

Hocheffiziente Heißgas- und Abwärmenutzung in Luft-/Wasser- wärmepumpen für Plus Energie Gebäude und Quartiere (CHALLENGE)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 33/2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

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

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

Leitung (interimistisch): DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

B. Windholz, A. Dahash, G. Klein, M. Lauermann, J. Emhofer, S. Both, S. Beier, Chr. Reichl,
T. Barz (AIT Austrian Institute of Technology GmbH)

Stephan Preisinger, Raimund Zitzenbacher (OCHSNER Wärmepumpen GmbH)

Birgo Nitsch (AKG Verwaltungsgesellschaft mbH)

Michael Gratz, Werner Pink

Wien, 2026. Stand: Oktober 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

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

Rechtlicher Hinweis

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

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

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

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

Vorbemerkung

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

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

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract.....	9
3	Ausgangslage.....	11
	3.1. Stand der Technik / Stand des Wissens	12
	3.1.1. Derzeit am Markt verfügbare Systeme und relevante Produkte	12
	3.1.2. Stand des Wissens im nationalen Innovationssystem.....	13
	3.1.3. Stand des Wissens auf europäischer und internationaler Ebene.....	14
4	Projekthalt.....	16
5	Ergebnisse	18
	5.1. CHALLENGE Kältekreislauf zur Kühlung	18
	5.2. Funktionsmuster RPW-HEX.....	19
	5.3. Funktionsmuster Kältekreis	22
	5.4. Regelungsstrategien Gesamtsystem.....	25
	5.4.1. Luft/Wasser-Wärmepumpe.....	25
	5.4.2. Gebäudenetz – Wasserkreis	29
	5.4.3. Regelstrategien.....	29
	5.5. Techno-ökonomisch-ökologische Analyse.....	32
	5.5.1. Vergleichssysteme	32
	5.5.2. Ergebnisse.....	33
6	Schlussfolgerungen	35
7	Ausblick und Empfehlungen	37
8	Verzeichnisse.....	38
9	Anhang.....	41
	9.1. Data Management Plan (DMP).....	41

1 Kurzfassung

Herkömmliche Luft-Wasser-Wärmepumpensysteme werden in großvolumigen Plus-Energie-Gebäuden und -Quartieren kaum zur Wärme-, Kälte- und Warmwasserbereitung eingesetzt, da sie weniger effizient und lauter als Sole- & Wasser Wärmepumpen sind, sowie zur Bildung lokaler Hitzeinseln im Sommer beitragen.

Am Weg zu urbanen Plus-Energie-Quartieren ist es notwendig, erneuerbare Energiequellen ressourcenschonend, effizient und emissionsfrei vor Ort zu nutzen und die gebäudetechnischen Systeme so energieeffizient wie möglich auszulegen. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit den aktuell zur Deckung des Raumwärme-, Kühl- & Warmwasserbedarfs im großvolumigen Niedrig und Plus Energie Wohnbau eingesetzten Kombisystemen aus PV-Modulen, Wärmepumpen und diversen Energiespeichertechnologien, die Effizienzvorgaben für Niedrigstenergiegebäude (nZEB - nearly zero-energy building) nur erfüllt werden können, wenn die Gebäude höchste energetische Standards aufweisen und zudem die WP-Technologie hocheffizient arbeitet.

Großvolumige Bauvorhaben in dicht besiedelten urbanen Quartieren, wie sie im Zuge der Stadt der Zukunft verstärkt notwendig sind, weisen Charakteristika auf, welche die Erfüllung der Effizienzkriterien von Plus-Energie-Gebäuden mit Stand-der-Technik Lösungen erschweren bzw. unmöglich machen. Neben begrenzten PV-Flächen können mangels geeigneter alternativer Wärmequellen nur Luft/Wasser-Wärmepumpen in großer Zahl eingesetzt werden. Diese sind oft weniger energieeffizient als Sole- und Wasser-Wärmepumpen, emittieren zudem im Betrieb störenden Schall und bilden lokale Hitzeinseln.

CHALLENGE zielte daher darauf ab, das im H2020 Projekt HYBUILD vom Konsortium entwickelte Konzept einer Luft/Wasser-Wärmepumpen-Systemkombination durch Innovationen so weiterzuentwickeln, dass sie ohne die genannten nachteiligen Effekte in dicht bebauten, urbanen Gebieten in großvolumigen Plus-Energie Gebäuden bzw. Quartieren als Heiz, Kühl- & System zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden ein in den Kältekreis integrierter Latentspeicher/Wärmeübertrager, der Kältekreis, und die Außeneinheit der Wärmepumpe komplett neu designt. Zudem wurde eine robuste und praxisnahe Gesamtsystemregelung entwickelt, die auf den neuen Kältekreis abgestimmt ist und die einzelnen Wohnungen optimal einbindet. Dazu wurden numerische Simulationen und experimentelle Messungen auf den verschiedenen Ebenen durchgeführt. Basierend auf Jahressimulationen wurden schlussendlich Jahresenergieverbrauch und Wirtschaftlichkeit des Konzepts berechnet und bewertet. Die Funktion des Konzepts wurde mit einem Funktionsmuster des Gesamtsystems im Labormaßstab nachgewiesen.

Die wichtigste Erkenntnis aus den umfangreichen Arbeiten im CHALLENGE-Projekt ist die Bestätigung, dass die sowohl die RPW-HEX-Speicher als auch die darauf aufbauend entwickelte Kältekreis-Konfiguration funktionieren. Das angestrebte Ziel, über ein Betriebsjahr mind. 10% an elektrischer Energie einzusparen, wurde mithilfe von Simulationsrechnungen nachgewiesen; die Einsparung an elektrischer Energie im Vergleich zur baugleichen Wärmepumpe beträgt sogar 38%. Die gesammelten Erfahrungen und unerwarteten Probleme hinsichtlich Design und Umsetzung der

Funktionsmuster haben das Know-how aller Partner deutlich erhöht, diese Erfahrungen bringen den Unternehmen einen deutlichen Wissensvorsprung im Vergleich zu Mitbewerbern.

Das Know-how hinsichtlich Modellierung/Simulation (insbesondere in Form der nun vorliegenden Modelle) und Experimenten von/mit Latentspeichern/Wärmeübertragern und deren Kombination mit Kompressionswärmepumpen auf Komponenten- (Kältekreis) und Systemebene (hier insbesondere Regelungskonzepte) wurde stark ausgebaut und die internationale Sichtbarkeit wurde weiter erhöht. Das erarbeitete Wissen wird definitiv in weitere F&E-Projekte einfließen, ebenso wie das gewonnene Know-how hinsichtlich Optimierung von Kältekreisen, Komponentenauswahl sowie Regelungstechnik (insbesondere das Zusammenspiel einer zentralen Wärmepumpe mit dezentralen, in den Wohnungen eingesetzten dezentralen Speicher für die Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung in den Wohnungen) in die wirtschaftlichen Tätigkeiten der Industriepartner einfließen werden.

Abgesehen von der in weiterer Folge möglichen direkten Vermarktung von Wärmepumpen und Speichern an v.a. Endkunden, sind Zielgruppen für die Verwertung v.a. des Know-how und der wissenschaftlichen Methoden (1D- und CFD-Modellierung sowie Laborexperimente auf Komponenten- und Systemebene) Industrieunternehmen wie beispielsweise Speicher und Wärmepumpenhersteller, die Kältekreis-konzepte und Komponenten dafür entwickeln und optimieren können.

Trotz der umfangreichen Modellierungsarbeiten in CHALLENGE gibt es hinsichtlich der Latentspeicher/Wärmeübertrager weiteren Forschungsbedarf, v.a. Erhöhung der Speicherdichte und Leistungssteigerung. Zur Integration des in CHALLENGE erarbeiteten Wissens in das Produktportfolio eines Speicherherstellers wie AKG sollte ein mögliches Folgeprojekt jedenfalls die Konzepterstellung für weitere Speicher (insbesondere weitere unterschiedliche Geometrie-Strukturen) sowie die Validierung mit Experimenten umfassen.

Ein großer Fokus sollte künftig auch auf der Adaptierung des Konzepts auf zukunftsicherere Kältemittel wie bspw. Propan gelegt werden. Aufsetzend auf die bereits gewonnenen Erkenntnisse sollte einer etwaigen Laboranlage eine Demonstration folgen, bei der auch das innovative Gesamtregelungskonzept angewendet werden kann, um sommerliche Hitzeinseln und Lärmemissionen durch sparsamen Betrieb des Wärmepumpen-Außengeräts hintanzuhalten. Eine nicht-technische Herausforderung dabei ist sicherlich die nötige Überzeugungsarbeit bei etwaig gemischten Eigentumsverhältnissen in Plus-Energie-Gebäuden und Quartieren, gemeinsam in dieses nachhaltige und innovative Energiekonzept zu investieren. Die Überzeugungsarbeit ist umso nötiger, zumal das oftmalige Hauptkriterium, die Gestehungskosten für Raumwärme/-kühlung und Warmwasserbereitung, unter Vernachlässigung von CO₂-Emissionssteuern noch nicht unter jenen der Referenzsysteme liegen - ungeachtet aller Vorteile, die das CHALLENGE-Konzept ggb. den Referenzsystemen bietet, insbesondere Energieeffizienz, minimale CO₂-Emissionen, mäßiger Platzbedarf, geringste Schallemissionen sowie Vermeidung von Hitzeinseln – eine ganzheitlich optimierte, hoch-effiziente technische Lösung zur Bereitstellung von Heizung, Kühlung und Warmwasser in dicht besiedelten urbanen Gebieten

2 Abstract

State-of-the-art air-to-water heat pumps systems are hardly ever used for heating, cooling and hot water in large-volume plus-energy buildings and quarters, as they are less efficient and noisier than brine-water heat pumps, and contribute to the formation of local heat islands in summer.

On the way to urban plus energy buildings/quarters, renewable energy sources are to be used in a resource-efficient and emission-free way on site and the building systems are to be designed as energy-efficient as possible. Studies have shown, that the combined systems of PV modules, heat pumps and various energy storage technologies currently used to cover space heating, cooling and domestic hot water requirements in large nZEB (nearly zero-energy building) and plus energy buildings have to be highly efficient. Furthermore, the buildings have to meet highest energy standards to comply with the efficiency criteria for nZEB.

Large-volume buildings in densely populated urban quarters will become increasingly important in the "city of the future". However, they show characteristics that make it difficult or impossible to meet the efficiency criteria of Plus Energy buildings with state-of-the-art heating and cooling solutions. In addition to limited areas for the utilization of electrical energy from PV, only air-to-water heat pumps can be used in large numbers due to lack of suitable other heat sources. These are often less energy efficient, emit disturbing noise during operation and create local heat islands.

Therefore, CHALLENGE aimed to further develop the concept of an air/water heat pump system developed by the consortium in the H2020 project HYBUILD. Various innovations should make sure, that it can be used as heating, cooling and domestic hot water system in densely populated urban areas in large-volume plus-energy buildings or quarters without any negative effects in future.

To achieve this goal, a latent storage/heat exchanger integrated into the refrigeration circuit, the refrigeration circuit itself, and the heat pump's outdoor unit were completely redesigned. In addition, a robust and practical overall system control was developed that is tailored to the new refrigeration circuit and optimally integrates the individual apartments. Numerical simulations and experimental measurements were carried out at various levels. Based on annual simulations, the annual energy consumption and economic efficiency of the concept were finally calculated and evaluated. The functionality of the concept was demonstrated with a functional model of the entire system on a laboratory scale.

The most important finding from the extensive work carried out in the CHALLENGE project is the confirmation that both the RPW-HEX storage and the refrigeration circuit configuration developed on this basis work. The target of saving at least 10% of electrical energy over one year of operation was verified using simulation calculations; the savings in electrical energy compared to an identical heat pump are as high as 38%. The experience gained and unexpected problems encountered in the design and implementation of the functional models have significantly increased the know-how of all partners, giving the companies a clear knowledge advantage over their competitors.

The know-how regarding modeling/simulation (especially in the form of the models now available) and experiments with latent heat storage systems and their combination with compression heat pumps at the component (refrigeration circuit) and system level (in particular control concepts) has

been greatly expanded and international visibility has been further increased. The knowledge gained will definitely be incorporated into further R&D projects, as will the expertise gained in optimizing refrigeration circuits, component selection, and control technology (in particular the interaction of a central heat pump with decentralized storage units used in apartments for heating, cooling, and hot water supply in the apartments). will be incorporated into the economic activities of the industrial partners.

Apart from the subsequent direct marketing of heat pumps and storage systems, primarily to end customers, the target groups for the exploitation of the know-how and scientific methods (1D and CFD modeling as well as laboratory experiments at component and system level) are industrial companies such as storage and heat pump manufacturers who can develop and optimize refrigeration circuit concepts and components for these.

Despite the extensive modeling work carried out in CHALLENGE, further research is needed in the field of latent heat storage, particularly with regard to increasing storage density and improving performance. In order to integrate the knowledge gained in CHALLENGE into the product portfolio of a storage manufacturer such as AKG, a possible follow-up project should include the design of further storage systems (in particular with different geometric structures) and validation through experiments.

In the future, a major focus should also be placed on adapting the concept to more future-proof refrigerants such as propane. Based on the knowledge already gained, a laboratory prototype should be followed by a demonstration in which the innovative overall control concept can also be applied to prevent summer heat islands and noise emissions through economical operation of the heat pump outdoor unit. A non-technical challenge here is certainly the necessary persuasion work required in cases of mixed ownership in plus-energy buildings and districts to invest jointly in this sustainable and innovative energy concept. This persuasion is all the more necessary given that the main criterion, the levelized costs for space heating/cooling and hot water do not yet fall below those of the reference systems, at least as long as CO₂ emission taxes are neglected – despite all the advantages that the CHALLENGE concept offers over the reference systems, in particular energy efficiency, minimal CO₂ emissions, moderate space requirements, minimal noise emissions, and the avoidance of heat islands — a holistically optimized, highly efficient technical solution for providing heating, cooling, and hot water in densely populated urban areas.

