

Sanierung von Mehrfamilienhäusern mit kleinen Wohnungen – Kostengünstige technische Lösungsansätze für Lüftung, Heizung und Warmwasser

SaLüH!

F. Ochs, D. Siegele,
D. Jähnig, C. Rohringer,
T. Calabrese, R. Pfluger,
C. Fink

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

5/2020

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Sanierung von Mehrfamilienhäusern mit kleinen Wohnungen – Kostengünstige technische Lösungsansätze für Lüftung, Heizung und Warmwasser

SaLüH!

Fabian Ochs, Dietmar Siegele, Toni Calabrese, Rainer Pfluger
Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen

Dagmar Jähnig, Christoph Rohringer, Christian Fink
AEE INTEC

Innsbruck, Dezember 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	9
1. Ausgangslage	11
2. Projektinhalt und Ergebnisse.....	11
2.1. Stand des Wissens und Stand der Technik.....	11
2.2. Stand des Wissens zur Kopplung von Simulationstools	13
2.3. Referenzgebäude für die Betrachtungen in SaLüH!	14
2.4. Sanierungskonzept von SaLüH!	16
2.4.1. Einleitung.....	16
2.4.2. Heizungswärmepumpe.....	16
2.4.3. Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.....	18
2.5. Messergebnisse zur Trinkwarmwasser-Wärmepumpe.....	24
2.6. Simulationen zur Analyse des Komforts und der Luftqualität	26
2.7. Simulationsergebnisse zur Lüftungs-Heizungswärmepumpe	27
2.8. Simulationsergebnisse zur Trinkwarmwasser-Wärmepumpe	29
2.9. Aktive Überströmer	30
2.10. Fassadenintegration und Realeinbau bzw. -test in den PASSYS-Testzellen	32
2.11. Wirtschaftlichkeit	35
2.12. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	36
3. Schlussfolgerungen.....	37
4. Ausblick und Empfehlungen.....	39
5. Verzeichnisse.....	40
5.1. Abbildungsverzeichnis.....	40
5.2. Tabellenverzeichnis	41
5.3. Literaturverzeichnis.....	41

Kurzfassung

Bei der Sanierung von Geschoßwohnbauten, welche häufig kleine Wohnungen mit sehr inhomogener Wärmeversorgung aufweisen (Gas-, Öl- oder Stückholz-Einzelöfen, Elektroboiler usw., vgl. EU-Projekt Sinfonia) zeigt sich, dass eine Gesamtsanierung inklusive Umstellung auf zentrale Heizung und TWW-Versorgung mit z.B. Fernwärmeanschluss, Biomassekessel mit oder ohne Solarthermie oder Grundwasserwärmepumpe i.d.R. nicht möglich ist. Gerade für Wohnbauten mit kleinen Wohneinheiten scheiden auch derzeitig verfügbare dezentrale Lösungen aus Platz- und Kostengründen häufig aus.

Ziel des Forschungsvorhabens SaLüH! war es, Wohnungsbaugesellschaften, Herstellern von Lüftungs- bzw. Heizungsgeräten sowie Planern Konzepte und Entwicklungsrichtungen für ein **Gesamtpaket** für die dezentrale (wohnungsweise) Lüftung, Heizung und TWW-Versorgung an die Hand zu geben, welches die kostengünstige und baulich einfache Umstellung auf effiziente Haustechnik im Rahmen der **Sanierung** auch schrittweise Wohnung für Wohnung ermöglicht, ohne die NutzerInnen in ihrem gewohnten Wohnumfeld einzuschränken. Ein abgestimmtes Gesamtpaket bestehend aus Wärmedämmung, Fenster, einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, sowie Heizung (und ggf. Kühlung) und Trinkwarmwasserversorgung wurde entwickelt, welches kostengünstig und mit minimalem Eingriff in der Wohnung umgesetzt werden kann. Es erfolgte eine simulationsgestützte Bewertung der Innenraumqualität, d.h. thermischer Komfort und Luftqualität, und der Energieeffizienz sowie eine Wirtschaftlichkeitsbewertung. Es wurden Funktionsmuster für eine **kompakte Hybrid-Kleinst-Wärmepumpe für Lüftung, Heizung (und optional Kühlung)** sowie eine **kompakte Trinkwarmwasser-Wärmepumpe** entwickelt optimiert und im Labor vermessen.

Neben dem Platzaufwand für die haustechnischen Komponenten für Heizung und Trinkwassererwärmung stellt die Luftkanalinstallation eine weitere Herausforderung beim nachträglichen Einbau im Rahmen der Gebäudesanierung dar. Für minimalen Kanal- und damit baulichen Aufwand bietet sich das **Konzept der aktiven Überströmung** an, welches im Vergleich zum Konzept der erweiterten Kaskadenlüftung eine weitere Reduzierung der Länge der Zuluftkanäle in der Wohneinheit ermöglicht. Die Zuluft wird mittels aktiven Überströmern (kleine schallgedämpfte Gleichstromventilatoren) transportiert. Daher wird im Flur keinerlei Deckenabhängung mehr benötigt. Die vereinfachte Zuluftführung speziell für kleine Wohneinheiten mit dezentralen wandintegrierten Wärmerückgewinnungssystemen wurde systematisch untersucht und Auslegungsrichtlinien wurden erarbeitet. Es wurde ein Funktionsmuster erstellt und im Labor bezogen auf die Effizienz (Stromaufnahme) und die Schallemissionen bei verschiedenen Volumenströmen vermessen.

Die **Lüftungs-Heizungswärmepumpe** (kompaktes Lüftungsgerät mit integrierter Kleinst-Wärmepumpe) wurde so konzipiert, dass ein Optimum aus Effizienz, Kompaktheit und Investitionskosten erreicht wird. Diese drehzahlgeregelte Kleinst-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von etwa 2,5 kW nutzt die Enthalpie der Fortluft einer mechanischen Lüftung mit Wärme- und Feuchterückgewinnung. Die Limitierung des Luftwechsels auf den hygienisch vorgeschriebenen Wert sind insbesondere im alpinen Raum mit längeren Phasen niedriger Außentemperaturen und entsprechend geringer absoluter Luftfeuchten von hoher Wichtigkeit, um das Problem der trockenen Innenraumluft zu vermeiden bzw. zu reduzieren und damit die Akzeptanz zu erhöhen. Der Einsatz von Feuchterückgewinnung reduziert das Problem der trockenen Luft und erlaubt tendenziell höhere Luftwechsel. Jedoch lässt sich die Feuchterückgewinnung nicht einfach regulieren und es muss darauf geachtet werden, dass es nicht zu feucht wird. Eine Entkopplung der Heiz- bzw. (fallweise) Kühlleistung

vom hygienischen Luftwechsel erfolgt durch bedarfsgerechte Beimischung von Umluft (wärmesenkenseitig) und Außenluft (wärmequellenseitig). Die Leistungsbegrenzung der Luftheizung wird damit weitgehend aufgehoben und eine deutlich bessere Regelbarkeit wird erreicht. Kühlung wird durch den reversiblen Betrieb der Wärmepumpe optional möglich und adressiert damit die steigende Nachfrage nach erhöhtem Sommerkomfort.

Alle Komponenten wurden in einem kostengünstigen Schaumgehäuse mit integrierten Micro-Schallabsorbieren montagefreundlich untergebracht. Das System wurde konzipiert um eine in Bezug auf Druckverlust, Gleichmäßigkeit der Anströmung und Schallreduktion optimierte Strömungsführung aufzuweisen. Gleichzeitig wird durch das Design ein hoher Grad an Vorfertigung und dadurch eine kostengünstige Fertigung ermöglicht.

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt bei diesem Renovierungs-Konzept unabhängig von der Heizung über eine **Kleinst-Trinkwarmwasser-Wärmepumpe** mit einem kompakten Speicher. Dieser kann auch in kleinen Bädern als Vorwandinstallation, optional in der Brüstung unterhalb des Badezimmerfensters oder in eine vorgehängte Fassade integriert werden. Dafür wurde der drucklose Speicher modular aufgebaut (90 l oder 120 l). Die Beladung erfolgt über einen Beladekreis mit Vorlaufschaltung. Der drucklose Speicher wird mit einer Trinkwarmwasserstation kombiniert. Die kompakte Kleinst-WP wird quellenseitig über einen Sole-Luftkühler (wohnungswise Quelle) oder eine Solebusleitung (gebäudezentrale Quelle) versorgt.

Als Option wurde die **Integration** der aktiven Komponenten in die bestehende **Fenster-Brüstung** bzw. in eine **vorgehängte Holzrahmenleichtbaufassade** untersucht. Die Gebäudeintegration (Fassadenintegration) bietet v.a. in kleinen Wohnungen mit i.d.R. sehr kleinen Bädern und Küchen überhaupt erst die Möglichkeit, eine Lüftung zu realisieren und auf ein effizientes dezentrales Heizsystem umzustellen. Zudem werden die Außen- und Fortluftkanäle minimiert und dadurch die Wärmeverluste reduziert und Installationskosten eingespart.

Im Außenlabor der UIBK (PASSYS Testzelle) wurde ein Funktionsmuster einer Testfassade mit integrierter Lüftungs-Heizungswärmepumpe vermessen. Die Testfassade im Maßstab 1:1 (2,7 m x 2,7 m) wurde als vorgefertigte Holzrahmenkonstruktion ausgeführt. Zusammen mit der Außeneinheit der Wärmepumpe wurden mehrere Temperatur- und Feuchtesensoren in die Fassade installiert. Ergänzend zu den Innenlaborversuchen (Leistung und Effizienz) wurden praktische Aspekte, wie z.B. Handhabbarkeit und Installation getestet sowie bauphysikalische Messungen (Schallemissionen, Kondensatvermeidung) durchgeführt. Begleitend wurden durch thermische (3D) und hygrothermische (2D) Simulationen die bauphysikalischen Eigenschaften bewertet.

Abstract

Experience show that in the renovation of residential buildings, which often have small apartments with very inhomogeneous heat supply (gas, oil or firewood stoves, electric boiler, etc., see e.g. EU project Sinfonia) a complete renovation including conversion to central heating and DHW Supply with e.g. connection to district heating, biomass boiler with or without solar thermal or groundwater heat pump is hardly possible. Measures inside the inhabited flats are often associated with number of complications (technical, legal, financial). Thus the centralization of ventilation, heating and domestic hot water (DHW) is often dropped. Unfortunately energy and cost efficient decentralized (and less invasive) solutions for mechanical ventilation (MVHR) and for heat pumps are also not available. Especially for residential buildings with small flats currently available decentralized solutions are often not feasible for space and cost reasons.

The aim of the research project SaLüH! was to provide housing associations, manufacturers of ventilation and heating systems and planners with concepts and development trends for a complete package for decentralized (flat wise) ventilation, heating and DHW supply. The concept allows for a cost-effective and simple (step by step and apartment by apartment) transition to energy efficient building services in the framework of the renovation, without restricting users in their usual living environment. A coordinated and complete renovation package consisting of thermal insulation, windows, a ventilation system with heat recovery, and heating (and possibly cooling) and domestic hot water supply was developed, which can be implemented inexpensively and with minimal intervention in the home. A simulation-based assessment of the concept with respect to the indoor air quality, the thermal comfort and energy efficiency as well as an economic evaluation was performed. Functional models for a **compact hybrid mini heat pump** for ventilation, heating and (optionally cooling) as well as a **compact domestic hot water heat pump** were developed optimized and measured in the laboratory.

In addition to the space required for the technical components for heating and DHW heating, the duct installation represents a further challenge during the refurbishment of buildings. The concept of **active overflow**, which with respect to the concept of extended cascade flow, offers a further reduction of required ducting and thus construction costs. The supply air is transported by means of active overflows (small sound-damped DC fans). Therefore, ceiling suspension in the hallway is not needed. The simplified air supply with active overflow elements was investigated systematically with focus on small apartments with decentralized wall-integrated heat recovery systems and design guidelines were developed. A functional model was created and measured in the laboratory with respect to the efficiency (power consumption) and sound emissions at different volume flows.

The **ventilation and heating heat pump** (compact ventilation unit with integrated mini heat pump) was designed in such a way that optimum efficiency, compactness and investment costs could be achieved. This variable speed mini heat pump with a heating capacity of about 2.5 kW uses the enthalpy of the exhaust air of a mechanical ventilation with heat and moisture recovery as a source. Limiting the air exchange to the limited hygienically required value are of high importance in particular in alpine space with longer phases of low ambient temperatures and correspondingly low absolute humidity in order to avoid or at least reduce the problem of dry indoor air and thus increase the acceptance of MVHR. The use of moisture recovery reduces the problem of dry air and allows higher air change rates. However, moisture recovery can hardly be regulated and care must be taken that it does not get too humid. A decoupling of the heating (or optionally cooling) power from the hygienic

air exchange is achieved by means of additional recirculation of secondary air (heat sink side) and additional ambient air (heat source side). The power limitation of the supply air heating is thus largely eliminated and a significantly better controllability is achieved. Cooling is optionally due to the reversible operation of the heat pump and thus the increasing demand for increased summer comfort is addressed.

All components are mounted in a cost-effective foam casing with integrated micro-sound absorbers, which is easy to install. The system was designed to provide optimized flow control in terms of pressure drop and uniformity of flow and noise reduction. At the same time, the design enables a high degree of prefabrication and thus cost-effective production.

In this renovation concept, DHW preparation is provided by a **compact DHW heat pump** with a compact storage tank independent of the heating system. This compact heat pump can also be integrated in small bathrooms as a pre-wall installation, optionally in the parapet below the bathroom window or in a curtain wall. For this purpose, a modular unpressurised storage tank (90 l or 120 l) was developed. The charging of the tanks takes place via a loading circuit with flow control. The storage-unpressurised tank is combined with a domestic hot water station (so-called fresh water station). The compact mini DHW-HP is supplied on the source side via a brine air cooler (flat-wise source) or a brine bus (building-central source).

As an option, the integration of the active components in the existing window parapet or in a prefabricated timber frame façade was examined. The building integration (façade integration) offers in particular in small apartments with generally very small bathrooms and kitchens if at all, the possibility to realize a mechanical ventilation and switch to a modern and efficient decentralized heating system. In addition, the length of the ambient and exhaust air ducts can be minimized by means of façade integration, thereby reducing heat losses and saving installation costs.

In the outdoor laboratory of UIBK (PASSYS test cell), a functional model of a test façade with **integrated outside unit of the ventilation and heating heat pump** was installed and measured. The **test façade** on a scale of 1:1 (2.7 m x 2.7 m) was designed as a prefabricated timber frame construction. Together with the outdoor unit of the heat pump several temperature and humidity sensors were installed in the façade. In addition to the indoor laboratory experiments (performance and efficiency measurements), practical aspects such as handling and installation were tested and building physics measurements (sound emissions, condensate avoidance) were carried out. Building physics properties were evaluated by accompanying thermal (3D) and hygrothermal (2D) simulations.

1. Ausgangslage

Bei der Sanierung von Geschosswohnbauten zeigt sich, dass eine Gesamtsanierung inklusive Umstellung auf zentrale Lüftung, Heizung und Trinkwarmwasser-Versorgung häufig nicht möglich ist. Gerade für Wohnbauten mit kleinen Wohneinheiten scheiden aber auch derzeitig verfügbare dezentrale Lösungen aus Platz- und Kostengründen aus (vgl. EU-Projekt *Sinfonia*). Es wurden daher innovative Lüftungs- und Heizungs-Konzepte für die Sanierung untersucht und platzsparende Heizungs- und Trinkwarmwasser-Kleinstwärmepumpen mit Außen- bzw. Fortluft als Wärmequelle für diesen Zweck entwickelt, welche optional in die bestehende Brüstung bzw. eine vorgehängte Holzleichtbau-Fassade integriert werden können. Die Wandintegration ermöglicht einen hohen Grad an Vorfertigung, erlaubt eine Installation auch in kleinen Wohnungen und minimiert die Außen- und Fortluftkanäle. Zudem werden für eine störungsarme Sanierung innovative Luftführungskonzepte (z.B. mittels aktiver Überströmung), benötigt, damit die Luftführung mit minimalem Material- und Installationsaufwand ermöglicht werden kann.

Der Stand der Technik wird in Abschnitt 2.1 detailliert dargestellt.

2. Projektinhalt und Ergebnisse

2.1. Stand des Wissens und Stand der Technik

Durch die luftdichte Bauweise von Passivhäusern ist eine mechanische Lüftung für Wohngebäude erforderlich. Die **Lüftungstechnik** im Passivhaus soll vier wesentliche Aufgaben erfüllen: a) Sicherstellen einer guten Raumluftqualität, b) Feuchteschutz, c) Minimierung der Lüftungswärmeverluste durch Wärmerückgewinnung und d) den Transport der nötigen Heizleistung über die Zuluft. Aus bauphysikalischer und hygienischer Sicht ist Wärmerückgewinnung nicht erforderlich, jedoch ist durch die Verwendung einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung neben der Reduzierung der Wärmeverluste auch hoher thermischer Komfort garantiert. Die Zuluftheizung ermöglicht den Verzicht auf ein konventionelles Heizsystem und bietet damit ein großes Potential Kosten zu reduzieren. In einem Mehrfamilienhaus besteht die Möglichkeit, den Luftaustausch über eine zentrale mechanische Be- und Entlüftung sicherzustellen. Andererseits ist es aber auch möglich, die Wohnungen separat zu lüften. Dabei bleiben die verschiedenen Brandabschnitte getrennt. Der Wartungsaufwand erhöht sich jedoch, wenn zu Wartungszwecken Zugang zu den einzelnen Wohnungen nötig ist. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, eine Wohnung mechanisch zu lüften, nämlich durch: a) Abluftanlage (ohne Wärmerückgewinnung), b) dezentrale wohnungsweise Komfortlüftung, c) Einzelraumlüftung – Raumkombinationen, d) Pendellüfter. Es gibt eine Vielzahl von nach dem PHI (Passivhausinstitut) zertifizierten Lüftungsgeräten mit Luftvolumenströmen unter 600 m³/h. Für die Anwendung in kleinen Wohnungen sind Volumenströme zwischen etwa 50 m³/h und 150 m³/h interessant.

