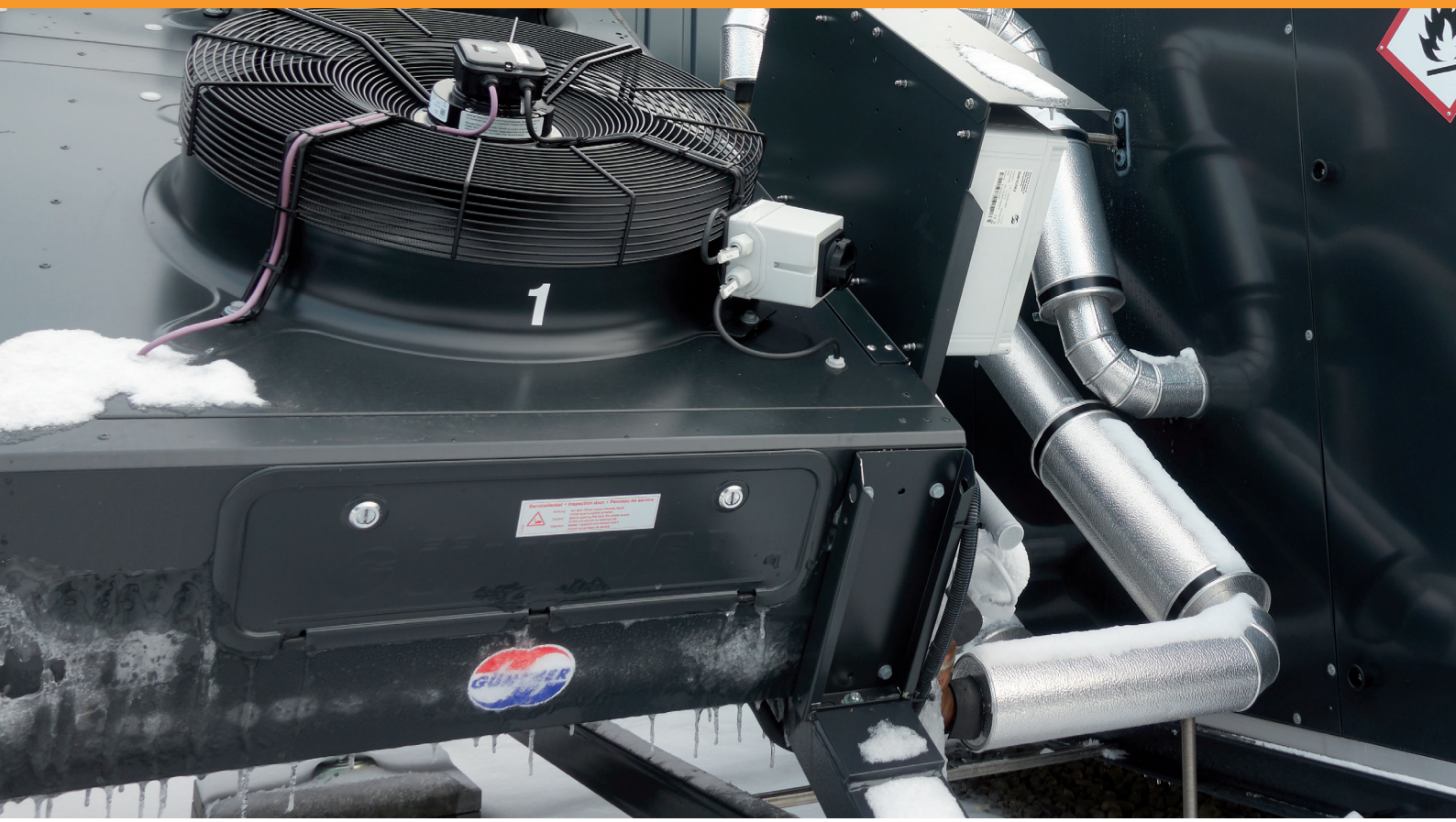
News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern und im städtischen Umfeld
Konzepte und Erkenntnisse aus der Praxis

Mittwoch, 27. Juni 2018, BFH Burgdorf



24. Tagung des Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik des Bundesamts für Energie BFE

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern und im städtischen Umfeld Konzepte und Erkenntnisse aus der Praxis

Tagungsband zur
24. Tagung des Forschungsprogramms
Wärmepumpen und Kältetechnik

27. Juni 2018
Berner Fachhochschule
Technik und Informatik Burgdorf

Herausgeber
Bundesamt für Energie (BFE)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

Impressum

Datum: Juni 2018
Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Wärmepumpen und Kältetechnik
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.bfe.admin.ch/forschung/waermepumpe

Vorwort

News aus der Wärmepumpen-Forschung

Wärmepumpen sind heute die erste Wahl als Heizungssystem für Neubauten. Auch bei Renovationen werden vermehrt Wärmepumpen eingesetzt und tragen dazu bei, die CO_2-Emissionen zu reduzieren. Wie die Statistik der Fachvereinigung Wärmepumpen zeigt, gilt dies aber vorwiegend für Einfamilienhäuser und kleinere Mehrfamilienhäuser. 97% der 2016 verkauften Wärmepumpen weisen eine Leistung unter 50 kW auf und 81% sind sogar kleiner als 20 kW. Zwei Drittel der Anlagen nutzen Aussenluft als Wärmequelle.

Wie sieht es hingegen bei grösseren Liegenschaften oder in dicht besiedelten Gebieten aus? Die Herausforderungen sind hier deutlich höher. Um beispielsweise die Wärmequelle Luft für einen Wohnblock zu nutzen, werden sehr grosse Verdampferflächen benötigt und die Integration ins Gebäude ist schwierig. Aber es gibt heute schon vielfältige Lösungen auf dem Markt und eine Reihe von Städten sind sehr aktiv, um den Einsatz von Wärmepumpen auch in dicht besiedelten Gebieten zu ermöglichen und zu fördern.

An der **24. Wärmepumpentagung des Bundesamts für Energie** (BFE) werden Sie Neues über den Einsatz von **Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern und im städtischen Umfeld** erfahren. Dies dokumentiert mit Beispielen aus der Praxis und aus der Forschung im nationalen und internationalen Kontext.

Carina Alles
Leiterin des BFE-Forschungsbereichs Wärmepumpen und Kältetechnik

Stephan Renz
Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik

Avant-propos

Nouvelles de la recherche sur les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur sont aujourd'hui le premier choix quand il s'agit de systèmes de chauffage pour les nouvelles constructions. On utilise aussi toujours davantage les pompes à chaleur lors de rénovations, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO_2. Comme le démontrent les statistiques du Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur, tel est surtout le cas pour les maisons individuelles et les petits immeubles résidentiels. 97% des pompes à chaleur vendues en 2016 ont une puissance inférieure à 50 kW et 81% sont même inférieures à 20 kW. Deux tiers des installations utilisent l'air extérieur comme source de chaleur.

Qu'en est-il en revanche des immeubles de plus grande taille ou situés dans des zones fortement densifiées ? Les défis sont ici nettement plus élevés. Par exemple, pour utiliser l'air comme source de chaleur pour un immeuble résidentiel, il faudrait de très grandes surfaces d'évaporation et l'intégration dans le bâtiment s'avère difficile. Il existe cependant aujourd'hui diverses solutions sur le marché, et de nombreuses villes sont très actives dans la facilitation et la promotion de l'utilisation de pompes à chaleur aussi dans les zones fortement densifiées.

Le **24e Congrès sur les pompes à chaleur,** organisé par **l'Office fédéral de l'énergie** (OFEN), vous informera des nouveautés en matière d'utilisation des **pompes à chaleur dans les immeubles résidentiels et en milieu urbain,** exemples tirés de la pratique et de la recherche nationale et internationale à l'appui.

Carina Alles
Cheffe du domaine de recherche pompes à chaleur et froid

Stephan Renz
Chef du programme de recherche pompes à chaleur et froid

Inhaltsverzeichnis

Wien: Heat Pump City of the Year 2017 **9**
Petra Schöfmann

Städtefernheizung mit Wärmepumpen: **12**
Internationale Übersicht
Leszek Wojtan

Wärmepumpen in thermischen Netzen: **13**
Anwendungsmöglichkeiten und Fallbeispiele
Diego Hangartner

Thermische Nutzung von Seen und Flüssen: **23**
Potenzial, Auswirkungen, Praxis
Adrien Gaudard

Einbindung von Wärmepumpen in übergeordnete Leitsysteme **32**
Pascal Imhof

Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements: **44**
situation et opportunités
Nicole Calame

Comment mobiliser le potentiel sous-estimé de l'air en milieu urbain? **54**
Matthias Rüetschi

Neuartige reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Propan für ein energie-effizientes Bürogebäude **60**
Stefan Rohrer

Systèmes de pompes à chaleur couplées à des capteurs solaires non-vitrés **73**
Emile Martin / Bernard Thissen

Performance Gap von Wärmepumpen in MFH: **82**
Potenzial einer Betriebsoptimierung und der Einfluss der Legionellenschaltung
Mario Roost

Grosse Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Umfeld: **95**
Herausforderungen und Lösungsansätze
Lukas Gasser

Abkürzungsverzeichnis **109**

Nützliche Adressen **110**

Referenten

Petra Schöfmann
UIV Urban Innovation Vienna GmbH
Operngasse 17-21
A-1040 Wien
schoefmann@urbaninnovaion.at

Leszek Wojtan, Dr
Friotherm AG
Sales Department
Langfeldstrasse 104
8500 Frauenfeld
leszek.wojta@friotherm.com

Diego Hangartner
Hochschule Luzern - Technik & Architektur
Institut für Gebäudetechnik & Energie (IGE)
Technikumstrasse 21
6048 Horw
diego.hangartner@hslu.ch

Adrien Gaudard
Eawag
Abteilung Umweltchemie
Überlandstrasse 133
8600 Dübendorf
Adrien.Gaudard@eawag.ch

Pascal Imhof
Misurio AG
Bahnhofplatz 1a
3039 Visp
pascal.imhof@misurio.ch

Nicole Calame
CSD Ingenieurs SA
Route Jo-Siffert 4 - Givisiez
Case postale 384
1701 Fribourg
n.calame@csd.ch

Matthias Rüetschi
SIG
Programme éco21 Immobilier
Case postale
1211 Genève 2
matthias.ruetschi@sig-ge.ch

Stefan Rohrer
ZHAW School of Engineering
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
Technikumstrasse 9 / TM O1.30
Postfach 805
8401 Winterthur
roht@zhaw.ch

Emile Martin
Perenzia Ingénieurs Sàrl
Rte Saint Cergue 37
1260 Nyon
emile.martin@perenzia.ch

Bernard Thissen
Energie Solaire SA
Rue des Sablons 8
3960 Sierre
b.thissen@energie-solaire.com

Mario Roost
Lemon Consult AG
Sumatrastrasse 10
8006 Zürich
roost@lemonconsult.ch

Lukas Gasser
Alera energies AG
Hohenrainstrasse 36
6280 Hochdorf
l.gasser@alera-energies.ch

Tagungs-Moderation

Carina Alles, Dr
Leiterin des BFE-Forschungsbereichs
Wärmepumpen und Kältetechnik
Sektion Energieforschung
Bundesamt für Energie
3003 Bern
carina.alles@bfe.admin.ch

Stephan Renz
Programmleiter des BFE-Forschungsprogramms
Wärmepumpen und Kältetechnik
Beratung Renz Consulting
Elisabethenstrasse 44
4410 Basel
info@renzconsulting.ch

Petra Schöfmann, UIV Urban Innovation Vienna GmbH
Expert Energy Centre

Wien – Heat Pump City of the Year 2017

Zusammenfassung

Wien ist eine schnell wachsende Stadt mit vielen großen Entwicklungsgebieten, in denen Wohnungen und Infrastruktur für Tausende von Menschen geschaffen werden. Wegen des Wiener Ziels, den Einsatz von Fossilien zu reduzieren, ist es wichtig, das Thema Energie bei der Planung neuer Stadtentwicklungsgebiete, aber auch für die bestehende, dicht bebaute Stadt zu berücksichtigen.

Die Wärmepumpentechnologie ist ein Schritt, um die Klimaziele zu erreichen. Die Stadt unterstützt die Installation von Wärmepumpen in Wien auf verschiedenen Wegen:

- *Online-Karte des geothermischen Potenzials des Stadtgebiets - In einer Online-Karte, die allen interessierten Bürgerinnen und Bürgern sowie Planerinnen und Planern zur Verfügung steht, werden die lokalen geothermischen Potenziale farbig dargestellt.*
- *Richtlinien für Wärmepumpen - Wien hat mehrere Richtlinien veröffentlicht, die planenden Unternehmen sowie Eigentümerinnen und Eigentümern bei der Entscheidung helfen sollen, das richtige Wärmepumpensystem mit der besten verfügbaren Wärmequelle zu installieren.*
- *Förderprogramm - Die Stadt Wien bietet finanzielle Investitionszuschüsse für Wärmepumpen in Wohngebäuden (Luft, Wasser und Erdreich) und saisonale Wärmespeicher sowie die Kombination mit Niedertemperaturnetzen an.*

Summary

Vienna is a rapidly growing city with many large development areas where housing and infrastructure are being created for thousands of people. Due to Vienna´s aim to reduce the use of fossils, it is very important to consider the issue of energy when planning new urban development areas but also for the existing densely-built city.

The heat pump technology is one step to reach the climate objectives. The city administration supports the installation of heat pumps in Vienna by several means:

- *Online map of the geothermal potential of the city area – The local potentials are shown in different colours in an online map, which is available to all interested citizens and planners.*
- *Heat pump guidelines - Vienna has published several guidelines which shall be a decision support for planners and property owners to install the proper heat pump system using the best heat source available.*
- *Funding scheme – The city of Vienna offers financial investment subsidies for heat pumps in residential buildings (air, water and ground source) and seasonal heat storage systems as well as the combination with low-temperature grids.*

Introduction

Cities all over the world are growing and they currently cause 75 % of the CO2 emissions. Vienna's quickly growing population and the Paris Agreement as well as the Smart City Wien Framework Strategy [1] support Vienna's aim to reduce the use of fossils – which are enormously contributing to climate and causing immense consequential costs. Unfortunately, the use of renewable energy in the densely-built city is still not state-of the-art (as it is currently for the most parts in the rural areas in Austria). But in the predictable future, the heat pump technology will provide new possibilities, also for the densely built city.

The City administration has intensively studied different possibilities of renewable energy supplies, especially in urban development areas. The use and (seasonal) storage of local heat sources (such as solar energy, exhaust heat, i.e. of sewage or exhausted air, or air-conditioning) was identified and calculated. The Life-Cycle-Analysis throughout 40 years showed a remarkable profitability.

Heat pump promotion strategy of the City of Vienna

Every heat pump is a (small) step to reach the climate objectives, no matter if it is working at a high or a low temperature level and regardless of its location (as a part of the local district heating or in a building). The city administration supports the installation of heat pumps in the city by several means:

Online map of the geothermal potential of the city of Vienna

The Vienna region has particularly good conditions for the use of groundwater and near-surface ground heat for energy purposes. A pilot study surveyed the geothermal energy potential in Vienna for the first time and it showed a huge potential. Various conditions, very good, good and fair, are shown in different colours in an online map [2], which is available to all interested citizens and planners. The data collected are particularly useful for the city's urban development areas. The results will facilitate the planning and construction of new plants for the optimum use of open and closed loop systems combined with heat pumps.

Heat pump guidelines

Vienna has published several guidelines [3], [4], [5] which shall be a decision support for planners and property owners to install the proper heat pump system using the best heat source available. These guidelines contain the functional principles of heat pumps and possible heat sources. They also cover planning basics, assistance for a tendering process and maintenance knowledge. In addition, information on national law as well as local permission processes assists the reader with the realisation of the heat pump system.

Funding scheme

The city of Vienna aims to increase the share of renewable energy in heat production considerably from the current level of 10%. There is potential for the use of solar energy, exhaust heat, groundwater and near-surface ground heat in Vienna, but it remains largely untapped. Therefore, new funding schemes have been launched to encourage the installation of systems that produce or store renewable heat. Since March 2016, the city has been subsidising heat pumps in residential buildings using ambient heat, systems for the thermal use of groundwater and ground heat, and seasonal heat storage systems (for waste heat and renewable energy) that help balance the load between the different times of production and use of heat. In addition, Vienna is the first Austrian province to subsidise seasonal storage combined with low-temperature grids, making it a trailblazer in the promotion of these innovative technologies. The city provides financial support for investment costs for heat pumps and storage technologies [6]. This partially mitigates of the high initial investment costs, and the use of these technologies will lower heating costs enormously for decades to come.

Quellen

[1] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008384b.pdf

[2] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/themenstadtplan/index.html

[3] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/waermepumpenleitfaden.pdf

[4] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/waermepumpe-kunden-broschuere-bf.pdf

[5] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/leitfaden-erdwaerme.pdf

[6] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/foerderungen/erneuerbare-waerme.html

Leszek Wojtan, Friotherm AG
Sales Department

Städtefernheizung mit Wärmepumpen: Internationale Übersicht

Informationen zu Anwendungsbeispielen von Städtefernheizungen mit Wärmepumpen finden Sie auf der Website der Firma des Referenten: http://www.friotherm.com/de/fernwaerme/

Diego, Hangartner, Institut für Gebäudetechnik und Energie, Hochschule Luzern
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Wärmepumpen in thermischen Netzen: Anwendungsmöglichkeiten und Fallbeispiele

Zusammenfassung

Wärmepumpen werden für die zukünftige Wärmeversorgung der Schweiz als Schlüsseltechnologie betrachtet. Bis jetzt wurden sie mehrheitlich für die Wärmeversorgung von Einfamilien- oder Mehrfamilienhäuser eingesetzt. Durch die Vielfalt an verfügbarer Abwärme und Umweltwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und durch die vermehrte Versorgung über thermische Netze, wird es in Zukunft eine Vielfalt von möglichen Einsatzbereichen für Wärmepumpen geben, in verschiedenen Leistungsbereichen und für verschiedene Temperaturhübe. So werden z.B. Wärmepumpen über 100 kW für sehr hohe (> 60 K) oder sehr geringe (< 4 K) Temperaturhübe gefragt. Vermehrt gefragt wird auch die Nutzung von Quellen bei höheren Temperaturen, die von Wärmepumpenherstellern Sonderbauformen abverlangen.

Es werden die im Rahmen des Programmes «Thermische Netze» und des internationalen Projekts Annex 47 «Heat pumps in district heating & cooling systems» des IEA Heat Pumping Technologies Collaboration Programme erarbeiteten Fallbeispiele aus der Schweiz und Ausland vorgestellt, welche als Inspiration für weitere Projekte dienen sollen. Ausserdem werden Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen präsentieren.

Summary

Heat pumps play a key role in Switzerland's future heat supply. Up to now, they have mainly been used to supply single family houses or apartment buildings. In the future, due to the increasing use of renewable energy and the potential of thermal networks, there will be a variety of possible areas of application for heat pumps, in different power ranges and for different temperature lifts. For example, heat pumps with a power range over 100 kW for high (> 60 K) or low (< 4 K) temperature lifts will be required as well as heat pumps that can deal with high source temperatures, requiring special designs from heat pump manufacturers.

Case studies from Switzerland and abroad will be shown and should serve as inspiration for further projects. The case studies were described as part of the Program «Thermal Networks» and the international project Annex 47 «Heat pumps in district heating & cooling systems» from IEA Heat Pumping Technologies Collaboration Programme. Furthermore, application possibilities for heat pumps will be presented.

Ausgangslage / Zielsetzung

Wärmepumpen haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte in der Wärmewirtschaft sehr gut etabliert. Insbesondere bei Neubauten (EFH, MFH der Bauperiode 2001 - 2015) werden bereits Wärmepumpen in mehr als die Hälfte der Objekte für die Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt [1]. Demzufolge haben Wärmepumpen für die Gebäudebeheizung basierend auf Wärmequellen wie Umgebungsluft, Erdwärme oder Grundwasser eine grosse Verbreitung.

In Zukunft wird es, durch das Potenzial von thermischen Netzen [2], eine Vielfalt von möglichen Einsatzbereichen für Wärmepumpen geben, in verschiedenen Leistungsbereichen und für verschiedene Temperaturhübe bzw Temperaturniveaus, die von Wärmepumpenherstellern Sonderbauformen abverlangen.

Ziel des Programmes «Thermische Netze» [3] und des internationalen Projekts IEA Annex 47 – Heat pumps in district heating & cooling systems [4] sind Fallbeispiele von thermischen Netzen zu dokumentieren und neue Anwendungsbereiche und Konzepte für die Integration von Wärmepumpen in thermischen Netzen zu definieren.

Typisierung «Thermische Netze»

Im Jahr 2016 lancierte das BFE das Programm «Thermische Netze» [3] mit dem Ziel, Grundlagen für alle Akteure zu erstellen und Fallbeispiele zu dokumentieren. Ausserdem soll eine Auswahl an Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten angeboten werden. Als erstes wurden in einem Bericht [5] Klarheit über die Begrifflichkeiten erstellt und die thermischen Netze typisiert (siehe Bild 1).

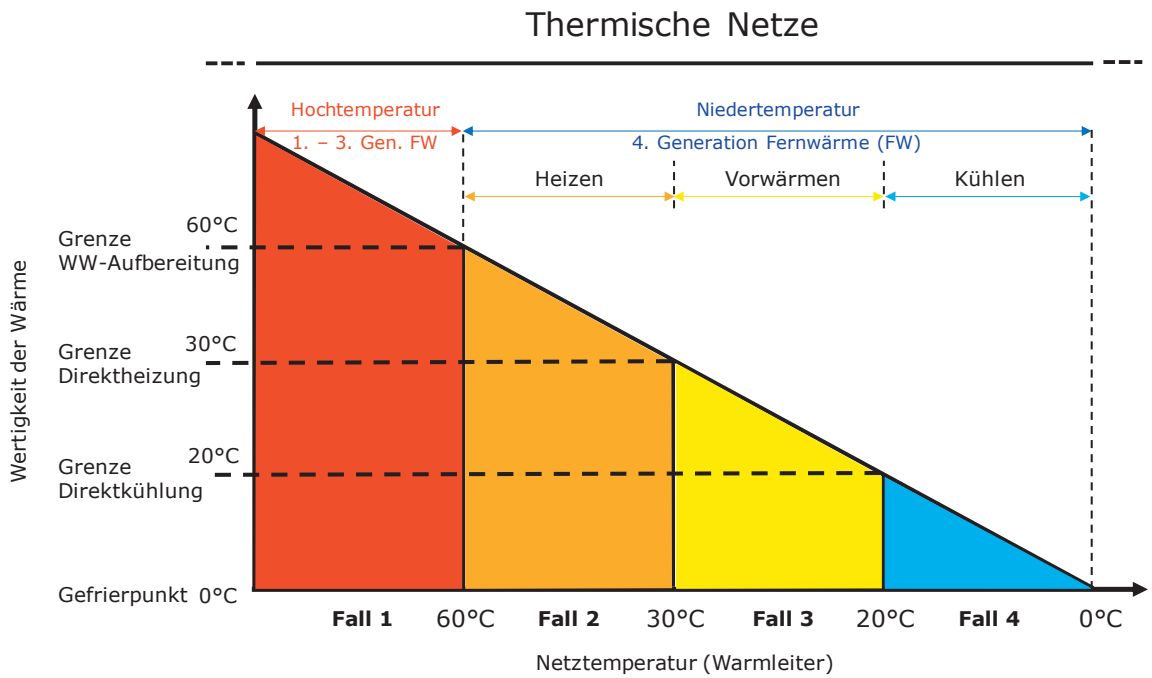


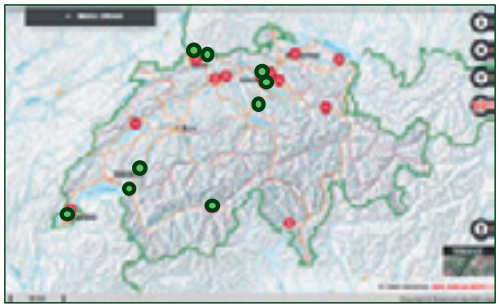
Bild 1: Typisierung thermischer Netze aufgrund der Netztemperatur. [5]

Die thermischen Netze werden aufgrund des Temperaturniveaus des Warmleiters unterteilt, da dieser definiert, welche Technologien für die restliche Energiebereitstellung im Gebäude erforderlich sind.

Aus heutiger Sicht sind Netze ≥ 60 °C Hochtemperaturnetze und unter 60 °C Niedertemperaturnetze. Diese Grenztemperatur gewährleistet in den Gebäuden die Wärmeversorgung für Heizen und Trinkwarmwarmwasser (TWW). Im Niedertemperaturbereich wird unterschieden zwischen Netzen mit direkter Heiz-, Kühl- oder Vorwärmungsfunktion.

Fallbeispiele Thermische Netze

Es wurden im Rahmen des Programmes «Thermische Netze» neun Fallbeispiele bearbeitet (siehe Bild 2), die als gemeinsames Werk auf der Webseite des Programmes «Thermische Netze» [6] publiziert wurden. Die Fallbeispiele erfüllen gewisse Kriterien: Sie nutzen erneuerbare Energiequellen (unabhängig vom Temperaturniveau) und basieren nicht auf klassischer Fernwärme auf hohem Temperaturniveau mit einer Verbrennung von Brennstoffen (Holz, KVA usw.).



1. Anergienetz Visp-West
2. Anergienetz ETH Hönggerberg
3. Anergienetz Friesenberg (FGZ)
4. Suurstoffi-Areal, Rotkreuz
5. Réseau thermique Genève Lac Nations (GLN)
6. CAD La Tour-de-Peilz
7. Wärmeverbund Rheinfelden-Mitte
8. Wärmeverbund Riehen
9. Réseau thermique Jardins de la Pâla, Bulle

Bild 2: Bearbeitete Fallbeispiele (grüne Punkte) innerhalb des Programmes «Thermische Netze». [6]

Es werden musterhaft drei Fallbeispiele kurz beschrieben: Genève-Lac-Nations, Bulle «Jardins de la Pâla» und Rheinfelden Mitte.

Genève-Lac-Nations (GLN)

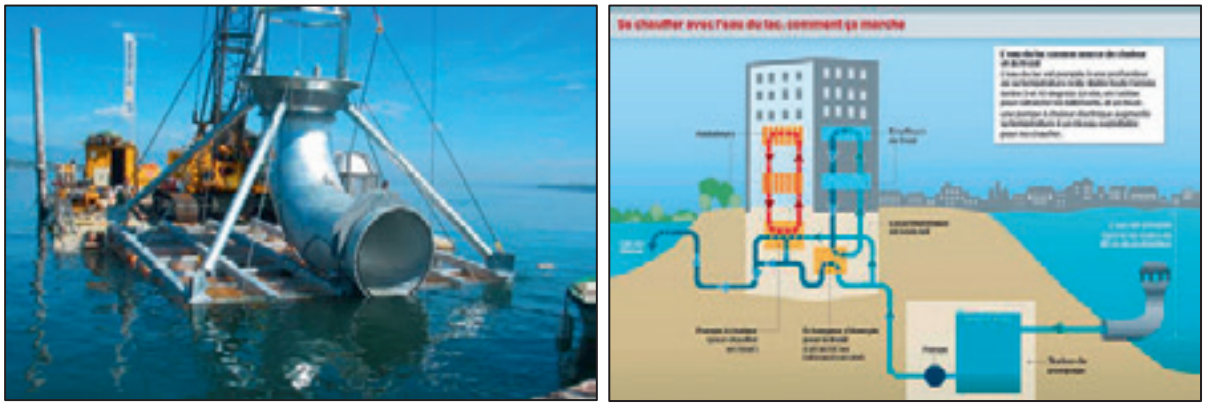


Bild 3: Seewasserfassung (links) und Aufbereitung des Wärme- und Kältebedarfs (rechts) im Projekt Genève-Lac-Nations. [6]

Genève-Lac-Nations ist eines der grössten Projekte in Europa, wo Seewasser für die Heizung und vor allem Kühlung von Gebäuden verwendet wird. Es werden Verwaltungsgebäude, Gebäude der internationalen Organisationen und auch Schulen mit einem Netz zwischen 5 °C und 17 °C versorgt. Der Bedarf an «Kälte» beträgt 20 GWh/a und der Bedarf an Wärme 5 GWh/a. Das Wasser wird im Genfersee in einer Tiefe von 37 m gefasst und zu den einzelnen Nutzern gepumpt. Über Wärmeübertrager und Wärmepumpen werden die Nutzer dezentral mit Kälte und Wärme versorgt. Ein Folgeprojekt konnte aus dem Erfolg dieses Netzes gestartet werden, GeniLac, indem das bestehende Netze bis zum Flughafen erweitert wird und das Stadtzentrum ebenfalls einbindet.

Bulle «Jardins de la Pâla»

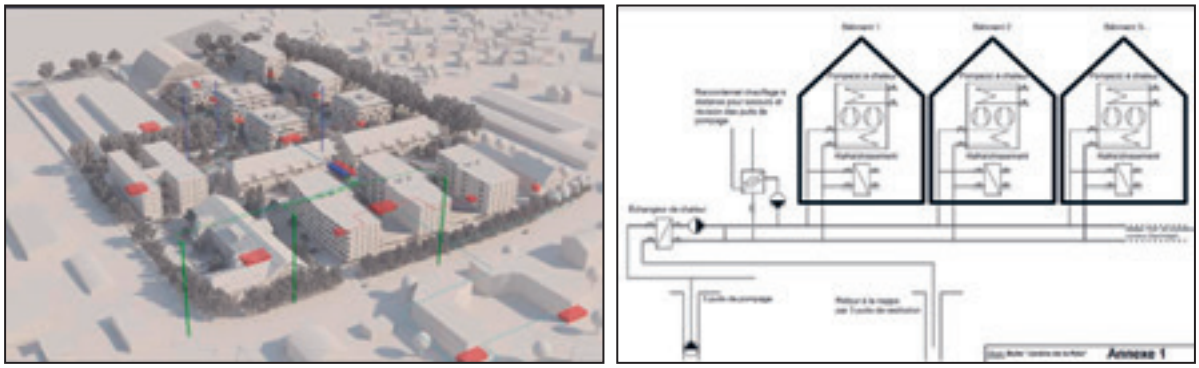


Bild 4: Überbauung in Bulle (links) und Prinzipschema (rechts) des Projekts «Jardins de la Pâla». [6]

In Bulle werden 65'000 m^2 Baufläche, Wohnen und Verkauf, an einem Verbund auf tiefem Temperaturniveau angeschlossen. Grundwasser zwischen 8 °C und 12 °C wird an drei Stellen in einer Tiefe von rund 50 m gefördert. Die Wärme wird über einen Wärmetauscher an ein Tieftemperaturnetz abgegeben und bis zu den Nutzern gepumpt. Dezentral werden über zweistufige Wärmepumpen Heizung und Trinkwarmwasser erzeugt.

Rheinfelden-Mitte (Feldschlösschen)

Bild 5: Abwärme aus der Feldschlösschen-Fabrik (links) und Versorgungsgebiet des Netzes (rechts) in Rheinfelden. [6]

In Rheinfelden wird Abwärme aus der Bierbrauerei Feldschlösschen genutzt. Dafür wurde ein sogenannter Abwärme-Ring erstellt, der die Wärme aus verschiedenen Abwärme-Quellen aus der Brauerei sammelt. Die Abwärme mit einer Temperatur von rund 30 °C wird mit Hilfe von Wärmepumpen auf bis zu 81 °C gebracht, bevor sie in das Netz eingespeist wird. Damit kann ein grosser Teil der Liegenschaften (in Bild 5 grün gekennzeichnet) der Gemeinde Rheinfelden mit Wärme versorgt werden.

Aus der Bearbeitung der neun Fallbeispiele konnte festgestellt werden, dass, obwohl die Quellen sehr heterogen sind, in allen Projekten (ausser evtl. Abwärmenutzung) die Primärenergie erneuerbar ist, in genügender Menge zur Verfügung steht, CO_2-frei und lokal verfügbar ist. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass in allen Projekten, Wärmepumpen für den Temperaturhub verwendet werden, sei es dezentral oder zentral angeordnet. Daraus wurde das Thema im Rahmen des IEA HPT Annex 47 «Heat pumps in district heating and cooling systems» näher betrachtet.