3 Ausgangslage

Auf dem Weg zu Plus-Energie-Quartieren ist es notwendig vor Ort verfügbare erneuerbare Energiequellen ressourcenschonend, emissionsfrei und effizient zu nutzen und die gebäudetechnischen Systeme so energieeffizient wie möglich auszulegen.

Wie aus Erhebungen im Rahmen von IEA Projekten bekannt, können mit den marktverfügbaren Systemen die Effizienzvorgaben für sogenannte nearly Zero Energy Buildings (nZEB), die ab 2021 verpflichtend auch für den privaten Neubau gelten, falls überhaupt, nur dann erfüllt werden, wenn mehrgeschossige Gebäude höchste energetische Standards aufweisen und zudem die eingesetzte WP-Technologie hoch-effizient arbeitet.¹

Derzeit werden zur Deckung des Raumwärme-, Kühl- und WW-Bedarfs im großvolumigen Niedrig sowie Plus Energie Wohnbau meist Kombi-Systeme aus PV- oder Solarthermie-Modulen, Wärmepumpen und verschiedene Energiespeichertechnologien genutzt. Die am Markt verfügbaren, hoch-effizienten Systeme, die zumeist mittels 4-Leiter Technik ins Gebäude integriert sind, verwenden zumeist:

- Erd- und Wassergebundenen WP², die teilweise mit elektrischer Energie aus PV-Modulen betrieben werden;
- großvolumige, zentral betriebene, Pufferspeicher und
- Frischwassermodule, die dezentral oder zentral betrieben werden.

Großvolumige Bauvorhaben in dicht bebauten urbanen Quartieren weisen Charakteristika auf, welche die Erfüllung der nZEB-Effizienzkriterien mit den Stand-der-Technik Konzepten erschweren bzw. unmöglich machen. So verfügen hohe Geschosswohnbauten im Quartier nur über begrenzte Flächen zur Nutzbarmachung elektrischer Energie aus PV. Mangels geeigneter alternativer Wärmequellen können speziell im dicht besiedelten urbanen Raum/Stadtquartier, statt Sole-/Grundwasser-WP, nur L/W-WP in größerer Zahl eingesetzt werden. Diese sind in der Regel weniger energieeffizient; zudem emittiert das Außengerät im Betrieb Schall, was in den letzten Jahren insbesondere in heißen Sommernächten für negative Schlagzeilen gesorgt hat.^{3,4} Gefordert ist ein innovativer technologischer Ansatz, der trotz schwieriger Rahmenbedingungen, die Einhaltung der nZEB Effizienzkriterien im großvolumigen Wohn-/Quartiersbau gewährleistet bzw. übertrifft.

Im H2020 Projekt HYBUILD wurde ein auf einem neuartigen Speicherkonzept und einer L/W-WP aufbauendes, innovatives Heiz-/Kühl- & WW-Bereitstellungskonzept für mehrgeschossige Wohn-/Quartiersgebäude im Labormaßstab entwickelt und validiert. Dabei konnte ein jährliches Einsparungspotential von 5% an elektrischer Energie auf Gesamtsystemebene berechnet werden.

Zielsetzung: Das darauf basierende CHALLENGE Konzept ermöglicht durch weitere Innovationen eine jährliche Einsparung an elektrischer Energie von 10%. Zudem können lokale Hitzeinseln vermieden und Schallemissionen im Sommer reduziert bzw. gänzlich vermieden werden. Dabei sind folgende

¹ "Net Zero Energy Solar Buildings - SHC Position Paper", 2015, IEA SHC Task 40 and IEA EBC Annex 52, Online unter: <http://task40.iea-shc.org/>

² In "DC.TR1 Solution Sets and Net Zero Energy Buildings A review of 30 Net ZEBs case studies worldwide", 2014 (online unter: <http://task40.iea-shc.org/>), wurden 30 nZEBs beschrieben. Davon wurden 11 Gebäude ausschließlich mit Kompressions-WP-Systemen geheizt, davon waren 10 G/W oder E/W-WP-Systeme und nur eines ein L/W-WP-System.

³ Technologievergleich für nZEBs "D5.2 Guidelines on best practice addressed to several stakeholders and target groups", 2016, H2020-Projekts RePublic_ZEB (online: <http://www.republiczeb.org>): Für L/W-WP in nZEBs werden 4 Vorteile (unlimitierte Wärmequelle, geringere Installationskosten als bei G/W oder W/W-WP, emissionsfreier Betrieb, niedrige Wartungskosten) und 3 Nachteile (niedriger COP unterhalb von 7°C, geringere Effizienz im vergl. zu G/W und E/W-WP, Schallemissionen durch Außeneinheit) angeführt.

⁴ Biermayr et al., 2018, „Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2018“, Vorteile L/W-WP: Geringe Investitionskosten, Wärmequelle lässt sich leichter erschließen, Nachteile: Schallemissionen der Außengeräte.

wissenschaftlich/technische Forschungsfragestellungen auf Komponenten, Kältekreis-, Gesamtsystem- & Quartier-Ebene zu beantworten:

- Komponente Latentspeicher/Wärmeübertrager: Wie kann der Latentspeicher/Wärmeübertrager (RPW-HEX) mit fixen Randbedingungen exakt ausgelegt und optimiert werden?
- Kältekreis - L/W-WP: Wie wird sich das Kältemittel verteilen? Wie wird sichergestellt, dass ohne Kältemittelsammler immer ausreichend Kältemittel zur Verfügung steht?
- Gesamtsystem: Wie kann die L/W-WP und der RPW-HEX in das Gesamtsystem mit dezentralen WW-Speichern optimal integriert werden?
- Gebäude- bzw. Quartierebene: Wie groß ist das Energieeinsparungspotential?

3.1. Stand der Technik / Stand des Wissens

3.1.1. Derzeit am Markt verfügbare Systeme und relevante Produkte

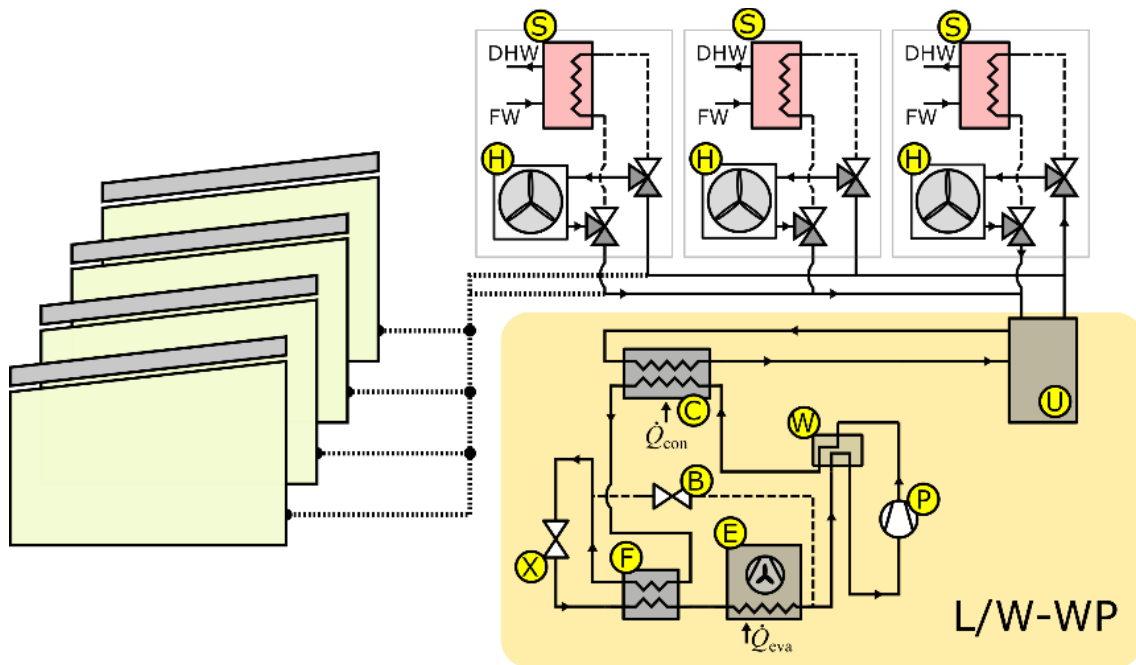
L/W-WP System (Referenzsystem)

Abbildung 1 zeigt ein vereinfachtes Schema eines modernen L/W-WP basierenden Heiz-, Kühl- und WW-System mit leistungsgeregelter WP und dezentralen WW-Speicher. Die WW-Speicher in den Wohnungen sind über 2-Leiter Technik mit dem Technikraum verbunden. Die WP ist leistungsgeregelt und über einen Pufferspeicher mit den einzelnen Wohnungen verbunden. Durch eine Kreislaufumkehr im Kältekreis der WP können im Sommer die Wohnungen gekühlt werden. In Abbildung 1 sind exemplarisch nur drei Wohnungen im Detail dargestellt. Genauso wie auch im CHALLENGE Konzept können auf Basis dieses Konzepts beliebig viele Wohnungen bzw. Gebäude versorgt werden. Ein ähnliches Konzept wurde von den Projektpartnern OCHSNER (L/W-WP vom Typ AIR 29 C12A ⁵) und PINK (dezentrale WW-Speicher vom Typ enerboxx^{®6}) 2018 in einer Wohnhausanlage in Mödling (NÖ) verbaut.

⁵ <https://www.ochsner.com/de-at/ochsner-produkte/air-29-c12a/>

⁶ <https://pink.co.at/enerboxx-allgemein/>

Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Referenz L/W-WP-Systems mit Pufferspeicher (U). (S) Dezentrale WW-Speicher, (H) Niedertemperatur Wärme-/Kälteabgabe (z.B.: Fußbodenheizung), (C) Kondensator der WP (W) Vier-Wege-Ventil, (B) Bypass Expansionsventil, (X) reguläres Expansionsventil, (F) Flüssigphase HEX, (E) Außeneinheit mit Verdampfer und Ventilator, (P) Kompressor. Quelle: Eigendarstellung



WP Systeme mit Heißgasnutzung für WW

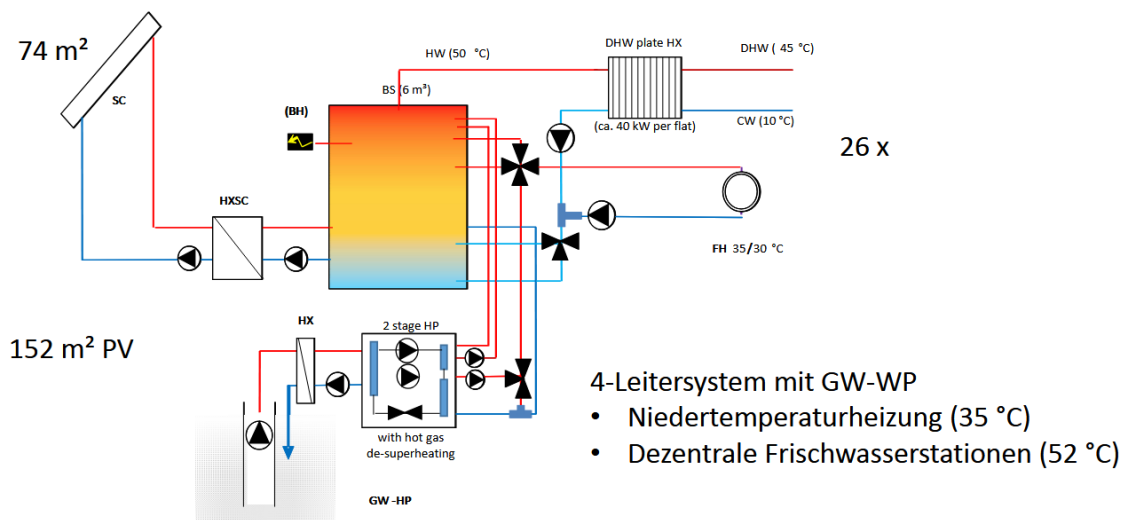
Es gibt mehrere WP Kombi-Systeme, welche sensible Energie aus Heißgas während der Heizperiode zur energieeffizienten WW-Bereitung verwenden. In einem der Systeme wird mit Hilfe eines Heißgaswärmeübertragers sensible Energie aus dem Heißgas in einen Wasser-Pufferspeicher, der wiederum über ein Frischwassermodul mit dem WW-System des Gebäudes verbunden ist, übertragen. In diesem Fall werden die einzelnen Wohnungen über ein 4-Leiter System eingebunden.

3.1.2. Stand des Wissens im nationalen Innovationsystem

Ein innovatives Konzept mit Nutzung des Heißgases einer Grundwasser/Wasser-WP (G/W-WP) wurde für ein „Passivhaus Plus“ im mehrgeschossigen Wohnbau in Innsbruck Vögelebichl umgesetzt.⁷ Wie in Abbildung 2 abgebildet, wird die sensible Wärme aus dem Heißgas mit Hilfe eines Wärmeübertragers und eines Sekundärkreises in den oberen Teil eines 6000 Liter Puffertanks einspeichert. Dieser versorgt über ein 4-Leiter System 26 Wohnungen (insg. 2149 m² Energiebezugsfläche verteilt auf zwei Gebäude) mit WW über dezentrale Frischwassermodule und mit Wärme für die Niedertemperaturheizung. Das Projekt wurde technisch gemonitort und man kam unter anderem zum Schluss, dass minimale Speicher- und Verteilverluste und eine hohe Effizienz der WP essentiell für die Erreichung des Plus-Energie-Standards im großvolumigen Wohnbau sind.