Die Heizlastberechnung in Passivhäusern erfolgt i.d.R. nach dem PHPP-Verfahren. Als oberer Grenzwert für die Heizlast bei Passivhäusern gelten ca. 10 W/m². Eine personenbezogene Auslegung des Luftvolumenstroms mit 20 bis 30 m³/h und Person im Wohnbau sollte als Grundlage dienen. Im Optimierungsprozess der Gebäudehülle wird meist ein Zielwert des Heizwärmebedarfs von 15 kWh/(m².a) angestrebt. In der Praxis haben sich zwei wesentliche Grundtypen von Heizsystemen für Passivhäuser herausgebildet: Heizung mit Wärmepumpen und Wärmepumpenkompaktgeräten,

sowie Heizung mit Biomassekesseln unterstützt durch Solaranlagen. Wärmepumpen-Kompaktgeräte stellen dabei eine der häufigsten Versorgungstechniken im Passivhaus dar. Benötigt werden für Passivhäuser Anlagen bzw. Wärmepumpen kleiner Leistung, im Bereich 1,5 bis 2,5 kW.

Trinkwarmwasser-Wärmepumpen (TWW-WP) stellen eine Möglichkeit zur effizienten Warmwasserbereitung, unabhängig von einem zentralen Heizungssystem, dar. Es kann grundsätzlich zwischen folgenden Bauarten unterschieden werden:

- a) Monoblock intern mit integriertem Standspeicher,
- b) Monoblock intern mit integriertem wandhängendem Speicher,
- c) Kältemittel Split Geräte,
- d) TWW-WP mit separatem Speicher.

Grundsätzlich lassen sich alle Systeme durch Solarthermie ergänzen. Alle recherchierten TWW-WP sind Speichersysteme. Die Wärmepumpen haben Wärmeleistungen im Bereich 0,5 kW bis 3 kW und können daher einphasig an das Stromnetz angeschlossen werden. Die aktuell erhältlichen Geräte sind daher überwiegend für den Einsatz in Einfamilienhäusern oder anderen Anwendungen, in denen ein entsprechender Aufstellraum zur Verfügung steht, vorgesehen. Als häufigste Bauform ist die Monoblock TWW-WP mit integriertem Standspeicher anzutreffen. Als kompakte Bauformen, die grundsätzlich für Etagenwohnungen geeignet sind, kommen vermehrt wandhängende Lösungen und/oder Split Systeme auf den Markt. Die TWW-WP stellt eine Alternative zu den sehr kostengünstigen aber ineffizienten Elektro-Boilern dar.

Die Idee eines einfachen kostengünstigen und kompakten Systems für dezentrale Lüftung, Heizung, Kühlung sowie ggf. Warmwasser ist so alt wie die Idee des Passivhauses selbst. Eine Vielzahl solcher **(Wärmepumpen-) Kompaktgeräte** wurde entwickelt und verschiedene Ausführungen sind bzw. waren am Markt erhältlich. Diese Lüftungs-Kompaktgeräte mit Wärmerückgewinnung beinhalten eine kleine Fortluftwärmepumpe für die Heizung und die Brauchwassererwärmung. Mit diesen können Passivhäuser vollständig mit Wärme und frischer Luft versorgt werden. Die grundlegende Idee hinter dieser Technik ist das Zusammenführen von Heizung, Warmwasser und Lüftung in einem Gerät mit optimal aufeinander abgestimmten Komponenten. Bei der Heiz- bzw. Wärmepumpenleistung können entsprechend grob zwei Klassen unterschieden werden: klassische Kompaktgeräte mit 1,4 kW bis um die 2 kW und „große“ Kompaktgeräte mit 4 bis zu 13 kW bzw. 22 kW. Sowohl die Luftmengen (teilweise 200 bis 350 m³/h bzw. 500 bis 600 m³/h) als auch die Abmessungen der größeren Kompaktgeräte liegen mit etwa 2 m / 1 m / 0,6 m teilweise deutlich über dem, was unter kompakt vermutet werden würde, was teilweise auch an relativ großen Trinkwasserspeichern liegt. Die Luftmengen bewegen sich bei den meisten der zertifizierten Geräte in der Größenordnung von 50 bis 200 m³/h. Sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Effizienz (vgl. (Bettgenhäuser, et al., 2011), (Pehnt, 2009)) gibt es noch ein großes Verbesserungspotential. Eine weite Verbreitung finden diese Systeme derzeit hauptsächlich deswegen nicht, weil die Investitionskosten für die Anlagen, auch wegen der bisher geringen Stückzahlen, noch zu hoch sind.

Im für Passivhäuser benötigten Leistungsbereich verfügbar – und dies aufgrund der hohen Stückzahl zu geringen Preisen – sind sogenannte **(Klima-) Splitgeräte**. Im Gegensatz zu Fortluft-Wärmepumpen sind Split- bzw. Multisplitgeräte unabhängig von der Lüftung. Diese Außenluft-WP (in der Regel reversible Luft-Luft-Wärmepumpen mit getrenntem Kondensator und Verdampfer) arbeiten gebäudeseitig rein mit Umluft. Splitgeräte werden mittlerweile von nahezu allen namhaften Firmen

mit durch die Invertertechnologie hoher Effizienz angeboten. Nachteilig sind die Geräuschentwicklung, die i.d.R. optisch wenig attraktiven Inneneinheiten und im Falle von Multisplit die relativ hohen Kosten. Ein weiterer Nachteil von Multisplitgeräten ist der relativ hohe Kältemittelbedarf. Splitgeräte werden primär von asiatischen Herstellern wie Daikin, Toshiba, Mitsubishi, LG, Panasonic u.v.m. angeboten, wobei auch europäische Firmen Geräte in ihr Portfolio aufgenommen haben (Stiebel-Eltron, Viessmann, etc.). Es gibt Splitgeräte bereits ab einer Heizleistung von 300 W (niedrigste Stufe) aber auch bis hin zu 8 kW. Die Schallleistungspegel dieser Geräte liegen je nach Betriebsmodus bei den Außeneinheiten in einer Bandbreite von 59 bis 70 dB(A) und bei den Inneneinheiten je nach Leistungsstufe zwischen 43 und 65 dB(A). Bei manchen Geräten liegt der Schalldruckpegel auf der niedrigsten Leistungsstufe bei nur 19 dB(A).

Bereits im EU-Projekt *iNSPIRe* konnte eine Fortluft-Wärmepumpe mit einer Heizleistung von knapp 1 kW in Kombination mit einem Lüftungsgerät vollständig in eine Fassade integriert und in einem Demo-Gebäude in Ludwigsburg (D) getestet werden. Diese Größenordnung der Heizleistung ist ausreichend für Sanierungen auf Passivhausstandard. Häufig kann dies jedoch nicht erreicht werden.

Aktive Überströmer wurden im Rahmen eines Produktwettbewerbs im Mai 2011 von mehreren Firmen entwickelt und zum Teil patentiert. Dabei entstanden sowohl Produkte, welche den Ventilator im Türblatt oder Türrahmen als auch über der Tür platzieren.

2.2. Stand des Wissens zur Kopplung von Simulationstools

Derzeit ist die größte Herausforderung für jeden Anwender der Gebäude- und Anlagensimulation die große Anzahl verschiedener Simulationstools. Jede Simulationssoftware verfügt über ein Hauptanwendungsgebiet und ist für genau dieses spezielle Problem optimiert. Selbst eine Software mit einer breiten Palette von Anwendungen wie MATLAB und Simulink oder spezialisierter Multiphysik Software wie ANSYS oder COMSOL können nicht jedes Problem in akkurater und effizienter Weise berechnen.

Dies wird hauptsächlich durch die verschiedenen Solver der Programme verursacht. Ein spezifisches Problem kann damit zwar sehr genau und effizient gelöst werden, für andere Probleme ist dieser eine Solver jedoch nutzlos.

Die Kombination (Kopplung) verschiedener Software Tools wird die Zukunft in der physikalischen Simulation sein.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Kopplung von Simulationstools müssen differenziert betrachtet werden und für jedes Problem die beste Lösungsmöglichkeit eruiert werden. Es stehen folgende Modellierungsansätze zur Verfügung (vgl. Abbildung 1):

- **Klassische Simulation**
Geschlossene Simulation mit einem Tool und einem Gleichungslöser.
- Vorteile: nur eine Simulationssoftware, sehr genaue Lösung.
- Nachteile: nicht jedes Problem ist in praktikabler Zeit mit diesem Verfahren lösbar.
- **Modellseparierung**
Ein Simulationstool mit mehreren Gleichungslösern.
- Vorteile: nur eine Simulationssoftware, theoretisch genauestes und schnellstes Lösungsverfahren.

- Nachteile: selten praktikabel, da sich Modelle nie optimal trennen lassen, die Rechengenauigkeit hängt von der Modellierung ab.

- Geschlossene Numerische Simulation

Es wird ein globaler Gleichungslöser für mehrere Modellierungstools bereitgestellt.

- Vorteile: wie klassische Simulation genaueste Lösung mit einem Solver.

- Nachteile: mehrere Simulationstools, hoher Entwicklungsaufwand von Modellen, nicht jedes Problem ist in praktikabler Zeit mit diesem Verfahren lösbar.

- Co-Simulation

- Vorteile: einfache Modellierung, verteilte Simulation (z.B. in der Cloud) möglich.

- Nachteile: Rechenzeit zumeist nicht optimal, die Genauigkeit der Lösung hängt von der Problemstellung ab.

Ein weit verbreiteter Standard, der in der Autoindustrie entwickelt wurde, ist FMI (Functional Mock-up). Dieser Standard ist sehr vielfältig, aber auch sehr komplex und ist aufwendig in der Implementierungsphase.

Für die wissenschaftliche Gebäude- und Anlagensimulation ist "Rapid-Prototyping" eine äußerst wichtige Funktion. Die Functional Mock-up Schnittstelle ist dafür nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde das Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) entwickelt (vergleiche (Wetter, 2011)). BCVTB ist Open-Source Software und kostenlos auf <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb> erhältlich.

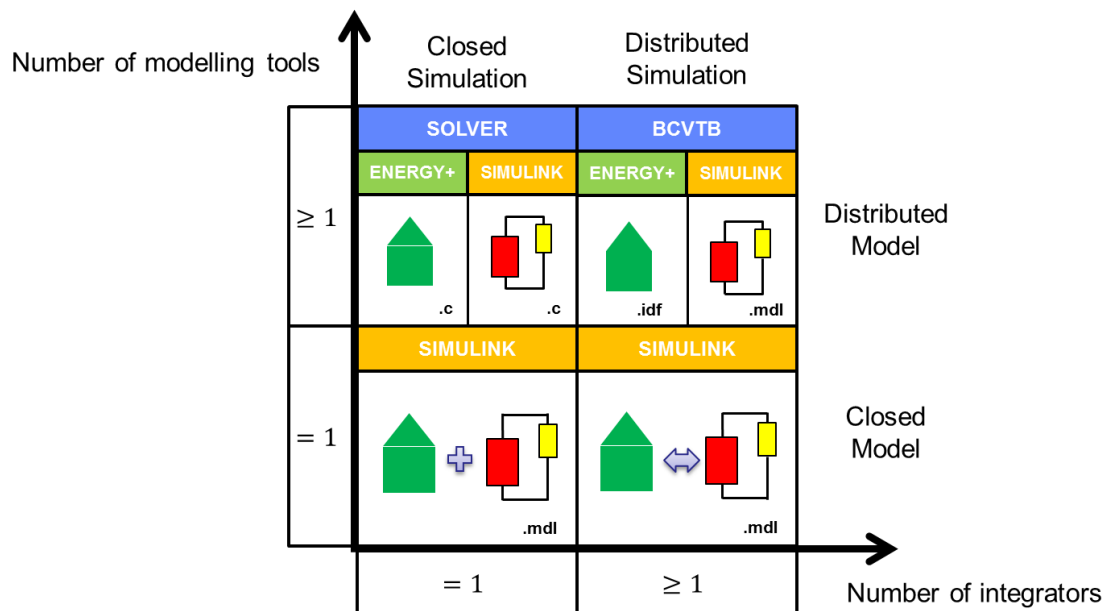


Abbildung 1: Definition der Kopplung von Simulations-Tools (Beispiel mit Energy Plus und Simulink)

2.3. Referenzgebäude für die Betrachtungen in SaLüH!

Für das Projekt SaLüH! stand kein definiertes Gebäude für die Entwicklung eines Sanierungskonzepts zur Verfügung. Vielmehr wurde versucht ein generisches Objekt als Referenzgebäude zu definieren, um die im Rahmen des Projekts entwickelten Lösungen in möglichst vielen Situationen (räumlich, geografisch, gesetzlich) anwenden zu können.

Abbildung 2 zeigt das erstellte Referenzgebäude, ein typisches mehrgeschossiges Wohnhaus (MFH) in Innsbruck mit zehn Wohnungen (zwei symmetrische Wohnungen pro Etage). Die untersuchte Wohnung (Wohnnutzfläche 70,8 m²) besteht aus sechs Zonen: Küche (KÜ), Schlafzimmer (SZ), Korridor (Flur) (KO), Bad (BA), Kinderzimmer (KZ) und Wohnzimmer (WZ). Dieses Gebäude wurde auf Basis von typischen Wohnungsgrundrissen bzw. Gebäudetopologien des EU-Projekts Sinfonia (in dem großflächig in Innsbruck und Bozen Sanierungslösungen umgesetzt werden) entwickelt. Der Grundriss des Gebäudes kam zuvor bereits beim „Component Award 2016“ des Passivhausinstituts (Passivhausinstitut, 2018) zur Anwendung.

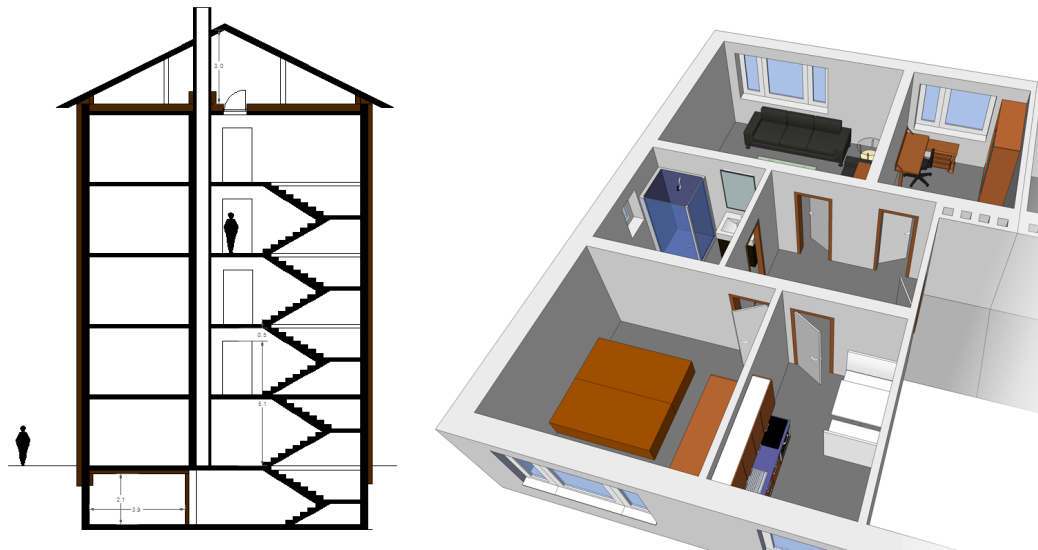


Abbildung 2: Mehrfamilienhaus Schnitt (links) (in Anlehnung an (Passivhausinstitut, 2018)), 3D Ansicht einer Wohnung (Wohnnutzfläche 70,8 m²) mit sechs Räumen (rechts)

Die Eckdaten des Gebäudes und der zugehörigen Haustechnik sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eckdaten Referenzgebäude und Referenzhaustechnik

Anzahl der Wohnungen	10
Energiebezugsfläche	732 m ² , 70,8 m ² pro Wohnung
Heizwärmebedarf	28,4 kWh/(m ² .a)
Energieerzeuger	Außenluftwärmepumpe für Heizung und WW
Ergebnisse (Simulation bzw. PHPP Berechnung) für 10 Wohnungen	
Wärme von der zentralen Wärmepumpe	
- für Trinkwarmwasser	32,3 MWh/a
- für Heizung	21,7 MWh/a

Abbildung 3 zeigt den monatlichen Heizwärmebedarf des Gebäudes (berechnet mit dem PHPP).