IEA Annex 47 – Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems

Fünf Länder nehmen im IEA HPT Annex 47 [4] teil: Dänemark (Lead), Grossbritannien, Österreich, Schweden und die Schweiz (HSLU) Im IEA HPT Annex 47 werden Fallbeispiele aus den verschiedenen Länder dokumentiert und verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für Wärmepumpen in thermischen Netzen untersucht.

Fallbeispiele Annex 47

Bisher wurden erst Projekte aus Dänemark, Österreich und der Schweiz dokumentiert. Einen Einblick in die Projekte aus Dänemark und Österreich zeigen eine Vielfalt an möglichen Anwendungsbereiche, von solarer Einbindung, Nutzung von Abwärme aus der ARA, Geothermie bis hin zur Abwärmenutzung aus Supermärkten und Industriebetrieben. Es zeichnet sich aber in beiden Länder ein gemeinsamer Fall ab, der ein hohes Potenzial darstellt: der Einsatz von Wärmepumpen in bereits bestehenden Biomassen-Anlagen für Rauchgaskondensationszwecke. Die Wärmepumpen nutzen die Wärme aus dem Rauchgas und dadurch wird die Kapazität des Netzes erhöht und die Effizienz der bestehenden Anlage kann zusätzlich noch verbessert werden. In Bjerringbro, Dänemark wird die Wärmequelle (Rauchgas) von 40 °C auf 15 °C gekühlt und der Rücklauf des Fernwärmenetzes wird von 37 °C auf 45 °C für den Vorlauf erwärmt. Dadurch konnte die Effizienz des bestehenden Heizkessels um rund 5 % gesteigert werden [7]. In Flachau, Österreich kann nun dank der Rauchgaskondensation, die Effizienz der Holzheizung auf 107% gesteigert und die Leistung des Netzes um 1.2 MW erhöht werden [8].

Anwendungsmöglichkeiten

Aus der Dokumentation der Fallbeispiele und Erarbeitung von Konzepten wurden typische Anwendungsfälle definiert. Die Anwendungen wurden anhand der Quellentemperatur in zwei Kategorien unterteilt: einmal mit tiefem Temperaturniveau (Umweltwärme) und einmal mit hohem Temperaturniveau (Holz, Abwärme, Industrie, Geothermie usw.).

Quellen auf tiefem Temperaturniveau

Bei der Nutzung von Quellen nahe der Umgebungstemperatur können Wärmepumpen zentral oder dezentral angeordnet werden können (siehe Bild 6). Es ist jeweils ein Abwägen zwischen wirtschaftlichen, ökologischen und sozio-ökonomischen Faktoren, welche Anordnung geeigneter ist. Die Wahl ob die Wärmepumpe zentral oder dezentral platziert wird, soll in jedem Fall nach einer gründlichen Analyse des Gesamtsystems entschieden werden.

Zentral vs. Dezentral

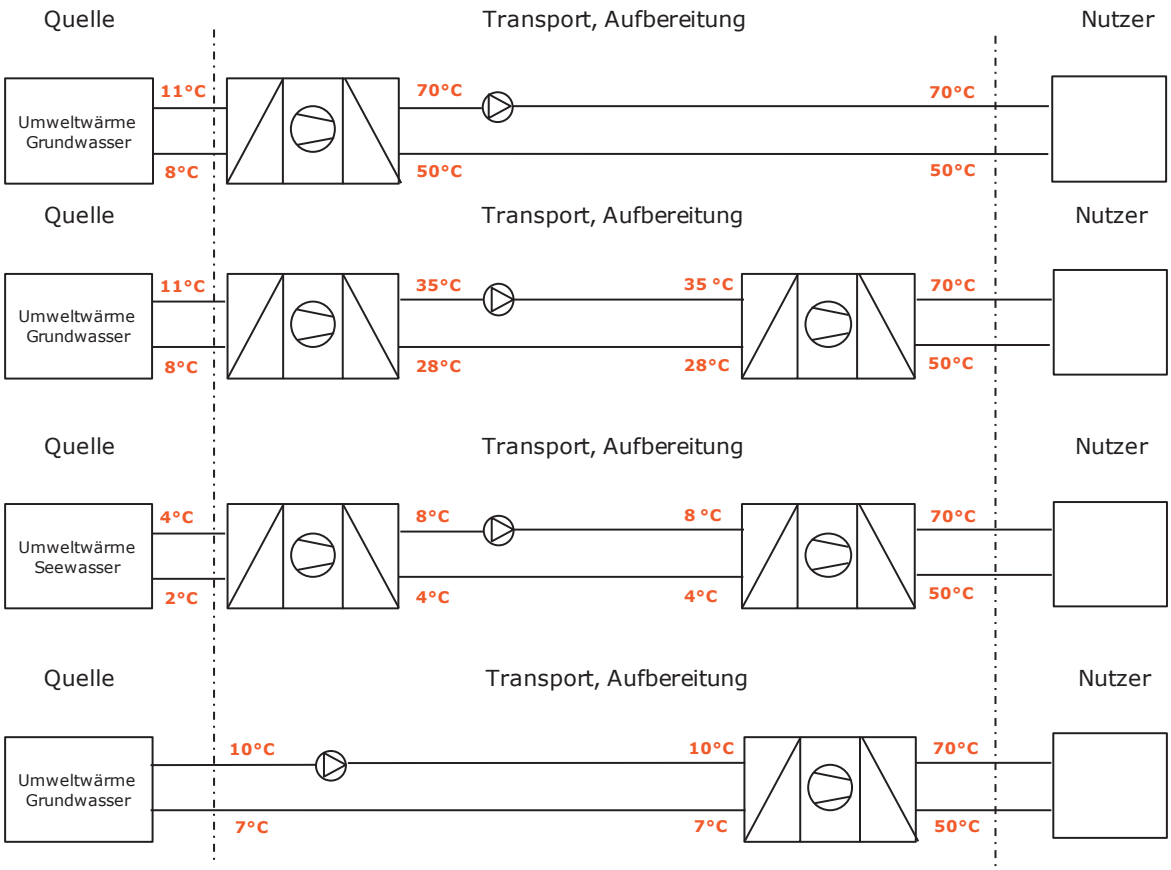


Bild 6: von oben nach unten;

- *Nutzung von Grundwasser, zentrale Wärmeaufbereitung auf 70 °C für Heizung und Trinkwarmwasser,*
- *Nutzung von Grundwasser, zentrale Wärmeaufbereitung auf 35 °C für direkte Raumheizung (Neubau) und dezentrale Wärmeaufbereitung auf 70 °C, für Heizung (Altbau) und Trinkwarmwasser,*
- *Seewassernutzung, zentraler Temperaturhub von 4 °C auf 8 °C und dezentrale Wärmeaufbereitung auf 70 °C, für Heizung (Altbau) und Trinkwarmwasser, Möglichkeit von Direktkühlung,*
- *Nutzung von Grundwasser dezentrale Wärmeaufbereitung auf 70 °C, für Heizung (Altbau) und Trinkwarmwasser, Möglichkeit von Direktkühlung.*

Im Rahmen des Programms «Thermische Netze» wurde dazu ein Bericht über die Entscheidungskriterien für die Systemwahl erstellt [6]. Die Tendenz aus einem untersuchten Beispiel mit Grundwassernutzung zeigt aber, dass ein Hochtemperaturnetz mit zentraler Wärmeaufbereitung für Altbauten und ein Niedertemperaturnetz mit dezentraler Wärmeaufbereitung für Neubauten wirtschaftlicher ist. Bei der zentralen Aufbereitung lohnt es sich aus wirtschaftlichen Gründen für die Auslegung der Leitungen auf die maximale Last zu verzichten, dafür aber andere Wärmeerzeuger mit fossilen Energieträgern für die Spitzendeckung einzusetzen.

Ausgehend davon, dass die zentralen Wärmepumpen grössere Gebiete versorgen als dezentrale Wärmepumpen, zeichnet sich ein wachsender Markt für Hochtemperatur-Wärmepumpen (Senkentemperaturen von 70–90 °C) im MW-Bereich ab, insbesondere bei der Sanierung von bestehenden Wärmeverbunden mit fossilen Energieträger und Altbauten.

Der Temperaturhub bei der Seewassernutzung wird benötigt, wenn die Seewassertemperaturen bei der Fassung über den Winter bei konstant 4 °C liegen und eine vernünftige Leistung an das Sekundärnetz übertragen werden soll. Es werden Wärmepumpen in einem höheren Leistungsbereich benötigt, die mit sehr geringeren Temperaturhüben hohe COP-Werte erreichen können. Heutzutage existieren solche Anlagen auf dem Markt nicht.

Quellen auf hohem Temperaturniveau

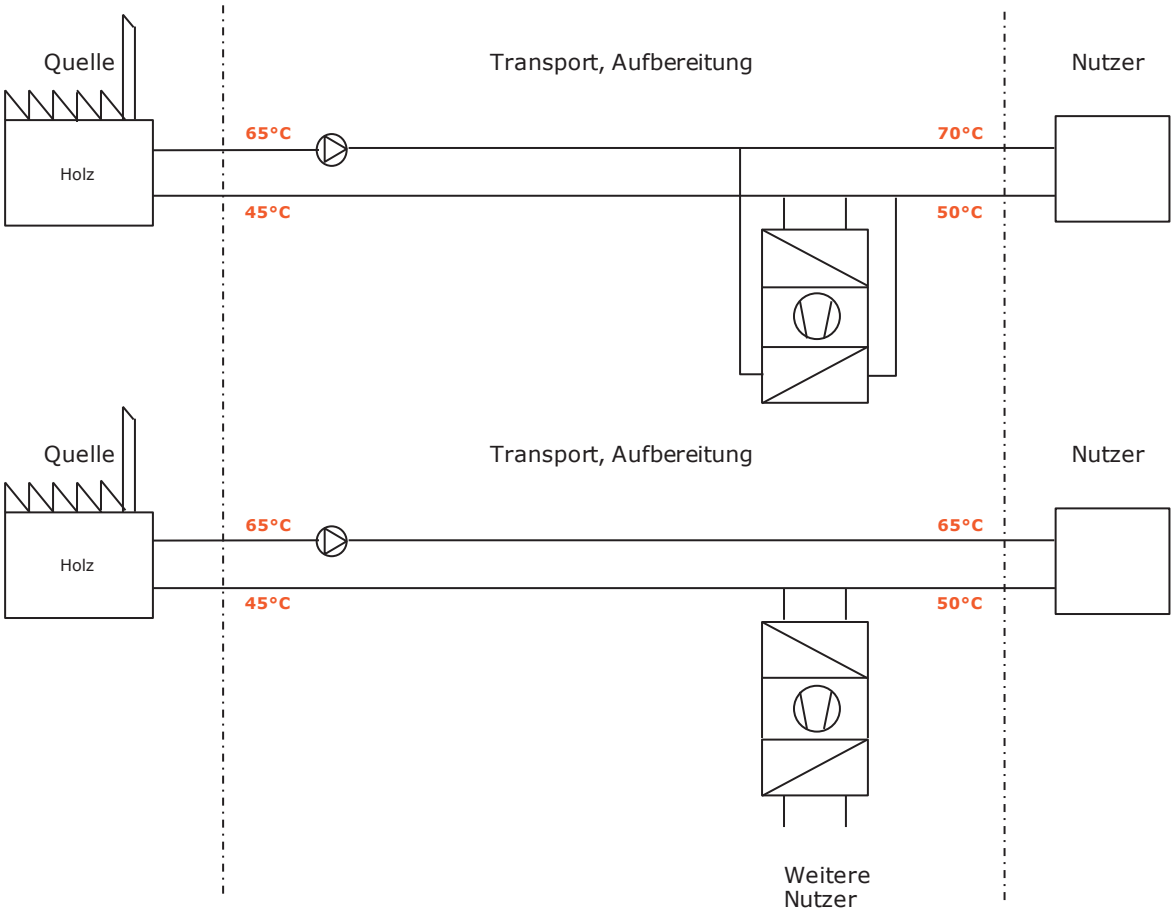


Bild 7: von oben nach unten;

- *Senkung der Rücklauftemperaturen durch Wärmepumpen für die Erhöhung der Leistung des eigenen Netzes z.B. bei Holzfeuerungen mit Rauchgaskondensation*
- *Senkung der Rücklauftemperaturen durch Wärmepumpen für die Versorgung eines zusätzlichen Netzes z.B. bei Holzfeuerungen mit Rauchgaskondensation*

Der Einsatz von Wärmepumpen bei Wärmequellen auf höherem Temperaturniveau erfordert besondere Kältemittel und Kompressoren, die bei marktüblichen Wärmepumpen nicht vorhanden sind. Wie bereits bei den Fallbeispielen im IEA HPT Annex 47 erwähnt, kann der Einsatz von Wärmepumpen im Rücklauf von Fernwärmenetzen die Leistung des Netzes um 25% erhöht werden und die Effizienz der Holzheizung um ca. 5 bis 10% gesteigert werden. Je nach Eignung oder Platzbedarf können die Wärmepumpen entweder direkt bei der Quelle nach dem Wärmeübertrager platziert werden oder nahe beim Nutzer.

Schlussfolgerung

Wärmepumpen sind in thermischen Netzen noch wenig verbreitet. Schweden hat den höchsten Anteil in Europa, wo 10 % des Wärmeabsatzes über Wärmepumpen in thermischen Netzen gedeckt wird. Der Erfolg von Schweden liegt unter anderem daran, dass die Herstellung und der Einsatz von Wärmepumpen eine lange Tradition haben, aber auch daran, dass der Strommarkt liberalisiert wurde, d.h. in Schweden werden Wärmepumpen eingesetzt, um die überschüssige Produktion im Netz zu nutzen. Dazu kommt noch, dass das Verhältnis Strompreis zu Gaspreis um ein Faktor 3.5 geringer ist als in Deutschland oder Faktor 2.5 als in der Schweiz

In der Schweiz wird es in Zukunft durch die Vielfalt an verfügbarer Abwärme und Umweltwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und durch die vermehrte Versorgung über thermische Netze, eine Vielfalt von möglichen Einsatzbereichen für Wärmepumpen geben, in verschiedenen Leistungsbereichen und für verschiedene Temperaturhübe. Zum Beispiel:

- Zentrale Aufbereitung, Wärmepumpe > 1 MW, Grundwassernutzung mit Temperaturhub von 11 °C auf 70 °C.
- Dezentrale Aufbereitung, Wärmepumpen zw. 10 kW – 100 kW mit Temperaturhub von 11 °C auf 70 °C.
- Seewassernutzung, Wärmepumpen > 1 MW, Temperaturhub von 4 °C auf 8 °C.
- Temperatursenkung Rücklauf Fernwärme und Rauchgaskondensation, Wärmepumpen 10 kW – 1 MW, Temperaturhub von 50 °C auf 70 °C.

Für diese Zwecke können marktübliche Wärmepumpen nur bedingt verwendet werden; es werden massgeschneiderte Sonderbauformen benötigt. Neue Kältemittel müssen eingesetzt werden, wobei der Trend langfristig hin zu natürlichen Kältemitteln geht. Bei kleinen Temperaturhüben müssen die Komponenten der Wärmepumpen und die gesamte Anlage speziell für die vorliegenden Bedingungen ausgelegt werden, damit das Potenzial ausgeschöpft werden kann. Insbesondere werden Verdichter benötigt, welche bei kleinen Hüben (sprich kleinen Druckverhältnissen) eine hohe Effizienz aufweisen. Diese Anforderungen bieten Herstellern von Wärmepumpen neue Anwendungsgebiete, um ihre Produktpalette zu erweitern, zu verbessern und als Pioniere auf dem Markt aufzutreten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Energie für die finanzielle Unterstützung und die Projektbegleitung des Programmes «Thermische Netze».

Quellen

[1] Gebäude und Wohnungsstatistiken, Bundesamt für Statistik BFS, Neuchâtel, 2015.

[2] Sres T. et al., Weissbuch Fernwärme, eicher und pauli, VFS, März 2014.

[3] www.energieschweiz.ch/page/de-ch/thermische-netze

[4] http://heatpumpingtechnologies.org/annex47/

[5] Ködel J. et al., Grundlagen und Erläuterungen zu Thermischen Netzen, SCCER, EnFK, März 2018

[6] www.energieschweiz.ch/home.aspx?p=22949,22963,22985

[7] www.danskfjernvarme.dk/groen-energi/projekter/drejebog-om-store-varmepumper

[8] www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke/broschuere.html

Adrien Gaudard, Eawag
Abteilung Umweltchemie

Thermische Nutzung von Seen und Flüssen: Potenzial, Auswirkungen, Praxis

Zusammenfassung

Die Schweizer Oberflächengewässer enthalten immense Reserven an Wärmeenergie, von der ein Teil zum Heizen und Kühlen nahe gelegener Gebäude und Infrastrukturen dienen kann. Diese lokale Energiequelle ist erneuerbar und zuverlässig und kann somit fossile Brennstoffe und Elektrizität ersetzen. Eine derartige thermische Nutzung beruht auf Wärmepumpen, bzw. (wenn nötig) Kältemaschinen, also auf bewährten Techniken: Sowohl in der Schweiz wie auch weltweit sind bereits zahlreiche Systeme in Betrieb oder in Planung. Dabei wird dem See- oder Fluss- oder Grundwasser je nach Bedarf Wärme entzogen oder hinzugefügt. Nach dem Wärmeaustausch wird das verwendete Wasser meist mit einer veränderten Temperatur wieder in das Gewässer zurückgeführt: Allgemein erfolgt im Winter eine Abkühlung und im Sommer eine Erwärmung.
Besonders tiefe Seen und grosse Flüsse sind für eine thermische Nutzung geeignet, da sie eine wenig variierende Temperatur aufweisen und auch ein extrem grosses Potenzial darstellen. Eine Analyse zeigt dass dieses Potenzial oft die regionale Nachfrage übertrifft, sodass die thermische Nutzung der Oberflächengewässer bis 40 % des Schweizer Wärme- und Kältebedarfs decken könnte.
Mehr Information: https://thermdis.eawag.ch/de

Resumée

Les eaux superficielles suisses renferment d'immenses réserves d'énergie thermique, dont une fraction pourrait servir à chauffer et refroidir les bâtiments et infrastructures proches. Cette source d'énergie locale, renouvelable et fiable pourrait ainsi remplacer combustibles et électricité. Une telle utilisation thermique repose sur l'utilisation de pompes à chaleur, resp. (si nécessaire) de machines frigorifiques, soit des techniques éprouvées: de nombreux systèmes sont en fonctionnement ou planifiés en Suisse et à travers le monde. La technique consiste à utiliser l'eau d'un lac, d'une rivière ou d'une nappe phréatique pour en extraire ou y rejeter de la chaleur, et implique souvent un rejet d'eau à une température modifiée: généralement un refroidissement en hiver et un réchauffement en été.
Les lacs profonds et les grandes rivières sont particulièrement adaptés à une utilisatioun thermique, car ils ont une température variant peu et représentent un potentiel extrêmement important. Une analyse montre que ce potentiel surpasse souvent la demande régionale, montrant que l'utilisation thermique des eaux de surface pourrait couvrir jusqu'à 40 % des besoins suisses de chaleur et de froid.
Plus d'informations: https://thermdis.eawag.ch/fr

Einleitung

Der jährliche Nettoenergieverbrauch in der Schweiz beträgt rund 850 PJ [1]. Knapp die Hälfte davon, d.h. 400 PJ, wird zum Heizen von Gebäuden, zur Warmwasseraufbereitung und für industrielle Prozesse verwendet [2]. Zu schätzungsweise 80% wird diese Wärmeenergie aus der Verbrennung der fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl gewonnen. Dies obschon zahlreiche alternative Wärmequellen zur Verfügung stehen [3] Der Kühlbedarf in der Schweiz beträgt aktuell rund 70 PJ (ohne Berücksichtigung der Kühlung der Kernkraftwerke) und wird mehrheitlich durch elektrische Klimaanlagen abgedeckt [4].

Um die CO_2-Emissionen zu vermindern, ist der schrittweise Ersatz der fossilen Brennstoffe durch andere Energieträger unerlässlich. Die Rückgewinnung von Abwärme und die Nutzung der Umgebungswärme sind umweltfreundliche, zukunftsgerichtete Lösungen, die eine lokale und nachhaltige Energieproduktion ermöglichen. Um Niedertemperatur-Wärmequellen nutzen zu können, kommen Wärmepumpen zum Einsatz, welche die Temperatur auf das vom Nutzer gewünschte Niveau anheben. Die Wärmepumpen benötigen externe Energie (meist Elektrizität), welche typischerweise 20 – 35% der erzeugten Wärme ausmacht.

Aufgrund seiner hohen Wärmekapazität kann Wasser Wärme sehr effizient speichern. Die Oberflächengewässer nehmen natürlicherweise im Frühling und Sommer Wärme von der Sonne und der Atmosphäre auf und geben sie im Winter wieder ab. Dieser Austausch erfolgt langsam. Die Wassertemperatur insbesondere der Seen und grossen Flüsse ändert sich deshalb saisonal und im Tagesverlauf weniger stark als die Lufttemperatur. Die Gewässer eignen sich daher gut zum Heizen oder Kühlen (nachfolgend als **thermische Nutzung** bezeichnet).

Seen, Flüsse und Grundwasser sind saubere und zuverlässige erneuerbare Wärmespeicher. In der Schweiz wartet dieses grosse Potenzial quasi vor der Haustür, liegen doch die grossen Agglomerationen an Flüssen oder Seen (z.B. Zürich, Genf, Basel, Bern, Lausanne, Zug, Luzern, Biel, Neuenburg, Thun oder Lugano). Dennoch werden als Energiequellen immer noch überwiegend fossile Brennstoffe zum Heizen und Elektrizität zum Kühlen verwendet [2].

Die thermische Nutzung der Oberflächengewässer würde daher bedeutende Einsparungen an fossilen Brennstoffen und Elektrizität erlauben und entspricht damit der Energiestrategie der Schweiz. Sie würde zudem die lokale Energieversorgung fördern und hätte positive wirtschaftliche Auswirkungen.

Technische Grundlagen

Für die Entnahme von Wärme oder Kälte aus einem See oder einem Fluss braucht es eine Wasserfassung, einen Primärkreislauf, in welchem das See-/Flusswasser zirkuliert und meist einen Sekundärkreislauf, welcher die Wärmeträgerflüssigkeit zum Nutzer bringt. Für die Heizung werden Wärmepumpen verwendet, und die Heizflüssigkeit zirkuliert normalerweise in einem zentralen (ein einziger Kreislauf für alle Nutzer) oder dezentralen (ein Kreislauf für jeden Nutzer) Tertiärkreislauf. Wärmetauscher ermöglichen die Wärmeübertragung zwischen den verschiedenen Kreisläufen. Das Diagramm im Bild 1 zeigt ein solches System. Obwohl das Knowhow in der Schweiz vorhanden ist, stehen bisher erst wenige grössere Anlagen (> 2 MW) in Betrieb[1].

[1] Zusammenstellung der heutigen Anlagen: https://thermdis.eawag.ch/de/map-installations

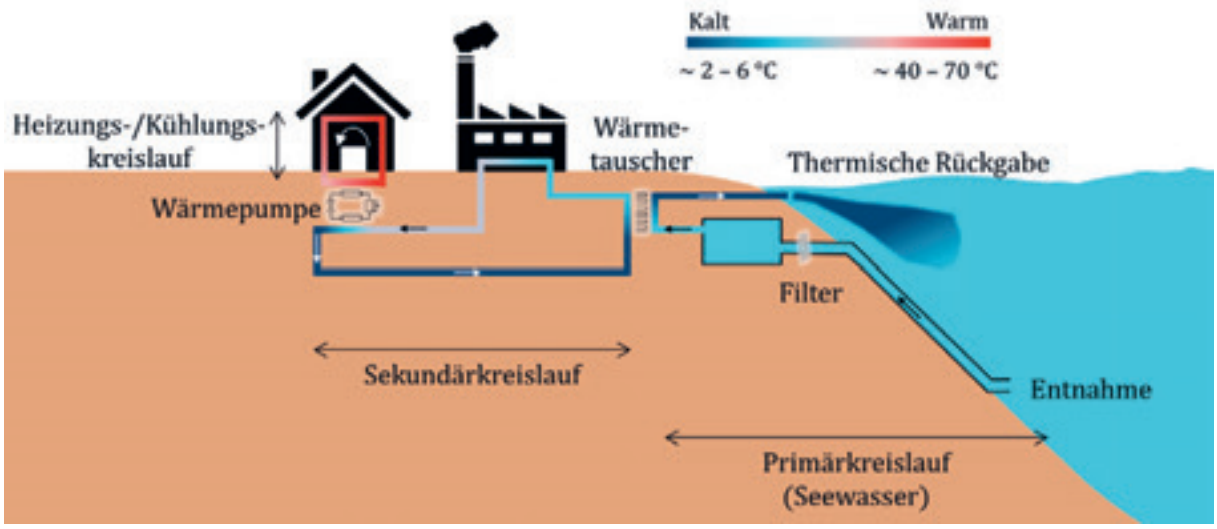


Bild 1: Beispiel einer Anlage für die thermische Nutzung aus einem See. In diesem Beispiel wird Seewasser genutzt, um dezentral eine Industrieanlage zu kühlen und anschliessend ein Haus zu heizen. Hier ist Heizung dominant und daher ist das Rückgabewasser kälter als das gefasste Seewasser.

Die thermische Nutzung ist mit der Rückgabe von erwärmtem (bei Kühlung) bzw. abgekühltem (bei Heizung) Wasser verbunden. Diese thermische Rückgabe erfolgt oft in dasselbe Gewässer, aus welchem das Wasser zuvor entnommen worden ist, und kann Auswirkungen haben.

Auswirkungen für die Gewässer

Die Temperatur beeinflusst physikalische, chemische und biologische Prozesse im Gewässer (s. Bild 2); daher kann sich eine thermische Rückgabe auf die Lebensbedingungen von Organismen auswirken. Die möglichen Folgen für das aquatische Ökosystem wurden vor kurzem in einem Artikel zusammengefasst [5]. Besonders heikel sind Erwärmungen der Gewässer, welche den bereits durch den Klimawandel verursachten Stress auf die Ökosysteme weiter verstärken können. Wichtig ist auch, dass die ökologischen Funktionen von Gewässern nicht beeinträchtigt werden. Beispielsweise sollte in Flüssen die Migration von Fischen oder in Seen die saisonale Tiefenmischung gewährleistet bleiben [5].

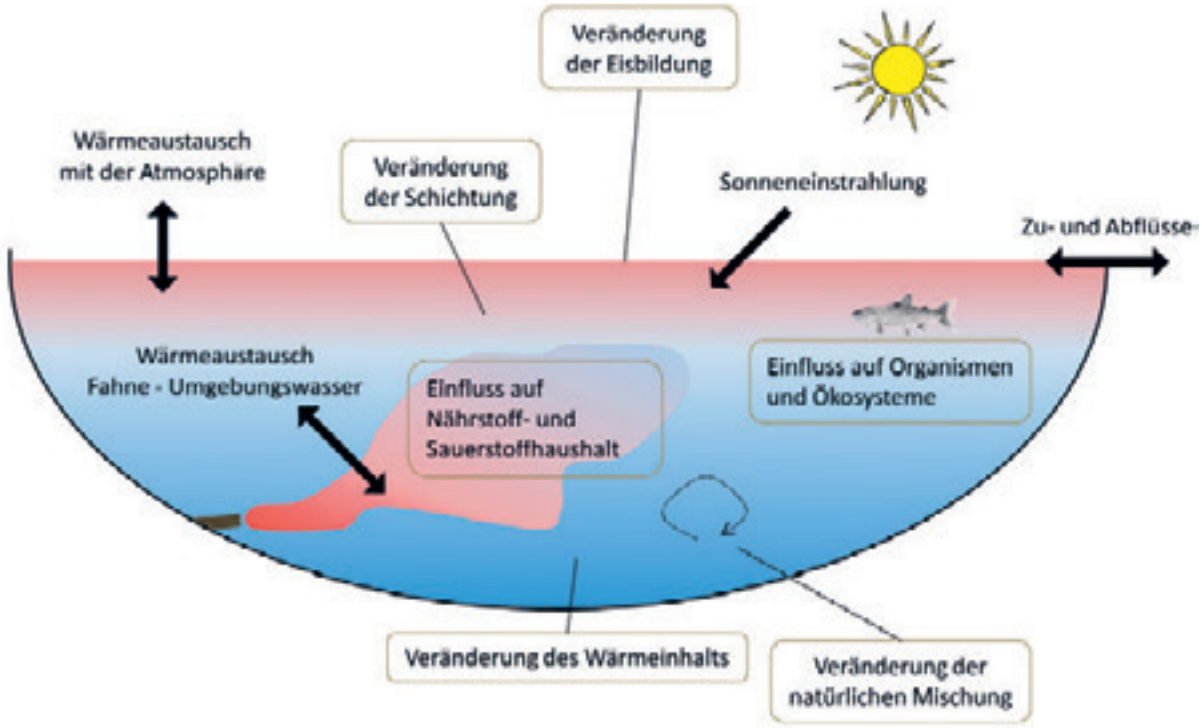


Bild 2: Thermische Einleitung in einen See: Übersicht über die wichtigsten Wärmeflüsse (Pfeile), die betroffenen Prozesse und möglichen Auswirkungen (eingerahmt).

In **Seen** beeinflusst Wärmezufuhr oder -entnahme die natürlichen Mischungsprozesse und die Schichtung [5]. Die Auswirkungen hängen von der eingeleiteten bzw. entzogenen Wärmemenge, deren Saisonalität und der Tiefe der Einleitstelle ab [5]. So besteht bei der Einleitung von warmem Wasser an der Oberfläche das Risiko, dass die Dauer der stabilen Schichtung verlängert wird (v.a. vom Frühjahr bis Herbst). Demgegenüber kann der Eintrag von Kälte im Winter die Durchmischung des Wassers fördern, was für die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers vorteilhaft ist. Auch die blosse Verlagerung eines Wasservolumens kann Auswirkungen haben. Wird beispielsweise Wasser unterhalb der Sprungschicht (Tiefenzone starker Schichtung) entnommen und oberhalb zurückgeleitet, kann dadurch die Sprungschicht abgesenkt und das Volumen der Oberflächenschicht vergrössert werden. Weil das Tiefenwasser oft nährstoffreicher ist als das Oberflächenwasser, kann dadurch die Produktivität der Algen erhöht werden. Allenfalls sind auch Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Algengemeinschaft möglich. In einem eutrophen, d.h. sehr produktiven See könnte die Entnahme von sauerstoffreichem Wasser an der Oberfläche, kombiniert mit der Rückgabe in die oft sauerstoffarmen und mit reduzierten Verbindungen angereicherten tiefen Schichten, zu einer erhöhten Sauerstoffzufuhr ins Tiefenwasser und somit zu einer Verbesserung der Wasserqualität führen.

In **Fliessgewässern** wird ein thermischer Eintrag mit der Strömung transportiert und kann sich über mehrere Kilometer erstrecken, bevor er vollständig eingemischt ist, wenn das Einleitsystem nicht eine rasche Durchmischung fördert oder das Fliessgewässer nicht sehr turbulent ist. Unterhalb der Einleitstelle kann daher die Wassertemperatur des Gewässers seitlich heterogen verteilt sein [5]. Stromabwärts nähert sich die Temperatur des Fliessgewässers durch Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und durch seitliche Zuflüsse zunehmend wieder dem

natürlichen Zustand an [5]. Ein gewisser Teil der thermischen Verunreinigung kann aber das Meer oder einen weiter flussabwärts liegenden See erreichen. Auch die Art, wie ein Fliessgewässer sich in ein stehendes Gewässer einschichtet, kann durch eine starke Temperaturveränderung beeinflusst werden: ein wärmerer Fluss taucht zum Beispiel weniger tief ein. Dies kann sich auch auf die Verteilung von Nährstoffen, Sauerstoff oder Partikeln im See auswirken [5].