⁷ https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/events/20190131-tws-sdz/05_ochs_Plusenergie_PH_Innsbruck.pdf?m=1550672813&

Abbildung 2: Vereinfachtes Hydraulikschemata des nZEB Innsbruck Vögelebichl (NHT). Quelle: F. Ochs, Universität Innsbruck⁷



3.1.3. Stand des Wissens auf europäischer und internationaler Ebene

Wie aus dem europäischen Projekt **RePublic_ZEB**⁸, sowie aus IEA Projekten (**IEA SHC Task 40/EBC Annex 52**⁹, **IEA HPT Annex 49**¹⁰) bekannt, gibt es außer dem H2020 Projekt HYBUILD derzeit keinen vergleichbaren technologischen Ansatz zu CHALLENGE.

Im Rahmen von HYBUILD wurde von den Projektpartnern ein innovatives, energieeffizientes Heiz-, Kühl- und WW-System auf Konzeptebene entwickelt und im Labor validiert¹¹. Der **Kern des Konzepts** ist ein **latenter Speicher/Wärmeübertrager** (in Folge mit **RPW-HEX** abgekürzt (R, in Abbildung 3)), der in den Kältekreis einer mit dem Kältemittel R32 betriebenen L/W-WP integriert ist. Das Konzept und erste Potentialabschätzungen wurden erstmals beim ICR 2019 in Montreal vorgestellt¹². Abbildung 3 zeigt das Konzept exemplarisch für drei Wohnungen¹³. Während hohe Heißgastemperaturen in Standardanwendungen oft nachteilig sind, haben sie im HYBUILD-System den Vorteil, dass die hohe Temperaturdifferenzen zwischen Heißgas und Phasenwechseltemperatur im RPW-HEX mit einer hohen übertragenen Wärmeleistung einhergehen und deshalb von Vorteil sind. Die eingezeichneten Temperaturen stammen aus numerischen Simulationsrechnungen bei einem Ladezustand des RPW-HEX von 50%. Die Außentemperatur beträgt jeweils 0 °C.

⁸ „Refurbishment of the Public building stock towards nZEB“, online https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/link-files/intelligent_energy_europe_-_refurbishment_of_the_public_building_stock_towards_nzeb_-_2015-02-04.pdf

⁹ “Towards Net Zero Energy Solar Buildings“, online: <http://task40.iea-shc.org/>

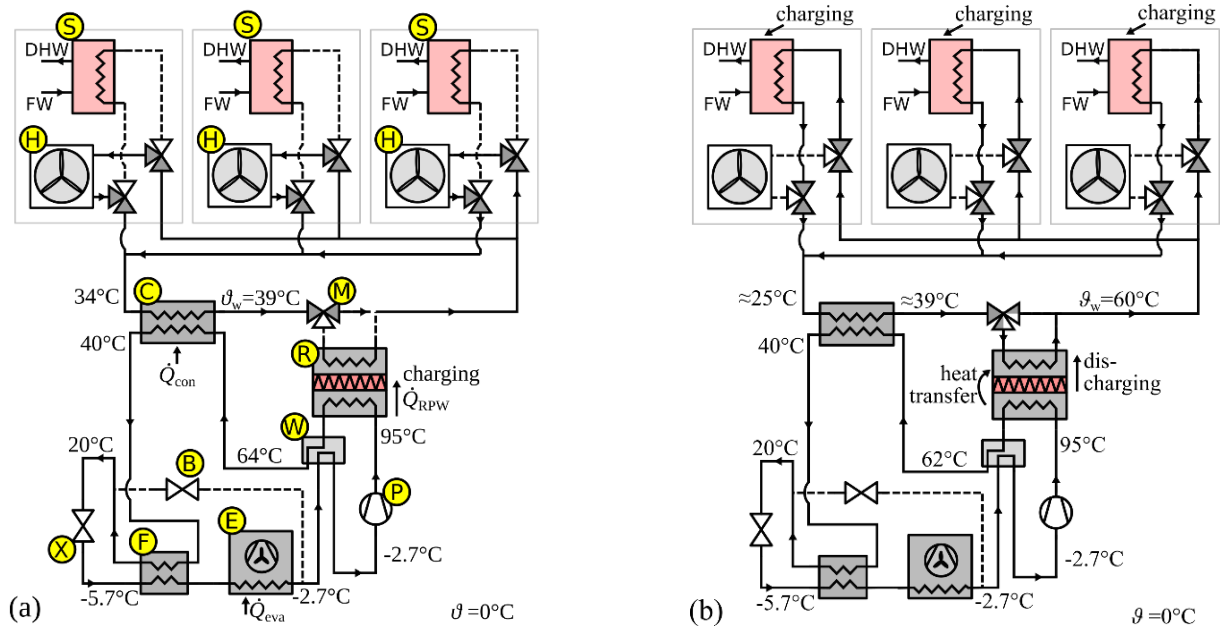
¹⁰ “Design and integration of heat pumps for nZEB“, online: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex49/>

¹¹ Das von den Projektpartnern in HYBUILD entwickelte Konzept ist eines von zwei Konzepten im Projekt und wird als Continental Concept bezeichnet. Im Folgenden wird aber der Einfachheit halber nur vom HYBUILD-Konzept gesprochen.

¹² Emhofer, J. et al., 2019. “Integration of a compact two fluid PCM heat exchanger into the hot superheated section of an air source heat pump cycle for optimized DHW generation“, 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, Canada, August 24–30, 2019, Manuscript ID: 645

¹³ Das Konzept ist beliebig skalierbar und kann damit nicht nur in großvolumigen Gebäuden, sondern auch in Gebäudeverbänden (Quartieren) eingesetzt werden.

Abbildung 3: Continental Concept aus HYBUILD, welches in CHALLENGE weiterentwickelt wird im Heizbetrieb (a) und im energieeffizienten Warmwasserbetrieb (b). (S) Dezentrale WW-Speicher, (H) Niedertemperatur Wärme-/Kälteabgabe (z.B.: Fußbodenheizung) (C) Kondensator der WP (R) RPW-HEX mit einem PCM mit einer Phasenwechseltemperatur von ca. 64 °C, (W) Vier-Wege-Ventil, (B) Bypass Expansionsventil, (X) reguläres Expansionsventil, (F) Flüssigphase HEX, (E) Außeneinheit mit Verdampfer und Ventilator, (P) Kompressor, (M) Drei-Wege-Ventil. Quelle: Eigendarstellung

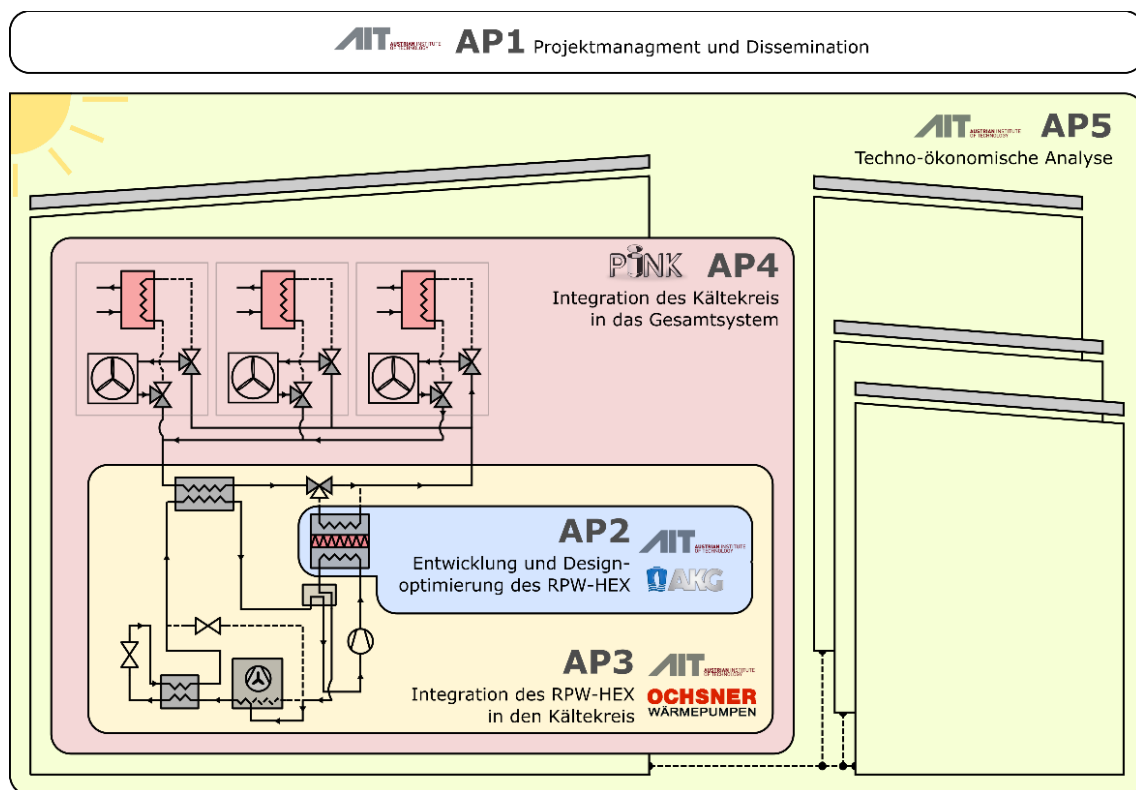


4 Projektinhalt

Neben Projektmanagement und Dissemination (AP1) war das Projekt in 4 weitere Arbeitspakete gegliedert, die zeitlich nacheinander bzw. teilweise parallel bearbeitet wurden zur Beantwortung von Forschungsfragen auf verschiedenen Ebenen, siehe Abbildung 4:

- Komponente (RPW-HEX) (AP2)
- Kältekreis der L/W-WP (AP3)
- Gesamtsystemebene (AP4)
- Gebäude- und Quartierebene (AP5)

Abbildung 4: Die Struktur der Arbeitspakete von CHALLENGE im Kontext zum Projektinhalt. Eigendarstellung



In AP2 „Entwicklung und Design-Optimierung des RPW-HEX“ wurden einzelne Passagen des Wärmeübertragers, die Wärmeübergänge sowie der Phasenwechsels im PCM modelliert und numerisch simuliert, um einerseits den RPW-HEX gezielt technisch auslegen zu können, bzw. um ihn in den Kältekreisimulationen richtig integrieren zu können. Die dynamischen Modelle wurden anhand verschiedener Teilfunktionsmuster experimentell im AIT-Labor validiert.

In AP3 „Integration des RPW-HEX in den Kältekreis“ wurde ein dynamisches Kältekreismodell mit integriertem RPW-HEX erstellt und der Kältekreis ausgelegt (Heizleistung ca. 10 kW). Funktionsmuster der Speichereinheit, die aus RPW-HEX-Funktionsmustern besteht, sowie vom daran angepassten Kältekreis (Innen- und Außeneinheit) wurden von AKG und OCHSNER gefertigt und in den Klimakammern des AIT in Betrieb genommen und in verschiedenen Betriebsmodi getestet.

In AP4 „Integration des Kältekreises in das Gesamtsystem“ wurde das hydraulische Konzept für das CHALLENGE Gesamtsystem ausgelegt und dafür ein praxisnaher Gesamtsystemregler entwickelt, der den Ladezustand der dezentralen Warmwasserspeicher und die Raumtemperatur überwacht und das Gesamtsystem in die entsprechenden Betriebsmodi setzt. Die Auswahl der Betriebsmodi geschah durch einfache und robuste Regeln, die aus energetischen Betrachtungen von den Simulationsrechnungen aus AP3 und AP5 abgeleitet wurden. Die Funktionsmuster aus AP3 wurden bei PINK in ein Gesamtsystem im Labormaßstab mit dezentralen Warmwasserspeichern integriert, in Betrieb genommen und experimentell getestet.

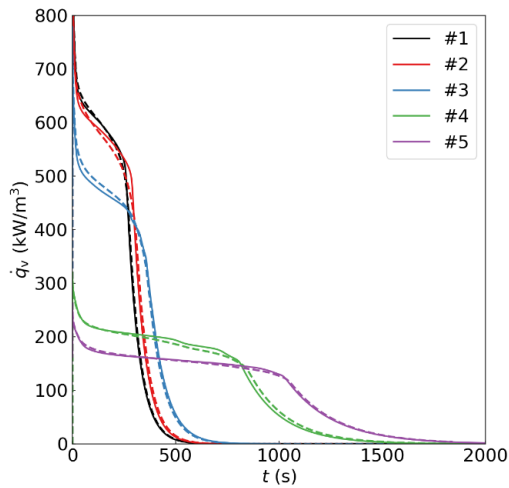
In AP5 „Techno-ökonomische Analyse“ wurden mithilfe numerischer Simulationsrechnungen und Kostenabschätzungen durch die Industriepartner die Wirtschaftlichkeit sowie das Energie- und Emissionseinsparungspotential des CHALLENGE Konzepts berechnet.

CHALLENGE ermöglicht jedoch die optimierte Betriebsweise des HYBUILD Konzepts im Sommer, sodass es als Heiz-, Kühl- & System zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden kann, siehe Abbildung 5. Durch den RPW-HEX steht dem CHALLENGE System jedoch ein weiterer Wärmeübertrager/Speicher zur Verfügung, in dem das Kältemittel kondensieren kann. Nachdem das Kältemittel den Kompressor (P, Abbildung 5) verlassen hat, wird es sensibel abgekühlt bis es schlussendlich im RPW-HEX (R) kondensiert. Dabei wird Wärme \dot{Q}_{RPW} in den RPW-HEX größtenteils latent in das PCM eingespeichert, um sie zu einem späteren Zeitpunkt zu den dezentralen WW-Speichern (S) zu bringen. Das flüssige Kältemittel wird danach über einen Teil des Außengerätes (E) geführt und wird dadurch weiter unter der Abgabe von Abwärme an die Umgebung (\dot{Q}_{waste}) unterkühlt. Die Unterkühlung mit Hilfe des vorhandenen Außengerätes ist essentiell für die Performance des Kreislaufs. Das unterkühlte flüssige Kältemittel wird über das Expansionsventil (X) entspannt und am „Winter-Kondensator bzw. Sommer Verdampfer“ (C) verdampft. Dabei wird Wärme \dot{Q}_{con} aus dem Prozesswasser entzogen, welches das Gebäude kühlt. Über das Vier-Wege-Ventil (W) kommt das Kältemittel wieder zurück zum Kompressor (P). Der Ventilator im Außengerät kann dabei herunter geregelt werden, um Schallemissionen zu verringern.