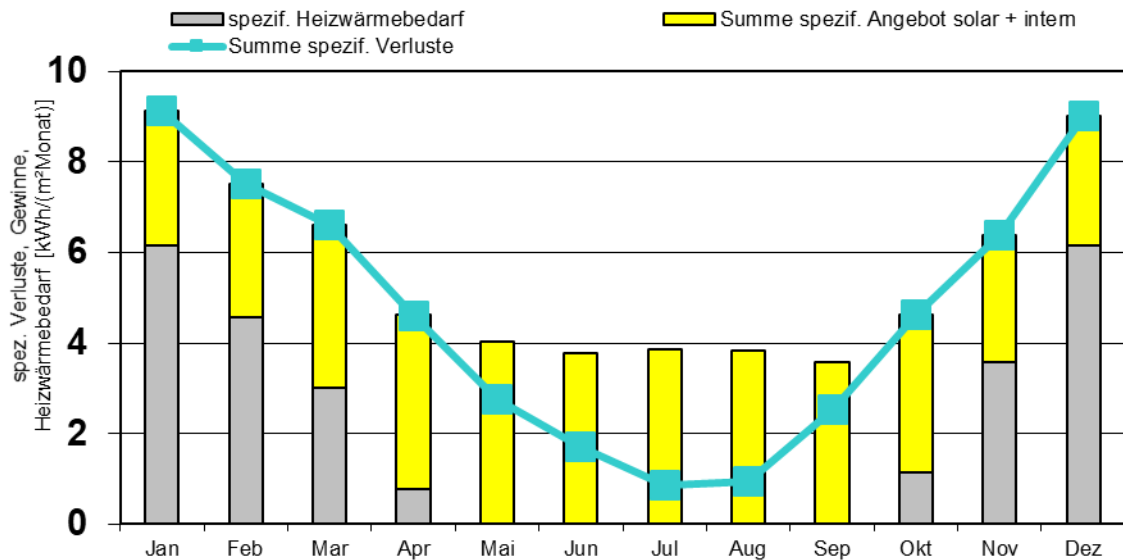


Abbildung 3: Monatlicher HWB des Referenzgebäudes nach PHPP (dargestellt auch die Summe aller Verluste und aller Gewinne)

2.4. Sanierungskonzept von SaLüH!

2.4.1. Einleitung

In denen im Rahmen des Projekts gegebenen Wohnungssituationen, also kleine Wohnungen ohne zentrale Heizungs- und Warmwasserbereitung, ist das Platzangebot für neue effiziente und kostengünstige Heizungs- und Lüftungstechnik sehr begrenzt.

Es wurden verschiedene Konzepte für die Bereitstellung der Heizwärme mittels Lüftungsheizungs-wärmepumpe (Fortluftwärmepumpe) und des Trinkwarmwassers mit einer separaten Trinkwasserwärmepumpe ausgearbeitet.

2.4.2. Heizungswärmepumpe

Für die Lüftungsheizungs-wärmepumpe hat es sich als vorteilhaft erwiesen, das Gerät in eine Innen- und eine Außeneinheit aufzutrennen (siehe Abbildung 4). Die Hauptursache ist, dass sich eine vollständige Fassadenintegration (mit den vorliegenden Randbedingungen) als nicht realisierbar herausgestellt hat. Diese wäre nur durch die Entwicklung neuer Komponenten (konkret Miniaturisierung von Verdampfer und Kondensator durch den Einsatz neuer Materialien) möglich.

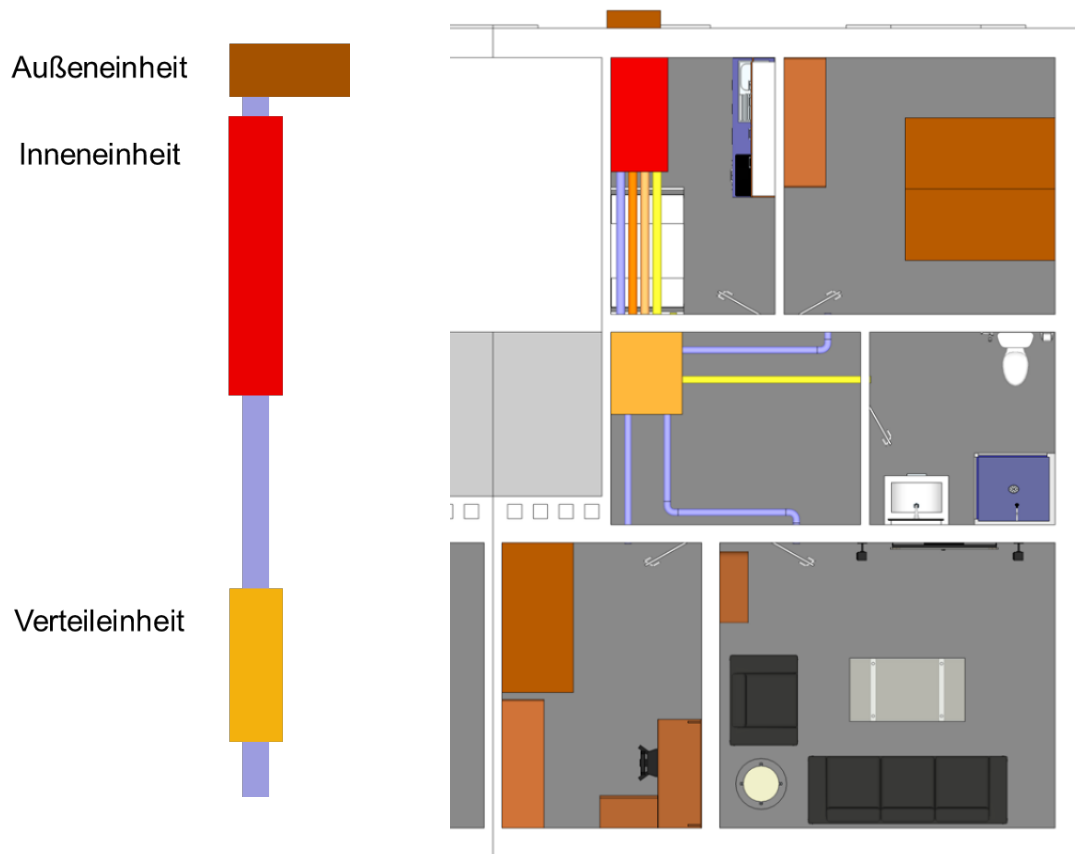


Abbildung 4: Schema des Konzepts der Lüftungs-Heizungs-WP und Grundriss der Wohnung mit Anordnung der Komponenten (Außen- und Inneneinheit sowie Luft-Verteilung) (Siegele, 2019)

Das Innengerät (siehe Abbildung 5) wird als Deckengerät ausgeführt und enthält die notwendigen Ventilatoren für das Lüftungsgerät und den Wärme- bzw. Enthalpieübertrager. Zudem sind die Kondensatoren der Wärmepumpe im Zuluft- bzw. Sekundärluftstrom positioniert. Zusätzlich sind die Außenluft- und Fortluft-Schalldämpfer bereits integriert.

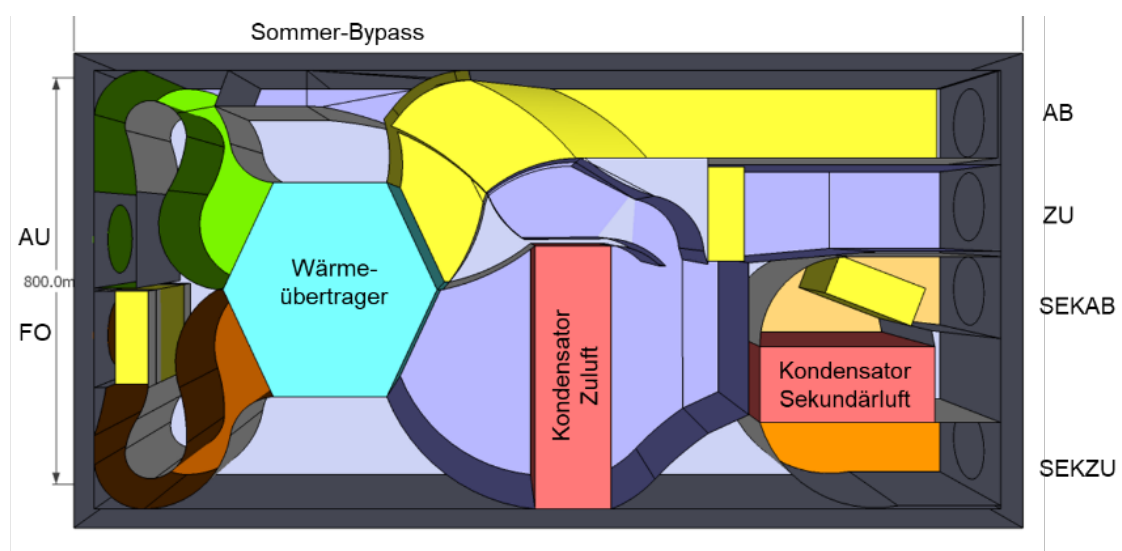


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Inneneinheit (Siegele, 2019)

Die Außeneinheit enthält den Kompressor und den Verdampfer. Der Verdampfer verwendet als Quellen den Fortluftvolumenstrom und zusätzlich wird bei erhöhten Heizleistungsanforderungen Außenluft beigemischt. Um die Heizleistung über die Luft zuführen zu können, wird neben dem hygienischen Luftwechsel auch Sekundärluft verwendet. Beide Luftströme können über je einen Kondensator aufgeheizt werden. Die Sekundärluft wird ausschließlich dem Gang/Korridor entnommen und aufgeheizt wieder zugeführt. Dies ermöglicht es, wie mit einem zusätzlichen Fan Coil, in den Flur zusätzlich Heizleistung einzubringen.

Der hygienische Luftwechsel des Geräts beträgt $100 \text{ m}^3/\text{h}$, der Luftwechsel der Sekundärluft max. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und dem Verdampfer können bis zu $250 \text{ m}^3/\text{h}$ Außenluft zugeführt werden.

2.4.3. Trinkwarmwasser-Wärmepumpe

Um das Trinkwarmwasser zur Verfügung zu stellen, steht als Wärmequelle nur die Außenluft zur Verfügung, da die Abluft bereits von der Heizungs-Lüftungswärmepumpe genutzt wird. Um den Einsatz eines Kältemitteltechnikers (m/w) in der Wohnung zu vermeiden, wird anstelle einer Split-Wärmepumpe auf ein Konzept mit Sole-Bus und Sole-Luft-Kühler gesetzt. Solch ein System kann von einem Heizungsinstallateur (m/w) installiert und in Betrieb genommen werden.

Hierfür wurde ein Konzept entwickelt, das einen möglichst geringen Platzbedarf hat und ein Zapfprofil mit zwei Duschzapfungen abdecken kann. Es wurde davon ausgegangen, dass in den hier betrachteten Wohnungen mit kleinen Badezimmern keine Badewannen vorhanden sind. Das Konzept beinhaltet einen drucklosen Speicher, der quaderförmig gebaut werden kann und dadurch gut in die Fassade integrierbar ist. Zusätzlich wird dann eine Trinkwarmwasserstation benötigt. Der Anschluss der Wärmepumpe an die Wärmequelle kann bei Wandeinbau entweder über einen wandintegrierten Verdampfer erfolgen oder über einen Solebus, der einen Lüfter beispielsweise auf dem Dach des Gebäudes mit den Wärmepumpen in den einzelnen Wohnungen verbindet. Das Konzept des Solebus kann auch verwendet werden, wenn das Trinkwarmwassersystem innerhalb des Badezimmers installiert wird.

Mittels Simulation wurde ermittelt, dass eine Speichergröße von mindestens 90 Litern und eine Wärmepumpenleistung von 1 kW bis 2 kW benötigt werden. Zusätzlich kann dann noch eine elektrische Nachheizung bis etwa 2 kW eingebaut werden, so dass die Anschlussleistung unter 3,5 kW bleibt und auf einen dreiphasigen Stromanschluss verzichtet werden kann.

Die Abbildung 6 zeigt eine Designstudie, wie die 90 Liter Speichervolumen auf drei Module verteilt werden können, die dann je nach geometrischen Gegebenheiten angeordnet werden können. Das vierte Modul wird dann jeweils mit der Sole-Wasser-WP belegt.

Damit ist eine Integration in eine Vorhangfassade oder in eine Bestandswand (beispielsweise unter einer Fensterbrüstung) genauso möglich wie eine Vorwandmontage.

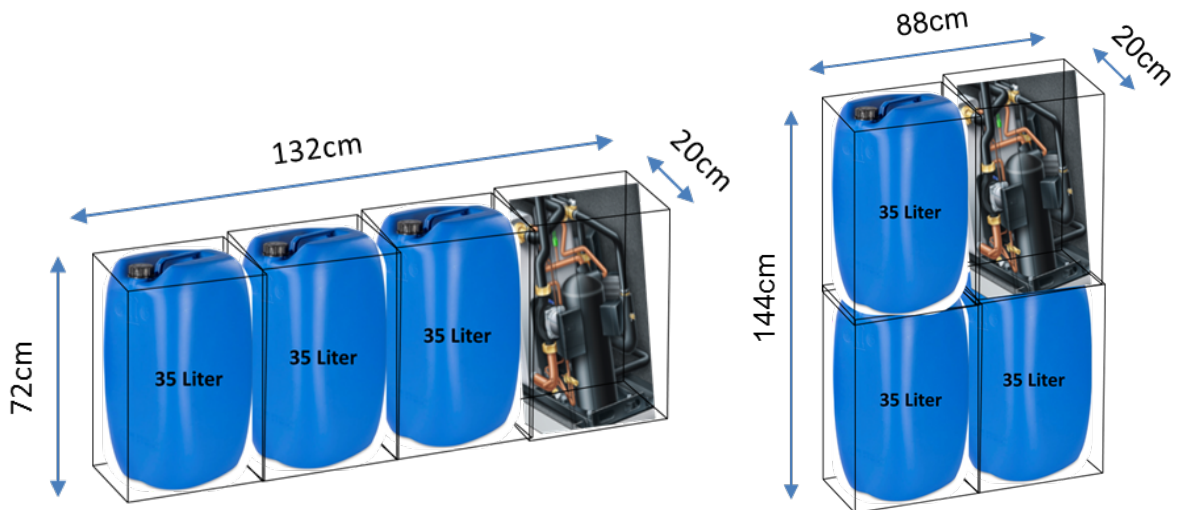


Abbildung 6: TWW-Wärmepumpensystem für Wandeinbau oder Vorwandinstallation (Quelle: Vaillant)

Für die Trinkwarmwasserwärmepumpe wurde ein neuartiges Systemkonzept entwickelt, das eine gute Schichtung des Speichers sicherstellt und damit ein geringes Speichervolumen bei gutem Komfort möglich macht. Durch das geringe Speichervolumen kann das System problemlos in Bestandswände oder Vorhangfassaden integriert werden.

Das Konzept beinhaltet einen Bypass mit Mischventil im Beladekreis von der Wärmepumpe. Das Speichermedium kann über den Bypass im Kreis gefahren werden, bis die Solltemperatur zur Speicherbeladung erreicht ist. Dadurch wird verhindert, dass kühleres Wasser in den Speicher gefördert und dieser dadurch durchmischt wird. Es steht zu jedem Zeitpunkt Wasser auf Zapftemperatur zur Verfügung.

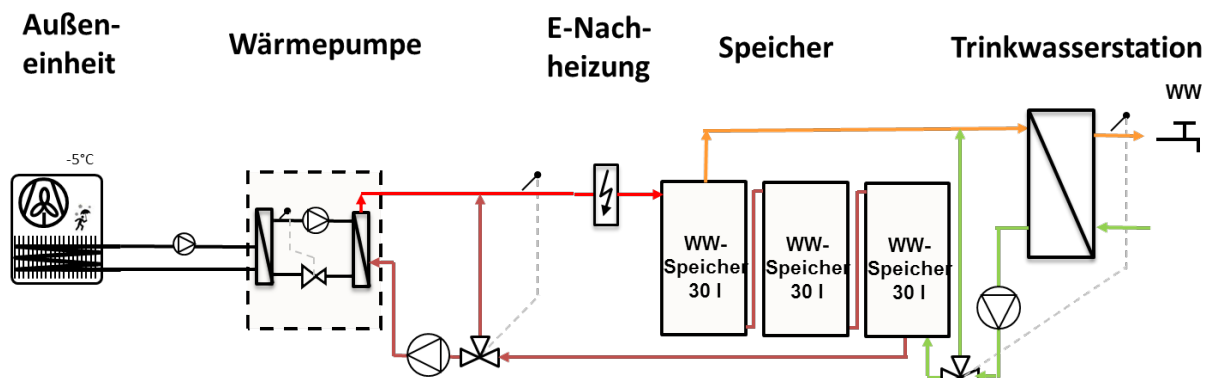


Abbildung 7: Schema Systemkonzept der Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit drucklosem modularem Speicher und Frischwasserstation

Zur besseren Integration in das Gebäude wird ein sehr flacher, quaderförmiger Speicher verwendet. Dieser ist aus Kunststoff gefertigt und wird daher drucklos betrieben. Die Trinkwasserzapfung wird über eine Trinkwasserstation mit einem externen Plattenwärmeübertrager durchgeführt.

Funktionsmuster für einen wandintegrierbaren Speicher und eine dafür geeignete Wärmepumpe, die ebenfalls in die Fassade oder Bestandswand integriert werden kann, wurden realisiert (siehe Abbildung 8). Das Funktionsmuster wurde modular aufgebaut. Jedes Modul enthält etwa 30 Liter Wasserinhalt. Durch die Modularität kann der Speicher in verschiedenen Größen ausgeführt und auch die räumliche Anordnung je nach Einbausituation variiert werden.



Abbildung 8: Funktionsmuster Speichereinheit bestehend aus drei Modulen (links) und Trinkwarmwasserwärmepumpe (rechts) für Gebäudeintegration oder Vorwandinstallation Messergebnisse und Modellvalidierung zur Heizungswärmepumpe

Im Rahmen des Projekts wurden Vermessungen der Komponenten und des Funktionsmusters der Heizungswärmepumpe durchgeführt. Ebenso wurden die Parametrierung und Validierung der entwickelten Simulationsmodelle durchgeführt.

Die vom Industriepartner *SIKO Energiesysteme* ausgeführte Lüftungs-Heizungs-Wärmepumpe wurde ausführlich im Lüftungs- und Kompaktgeräteprüfstand des AB Energieeffizienten Bauens vermessen. Es wurden zwei verschiedene Kompressoren mit unterschiedlichen Leistungsgrößen verbaut und vermessen. So liegen Messwerte für jeweils ein Funktionsmuster mit einer Design-Heizlast von ca. 2500 W und ca. 1400 W vor, welche den Bereich EnerPHit-Sanierung, bzw. der Sanierung zum Passivhausstandard abdecken. Ein Einsatz ist auch in anderen effizienten Gebäuden, sowohl in der Sanierung, als auch im Neubau Research Report SaLüH! möglich. Beide Typen wären auch im Neubau in den ab 2020 lt. OIB 6 vorgesehenen nZEBs einsetzbar. Abbildung 9 zeigt das Funktionsmuster im Labor der UIBK.