Es ist wichtig, dass anthropogene Temperaturveränderungen beobachtet und gemessen werden, um sie im Vergleich mit der natürlichen Variabilität beurteilen zu können. Für ein sehr dynamisches Fliessgewässer können gegenüber einem See, dessen thermisches Regime natürlicherweise weniger variabel ist, grössere Veränderungen toleriert werden [5]. Besondere Vorsicht ist angebracht bei einer Zunahme der Maximaltemperaturen, einer Abnahme der Minimaltemperaturen, sowie bei künstlich erzeugten raschen Temperaturschwankungen.

Thermisches Potenzial der Schweizer Seen und Fliessgewässern

Das thermische Potenzial der wichtigsten Seen und Flüsse in der Schweiz wurde vor kurzem abgeschätzt und mit dem regionalen maximalen Heiz- und Kühlbedarf verglichen [6]. Diese Abschätzungen erfolgen aufgrund von vereinfachten Berechnungen und geben eine Grössenordnung an. Für die Umsetzung einer konkreten thermischen Nutzung, die sich der hier abgeschätzten Grössenordnung annähert, müsste eine vertiefte Analyse durchgeführt werden, welche die spezifischen Eigenschaften des betroffenen Gewässers berücksichtigt.

Insgesamt wurden 36 Seen oder Seebecken, 35 Flüsse an 57 Standorten, und 9 Seeabflüsse berücksichtigt. Die Potenziale zur Wärmenutzung und Kältenutzung von diesem Wasserkörper sind kartographisch gezeigt im Bild 3 und Bild 4.

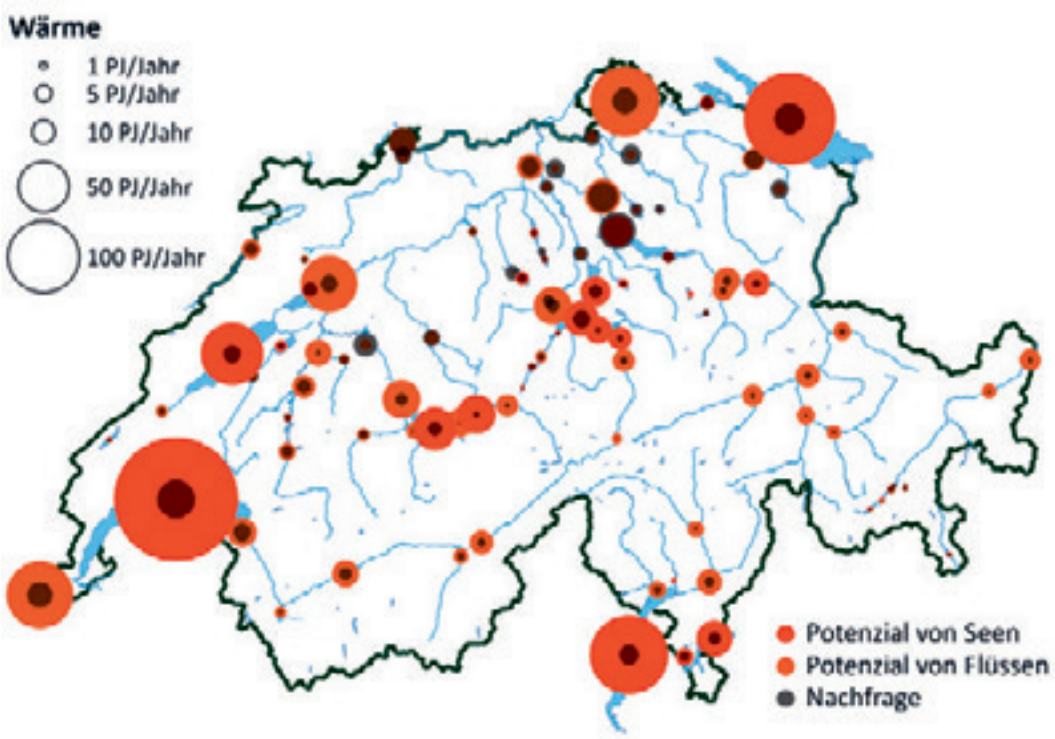


Bild 3: Potenzial der Schweizer Seen und Flüssen für Wärmeextraktion, und regional maximale Nachfrage [6]. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

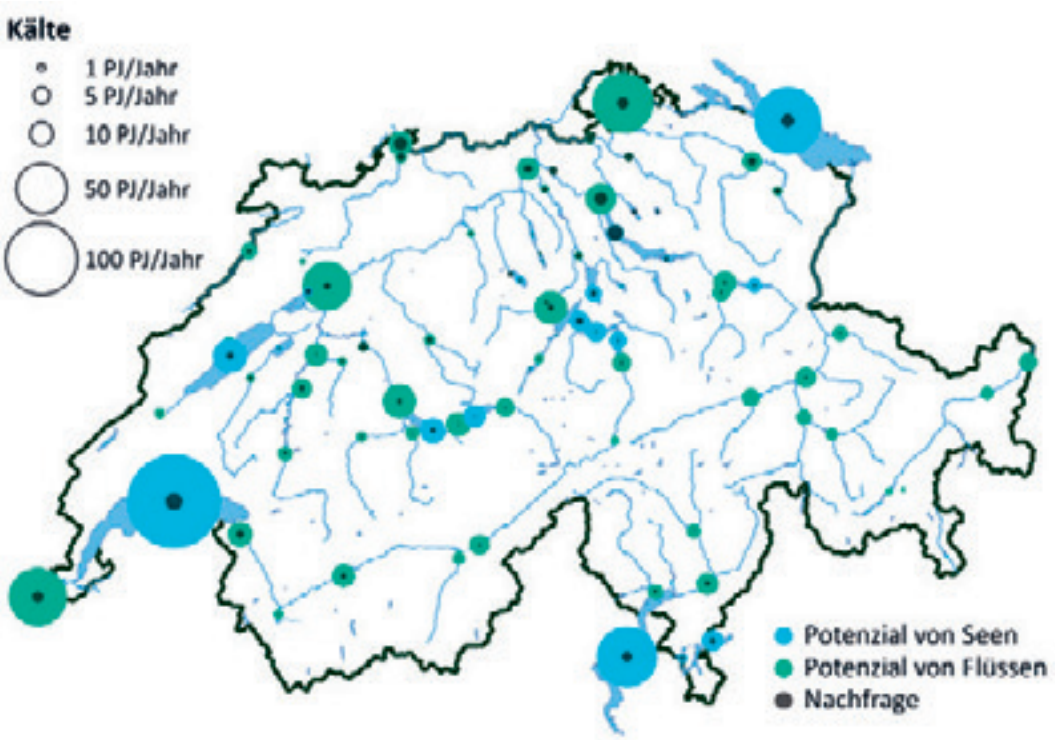


Bild 4: Potenzial der Schweizer Seen und Flüssen für Kälteextraktion, und regional maximale Nachfrage [6]. Die Fläche der Kreise ist proportional zum entsprechenden Wert.

Die Abschätzung des Potenzials der oberirdischen Gewässer unterstreicht deren enorme Wärmereserven. Die berechneten Potenziale sind meist höher als die regional maximale Nachfrage, mit Ausnahme sehr dicht besiedelter Gebiete wie der Region Zürich. Das Wärmepotenzial ist z.B. für den Greifensee, den Pfäffikersee und den St. Moritzersee deutlich geringer als die Nachfrage, ebenso bei den Mittellandflüssen in den grossen Städten. Unter der Annahme, dass die Hälfte der geschätzten Nachfrage dem jeweiligen See oder Fluss entnommen werden kann (falls das entsprechende Potenzial dazu vorhanden ist), erhält man eine totale Wärmemenge von 160 PJ und eine Kältemenge von 30 PJ. Dies entspricht rund 40 % des Bedarfs der Schweiz.

Die Auswirkungen einer thermischen Nutzung (Wärme und Kälte) im Umfang der Hälfte der geschätzten Nachfrage wurden für den Bodensee und den Zürichsee modelliert. Im Bodensee sind die simulierten Temperaturveränderungen[2] kaum messbar (< 0.05 °C), im Zürichsee erreichen sie 0.5 °C. Tendenziell werden die Seen abgekühlt, da der Heizbedarf den Kühlbedarf deutlich übersteigt.

Die Nachfrage schwankt im Laufe des Jahres stark, was mit den oben berechneten Jahreswerten nicht berücksichtigt werden kann. Der Heizbedarf ist im Sommer gering, während sich der Kühlbedarf weitgehend auf den Sommer beschränkt. Die Situation im Sommer kann daher problematisch sein, auch wenn das ermittelte jährliche Kühlpotenzial die Nachfrage übersteigt.

[2] Des mittleren jährlichen Temperaturprofils.

In der Praxis sind bei weitem nicht alle Gewässer gleichermassen für eine thermische Nutzung geeignet. Die Flüsse mit glazialem oder nivalem Regime (d.h. vor allem durch Schnee- und Gletscherschmelze gespiesen) sind im Winter oft zu kalt für eine effiziente Wärmeentnahme. Andererseits kann die Temperatur in Mittellandflüssen unterhalb eines Sees zeitweilig für eine sinnvolle Kälteentnahme zu hoch sein, bzw. eine Kälteentnahme könnte nicht bewilligt werden. In den Seen ist die Temperatur der Oberflächenschicht zwar höher als die Temperatur der tiefen Schichten, gleichzeitig aber auch viel variabler. Man kann daher in Bezug auf die Effizienz optimale Standorte für eine thermische Nutzung definieren (s. Tabelle 1). Bei Flüssen mit geringem Niedrigwasserabfluss sowie bei wenig tiefen Seen, sind alternative Wärme- oder Kältequellen in Betracht zu ziehen.

	Seen	**Flüsse**
Wärmeextraktion (Oktober - März)	Um 15 - 40 m Tiefe (Temp.: 4 - 10 °C)	Im Unterstrom eines tiefgelegenen Sees (Temp.: 4 - 12 °C)
Kälteextraktion (Juni - August)	Um 30 - 70 m Tiefe (Temp.: 4 - 8 °C)	Mit alpinem Einzugsgebiet (Temp.: 2 - 15 °C)

Tabelle 1: Optimale Lage für die Wasserfassung je nach Gewässer und thermischer Nutzung, und typischer Temperaturbereich.

Für direkt an einem See und in der Nähe seines Ausflusses gelegene Kältenutzungen existiert eine zusätzliche Möglichkeit: kaltes Tiefenwasser aus dem See kann genutzt und erwärmt direkt in den Ausfluss eingeleitet werden. Wenn dabei sichergestellt wird, dass die Rückgabetemperatur nicht höher als die Flusstemperatur ist, resultiert im Sommer keine unerwünschte Erwärmung. Das Potenzial dieser Methode ist jedoch aufgrund der Absenkung der Oberflächenschichten limitiert, da es zu einer Erwärmung der Sprungschicht führt, welche negative Auswirkungen auf den See haben kann (z.B. zeitliche Verschiebung der winterlichen Durchmischung) [5].

Die Klimaveränderung wird nicht nur die Nachfrage nach Wärme und Kälte beeinflussen, sondern auch das thermische Potenzial der Seen und Flüsse. Wir können davon ausgehen, dass sich der Heizbedarf bis zum Jahr 2050 um mindestens einen Viertel vermindern wird (auch dank einer besseren Gebäudeisolierung), während sich der Kühlbedarf beinahe verdoppeln könnte (immer mehr Nutzer werden Kühlungen installieren wollen) [7]. Das Potenzial wird sich entgegengesetzt entwickeln, jedoch in deutlich geringerem Masse.

Herausforderungen und Wirtschaftlichkeit

Das grosse Wärme- und Kältepotenzial der Seen und Flüsse wird heute aus verschiedenen Gründen noch wenig genutzt: fehlende Wahrnehmung der Möglichkeiten, mangelnde Erfahrung, inhärente Hindernisse der jeweiligen Gewässer, Schwierigkeiten bei der Umsetzung und beim Betrieb sowie teilweise eine zu tiefe Rentabilität.

Im Betrieb wird in den Leitungen des Primärkreislaufs (See- oder Flusswasser) manchmal ein Wachstum aquatischer Lebewesen (z.B. Biofilm und Muscheln) beobachtet. Dieses Problem kann insbesondere in den Wärmetauschern kritisch sein, in denen ein Biofilm den Fliesswiderstand erhöht und die Effizienz des Wärmeaustauschers vermindert. Verschiedene Faktoren erhöhen das Risiko eines derartigen Bewuchses:

- Untiefe Wasserentnahme;
- Nährstoffreiches Wasser;
- Erwärmung des gepumpten Wassers;
- Zonen mit geringer Strömung im Primärkreislauf oder in den Wärmetauschern;
- Oberflächen von ungenügender Qualität oder aus ungeeignetem Material.

Plattenwärmetauscher werden häufiger besiedelt als Rohrwärmetauscher, insbesondere wenn die Platten einen geringen Abstand und somit eine grössere Kontaktfläche aufweisen. Es konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Fliessgeschwindigkeit (auch vorübergehend) gegen die Bildung von Biofilmen wirksam ist [8]. Trotzdem ist oft eine punktuelle mechanische Reinigung erforderlich. Zebramuscheln wiederum, deren Larven die Filter passieren können, kommen in der Regel unterhalb von 20 m Tiefe (Tessin: 30 m) nicht vor. In Zukunft muss aber in verschiedenen Gewässern auch mit dem Auftreten der Quagga-Muschel gerechnet werden, die grössere Tiefen besiedeln kann.

Bei der Planung der thermischen Nutzung eines Gewässers müssen bestehende oder künftige Nutzungen in der Nähe berücksichtigt werden, wie beispielsweise Fischerei, Trinkwasserfassungen, oder im Boden verlegte Kabel.

Die Wirtschaftlichkeit der thermischen Nutzung eines Gewässers ist das Haupthindernis für eine breitere Nutzung dieser Technik. Die Erstellung einer neuen Anlage erfordert hohe Investitionen (Vorstudien und Planung, Erstellen der Wasserfassung, Aufbau eines Wärmeverbundes usw.) und verursacht variable Betriebskosten (Energie für die Wärmepumpen, Kosten für Revisionen und Reinigung, Wassernutzungsgebühren usw.). Bei den aktuellen Preisen für fossile Brennstoffe ist eine Amortisation bei Wärmenutzungen auch im besten Fall erst nach mehreren Jahrzehnten möglich. Die Deckung des Spitzenbedarfs durch Erdgas oder Heizöl verbessert die Rentabilität, das System ist dann so ausgelegt, dass typischerweise 80 – 95% des Wärmebedarfs mit erneuerbarer Energie gedeckt wird[3]. Bei Kühlnutzung hingegen sind die Betriebskosten meist deutlich geringer, als bei andern Lösungen (z.B. elektrisch betriebene Klimaanlagen), so dass die Amortisation schneller möglich ist.

Die Amortisationsdauer ist für Unternehmen der öffentlichen Hand eher tragbar als für private Unternehmen. Darüber hinaus kann bei einem grossen Verbund das Verhältnis zwischen Leistung und Kosten potenziell besser optimiert werden als bei einem kleinen System. Die thermische Nutzung der Seen und Flüsse bietet sich daher besonders für grosse Projekte an, die von der öffentlichen Hand mitgetragen werden.

Bei Fernheizungen kann die Machbarkeit anhand der Energiedichte der Nachfrage beurteilt werden. Jährliche Mindestwerte von 2 MWh pro Laufmeter Leitung oder von 300 MWh pro Hektare werden oft als Referenzgrössen verwendet.

Schliesslich können externe Beiträge die Wirtschaftlichkeit eines Systems verbessern. So bietet z.B. die Stiftung KliK solche Beiträge im Rahmen des Anreizprogramms „Wärmeverbünde“ an. Manchmal stehen auch kantonale oder regionale Förderbeiträge zur Verfügung.

[3] Wenn neben die Gewässerwärme auch die Elektrizität der Wärmepumpen aus erneuerbaren Quellen stammt.

Quellen

[1] BFE: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016 / Statistique globale suisse de l'énergie 2016, Bundesamt für Energie, 2017.

[2] Prognos AG et al.: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2014 nach Verwendungszwecken, Bundesamt für Energie, 2015.

[3] Eicher & Pauli: Weissbuch Fernwärme Schweiz – VFS Strategie, Langfristperspektiven für erneuerbare und energieeffiziente Nah- und Fernwärme in der Schweiz, Verband Fernwärme Schweiz (VFS), 2014.

[4] R. Dumortier, T. Lang, B. Schmutz: Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz, EnergieSchweiz, 2012.

[5] A. Gaudard, M. Schmid, A. Wüest: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern: mögliche physikalische und ökologische Auswirkungen der Wärme- und Kältenutzung, Aqua & Gas, 97, 5, p. 40-45, 2017.

[6] A. Gaudard, M. Schmid, A. Wüest: Thermische Nutzung von Oberflächengewässern - Potenzial der Schweizer Seen und Flüsse, Aqua & Gas, 98, 2, p. 26-33, 2018.

[7] CH2014-Impacts: Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland, OcCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, 2014.

[8] O. Wanner: Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen, Eawag, 2004.

Pascal Imhof, Misurio AG
CEO

Einbindung von Wärmepumpen in übergeordnete Leitsysteme

Zusammenfassung

Warmwasserspeicher und die thermische Trägheit von Gebäuden bieten ein grosses Potential an Flexibilität. Diese Art von Energiespeicher ist bereits heute in grosser Zahl vorhanden und bietet sich fürs Lastmanagement an. Die thermische Trägheit von Gebäuden erlaubt es, die Wärmeerzeugung zeitlich zu verschieben, ohne dass der Wärmekomfort beeinträchtigt wird. Die flexible Steuerung von Wärmepumpen kann für vielerlei Anwendungen im Stromsystem eingesetzt werden. Mit einem ganzheitlichen Ansatz können Kosten, Effizienz, Ökologie und Komfort optimiert werden.

Résumée

Les réservoirs d'eau chaude et l'inertie thermique des bâtiments présentent un gros potentiel de flexibilité. Ce type de stockage d'énergie est disponible en grande quantité dès à présent et est parfaitement adapté pour la gestion de la demande. L'inertie thermique des bâtiments permet de décaler dans le temps la production de chaleur, et cela sans affecter le confort thermique. Le contrôle flexible des pompes à chaleur peut être utilisé pour de multiples applications dans le système électrique. Une approche globale permet d'optimiser les coûts, l'efficacité, l'écologie et le confort.

Summary

Hot water tanks and the thermal inertia of buildings offer a great potential for flexibility. This type of energy storage is already widely available and can be utilized for load management. Thermal inertia of buildings enables to shift heat generation in time without affecting the thermal comfort in buildings. Flexible control of heat pumps can be used for various applications in the power system. With a holistic approach costs, efficiency, ecology and comfort can be optimized simultaneously.

Einführung

Die Integration einer grossen Menge an stochastischen Energiequellen im Zuge der Energiewende ist ein anspruchsvolles Ziel. Damit ein elektrisches Energiesystem mit einem hohen Anteil an Wind- und Solarenergie betrieben werden kann, bedarf es zusätzlicher Flexibilität. Eine interessante Option in diesem Zusammenhang sind thermische Speicher. Einerseits sind diese bereits heute in einer grossen Zahl vorhanden (Warmwasserboiler, Gebäudemasse als thermischer Speicher). Andererseits macht die Erzeugung von Wärme (Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser) einen Anteil von fast 50 % am inländischen Endenergieverbrauch aus [1]. Mit Lastmanagement (engl. Demand Response) kann die Flexibilität von thermischen Speichern optimal genutzt werden, um Fluktuationen von neuen erneuerbaren Energien auszugleichen. Demand Response ist in den letzten Jahren zu einem wichtigen Thema in der Stromversorgung geworden.

Im Forschungsprojekt WarmUp [2], welches in Zusammenarbeit mit dem BFE und dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) umgesetzt wurde, konnte die thermische Speicherkapazität der Gebäudemasse und der Boiler als Puffer genutzt werden, um Wärmepumpen flexibel zu betreiben. Dank der thermischen Trägheit von Gebäuden kann die Wärmeerzeugung mit den Wärmepumpen zeitlich verschoben werden, ohne dass der Wärmekomfort beeinträchtigt wird. Die flexible Steuerung der Wärmepumpen wird für verschiedene Anwendungen genutzt.

Bild 1: Grundidee von WarmUp: Nutzung der Flexibilität von thermischen Speichern zu Gunsten des elektrischen Energiesystems

Beispielsweise kann der Wärmebedarf dann gedeckt werden, wenn die Strompreise tief (Indikator für Stromknappheit im System) sind. In Zeiten hoher Netzspitzen kann die Last durch Ausschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz können durch Zuschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Den steilen Rampen der PV-Einspeisung kann mit Lastmanagement besser entgegengewirkt werden, als dies fossile

Kraftwerke können. Durch Einbezug von Wetterprognosen und Bedarfsmodellen kann die Wärmeerzeugung vorausschauend agieren und möglicherweise Effizienz sowie Komfort steigern.

Vergleich von Speicherkapazitäten

Bild 2 zeigt einen Vergleich der Speicherkapazität von Boiler, Gebäude und Batteriespeicher. Ein Boiler mit einem Volumen von 2000 Litern und einem Temperaturbereich von 40 – 60 °C hat eine thermische Speicherkapazität von etwa 46 kWh. Bei einem COP von etwa 4 ergibt dies eine elektrische Kapazität von ca. 12 kWh. Das in WarmUp modellierte Gebäude hat ein Volumen von 2'500 m3 und einen flexiblen Temperaturbereich von ca. einem Grad. Thermisch ergibt dies eine Speicherkapazität von etwa 1750 kWh. Aufgrund der tieferen Temperaturen für die Gebäudeheizung kann ein etwas höherer COP angenommen werden. Bei einem COP von 5 erhält man eine elektrische Speicherkapazität von ca. 350 kWh. Eine Tesla Powerwall hat eine Speicherkapazität von 6.4 kWh und ein Volumen von etwa 0.2 m^3. Damit hat die Tesla Powerwall eine Energiedichte von ca. 31 kWh/m^3.

	Boiler	Gebäude	Batteriespeicher
Volumen	$2\ m^3$	$2500\ m^3$	$0.2\ m^3$
Temperatur ΔT	$20\ °C$	$1\ °C$	-
Energiedichte	$23\ \frac{kWh_{th}}{m^3}$	$0.7\ \frac{kWh_{th}}{m^3}$	$31\ \frac{kWh_{el}}{m^3}$
Therm. Speicherkapazität	$46\ kWh$	$1750\ kWh$	-
Elektr. Speicherkapazität	$12\ kWh$	$350\ kWh$	$6.4\ kWh$

Bild 2: Vergleich der Speicherkapazität von Boiler, Gebäudemasse und Batteriespeicher

Der Vergleich soll nicht dazu dienen, unterschiedliche dezentrale Speicher gegeneinander auszuspielen. Beide Speicher haben ihre Berechtigung. Der Vergleich dient vielmehr dazu, das Potential der Speicherkapazitäten von Boilern und Gebäuden aufzuzeigen. In Kombination mit dem Energiebedarf kann daraus die Flexibilität abgeleitet werden. Dieser Rechenschritt ist allerdings sehr anspruchsvoll und wird direkt in der Optimierung durchgeführt.

Konkrete Aussagen über die Flexibilität sind immer an bestimmte Bedarfssituationen geknüpft. Eine Aussage wie jene, dass eine Heizung beispielsweise während zwei Stunden unterbrochen werden kann, ohne dass davon etwas bemerkt wird, ist im Sommer wie im Winter unqualifiziert. Im Sommer wird nicht geheizt und deshalb ist keine Flexibilität vorhanden. Im Winter bei tiefen Temperaturen ist die Flexibilität ebenso nicht gegeben. Würde man mehrere Tage in Serie bei kalten Aussentemperaturen die Heizung unterbrechen, so kühlt sich das Gebäude allmählich aus. Falls dies nicht geschieht, ist die Heizung zu gross dimensioniert worden und das System ineffizient. An Heiztagen, die nicht von extremer Kälte sind, kann die Heizung durchaus unterbrochen werden. Allerdings ist die Aussage von «zwei Stunden Unterbrechbarkeit» ebenfalls ungenau. Es könnte auch nur eine Stunde oder fünf Stunden sein. Das Beispiel zeigt, dass bei der Verwendung vom Begriff Flexibilität Vorsicht geboten ist.

Marktpotential

In der Schweiz sind Wärmepumpen für die Bereitstellung von Komfortwärme gemäss Gesamtenergie-statistik mit über 240‘000 Anlagen (2014) sehr verbreitet. Die entsprechende installierte thermische Leistung betrug 3‘565 MW, was bei einem Wirkungsgrad von angenommenen 350% einer elektrischen Leistung von 1 GW (1 Mio. kW) entspricht. Im Durchschnitt haben die Anlagen also eine elektrische Leistung von etwas über 4 kW. In den Bauten von WarmUp handelt es sich um grössere Anlagen im Bereich von 20 – 175 kW in Mehrfamilienhäusern und öffentlichen Bauten.

Jährlich werden rund 20‘000 neue Wärmepumpen installiert. Damit wächst auch das Potential der nutzbaren Flexibilität in diesem Bereich. Eine Verdoppelung der verfügbaren Leistung bis 2050 erscheint realistisch, frühere Studien sind sogar von einer Verdreifachung ausgegangen.

Im Trend der fortschreitenden Vernetzung von Anlagen, die durch Informationstechnologie ermöglicht wird, ist es wahrscheinlich, dass Internetanbindungen von Wärmepumpen in nicht allzu ferner Zukunft zum Stand der Technik gehören. WarmUp wird diesbezüglich wichtige Erkenntnisse liefern. Es sollte einfacher werden, die thermische Trägheit der Gebäude für die Flexibilität bei der Stromversorgung zu nutzen.

Das erschliessbare Potential der Gebäude liegt heute unter Annahme 20 prozentiger Ausschöpfung des theoretischen Potentials bei 0.2 x 1 GW = 200 MW, was eine durchaus ansehnliche flexibel verfügbare Leistung darstellt (Flusskraftwerke am Hochrhein verfügen über etwa 50 MW Leistung). Mit einer sehr konservativen Annahme, dass Flexibilität einen Wert von nur 5 CHF/kW/a hat, ergibt das einen Ertrag von 200‘000 kW x 5 CHF/kW = 1 Mio. CHF pro Jahr für das Marktgebiet Schweiz. Optimistisch geschätzt wären es 8 Mio. CHF.

Es ist davon auszugehen, dass der Flexibilitätsbedarf mit fluktuierenden Einspeisungen aus PV und Windanlagen zunehmen wird. Wie gross der Bedarf effektiv sein wird und zu welchen Preisen Flexibilität zukünftig abgegolten wird, ist mit grosser Unsicherheit behaftet und unter anderem von der Entwicklung und Ausprägung der Speichermöglichkeiten abhängig.

Neben dem monetarisierten Potential, das stark von den sich wandelnden Markt- und Tarifverhältnissen abhängt, gibt es ein anderes, ein strategisches Anwendungspotential. Dieses betrifft die Transformation der bisherigen zentral top-down organisierten Stromversorgung hin zu einer dezentralen Versorgung mit Einspeisungen auf den unteren Netzebenen. In diesem neuen

System mit variabler Produktion ist es schlicht unumgänglich, die Flexibilität auf der Verbraucherseite zu nutzen, um das System im Gleichgewicht zu halten und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Vernetzung entsprechender Anlagen ist eine Voraussetzung dafür.

Die Funktionalität eines marktgängigen Produktes für die Bewirtschaftung von Flexibilität von Energiesystemen geht über die Nutzung der thermischen Trägheit von Gebäuden hinaus. Dieser anspruchsvolle Teilbereich nutzt viele der technischen Eigenschaften der Basistechnologie exemplarisch. Die Technologie einer solchen Plattform ist aber gegenüber vielen verschiedenen Anwendungen offen, denen gemeinsam ist, dass laufend grosse Mengen von Echtzeitdaten zusammenlaufen, die analysiert werden und aus denen für kundenspezifische Geschäftsmodelle Informationen und Handlungsanweisungen generiert werden.

Eingriff in bestehende Gebäudeleitsysteme am Beispiel WarmUp

Bild 3 illustriert eine Übersicht der Stakeholder bei der Anbindung der Pilotanlage im Forschungsprojekt WarmUp. In dieser Übersicht ist die Vielfalt der Akteure ersichtlich, welche bei der Einbindung von bestehenden Wärmepumpen in übergeordneten Leitsystemen involviert sind. Schon rein der Koordinationsaufwand bei Änderungswünschen an laufenden Systemen zwischen HLK Planer, Wärmepumpenlieferant und Heizungsinstallateur sollte nicht unterschätzt werden. Zudem sind bestehende Anlagen in der Regel spartanisch mit Sensorik ausgerüstet oder bestehende Sensoren sind nicht im Gebäudeleitsystem integriert und erfordern zwecks Umsetzung intelligenter Steuerungen diverse Nachrüstungen.

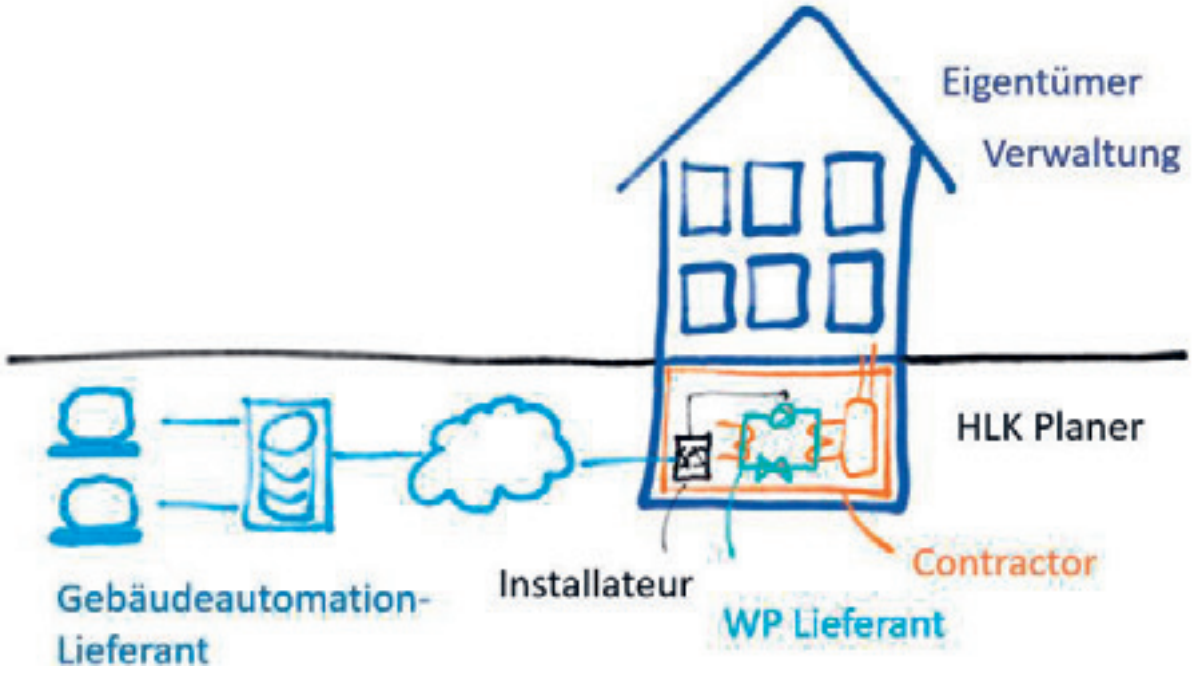


Bild 3: Übersicht der Stakeholder bei der Anbindung von Anlagen.

Bei Neubauten oder Ersatz von bestehen Anlagen kann problemlos vorgebeugt werden. Hierfür wurden «WarmUp-ready»-Kriterien erarbeitet (siehe Unterkapitel WarmUp-ready Kriterien), welche bei der Planung von neuen Anlagen berücksichtig werden können.