5.2. Funktionsmuster RPW-HEX

Es numerische Modelle entwickelt zur Auslegung des RPW-HEX entwickelt, die sowohl mit CFD als auch mit Experimenten validiert wurden. Für die CFD-Vergleiche wurden 10 verschiedene Geometrien erstellt. In Abbildung 6 ist beispielhaft der Wärmetransport pro Speichervolumen für Varianten die #1 bis #5 während der Beladung (Aufschmelzen des PCMs) dargestellt. Der Aluminiumanteil wird von Variante #1 bis Variante #5 immer weiter verringert, was sich negativ auf den maximalen Wärmetransport aber positiv auf die Materialkosten auswirkt. Das Diagramm zeigt, dass das Verhalten mit den schnellen 1D-Modellen sehr gut wiedergegeben werden kann, wodurch eine genaue Auslegung in Originalbaugröße möglich wurde.

Abbildung 6: Validierung der detaillierten RPW-HEX Auslegungsmodelle. Für fünf verschiedene Geometrien (#1 bis #5) wurde der Wärmetransport in einen Teil des Speichers mit CFD (strichlierte) und mit reduzierten 1D-Modellen in Modelica (durchgezogene Linie) berechnet. Quelle: AIT.



In einem iterativen Prozess mit allen Projektpartnern wurden die einzelnen RPW-HEX Module mithilfe der 1D-Modelle und einer Vielzahl an Simulationen ausgelegt, in denen die Geometrien variiert wurden. Von AKG wurde ein RPW-HEX Funktionsmuster aus Aluminium gebaut und experimentell untersucht. Zur Charakterisierung des Phasenübergangs und der Wärmeübertragung des Latentwärmespeichers wurde er an eine Labor-Wärmepumpe angeschlossen. Abbildung 7 zeigt ein Schema (links) und die tatsächliche Ausführung (rechts) des RPW-HEX, in dessen Inneren sich die Lamellen- und Mikrokanalstruktur befindet, um für beste Wärmeübertragung die Oberfläche zu maximieren. Abbildung 8 zeigt den Teststand für die Laborexperimente am RPW-HEX-Funktionsmuster.

Abbildung 7: Links: Schematische Struktur des RPW-HEX mit Wasser- und Kältemittel-Ein- und -auslass. Quelle: Eigendarstellung. Rechts: RPW-HEX aus Aluminium, von außen ohne Wärmedämmung. Quelle: AIT

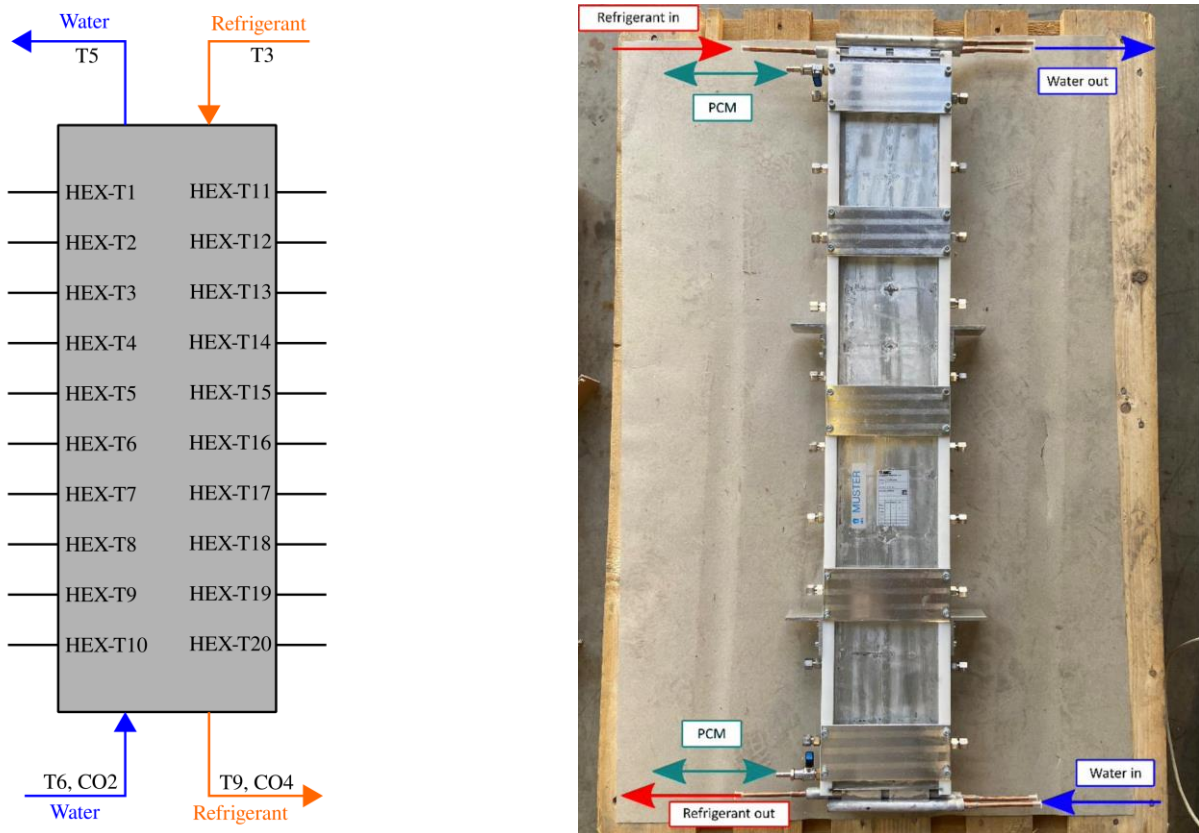
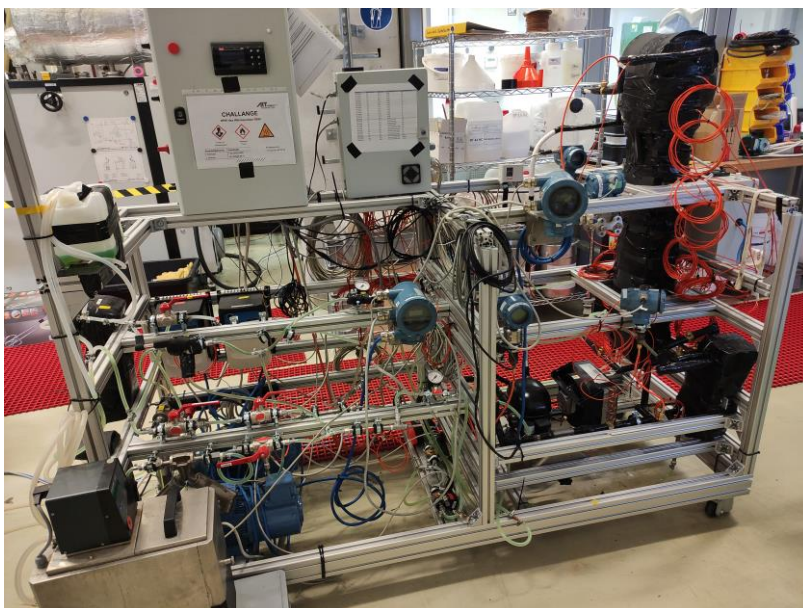


Abbildung 8: RPW-HEX-Teststand am AIT. Ganz rechts im Bild: Wärmegedämmter (schwarz) RPW-HEX mit den Kabeln der Temperaturfühler (orange). Quelle: AIT



Die Experimente wurden mit CFD-Simulationsergebnissen verglichen und ermöglichten die Abfassung einer Journal Publikation.

Reichl, C., Both, S., Mascherbauer, P., & Emhofer, J. (2022). Comparison of Two CFD Approaches Using Constant and Temperature Dependent Heat Capacities during the Phase Transition in PCMs with Experimental and Analytical Results. *Processes*, 10(302), 25.

<https://doi.org/10.3390/pr10020302>

Die Modellierung von Phasenwechselmaterialien (PCMs) war in der Vergangenheit ein Thema von Forschungsinteresse, das experimentell und mittels numerischer Strömungsmechanik (CFD) untersucht wurde. Das in Ansys Fluent implementierte Erstarrungs- und Schmelzmodell (SM) auf Basis der Enthalpie-Porositäts-Formulierung ist in der Literatur weit verbreitet. Nach Kenntnis der Autoren gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die die Methode der scheinbaren Wärmekapazität (engl.: apparent heat capacity; AHC) in Ansys Fluent anwenden, und noch weniger, die beide Methoden diskutieren. Der SM-Ansatz wendet eine lineare Beziehung der Flüssigkeitsfraktion zwischen Solidus- und Liquidustemperatur an, obwohl bekannt ist, dass die Phasenübergänge einem nichtlinearen Verhalten folgen, das mit der AHC-Methode als Kurvenform und Lage der spezifischen Wärmekapazität erfasst werden kann, die Informationen über die Art des Phasenübergangsverhaltens enthält. Wichtige Faktoren bei der Modellierung sind die temperaturabhängigen thermophysikalischen Materialeigenschaften Dichte, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit. Sie werden oft in der jeweiligen Phase (fest oder flüssig) als konstant mit einem (linearen) Übergang über den Schmelzbereich angenommen. Die temperaturabhängige Dichte wurde durch Verwendung der Boussinesq-Näherung zur Modellierung der konvektiven Wärmeübertragung berücksichtigt. SM und AHC wurden mit der analytischen Lösung des zweiphasigen Stefan-Problems verglichen. Da diese die Schwerkraft und damit das natürliche Konvektionsverhalten nicht berücksichtigt, wurde ein zusätzlicher Vergleich mit zwei verschiedenen PCMs, einem aus der Literatur und einem zweiten Datensatz aus einem neuen Experiment, durchgeführt. Sowohl der SM- als auch der AHC-Modellansatz wurden mit dem analytischen Ergebnis des zweiphasigen Stefan-Problems verglichen. Beide Modelle zeigten nur geringe Abweichungen (<2%), wobei eine etwas höhere Abweichung für AHC auf die asymmetrische Wärmekapazitätskurve zurückzuführen ist, die zu einer nichtlinearen Phasenänderung führt, die im zweiphasigen Stefan-Problem nicht berücksichtigt ist.

5.3. Funktionsmuster Kältekreis

Es wurde ein Funktionsmuster des CHALLENGE-Konzepts entwickelt und gefertigt. Diese Funktionsmuster wurde in den Klimakammern (Innenkammer + Außenkammer) des AIT in Wien aufgebaut und mit Kältemittel R32 befüllt. Das Funktionsmuster bestand aus drei Einheiten: Inneneinheit, Speichereinheit und Außeneinheit. Zusätzlich musste ein Zwischenkreis eingebaut werden, damit das Glycarr, das für den Korrosionsschutz des Aluminium-RPW-HEX notwendig war, nicht in den Wasserkreislauf des Prüfstandsystems gelangen konnte. Abbildung 9 zeigt die Komponenten des CHALLENGE-Kältekreises in den Klimakammern des AIT samt Instrumentierung und Verbindungsleitungen.

Abbildung 9: CHALLENGE- Funktionsmuster in den Klimakammern des AIT-Labors. Links: Inneneinheit. Mitte: Speichereinheit. Rechts: Außeneinheit. Quelle: AIT

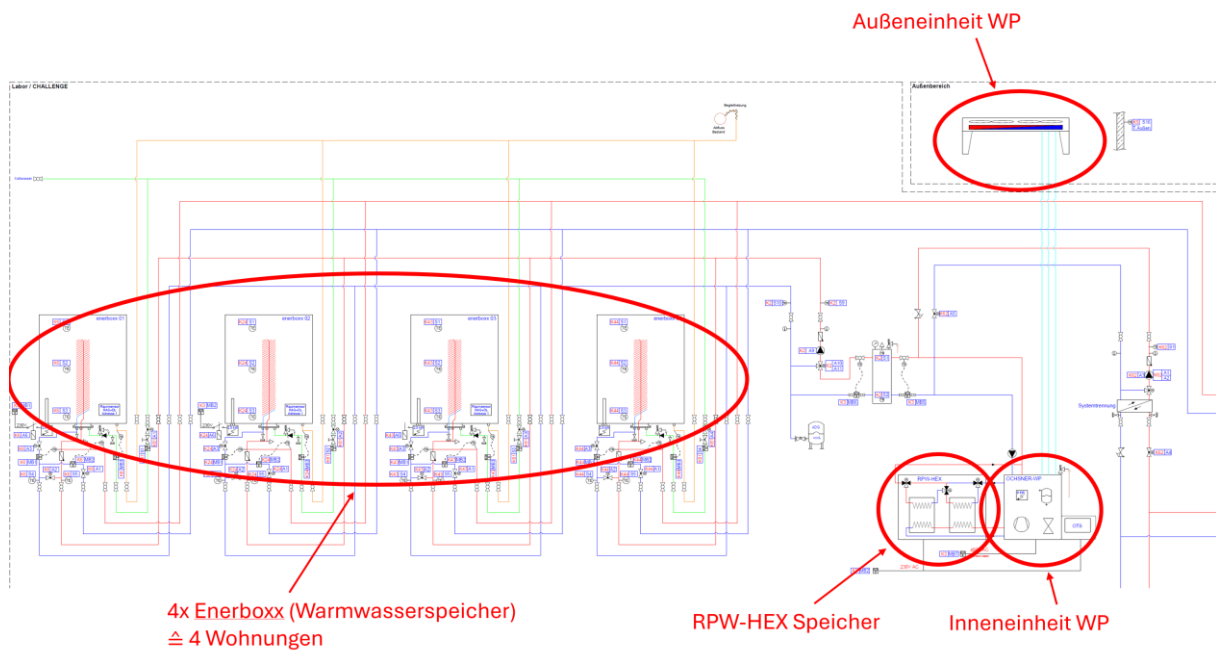


Im Anschluss an die Messungen am AIT wurde das System für die Untersuchungen zum Projektpartner PINK nach Langenwang transportiert. Dort wurde die Wärmepumpe in die bestehende Laborinfrastruktur integriert und hydraulisch angeschlossen. Abbildung 10 zeigt die Aufstellung des CHALLENGE Gesamtsystems bei PINK. Der detaillierte Hydraulik- und Messtellenplan für diesen Aufbau ist in Abbildung 11 dargestellt, der auch die 4 Enerboxes beinhaltet, die 4 Wohnungen emulierten.