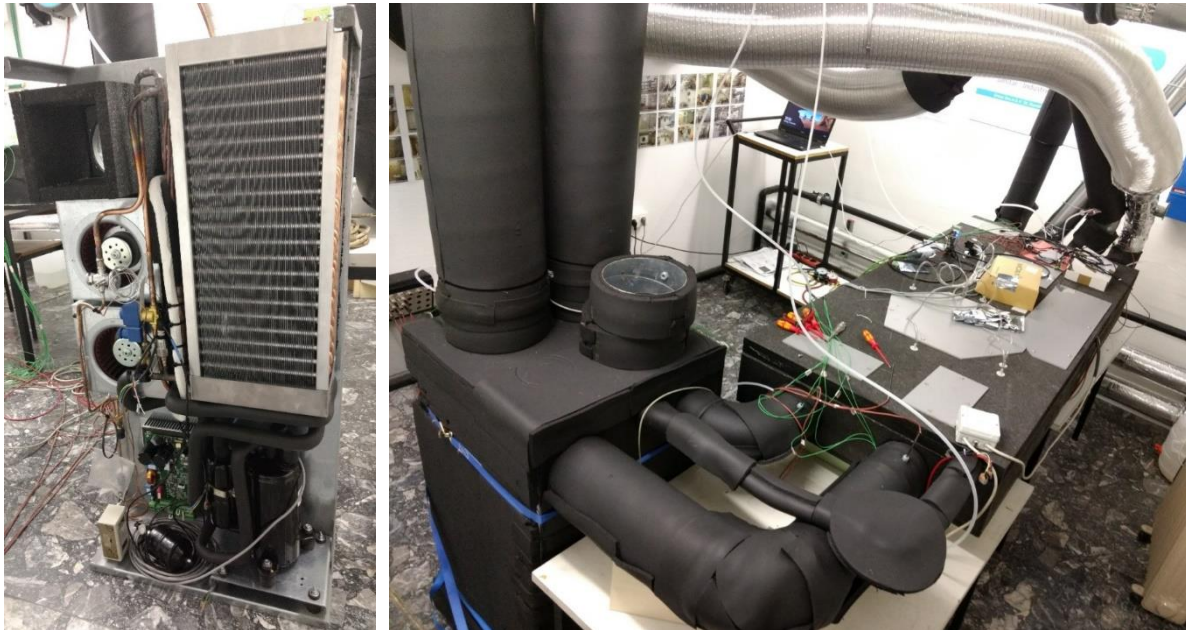


Abbildung 9: links: Außeneinheit beim Einbau, rechts: Gesamtaufbau des Funktionsmusters mit Außen- und Inneneinheit im Kompaktgeräteprüfstand der UIBK

Für das Funktionsmuster kommt ein Feuchteübertrager der Firma *Paul Wärmerückgewinnung GmbH* zum Einsatz. Im Vorfeld wurde dieser Feuchteübertrager (und auch der Wärmeübertrager in der gleichen Baugröße) im Lüftungs- und Kompaktgeräteprüfstand der Universität Innsbruck ausführlich vermessen. Aus diesen Messdaten konnte dann ein physikalisches Wärme- und Feuchteübertragermodell abgeleitet werden. Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der parametrisierten Simulation und der Messergebnisse für den Feuchteübertrager eingesetzt im Funktionsmuster.

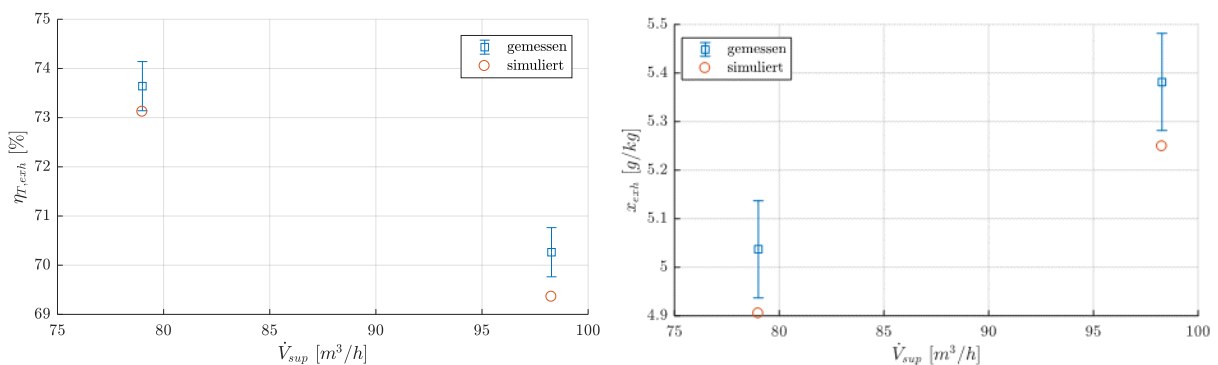


Abbildung 10: Ergebnisse für den Feuchteübertrager des Funktionsmusters, links: Wärmebereitstellungsgrad fortluftseitig, rechts: absolute Feuchte Fortluft

Neben dem Feuchte- bzw. Wärmeübertrager spielen der Kompressor und der Inverter für den Kältemittelkreislauf eine bedeutende Rolle. Aus diesem Grund wurden im Labor der Universität Innsbruck zwei Kompressoren und ein Inverter im Detail zu vermessen, um diese charakterisieren zu können.

Abbildung 11 zeigt die Messergebnisse für den Kompressor Hitachi Highly WHP01900BCK.

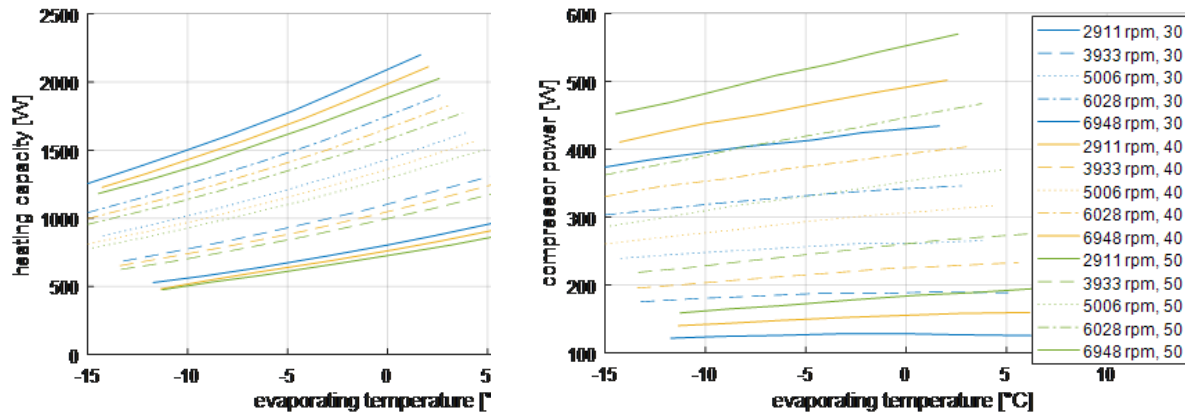


Abbildung 11: links: Heizleistung, rechts: Leistungsaufnahme (Kompressor WHP01900BCK)

Die Effizienz des Inverters ist beim Einsatz von drehzahlregelbaren Kompressoren ebenfalls ein wichtiger Parameter für die Gesamteffizienz des Systems. Deshalb wurde der Wirkungsgrad eines Inverters für verschiedene Betriebszustände gemessen und in einem Modell abgebildet. Abbildung 12 zeigt die Messergebnisse der Effizienz des Inverters für verschiedene Betriebszustände aufgetragen über der Eingangsleistung.

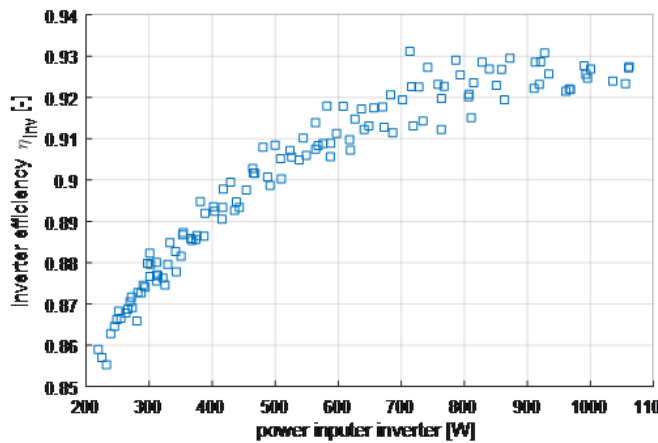


Abbildung 12: Inverterwirkungsgrad über der Eingangsleistung

Parallel zu den Messungen wurde ein Kompressor-Modell entwickelt, das in Zusammenspiel mit einem Kältekreislaufmodell die Prognose der Effizienz von solchen Systemen ermöglicht.

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Validierung dieses Modells. Hier konnten sehr geringe Abweichungen erzielt werden und diese Abweichungen sind im Grunde durch die Polynomqualität charakterisiert.

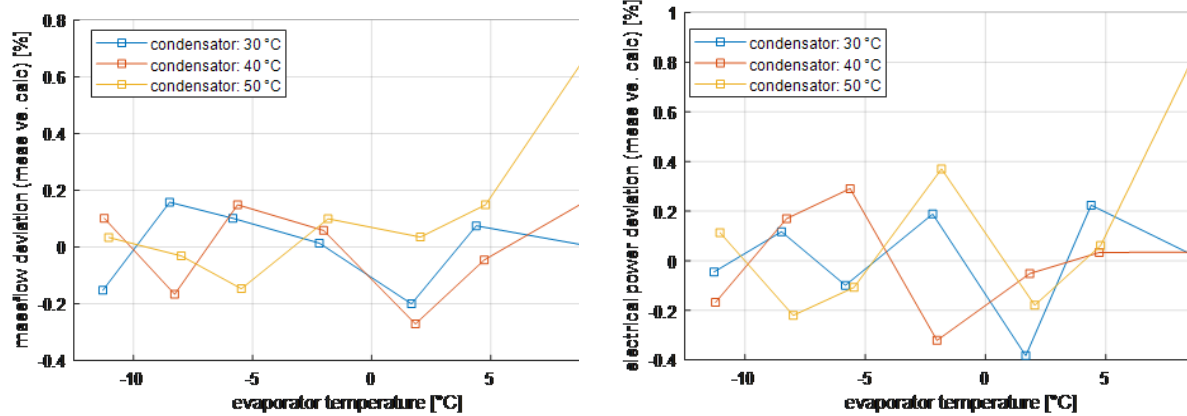


Abbildung 13: links: Validierung Massenstrom, rechts: Validierung elektrische Leistungsaufnahme

Abbildung 14 zeigt das Kompressormodell angewandt auf die Kältekreisimulation des Funktionsmusters. Auch hier können Abweichungen unter 4 % für die thermische Leistung und unter 1 % für die elektrische Leistung beobachtet werden.

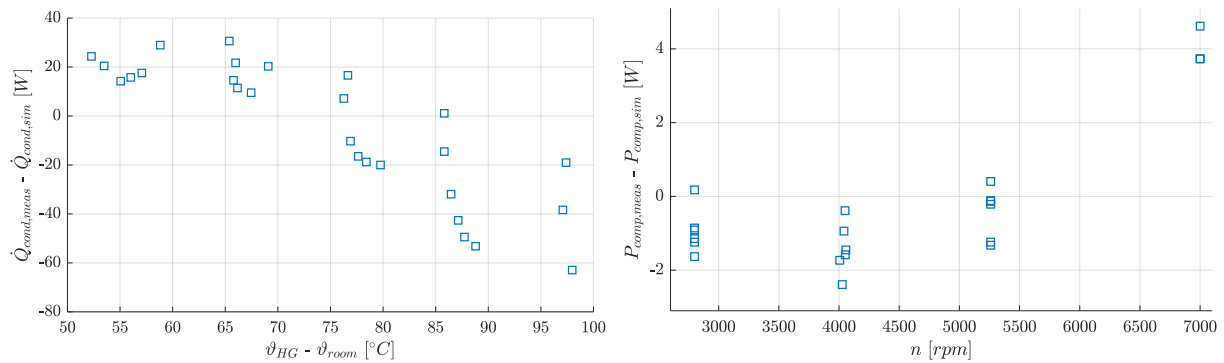


Abbildung 14: links: Leistung Kondensator (gemessen-simuliert), rechts: elektrische Leistungsaufnahme (gemessen-simuliert)

Zusammen mit Arbeitspaket 3 wurde ein vereinfachtes Berechnungstool für die Ermittlung der Jahresarbeitszahl von Luft-Luft-Wärmepumpen auf Basis der EN 14825 entwickelt. Die Methodik wurde dahingehend erweitert, dass mit einem Satz von Messdaten beliebige Heizlastkurven berechnet werden können und nicht wie bei der Norm-Variante nur ein Design-Gebäude. Erst damit wird eine Prognostizierbarkeit ermöglicht. Abbildung 15 zeigt eine mögliche Heizlastkurve und das Kennfeld der Wärmepumpe (für das Funktionsmuster), welches anhand von fünf Messpunkten (identische Anzahl zu EN 14825, aber andere Messpunkte) mittels der neu entwickelten Methodik erstellt wird.

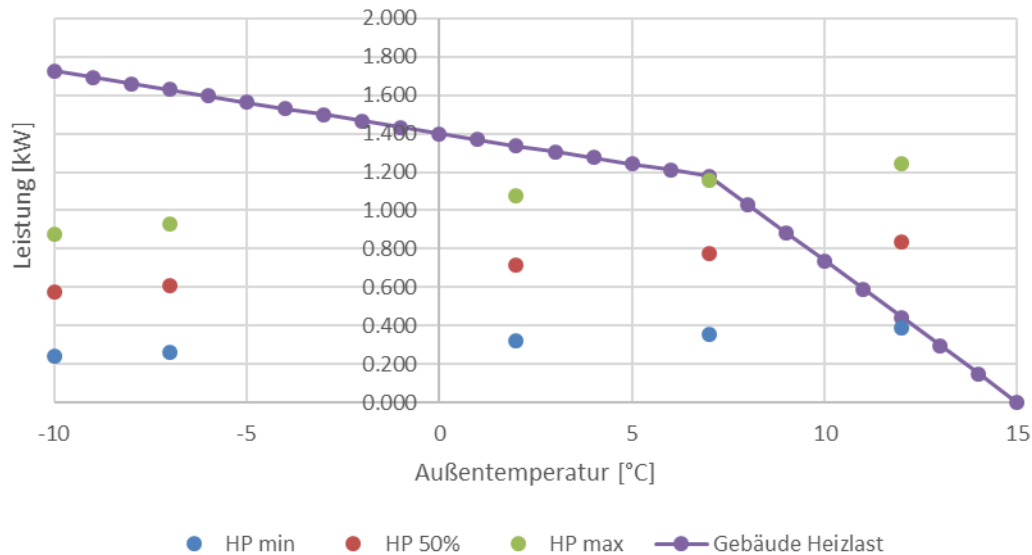


Abbildung 15: Heizlastkurve und Wärmepumpen-Kennfeld

Zusammenfassend sind nachfolgend die Leistungsdaten der beiden Varianten des Funktionsmusters dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die Leistungs-Daten der Lüftungs-Heizungswärmepumpe

Parameter	Variante 2500 W	Variante 1400 W
Wärmebereitstellungsgrad zuluftseitig (100 m ³ /h)	82,6 %	82,6 %
Wärmebereitstellungsgrad fortluftseitig (100 m ³ /h)	70,2 %	70,2 %
Feuchterückzahl (100 m ³ /h)	59,3 %	59,3 %
Ventilator-Strombedarf (100 m ³ /h, 100 Pa)	40,4 W	40,4 W
Maximale Heizleistung mit Sekundärluft (+2 °C)	1922 W	1076 W
COP bei maximaler Heizleistung mit Sekundärluft (+2 °C)	1,4 W/W	2,2 W/W
Minimale Heizleistung mit Sekundärluft (+2 °C)	556 W	319 W
COP bei minimaler Heizleistung mit Sekundärluft (+2 °C)	2,6 W/W	4,3 W/W
JAZ bei einer Design-Heizlast von 2 kW inkl. Nachheizung	1,9 W/W	2,0 W/W
JAZ bei einer Design-Heizlast von 2 kW ohne Nachheizung	1,9 W/W	2,8 W/W

2.5. Messergebnisse zur Trinkwarmwasser-Wärmepumpe

Im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen zur Trinkwasser-Wärmepumpe wurde zunächst eine marktverfügbare sogenannte Boiler-Wärmepumpe vermessen. Damit konnte der im Projekt neu errichtete Prüfstand getestet, ein Benchmark erstellt und das im Projekt entwickelte Wärmepumpenmodell verifiziert werden. Außerdem wurde das Gerät auf Eignung als Grundlage für die Wärmepumpenentwicklung innerhalb des Projekts SaLüH! untersucht. Das Ergebnis der Messung zweier baugleicher Boiler-Wärmepumpen war, dass die untersuchten Wärmepumpen eine vergleichsweise geringe Heizleistung (zwischen 450 W und 800 W) aufweisen und die Leistungszahl (COP) deutlich unter den Erwartungswerten liegt (COP von ca. 2,0 statt 2,6 laut Datenblatt). Außerdem ist das Gerät nur für den Einsatz mit Abluft geeignet, da es bei Temperaturen unter 7 °C wegen zu häufigen Enteisens auf Störung geht. Bei Einsatz als Außenluftwärmepumpe würde der Speicher häufig über den Elektroheizstab beheizt, was zu sehr geringen Jahresarbeitszahlen führen würde.