Dynamische Sollwertübersteuerung

Aus der Optimierung resultiert ein Fahrplan für die Wärmepumpen. Der Fahrplan beinhaltet elektrische Sollwerte. Daraus müssen für die einzelnen Anlagen verwertbare (thermische) Sollwerte berechnet werden, so dass der gesamte elektrische Verbrauch dem zuvor gehandelten Fahrplan entspricht. Die Übersteuerung der bisherigen Regelung auf der Anlage kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Grundsätzlich bieten sich nachfolgende Optionen an:

- Übersteuerung der Heizkurve
- Übersteuerung der Sensoren
- Übersteuerung der Stellgrössen am Ausgang der PI-Regler (proportional–integral controller)
- Direktes Ansteuern der Wärmepumpen (z.B. durch Relais)

Die Übersteuerung der Stellgrössen bietet die beste Dynamik. Im Forschungsprojekt WarmUp hat sich aber gezeigt, dass diese Option nicht möglich ist. Das bisherige Regelkonzept besteht aus kaskadierten PI-Reglern so dass ein Übersteuern von Eingangsgrössen unumgänglich ist. Einen direkten Eingriff via Relais ist als zu riskant bewertet worden, da im Fall eines Kommunikationsproblems und ausgeschaltetem Relais die Wärmepumpe nicht mehr von selbst anspringen kann. Man hat sich deshalb im Konsens für das Übersteuern der Heizkurven entschieden.

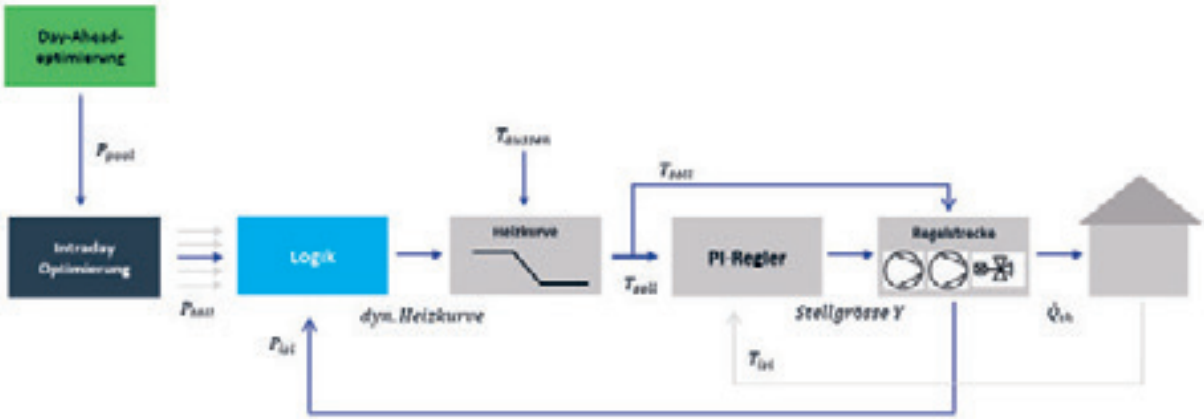


Bild 4: Vereinfachtes Schema der Regelstrecke in WarmUp.

Via Schaltfläche auf der Webapplikation kann der WarmUp-Modus aktiviert oder deaktiviert werden. Sobald WarmUp aktiv ist, werden die dynamischen Heizkurven verwendet, andernfalls die Statischen. Im Fall der Boiler ist die Übersteuerung sehr einfach. Es genügt, einzig die Solltemperatur zu verändern um ein Ein- oder Ausschalten zu erzwingen.

In der Zeit, in der WarmUp aktiv ist, werden die Energiekosten minimiert und parallel die Effizienz der Anlagen gesteigert. Energiekosten werden minimiert indem einerseits Strom günstiger eingekauft wird und andererseits Netzspitzen (Peak Shaving) gemieden werden, so dass

Netzkosten reduziert werden. Die Effizienz wird mittels Optimierung des COP-Wertes sichergestellt, indem beispielsweise die Quellentemperatur überwacht und prognostiziert wird oder ein häufiges Takten der Wärmepumpe gemieden wird.

Exception Handling

Ein äusserst wichtiger Bestandteil von robuster Software ist der Umgang mit Ausnahmesituationen. Was soll das System machen, wenn beispielsweise eine Prognose nicht rechtzeitig geliefert wird? Wie soll das System reagieren, wenn eine Temperaturgrenze erreicht ist? Was soll passieren, wenn das Resultat einer Optimierung nicht die gewünschte Qualität aufweist? Diese und viele andere Ausnahmesituationen müssen in der Planung und Umsetzung berücksichtigt werden. Das Exception Handling nimmt einen beachtlichen Anteil am Programmieraufwand ein. Nachfolgend werden einige der Regeln kurz erläutert.

Alarme

Das WarmUp System erlaubt es, für beliebig viele Messgrössen erlaubte Bereiche zu definieren. Naheliegend sind Temperaturgrenzen für Vor- und Rücklauf sowie der Boiler aufgelistet. Im Fall der Boiler muss abgesichert werden, dass die Temperaturen nicht zu tief sind. Die obere Temperaturgrenze wird durch die Maschinensteuerung der Wärmepumpe selber geregelt. Im Fall der Heizung muss überwacht werden, dass die Temperatur im Rücklauf nicht zu hoch ist. Dies geschieht dann, wenn die Wärmeabgabe an das System nicht wie geplant vonstattengeht, weil beispielsweise die Raumthermostaten geschlossen sind. Zu tiefe Temperaturen werden dadurch verhindert, indem minimale Werte für die Heizkurven definiert sind.

Alarm	Beschreibung	Gewünschte Reaktion
Boiler-Temperatur Grenzwertüberwachung Haus 1-4 Temperatur zu tief	Nach einer vorgegebenen Temperatur und Wartezeit wird auf dem obersten Speicherfühler, ein Alarm abgesetzt	Sofortiger Start der BWW-Ladung
Rücklauftemperatur Grenzwertüberwachung Haus 1-4 Temperatur zu hoch	Bei einer vorgegebenen Temperatur beim Rücklauf, wird ein Alarm abgesetzt	Temporäre Deaktivierung der Sollwertübersteuerung

Tabelle 1: Beschreibung der wichtigsten zwei Alarme mit den gewünschten Reaktionen

Automatischer Stopp

Es gibt Ausnahmesituationen, auf die WarmUp korrigierend einwirken kann. Es gibt auch Fälle, wo eine automatische Korrektur nicht möglich ist. Beispielsweise können Probleme mit der Server-Performance einen robusten Betrieb verunmöglichen. Solche Fälle müssen detektiert werden und eine manuelle Interaktion auslösen. Vorsichtshalber kann WarmUp automatisch deaktiviert werden. Hierbei besteht allerdings die Herausforderung, nicht zu schnell auszuschalten, da beispielsweise eine temporär längere Reaktionszeit nicht zwingend ein anhaltendes Problem sein muss. Umgekehrt sollte im Falle eines anhaltenden, grösseren Problems umgehend reagiert werden. Die beste Lösung zwischen diesen beiden Positionen ist ein Trade-Off und muss vorsichtig abgewogen werden.

Kommunikationsausfall

Fällt die Kommunikation zu einer der Anlagen aus, wird sofort ein Alarm generiert und an das WarmUp-System gesendet. Sofern keine Kommunikation zur Anlage mehr möglich ist, kann WarmUp seine Sollwerte nicht mehr korrigieren. Dieser Fehler kann auch im klassischen System vorkommen. In beiden Fällen ist es wichtig, dass die gesendeten Sollwerte auch für eine längere Zeit aktiv sein können, ohne dass Probleme entstehen. Zusätzlich kann auf der Steuerung vor Ort ein Heartbeat überwacht werden, so dass die Anlage selber auf die klassischen Sollwerte umschalten kann.

Manueller Stopp

Der Benutzer kann via Webapplikation den WarmUp-Modus abschalten. Dies ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn eine Revision der Anlagen bevorsteht.

Resultate

Parameteridentifikation für das Gebäudemodell

Die Parameteridentifikation für die Pilotanlage im Forschungsprojekt WarmUp wurde mit einem eigens dafür entwickelten Tool durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Qualität der Resultate wesentlich davon abhängt, wie viele der Zustandsgrössen mit Sensoren gemessen werden. Im Fall der vorliegenden Arbeit waren weder Raumtemperaturen noch Temperaturen, die auf den Zustand der Gebäudemasse schliessen lassen, vorhanden. Der Nutzen der Rücklauftemperaturen ist sehr bescheiden. Um die Ausgangslage zu verbessern, wurden Funkfühler von EnOcean zur Messung der Raumtemperatur installiert. Die Bauweise des Gebäudes war aber dermassen massiv, dass keine stabile Funkverbindung über längere Zeiten möglich war und dieser Ansatz leider verworfen werden musste. Anhand von typischen Kennzahlen für Gebäudematerialien und viel manuellem Tuning konnten letztlich Parameter gefunden werden, welche gute Resultate gezeigt haben. Der manuelle Ansatz ist aber definitiv zu aufwendig und wird nicht weiterverfolgt werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt einen Vergleich der gemessenen und simulierten Raumtemperatur für die Pilotanlage aus WarmUp.

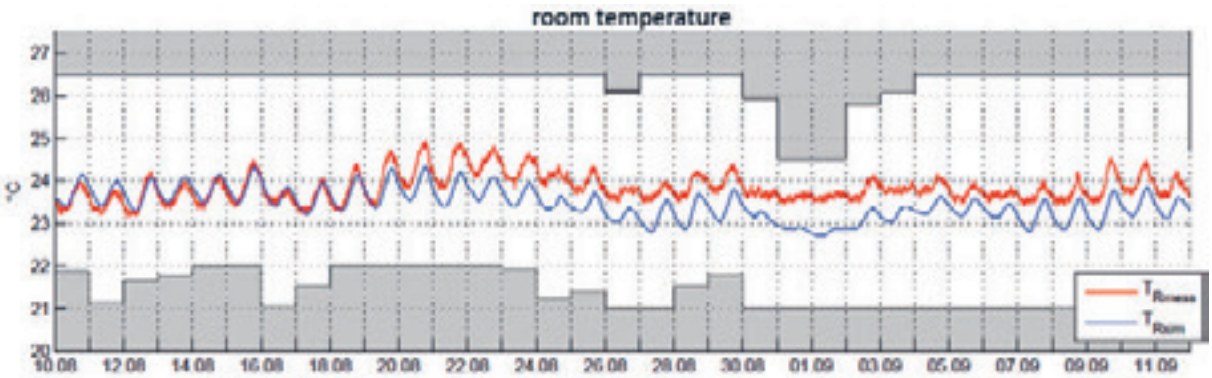


Bild 5: Vergleich der gemessenen und simulierten Raum-Temperaturen.

Zustandserfassung in den Boilern

Bild 6 zeigt in der ersten Zeile den Verlauf des obersten und untersten Temperaturfühlers im Boiler. Im Bereich mit roter Schraffierung ist zu erkennen, dass es Zeiten gibt, wo diese zwei Temperatursensoren praktisch konstante Werte über Stunden anzeigen. Basierend auf nur diesen zwei Sensoren könnte man fälschlicherweise ableiten, dass in dieser Zeit kein Brauchwarmwasser bezogen wurde. In der zweiten Zeile ist der gleiche Boiler mit insgesamt fünf Temperaturfühlern dargestellt. Man sieht, dass zu der vorher erwähnten Zeit ein Bedarf an Brauchwarmwasser existierte (roter Verlauf). Aufgrund der Schichtung im Boiler tragen der oberste und unterste Temperaturfühler wenig zur Bestimmung des Ladezustandes bei. Idealerweise sind Boiler also mindestens mit drei Temperaturfühlern ausgestattet. Bei weniger Fühlern verzichtet man besser auf den untersten statt auf den mittleren Fühler, weil man so ein nahendes zwingendes Nachladen besser prognostizieren kann.

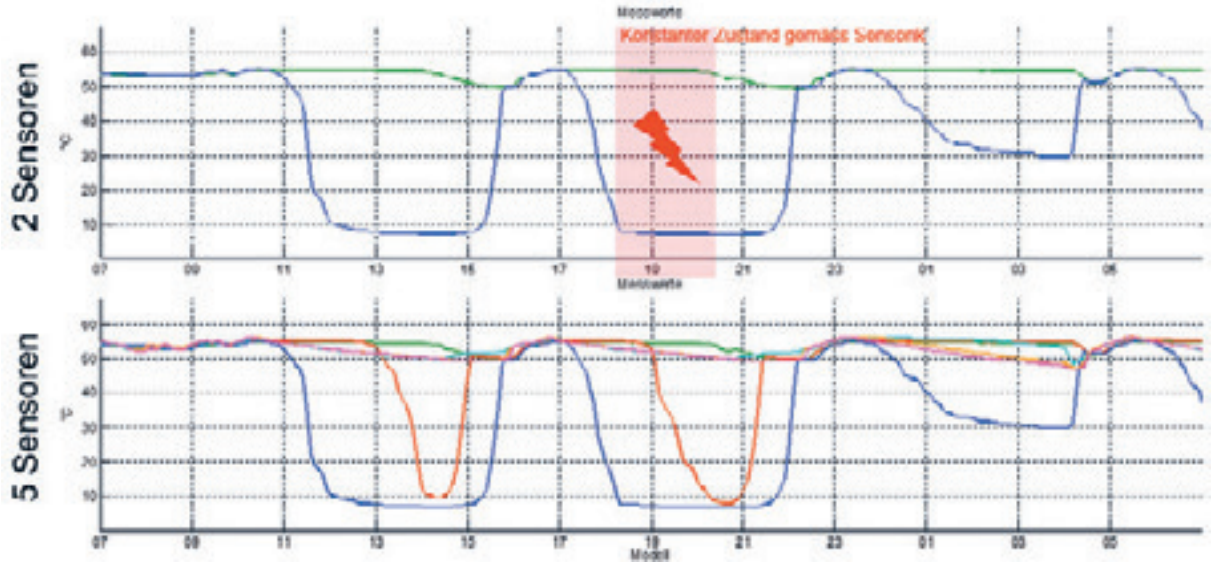


Bild 6: Schwierige Zustandserfassung bei Vorhandensein von nur zwei Temperaturfühlern (oben). Unten ein Beispiel mit fünf Fühlern, womit der Ladezustand des Boilers sehr genau abgeleitet werden kann.

Anbindung an die bestehende Gebäudeautomation

Aktuell geschieht die Übersteuerung der dynamischen Sollwerte auf der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vor Ort (Option 1). Sprich die SPS bekommt vom Server sowohl die klassischen statischen wie auch die dynamischen Sollwerte. Zusätzlich wird der SPS mitgeteilt, ob WarmUp aktiv ist oder nicht. Die SPS entscheidet anhand dieses Status-Flags, welche Sollwerte sie verwendet. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die SPS detektieren kann, ob die Verbindung zum Server ausgefallen ist und entsprechend reagieren kann. Der grosse Nachteil dieses Ansatzes sind teure Anpassungen auf der SPS. Vor allem wenn es sich um ältere Anlagen handelt, ist man vorsichtig Anpassungen vorzunehmen. Bei neuen Anlagen ist dieser Ansatz kein Problem, da die Ergänzung ohne grossen Mehraufwand beim Bau der Anlage berücksichtigt werden kann.

In der Option 2 wird die Selektion der gültigen Sollwerte direkt auf dem Server durchgeführt und die SPS vor Ort bleibt unangetastet. Für bestehende Anlagen ist dieser Ansatz wesentlich günstiger. Im Fehlerfall ist dieser Ansatz aber weniger robust als Option 1.

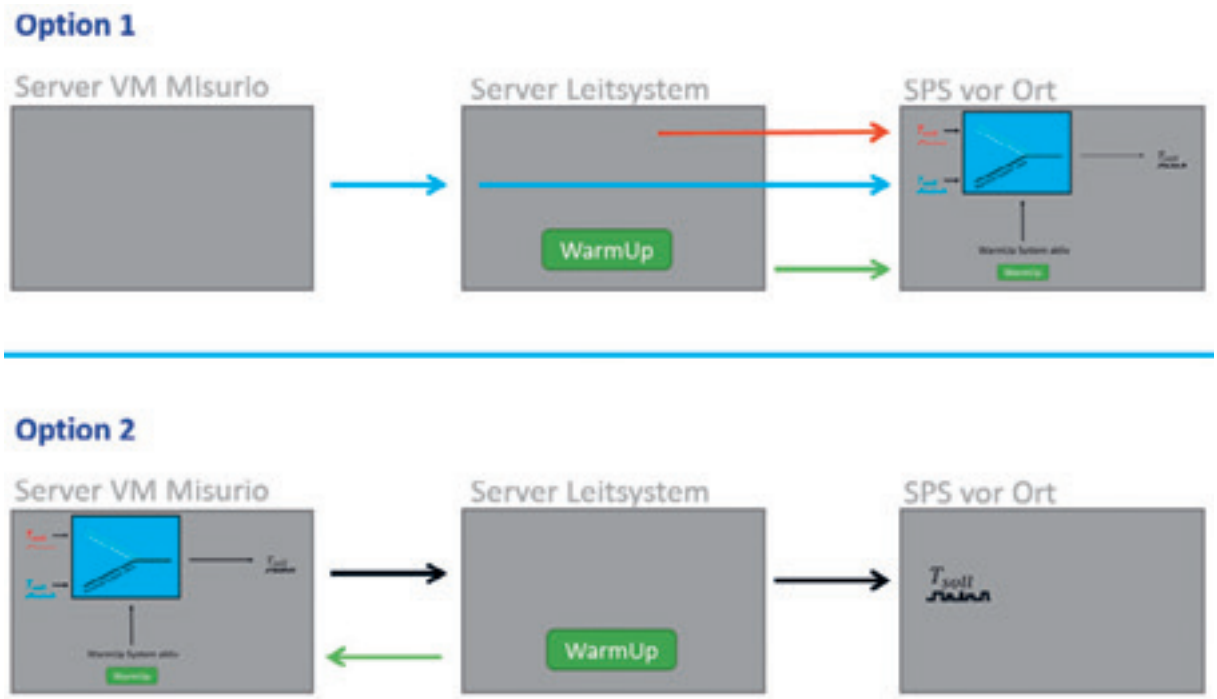


Bild 7: Dynamische Übersteuerung von Sollwerten auf der SPS vor Ort (Option 1) oder auf dem Server (Option 2).

Erkenntnisse aus der Anbindung der Pilotanlage

Die Wahl der Pilotanlage beruhte vor allem auf ihrer Grösse und der Flexibilität. Wie sich später herausstellte, ist die bestehende Regelung nicht optimal für den Eingriff eines übergeordneten Energiemanagement-Systems. Zudem musste die fehlende Sensorik der Speicherzustände aufwendig durch andere Ansätze kompensiert werden. Die Analyse weiterer Anlagen hat gezeigt, dass die Pilotanlage diesbezüglich eine Ausnahme ist und dass andere Anlagen einfacher angebunden werden können. Trotzdem ist es bei der ausgewählten Pilotanlage gelungen, die Wärmepumpen zu übersteuern und die Tests erfolgreich durchzuführen. Bild 8 illustriert den Vergleich zwischen Fahrplan (gelb markiert) und der tatsächlich realisierten elektrischen Leistung (rote Kurve).

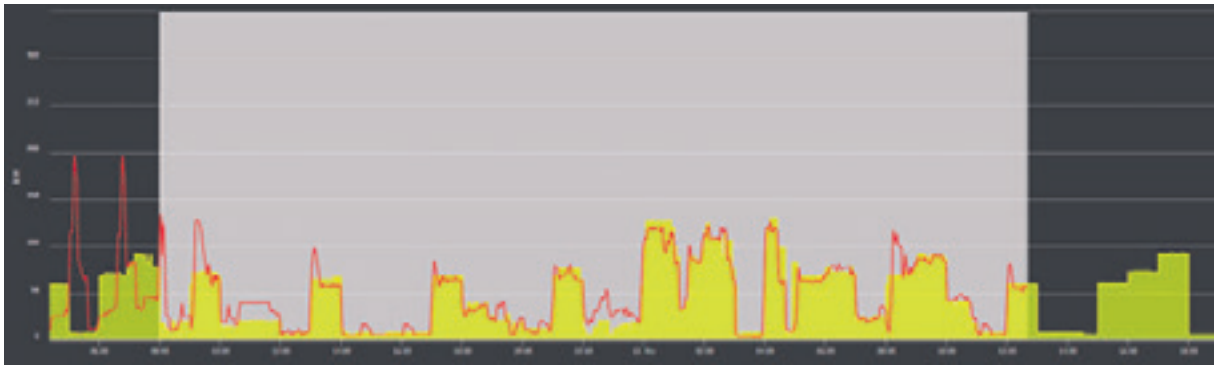


Bild 8: Test des WarmUp-Systems während 29 Stunden auf der Pilotanlage. Der weiss hinterlegte Bereich ist jene Zeit, in der WarmUp aktiv war. Gelb ist der Fahrplan (Soll) und rot ist die tatsächliche Leistung (Ist).

WarmUp-ready Kriterien

Damit die Erkenntnisse aus WarmUp in die Planung von neuen Anlagen einfliessen, wurden WarmUp-ready Kriterien definiert. Die meisten Kriterien sind einfach zu erfüllen, wenn diese bereits beim Bau der Anlagen berücksichtigt werden. Einige der Kriterien sind mittlerweile bereits Standards. Zu den zwingenden WarmUp-ready Kriterien zählen:

- Mindestens Fussbodenheizung, idealerweise noch trägere Systeme
- Speicherkapazität der Boiler so gross dimensionieren, dass 1-2 Ladungen pro Tag genügen
- Sollwerte dynamisch von übergeordnetem Energiemanagement-System übersteuerbar
- Vor- und Rücklauftemperatur der Wohnungen werden gemessen
- Temperaturfühler in der Abluft
- 3 Temperaturfühler pro Boiler
- Zugriff auf die Zählerdaten, Temperaturmessungen, etc. (idealerweise via REST-Schnittstelle)
- Trennen von Grundlast und flexiblen Lasten in der Hydraulik

Es gibt weitere Kriterien, die zu mehr Flexibilität verhelfen. Diese Kriterien sind nicht zwingend, erlauben aber eine bessere Performance des WarmUp-Systems und tiefere Kosten bei der Implementierung von WarmUp. Die begünstigenden WarmUp-ready Kriterien sind:

- Separate Wärmezähler für Brauchwarmwasser und Heizung pro Gebäude
- Leistung der Wärmepumpe etwas grösser als in der Standardauslegung dimensionieren
- Bei mehrstufigen Wärmepumpen (WP) oder kontinuierlich geregelten WPs muss Leistungssollwert oder Grenze für Stufen beeinflusst werden können
- Vereinzelt Raumtemperaturfühler (v.a. in kritischen Räumen)
- Bewusstes Einbauen von zusätzlicher Speicherkapazität
- Zuschaltbare Speicherkapazität
- Temperaturfühler in der Gebäudemasse
- Vorausschauendes Heizen ermöglichen (übersteuerbare Raumthermostaten)

Schlussfolgerung

Thermische Speicher bieten ein attraktives Potential für Lastmanagement. Das Speichervermögen von Gebäuden und eine vorausschauende Betriebsweise versprechen einen grossen Nutzen für die dezentrale Speicherung von Energie. Thermische Speicher sind eine naheliegende Option, da diese bereits heute in einer grossen Anzahl vorhanden sind. Daneben wird es zukünftig auch andere Technologien, wie beispielsweise Batteriespeicher brauchen. Heute sind die thermischen Speicher in vielen Punkten im Vorteil gegenüber anderen Technologien.

Bei der Wahl der Einbindung von Anlagen hat man sich im Forschungsprojekt WarmUp bewusst für grössere Anlagen entschieden, da diese im Betrieb wirtschaftlicher sind als kleine. Die Erkenntnis ist, dass die Einbindung von grösseren Anlagen in übergeordnete Leitsysteme aber wesentlich komplizierter sind als bei kleineren Anlagen. An das bestehende Regelsystem konnte dennoch erfolgreich angedockt und ein stabiler Betrieb sichergestellt werden. Nichtsdestotrotz würde die Einführung von Standardschnittstellen die Einbindung in übergeordnete Leitsysteme um einiges Vereinfachen.

Damit zukünftig Anlagen einfacher eingebunden werden können, wurden Empfehlungen erarbeitet. Dank den WarmUp-ready Kriterien kann zukünftig beim Bau neuer Anlagen eine einfachere Einbindung der Anlagen in WarmUp erreicht werden.

Zwecks erfolgreicher Umsetzung von Lastmanagement sind leistungsgeregelte Wärmepumpen eine ideale Voraussetzung. Hier wird ein elektrischer Fahrplan vorgegeben, der beispielsweise den steilen Rampen der PV-Einspeisung entgegenwirken kann.

Quellen

[1] Prognos AG, Infras AG, TEP Energy GmbH, „Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2014 nach Verwendungszwecken," Bundesamt für Energie Bern, Oktober 2015.

[2] Samuel Pfaffen, Karl Werlen, „WARMup Phase 2 - Pilotversuch zur optimalen Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern; Schlussbericht BFE Forschungsprojekt Vertrag Nr. SI/500710-02," Visp, 31. Oktober 2016.

Nicole Calame, CSD Ingénieurs SA
Cheffe de projet
Fabrice Rognon, CSD Ingénieurs SA
Responsable énergie Suisse romande

Marché des pompes à chaleur dans les maisons à plusieurs logements : situation et opportunités

Resumée

L'air a un rôle important à jouer en tant que ressource renouvelable dans la fourniture de chaleur en milieu urbain. L'intégration de pompes à chaleur (PAC) dans les bâtiments multifamiliaux représente un potentiel important aujourd'hui sous-exploité. Il existe actuellement un manque sur le marché pour des PAC silencieuses permettant de fournir de grandes puissances. Un certain nombre d'autres barrières ont été identifiées sur le plan technique, commercial et légal. Une approche de type contracting énergétique semble prometteuse pour développer ce marché. Le projet «AirBiVal» s'inscrit dans la perspective d'étendre le PAC Système Module pour des puissances plus élevées. Il adresse le développement de schémas hydrauliques standard pour des PAC sur l'air en fonctionnement bivalent adaptés à la rénovation des bâtiments multifamiliaux.

Zusammenfassung

Die Luft als erneuerbare Wärmequelle besitzt ein bedeutendes Potenzial für die Wärmeerzeugung in städtischen Gebieten. Der Einsatz von Wärmepumpen (WP) in Mehrfamilienhäusern ist bis heute ein unausgeschöpftes Potenzial. Auf dem Markt besteht eine Lücke im Bereich Luft/Wasser-WP grösserer Heizleistung. Ausserdem wurden weitere Hürden identifiziert, besonders bei den Rahmenbedingungen. Eine vielversprechende Alternative biete das Energie-Contracting, um diesen Markt zu entwickeln. Das Projekt «AirBiVal» will effiziente und zuverlässige Standardlösungen entwickeln und dokumentieren, insbesondere für den Einsatz im bivalenten Betrieb. Ferner können diese Standardschemas ein wichtiger Beitrag für die Erweiterung des WP-System-Moduls sein. Dies für geeignete bivalente WP-Systeme für den Ersatz bestehender Heizungen in Mehrfamilienhäuser.

Summary

Ambient air has an important role to play as a renewable resource to provide heat in urban areas. The integration of heat pumps (HP) in multi-family buildings represents a large and underused potential. The market currently lacks silent HP with large power outputs. Other barriers have been identified from technical, commercial and legal aspects. An energy contracting scheme seems to be promising to develop this market. The «AirBiVal» project aims to extend the HP System Module for higher power capacities. It addresses the development of standard hydronic schemes for air to water HP in bivalent operation mode, which are adapted to retrofit in multifamily buildings.

Introduction

La transition vers les énergies renouvelables est aujourd'hui une priorité dans beaucoup de pays, notamment européens. La production d'électricité renouvelable a été ciblée en priorité ces dernières années. Les efforts se tournent maintenant vers la fourniture de chaleur durable qui joue un rôle clé pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions de CO_2 qui ont été fixés.
En 2016, les besoins en énergie du secteur du logement en Suisse représentaient 28.2% de la consommation nationale en énergie finale (240'710TJ) [1]. L'énergie thermique produite pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est responsable d'environ 30% des émissions de CO_2 en Suisse. La part de la chaleur fournie par des ressources renouvelables est toutefois en augmentation puisqu'elle a passé de 16% en 2015 à 20.2% en 2016 (sans compter l'électricité) [1,2]. En 2016, les pompes à chaleur génèrent 28% de la chaleur renouvelable dans le pays [3].
Le mouvement de promotion de l'utilisation des pompes à chaleur dans le cadre de la rénovation en Suisse est en marche depuis longtemps. Le Swiss Retrofit Heat Pump Programme lancé dans les années 1990 avait pour but de développer un concept de PAC capable de produire de la chaleur à un niveau suffisant pour permettre le remplacement des chaudières dans le cas d'assainissement de bâtiments existants de petite puissance [4]. Ce projet a clairement stimulé ce segment du marché. Des produits standards sont maintenant disponibles pour les petites puissances et la part de marché des PAC dans les ménages a atteint environ 50% ces dernières années. Cette évolution est très encourageante même si la part concernée par la rénovation est minoritaire. Près de 25 ans plus tard pourtant, la problématique est toujours d'actualité dans les bâtiments de plus grande taille où le recours à la technologie PAC fait encore cruellement défaut.
La proportion d'énergie dévolue au chauffage par rapport aux besoins en eau chaude sanitaire (ECS) dans le cadre de bâtiments existants est largement plus importante dans les bâtiments à plusieurs logements que pour les bâtiments individuels. La Figure 1 illustre clairement cette tendance.

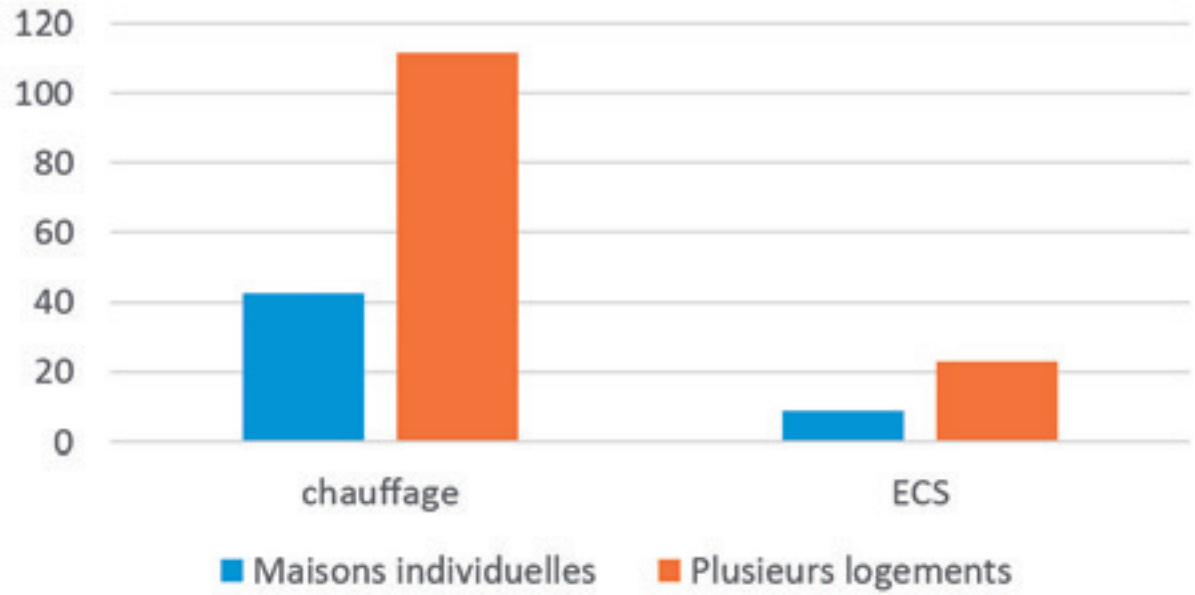


Figure 1: Besoins thermiques en [PJ] dans le parc immobilier suisse en 2016 selon le type de besoin et le nombre de logements dans le bâtiment [5]

Situation du marché suisse

La part de marché des pompes à chaleur dans les ménages est passée de près de zéro dans les années 1990 à environ 50% aujourd'hui. La proportion actuelle est de 90% pour les maisons mono-familiales contre 10% pour les bâtiments à plusieurs logements [6]. La Figure 2 illustre la distribution des pompes à chaleur sur le marché Suisse du chauffage en 2016. La gamme de puissance jusqu'à 50kW montre que cette technologie est presque à parité avec les chaudières d'autres types. Au-delà de 50kW par contre, leur présence est marginale dans la tranche des plus grandes puissances qui concerne notamment les bâtiments multifamiliaux. La part des PAC dans les maisons à plusieurs logements est modeste dans les nouvelles constructions et presque nulle dans les assainissements d'installations existantes.