Abbildung 10: CHALLENGE Gesamtsystem bei PINK. Links: Inneneinheit und RPW-HEX Speicher. Rechts: Außeneinheit. Quelle: PINK



Abbildung 11: Hydraulik- und Messtellenplan für das CHALLENGE-Gesamtsystem bei PINK. Quelle: PINK



Die Funktion des Kältekreis wurde in den Klimakammern des AIT getestet, bei PINK das Gesamtsystem in praxisnaher Umgebung gemeinsam mit dezentralen Warmwasserspeichern. Sowohl

im Heizbetrieb als auch im Kühlbetrieb konnte das Laden und Entladen des RPW-HEX Speichers erfolgreich demonstriert werden.

Im Rahmen der Experimente wurden mehrere technische Herausforderungen identifiziert. Teilweise konnten direkt im Projekt Lösungen gefunden und umgesetzt werden, teilweise wurden Themen als Learning für mögliche Folgeprojekte oder kommende Produktentwicklungen mitgenommen.

5.4. Regelungsstrategien Gesamtsystem

5.4.1. Luft/Wasser-Wärmepumpe

Die zentrale L/W-WP besteht aus Außen- und Innengeräten, Kompressor, Expansionsventil und zusätzlichen Elementen wie einem Ölabscheider sowie hydraulischen Komponenten, einschließlich Ventilen und Rohren, siehe Abbildung 12 und Abbildung 13. Sie hat eine Nennheizleistung von 10 kW. Um die Leistung zu optimieren und betriebliche Einschränkungen zu berücksichtigen, wurde eine Regelstrategie für den Kältekreislauf entwickelt, die auch Injektionsventile am Kompressor nutzt. Um sicherzustellen, dass das Kältemittel am Eingang des Expansionsventils flüssig bleibt, wurde ein interner Wärmeübertrager (engl.: internal heat exchanger; IHX) hinzugefügt, der das Kältemittel vor dem Expansionsventil unterkühlt. Zusätzlich wurde die Außenluftzirkulation mit einem Lüfter verbessert, um den Wärmetransfer zu erhöhen.

Zur Erweiterung des L/W-WP-Systems wurden zwei Kältemittel-PCM-Wasser-Wärmeübertrager (engl.: Refrigerant-PCM-Water heat exchanger; RPW-HEX) und ein Vier-Wege-Ventil (4-WV) integriert. Ein Teil der RPW-HEXs liefert Temperaturen unter 54°C für die Vorwärm- und Grundladungsphasen, während der andere Teil Temperaturen über 55°C für die Aufladung auf höhere Temperaturen übernimmt. Der Betrieb erfolgt analog zu einem Enthitzer und soll die Leistungszahl (COP) der L/W-WP verbessern.

Es ist entscheidend, zwischen der wasserseitigen Kondensatoraustrittstemperatur (relevant für die Raumheizung; engl.: space heating; SH) und der L/W-WP-Austrittstemperatur aus dem RPW-HEX (die der WW-Erzeugung gewidmet ist) zu unterscheiden. Ein 4-WV ermöglicht den Umschaltvorgang zwischen Heiz- und Abtauen-/Kühlbetrieb innerhalb des Kältekreislaufs.

Heizbetrieb

Während des Heizbetriebs funktioniert die L/W-WP als Heizsystem, wobei das Innengerät als Kondensator und die Außeneinheit als Verdampfer fungiert. Die L/W-WP verwendet das Kältemittel R32, das durch einen Rotationskompressor (P) komprimiert wird, was zu einem heißen Gaszustand am Verdichteraustritt führt, siehe Abbildung 12.

Wenn die RPW-HEX-Module (D) aufgeladen werden, lädt sie das Heißgas aus dem Kompressor über die manuellen Ventile (B1 und B2) und umgeht die Module über das Ventil (B3), sobald sie vollständig aufgeladen sind. Im RPW-HEX gibt das Heißgas seine sensible Energie ab und speichert sie als sensible und latente Wärme. Das Kältemittel verlässt den RPW-HEX mit einer geringeren Temperatur, passiert das 4-WV und fließt zum Kondensator (C). Hier gibt es die verbleibende sensible und latente Energie an das gegenläufig strömende Wasser ab, was zur Kondensation führt.

Um das Kältemittel am Eingang des Expansionsventils (X) in flüssigem Zustand zu halten, wird es durch das aus dem Expansionsventils ausströmenden Kältemittels mithilfe eines internen Wärmeübertragers (IHX) gekühlt. Nach dem Passieren des Expansionsventils wird das Kältemittel leicht durch den IHX erwärmt, bevor es die Außeneinheit (Verdampfer, E) erreicht, wo es verdampft und überhitzt wird, bevor es über das 4-WV zum Kompressor zurückkehrt (siehe Abbildung 12).

Um einen sicheren Betrieb mit einer Verdichterausgangstemperatur unter 110°C zu gewährleisten, wird ein Flüssigkeitseinspritzventil (Z1) verwendet, das von einem PI-Regler gesteuert wird. Wenn die Temperatur 110°C überschreitet, öffnet das Spritzventil (Z1), sodass kälteres Gas vom Hochdruckseitengang zur Niederdruckseite (Verdichtereintritt) umgeleitet wird, was einen sicheren und effizienten Betrieb der L/W-WP gewährleistet.

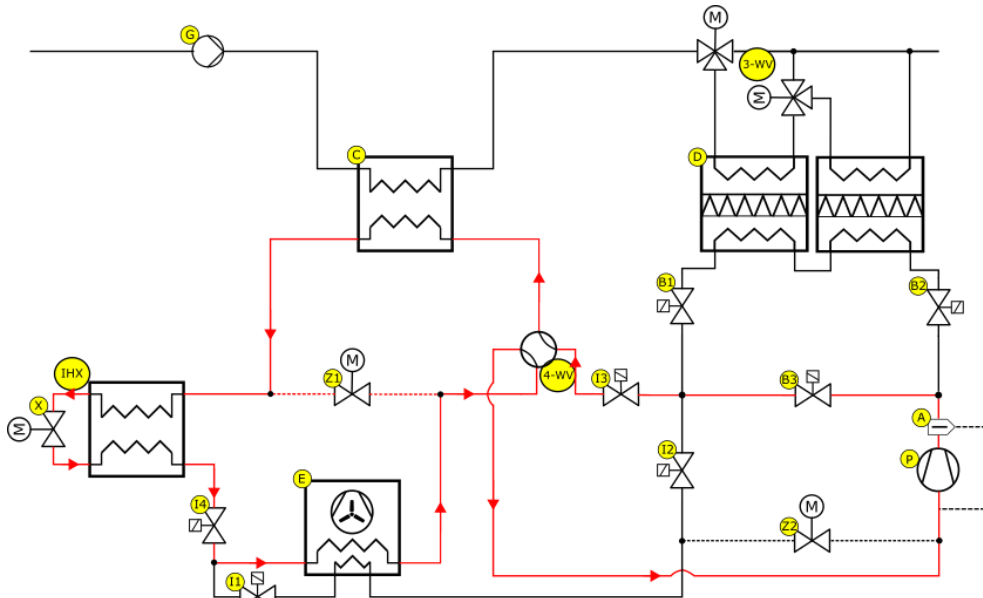
Kühlbetrieb

Im umgekehrten Betrieb der L/W-WP, der durch das 4-WV ermöglicht wird, wird der Kältekreis angepasst, siehe Abbildung 13.

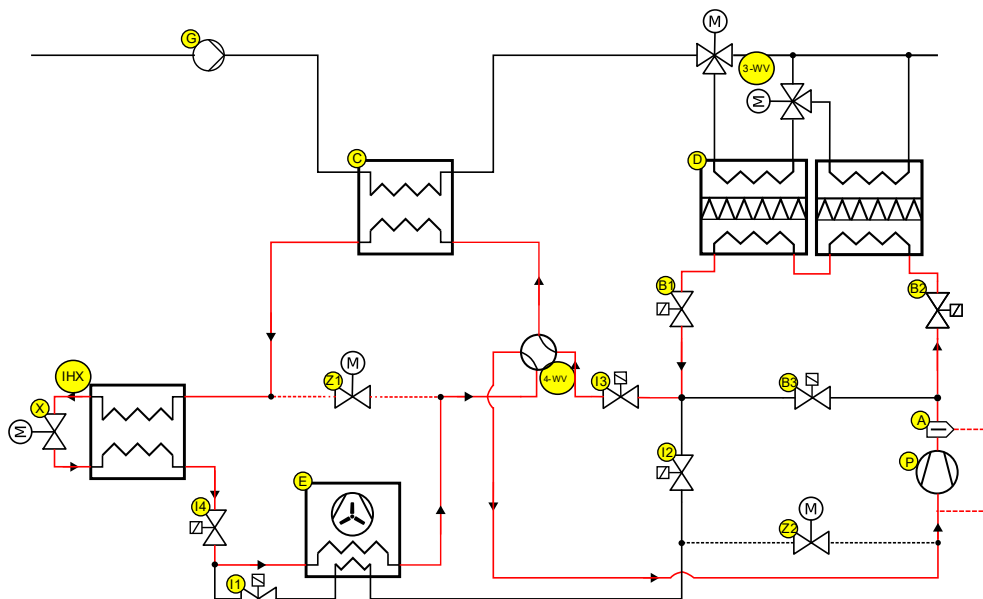
Zunächst wird das Kältemittel R32 durch den Kompressor (P) in einen heißen Gaszustand komprimiert. Wenn die RPW-HEX-Module aufgeladen sind, umgeht das Heißgas die Module über das Bypass-Ventil (B3) und das 4-WV und gelangt zum Außengerät – das nun als Kondensator fungiert. Hier wird das Kältemittel mithilfe des IHX weiter gekühlt, um sicherzustellen, dass es in einem flüssigen Zustand in das Expansionsventil (X) eintritt. Nach der Expansion gelangt das Kältemittel in die Inneneinheit, die nun als Verdampfer fungiert, wo es Wärme aus dem gleichströmenden Wasser aufnimmt und das Wasser abkühlt, während das Kältemittel verdampft. Das Gas kehrt dann zum Kompressor zurück, wodurch der umgekehrte Kältekreis abgeschlossen wird (siehe Abbildung 13 (a)).

Wenn die RPW-HEX-Module nicht vollständig aufgeladen sind, wird das Heißgas nach Verlassen des Kompressors zu den RPW-HEX-Modulen geleitet, um sie aufzuladen. Dabei gibt das Heißgas seine sensible Energie an die RPW-HEX-Module ab. Danach fließt das Kältemittel weiter zum Außengerät, das als Kondensator und Unterkühler fungiert. Nur ein kleiner Teil des Geräts wird hierfür genutzt, wie in Abbildung 13 (b) gezeigt. Ab diesem Punkt läuft der Betrieb ähnlich wie in Abbildung 13 (a), wobei der Kühlbetrieb der Wohnungen fortgesetzt wird. Während des Kühlbetriebs bleibt das Flüssigkeitseinspritzventil (Z2) geschlossen.

Abbildung 12: Kältekreislauf der L/W-Wärmepumpe während des Heizbetriebs ohne und mit Aufladung des RPW-HEX-Moduls. P: Kompressor, A: Ölabscheider, B1-3: Handventile, 3-WV: Dreiweiventil, D: Kältemittel-PCM-Wasser-Wärmetauscher (RPW-HEX), C: Wärmeübertrager im Innengerät, G: Umwälzpumpe, IHX: Interner Wärmeübertrager, x: Expansionsventil, E: Wärmeübertrager im Außengerät, I1-4: Absperrventile, Z1-2: Einspritzventile, 4-WV: Vierwegeventil. Quelle: Eigendarstellung

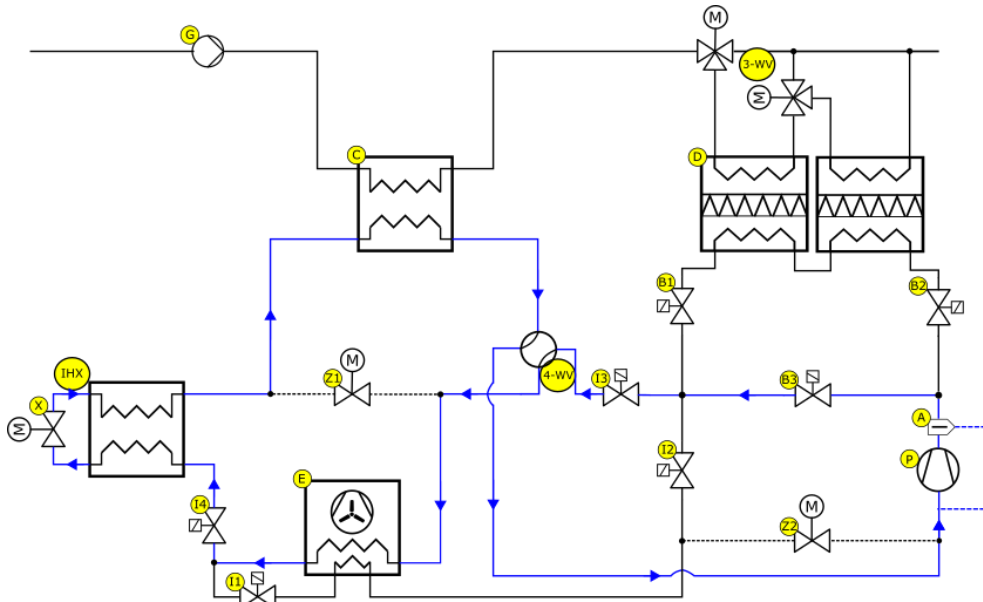


(a) Heizbetrieb ohne Aufladung der RPW-HEX Module.