Für den Einsatz als dezentrale Lösung für die Trinkwarmwasserbereitung im Geschosswohnbau mit der Möglichkeit der Wandintegration wurde ein neues Systemkonzept entwickelt, das eine sehr flache drucklos betriebene Speichereinheit beinhaltet und eine Wärmepumpe, die über eine Mischerschaltung so mit dem Speicher verknüpft ist, dass die Vorlauftemperatur in den Speicher immer hoch genug ist, um die Zapftemperatur zu liefern. Damit wird eine Durchmischung des Speichers beim Wärmepumpenbetrieb verhindert und der Speicher kann kleiner dimensioniert werden.

Zunächst wurden Versuche zur Bestimmung der Wärmeverluste des neu entwickelten modularen Speichers mit knapp 90 Liter Wasserinhalt durchgeführt. Da die Ergebnisse mit Standarddämmmaterial nicht zufriedenstellend waren, wurde die Speichereinheit bestehend aus 3 Modulen) mit 40 mm Aerogel-Wärmedämmung versehen. Die Wärmeverluste der Speichereinheit (ohne Anschlussleitungen) betrug 1,3 W/K, was für die Speichergröße angemessen ist (zum Vergleich ErP-Klasse B: 1,1 W/K, ErP-Klasse C: 1,5 W/K). Wichtig ist es aber, bei der weiteren Entwicklung des Geräts darauf zu achten, dass die Anschlussleitungen zu den anderen Systemkomponenten möglichst kurz und gut gedämmt ausgeführt werden.

Der neu entwickelte Speicher wurde mit einer Standard-Trinkwasserstation für die Zapfungen verbunden. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Speichersolltemperaturen und unterschiedlichen Wärmepumpenleistungen durchgeführt. Das Zapfprofil kann problemlos bei einer Speichersolltemperatur von 55 °C mit einer Wärmepumpenleistung von 800 W gedeckt werden.

Abbildung 16 zeigt eine Messkurve des Norm-Zapfprofils M (nach EN 16147) mit 55 °C Speichersolltemperatur und einer Wärmeleistung von 800 W.

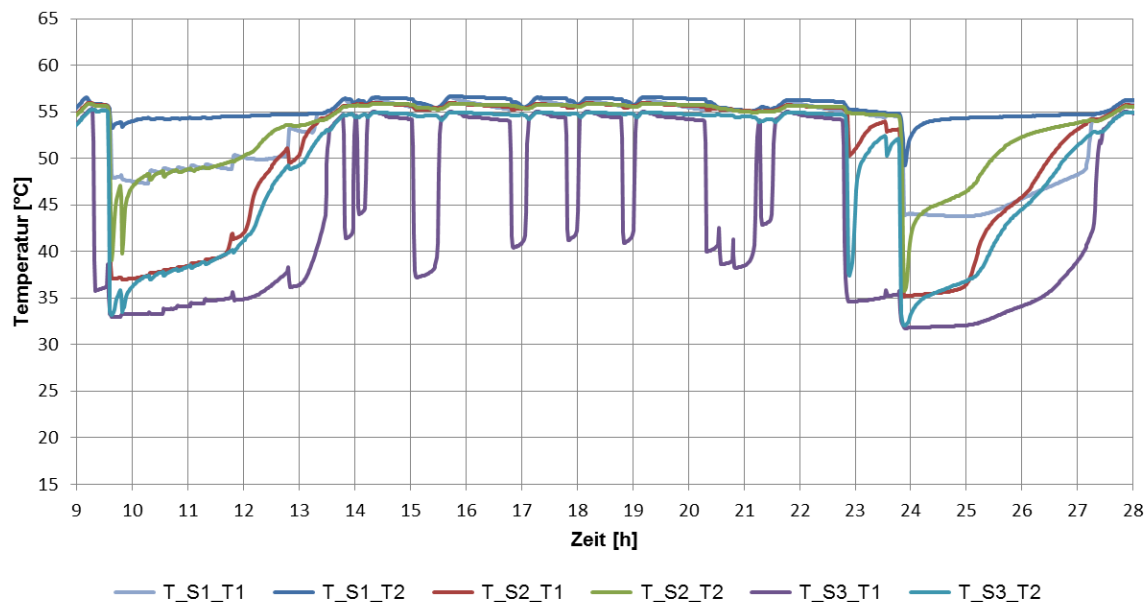


Abbildung 16: Speichertemperaturen für den Zapfversuch mit 800 W Wärmeleistung und einer Soll-Vorlauftemperatur von 55 °C; Zapfprofil „M“ nach EN 16147

Es ist zu erkennen, dass der Speicher fast über die gesamte Versuchsdauer im wärmsten Bereich auf 55 °C bleibt. Bei den Duschzapfungen am Morgen und am Abend sinken die Speichertemperaturen stark ab und dann wird der Speicher über mehrere Stunden wieder aufgeheizt.

Es wurde eine für die Speichereinheit passende kompakte Wärmepumpe entwickelt. Tests mit der Wärmepumpe angeschlossen an die modulare Speichereinheit ergaben eine Kondensatorleistung von etwa 920 W bei 3 °C Außentemperatur und Speichertemperaturen von 50°C °C. Die Leistungszahl (COP) liegt an diesem Punkt bei etwa 2,3. Bei Sommerbedingungen von 20°C Außentemperatur von 3,8 bei einer Heizleistung von 1800 W erreicht.

2.6. Simulationen zur Analyse des Komforts und der Luftqualität

Im Rahmen der Simulationsstudie innerhalb des Projekts SaLÜH! wurden vier verschiedene Konzepte zur dezentralen Beheizung und Belüftung von Kleinwohnungen für die Sanierung von Mehrfamilienhäusern (MFH) untersucht. Der thermische Komfort (d.h. Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) und die Raumluftqualität (IAQ) in einer Wohnung der MFH wurden durch dynamische Gebäude- und Systemsimulationen in MATLAB Simulink mit dem CARNOT Blockset analysiert. Darüber hinaus wurde der Einfluss relevanter Parameter (d.h. des genutzten Gebäudes, der Planung und des Betriebs der Heizungs- und Lüftungsanlage) auf die Simulationsergebnisse mittels einer parametrischen Studie analysiert.

Als Simulationsobjekt wurde das Referenzgebäude (vgl. 2.3) herangezogen.

Die im Abschnitt 2.4 vorgestellte Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluftzirkulation (nachfolgend "System D" genannt) wurde mit verschiedenen Lösungen für eine störungsarme Renovierung einer Wohnung verglichen:

- "System A": raumweise Elektroheizkörper (kostengünstig in der Installation, hohe Betriebskosten)
- "System B": Split-Wärmepumpe, Inneinheit im Korridor angebracht (verhältnismäßig geringer Zusatzaufwand; Verbesserung der Effizienz im Vergleich zu System A)
- "System C": Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe in Kombination mit einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung (ohne Sekundärluft).

Das untersuchte Heizkonzept (d.h. Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluftzirkulation) kann, wie Abbildung 17 zeigt, einen guten thermischen Komfort und eine gute Raumluftqualität (IAQ) in der Wohnung gewährleisten. Im Vergleich zum System mit der Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe (z.B. "System C" in Abbildung 18) kann eine Überhitzung der Zulufräume begrenzt und eine gute Durchschnittstemperatur in allen Räumen der Wohnung gewährleistet werden.

So können mit dem vorgeschlagenen System eine höhere Heizleistung, gute Effizienz und flexible Regelung der Raumtemperatur, aber auch hoher Komfort und IAQ erreicht werden.

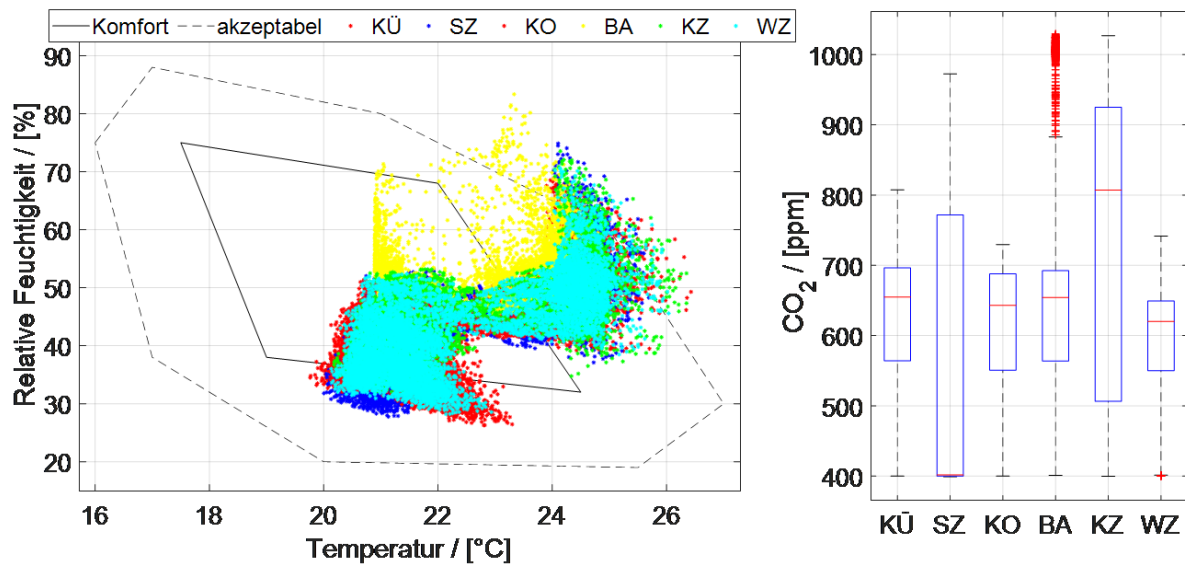


Abbildung 17: Stundenswerte der relativen Feuchte vs. Temperatur für jeden Raum der Wohnung (links) und Box-Plot der CO₂-Konzentration (rechts) bei Berücksichtigung der Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluftzirkulation - KÜ: Küche, SZ: Schlafzimmer, KO: Korridor (Flur), BA: Bad, KZ: Kinderzimmer, WZ: Wohnzimmer

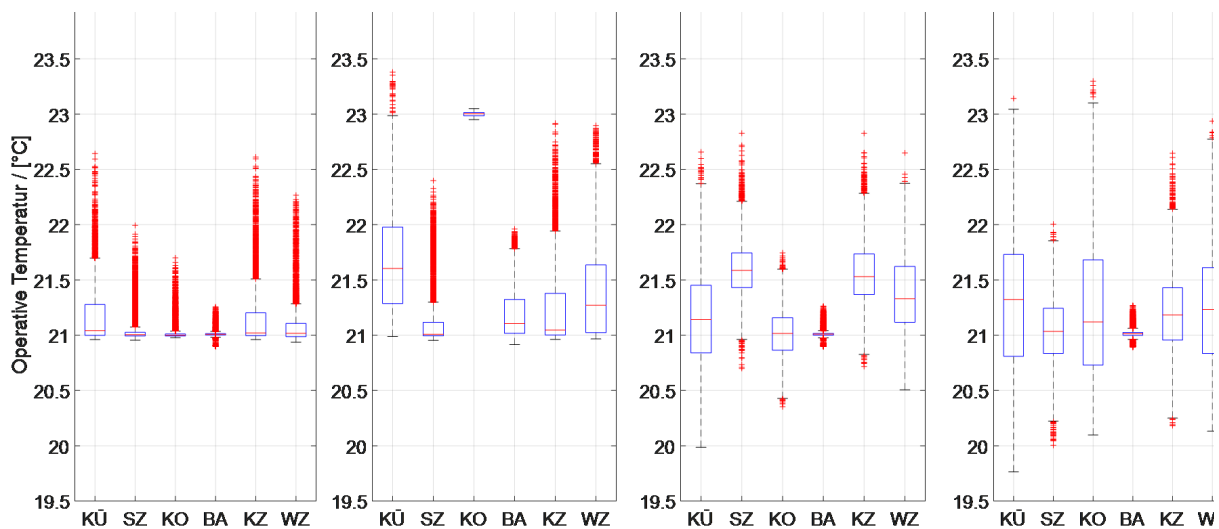


Abbildung 18: Raumtemperatur während der Heizperiode für jeden Raum der Wohnung für die vier analysierten Heizsysteme (d.h. raumweise elektrische Heizkörper (A), Splitgerät mit Inneneinheit im Korridor (B), Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe (C) und Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluft (D))

2.7. Simulationsergebnisse zur Lüftungs-Heizungswärmepumpe

Wie in den Abschnitten zuvor ausführlich vorgestellt, ist die Heizungswärmepumpe mit zwei Wärmeübertragern, einem Kondensator und einem Enthitzer, ausgestattet. Die Sekundärluft, die aus dem Korridor bzw. Flur der Wohnung kommt, wird durch den Enthitzer erwärmt und wieder in den Flur eingebracht. Der Einsatz von zwei Kondensatoren mit zwei getrennten Luftströmen fügt dem System einen neuen Freiheitsgrad für die Steuerung hinzu, der es ermöglicht, Heizenergie nur mit der Zuluft (d.h. mit dem Kondensator) oder mit Zu- und Sekundärluft (d.h. mit Kondensator und dem Enthitzer) einzubringen.

Dieses neue Konzept (d.h. System "D" wie im Abschnitt oben bzw. Abbildung 18 gezeigt) wurde mit anderen drei möglichen Sanierungslösungen verglichen: raumweise elektrische Heizkörper (System

"A"), Split-Wärmepumpe im Flur der Wohnung (System "B") und Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe in Kombination mit einer Lüftungsanlage ohne Sekundärluft (System "C").

System "C" und System "D" weisen bessere Ergebnisse auf als die beiden anderen Heizkonzepte (vergleiche Abbildung 19). Die Energieeffizienz der Systeme "C" und "D" ist bei Heizlasten kleiner als 1,2 kW vergleichbar, aber das System D kann auch bis zu 2,5 kW einen besseren thermischen Komfort in der Wohnung gewährleisten.

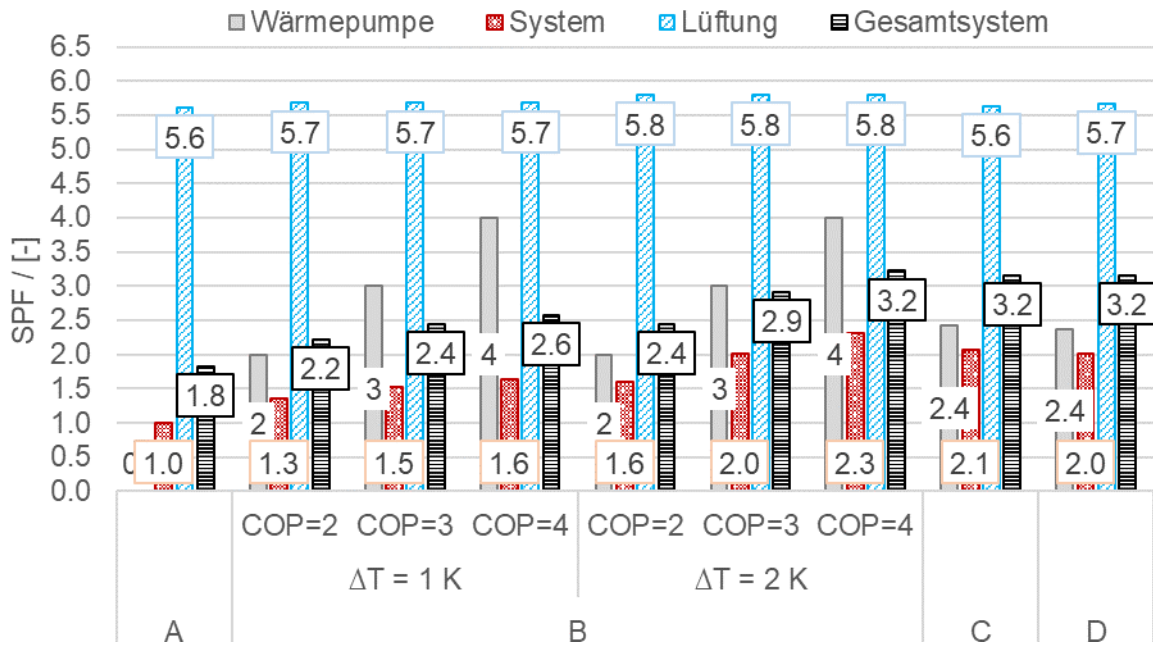


Abbildung 19: Jahresarbeitszahlen (SPF) für die vier untersuchten Heizsysteme. Für die Split-Wärmepumpe (d.h. System „B“) werden SPF für unterschiedliche Überhitzungen des Korridors (ΔT , Überhitzung des Korridors im Vergleich zu den anderen Räumen der Wohnung) und unterschiedliche Leistungszahlen (COP) der Split-Wärmepumpe angenommen.

Die geringfügige Überhitzung der Zulufräume (d.h. SZ, KZ und WZ) bei System „C“ führt zu einem etwas höheren Heizwärmebedarf (30,5 kWh/(m²a)) im Vergleich zum System „D“, bei dem Sekundärluft verwendet wird (28,3 kWh/(m²a)), siehe Tabelle 2.