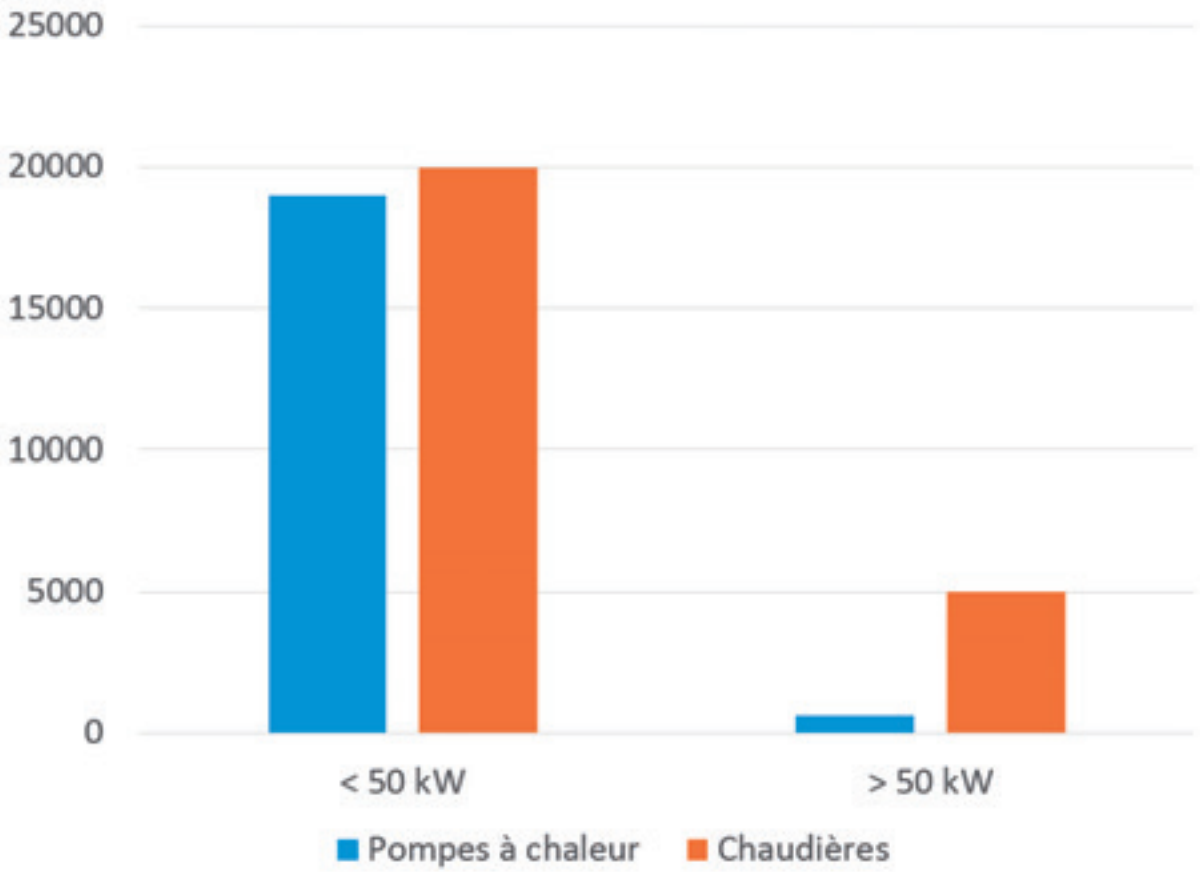


Figure 2: Marché du chauffage en Suisse pour 2016 selon la gamme de puissance, en nombre d'unités vendues [7].

Pourtant, si les machines de grande puissance sont peu nombreuses, elles représentent un potentiel significatif par unité et promettent un chiffre d'affaire intéressant par rapport aux machines de petite puissance. Le potentiel énergétique et économique que cette part de marché représente est important.

Les statistiques du parc immobilier suisse doivent être abordées avec précaution. En effet à l'échelle du pays, la majorité des bâtiments sont des maisons individuelles. Pourtant, la part de la population vivant dans celles-ci n'est que de 27.7% comme l'illustre la Figure 3 [8]. Ainsi les besoins thermiques issus de près des trois quarts de la population nationale sont générés par des bâtiments multifamiliaux. Le potentiel de développement des énergies renouvelable réside

donc en majorité dans les grands bâtiments locatifs puisque ce sont eux qui constituent la plus grande part des besoins thermiques des ménages suisses. Une grande part du marché potentiel pour les PAC se situe ainsi dans les zones urbaines.
D'autre part, ces grandes puissances génèrent de larges émissions de CO_2, que le pays s'est engagé à diminuer selon la Stratégie Énergétique 2050. Il s'agit donc d'une problématique à la fois importante et urgente à adresser.

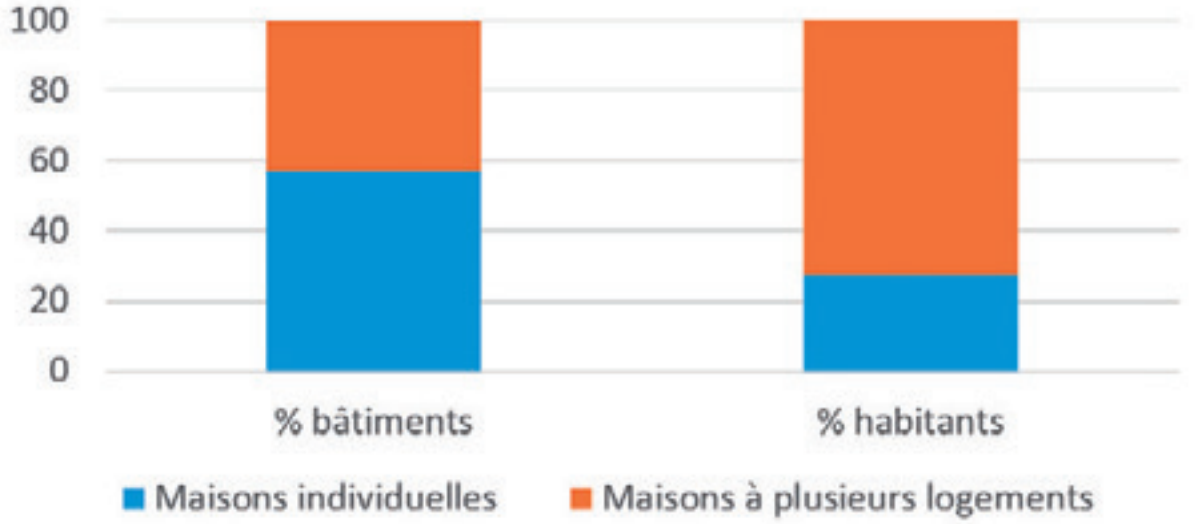


Figure 3: Répartition du parc immobilier selon maison individuelle ou à plusieurs logements, en pourcentage du nombre de bâtiment et en pourcentage de la population résidente pour 2016 [8]

Les ressources renouvelables disponibles en zone urbaine peuvent varier fortement. En effet une ville située au bord d'un lac disposera d'un large potentiel de chaleur qui peut être produit à partir de cette ressource. Les sondes géothermiques verticales sont sujettes aux autorisations de forage et ne peuvent pas être utilisées dans toutes les zones. D'autre part, le bois ne peut être considéré que si le milieu urbain n'est pas déclaré en zone d'émissions excessives. Ainsi le panachage des ressources varie en fonction du contexte local. Seul l'air est disponible partout, en tout temps et sans restrictions. Dans le cadre de scénarios durables mais économiquement et politiquement réalistes, il faut toujours y recourir pour couvrir l'entier des besoins. Sa part varie selon les cas de quelques pourcents à 30% [9]. À titre d'exemple, la Figure 4 illustre les ressources disponibles pour deux communes du plateau suisse d'environ 12'000 habitants chacune qui ne disposent pas d'accès à un lac. La Commune 1 peut exploiter la géothermie alors que la Commune 2 n'a pas moyen d'y recourir. La part correspondant aux machines fonctionnant sur l'air est indiquée en vert.

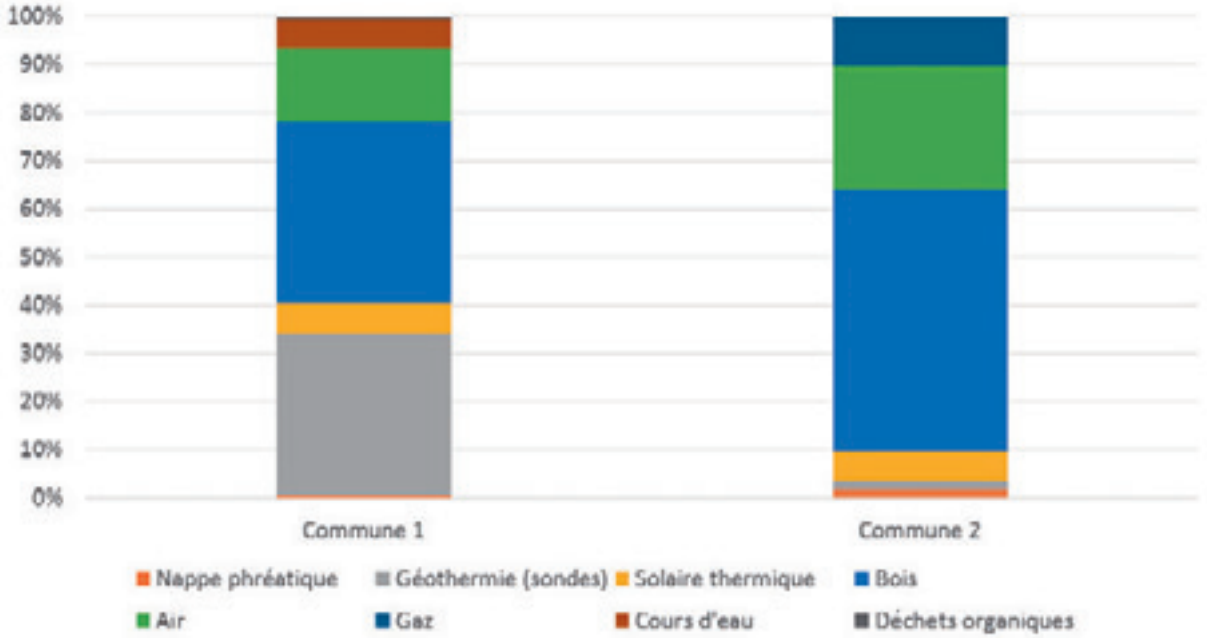


Figure 4: Couverture des besoins utiles de deux communes selon des scénarios durables à l'horizon 2050, pourcentage des sources disponibles [9]

Ainsi l'air ambiant a un rôle clé à jouer dans la transition vers les énergies renouvelables dans les zones fortement urbanisées.

Lacunes du marché

Lors de projets concrets, les ingénieurs se heurtent au manque de disponibilité sur le marché de produits standards adaptés aux contraintes d'une application dans le contexte des bâtiments multifamiliaux. Les unités de plus de 20kW à -7°C atteignent ou dépassent typiquement 60dB(A). La combinaison de plusieurs machines pour atteindre la puissance nécessaire induit un cumul des émissions sonores qui peuvent alors largement dépasser les valeurs admissibles légalement. Pour mémoire, l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) fixe les valeurs limite d'immissions sonores à 55dB(A) en zone 3 (zone mixte) et 50dB(A) en zone 2 (zone d'habitation) [10].
D'un autre côté, les machines conçues pour une application industrielle ont l'avantage d'exister dans une gamme de puissance adaptée (environ 50kW à 500kW). Elles génèrent par contre une puissance acoustique entre 70dB(A) et 80dB(A) ce qui n'est pas acceptable pour une intégration en milieu urbain.
En conclusion, il n'existe actuellement pas de machines d'au-moins 50kW et d'une puissance acoustique inférieure à 60dB(A), idéalement autour de 50dB(A).

Barrières et opportunités

Barrières technico-commerciales

Au-delà du manque de machines adéquates en termes acoustiques et de capacité suffisante pour l'application souhaitée, il existe d'autres barrières qui entravent une plus large application des

pompes à chaleur dans le contexte des bâtiments à plusieurs logements. L'encombrement est un aspect critique, surtout s'il faut recourir à plusieurs machines. Lors de projets d'assainissements, les locaux techniques existants n'ont pas forcément la place d'accueillir des installations volumineuses. De plus, lorsqu'il est nécessaire d'implanter des machines en toiture, leur masse peut s'avérer décisive pour le succès du projet. Il serait donc souhaitable que les PAC soient aussi compactes et légères que possible.
L'efficacité des pompes à chaleur est dépendante de la température de l'air ambiant. Des températures extérieures basses sur de longues périodes induisent une péjoration du rendement et surtout une réduction de la puissance ce qui peut rendre pertinent un appoint selon la zone climatiques et/ou les températures de distribution nécessaires.
De manière analogue une température de distribution trop élevée dans un système existant peut péjorer l'efficacité, voir être impossible à atteindre pour une PAC. Là aussi un appoint par chaudière constitue une solution pragmatique.
Les coûts d'exploitation sont fortement dépendants de l'efficacité de la pompe à chaleur, d'où l'importance de l'exploiter dans de bonnes conditions de fonctionnement.

Sur le plan technique, il y a un manque de solutions standard pour les grandes puissances, notamment dans le cadre d'applications bivalentes avec un autre producteur de chaleur. En effet, dans la rénovation d'installations existantes, il faut composer avec les éléments disponibles pour optimiser les coûts. Le remplacement complet en une fois de la totalité de l'installation n'est en général financièrement pas viable. Le marché quasi-inexistant lié aux PAC dans les bâtiments à plusieurs logements n'a à l'évidence pas encore poussé les fournisseurs à élaborer des schémas standards incluant des machines sur l'air.
Un projet de rénovation de chauffage à l'échelle d'un bâtiment multifamilial se traduit par un projet plus global que le simple remplacement d'une chaudière par une autre. La maîtrise des « travaux annexes » n'est pas à sous-estimer. En effet, selon la configuration (par exemple PAC en toiture) et le nombre d'étages, ceux-ci peuvent représenter jusqu'à la moitié du budget et demandent des compétences qui vont bien au-delà du simple raccordement du nouvel appareil par l'installateur.

Cadre légal

La plus grande part de la fourniture de chaleur en Suisse (75%) est d'origine fossile. Celle-ci inclut 40% de mazout, 33% de gaz naturel et 2% de charbon [1,2]. La Confédération vise 20% de réduction des émissions globales de CO_2 et 40% de réduction des émissions liées aux bâtiments en 2020 par rapport à 1990 [11, 12, 13]. En 2014, les émissions de dioxyde de carbone étaient réduites de 9% par rapport aux valeurs de 1990. Dans les bâtiments, le chiffre se monte à 30%. Il reste encore environ 5.2 millions de tCO_2-éq. à économiser d'ici 2020. Divers instruments réglementaire tels que la taxe sur le CO_2 et le programme fédéral de subsides Programme Bâtiment ont été mis en place pour atteindre la baisse des émissions fixée et promouvoir des solutions renouvelables. Toutefois, il a été reconnu officiellement que ces solutions ne sont pas suffisantes pour atteindre le seuil d'émissions de CO_2 visé.
En plus des réglementations fédérales, certains cantons entreprennent des actions pour promouvoir des solutions renouvelables liées au chauffage. Dans le canton de Genève par exemple, les Services Industriels (SIG) sont mandatés par le canton pour soutenir le développement des ressources renouvelables auprès des consommateurs (bâtiments mono- et multifamiliaux). Ce support est implémenté via le programme d'efficacité énergétique des SIG éco21 [14-17]. Dans le cas des maisons individuelles, éco21 offre des subsides à hauteur de 10% des coûts

d'investissement initiaux. Ce type de soutien n'est pas applicable dans le cas des bâtiments à plusieurs logements du fait de singularités dans le droit du bail en Suisse.

En Suisse d'un point de vue législatif, les projets d'assainissement de bâtiments à plusieurs logements se heurtent au droit du bail. Contrairement au secteur individuel, une large majorité des habitants de bâtiments multifamiliaux sont locataires [8]. Selon la loi suisse, ces derniers ont à leur charge les coûts d'énergie et de maintenance alors que le propriétaire est responsable des investissements initiaux du système de chauffage et n'a aucun droit de les répercuter aux locataires sur leurs factures d'énergie [18]. Ainsi lors de la rénovation d'une chaufferie, l'investissement supplémentaire généré par une variante technologique efficiente et renouvelable incombe au propriétaire de l'immeuble. Par contre, la répercussion sur les économies d'énergie est totalement au bénéfice des locataires qui paieront moins de charges. Ce schéma n'incite pas les investissements dans un système comprenant des PAC, plus efficient mais également plus onéreux lors de l'installation et qui ne bénéficie au final pas financièrement à celui qui le paie. Une possibilité de remédier à ce problème serait d'appliquer le principe de contracting énergétique et /ou de financer des transformations par un contrat de performance énergétique (CPE). Toutefois cette solution n'est que peu répandue en Suisse. Le nombre limité d'acteurs de ce type sur le marché national et le manque d'expérience dans l'implémentation d'énergies renouvelables ne joue pas en faveur de ce modèle.

La demande d'autorisation nécessaire auprès des autorités cantonales lors du remplacement d'une chaudière par une PAC air-eau est un autre aspect légal qui constitue un frein au développement. Cette démarche n'est en effet pas requise lors du remplacement d'une chaudière par une chaudière du même type. Un certain nombre de normes doivent également être satisfaites sur les aspects du niveau sonore, de la conformité électrique et de la sécurité incendie. Ces démarches ont un coût significatif qui augmente d'autant le budget d'un projet de chaleur renouvelable.

Défis et opportunités de développement

Des barrières identifiées découlent deux défis principaux :

a) technique avec des unités de >50kW silencieuses et faciles à intégrer et
b) commercial avec une offre susceptible de plaire aux propriétaires : la rénovation doit être un produit complet qui comprend toutes les prestations et les procédures nécessaires.

Malgré ce contexte contraignant, des expériences pilotes menées par SIG montrent que des projets exemplaires sont possibles avec les produits actuels et réalisés dans un cadre exigeant.

Projet «AirBiVal» et Contribution à l'Annexe 50 du IEA HPT TCP

Le projet «AirBiVal» s'inscrit dans le cadre de la contribution suisse à l'Annexe 50 « Pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire dans les bâtiments multifamiliaux » du Heat Pumping Technology Collaboration Programme de l'International Energy Agency (IEA HPT TCP). Il consiste à élaborer des schémas standards pour des PAC air/eau en fonctionnement bivalent. Pour les pompes à chaleur de petite puissance (max 15kW), les schémas standards ont été élaborés et sont appliqués jusque dans le PAC Système Module. Pour les PAC sur

l'air plus puissantes et les systèmes hybrides, le marché dénote l'absence de systèmes combinés optimaux. Ces schémas sont nécessaires pour adresser la problématique de l'assainissement des maisons à plusieurs logements en intégrant des pompes à chaleur. Selon les discussions préliminaires avec les acteurs du marché, et à notre connaissance, le projet se limite aux systèmes combinés suivants, toujours avec une base de pompe à chaleur sur l'air :

- PAC avec chaudière en mode bivalent parallèle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) ;
- PAC avec chaudière en mode bivalent alternatif pour le chauffage et l'ECS ;
- PAC monovalente pour le chauffage et l'ECS.

Les hypothèses tiennent notamment compte de la réutilisation de chaudières existantes en tant qu'appoint. Celles-ci pouvant dater, les schémas doivent être prévus pour différents types de fonctionnements. Les bases de dimensionnement ainsi que l'analyse fonctionnelle permettant une mise en œuvre efficace et fiable seront documentées. La démarche est appliquée à des puissances de 50kW à 1MW.
L'objectif du projet est de lever plusieurs barrières techniques freinant une plus large application de la technologie PAC dans les zones urbaines. La diffusion de schémas hydrauliques adaptés ainsi qu'une description du principe de fonctionnement optimal correspondant à chaque cas constitueront une assurance de performance qui soutiendra à l'avenir le développement de l'application des PAC dans un domaine aujourd'hui sous-exploité.

Pour obtenir les résultats attendus, le travail sera réalisé en collaboration avec l'Université de Genève (UNIGE) et les services industriels de Genève (SIG) et se déroulera par phases jusqu'à 2020. Dans un premier temps, des mesures sont effectuées (hiver 2017/2018) sur plusieurs installations réalisées. Elles permettront de caler le modèle par une simulation des sites mesurés. Cet outil servira ensuite à effectuer des simulations sur la base d'autres hydrauliques sélectionnées comme prometteuses. Une phase d'optimisation suivra pour améliorer encore les performances, notamment la robustesse et l'efficience des meilleures configurations. Une revue critique par des ingénieurs du terrain remettra en question les résultats obtenus après chaque phase itérative. Une documentation accompagnera les meilleurs schémas résultant de cette démarche. Elle sera finalement intégrée comme complément au guide pratique en cours d'élaboration sur mandat de l'OFEN. L'objectif final réside dans une large diffusion des résultats obtenus afin de stimuler de futurs projets en fournissant des outils performants et fiables.

Conclusion et perspectives

L'air en tant que ressource renouvelable joue un rôle important dans la transition énergétique de la fourniture de chaleur en milieu urbain. L'intégration de PAC dans les bâtiments multifamiliaux représente un potentiel important aujourd'hui sous-exploité. Les lacunes du marché décrites plus haut se traduisent en opportunités de développement pour des produits adaptés qui permettront de stimuler les projets de ce type. La réduction des émissions de CO_2 liées au remplacement de chaudières à combustible fossile constitue un moteur en soi pour la promotion de ce type d'installation de grande puissance. Un certain nombre de barrières existent sans être pour autant insurmontables. L'expérience montre que le droit du bail est un sujet politiquement difficile. Nous sommes d'avis que le développement d'offres de type contracting énergétiques et les programmes tels que éco21 sont les plus prometteurs dans ce marché. Le projet AirBiVal s'inscrit dans la perspective d'étendre le PAC Système Module pour des puissances plus élevées

et fournir ainsi des outils permettant de promouvoir une plus large application des PAC dans les bâtiments à plusieurs logements.

Remerciements

Nous tenons à remercier notre partenaire l'Université de Genève ainsi que les Services Industriels de Genève (SIG) pour leur précieuse collaboration. D'autre part, nous remercions l'Office Fédéral de l'Énergie pour son soutien financier.

Bibliographie

[1] Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2016: Aperçu de la consommation d'énergie en Suisse au cours de l'année 2015, http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00867

[2] Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2016 : Vue d'ensemble des émissions, http://www.bafu.admin.ch/klima/13879/13880/14486/index.html?lang=fr

[3] Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2017 : Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien – Ausgabe 2016, http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/?dossier_id=00772&lang=de

[4] M. Zogg : The Swiss Retrofit Heat Pump Programme, 7th IEA Heat Pump Conference, Beijing, 2002.

[5] Prognos AG : Der Energieverbrauch der Privaten Haushalte 2000-2015, Ex-Post-Analyse nach Verwendungszwecken und Ursachen der Veränderungen. BFE, 2016.

[6] Groupement professionnel Suisse pour les pompes à chaleur (GSP) : Statistiques 2016, http://www.fws.ch/statistiques.html

[7] Gebäude Klima Schweiz (GKS) : Statistik für Heizkessel, Brenner, Wärmepumpen, Solaranlagen, Energiespeicher, Warmwasserwärmer, 2018

[8] Office fédéral de la statistique (OFS), 2016, 2017 : Construction et logement, https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/construction-logement.html

[9] CSD Ingénieurs SA : Documents d'études, 2017

[10] Le Conseil Fédéral Suisse : Ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) 814.41, https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19860372/201601010000/814.41.pdf

[11] L'Assemblée fédérale de la Confédération Suisse, 2011: Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO_2 641.71 (Loi sur le CO_2), https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20091310/201301010000/641.71.pdf

[12] Le Conseil fédéral Suisse, 2012: Ordonnance sur la réduction des émissions de CO_2 641.711 (Ordonnance sur le CO_2), https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20120090/201306010000/641.711.pdf

[13] Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), 2016: Politique climatique de la Suisse. Rapport explicatif relatif au projet mis en consultation, https://www.admin.ch/ch/f/gg/pc/documents/2801/Politique-climatique-de-la-Suisse-post-2020_Rapport-expl_fr.pdf

[14] Services Industriels de Genève (SIG), 2016 : éco21 energy efficiency program, http://www.sig-ge.ch/eco21/Pages/home.aspx

[15] Yushchenko, A., & Patel, M. K. : Contributing to a green energy economy? A macroeconomic analysis of an energy efficiency program operated by a Swiss utility. Applied Energy, 179, 1304–1320, 2016, https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.028

[16] Cabrera, D., Seal, T., Bertholet, J.-L., Lachal, B., & Jeanneret, C., 2012 : Evaluation of energy efficiency program in Geneva. Energy Efficiency, 5(1), 87–96. https://doi.org/10.1007/s12053-011-9110-1

[17] Bertholet, J.-L., Cabrera, D., Lachal, B., & Patel, M. K., 2014 : Evaluation of an energy efficiency program for small customers in Geneva. In 2014 International Energy Policy & Programme Evaluation Conference (IEPEC). Berlin, http://www.iepec.org//conf-docs/papers/2014/Jean-Luc Bertholet.pdf

[18] Le Conseil fédéral Suisse, 1990 : Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux 221.213.11 (OBLF), https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19900092/201407010000/221.213.11.pdf

Matthias Rüetschi, SIG-éco21
Responsable éco21 Immobilier
Rodrigo De Pablo, SIG-éco21
Chef de projet Chaleur renouvelable Villa

Comment mobiliser le potentiel sous-estimé de l'air en milieu urbain ?

Introduction

En Suisse, environ 75% des énergies servant aux systèmes de chauffage sont importées sous forme d'énergies fossiles. La Confédération a pour objectif d'abaisser de 20% des émissions totales de carbone à l'horizon 2020 (par rapport au niveau de 1990), en visant notamment une diminution de 40% des émissions de CO2 issues du secteur du bâtiment. Afin de promouvoir les énergies renouvelables dans les systèmes de chauffage, des instruments ont été mis en place au niveau fédéral, notamment le Programme Bâtiments. Cependant, ces mesures ne seront pas suffisantes pour atteindre les taux d'émissions escomptés. En 2014, on observait une réduction des émissions totales de CO2 de 9% par rapport à 1990 et les émissions liées au secteur des bâtiments avaient diminué de 30%.

Fort de ce constat, les cantons ont pris des dispositions afin d'atteindre les objectifs fixés. A Genève, le Canton s'est doté d'un Plan climat cantonal (PCC) et s'est associé aux Services Industriels de Genève (SIG) afin d'amorcer et accélérer la transition énergétique, notamment dans le domaine du bâtiment.
Dans le cadre du programme éco21, SIG cherche à promouvoir la mise en œuvre de solutions renouvelables, notamment dans la thermique des bâtiments existants.

Pour les propriétaires de maisons mono-familiale, le surcoût lié à une installation de chauffage renouvelable, type pompe à chaleur (PAC), est généralement amorti en quelques années. En revanche, dans le domaine des bâtiments multifamiliaux, les locataires paient uniquement l'énergie et l'entretien du système de chauffage ; les coûts liés à l'investissement étant exclusivement à charge du propriétaire. Il en résultat une situation de blocage, ces conditions n'incitant pas les propriétaires d'immeubles à investir dans des installations de PAC. En effet, ces solutions de chauffage sont généralement 4 à 6 fois plus chères que les systèmes dits conventionnels, et le seul bénéficiaire est le locataire. Les propriétaires se contentent ainsi de remplacer les anciennes installations par des nouvelles chaudières fossiles.

SIG-éco21 souhaite mettre en place des conditions favorables au déploiement des énergies renouvelables, notamment par le biais du *contracting énergétique*.

Programme Chaleur renouvelable bâtiments – SIG-éco21

Contexte

Les nouvelles constructions à haute ou très haute performance énergétiques (HPE/THPE à Genève, correspondant en Suisse à respectivement Minergie ou Minergie P) peuvent être chauffées

efficacement à basse température (températures de départ de l'ordre de 30°C, hors eau chaude sanitaire). Ainsi, depuis une vingtaine d'années, les solutions comprenant des pompes à chaleur (PAC) sont toujours plus utilisées pour ces nouveaux bâtiments, car le faible écart de température à couvrir par les PAC garantit un bon coefficient de performance (COP).

Cependant, pour les bâtiments existants non ou mal isolés, la température de distribution de chaleur est supérieure. Réputée très élevée, ce qui a longtemps disqualifié les solutions PAC, elle se révèle en réalité aux alentours de 55-60°C par -5°C extérieur. Ce constat, combiné aux progrès techniques observés ces dernières années sur cette technologie amènent à reconsidérer ce principe, d'autant plus que ces bâtiments sont responsables de la plus grande part des émissions de CO2 à Genève.

Face à ce constat, des études ont été menées par SIG-éco21 depuis 2014 pour évaluer la pertinence d'une offre permettant de remplacer des chauffages fossiles par des solutions PAC, couplées ou non à la chaudière existante. En fin 2016 et 2017, 3 sites pilotes ont été réalisés. Le suivi des performances énergétiques fait partie intégrante de l'opération. Ainsi, en partenariat avec l'Université de Genève (UniGE), ces projets font actuellement l'objet d'un suivi technique détaillé à des fins de bilans et d'optimisations.

Le développement et la multiplication de ces projets vise à contribuer à l'atteinte des objectifs fixés par la Stratégie Energétique 2050.

Contraintes techniques

Plusieurs contraintes techniques ont été identifiées suite à la réalisation des projets pilotes, en voici les principales :

Electricité :
L'implémentation des PAC en rénovation de chaudière fossile peut nécessiter une mise à niveau de l'introduction électrique dans le bâtiment en fonction de la capacité disponible. En cas de sous capacité électrique, des travaux parfois conséquents et coûteux peuvent compromettre le projet.

Poids et encombrement
D'une manière générale, les PAC aujourd'hui disponibles sur marché ne répondent pas aux critères et exigences du milieu urbain densément bâti. La taille et le poids des machines peuvent poser problème, particulièrement lors de l'implantation en toiture. En effet, la toiture peut subir des déformations importantes. La machine doit alors être posée sur une structure répartissant le poids sur une plus grande surface. Le cas échéant, la toiture doit être renforcée.
En termes de taille, il faut prêter attention à ce que les PAC ne dépassent pas le gabarit autorisé du bâtiment.

Acoustique et vibration :
Généralement, les PAC de grande puissance thermique génèrent beaucoup de bruit ; ces dernières étant destinées à l'industrie et non au milieu résidentiel. Des mesures afin d'atténuer le son émis (ex : panneau absorbeur de bruit) doivent alors être prises afin de respecter les valeurs légales. Les machines peuvent également produire des vibrations mécaniques. Cependant, ces sons solidiennes peuvent être facilement supprimés par le mise en place d'amortisseurs.

Plan hydraulique
Contrairement au domaine des PAC de petites puissances, il n'existe pas de schémas standards pour les installations de moyennes et grandes tailles. Des solutions innovantes et fonctionnant de façon optimale doivent être testées.