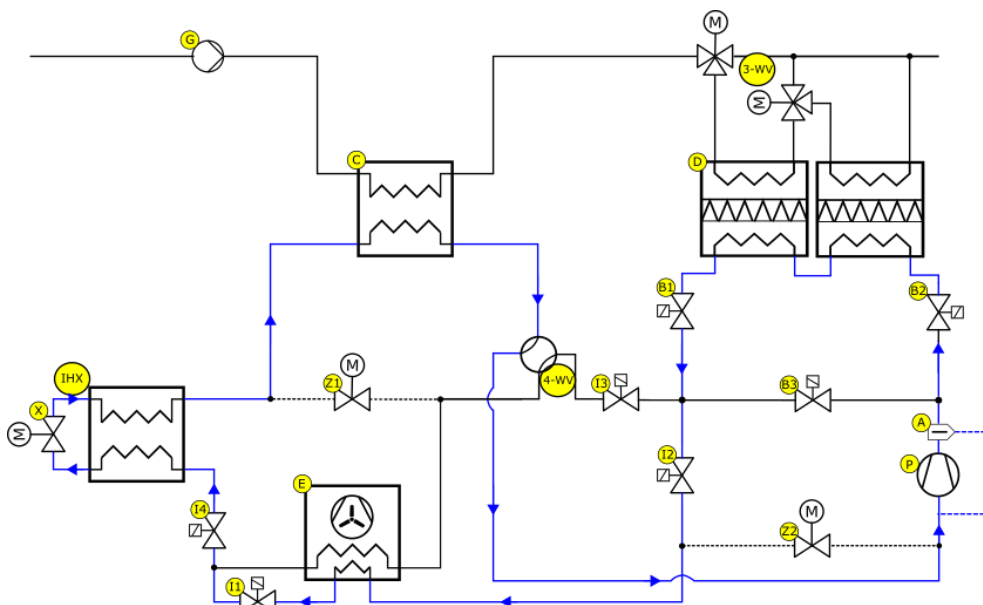


(b) Heizbetrieb mit Aufladung der RPW-HEX Module für Warmwasserbereitung.

Abbildung 13: Kältekreislauf der L/W-Wärmepumpe während des Kühlbetriebs ohne und mit Aufladung des RPW-HEX-Moduls. P: Kompressor, A: Ölabscheider, B1-3: Handventile, 3-WV: Dreiweiventil, D: Kältemittel-PCM-Wasser-Wärmetauscher (RPW-HEX), C: Wärmeübertrager im Innengerät, G: Umwälzpumpe, IHX: Interner Wärmeübertrager, x: Expansionsventil, E: Wärmeübertrager im Außengerät, I1-4: Absperrventile, Z1-2: Einspritzventile, 4-WV: Vierwegeventil. Quelle: Eigendarstellung



(a) Kühlbetrieb ohne Aufladung der RPW-HEX Module.



(b) Kühlbetrieb mit Aufladung der RPW-HEX Module für Warmwasserbereitung.

5.4.2. Gebäudenetz – Wasserkreis

Es ist wichtig, den hydraulischen Kreislauf zu untersuchen, der mit dem L/W-WP-Kältekreis über den Kondensator (C) und die RPW-HEX-Module verbunden ist. Die Erzeugung von Warmwasser hat Vorrang vor der Raumheizung und Raumkühlung.

Heizbetrieb

Hier fließt Wasser durch den Kondensator (C) über eine Zirkulationspumpe (G), Abbildung 12, und dann ins Gebäude, wenn Raumheizung aktiv ist, geregelt durch 3-Wege-Ventile. So wird keine Wärme aus den RPW-HEX-Modulen für Raumheizung entzogen. Später leiten die 3-WVs Wasser durch die RPW-HEX-Module, um Wärme für die WW-Erzeugung zu entziehen. Das erwärmte Wasser lädt dezentrale WW-Tanks (Enerboxxes) auf oder heizt das Verteilungssystem vor, um Wärmeverluste zu reduzieren.

Kühlbetrieb

Das kühle Wasser wird mit der Zirkulationspumpe (G) zirkuliert, Abbildung 13, um den Raumkühlungsbedarf zu decken. Wie beim Heizen wird das Wasser während der Kühlung an den RPW-HEX-Modulen vorbeigeführt. In der Zwischenzeit lädt heißes Gas auf der L/W-WP-Kältekreisseite die RPW-HEX-Module für eine spätere Nutzung auf. Wenn die WW-Erzeugung aktiv ist, fließt Wasser durch die RPW-HEX-Module, um Wärme zu entziehen, wobei der Vorgang ähnlich wie beim Heizbetrieb verläuft.

5.4.3. Regelstrategien

Gebäude und Gebäudenetz

Abbildung 14 zeigt die Regelungsstrategie für die Raumheizung (SH), Raumkühlung (SC) und die Warmwasserbereitung (WW). Die Signale für Heizung und Kühlung werden von einem PI-Regler verwaltet, der die Innentemperatur mit einem festgelegten Sollwert und einer definierten Bandbreite (ΔT) von 1,5 K vergleicht:

$$y_{\text{heating}} \quad \text{If: } T_{\text{heating,ST}} - \left(\frac{\Delta T}{2}\right) < \vartheta_{\text{indoor}} < T_{\text{heating,ST}} + \left(\frac{\Delta T}{2}\right) \quad (1)$$

$$y_{\text{cooling}} \quad \text{If: } T_{\text{cooling,ST}} - \left(\frac{\Delta T}{2}\right) < \vartheta_{\text{indoor}} < T_{\text{cooling,ST}} + \left(\frac{\Delta T}{2}\right) \quad (2)$$

Zunächst wechselt die L/W-WP in den Heizmodus, wenn ($y_{\text{heating}} = \text{true}$). Die Wassertemperatur wird entsprechend der Heizkurve eingestellt. So betreibt die L/W-WP ausschließlich die Raumheizung.

Für die Warmwasserbereitung (WW) werden drei Phasen unterschieden: Vorheizen, grundlegendes Laden und Spitzenladen. Die mittlere Temperatur der Enerboxxes bestimmt die Phase. Wenn die Mindesttemperatur einer Enerboxx ($\vartheta_{\text{EB}} \geq 52 \text{ °C}$) erreicht wird, was auf ausreichend Energie für WW hinweist, beginnt die Vorheizphase, um den Kreislauf zu erwärmen und Wärmeverluste zu minimieren. Wenn eine Enerboxx unter diesen Schwellenwert fällt, aber innerhalb eines Bereichs bleibt ($42 \text{ °C} < \vartheta_{\text{EB}} < 48 \text{ °C}$), startet das grundlegende Laden mit einer Versorgungstemperatur von 50 °C .

Liegt die Temperatur zwischen 48 °C und 52 °C, beginnt das Spitzenladen mit einem Sollwert von 61 °C. Das Laden endet, wenn die Enerboxxes 52 °C überschreiten. Einzelne Enerboxxes können elektrisch beheizt werden, wenn ihre Temperatur unter 40 °C fällt, mit einer Beendigung des Ladevorgangs bei 44 °C.

Laden von RPW-HEX-Modulen

Die RPW-HEX-Module werden basierend auf dem Betriebsmodus der L/W-WP aufgeladen. Die Temperatur jedes Moduls wird überwacht, um sicherzustellen, dass sie über einem festgelegten Schwellenwert bleibt, der typischerweise bei etwa 54 °C liegt. Fällt die Temperatur unter diesen Schwellenwert, beginnt der Ladevorgang, wobei Heißgas zugeführt wird, bis das Modul aufgeladen ist. Der Ladevorgang kann pausieren, wenn andere Betriebsphasen aktiviert werden.

Entladung von RPW-HEX-Modulen

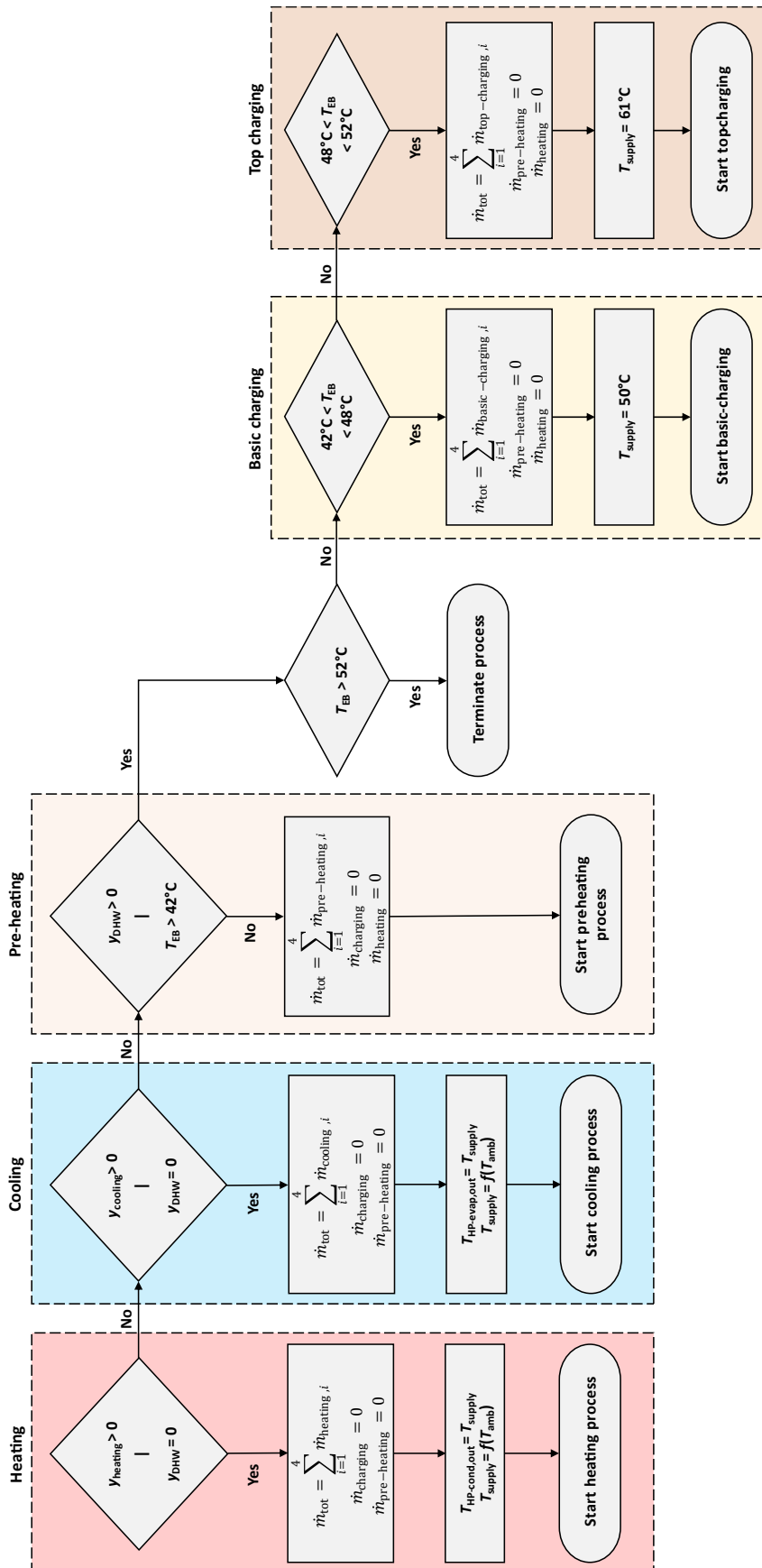
Der Entladeprozess der RPW-HEX-Module auf der Wasserseite beginnt, wenn die WW-Erzeugung priorisiert wird, was durch aktive Heiz- und Kühl-Signale zusammen mit einem aktiven WW-Signal angezeigt wird.

Wenn die Phase der Basisladung angezeigt wird und die Temperatur der 3 Niedertemperatur-RPW-HEX-Moduls 53 °C überschreitet, wird das Entladen eingeleitet, wobei die Wassertemperatur, die das L/W-WP-System verlässt, auf mindestens 48 °C eingestellt wird.

Alternativ, wenn die Basisladephase inaktiv ist und die Top-Ladephase aktiv ist, regelt die L/W-WP die Wassertemperatur, die das System verlässt, auf 61 °C. Das Entladen beginnt mit den Niedertemperatur-RPW-HEX-Modulen, gefolgt vom Hochtemperatur-RPW-HEX-Modul, falls notwendig. Während des Entladevorgangs wird die Wassertemperatur, die den Wärmepumpenkondensator verlässt, auf 35 °C gehalten. Wenn die RPW-HEX-Module nicht ausreichend Energie zum Entladen haben, wird die Sollwassertemperatur, die den Wärmepumpenkondensator verlässt, auf 61 °C eingestellt.

Zusätzlich wird die Kompressordrehzahl auf das Minimum reduziert, wenn die Kondensator-Eingangstemperatur während des aktiven L/W-WP-Betriebs den Sollversorgungswert überschreitet. Die Vorheizphase des Wasserversorgungssystems beginnt bei 50 °C, um während des Entladevorgangs thermische Verluste zu minimieren. Während der Basisladephase bleibt die Versorgungstemperatur bei 50 °C für ein effizientes Entladen. Für die Top-Ladephase ist jedoch eine höhere Temperatur von 61 °C erforderlich.