Tabelle 3: Heizwärmebedarf (HWB), maximale stündliche Heizlast (HL) und Strombedarf (EI) für das vorgeschlagene System mit Sekundärluft und das Referenzsystem. Die zusätzliche elektrische Leistung der Lüfter (für beide Systeme) und für die Sekundärluft (nur für das System mit Sekundärluft) sind berücksichtigt

	HWB [kWh/(m ² a)]	HL [W/m ²]	EI [kWh/(m ² a)]
Zuluft-Fortluft WP	30.5	17.3	14.8
Zuluft-Fortluft WP mit Sekundärluft	28.3	22.7	14.1

Abbildung 20 zeigt die Heizleistung des untersuchten Heizsystems. Die Heizperiode dauert 8 Monate (15. Oktober bis 15. Mai) und 13 % der gesamten Heizenergie wird durch direktes Heizen (d.h. elektrischer Badheizkörper) geliefert. Fast 50 % des gesamten Stromverbrauchs des Systems entfällt auf den Kompressor (siehe Abbildung 20, rechts). Einen relevanten Beitrag hat auch das Lüftungssystem (32 % des Gesamtstrombedarfs) während der Heizperiode. Der Jahresstrombedarf der Lüfter ist noch höher, da die Lüftungsanlage durchgehend das ganze Jahr über mit einem konstanten Zuluftvolumenstrom von 100 m³/h läuft.

Der Heizwärmebedarf beträgt 2005 kWh/a oder 28,3 kWh/(m²a) einschließlich der Wärmerückgewinnung. Der jährliche Gesamtstromverbrauch (während der Heizperiode) beträgt 1456,4 kWh/a. In Abbildung 20 bedeutet "Fans_{ERV}." die zwei Ventilatoren (d.h. Zu- und Abluft) des Lüftungssystems, während "Fans_{sys}" die Ventilatoren des Heizungssystems darstellt (d.h. für Sekundärluft und zusätzliche Umgebungsluft).

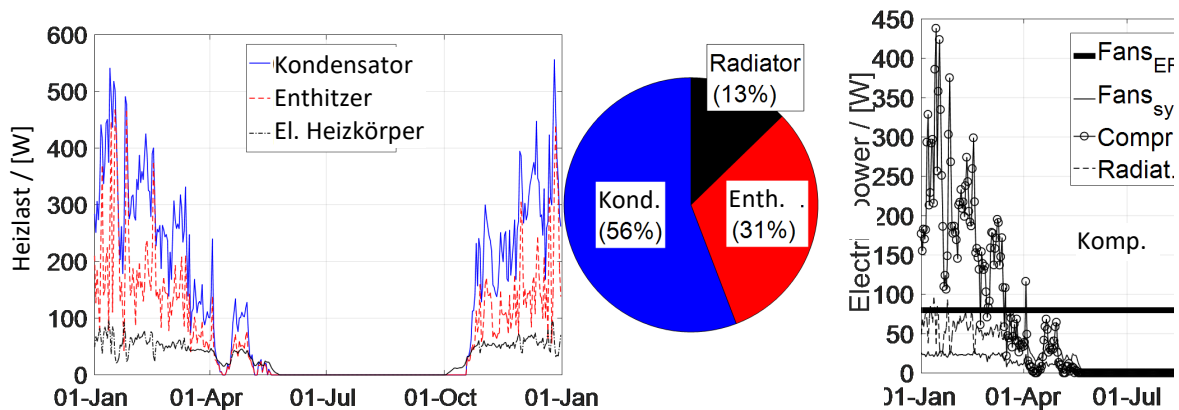


Abbildung 20: Tagesmittelwerte der Heizleistung (links), jährliche Aufteilung der gelieferten thermischen Energie (Mitte) und jährliche Aufteilung der verbrauchten elektrischen Energie (rechts)

2.8. Simulationsergebnisse zur Trinkwarmwasser-Wärmepumpe

Es wurde eine Simulationsstudie des neuen Konzeptes für ein Trinkwarmwassersystem durchgeführt. Dafür wurden zunächst einmal realistische Kennlinien für eine Trinkwasserwärmepumpe mit niedriger Leistung gebraucht.

Dafür wurden Messdaten von 30 am Wärmepumpentestzentrum Buchs getesteten Luft-Wärmepumpen analysiert und ein semi-empirisches (generisches) Modell entwickelt. Die Kondensatorleistung wird dabei in Abhängigkeit von der Quelltemperatur (ϑ_{cold}) dargestellt.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot (1 + dq_0) \cdot (1 + dq_1 \cdot \vartheta_{cold})$$

Beim der Leistungszahl COP fließt der Carnot-Gütegrad mit ein:

$$COP = \eta_C \cdot \frac{T_{hot}}{(T_{hot} - T_{cold})}$$

Weiterhin wurde auch noch ein physikalisches Modell entwickelt, mit dem man Sensitivitätsanalysen durchführen kann. Für die Auslegung einer konkreten Wärmepumpe können hiermit Parameter wie z.B. Quelltemperaturen, Volumenströme oder die Dimensionierung der einzelnen Komponenten variiert werden. Das Modell ist aber noch nicht genau genug und konnte die Messpunkte weniger gut abbilden als das semi-empirische Modell. Daher wurde für die Simulationsstudie mit dem vereinfachten Modell weitergearbeitet.

Mit Hilfe des vereinfachten Wärmepumpenmodells wurden Kennlinien für verschiedene Wärmepumpenleistungen generiert. Mit diesen Kennlinien wurde eine Jahressimulation des Trinkwarmwassersystems durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer Wärmepumpe mit der Nennleistung 500 W bei 0°C und 45°C und den generierten Kennlinien und einer Speichergröße von 90 Litern, das Zapfprofil für einen

Jahreszyklus mit Innsbrucker Wetterdaten gedeckt werden kann. Um etwas Leistungsreserve zu haben, würde man wahrscheinlich eine etwas höhere Leistung (z.B. 750 W) wählen.

In Abbildung 21 sind die Simulationsergebnisse der 750 W Wärmepumpe mit einem 90 Liter Speicher als Monatswerte aufgetragen. Die jeweils linke Säule enthält alle Stromaufwendungen (Wärmepumpe, Nachheizung und Enteisung) und die jeweils rechte Säule die Nutzenergie (Zapfungen) sowie die Verluste. Auf der rechten Achse ist dann noch als Kreis im Diagramm die monatliche Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe aufgetragen.

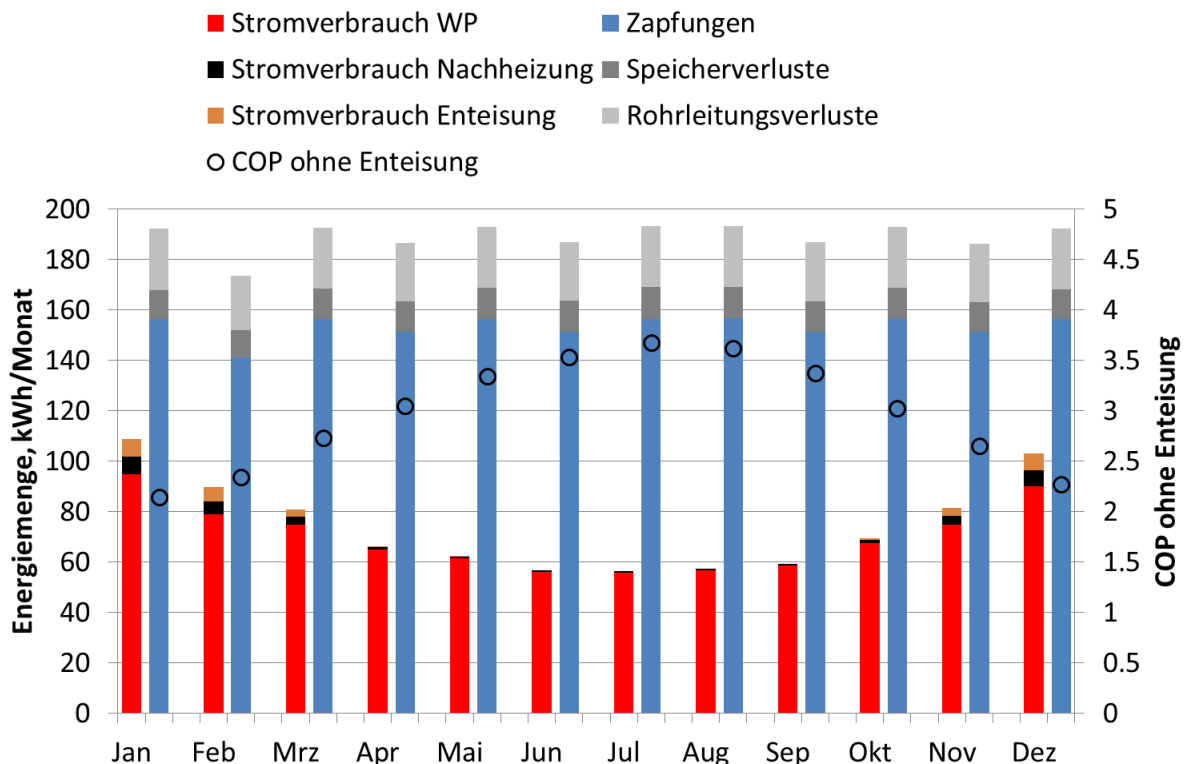


Abbildung 21: Simulationsergebnis mit generischer Kennlinie 750 W (Monatswerte), Kreise rechte Achse

Die Wärmepumpe erreicht mit dieser Kennlinie eine Leistungszahl (COP) von 2,9 und der Jahresnutzungsgrad des Gesamtsystems liegt bei 2,1. Durch die intelligente Verschaltung der Wärmepumpe mit einem Mischventil liefert die Wärmepumpe nur Wasser auf Zapftemperatur in den Speicher. Dadurch wird der Speicher nicht mit kühlerem Wasser durchmischt und die sehr geringe Wärmepumpenleistung reicht bei einem relativ kleinen Trinkwarmwasserspeicher für Zapfprofil M aus.

Im Vergleich zu einem einfachen Elektroboiler gleicher Größe, der einen Jahresnutzungsgrad von 0,79 hat), kann eine deutliche Verbesserung erreicht werden. Ziel einer Wärmepumpenentwicklung für dieses Trinkwarmwassersystem ist es daher, eine Kennlinie die in dem Effizienzbereich der hier gezeigten Kennlinien oder besser liegt, zu erreichen.

2.9. Aktive Überströmer

Der Einsatz von aktiven Überströmern hat sich, ausgehend von Entwicklungen in der Schweiz, in den letzten Jahren insbesondere in der energieeffizienten Gebäudesanierung verbreitet und findet heute, zur Anbindung einzelner Räume auch in Neubauten Anwendung. Es handelt sich dabei um

ventilatorgestützten Transport der Luft aus einer Mischluftzone (meist dem Flur) in die Zuluftzonen. Die Abluft erfolgt wie bei der Kaskadenlüftung aus Bad, Küche und WC.

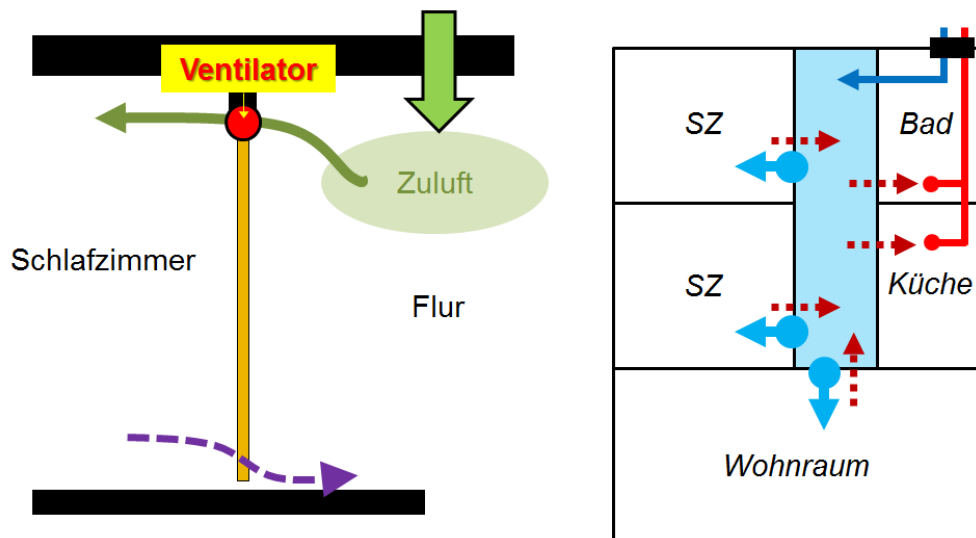


Abbildung 22: links: Konzept des aktiven Überströmers, rechts: mögliches Einsatzschema

Damit kann das Zuluftkanalnetz sowie dafür notwendige Deckenverkleidung weitgehend eingespart werden. Die hier zusammengestellten Planungsrichtlinien stützen sich auf umfangreiche Simulationsrechnungen mit dem Mehrzonen-Simulationstool CONTAM (NIST) unter Berücksichtigung der Raumluftqualität und der Raumluftfeuchte am Beispiel von zwei typischen Wohnungsgrundrissen aus dem Geschosswohnungsbau.

Insgesamt wurden drei unterschiedliche Strategien mit den jeweiligen Vor- und Nachteilen hinsichtlich Aufwand und Raumluftqualität sowie Effizienz verglichen. Da durch geöffnete Türen allein durch thermisch getriebene konvektive Luftbewegung ein Austausch von mehreren hundert Kubikmetern pro Stunde erfolgt, stellt sich die Frage, ob ventilatorgetriebene Überströmer überhaupt notwendig sind. Es konnte aber gezeigt werden, dass auf aktive Überströmer nicht verzichtet werden kann, wenn die Zuluft ausschließlich in einem zentralen Mischlufttraum eingebracht und die Zimmertüren, wenn auch nur nachts, geschlossen werden.

Daher wurden die Varianten in weiterer Folge mit aktiven Überströmern berechnet. Unterschieden wurde dabei, wie in nachfolgender Abbildung schematisch gezeigt, Grundrisse mit Flur b zw. Wohnraum als Mischluftzone.

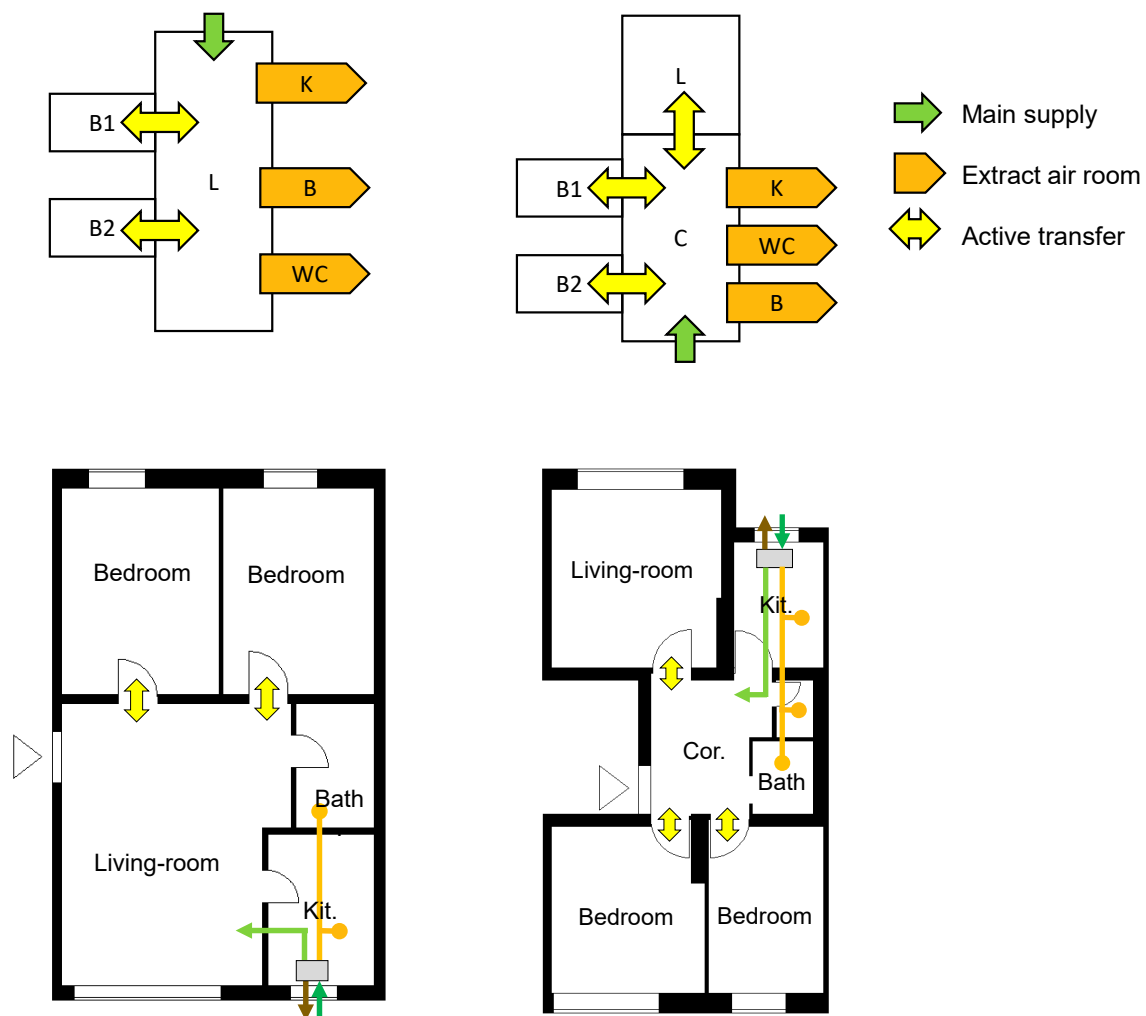


Abbildung 23: Verschiedene Grundrisse mit dem Einsatz von aktiven Überströmern (Sibille, 2015)

Untersucht wurden sowohl eine Variante mit konstantem Zuluftvolumenstrom, als auch eine über Luftqualitätssensor gesteuerte Anlage. Eine bedarfsgesteuerte Lüftung durch Messung der Luftqualität in der Mischluftzone ermöglicht die temporäre Absenkung des Zuluftvolumenstromes und erhöht damit die Effizienz (geringerer Ventilatorstromverbrauch und geringerer Lüftungswärmebedarf) und Raumluftfeuchte (geringerer Außenluftwechsel). Im Rahmen der Produktentwicklung konnten Funktionsmuster für messtechnische Untersuchungen gefertigt werden. Diese haben zwar den geforderten Luftvolumenstrom von $70 \text{ m}^3/\text{h}$ bei den gesetzten Grenzwerten für die Schallemission noch nicht erreicht, mit geeigneten Strömungsquerschnitten und Schallabsorbern sollte dieses Ziel aber trotz geringem Spielraum bei den maximalen Investitionskosten erreichbar sein.