Contraintes légales

Acoustique
En termes de nuisances acoustiques, l'Ordonnance sur la Protection du Buit (OPB) fixe des limites sonores en fonction du degré de sensibilité de différentes zones. Les pompes à chaleur puissantes, capables de couvrir les besoins thermiques d'un bâtiment non isolé, dépassent généralement les limites imposées par l'OPB. Il devient alors nécessaire d'installer des panneaux réducteurs de bruit afin de diminuer les nuisances sonores. Une autre solution technique consiste à installer plusieurs pompes à chaleur de type villa en série. Ces pompes à chaleur ont l'avantage d'être optimisées au niveau acoustique. Cependant, l'addition d'appareils peu bruyants peut provoquer dans certaines situations un dépassement des limites légales.

Fluides réfrigérants
L'Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances (ORRChim) réglemente et restreint l'utilisation de certains fluides frigorifiques. Ainsi, les pompes à chaleur sont directement concernées par cette ordonnance. Les réfrigérants appauvrissant la couche d'ozone (type CFC) sont interdits. Les réfrigérants stables dans l'air (type HCF) sont limités en fonction de la plage de puissance et du potentiel de réchauffement global (*Global Warming Potential*, GWP). Quant aux réfrigérants naturels ou non stables dans l'air (type HFO), ceux-ci sont autorisés.

Charges des locataires
Selon l'Ordonnance sur le bail à loyer et le bail à ferme d'habitations et de locaux commerciaux (OBLF), l'investissement des systèmes de chauffage et de production de l'eau chaude sanitaire est à charge du propriétaire (art.6), alors que les frais d'utilisation et d'entretien des installations techniques sont à la charge des locataires (art.5). Dans cette situation, le propriétaire n'a aucun intérêt à investir dans une solution valorisant des énergies renouvelables puisqu'il ne peut, en aucun cas, récupérer le surcoût de son installation (environ 4 à 6 fois le prix d'une installation fossile conventionnelle). Seuls les locataires bénéficient d'une baisse des charges. Ce mécanisme bloquant peut néanmoins être contourné par un montage financier du type *contracting énergétique* (voir Stratégie et positionnement de SIG ci-dessous).

Stratégie et positionnement SIG

Contracting énergétique
Afin de contourner les dispositions légales prévues sans l'OBLF, SIG-éco21 a recouru à un montage financier du type *contracting énergétique* pour la réalisation de ses projets pilotes. En prenant le rôle de maitre d'ouvrage, SIG-éco21 prend à sa charge l'investissement, l'entretien des installations ainsi que l'énergie consommée par les pompes à chaleur. Ainsi, en proposant une prestation globale, SIG a la possibilité de reporter indirectement l'amortissement de l'investissement en facturant aux locataires les kWh thermiques consommés.

De ce fait, la différence entre les charges facturées aux locataires et les coûts réels d'exploitation du système de chauffage permet d'amortir le surcoût lié à l'implémentation des PAC.

Globalement, le montage financier est le suivant :

- Le propriétaire investi le montant que lui aurait coûté l'installation d'une chaudière fossile conventionnelle neuve ;
- SIG investit le solde ;
- Les subventions à disposition viennent alléger légèrement le plan financer ;
- Les charges des locataires ne subissent que très peu de majoration (< 10%).

Les installations sont amorties sur une période de 20 ans.

Au vu des dispositions légales en vigueur, ce montage financier est un levier prometteur pour l'intégration d'énergie renouvelable dans le milieu locatif résidentiel.

Modification du marché

A moyen terme, les projets de PAC en rénovation de chaudières fossiles dans le milieu résidentiel locatif seront destinés à assurer les besoins thermiques des bâtiments ne pouvant pas être raccordés aux réseaux de chaleur à distance. Cependant, force est de constater que les professionnels dans le secteur du chauffage ne sont pas préparés au transfert de technologie qui doit s'opérer durant ces prochaines années. Afin que le canton entreprenne le virage de la transition énergétique au plus vite et de la meilleure façon, SIG-éco21 se positionne dans le rôle de moteur dans la transformation du marché. En collaboration avec l'Office Cantonal de l'Energie (OCEN), éco21 accompagne les professionnels du secteur du chauffage pour qu'ils s'adaptent et appréhendent au mieux ces nouvelles technologies.

Ainsi, pour les premiers projets pilotes, il est nécessaire de fonctionner en entreprise générale pour réaliser des installations qui délivrent des résultats satisfaisants du point de vue énergétique. Les projets sont donc pilotés par SIG-éco21. L'étude détaillée des projets ainsi que la réalisation des installations sont sous-traitées respectivement à un bureau d'ingénieur et à une entreprise chauffagiste de la place.

Afin de faciliter et de stimuler l'émergence de nouveaux projets dans un futur proche, SIG-éco21 développe actuellement un logiciel de simulation en ligne. Alimenté en partie par des données du *système d'information du territoire à Genève* (SITG), cet outil informatique doit permettre, à terme, de fournir une analyse technico-économique automatisée afin de pré-qualifier les projets de rénovation de chaudière du parc immobilier genevois.

Premiers résultats et perspectives

Globalement, les caractéristiques et performances des machines sont conformes aux données transmises par le fournisseur, permettant ainsi la convergence entre les plans financiers planifiés et les factures d'énergies adressées aux clients. Dans le cadre du premier projet pilote, le coefficient de performance annuel mesuré (COPa) est de 3.

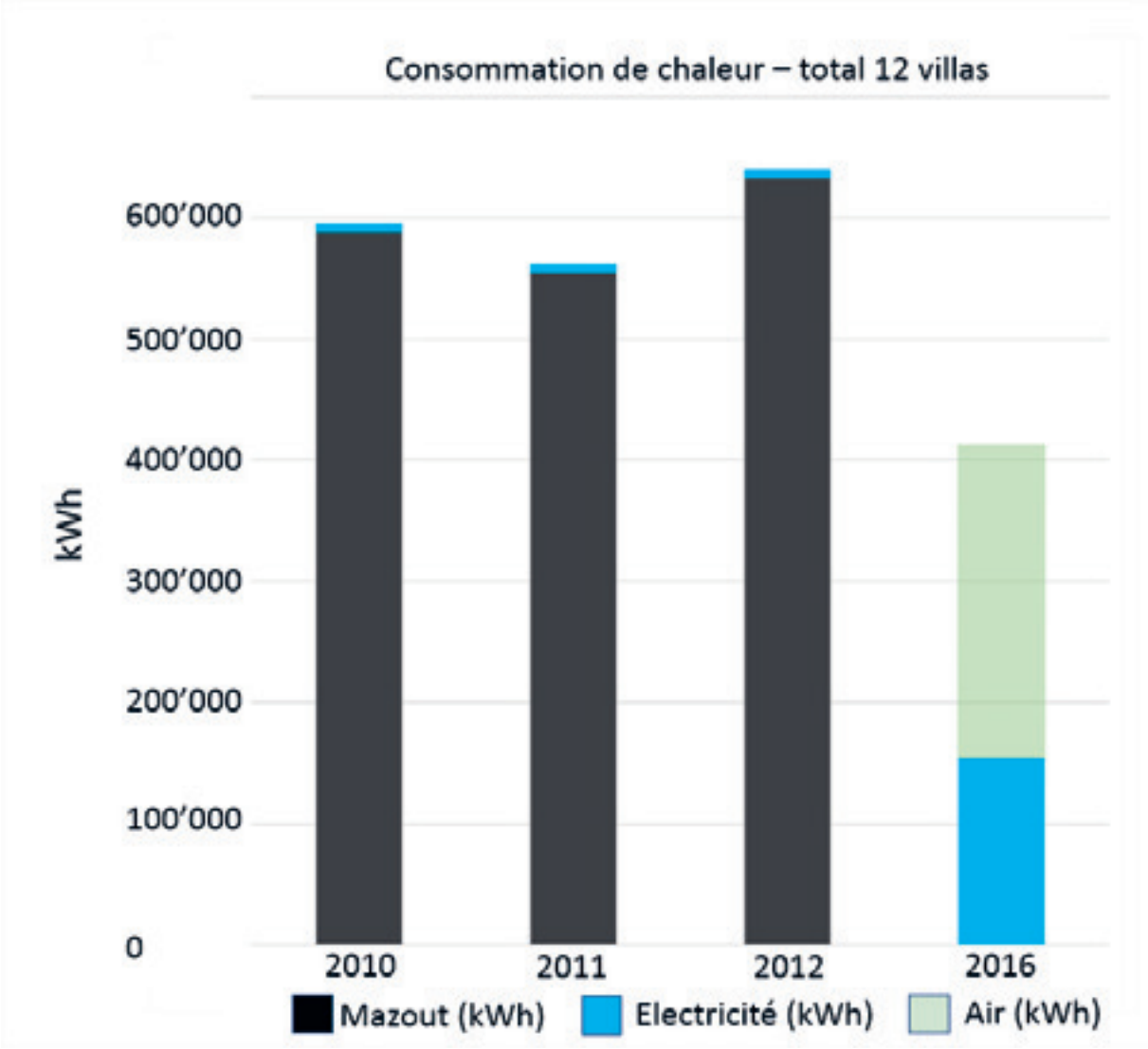


Figure 1: Consommation d'énergie du premier site pilote avant et après installation de PAC air/eau. Villas non rénovées des années 1970.

Une nouvelle série de projets pilotes sera réalisée dans les mois à venir à Genève. Avec ces nouvelles installations, SIG souhaite acquérir une meilleure maîtrise des coûts en fonction des différents contextes d'implémentation. En parallèle, et sur la base de ses résultats, SIG développe différents schémas hydrauliques afin d'orienter, à terme, les installateurs vers des installations efficientes et simplifiées, à l'image du PAC-Système-Module pour des PAC de plus petite puissance. Ces schémas standardisés font partie d'un projet en collaboration avec CSD Ingénieurs et avec le soutien de l'OFEN.

Guide pratique à destination des bureaux d'ingénieurs - Vadémécum

Dans le cadre du programme éco21, SIG cherche à promouvoir la mise en œuvre de solutions renouvelables dans le domaine de la thermique dans les bâtiments existants. Ce segment de marché est particulièrement difficile en raison des nombreuses contraintes en milieu urbain densément bâti.

Dans ce contexte, SIG-éco21 souhaite valoriser ses travaux afin de permettre un déploiement à large échelle. Financé en partie par l'OCEN et réalisé par le bureau CSD Ingénieurs, un guide pratique pour l'implémentation de pompes à chaleur air-eau en toiture dans les immeubles résidentiels de petite et moyenne taille a vu le jour : le Vadémécum.

Nourri par l'expérience acquises lors de la réalisation des projets pilotes menés à Genève, ce document émet des recommandations et relève différents obstacles auxquels les maîtres d'ouvrage doivent faire particulièrement attention, pour les différentes phases du projet et de la réalisation.

Principalement destiné aux bureaux d'ingénieurs, ce guide pratique peut également inspirer des bureaux d'architecte et des sociétés chauffagistes.

Remerciements

SIG tient à remercier chaleureusement l'OFEN pour la participation et le soutien à ce projet. Un grand merci également à CSD Ingénieurs ainsi qu'à l'Université de Genève (UniGE) pour leur implication et leur collaboration dans ces projets.

Stefan Rohrer, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Frank Tillenkamp, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Martin König, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, ZHAW
Ciril Schiess, Scheco AG
Michael Benz, 3-Plan Haustechnik AG

Neuartige reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Propan für ein energieeffizientes Bürogebäude

Zusammenfassung

Die steigenden Anforderungen an den Energiebedarf von Gebäudesystemen haben dazu geführt, dass der Anteil an installierten Wärmepumpensystemen bei Neubauten stetig wächst. Zudem werden moderne Bürogebäude in den Sommermonaten oft gekühlt, um den Komfortansprüchen gerecht zu werden. Gleichzeitig muss der Einsatz synthetischer Kältemittel mit hohen Treibhausgaspotentialen langfristig stark eingeschränkt werden. Daher müssen neue Anlagentypen auf Basis natürlicher Kältemittel entwickelt werden, welche insbesondere für kleinere bis mittlere Gebäudegrössen aktuell auf dem Markt kaum verfügbar sind. Im Rahmen eines Demonstrationsprojektes des Bundesamtes für Energie wurde eine neuartige reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Propan als Kältemittel entwickelt. Dieser Beitrag fasst die Analyse der ersten Heizphase zusammen und dokumentiert die daraus abgeleiteten Optimierungsmassnahmen zur Effizienzsteigerung des Wärmepumpen-Betriebs.

Summary

The ever increasing demand on energy in new buildings has led to an increase in demand for heat pump systems. In addition modern offices are nowadays being cooled during the summer months, to maintain a necessary level of comfort. Also since synthetic refrigerants with a high global warming potential in the long term are unsustainable, there is now a need to develop heat pump systems with a natural refrigerant, but as yet, such systems are rarely available for use in small to medium size buildings. A demonstration project funded by the BFE has developed a new reversible heat pump system using Propane as the refrigerant. This paper summarizes the analysis of the first heating period and the improvement measures derived from it in order to increase the efficiency of the heat pump operation.

Gebäudekonzept

Im Oktober 2017 wurde das neue Bürogebäude Albert-Einstein-Strasse 15 (AE15) in Winterthur bezogen (vgl. Bild 1). Das Gebäude bietet Arbeitsplätze für 150 Personen, weist eine Energiebezugsfläche von 3'031 m^2 auf und ist nach dem MINERGIE-P® Standard gebaut. Das Gebäude verfügt über eine PV-Anlage mit hoher Eigenstromnutzung (Leistung PV-Anlage: ca. 20 MWh/a), ist mit einem Niedertemperatur Heizsystem ausgerüstet (Heizen: 30 °C/25 °C, Kühlen 17 °C/22 °C) und verfügt über diverse passive und aktive Massnahmen zur Bedarfsreduktion.

Bild 1: Neues Bürogebäude AE15 mit einer Energiebezugsfläche von 3'031 m2 versorgt durch eine reversible Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Propan als Kältemittel

In der ersten Planungsphase des Gebäudes wurden verschiedene Energieversorgungskonzepte evaluiert. Die Vorstudie zeigt, dass unter den gegebenen Randbedingungen am sinnvollsten eine umkehrbare (reversible) Wärmepumpe eingesetzt wird. Das Gebäudekonzept ermöglicht es, während einer langen Übergangszeit auf eine Klimatisierung zu verzichten, wodurch es möglich ist, den Heiz- und Kühlbetrieb zu separieren. Die Hydraulik kann somit stark vereinfacht und die gesamte Verteilung durch ein Zweileitersystem mit einer einfachen Change-Over-Schaltung realisiert werden.

Durch die Lage des Gebäudes ist eine Grundwassernutzung oder der Einsatz einer Erdsonde nicht möglich, wodurch nur eine Nutzung der Aussenluft in Frage kommt. Bei der Evaluation der Wärmepumpe wurde zudem auf die Umweltverträglichkeit des Kältemittels geachtet. Da der Gebrauch von synthetischen Kältemitteln (FKW und HFO) längerfristig eingeschränkt werden kann, wurde entschieden, ein natürliches Kältemittel einzusetzen. Bedingt durch seine günstigen thermodynamischen Eigenschaften für den gegebenen Einsatzbereich, bietet sich die Verwendung von Propan (R290) als Kältemittel an.

Im Rahmen einer Marktanalyse wurden mögliche Wärmepumpensysteme diverser Hersteller analysiert. Im benötigten Spektrum bieten diverse Anbieter Lösungen an. Die verfügbaren Applikationen weisen aber folgende Einschränkungen auf:

- Es sind keine natürlichen Kältemittel verfügbar
- Geringe Effizienz im Kühlfall aufgrund von Herstellungskosten bedingte Vereinfachung des Kältemittelkreislaufes (Verwendung eines Wärmetauschers mit kombinierter Nutzung als Verdampfer und Verflüssiger).
- Die Systeme sind nicht auf ein Gesamtsystem mit moderaten Vorlauftemperaturen ausgelegt (Heizen: 30 °C/25 °C, Kühlen 17 °C/22 °C).
- Es ist keine stufenlose Leistungsregulierung möglich, wodurch die Effizienz des Teillastbetriebs verschlechtert wird.
- Die Lebensdauer der Aggregate ist aufgrund von vorhersehbar vielen Ein- und Ausschaltvorgängen beeinflusst.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Wärmepumpensystems, welches die oben genannten Einschränkungen eliminiert und die Maschine optimal in das energieeffiziente Gebäude integriert. Dafür sind folgende Hauptschritte geplant:

- Entwicklung und Bau einer umschaltbaren (reversiblen) Wärmepumpe mit Propan als Kältemittel
- Performance-Analyse der Wärmepumpe sowie des Gesamtsystems.
- Detailliertes Verständnis des Prozesses erarbeiten um gezielte Optimierungsmassnahmen ableiten zu können.
- Betriebsoptimierung der Wärmepumpe und Erfolgskontrolle der getroffenen Optimierungsmassnahmen.

Wärmepumpenkonzept

Die Maschine wird mit dem natürlichen Kältemittel R290 (Propan) betrieben. Drei verschiedenen Betriebsmodi sind möglich: Wärmeerzeugung, Kälteerzeugung und Abtaubetrieb. Sie verfügt über vier halbhermetische Hubkolbenverdichter, wobei einer der Verdichter drehzahlgesteuert ist (vgl. Bild 2). Im Heizfall wird das Kältemittel im Plattenverflüssiger (WT 1) verflüssigt und Energie ans Heizwasser abgegeben. Die Ausseneinheit (WT 2), welche im Heizfall als Verdampfer arbeitet, dient als Quelle. Im Kältekreis sind zwei Motorkugelhähne verbaut, welche eine automatische Umstellung des Kältemittelkreislaufes in den Kühlbetrieb (Bild 2, unten) gewährleisten. Die Ausseneinheit (WT 2) wird im Kühlfall als Verflüssiger betrieben. Ein weiterer Plattenwärmeübertrager (WT 3) arbeitet als Verdampfer.

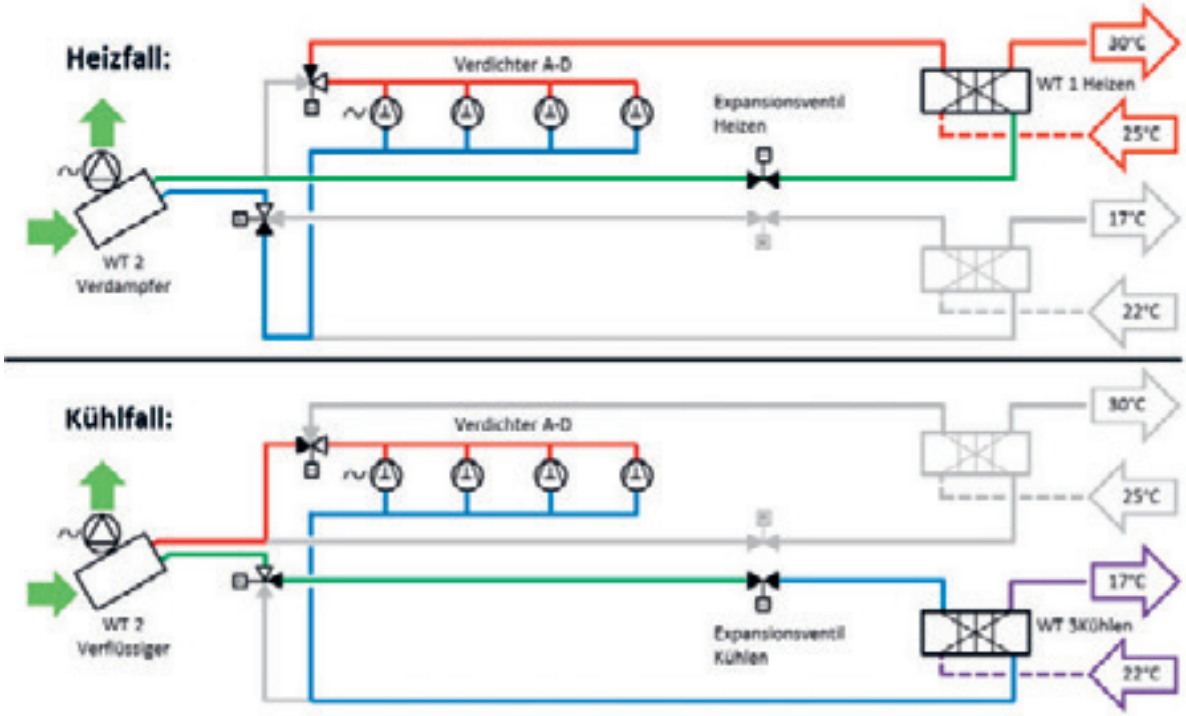


Bild 2: Vereinfachtes Schema des Wärmepumpenkreises für den Heiz- und Kühlfall

Um einen sicheren Betrieb auch bei Minustemperaturen zu gewährleisten, ist ein bedarfsgerechtes Abtauen nötig (vgl. Bild 3). Dies geschieht mit Kältemittel-Heissgas, welches durch den Wärmetauscher geführt wird und damit den Eisansatz eliminiert.

Bild 3: Ausseneinheit und Maschinengehäuse der Wärmepumpe

Die Verwendung von vier Verdichtern erlaubt, dass die Kälte- oder Heizleistung der Anlage von 15 % - 100 % moduliert werden kann. Sämtliche Anlagenbestandteile auf der Kältemittelkreisseite sowie auf der Sekundärseite sind teillastoptimiert, damit eine möglichst hohe Effizienz in allen Betriebsphasen erreicht wird. Durch die stufenlose Leistungsregulierung wird eine längere Laufzeit der Verdichter ohne Abschaltung angestrebt, wodurch sich die Lebensdauer der Aggregate erhöht.
Das Umschalten des Kältemittelkreises erlaubt, einen separaten Wärmeübertrager als Verdampfer einzusetzen. Dadurch lassen sich die einzelnen Wärmeübertrager auf den Prozess der Verflüssigung resp. Verdampfung optimieren und tragen damit zur Effizienz des Kreislaufes bei.

Der Einsatz von Propan (R290) als Kältemittel bietet den wesentlichen Vorteil, dass Propan kein Ozon-Abbaupotential (ODP = 0) besitzt, ein vernachlässigbares Treibhauspotenzial (GWP = 3) aufweist und gleichzeitig günstige thermodynamische Eigenschaften hat. Die thermodynamisch guten Eigenschaften von R290 ermöglichen einen niedrigen Energiebedarf bei der Verdichtung und R290 weist eine hohe Verdampfungsenthalpie auf (bei -10 °C/40 °C etwa 1,7-fach gegenüber R22 und 2,5-fach gegenüber R404A/R507A). Dadurch ergibt sich ein äusserst niedriger Kältemittel-Massenstrom (bei identischer Kälteleistung ca. 55 %- 60 % im Vergleich zu R22 und ca. 40 % im Vergleich zu R404A/R507A). Dabei unterscheiden sich die Drucklagen und die volumetrische Kälteleistung nur unwesentlich von den Werten von R22 oder R134a. Beim Bau der Anlage musste darauf geachtet werden, für Kohlenwasserstoffe geeignete Bauteile am Markt zu finden. Das Angebot wird laufend erweitert und dem Stand der Technik angepasst.

lm Vergleich zu den meisten HFKW ist die Brennbarkeit von Kohlenwasserstoffen allerdings ein wesentlicher Nachteil. Daher müssen sämtliche Bauteile einer Risikobewertung (nach Gefährdungszone 2) unterzogen werden. Die Bewertung erfolgte auf einer Grundlage innerhalb der EU gültigen Richtlinien 94/9/EG (ATEX 95) [1] und 1999/92/EG (ATEX 137) [2] sowie den entsprechenden Normen [3], [4].

Ziel der Entwicklung war ein möglichst einfaches und trotzdem betriebssicheres Sicherheitskonzept als Beispiel für weitere Anwendungen. Sämtliche kältemittelführenden Anlageteile ausser der Ausseneinheit befinden sich in einem belüfteten Maschinengehäuse. Die Gesamte

Anlage steht auf dem Gebäudedach (Aussenaufstellung). Das Gehäuse ist nötig, um den Lärmschutz zu gewährleisten.
Die Anlage verfügt über eine Gasüberwachung. und misst die Kältemittelkonzentration innerhalb des Maschinengehäuses. Zur Vermeidung einer zu hohen Kältemittelkonzentration ist das Maschinengehäuse mittels eines Ventilators belüftet (vgl. Bild 4). Wird im Havariefall eine erhöhte Kältemittelkonzentration erkannt (≥20 % UEG[1]), werden zunächst die Verdichter ausgeschaltet und die maximale Luftmenge umgesetzt. Erhöht sich die Konzentration weiter (≥ 25 % UEG) werden sämtliche Bauteile (mit Ausnahme des Ventilators und der Gasüberwachung) stromlos geschaltet. Damit wird sichergestellt, dass keine Zündquelle (Funkenbildung) innerhalb des Gehäuses entstehen kann.

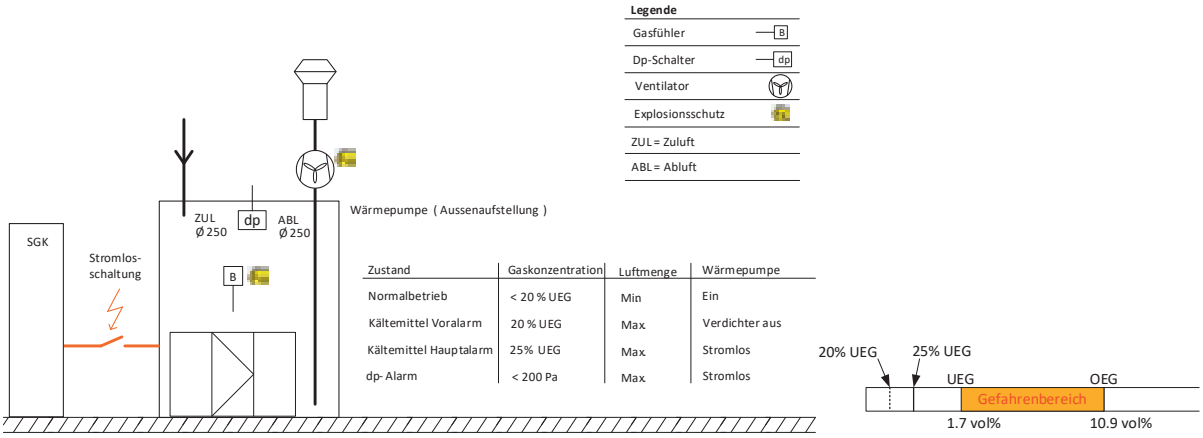


Bild 4: Lüftungskonzept des Maschinengehäuses und Sicherheitskonzept der Wärmepumpe

Performance-Analyse der Wärmepumpe

Zur Analyse der Wärmepumpenanlage wurde eine On-Site-Performancemessung installiert. Mit der Instrumentierung lassen sich alle wichtigen Prozessgrössen erfassen. Instrumentiert ist sowohl die Kältemittel- wie auch die Sekundärseite (Hydraulik). Die Messdatenerfassung, die Datenverarbeitung und der Datentransfer sind automatisiert (vgl. Bild 5). Dadurch kann die Auswertung extern erfolgen.

[1] UEG: Untere Explosionsgrenze

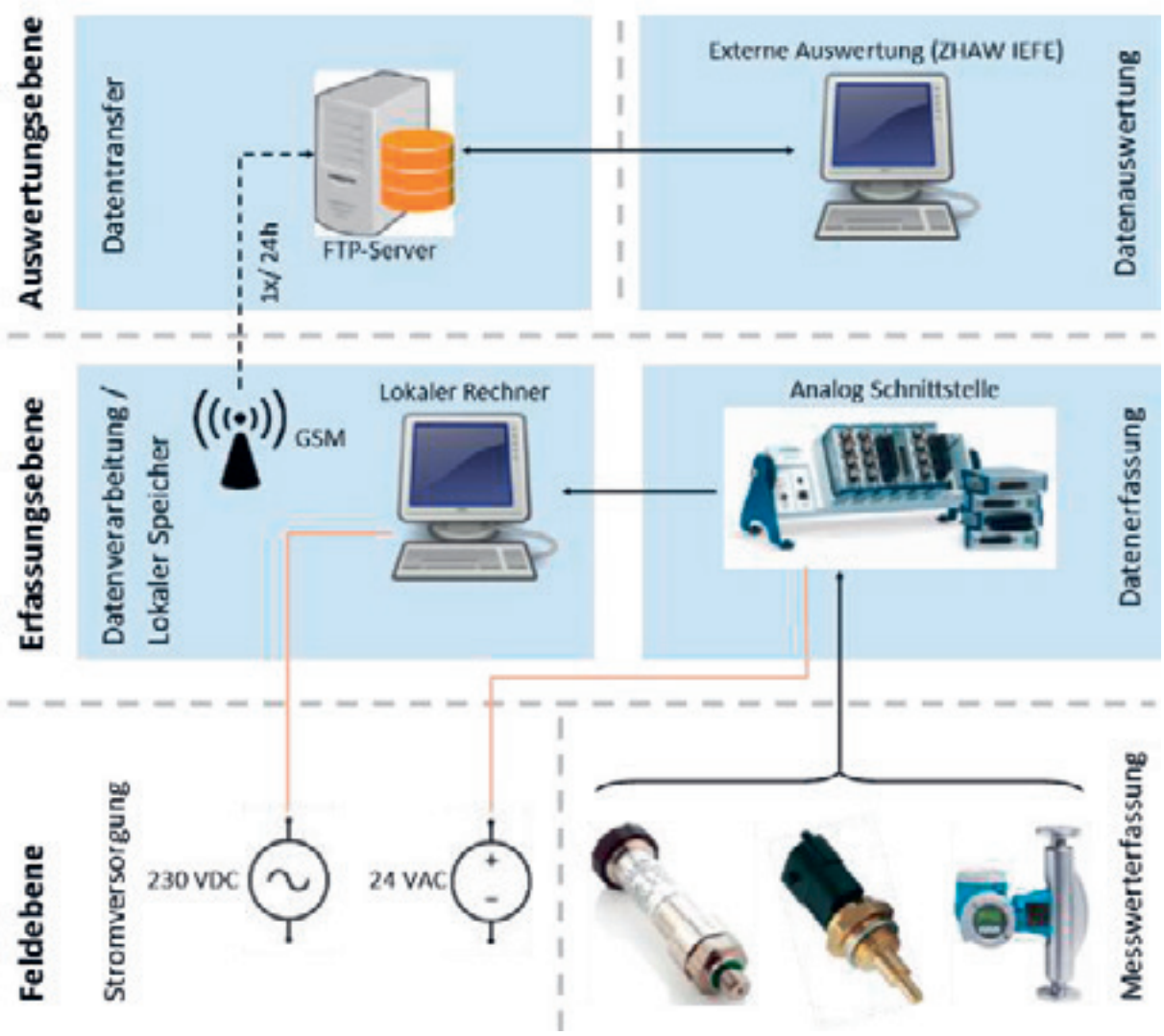


Bild 5: Aufbau der Performance Messung

Sämtliche Messwerte werden im 60 Sekunden Intervall aufgenommen und gespeichert. Die Messdatenfiles können anschliessend automatisiert ausgewertet werden. Wichtigste Prozessgrössen des Wärmepumpenbetriebs sind die Wärmeleistungen ($\dot{Q}_C$), die elektrischen Leistungen (P_{El}), die dazugehörigen summierten Werte der Wärmemenge ($Q_C = \int \dot{Q}_c \, dt$) und der elektrischen Arbeit ($W_{El} = \int P_{El} \, dt$). Die elektrische Arbeit wurde zudem in drei Anteile aufgeteilt (vgl. Tab. 1).

Ausgewertete Grösse	*Symbol*
Leistungsaufnahme des Verdichters im Wärmepumpenbetrieb	$W_{el,WP}$
Leistungsaufnahme des Verdichters im Abtaubetrieb	$W_{El,Abtau}$
Leistungsaufnahme der Sekundär-Aggregate[2]	$W_{El,Sek}$

Tabelle 1: Aufteilung der elektrischen Arbeit

[2] Sekundär-Aggregate: Lüfter der Ausseneinheit (WT2), Carterheizungen, Heisswasserpumpe, Steuerung und Schaltschrank, Begleitheizbänder

Zur Bewertung des Wärmepumpenbetriebs wurden vier Prozesszahlen gebildet (vgl. Bild 6). Zielgrösse der Optimierung ist die gesamte Arbeitszahl JAZ, welche die komplette elektrische Arbeit W_{El} für den Betrieb der Wärmepumpe beinhaltet. Die restlichen Werte dienen der Klärung der verschiedenen Einflüsse auf die gesamte Arbeitszahl.