Abbildung 14: Top-level Regelungsstrategie für den Betrieb der Wärmepumpe. Quelle: Eigendarstellung AIT



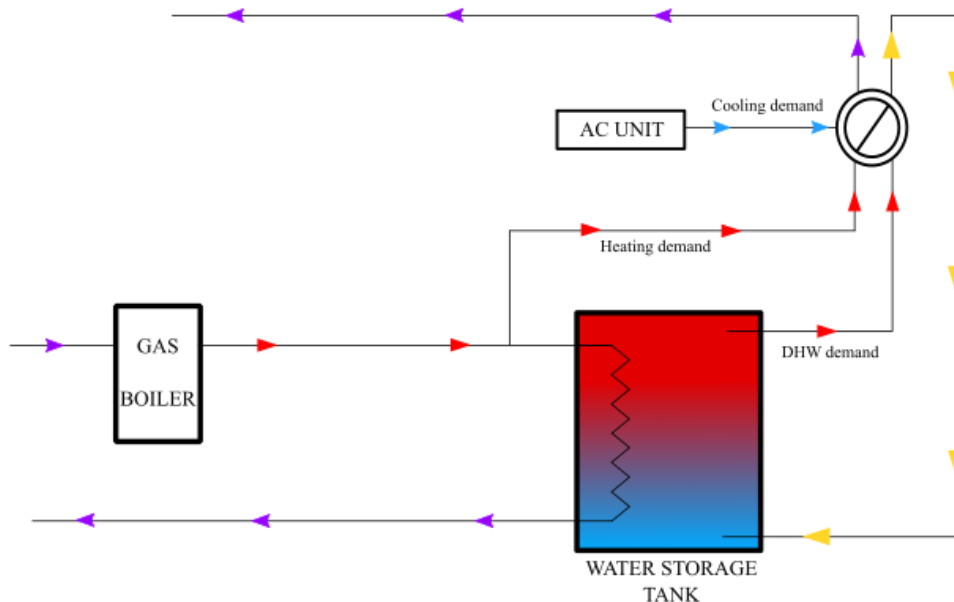
5.5. Techno-ökonomisch-ökologische Analyse

5.5.1. Vergleichssysteme

Um die Machbarkeit des CHALLENGE-Systems zu bewerten, wird es Konzept mit etablierten Referenzsystemen verglichen, die in Wohngebäuden häufig verwendet werden.

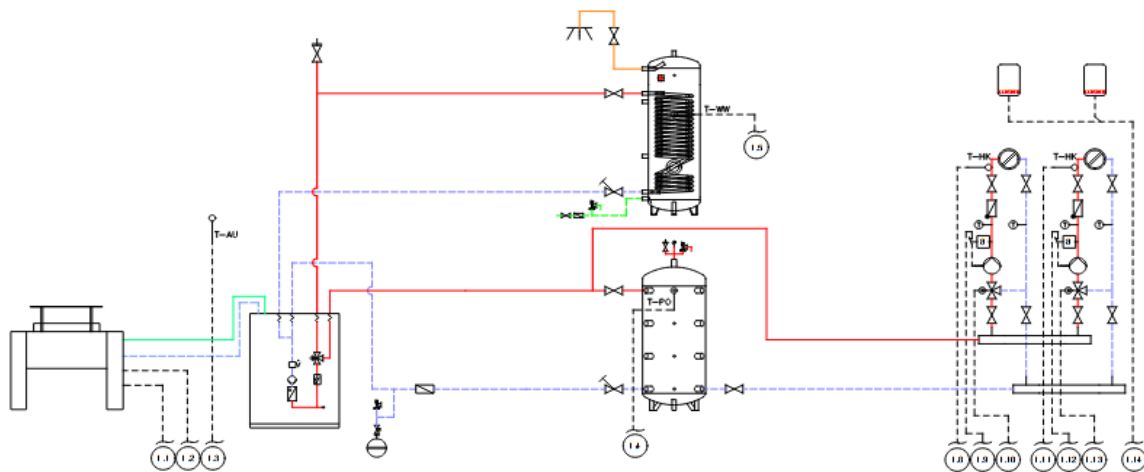
Das erste Referenzsystem, bezeichnet als Reference_01, ist eine konventionelle Heiz- und Kühlanlage, bestehend aus einem zentralen Gaskessel mit einer maximalen Heizleistung von 24 kW samt 300-Liter-Warmwasserspeicher und dezentralen Klimaanlage mit 2 kW (Kälteleistung) (siehe Abbildung 15). Dieses System ist typischerweise in älteren oder nicht renovierten Wohnungen zu finden.

Abbildung 15: Prinzipschema des Vergleichssystems „Reference_01“. Quelle: Eigendarstellung AIT



Ein zweites Referenzsystem, Reference_02, wird als geeignetere Option für renovierte Gebäude betrachtet. Dieses System besteht aus einer zentralen Luft-Wasser-Wärmepumpe (OCHSNER AIR HAWK 518 C11A) und zwei Warmwasserspeichern – einer für die Warmwasserbereitung und der andere als Puffer für die Raumheizung, siehe Abbildung 16. Das System wurde so ausgelegt, dass es die thermischen Anforderungen des Gebäudes erfüllt, einschließlich der Raumheizung, Kühlung und der Bereitstellung von Warmwasser. Ein Drei-Wege-Ventil ermöglicht die Umschaltung zwischen dem Warmwasserkreis und dem Heizkreis.

Abbildung 16: Prinzipschema des Systems „Reference_02“. Quelle: Eigendarstellung OCHSNER



5.5.2. Ergebnisse

Es wurde die Machbarkeit des CHALLENGE-Systems für ein Mehrfamilienhaus mit vier Wohnungen bewertet. Nachfolgend die Ergebnisse pro Wohnung. Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der techno-ökonomisch-ökologischen Analyse für die drei betrachteten Systeme zusammen. Sie enthält den jährlichen Bedarf an thermischer Energie für Raumheizung, Raumkühlung und Warmwasserbereitung sowie den dafür erforderlichen Energieaufwand. Darüber hinaus liefert sie einen qualitativen Indikator für den Platzbedarf dieser Systeme. Die Analyse zeigt, dass das CHALLENGE-System zu höheren Gesteungskosten für thermische Energie (annualisierte Investitionskosten (CAPEX), Betriebskosten (OPEX = 10% der CAPEX zzgl. Kosten für den Energieträger (z. B. Gas, Strom), Betriebsdauer 15 Jahre, Zinssatz 5%, CO₂-Emissionssteuern sind nicht berücksichtigt) im Vergleich zu den herkömmlichen Referenzsystemen führt. Allerdings schneidet das CHALLENGE-System in Bezug auf die Umweltwirkung deutlich besser ab und erzielt etwa 78% bzw. 38% geringere CO₂-Emissionen als Reference_01 bzw. Reference_02. Diese erhebliche Reduktion bestätigt das erwartete Potenzial des Systems zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Die geringeren Emissionen resultieren aus der hohen Jahresarbeitszahl des CHALLENGE-Systems. Das angestrebte Ziel, mind. 10% an elektrischer Energie einzusparen, wurde mithilfe von Simulationsrechnungen nachgewiesen; die Einsparung an elektrischer Energie im Vergleich zur baugleichen Wärmepumpe (Reference_02) beträgt sogar 38%.

Tabelle 1: Techno-ökonomisch-ökologische Analyse für das CHALLENGE und die zwei Vergleichssysteme

Simulationsergebnis und KPIs zur Bewertung	CHALLENGE (zentrale Wärmepumpe mit PCM-Speichern)	Reference_01 (zentraler Gaskessel mit dezentralen Klimaanlage)	Reference_02 (zentrale Wärmepumpe mit Puffer und Warmwasserspeicher)
Heizwärmebedarf (kWh/a)	7290	7356	7338
Kühlbedarf (kWh/a)	641	701	698
Warmwasserbedarf (kWh/a)	3665	3665	3665

Energieträger für Antrieb (kWh/a)	2655	Gas: 12.245 Strom: 281	4297
Gesamte CO₂-Emissionen (kg/a)	555	3108	900
Gestehungskosten für Raumheizung/-kühlung und Warmwasserbereitung (ct/kWh)	44	31	35
Jahresarbeitszahl (JAZ)	4,4	0,9	2,8
Platzbedarf	Mäßig (WP + PCM- Speicher)	Gering (zentrale Gastherme + dezentrale Klimageräte)	Hoch (WP + 2 Wasserspeicher)

6 Schlussfolgerungen

Die wichtigste Erkenntnis aus den umfangreichen Arbeiten im CHALLENGE-Projekt ist die Bestätigung, dass die sowohl die RPW-HEX-Speicher als auch die darauf aufbauend entwickelte Kältekreis-Konfiguration funktionieren. Das angestrebte Ziel, über ein Betriebsjahr mind. 10% an elektrischer Energie einzusparen, wurde mithilfe von Simulationsrechnungen nachgewiesen; die Einsparung an elektrischer Energie im Vergleich zur baugleichen Wärmepumpe (Reference_02) beträgt sogar 38%. Die gesammelten Erfahrungen und unerwarteten Probleme hinsichtlich Design und Umsetzung der Funktionsmuster haben das Know-how aller Partner deutlich erhöht, diese Erfahrungen bringen den Unternehmen einen deutlichen Wissensvorsprung im Vergleich zu Mitbewerbern.

Das Know-how hinsichtlich Modellierung/Simulation (insbesondere in Form der nun vorliegenden Modelle) und Experimenten von/mit Latentwärmespeichern und deren Kombination mit Kompressionswärmepumpen auf Komponenten- (Kältekreis) und Systemebene (hier insbesondere Regelungskonzepte) wurde stark ausgebaut und die internationale Sichtbarkeit wurde weiter erhöht. Das erarbeitete Wissen wird definitiv in weitere F&E-Projekte einfließen, ebenso wie das gewonnene Know-how hinsichtlich Optimierung von Kältekreisen, Komponentenauswahl sowie Regelungstechnik (insbesondere das Zusammenspiel einer zentralen Wärmepumpe mit dezentralen, in den Wohnungen eingesetzten dezentralen Speicher für die Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung in den Wohnungen) in die wirtschaftlichen Tätigkeiten der Industriepartner einfließen werden.

Für das in CHALLENGE verwendete Kältemittels R32 hat sich der legislative Hintergrund aufgrund der F-Gase Verordnung geändert – natürliche und zumeist brennbare Kältemittel (z.B. Propan) sind zukunftssicherer, erfordern aber auch besondere Sicherheitsmaßnahmen. 2022 reichten die Projektpartner AIT, OCHSNER und PINK gemeinsam mit einem europäischen Konsortium unter dem Lead von ACR, Spanien, das Horizon Europe IA Projekt HYSTORE ein (Topic: HORIZON-CL5-2022-D3-01-14). Dieses wurde genehmigt und startete 2023. In HYSTORE wurden und werden die in CHALLENGE entwickelten Methoden weiterentwickelt, um einen Latentwärmespeicher (RPW-HEX) direkt in den Kältemittelkreislauf einer Propanwärmepumpe optimal zu integrieren.

Abgesehen von der in weiterer Folge möglichen direkten Vermarktung von Wärmepumpen und Speichern an v.a. Endkunden, sind Zielgruppen für die Verwertung v.a. des Know-how und der wissenschaftlichen Methoden (1D- und CFD-Modellierung sowie Laborexperimente auf Komponenten- und Systemebene) Industrieunternehmen wie beispielsweise Speicher und Wärmepumpenhersteller, die Kältekreis-konzepte und Komponenten dafür entwickeln und optimieren können. Um diverse Zielgruppen zu erreichen, wurden folgende Disseminations- und Verwertungsmaßnahmen gesetzt:

Publikationen

Emhofer, J., Barz, T., Buruzs, A., Both, S., Scsepka, P., Nitsch, B., & Reichl, C. (2025). Model-based design and experimental analysis of a compact PCM thermal storage for integration in heat pump cycles. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125674. Artikel 125674.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125674>

Reichl, C., Both, S., Mascherbauer, P., & Emhofer, J. (2022). Comparison of Two CFD Approaches Using Constant and Temperature Dependent Heat Capacities during the Phase Transition in PCMs with Experimental and Analytical Results. *Processes*, 10(302), 25. <https://doi.org/10.3390/pr10020302>

Both, S. (2021). *Analysis of the heat transfer between refrigerants and latent storage materials in a novel heat pump storage application by means of computational fluid dynamics*. Masterarbeit, University of Stuttgart.

Vortrag mit Eintragung in Tagungsband

Dahash, A., Klein, G., Lauer mann, M., Zitzenbacher, R., Preisinger, S., & Windholz, B. (2024). Integration of a latent heat storage in the refrigeration cycle of an air source heat pump for energy-efficient heating, cooling and DHW operations. in T. Bednar (Hrsg.), *BauSIM Conference Proceedings by IBPSA-Austria and Germany* (Band 10, S. 192 - 200). <https://doi.org/10.26868/29761662.2024.25>

Vorträge

A. Dahash, M. Lauer mann, B. Windholz: *“Challenge” – Highly efficient waste heat utilization in Plus-Energy Districts and Quarters*, act4.energy Congress, 16.-17. Nov. 2023, Stegersbach

Beier, S.; Klein G.; Scsepka P.; Reichl, C.; Gröschl, M.; Emhofer, J. Experimental studies and characterization of phase transition and heat transfer of a latent heat storage connected to a lab scale heat pump, Presentation: 71st Annual Meeting of the Austrian Physical Society ÖPG, Leoben 27.9.2022

Patentanmeldung

Ein Patent für die in CHALLENGE entwickelte Kältekreisführung im kombinierten Kühl- und Warmwasserbetrieb wurde von OCHSNER und AIT am 24.3.2022 zum Patent angemeldet. Das Patent mit dem Titel „Anlage zur häuslichen Wärmeversorgung“ (AktENZEICHEN A 50192/2022, Patentnummer 525349) wurde am 15.3.2023 erteilt, siehe <https://see-ip.patentamt.at/NPatentSuche/Details/e6852088-309c-4a04-b2d3-1777e16284fe>

7 Ausblick und Empfehlungen

Trotz der umfangreichen Modellierungsarbeiten in CHALLENGE gibt es hinsichtlich der Latentwärmespeicher weiteren Forschungsbedarf, v.a. Erhöhung der Speicherdichte und Leistungssteigerung. Zur Integration des in CHALLENGE erarbeiteten Wissens in das Produktportfolio eines Speicherherstellers wie AKG sollte ein mögliches Folgeprojekt jedenfalls die Konzepterstellung für weitere Speicher (insbesondere weitere unterschiedliche Geometrie-Strukturen) sowie die Validierung mit Experimenten umfassen.