Mit den durchgeführten Untersuchungen und dem daraus erarbeiteten Auslegungstool liegen nun alle planerischen Voraussetzungen vor, um eine optimierte Auslegung von Lüftungsanlagen mit aktiven Überströmern durchführen zu können.

2.10. Fassadenintegration und Realeinbau bzw. -test in den PASSYS-Testzellen

Ein wesentliches Hindernis für den Einsatz effizienter Technologien in der Sanierung ist Verfügbarkeit von Raum. Für die beiden im Projekt entwickelten Geräte (Trinkwasserwärmepumpe mit Speichereinheit und Heizungs-Lüftungswärmepumpe) wurden Konzepte ausgearbeitet, wie die

Komponenten platzsparend im Gebäude untergebracht werden können. Dabei wurde sowohl die Integration in eine Holzleichtbau-Vorhangfassade als auch die Integration im Parapetbereich unterhalb eines Fensters betrachtet.

Es wurden Funktionsmuster einer wandintegrierbaren Speichereinheit und einer ebenfalls wandintegrierbaren Trinkwasserwärmepumpe realisiert. Die Integrierbarkeit dieser Komponenten wurde theoretisch untersucht und unterschiedliche Lösungen wurden bewertet.

Für die Heizungs-Lüftungswärmepumpe wurde ein Funktionsmuster gebaut und in ein Testmodul einer Holzleichtbau-Vorhangfassade integriert. Das Funktionsmuster ist von seiner Geometrie auf eine Vorhangfassade abgestimmt, indem die Breite der Einheit genau zwischen zwei Holzsteher passt. Die Komponenten wurden dazu in verschiedenen Ebenen angeordnet.

Für die Integration derselben Einheit im Parapetbereich wäre wegen der maximal möglichen Bauhöhe eine angepasste Konstruktion notwendig. Eine Herausforderung wären dabei die notwendigen Luftdurchführungen durch ein vorgesetztes Wärmedämmverbundsystem.



Abbildung 24: (a) Funktionsmuster einer vorgefertigten Holzfassade mit integrierter Außeneinheit der Heizungs-Lüftungswärmepumpe in der PASSYS Testzelle der UIBK und (b) während der Installation des Fassadenelements

Der Aufbau der Testfassade ist in Abbildung 25 dargestellt. Die vorgefertigte Fassade besteht aus einem Holzrahmen, einer Holzplatte, die die Mineralwoll-Wärmedämmung innen und außen abdeckt, und einer zementgebundenen Spanplattenverkleidung. Hinter der Außeneinheit wird eine leistungsstärkere Dämmplatte verwendet, damit trotz geringerer Dämmstärke keine kritischen Temperaturbedingungen auftreten. Außerdem ist auf der Innenseite eine dampfbremsende Membran und auf der Außenseite eine luftdichte Membran eingebaut.

Die Testfassade ist entsprechend Maße der PASSYS-Testzelle 273 cm breit, 273 cm hoch und 31 cm dick.

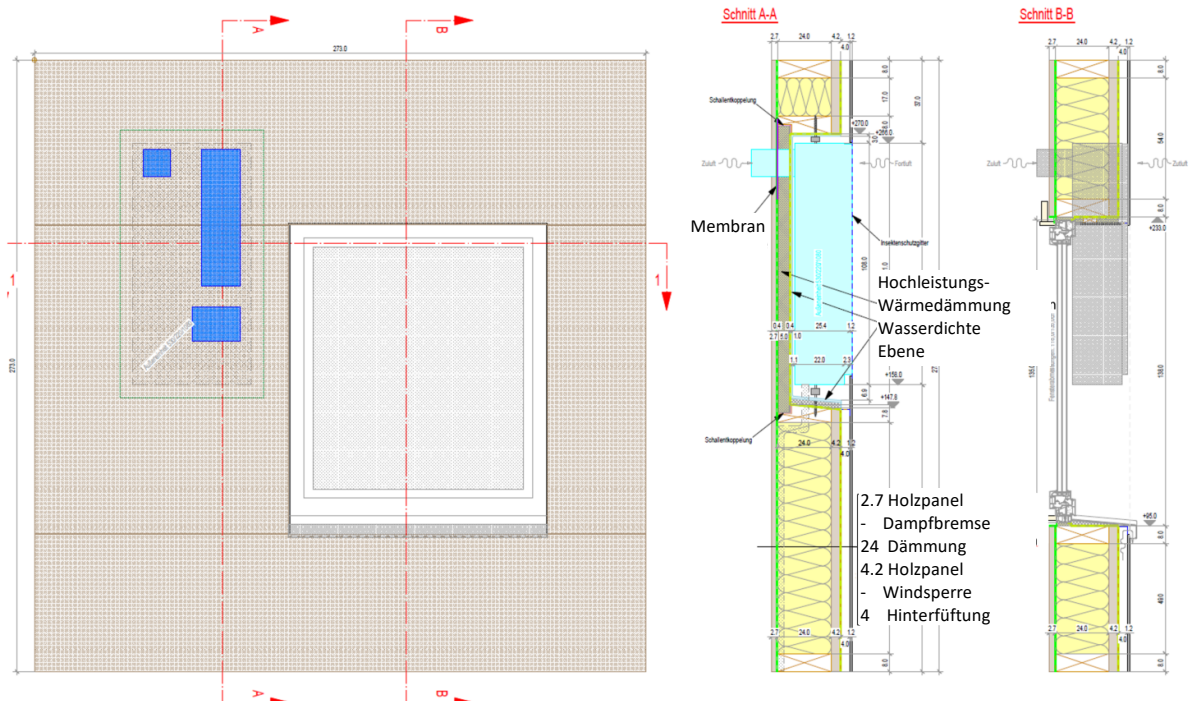


Abbildung 25: Aufbau der Testfassade mit integrierter Außeneinheit

Bei der Trinkwasserwärmepumpe ging es zunächst darum, die Speichereinheit, die den größten Platzbedarf hat, unterzubringen. Es konnte gezeigt werden, dass dies sowohl in der Vorhangfassade als auch im Parapetbereich möglich ist. Bei Integration im Parapetbereich fallen geringere Speicherverluste an, da der Speicher bei dieser Variante nach außen hin durch die normale Hausdämmung noch zusätzlich geschützt ist. Zu den Verlusten eines solchen Speichers wurde eine Simulationsstudie durchgeführt.

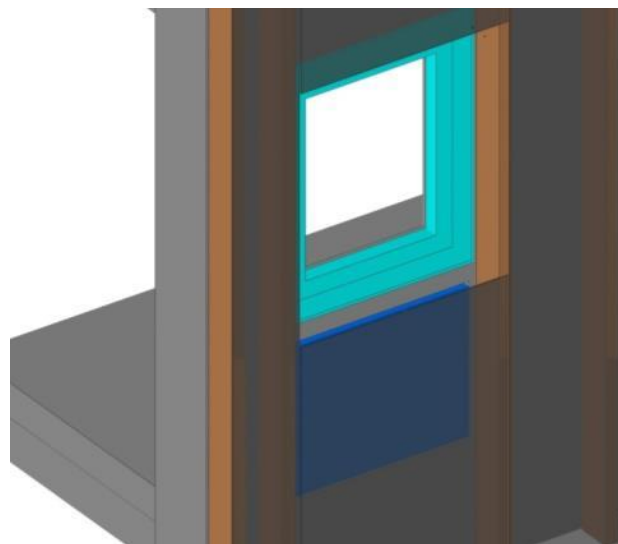


Abbildung 26: Integrationsmöglichkeit der Speichereinheit in das bestehende Mauerwerk (Fensterbrüstung) --- 3D Ansicht eines unterhalb des Fensters integrierten Speichers (Bildquelle: Kulmer Holzbau)

Eine andere vielversprechende Möglichkeit ist aber auch die Integration in eine Vorhangfassade. Hierzu wurden verschiedene Konzepte entwickelt, die in Abbildung 27 dargestellt sind. Der Vorteil der Integration in eine Vorhangfassade ist das größere Platzangebot. Hier wäre auch eine Integration der Wärmepumpe möglich.

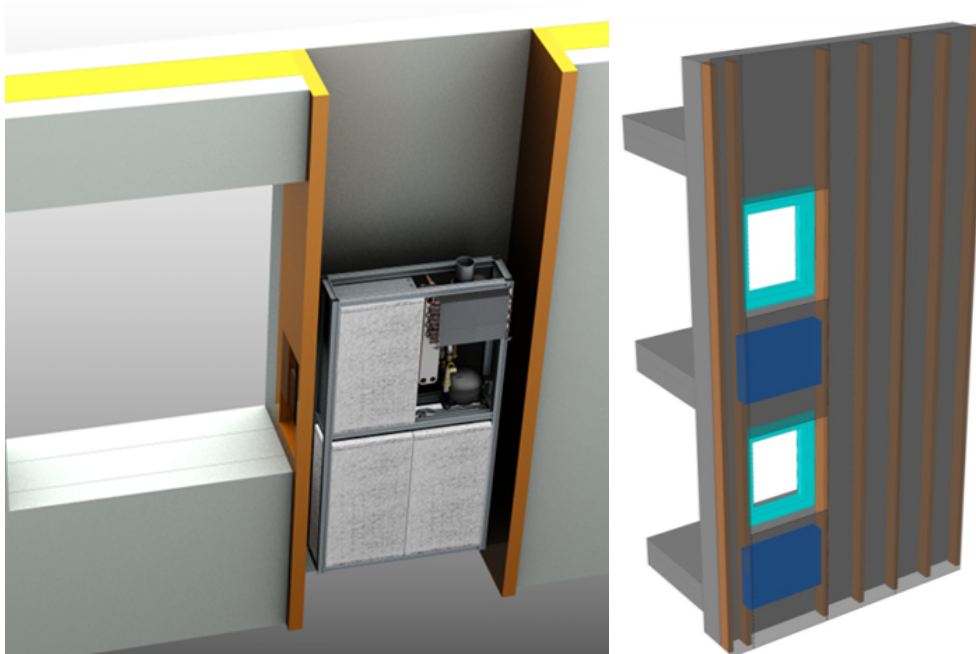


Abbildung 27: Integrationsmöglichkeit in einer Vorhangfassade: Speicher und Wärmepumpe in einen Installationsschacht neben dem Fenster (links, Bildquelle: Vaillant) bzw. Speichereinheit unterhalb des Fensters (rechts, Bildquelle: Kulmer Holzbau)

2.11. Wirtschaftlichkeit

Das Sanierungskonzept basierend auf den beiden im Rahmen des Projekts SaLüH! entwickelten Wärmepumpen (Lüftungs-Heizungswärmepumpe und Trinkwarmwasser-Wärmepumpe) bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einem Referenzsystem bewertet. Mithilfe der am Projekt beteiligten Industriepartner wurden realistische Kosten für das Referenzsystem sowie die jeweils benötigte Verrohrung, weiteres Zubehör, Installation, Inbetriebnahme und Wartung abgeschätzt. Alle Kosten sind Bruttoangaben und enthalten. In einem zweiten Schritt wurden dann die Grenzkosten bestimmt, unter denen die dezentralen Wärmepumpen liegen müssten, um wirtschaftlich konkurrenzfähig mit dem Referenzsystem zu sein.

Anmerkung: Es wurde zwar für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ein zentrales Referenzsystem angesetzt, jedoch soll das vorgeschlagene Konzept nur dann zum Einsatz kommen, wenn eine zentrale Lösung aus diversen Gründen nicht möglich ist. Der Vergleich mit einem zentralen System ist dennoch lehrreich und erforderlich.

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung wurde mit der Kapitalwertmethode durchgeführt. Dabei werden alle Kosten, die zu späteren Zeitpunkten anfallen, auf den Investitionszeitpunkt abgezinst (Strompreissteigerung 0,5 %, Kapitalzinsen 2,0 % Inflationsrate 1,0 %). Bei der Analyse wurden die Investitionskosten und ggf. Reinvestitionen sowie Betriebskosten inklusive Wartungskosten berücksichtigt. Die Betriebskosten für das zentrale Referenzsystem und für die dezentralen Wärmepumpen wurden jeweils mit dem PHPP unter Berücksichtigung von Speicher und Leistungsverlusten und mit durch Simulationen überprüften Effizienz der Wärmepumpen ermittelt.

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist, dass die Geräte bei den aktuellen Stromkosten in Österreich etwa 9.000 EUR inklusive Montage und Umsatzsteuer kosten dürfen, um wirtschaftlich konkurrenzfähig zu sein (also z.B. 6.000 EUR für die Lüftungs-Heizungs-Wärmepumpe und 3.000 EUR für die Trinkwarmwasserwärmepumpe). In Deutschland dürfen die Kosten wegen der höheren

Strompreise (derzeit 30 Eurocent in Deutschland statt 18 Eurocent in AT) bei etwa 10.000 EUR liegen. Es erscheint realistisch, dass bei einer breiten Markteinführung, solche Gerätepreise erreicht werden. Durch die kompakte Bauweise können beide Geräte äußerst platzsparend in die Fassade oder ins Gebäude integriert werden (z.B. die Heizungs-Lüftungs-WP in der Küche als Deckengerät und der Außenteil in die Fassade integriert und die TWW-WP in der Fensterbrüstung im Bad) und damit in nahezu jeder hochwertig sanierten Wohnung zur Anwendung kommen.

2.12. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

Das Projekt wurde primär dem Ausschreibungsschwerpunkt *Technologieentwicklung für Gebäudeoptimierung und -modernisierung bzw. Erforschung und Weiterentwicklung energieeffizienter, gebäudeintegrierter Technologien und Systeme* zugeordnet.

Das Projekt SaLüH! behandelte die Sanierung von Wohngebäuden aus den 1950er bis 1970er Jahren, die mit ca. 900.000 Wohnungen (Statistik Austria, 2004) ein großes Potential darstellen. Diese Gebäude sind oft durch Kleinwohnungen mit „Zimmer - Küche - Kabinett“ und alte Einzelöfen charakterisiert. Durch die thermische Sanierung der Außenhülle und der Fenster werden diese Gebäude relativ luftdicht, die alten Einzelöfen können nicht mehr gefahrlos betrieben werden, der Einbau einer Zentralheizungs- und Warmwasseranlage im bewohnten Bestand ist äußerst schwierig und aufwändig und es ist das Lüftungsproblem zu lösen. In SaLüH! wurden daher innovative Hybridkonzepte auf Basis von Kleinstwärmepumpen für die Heizung und die Warmwasserbereitung zur dezentralen Versorgung der Wohnungen untersucht und entwickelt, die mit minimalem Platzbedarf bzw. baulichem Aufwand in die Wohnungen integriert werden können.

Das Ziel des Programms *Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte* wurde dabei primär adressiert.

Eine kürzlich begonnene Partnerschaft von Unternehmen der Wärmepumpen- und Lüftungsindustrie (SIKO Energiesysteme, Pichler) wurde in SaLüH! vertieft und sinnvoll mit dem Bereich Gesamtsysteme, Fenster und Fassadenbau (Kulmer Holzbau) auch international ergänzt (Fa. Vaillant, Internorm). Die Forschungskoooperation von Industrie mit und zwischen den wissenschaftlichen Partnern Universität Innsbruck und AEE INTEC wurde weiter vertieft und durch sich ergänzende Expertisen aus umsetzungs- und anwendungsorientierter Forschung optimal ergänzt. Grundlegende Erkenntnisse wurden von den Forschungspartnern in den Zielgruppen Forschung und Planung verbreitet und publiziert, während die Industriepartner - für das in Zukunft potentiell große Marktsegment *Sanierung im Mehrfamilienwohnbau* - ihr Produktangebot auf- bzw. ausbauen konnten und können.

Aber auch die Erreichung des Ziels *Beitrag zur Entwicklung resilienter Städte und Stadtteile mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität* wurde mit SaLüH! unterstützt. Dies geschieht durch Beiträge zur Anhebung des Anteils erneuerbarer Energieträger (Wärmepumpe und Ermöglichung von vermehrter PV-Nutzung), Erhöhung der Energieeffizienz (Ermöglichung der Lüftungs-Wärmerückgewinnung) und Verbesserung der Lebensqualität (Raumluftqualität; besonders bei oft spezifisch stark belegten Kleinwohnungen im Stadtgebiet, welche aus Schallgründen nur beschränkte Fensterlüftungsmöglichkeiten haben).

3. Schlussfolgerungen

Das übergeordnete Ziel des Projekts SaLüH!, die Erarbeitung von kostengünstigen Lösungen für die Sanierung von mehrgeschossigen Wohnhäusern wurde vom Konzept her – der Einsatz von dezentralen Kleinst-Wärmepumpen für Heizung (kombiniert mit der Lüftungsanlage) und für Trinkwarmwasser – erreicht. Das Konzept wurde mittels Simulationsstudien überprüft und bewertet. Es konnten dabei drei sich ergänzende technische Lösungsansätze erarbeitet und als Funktionsmuster umgesetzt werden:

- Lüftungs-Heizungs-Wärmepumpe,
- Kompakte Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit Speicher,
- Aktive Überströmer.