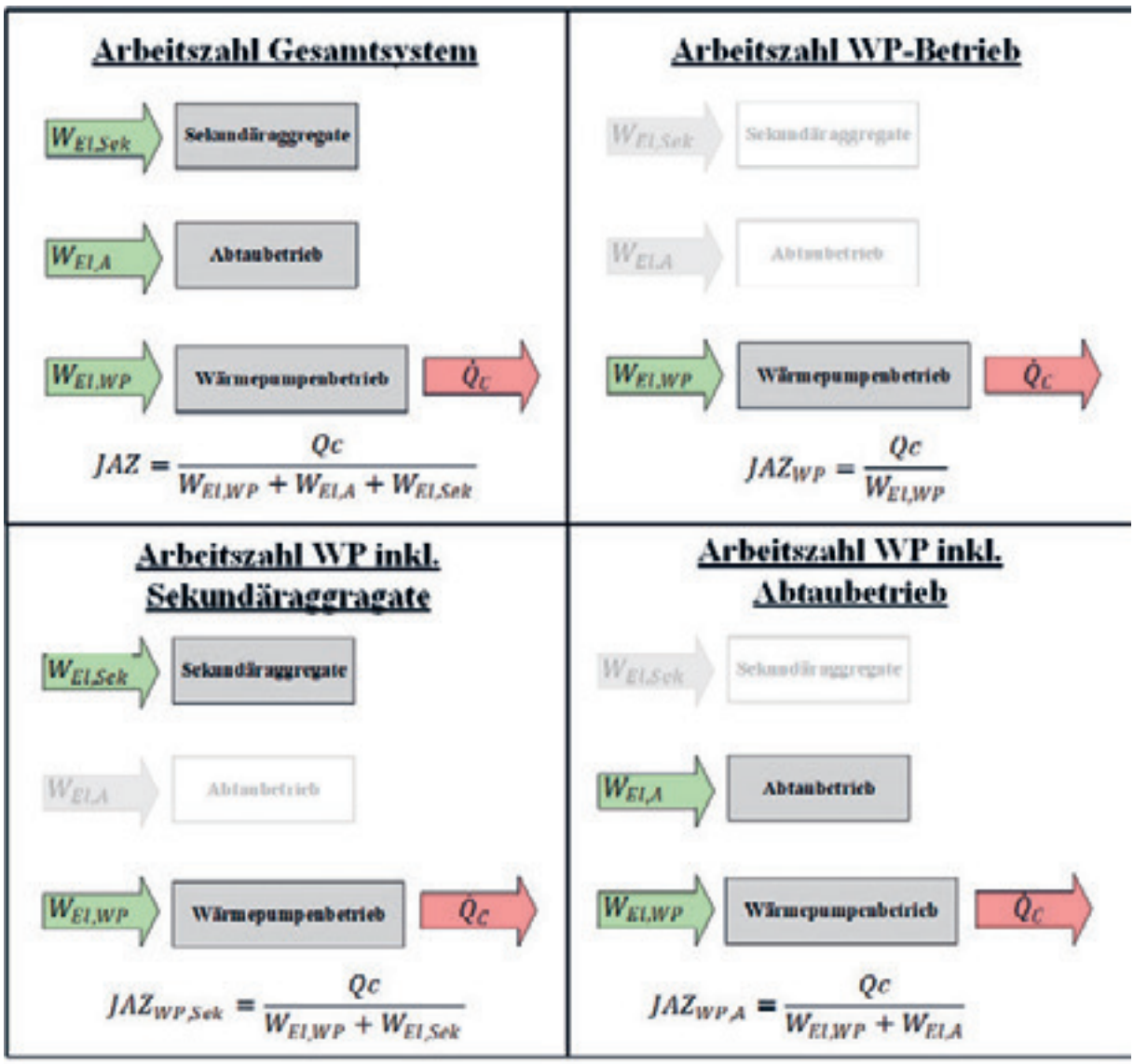


Bild 6: Übersicht zu den Prozesszahlen

Zur Auswertung von stationären Betriebspunkten wurde zudem der COP berechnet:

$$COP = \frac{\dot{Q}_C}{P_{El,KM}}$$

$\dot{Q}_C =$ *Abgegebene Wärmeleistung im stationären Betrieb*
$P_{El,KM} =$ *Aufgenommene elektrische Leistung des Verdichters im stationären Betrieb*

Heizperiode 2017/2018

Im Zeitraum vom 01. November 2017 bis 09. März 2018 wurden die aufgezeichneten Messwerte ausgewertet. Durch die Auswertung von stationären Punkten konnte der Wärmepumpenprozess unter den gegebenen Randbedingungen (UmgebungstemperatuT_Ur und der Rücklauftemperatur der Heizung$T_{C,A}$) bewertet werden. Untersucht wurde unter anderem der Verdichtungsprozess, die Überhitzung und Unterkühlung des Kältemittels, die Kühlgrenzabstände der Verdampfungstemperatur und der Verflüssigungstemperatur sowie der Druckabfall über den Verflüssiger und die Performance des Wärmepumpenprozesses.
Die Werte der VerdampfungstemperaturT_0 und der Verflüssigungstemperatur T_C liegen im Bereich, der anzustrebenden Werte gem. VDMA 24247-8 [2] (vgl. Bild 7 & 8). Daraus lässt sich schliessen, dass vorgegebenen Randbedingungen korrekt im Prozess umgesetzt werden.

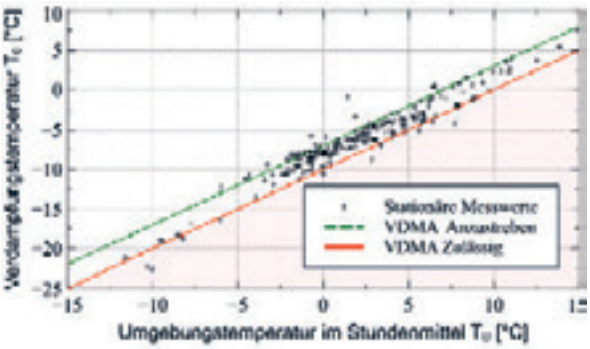


Bild 7: Verdampfungstemperatur im stationären Wärmepumpenbetrieb in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur mit Vergleich der Richtlinien nach VDMA 24247-8 [5]

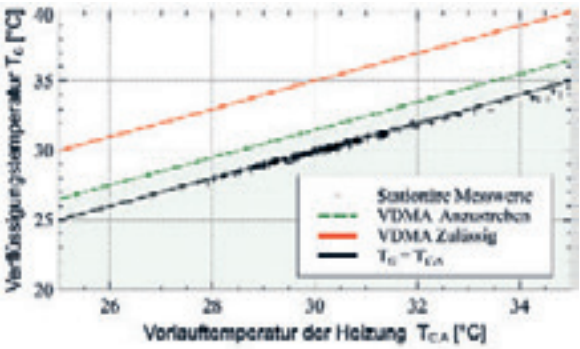


Bild 8: Verflüssigungstemperatur im stationären Wärmepumpenbetrieb in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur der Heizung mit Vergleich der Richtlinien nach VDMA 24247-8 [5]

Wird der COP in Abhängigkeit der UmgebungstemperaturT_U (vgl. Bild 9) betrachtet, kann die Performance des Prozesses beurteilt werden. Die Auswertungen zeigen, dass der Wärmepumpenprozess die in der Auslegung definierten Betriebspunkte unter den gegebenen Umgebungsbedingungen abbilden kann und die definierten Leistungsmerkmale erreicht werden.

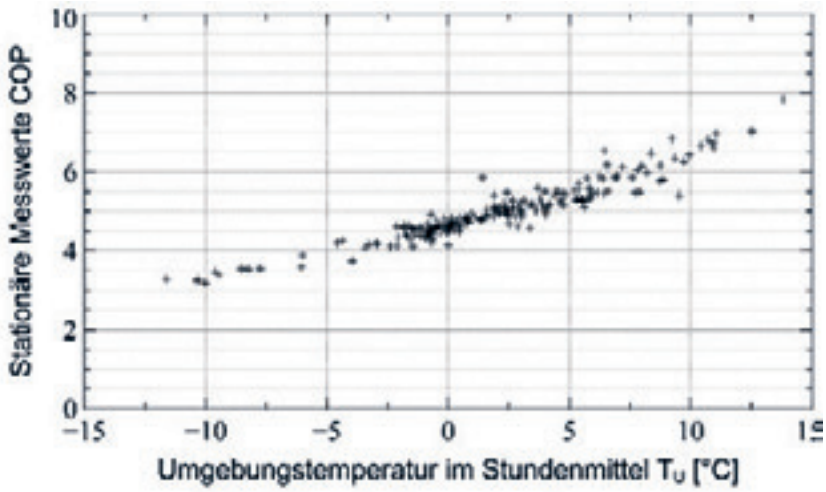


Bild 9: COP im stationären Wärmepumpenbetrieb in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Die Analyse des COP lässt jedoch nur einen Rückschluss auf den Prozess unter den gegebenen Randbedingen zu. Für einen optimalen Betrieb müssen auch die Randbedingungen betrachtet werden. Bilder 10 & 11 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizung ($T_{C,}$, $T_{C,E}$) während des Wärmepumpenbetriebs. Auffallend ist, dass die in der Auslegung definierte Rücklauftemperatur der Heizung von $25°C$ im Mittel ca. 3 K überschritten wird. Dies hat zur Folge, dass in einigen Betriebspunkten die definierte Vorlauftemperatur der Heizung vom 30 °C nicht eingehalten werden kann. Dadurch wird auch die Performance des Wärmepumpenprozesses beeinflusst.

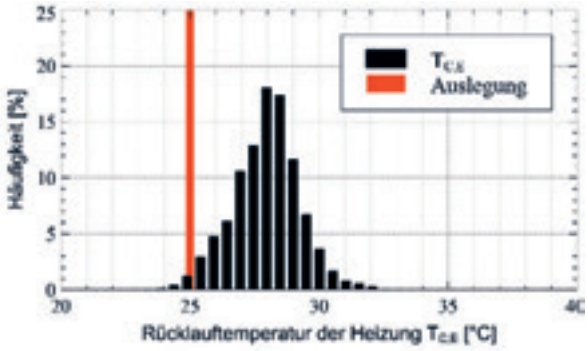


Bild 10: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperatur der Heizung $T_{C,E}$

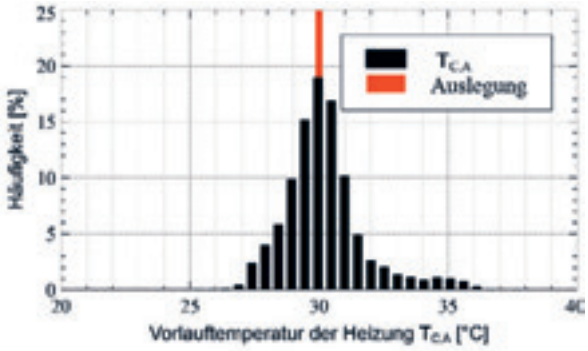


Bild 11: Häufigkeitsverteilung der Vorlauftemperatur der Heizung $T_{C,A}$

Zur Beurteilung der Systemperformance müssen nebst dem Prozess auch die diversen Hilfsenergien miteinbezogen werden. Tabelle 2 zeigt die summierten Werte der abgegebenen Wärmemenge und den Aufwand an elektrischer Arbeit über der gesamten Heizperiode sowie die daraus gebildeten Arbeitszahlen. Auffallend ist der Anteil der elektrischen Arbeit, welche für den Abtaubetrieb (11.8 %) und die Sekundäraggregate (22.9 %) aufgewendet werden muss. Dadurch werden auch die jeweiligen Arbeitszahlen beeinflusst.

Ausgewertete Grösse	*Symbol*	*Summenwert*
Abgegebene Wärmemenge des Verflüssigers	Q_C	*46'576 kWh*
Elektrische Arbeit total	W_{El}	*15'200 kWh (100%)*
Elektrische Arbeit WP-Betrieb	$W_{El,WP}$	*9'894 kWh (65.1 %)*
Elektrische Arbeit Abtau-Betrieb	$W_{El,Abtau}$	*1'799 kWh (11.8 %)*
Elektrische Arbeit Sekundäraggregate	$W_{El,Sek}$	*3'488 kWh (22.9 %)*
Arbeitszahl WP-Betrieb	JAZ_{WP}	*4.71*
Arbeitszahl WP inkl. Abtaubetrieb	$JAZ_{WP,A}$	*3.98*
Arbeitszahl WP inkl. Sekundäraggregate	$JAZ_{WP,Sek}$	*3.74*
Arbeitszahl Gesamtsystem	JAZ	*3.06*

Tabelle 2: Summenwerte der Heizperiode (01. November 2017 bis 09. März 2018)

Zur Analyse der der Zusammenhänge zwischen den Arbeitszahlen und den verschiedenen Betriebsmodi wurden Tagesmittelwerte der wichtigsten Parameter ausgewertet. In Bild 12 wird die Wärmeleistung des Verflüssigers $\dot{Q}_C$ als Tagesmittelwert in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur T_U im Tagesmittel dargestellt. Im ausgewerteten Zeitraum wurden

Tagesmitteltemperaturen von -9.7 °C bis 10.4 °C gemessen. Die Datendichte lässt es zu, Klassen (BINs) mit einer Breite von 1.5 °C im Intervall [-10 °C, 11 °C] zu bilden.

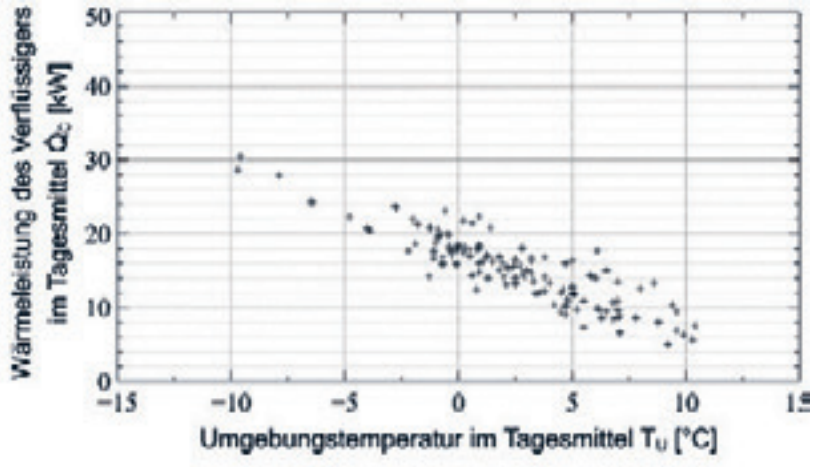


Bild 12: Wärmeleistung des Verflüssigers in Abhängigkeit Aussentemperatur

Durch die Bildung der BINs können die Verläufe der einzelnen Parameter in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur T_U ausgewertet werden. Bild 13 zeigt den Verlauf der Wärmeleistung des Verflüssigers $\dot{Q}_c$, der elektrischen Leistungsaufnahme P_{El} und der gesamten Arbeitszahl JAZ. Die Arbeitszahl des Gesamtsystems wird wie erwähnt stark durch den Abtaubetrieb und die elektrische Leistung für die sekundären Verbraucher beeinflusst.

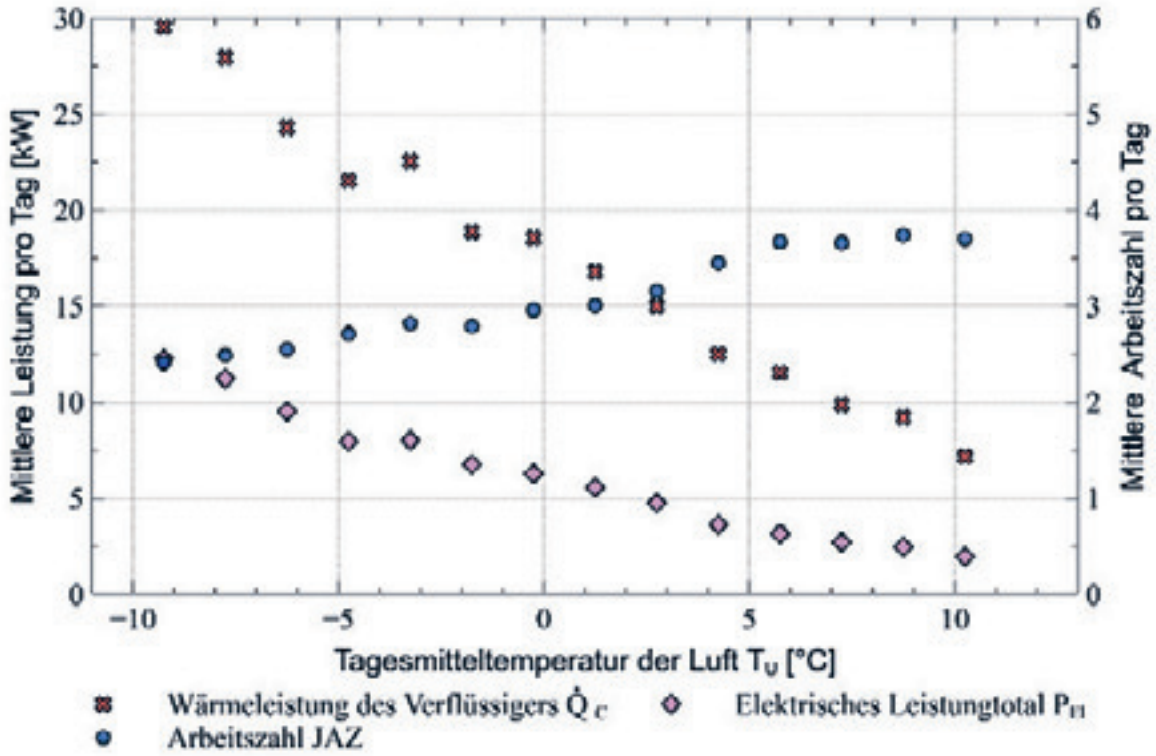


Bild 13: Vergleich der Tagesmittelwerte der Wärmeleistung des Verflüssigers, der gesamten elektrischen Leistung und der gesamten Arbeitszahl, eingeteilt in 1.5 °C BINs

Um den Einfluss der verschiedenen Anteile an der elektrischen Arbeit zu klären, wurde die gesamte elektrische Leistung in die einzelnen Anteile unterteilt (vgl. Bild 14). Daraus können zwei Problematiken erkannt werden: Zum einen ist der Anteil der elektrischen Leistung für die Sekundäraggregate bei höheren Umgebungstemperaturen sehr hoch und zum anderen wird bei niedrigen Umgebungstemperaturen anteilsmässig viel Energie für die Abtauung der Aussen-einheit verwendet.

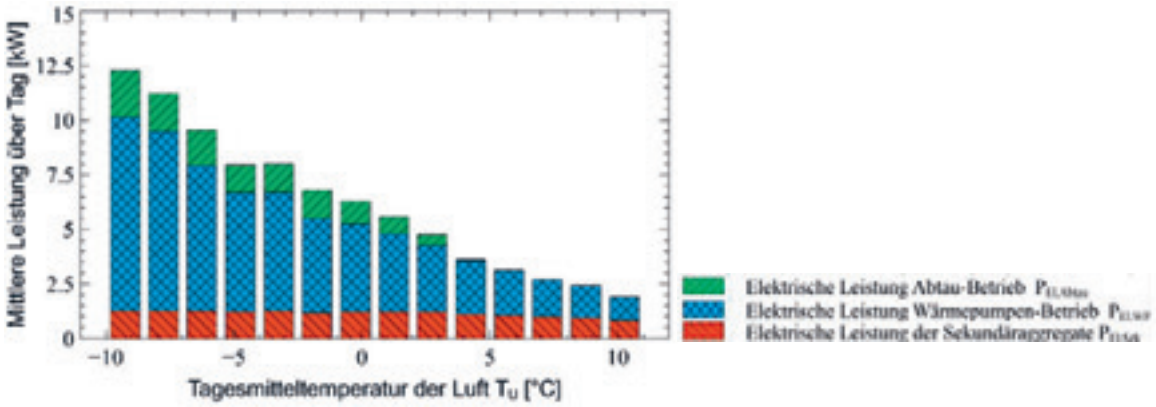


Bild 14: Unterteilung der elektrischen Leistung in Anteile für den Wärmepumpenbetrieb, den Abtaubetrieb und die Sekundäraggregate, eingeteilt in 1.5 °C BINs

Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang, wenn die mittleren Arbeitszahlen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur aufgetragen werden (vgl. Bild 15). Deutlich ist zu erkennen, dass die Arbeitszahl des Gesamtsystems JAZ bei einer Tagesmitteltemperatur > 4 °C von der elektrischen Leistung der Sekundäraggregate dominiert wird. Bei einer Tagesmitteltemperatur von < 0 °C wird die JAZ sowohl durch die Sekundärleistungen wie auch vom Abtaubetrieb beeinflusst. Wird die Häufigkeitsverteilung der Tagemitteltemperaturen betrachtet, zeigt sich jedoch, dass vor allem die elektrische Leistung der Sekundäraggregate und der Abtaubetrieb bei Tagesmitteltemperaturen von -1 °C bis 4 °C die Arbeitszahl negativ beeinflussen.

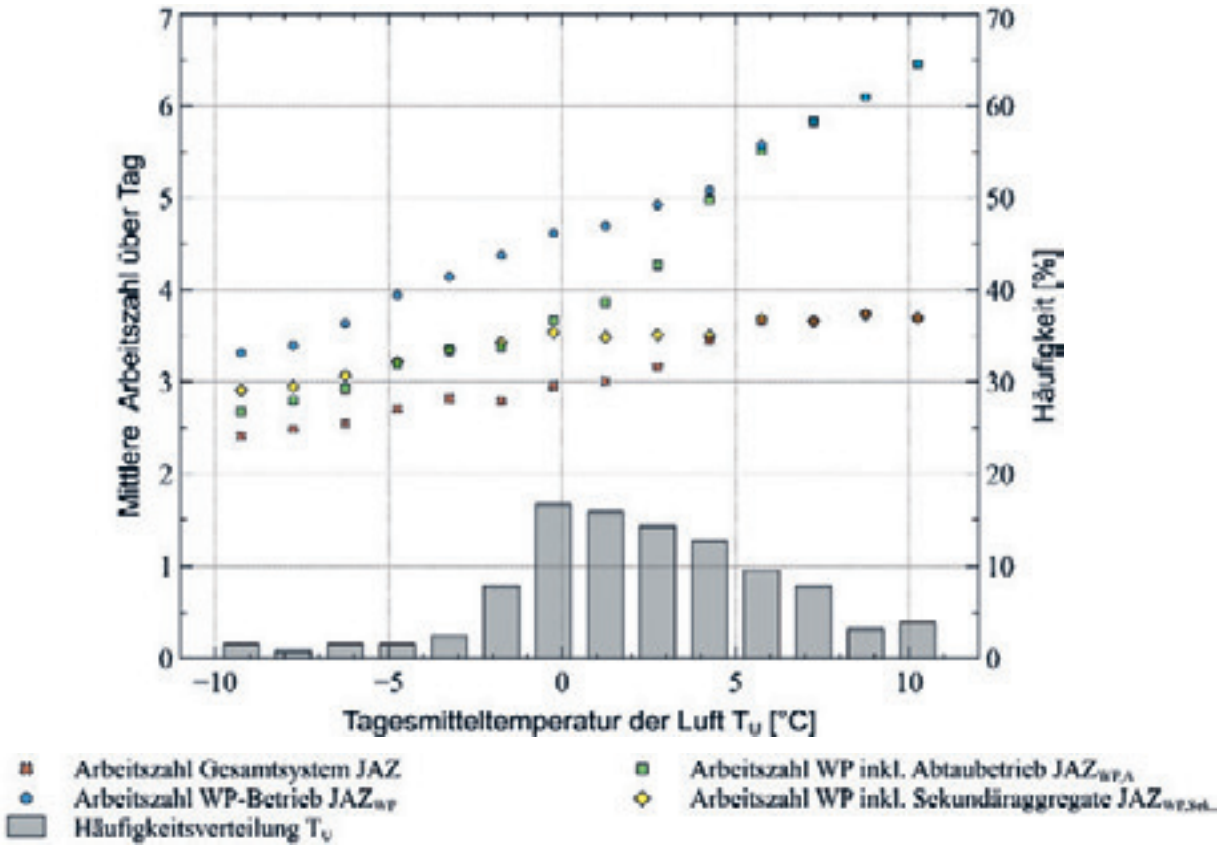


Bild 15: Vergleich der verschiedenen Arbeitszahlen eingeteilt in 1.5 °C BINs

Optimierung der Wärmepumpe und des Gesamtsystems

Im Anschluss an die Heizperiode wird im nächsten Schritt der Wärmepumpenbetrieb optimiert. Aus der Auswertung der Heizperiode können drei Optimierungsmassnahmen abgeleitet werden:

- Senkung der Rücklauftemperatur der Wärmeverteilung.
- Reduktion der Leistungsaufnahme der Sekundäraggregate.
- Optimierung des Abtaubetriebs.

Die Rücklauftemperatur der Wärmeverteilung $T_{C,E}$ liegt im Mittel ca. 3 K – 4 K über dem statischen Auslegepunkt. Dadurch kommen in gewissen Betriebspunkten sehr geringe Temperaturunterschiede zwischen Vor- und Rücklauf zustande, was den Wärmepumpenprozess beeinflusst. Eine Senkung des Temperaturniveaus des Heizungsrücklaufs sollte sich positiv auf die Jahresarbeitszahl des Wärmepumpen-Betriebs auswirken und so auch die gesamte Jahresarbeitszahl verbessern. Um das Temperaturniveau zu senken, wird in einem nächsten Schritt das hydraulische Verhalten sämtlicher Gruppen (Raumheizung, Lüftung Büro und Lüftung WC) sowie der Betrieb des technischen Speichers kontrolliert, um die Ursache der erhöhten Temperatur zu klären.

Der Anteil der elektrischen Leistung, welcher für die Sekundäraggregate aufgewendet wird, verringert die Jahresarbeitszahl beträchtlich. Den grössten Anteil an der Leistungsaufnahme der Sekundäraggregate haben die Lüfter der Ausseneinheit. Die Leistungsaufnahme der Lüfter

kann stufenlos eingestellt werden. Wird die Leistungsaufnahme der Lüfter reduziert, wirkt sich das positiv auf den Stromverbrauch aus. Jedoch wird durch die verminderte Leistungsaufnahme der Lüfter auch die Verdampfungstemperatur absinken, was einen negativen Einfluss auf den Wärmepumpenprozess hat. Da diese zwei Effekte gegenläufig sind, gibt es einen optimalen Betrieb, welcher aber auch vom Betriebspunkt der Wärmepumpe abhängig ist. Die Leistungsaufnahme der Lüfter muss demnach betriebspunktabhängig gesteuert werden, um die Jahresarbeitszahl zu optimieren. Dies sollte im Rahmen der Anlageoptimierung durchgeführt werden.

Das Abtauen der Ausseneinheit wird durch eine Heissgasabtauung realisiert. Vor allem bei Tagesmitteltemperaturen von -1 °C bis 4 °C hat der Abtaubetrieb einen wesentlichen Einfluss auf die gesamte Jahresarbeitszahl, da diese Temperaturen am häufigsten auftreten. Zur Optimierung des Abtaubetriebs werden verschiedene Massnahmen diskutiert. Die offensichtlichste und einfachste Massnahme ist die Optimierung des Zeitpunktes, bei dem eine Abtauung ausgelöst wird. Bei jeder Abtauung wird ein Teil der aufgewendeten Energie für die nicht wirksame Erwärmung der Ausseneinheit verwendet. Dieser Effekt kann durch möglichst seltene Abtauvorgänge minimiert werden. Seltene Abtauvorgänge können jedoch den Wärmepumpenprozess negativ beeinflussen, weil sich eine Eisschicht auf dem Verdampfer auf die Verdampfungstemperatur und die Performance des Luftkühlers auswirkt. Auch diese Effekte sind gegenläufig und müssen unter Berücksichtigung des Betriebs optimiert werden.
Als weitere Massnahme wird abgeklärt, ob die Abtauung durch anfallende Abwärme des Gebäudes realisiert werden könnte. In einem weiteren Schritt werden Konzepte zur Abtauung mit Abwärme erarbeitet und dessen Umsetzbarkeit geprüft. Weiter soll die Abtausteuerung optimiert werden.

Nach erfolgter Optimierungsphase des Wärmepumpenbetriebs wird eine Erfolgskontrolle in der Heizperiode 2018/2019 durchgeführt. Zugleich werden Messwerte der Kühlperiode 2018 aufgenommen und ausgewertet. Aus diesen Auswertungen werden Massnahmen zur Betriebsoptimierung des Kühlbetriebs abgeleitet. Die Kühlperiode 2019 dient wiederum der Erfolgskontrolle.

Der Schlussbericht dieses vom BFE geförderten Pilot- und Demonstrationsprojekt wird Ende 2019 über die BFE-Website (www.bfe.admin.ch) publiziert werden.

Quellen

[1] Richtlinie 94/9/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 23.März.1994.

[2] Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 16. Dezember 1999.

[3] SN EN 378-1:2017-05: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien, 2017

[4] SN EN 378-3:2017-05: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen, 2017

[5] VDMA 24247-8: Energieeffizienz von Kälteanlagen Teil 8: Komponenten Wärmeübertrager, 2011.

Bernard, Thissen, Energie Solaire S.A.
Directeur commercial
Emile Martin, Perenzia Ingénieurs Sàrl
Ingénieur

Systèmes de pompes à chaleur couplées à des capteurs solaires non-vitrés

Resumée

Habituellement les installations solaires thermiques sont installées en parallèle avec des pompes à chaleur (PAC) sans interaction directe. Pourtant le couplage de ces deux producteurs de chaleur est intéressant afin d'optimiser l'utilisation d'énergies renouvelables et la performance des systèmes de chauffage à un prix raisonnable. Ce document traite le couplage de PACs avec des capteurs solaires sélectifs non-vitrés, en particulier en combinaison avec des stocks à changement de phase (eau/glace).

Zusammenfassung

Thermische Solaranlagen werden in der Regel ohne regeltechnische Verbindung parallel zu Wärmepumpen in Heizungssystemen eingebaut. Die Kopplung von Solarthermie mit Wärmepumpen ist interessant, um die Nutzung von erneuerbaren Energien und die Leistung zu einem wirtschaftlichen Preis zu optimieren. In diesem Bericht wird die Kopplung von Wärmepumpen mit unverglasten selektiven Solarkollektoren und speziell mit Eisspeichern beschrieben.

Capteurs sélectifs non-vitrés

Une des spécialités de l'entreprise Energie Solaire SA est la fabrication de capteurs sélectifs non-vitrés à géométrie de coussins. Ils sont constitués de 2 fines plaques en acier inoxydable dans lesquelles des motifs quadratiques sont emboutis et qui sont soudées de telle manière à ce que l'irrigation de la surface de l'absorbeur soit maximale (98% de la surface irriguée). Ce concept est fondamentalement différent des absorbeurs à serpentins conventionnels.

Sur un capteur solaire sans vitrage la totalité du rayonnement solaire atteint la surface de l'absorbeur où il est transformé en chaleur. Ceci en fait le meilleur capteur solaire quand l'écart de températures avec la température ambiante est faible (rendement maximal : 95%). Dans un système de chauffage combinant énergie solaire et pompe à chaleur, ces capteurs fonctionnent essentiellement comme source d'énergie pour la pompe à chaleur pendant l'hiver. Pendant l'été ils permettent d'atteindre des températures bien plus élevées de sorte à assurer la production d'eau chaude sanitaire. Leur courbe de rendement est illustrée en comparaison avec celle de capteurs plans vitrés et capteurs hybrides (photovoltaïque-thermique) dans le graphique ci-dessous.