Ein großer Fokus sollte künftig auch auf der Adaptierung des Konzepts auf zukunftssicherere Kältemittel wie bspw. Propan gelegt werden. Aufsetzend auf die bereits gewonnenen Erkenntnisse sollte einer etwaigen Laboranlage eine Demonstration folgen, bei der auch das innovative Gesamtregelungskonzept angewendet werden kann, um sommerliche Hitzeinseln und Lärmemissionen durch sparsamen Betrieb des Wärmepumpen-Außengeräts hintanzuhalten. Eine nicht-technische Herausforderung dabei ist sicherlich die nötige Überzeugungsarbeit bei etwaig gemischten Eigentumsverhältnissen in großvolumigen Wohngebäuden, gemeinsam in dieses nachhaltige und innovative Energiekonzept zu investieren. Die Überzeugungsarbeit ist umso nötiger, zumal das oftmalige Hauptkriterium, die Gestehungskosten für Raumwärme/-kühlung und Warmwasserbereitung, unter Vernachlässigung von CO₂-Emissionssteuern noch nicht unter jenen der Referenzsysteme liegen - ungeachtet aller Vorteile, die das CHALLENGE-Konzept ggü. den Referenzsystemen bietet, insbesondere Energieeffizienz, minimale CO₂-Emissionen, mäßiger Platzbedarf, geringste Schallemissionen sowie Vermeidung von Hitzeinseln.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Referenz L/W-WP-Systems mit Pufferspeicher (U). (S) Dezentrale WW-Speicher, (H) Niedertemperatur Wärme-/Kälteabgabe (z.B.: Fußbodenheizung), (C) Kondensator der WP (W) Vier-Wege-Ventil, (B) Bypass Expansionsventil, (X) reguläres Expansionsventil, (F) Flüssigphase HEX, (E) Außeneinheit mit Verdampfer und Ventilator, (P) Kompressor. Quelle: Eigendarstellung 13

Abbildung 2: Vereinfachtes Hydraulikschema des nZEB Innsbruck Vögelebichl (NHT). Quelle: F. Ochs, Universität Innsbruck 14

Abbildung 3: Continental Concept aus HYBUILD, welches in CHALLENGE weiterentwickelt wird im Heizbetrieb (a) und im energieeffizienten Warmwasserbetrieb (b). (S) Dezentrale WW-Speicher, (H) Niedertemperatur Wärme-/Kälteabgabe (z.B.: Fußbodenheizung) (C) Kondensator der WP (R) RPW-HEX mit einem PCM mit einer Phasenwechseltemperatur von ca. 64 °C, (W) Vier-Wege-Ventil, (B) Bypass Expansionsventil, (X) reguläres Expansionsventil, (F) Flüssigphase HEX, (E) Außeneinheit mit Verdampfer und Ventilator, (P) Kompressor, (M) Drei-Wege-Ventil. Quelle: Eigendarstellung 15

Abbildung 4: Die Struktur der Arbeitspakete von CHALLENGE im Kontext zum Projektinhalt. Eigendarstellung..... 16

Abbildung 5: Prinzip des CHALLENGE Kältekreislaufs zur Kühlung mit drehzahlreduziertem Ventilator in der Außeneinheit (E) und vollständiger Kondensation im RPW-HEX (R). Quelle: Eigendarstellung. 18

Abbildung 6: Validierung der detaillierten RPW-HEX Auslegungsmodelle. Für fünf verschiedene Geometrien (#1 bis #5) wurde der Wärmetransport in einen Teil des Speichers mit CFD (strichlierte) und mit reduzierten 1D-Modellen in Modelica (durchgezogene Linie) berechnet. Quelle: AIT..... 20

Abbildung 7: Links: Schematische Struktur des RPW-HEX mit Wasser- und Kältemittel-Ein- und -auslass. Quelle: Eigendarstellung. Rechts: RPW-HEX aus Aluminium, von außen ohne Wärmedämmung. Quelle: AIT..... 21

Abbildung 8: RPW-HEX-Teststand am AIT. Ganz rechts im Bild: Wärme gedämmter (schwarz) RPW-HEX mit den Kabeln der Temperaturfühler (orange). Quelle: AIT 21

Abbildung 9: CHALLENGE- Funktionsmuster in den Klimakammern des AIT-Labors. Links: Inneneinheit. Mitte: Speichereinheit. Rechts: Außeneinheit. Quelle: AIT 23

Abbildung 10: CHALLENGE Gesamtsystem bei PINK. Links: Inneneinheit und RPW-HEX Speicher. Rechts: Außeneinheit. Quelle: PINK 24

Abbildung 11: Hydraulik- und Messtellenplan für das CHALLENGE-Gesamtsystem bei PINK. Quelle: PINK 24

Abbildung 12: Kältekreislauf der L/W-Wärmepumpe während des Heizbetriebs ohne und mit Aufladung des RPW-HEX-Moduls. P: Kompressor, A: Ölabscheider, B1-3: Handventile, 3-WV: Dreiwegeventil, D: Kältemittel-PCM-Wasser-Wärmetauscher (RPW-HEX), C: Wärmeübertrager im Innengerät, G: Umwälzpumpe, IHX: Interner Wärmeübertrager, x: Expansionsventil, E:

Wärmeübertrager im Außengerät, I1-4: Absperrventile, Z1-2: Einspritzventile, 4-WV: Vierwegeventil. Quelle: Eigendarstellung	27
Abbildung 13: Kältekreislauf der L/W-Wärmepumpe während des Kühlbetriebs ohne und mit Aufladung des RPW-HEX-Moduls. P: Kompressor, A: Ölabscheider, B1-3: Handventile, 3-WV: Dreiwegeventil, D: Kältemittel-PCM-Wasser-Wärmetauscher (RPW-HEX), C: Wärmeübertrager im Innengerät, G: Umwälzpumpe, IHX: Interner Wärmeübertrager, x: Expansionsventil, E: Wärmeübertrager im Außengerät, I1-4: Absperrventile, Z1-2: Einspritzventile, 4-WV: Vierwegeventil. Quelle: Eigendarstellung	28
Abbildung 14: Top-level Regelungsstrategie für den Betrieb der Wärmepumpe. Quelle: Eigendarstellung AIT.....	31
Abbildung 15: Prinzipschema des Vergleichssystems „Reference_01“. Quelle: Eigendarstellung AIT.	32
Abbildung 16: Prinzipschema des Systems „Reference_02“. Quelle: Eigendarstellung OCHSNER	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Techno-ökonomisch-ökologische Analyse für das CHALLENGE und die zwei Vergleichssysteme.....	33
Tabelle 2: I Dateneigenschaften.....	41
Tabelle 3: II Dokumentation und Datenqualität.....	41
Tabelle 4: III Speicherung, gemeinsame Nutzung und Langzeitarchivierung von Daten	42
Tabelle 5: IV Rechtliche und ethische Aspekte.....	43

Abkürzungsverzeichnis

E/W-WP	Erdreich/Wasser-Wärmepumpe
FVM	Finite Volumen Methode
G/W-WP	Grundwasser/Wasser-Wärmepumpe
HEX	Wärmeübertrager (engl. heat exchanger)
iHv	In Höhe von
iV	Im Vergleich
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings
PCM	Phase Change Material (Phasenwechselmaterial)
PV	Photovoltaik
RPW-HEX	Latenter Speicher/Wärmeübertrager, der in die Heißgasleitung der Wärmepumpe eingebaut wird (Refrigerant/PCM/Water Heat EXchanger)
Vgls.	vergleichsweise
W/W-WP	Wasser-Wasser-Wärmepumpe

WP	Wärmepumpe
WV	Wege-Ventil
WW	Warmwasser

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

Tabelle 2: I Dateneigenschaften

Teilaspekt	Erklärung
I.1 Beschreibung der Daten und der Erhebung oder der Nachnutzung bestehender Daten	<ul style="list-style-type: none"> - Messdaten der Funktionsmuster Erfassung mittels bestehender Datenerfassungssysteme am AIT-Prüfstand, der OCHSNER-Steuerung und der Datenerfassung bei PINK, manueller Export für die Nutzung im Projekt. Dokumentation der Herkunft über Ablage in Projektordnerstruktur. Eine Nachnutzung nach dem Projekt ist nur nach Zustimmung des Konsortiums erlaubt. Art, Umfang, Menge: Über hundert Messsensoren (numerische Daten), zeitliche Auflösung im Sekundenbereich, mehrere Messkampagnen zu je einigen Wochen, Export z.B. im csv-Format (bewährter Standard für flexible Weiterverwendung mit z.B. python oder Visplore für die Validierung) - Simulationsergebnisse Erstellung mittels Dymola sowie ANSYS Fluent. Dokumentation der Herkunft über Ablage in Projektordnerstruktur. Eine Nachnutzung nach dem Projekt ist nur mit Zustimmung des Konsortiums erlaubt. Art, Umfang, Menge: numerische Daten (Größenordnung 100 GB), Speicherung in den nativen Standardformaten der SW-Tools (Speicherbedarf dadurch am geringsten)

Tabelle 3: II Dokumentation und Datenqualität

Teilaspekt	Erklärung
II.1 Metadaten und Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> - Messdaten der Funktionsmuster Metadaten und weitere Dokumentation: Speichertyp/Wärmepumpentyp, Aufstellungsort, Zuordnung der Messdaten zum Messstellenplan (mit Sensorpositionen und Einheiten), Hydraulikschemata, Kältekreis schemata, Sensordatenblätter, Informationen zum pre-processing vor dem Export (z.B. Mittelwertbildung) Organisation der Daten: Ablage in Unterordnern je Messkampagne, Verschieben veralteter Versionen in Unterordner bei Aktualisierung

	<p>von Metadaten-Dateien. Sammlung der Information im Planungsdokument der jeweiligen Messkampagne</p> <ul style="list-style-type: none"> - Simulationsergebnisse Metadaten und weitere Dokumentation: Variantenummer, gewählte Randbedingungen, Parameter-Einstellungen Organisation der Daten: Ablage in Unterordnern je Variantenstudie, Verschieben veralteter Versionen in Unterordner bei Aktualisierung von Metadaten-Dateien. Sammlung der Information im Planungsdokument der jeweiligen Variantenstudie
II.2 Kontrolle der Datenqualität	<ul style="list-style-type: none"> - Messdaten der Funktionsmuster Soweit möglich wird eine Kalibrierung der Messsensoren am besten vor jeder, zumindest jedoch vor der ersten Messkampagne vorgenommen. Diese wird in einem Protokoll dokumentiert. - Simulationsergebnisse Peer-review der Daten und von deren Interpretation

Tabelle 4: III Speicherung, gemeinsame Nutzung und Langzeitarchivierung von Daten

Teilaspekt	Erklärung
III.1 Datenspeicherung und Backup während des Forschungsprozesses	<p>Daten und Metadaten werden auf einem gemeinsamen Sharepoint des AIT gespeichert, von dem in regelmäßigen Abständen standardmäßig Backups gemacht werden (AIT ITO-Abteilung). Die Wiederherstellung kann von Projektmitarbeitern und/oder durch den IT-Support des AIT durchgeführt werden.</p> <p>Über personalisierte Zugangsdaten und Vergabe von grundlegenden Rechten („kann bearbeiten“, „kann anzeigen“) wird der individuelle Zugriff auf die Daten innerhalb des Konsortiums ermöglicht und reguliert. Die anzuwendenden Datenschutzrichtlinien sind im Konsortialvertrag geregelt.</p> <p>AIT verfügt über ein eigenes Datenschutz Management für personenbezogene Daten, das in einer umfassenden Prozessbeschreibung definiert ist und bei hohem Risiko unter anderem eine Datenschutz-Folgenabschätzung vorgibt. Ein Datenschutzbeauftragter berät, schult, kontrolliert/überwacht die Einhaltung der Richtlinie und berichtet an das oberste Management. Aus aktueller Sicht besteht kein Risiko hinsichtlich des Datenschutzes personenbezogener Daten, da keine derartigen Daten erfasst wurden.</p>

III.2 Gemeinsame Nutzung und Langzeitarchivierung von Daten	Daten und Metadaten werden auf den Laufwerken des AIT für die Langzeitarchivierung und Nachnutzung gespeichert. Zur Nachnutzung durch die Konsortialpartner werden Daten auf Anfrage via Sharepoint erneut zur Verfügung gestellt. Zur Nachnutzung bei etwaigen kooperativen Folgeprojekten werden die Nutzungsrechte im Zuge der Projektentwicklung und rechtlichen Gestaltung fallweise beurteilt. Grundlegend werden die Daten nicht öffentlich zugänglich gemacht aufgrund der Unvereinbarkeit mit dem Schutz der Ergebnisse.
--	---

Tabelle 5: IV Rechtliche und ethische Aspekte

Teilaspekt	Erklärung
IV.1 Rechtliche Aspekte	<p>Im Rahmen des Projektes generierte Daten sind im Eigentum des Konsortiums, die rechtlichen Fragen hinsichtlich des Datenzugangs sind im Konsortialvertrag geregelt. Daten von Dritten werden entsprechend der Vereinbarungen gehandhabt.</p> <p>Bei Antragstellung war keine Nutzung von personenbezogenen Daten geplant. Hätte sich dies im Projektverlauf ändert, hielte sich das Konsortium an die geltenden Datenschutzgesetze.</p>
IV.2 Ethische Aspekte	Bei Antragstellung waren keine ethischen Aspekte der Daten bekannt. Falls dies sich im Projektverlauf änderte, hielte sich das Konsortium im Umgang mit Daten an das von der Europäischen Kommission veröffentlichte Dokument <u>Ethics for researchers</u> und den <u>European Code of Conduct for Research Integrity</u> .