Diese Funktionsmuster wurden anschließend im Labor getestet und bewertet. In umfangreichen Simulationsstudien, mit durch Messungen parametrisierten Modellen, wurden diese unter verschiedenen Randbedingungen (virtuell) getestet, optimiert und bewertet. Damit stehen theoretisch Lösungen für die wohnungsweise Sanierung zur Verfügung. Diese sollen insbesondere dann zum Einsatz kommen können, wenn eine zentrale Sanierung oder Nachrüstung der Heizungs- und Lüftungsanlage nicht möglich ist oder ein ökonomischer Vorteil erwartet wird. Damit kann zukünftig ein Einsatz von E-Boilern und E-Heizungen, mit entsprechend ineffizientem Einsatz von Strom, oder von Gas-Boilern vermieden oder zumindest reduziert werden. Es können ausgezeichnete Luftqualität und hoher thermischer Komfort erreicht werden, wie durch die umfangreichen Simulationsstudien gezeigt werden konnte.

Praktisch müssen die Technologien zu marktreifen Produkten weiterentwickelt werden und sich am Markt durchsetzen. Dies hängt maßgeblich von den wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen (Energiepreis, Förderung, Ausstieg aus Gas, etc.) ab. Generell lässt sich schlussfolgern, dass Lösungen für die Heizung und Warmwasserbereitung im Mehrgeschosswohnungsbau auf Basis von dezentralen Kleinst-Wärmepumpen in Kombination mit einem Lüftungsgerät vielversprechend sind, jedoch bei den derzeitigen Randbedingungen (v.a. Energiepreisen) ein wirtschaftlicher Einsatz kaum möglich ist.

Es konnte bei der Entwicklung der Lüftungs-Heizungs-Wärmepumpe auf Erfahrungen des kurz vor Projektstarts abgeschlossenen EU-Projekts iNSPIRe zurückgegriffen werden, in dem ein Funktionsmuster einer Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe in eine vorgefertigte Holzfassade integriert wurde. Dieses Funktionsmuster wurde im Labor der UIBK sowie in einem Demogebäude (Mehrfamilienhaus in Ludwigsburg, Deutschland) getestet und vermessen. Das Ziel in SaLüH! war die Verbesserung der Effizienz und v.a. die Steigerung der Leistung der Wärmepumpe von unter 1 kW auf für die Sanierung notwendigen 2,5 kW. Dafür sollte zusätzlich Umluft (Sekundärluft) für die Wärmeabgabe als auch zusätzliche Außenluft als Wärmequelle verwendet werden.

Die Funktionsmuster wurden detailliert im Labor vermessen. Die Vermessung der Lüftungs-Heizungs-Wärmepumpe erfolgte im Kompaktgeräte-Prüfstand der UIBK, welcher für SaLüH! angepasst und erweitert wurde. Es erfolgte zunächst die Vermessung der Komponenten (Wärmeübertrager, Feuchteübertrager, Verdampfer, Kondensator, Kompressor, Inverter und Ventilatoren) und dann die Vermessung des Gesamtsystems. Für alle Komponenten wurden Simulationsmodelle erstellt. Durch Vergleich von Messung und Simulation kann das jeweilige Modell parametrisiert werden, gleichzeitig kann aber auch die Güte der Messung überprüft werden. Durch die Verwendung von parametrisierten Modellen kann über den Messbereich hinaus (z.B. für Volumenströme, Temperaturen, etc.) eine

Bewertung des Systems erfolgen. Die parametrisierten Komponentenmodelle ermöglichen zudem in weiterer Folge eine Optimierung des Designs. Ein Schwerpunkt der Komponentenvermessung lag bei der vergleichenden Bewertung zwischen Wärmeübertragern und sogenannten Enthalpieübertragern. Letztere werden mehr und mehr nachgefragt, um dem Problem der zu trockenen Luft bei kalten Außenlufttemperaturen im Winter entgegenzuwirken. Außerdem wird durch die Verwendung eines Enthalpieübertragers Kondensatbildung im Wärmeübertrager vermieden, wodurch die Möglichkeit entsteht, das Gerät als deckenhängendes Gerät auszuführen. Der Einfluss der Feuchteübertragung auf die Effizienz bei einer Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe konnte im Rahmen des Projekts SaLüH! erstmals systematisch untersucht werden.

Die TWW-Wärmepumpe wurde am im Rahmen des Projekts SaLüH! neu errichteten Prüfstands im Labor des Projektpartners AEE INTEC vermessen. Zunächst war geplant die Entwicklung der Kleinst-Warmwasserwärmepumpe auf Basis eines vorhandenen Produkts (Kältemittel Propan) aufzusetzen. Jedoch erwies sich nach umfangreichen Laborversuchen bei AEE INTEC die Effizienz der Wärmepumpe derart gering ($COP < 2$) und der Einsatzbereich der Wärmepumpe derart begrenzt (Umgebungsluft > 7 °C), dass davon abgesehen werden musste. Der Schwerpunkt der Entwicklung konzentrierte sich auf einen (drucklosen) fassadenintegrierbaren Speicher mit Frischwasserstation für die Trinkwarmwassererwärmung und mit einem Beladekreis für die Wärmepumpe.

Die Integration der Komponenten (vollständig oder zumindest teilweise) in die Fassade war ein weiterer Aspekt des Projekts SaLüH!. Fassadenintegration verspricht einen breiteren Einsatz, z.B. auch in Gebäuden mit sehr kleinen Wohnungen, in denen kein Platz für die Heizungstechnik vorhanden ist. Innerhalb des Projektes SaLüH! wurde auf Konzeptebene die Heizungswärmepumpe und die Kleinst-Trinkwarmwasserwärmepumpe jeweils in eine vorgefertigte Holzfassade, als auch in die Bestandswand integriert. Es zeigte sich, dass zum einen das benötigte Volumen des Gerätes für solch eine Leistung (2,5 kW) und damit verbunden relativ hohen Volumenstrom (100 m³/h hygienischer Luftwechsel und 100 m³/h Sekundärluft-Zirkulation) auch bei maximal möglicher Kompaktheit so groß ist, dass eine vollständige Integration nur bei Modularer Bauweise möglich ist und zum anderen, dass die Rohrführung bei Integration in die Bestandswand (Fensterbrüstung) schwierig ist. Entsprechend wurde schwerpunktmäßig an der Integration der Heizungswärmepumpe in eine vorgefertigte Holzfassade gearbeitet.

Es ergab sich zudem, dass die Integration des Wärmespeichers in die Bestandswand (z.B. im Bad, sofern ein Fenster oder eine Heizungsniße vorhanden ist) eine zielführende Variante ist, auch die Integration in eine vorgefertigte Holzfassade ist eine interessante Variante, wobei hier höhere Wärmeverluste als bei Integration in die Bestandswand auftreten.

Ein Funktionsmuster der Außeneinheit der Lüftungs-Heizungswärmepumpe wurde in einer Holzrahmen-Fassade integriert im Außenlabor (PASSYS Testzelle der UIBK) montiert und erfolgreich getestet. Projektpartner Kulmer lieferte dabei die Fassade, in die im Werk die Außeneinheit der Heizungswärmepumpe bereits integriert wurde. Es wurden praktische Aspekte der Handhabbarkeit und Installation getestet sowie bauphysikalische Messungen (Schallemissionen, Kondensatvermeidung) durchgeführt. Die Messergebnisse wurden zudem verwendet um thermische (3D) und hygrothermische Modelle (2D) zu parametrieren. Damit können diese Modelle bzw. Simulationswerkzeuge zuverlässiger für zukünftige Planungen eingesetzt werden.

4. Ausblick und Empfehlungen

Innerhalb des Projekts war dabei das Ziel jeweils ein Funktionsmuster für eine Heizungs- und eine Trinkwarmwasser-Kleinstwärmepumpe zu entwickeln und zu testen. Damit können diese Technologien in einem möglichen Nachfolgeprojekt weiterentwickelt und in Demonstrationsgebäuden getestet werden. Alle Funktionsmuster konnten entwickelt und erfolgreich getestet werden und eine Weiterentwicklung innerhalb des SdZ Projekts FiTNeS (Leitung UIBK) wird durchgeführt werden, wenn auch mit teilweise veränderter Partnerstruktur.

Als Hürde bei der Entwicklung solch effizienter kompakter Wärmepumpen erweist sich die geringe Verfügbarkeit von Komponenten, v.a. bezüglich der (drehzahlgeregelten) Kompressoren. Mittelfristig muss auf alternative Kältemittel umgestiegen werden (F-Gas Verordnung) und dies war auch entsprechend ein Ziel der Projektpartner. Geeignete Komponenten für Kleinst-Wärmepumpen, welche für alternative Kältemittel geeignet sind, zumindest in geringer Stückzahl, kaum verfügbar.

Als große Herausforderung für eine Weiterentwicklung des Konzepts zur Marktreife stellt die im Projekt nicht schwerpunktmäßig untersuchte, Wartung und Reparatur dar. Des Weiteren müssen die nicht-technischen Aspekte wie Schnittstellen zwischen Fassadenbauer und Gerätehersteller, insbesondere in Bezug auf Gewährleistung geklärt werden.

Über den Erfolg des Konzepts werden letztendlich nicht nur technische Aspekte entscheidend sein. So können z.B. Wärmepumpen-Splitgeräte im Vergleich zu einer kompakten Bauweise und einem zusätzlichen Sole- oder Wasserkreislauf energetisch von Vorteil sein. Allerdings herrscht in Zentraleuropa (v.a. D-A-CH Länder) derzeit keine Kultur, die einen flächendeckenden Einsatz von Split-Wärmepumpen erlaubt. Heizungen werden von Heizungstechnikern installiert und in Betrieb genommen, Kältemitteltechniker bauen dagegen keine Heizungen. Anders ist dies z.B. in den südlichen Ländern wie Italien und Griechenland. Solch ein Kulturwandel (vom Heizungstechniker zum Kältetechniker) braucht seine Zeit und muss auch mittel- bis langfristig in der Ausbildung (Heizungstechnik, Klimatechnik) verankert werden. Dies geht natürlich weit über den Rahmen eines solchen Projekts hinaus. Ähnlich verhält es sich bezüglich zwei getrennter technischer Systeme für Heizung und Trinkwarmwasser. Im DACH-Raum werden i.d.R. integrierte Systeme eingesetzt (Gas-Etagenheizung, Luft-Wasser-Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser, etc.). Das für die Sanierung von Wohnungen in Mehrfamilienhäusern vorgeschlagenen Konzept mit je einer Wärmepumpe für die Heizung und Trinkwassererwärmung wird nicht sofort überall auf Akzeptanz stoßen, auch wenn dies in vielen Wohnungen die einzige Alternative zu E-Boiler und E-Heizung oder Gas-Etagenheizung darstellt. Ein integriertes System wie derzeit in Europa üblich, findet in kleinen Wohnungen keinen Platz. Zwei getrennte Systeme sind z.B. derzeit in den USA üblich und es müsste weitere Überzeugungsarbeit geleistet werden. Es ist aber auch denkbar, dass sich solche Lösungen mittelfristig in Europa durchsetzen und damit einen Beitrag auf dem Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem leisten.

5. Verzeichnisse

5.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Definition der Kopplung von Simulations-Tools (Beispiel mit Energy Plus und Simulink)	14
Abbildung 2: Mehrfamilienhaus Schnitt (links) (in Anlehnung an (Passivhausinstitut, 2018)), 3D Ansicht einer Wohnung (Wohnnutzfläche 70,8 m ²) mit sechs Räumen (rechts)	15
Abbildung 3: Monatlicher HWB des Referenzgebäudes nach PHPP (dargestellt auch die Summe aller Verluste und aller Gewinne).....	16
Abbildung 4: Schema des Konzepts der Lüftungs-Heizungs-WP und Grundriss der Wohnung mit Anordnung der Komponenten (Außen- und Inneneinheit sowie Luft-Verteilung) (Siegele, 2019)	17
Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Inneneinheit (Siegele, 2019).....	17
Abbildung 6: TWW-Wärmepumpensystem für Wandeinbau oder Vorwandinstallation (Quelle: Vaillant)	19
Abbildung 7: Schema Systemkonzept der Trinkwarmwasser-Wärmepumpe mit drucklosem modularen Speicher und Frischwasserstation.....	19
Abbildung 8: Funktionsmuster Speichereinheit bestehend aus drei Modulen (links) und Trinkwarmwasserwärmepumpe (rechts) für Gebäudeintegration oder Vorwandinstallation Messergebnisse und Modellvalidierung zur Heizungswärmepumpe	20
Abbildung 9: links: Außeneinheit beim Einbau, rechts: Gesamtaufbau des Funktionsmusters mit Außen- und Inneneinheit im Kompaktgeräteprüfstand der UIBK	21
Abbildung 10: Ergebnisse für den Feuchteübertrager des Funktionsmusters, links: Wärmebereitstellungsgrad fortluftseitig, rechts: absolute Feuchte Fortluft.....	21
Abbildung 11: links: Heizleistung, rechts: Leistungsaufnahme (Kompressor WHP01900BCK).....	22
Abbildung 12: Inverterwirkungsgrad über der Eingangsleistung	22
Abbildung 13: links: Validierung Massenstrom, rechts: Validierung elektrische Leistungsaufnahme .	23
Abbildung 14: links: Leistung Kondensator (gemessen-simuliert), rechts: elektrische Leistungsaufnahme (gemessen-simuliert)	23
Abbildung 15: Heizlastkurve und Wärmepumpen-Kennfeld	24
Abbildung 16: Speichertemperaturen für den Zapfversuch mit 800 W Wärmeleistung und einer Soll-Vorlauftemperatur von 55 °C; Zapfprofil „M“ nach EN 16147.....	25
Abbildung 17: Stundenwerte der relativen Feuchte vs. Temperatur für jeden Raum der Wohnung (links) und Box-Plot der CO ₂ -Konzentration (rechts) bei Berücksichtigung der Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluftzirkulation - KÜ: Küche, SZ: Schlafzimmer, KO: Korridor (Flur), BA: Bad, KZ: Kinderzimmer, WZ: Wohnzimmer.....	27
Abbildung 18: Raumtemperatur während der Heizperiode für jeden Raum der Wohnung für die vier analysierten Heizsysteme (d.h. raumweise elektrische Heizkörper (A), Splitgerät mit Inneneinheit im Korridor (B), Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe (C) und Fortluft-Zuluft-Wärmepumpe mit Sekundärluft (D))	27
Abbildung 19: Jahresarbeitszahlen (SPF) für die vier untersuchten Heizsysteme. Für die Split-Wärmepumpe (d.h. System „B“) werden SPF für unterschiedliche Überhitzungen des Korridors (ΔT ,	

Überhitzung des Korridors im Vergleich zu den anderen Räumen der Wohnung) und unterschiedliche Leistungszahlen (COP) der Split-Wärmepumpe angenommen.....	28
Abbildung 20: Tagesmittelwerte der Heizleistung (links), jährliche Aufteilung der gelieferten thermischen Energie (Mitte) und jährliche Aufteilung der verbrauchten elektrischen Energie (rechts)	29
Abbildung 21: Simulationsergebnis mit generischer Kennlinie 750 W (Monatswerte), Kreise rechte Achse	30
Abbildung 22: links: Konzept des aktiven Überströmers, rechts: mögliches Einsatzschema	31
Abbildung 23: Verschiedene Grundrisse mit dem Einsatz von aktiven Überströmern (Sibille, 2015)..	32
Abbildung 24: (a) Funktionsmuster einer vorgefertigten Holzfassade mit integrierter Außeneinheit der Heizungs-Lüftungs-Wärmepumpe in der PASSYS Testzelle der UIBK und (b) während der Installation des Fassadenelements	33
Abbildung 25: Aufbau der Testfassade mit integrierter Außeneinheit.....	34
Abbildung 26: Integrationsmöglichkeit der Speichereinheit in das bestehende Mauerwerk (Fensterbrüstung) --- 3D Ansicht eines unterhalb des Fensters integrierten Speichers (Bildquelle: Kulmer Holzbau).....	34
Abbildung 27: Integrationsmöglichkeit in einer Vorhangfassade: Speicher und Wärmepumpe in einen Installationsschacht neben dem Fenster (links, Bildquelle: Vaillant) bzw. Speichereinheit unterhalb des Fensters (rechts, Bildquelle: Kulmer Holzbau)	35

5.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eckdaten Referenzgebäude und Referenzhaustechnik.....	15
Tabelle 2: Übersicht über die Leistungs-Daten der Lüftungs-Heizungswärmepumpe	24
Tabelle 3: Heizwärmebedarf (HWB), maximale stündliche Heizlast (HL) und Strombedarf (El) für das vorgeschlagene System mit Sekundärluft und das Referenzsystem. Die zusätzliche elektrische Leistung der Lüfter (für beide Systeme) und für die Sekundärluft (nur für das System mit Sekundärluft) sind berücksichtigt.....	28

5.3. Literaturverzeichnis

Austria, Statistik. 2004. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/index.html. *abgerufen im Dezember 2006.* [Online] 2004.

Bettgenhäuser, Kjell und Boermans, Thomas. 2011. *Umweltwirkung von Heizungssystemen in Deutschland - ein Vergleich.* Köln : Umweltbundesamt, 2011.

Passivhausinstitut. 2018. Passivhausinstitut Component Award 2016. [Online] 07. 12 2018. https://passiv.de/de/08_award/01_component_award/01_component_award_2016.html.

Pehnt, Martin. 2009. *Energiebalance - Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz.* Berlin : Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2009.

Sibille, Elisabeth. 2015. Optimized Integration of Ventilation with Heat Recovery in Residential Buildings through the Implementation of innovative Air Distribution Strategies and Pre-Fabricated Components. *Dissertation*. Innsbruck : s.n., 2015.

Siegele, Dietmar. 2019. Optimization and Appliance of small Air Exhaust Heat Pumps with Focus on Alpine Regions. *Disseration*. 2019.

Wetter, Michael. 2011. Co-Simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*. 2011, 4, S. 185-203.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)