Figure 1: capteur sans vitrage (détail)

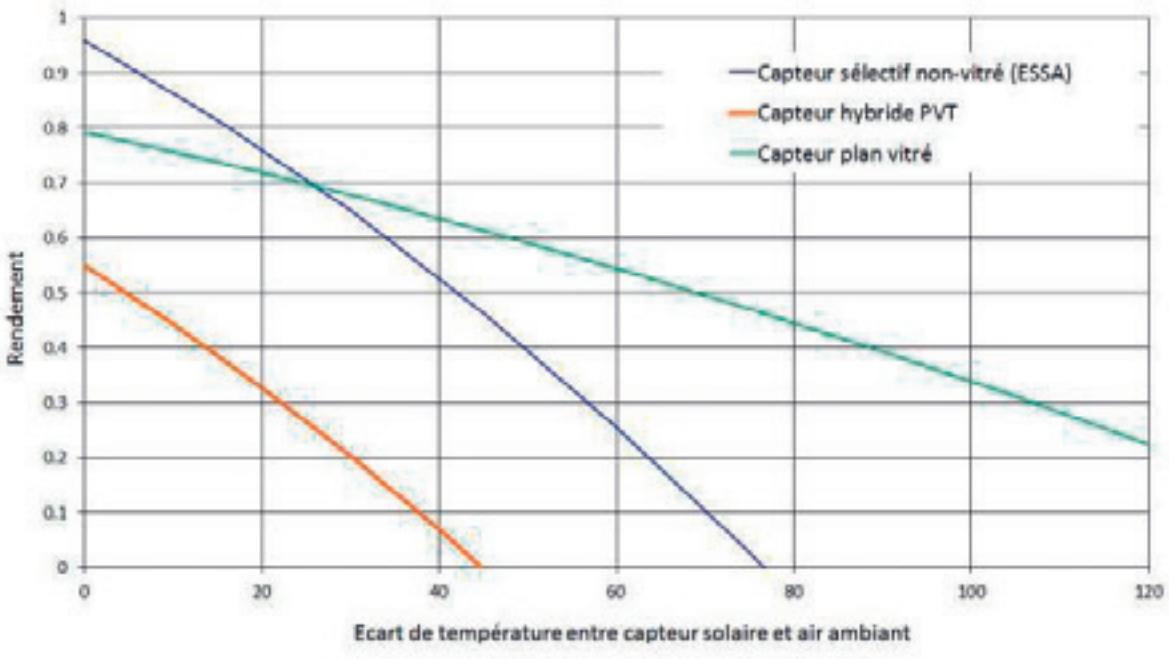


Figure 2: Rendement thermique de panneaux solaires en fonction de l'écart de température entre les panneaux solaires et la température ambiante

Dans un système de chauffage combinant énergie solaire et pompe à chaleur, ces capteurs fonctionnent essentiellement comme source d'énergie pour la pompe à chaleur pendant l'hiver. Pendant l'été ils permettent d'atteindre des températures bien plus élevées de sorte à assurer la production d'eau chaude sanitaire.
Grâce à l'absence de vitrage le capteur non vitré fonctionne aussi comme échangeur sur l'air ambiant, ce qui est intéressant notamment quand le capteur solaire est la source primaire d'énergie pour une pompe à chaleur. Ils peuvent ainsi amener de la chaleur 24 h par jour, même la nuit. Le coefficient spécifique d'échange des capteurs varie entre 10 et 30 W/m2.K. Un gain de 100 à 200 W/m2 peut ainsi être atteint.
Utilisé en combinaison avec des pompes à chaleur sa température se situe régulièrement sous le point de rosé. Contrairement à la plupart des autres capteurs solaires la condensation ne l'affecte pas (pas de dégradation d'un isolant ou autres composants ne supportant pas l'humidité).
En combinaison avec des pompes à chaleur des surfaces généreuses de capteurs solaires sont habituellement installées, ce qui fait craindre des situations de surchauffe en été. Etant donné que le capteur non vitré sélectif présente une température de stagnation d'environ 100°C, il ne présente pas de risque de surchauffe, ce qui est un atout majeur. Finalement les capteurs sans vitrage peuvent être installés avec un angle d'inclinaison de seulement 10°, ce qui permet une haute densité de capteurs par m2 de toiture disponible et facilite l'intégration architecturale. La pose de capteurs sur des supports dits « Est-Ouest », comme pour des modules photovoltaïques, est également possible afin d'augmenter encore la densité des capteurs solaires sur les toits.

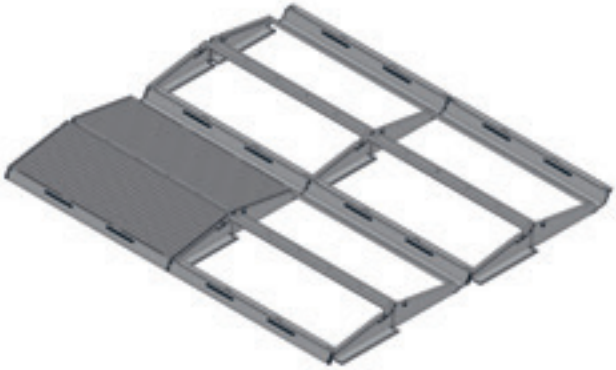


Figure 2: Illustration du système de support Est-Ouest pour des capteurs solaires non-vitrés, inclinaison 10°

EARTHSOL - Combinaison avec pompes à chaleur et géothermie

La combinaison d'une PAC géothermique avec des capteurs solaires permet d'augmenter la performance du système et de prolonger sa longévité.

Il y a plusieurs façons d'intégrer l'énergie solaire à la géothermie :

- « Délestage solaire » de sondes géothermiques. Une installation de préchauffage solaire d'eau chaude pour immeubles (système "Basic", obligatoire dans plusieurs cantons) peut soulager le travail des sondes géothermiques pendant la mauvaise saison. Quand le soleil brille en hiver, les capteurs solaires donnent toute leur énergie à la pompe à chaleur. Les sondes travaillent moins, la pompe à chaleur aussi, ce qui augmente leur durée de vie. Quant à l'énergie solaire, on en tire un profit maximal. L'été, les capteurs produisent l'eau chaude sanitaire. Elle est actuellement surtout appliquée pour des petits immeubles dans la région de Zürich.

- « Rétrofit » : En Suisse, beaucoup de champs de sondes géothermiques ont été sous dimensionnées. La PAC soutire chaque année de l'énergie à la terre, mais la recharge géothermique naturelle du terrain est insuffisante pour compenser la grande quantité d'énergie extraite. Au fil du temps, la température du sol à proximité des sondes diminue, au risque de congeler le terrain et de rendre l'installation géothermique inexploitable. Les capteurs solaires non vitrés sont une solution pour résoudre ce problème. Ils permettent de fournir un complément d'énergie à la PAC en hiver et d'injecter de l'énergie en été dans le terrain pour le stabiliser. La durée de vie et la performance du système de chauffage sont largement améliorées.
- Le solaire remplace une partie des sondes géothermiques (immeubles d'habitations et grands bâtiments sans géo-cooling). Dans certaines villes de Suisse la densité de sondes géothermiques devient importante et une interaction de sondes d'installations voisines devient inévitable. Avec l'apport de l'énergie solaire, il est possible de réduire le nombre de sondes géothermiques nécessaires. La chaleur fournie par les capteurs solaires permet de régénérer les sondes et d'éviter un rafraichissement du champ de sondes d'année en année. Le champ de sondes géothermiques devient en quelque sorte un stockage saisonnier d'énergie solaire à basse température.

Les capteurs sélectifs non-vitrés ont prouvé leur efficacité pour ce type d'application depuis de nombreuses années. Des apports solaires de 850 kWh/m2.an ont été enregistrés.

ICESOL - Combinaison avec pompes à chaleur et stocks à changement de phase eau glace

En zone urbaine il n'est pas toujours possible d'effectuer de forages pour des sondes géothermiques couplées à des pompes à chaleur. Les pompes à chaleur air/eau sont une alternative certes meilleur marché, mais à la performance moindre. Leur plage de puissance est cependant limitée ce qui empêche leur utilisation dans certains gros projets immobiliers. Des législations en matière d'impact sonore limitent également leur champ d'application.
Le système de chauffage ICESOL est un système relativement récent et qui présente une alternative intéressante :

1. Performance similaire à une pompe à chaleur couplée à de la géothermie
2. Pas d'impact sonore
3. Intégration facile des composants de l'installation
4. Pas d'appauvrissement énergétique de l'environnement

L'inconvénient principal réside dans la grande surface de toiture nécessaire pour y disposer les capteurs (voir règles de dimensionnement ci-dessous) qui si elle est insuffisant, peut limiter la puissance de la production de chaleur. Le cas échéant, un système bivalent peut être adapté en couplant le système ICESOL à un appoint électrique ou à gaz qui complète la production de chaleur lorsque les conditions météo sont trop défavorables.
Bien que novateur, il intègre des composants éprouvés depuis de nombreuses années dans le domaine du chauffage. Le caractère novateur réside dans la combinaison des différents composants. ICESOL a déjà prouvé son efficacité. Le système se décline en trois éléments : une pompe à chaleur saumure/eau, des capteurs sélectifs non vitrés et un accumulateur à changement de phase (eau/glace).
Principe de fonctionnement : L'énergie solaire thermique couvre une partie importante des besoins en eau chaude hors période de chauffage. Pendant les autres six mois de l'année les

panneaux solaires, le stock à changement de phase et la pompe à chaleur fonctionnent de concert pour assurer le confort dans le bâtiment. En automne, en mi-saison ou même en hiver, lorsque l'ensoleillement est conséquent, l'énergie solaire est captée à un niveau de température suffisant pour permettre son utilisation en direct pour le chauffage voire pour l'eau chaude sanitaire. Si le niveau de température de retour du champ de capteurs solaires n'est pas suffisant (< 20°C), l'énergie captée est dirigée vers le stock à changement de phase et l'évaporateur de la PAC. La pompe à chaleur élève la température, par le biais du compresseur, à celle nécessaire pour les besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Les capteurs solaires thermiques sont ainsi utilisés dans une plage de températures nettement plus large qu'une installation solaire classique. Les apports solaires sont maximaux.
Il est également possible de combiner le système ICESOL avec des capteurs hybrides (photovoltaïques + thermiques) au lieu des capteurs solaires non-vitrés. Cette combinaison est intéressante quand l'espace en toiture est limitée et qu'il est souhaité de générer de l'électricité « verte ». Cette solution est économiquement avantageuse.

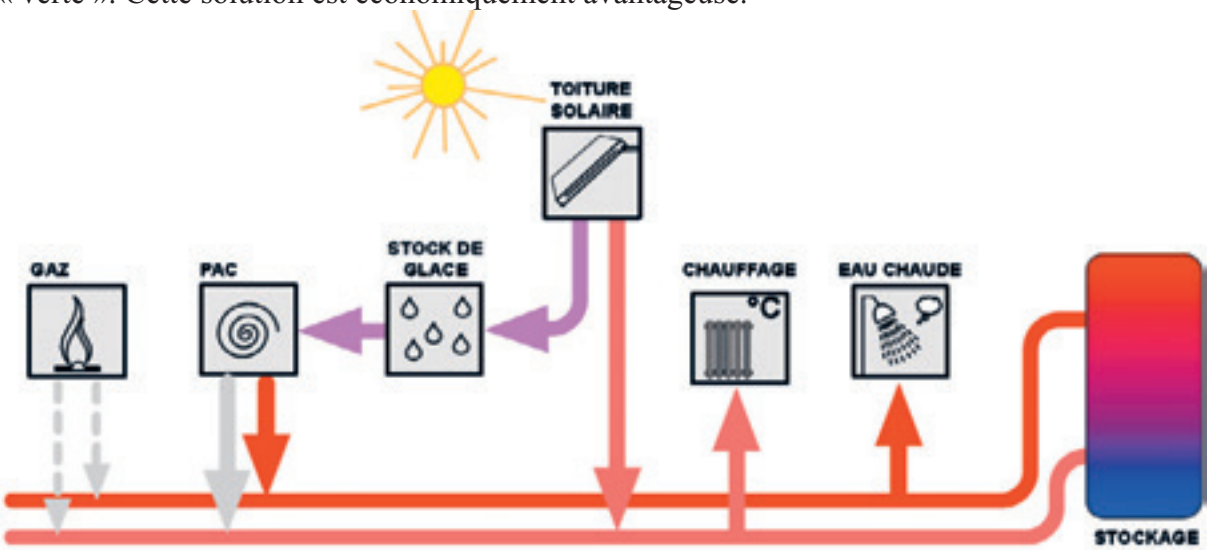


Image 2: Schéma avec principe de fonctionnement du système ICESOL

<u>Quelques règles de dimensionnement préliminaires d'un système « IceSol »</u> (pour des constructions respectant idéalement les valeurs cibles des normes SIA 380/1 sont les suivantes) :

Puissance de la PAC en B0W35 (kWpac)	1.3 x Puissance de chauffage à fournir	Prise en compte de la baisse de puissance lorsque la source chute en température.
Limites de fonctionnement de la PAC	B-9W45, B-5W55, B18W55	
Surface de capteurs solaires sans vitrage	3.0 à 4.0 m^2/kW_{pac}	Inclinaison minimale 20° Orientation Sud +/- 45°
Volume latent du stock à changement de phase	0.1 à 0.15 m^3/kW_{pac}	Env. 75% du volume brut
Surface d'échange stock à changement de phase	1.0 à 1.5 m^2/kW_{pac}	Epaisseur de glace 3 à 5 cm

Expérience du projet de rénovation « La Cigale » (GE) – projet Phare ayant obtenu un soutien de l'Office Fédéral de l'Energie

Le projet La Cigale est la plus grande rénovation Minergie-P en Suisse avec une surface de référence énergétique de l'ordre de 19'000 m2 pour une puissance PAC installée de 500kW (répartie sur 2 chaufferies). Le premier volet important du projet était l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment afin de répondre aux exigences primaires du label Minergie-P. Le deuxième volet concernait la mise en place du système de chauffage novateur ICESOL.
Voici quelques données clés du projet :

LA CIGALE	**Bâtiment « Vermont »**	**Bâtiment « Vidollet »**
Surface de Référence Energétique	7 343 m2	11 656 m2
Surface de capteurs solaires	649 m2	1 091 m2
Puissance PAC (B0/W35)	200 kW	300 kW
Volume stock de glace	30 m3	30 m3
Puissance chaudière gaz de secours	130 kW	200 kW
Distribution de chaleur	Anciens radiateurs	Anciens radiateurs

Grâce au volume réduit des stocks de glace (2 x 30m3) il a été possible d'intégrer le système dans les chaufferies existantes. Les stocks de glace ont été installés dans les locaux anciennement occupées par les citernes à mazout.

Résultats de la 2ème année de suivi dans le cadre du projet phare soutenu par l'OFEN pour le bâtiment Vermont :

	Avant rénovation	Objectif MINERGIE-P	Mesuré
Température dans les habitations		20°C	21.8 – 24.5°C
Consommation d'eau chaude san.		53 l/j	Vermont: 95 l/j Vidollet: 72 l/j
Consommation d'énergie finale (chauffage & ECS)	147 kWh/m2.an	38.2 kWh/m2.an	66.3 kWh/m2.an
COP Système (auxiliaires n.c.)	-	4.4	3.9

Les consommations relevées sont nettement supérieures aux objectifs du label Minergie-P. Malgré cette consommation plus élevée que l'objectif Minergie-P, la fraction annuelle d'énergie renouvelable (rapport entre ressources renouvelables et ressources totales mobilisées) s'élève à 93%, en tenant compte que l'électricité utilisée par le système est labélisée d'origine renouvelable. Ceci est un excellent résultat.

Prix de revient comparatif de la chaleur : ICESOL en comparaison avec un système de chauffage comprenant une chaudière à gaz & de l'énergie solaire thermique pour le pré-chauffage d'eau chaude sanitaire.

	IceSol	Chaudière à gaz + solaire thermique
SRE Bâtiments La Cigale (m2)	19'000 m2	19'000 m2
Consommation chauffage (kWh/m2.an)	32.5 kWh/m2.an	32.5 kWh/m2.an
Consommation ECS (kWh/m2.an)	33.8 kWh/m2.an	33.8 kWh/m2.an
Consommation électricité (kWh/an)	364'800 kWh/an	50'342 kWh/an
Consommation gaz (kWh/an)	98'800 kWh/an	1'185'600 kWh/an
Investissement chaufferie + distribution chaufferie (CHF)	1'830'600 CHF	1'065'000 CHF
Prix par kWh (CH/kWh)*	0.189 CHF/kWh	0.192 CHF/kWh

*) Durée d'amortissement 25 ans ; prix gaz Vital Biogaz (y compris abonnement, taxe CO2, taxe puissance) = 0.12 CHF/kWh (pour le système gaz + solaire), 0.16 CHF/kWh (pour le système ICESOL) ; prix électricité Vital Vert 100% renouvelable = 0.22 CHF/kWh ; Indexation du prix de l'électricité & du gaz incl. ; frais de maintenance incl.

Le projet de La Cigale montre qu'on obtient un prix du kWh compétitif par rapport aux systèmes de chauffage classiques, mais avec une part d'énergies renouvelables importante.

Le projet de rénovation La Cigale : un bâtiment exemplaire pour le parc immobilier existant en Suisse

Mettons le projet de rénovation Minergie P de la Cigale dans le contexte du parc de bâtiments de logements en Suisse. 45% des bâtiments de logements sont dans le même cas que la Cigale avant la rénovation. Si les propriétaires de ces bâtiments suivent la même démarche que la coopérative de la Cigale un équivalent de 21'000 GWh/an pourrait être économisé qui représente la production annuelle de presque 3 centrale nucléaire type Gösgen. Comme la majorité de ces bâtiments sont chauffés au mazout, cette économie est égale à 2.1 milliard d'importation par année de ce hydro-carburant. Il y a encore du travail sur la planche !

Combinaison avec pompes à chaleur, stocks à changement de phase (eau / glace) & récupération de chaleur sur une ventilation simple flux

La récupération d'énergie sur des rejets de chaleur est de plus en plus pratiquée dans les projets immobiliers : récupération de chaleur sur l'air vicié d'installation de ventilation (obligatoire dans certains cantons), récupération de chaleur sur les eaux grises, …

ICESOL propose l'intégration de la récupération de chaleur sur l'air vicié d'installations de ventilation simple flux comme source d'énergie pour régénérer les stocks à changement de phase. En hiver et à l'intersaison, la température le stock de glace se trouve en dessous de l'air intérieur du bâtiment (21°C), le potentiel de récupération d'énergie sur l'air vicié est alors

important. Les premières installations ICESOL qui incluent cette récupération d'énergie sont à présent en service.

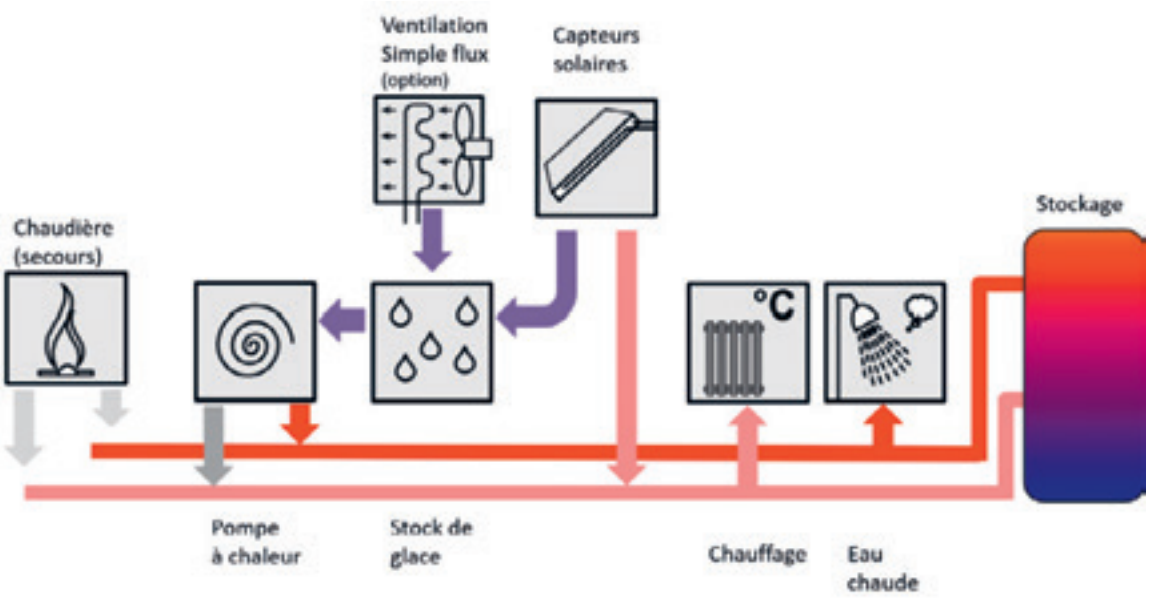


Image 2 : Schéma avec principe de fonctionnement du système ICESOL incluant la récupération de chaleur sur un système de ventilation simple flux.

Dans le cadre d'un projet Pilote + Démonstration Velours 22, qui reçoit le soutien de l'Office Fédéral de l'Energie, des mesures sont réalisées afin de vérifier la pertinence de ce système. Nous avons comparé la récupération de chaleur sur la ventilation dans le système ICESOL avec d'autres systèmes de valorisation de l'air vicié.

Voici un comparatif succinct de la performance récupération de chaleur par SRE (Surface de Référence Energétique) :

Système ICESOL – mesure 1ère année	42MJ/m².an
Système ICESOL – calcul théorique après optimisation *)	74MJ/m².an
Récupération de chaleur mesurée sur une ventilation double flux **)	54MJ/m².an
Récupération de chaleur mesurée sur une ventilation à double-flux combinée à une pompe à chaleur intégrée**)	77MJ/m².an
Production d'eau chaude sanitaire par PAC sur air extrait théroique ***)	51MJ/m².an

*) suite à une première année d'exploitation nous avons entrepris des améliorations au niveau du raccordement hydraulique de la récupération de chaleur ainsi que la régulation. Débit d'air théorique = 0.7m³/h.m²
**) Débit d'air = 0.7 m³/h.m² (Source : Etude de l'université de Genève *Suivi énergétique du bâtiment 40-42 de l'avenue du Gros-Chêne à Onex (GE), rénové selon le standard MINERGIE)*
***) débit d'air = 1.1 m³/h.m², valorisation de la chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire, volume stock 1L/ m² (source : Etude de l'université de Genève *Estimation du potentiel de systèmes utilisant des pompes à chaleur comme alternative aux double-flux*)

Le suivi énergétique du projet Velours 22 est encore en cours et la performance mesurée de la récupération de chaleur ainsi que du coefficient de performance du système global ICESOL ne sont pas vérifiés pour l'instant. Les calculs théoriques semblent montrer des performances de récupération de chaleur sur l'air extrait comparables aux autres systèmes existants sur le marché.

Résumé des avantages du système ICESOL

- Solution intéressante lorsque la pose d'une PAC géothermique est impossible : zone urbaine (manque de place), zones à interdiction de forages, sol non propice, etc.
- Silencieux, contrairement aux pompes à chaleur air / eau.
- Pas besoin d'autorisations contrairement aux pompes à chaleur à sondes géothermiques
- Stock de glace: faible encombrement
- Exploitation maximale de l'énergie solaire thermique, également dans la plage de basse température (<-20°C) habituellement non utilisables.
- Exploitation idéale des capteurs solaires tout au long de l'année sans risques de surchauffe
- Exploitation de rejets de chaleur basse température (0 à 20°C) en complément aux capteurs solaires thermiques : eaux usées, eaux grises, rejets de chaleur industrielle, récupération sur ventilation simple flux, etc.
- COP annuel élevé: 4,0 à 5,0.
- Utilisation de la pompe à chaleur essentiellement lors de la période de chauffage.
- Bonne rentabilité et faibles coûts d'entretien.
- Possibilité également de coupler le système ICESOL avec des capteurs solaires hybrides (photovoltaïques + thermiques).
- Indépendance des ressources d'énergie non-renouvelables, haute réduction des émissions de CO2.

Résumé des inconvénients du système ICESOL

- Place nécessaire en toiture pouvant être limitante

Mario, Roost, Lemon Consult AG
Meta Lehmann, econcept
Bernd Sitzmann, Energie Zukunft Schweiz

Performance Gap von Wärmepumpen in MFH: Potenzial einer Betriebsoptimierung und der Einfluss der Legionellenschaltung

Zusammenfassung

Wie gross ist das Einsparpotenzial von Betriebsoptimierungen bei Mehrfamilienhäusern und wirkt sich die Legionellenschaltung auf den Endenergieverbrauch aus? Diese und weitere Fragen waren Gegenstand der Untersuchung von 81 Mehrfamilienhäusern, bei welchen die Raumwärme und das Warmwasser über eine Wärmepumpe bereitgestellt werden.
Die Resultate zeigen, dass 25% der untersuchten Anlagen heute optimal betrieben werden. Hingegen verfügen 17% der Anlagen über ein Einsparpotenzial von mehr als 20%. Der Median liegt bei 14%. Je nach Legionellenschaltung beträgt der Mehrverbrauch an Endenergie zur Bereitstellung des Warmwassers bis zu 140%.
Als Ursache für das Einsparpotenzial wurden hauptsächlich zu hoch eingestellte Heizgrenzen und Heizkurven identifiziert. Vereinzelt wurden auch überhöhte Temperaturen der Elektroheizstäbe angetroffen.
Das fehlende Wissen des Anlagenbetreuers, Unklarheiten betreffend Zuständigkeiten oder konservative Einstellungen durch den Servicetechniker, wurden in weiterführenden Untersuchungen als Ursache für die aktuellen Einstellungen bestätigt. Aus den Erkenntnissen wurden Massnahmen, wie z.B. die Aktivierung der Hauswarte/innen abgeleitet.

Resumée

Quel potentiel d'économie d'énergie présente l'optimisation en exploitation des lotissements résidentiels? Quelle est l'influence de la désinfection anti-légionelle sur la consommation d'énergie finale? Ces questions ont conduit à l'analyse de 81 lotissements résidentiels équipés de pompe à chaleur pour la production de chauffage et d'eau chaude sanitaire.
Les résultats montrent que 25% des installations sont exploitées de façon optimale. En revanche 17% des installations présentent un potentiel d'économie d'énergie supérieur à 20%. Le potentiel médian se situe vers 14%. Suivant le réglage de la désinfection anti-légionelle, la surconsommation d'énergie finale pour l'eau chaude atteint 140%.
Le potentiel d'économie réside essentiellement dans le réglage des limites de températures extérieures de chauffage et des courbes de chauffe. Des températures de consigne de désinfection anti-légionelle élevées ont pû être constatées.
Le manque de connaissances et d'implication des responsables techniques et les réglages effectués lors des maintenances, expliquent en partie les réglages relevés. Ce constat a permis de définir des mesures comme la sensibilisation des responsables techniques.

Ausgangslage

Aus der Studie «Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015» von Reimann et al. 2016 zeigt sich unter anderem, dass neue Mehrfamilienhäuser (MFH) im Betrieb deutlich mehr Energie verbrauchen als in der Planung berechnet wurde.

Beobachtungen im Rahmen der Studie legen die Vermutung nahe, dass konservative Einstellungen von Heizungsregelung, Elektroheizstäben und Warmhaltebändern wesentlich zum "Performance Gap" bei Mehrfamilienhäusern beitragen. Neben dem viel zitierten Nutzereffekt (Fensterlüftung, Sonnenschutz im Winter, Warmwasserverbrauch) kommt bei Mehrfamilienhäusern somit der «Betreibereffekt» als Ursache für einen überhöhten Energieverbrauch hinzu.

Langjährige Erfahrungen mit Betriebsoptimierungen und Heizungschecks zeigen, dass Anlagenbetreiber mit der Bedienung von Wärmepumpenanlagen (WP) überfordert sind und die Einstellungen den Servicefirmen überlassen. Da die Bearbeitung von Reklamationen einen Mehraufwand generiert, werden viele Anlagen konservativ eingestellt und betrieben. Mit negativen Auswirkungen auf die Energieeffizienz.

Bedeutende Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Wärmepumpenanlagen haben auch die steigenden Anforderungen an den Legionellenschutz. Während lange eine wöchentliche Desinfektion von Speicher und Zirkulation üblich war, werden seit einigen Jahren vom Bundesamt für Gesundheit BAG und in der SIA-Norm 385/1:2011 bei Mehrfamilienhäusern eine tägliche Desinfektion während einer Stunde bei Temperaturen von mindestens 60°C gefordert. Aktuell steht bei der Revision der SIA-Norm zudem eine stetige Warmwassertemperatur am Ausgang des Warmwasserspeichers von 60 °C zur Diskussison.

Wärmepumpen sind momentan die zentrale Technologie um fossile Energieträger zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmasser zu substituieren. Werden die immer zahlreicheren Wärmepumpen jedoch ineffizient betrieben, besteht die Gefahr, dass sie ihren zugedachten Beitrag an die Energiestrategie 2050 nur bedingt leisten können.

Die Studie wurde vom Bundesamt für Energie, Sektion Energieforschung, dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, dem Stromsparfonds der ewz, der AEK Onyx AG, dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt, dem Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft und der Energiefachstelle des Kantons Solothurn finanziert.

Zielsetzung

Die Studie verfolgt unter anderem folgende Ziele:

- Analyse der Bedeutung von Heizungs- und Warmwasser-Einstellungen sowie die Auswirkungen des Legionellenschutzes auf den Endenergieverbrauch der Wärmepumpe und deren Zusatzaggregate (Elektroheizstab u. ä.) bei MFH
- Ermittlung des Einsparpotenzials

Folgende Fragen sollen dazu beantwortet werden:

- Frage 1: Wie hoch ist der Anteil von MFH mit Wärmepumpen mit ineffizienten Einstellungen der Wärmepumpe und der Zusatzaggregate?

- Frage 2: Welches energetische Einsparpotenzial geht von optimierten Einstellungen unter Einhaltung der objektspezifischen Anforderungen an Komfort und Legionellenschutz aus?

- Frage 3: Welchen Einfluss hat die Art (Elektroheizstab oder Wärmepumpe) und Häufigkeit der Legionellenschaltung auf die Anlageneffizienz.

Nicht behandelt werden in der Studie die Beiträge von Planungsfehlern (z.B. hydraulische Schaltung, Dimensionierung der Komponenten) und des Nutzerverhaltens (Raumtemperatur, Lüftungsverhalten, Einsatz des Sonnenschutzes, Warmwasserverbrauch) zum Performance Gap von MFH.

Neben den oben genannten Zielen und Fragestellungen befasst sich die Studie auch mit weiterführenden Fragen betreffend der Ursache der vorgefundenen Einstellungen, Schwierigkeiten der Betreiber und Lösungsmöglichkeiten zur Schaffung von Rahmenbedingungen, die einen effizienten Betrieb von Wärmepumpenanlagen fördern. Einige Erkentnisse werden im Kapitel "Schlussfolgerung" kurz erwähnt. Weiterführende Informationen sind dem Schlussbericht zu entnehmen (erscheint im dritten Quartal 2018).

Grundlagen & Methodik

Systemgrenzen

Bisherige Untersuchungen betreffend Effizienz von Wärmepumpenanlagen und auch Grenzwerte im Vollzug (Kantone und Minergie) basieren meist auf der Systemgrenze der Jahresarbeitszahl 2 (JAZ 2) gemäss Erb et al. 2004. Die JAZ 2 hat den Nachteil, dass sich diverse Energieeinträge oder Verluste ausserhalb der Systemgrenzen befinden und somit die Effizienz der Anlage auf Stufe Endenergie nicht komplett abgebildet wird (siehe Abbildung 1).

Für die vorliegende Studie wurde daher die Systemgrenze der JAZ 4 definiert. Sie ist umfassender als die JAZ 2 und berücksichtigt zusätzlich auch die Verteil- und Warmhalteverluste sowie den Energieeintrag ins Warmwassersystem durch den Elektroheizeinsatz.

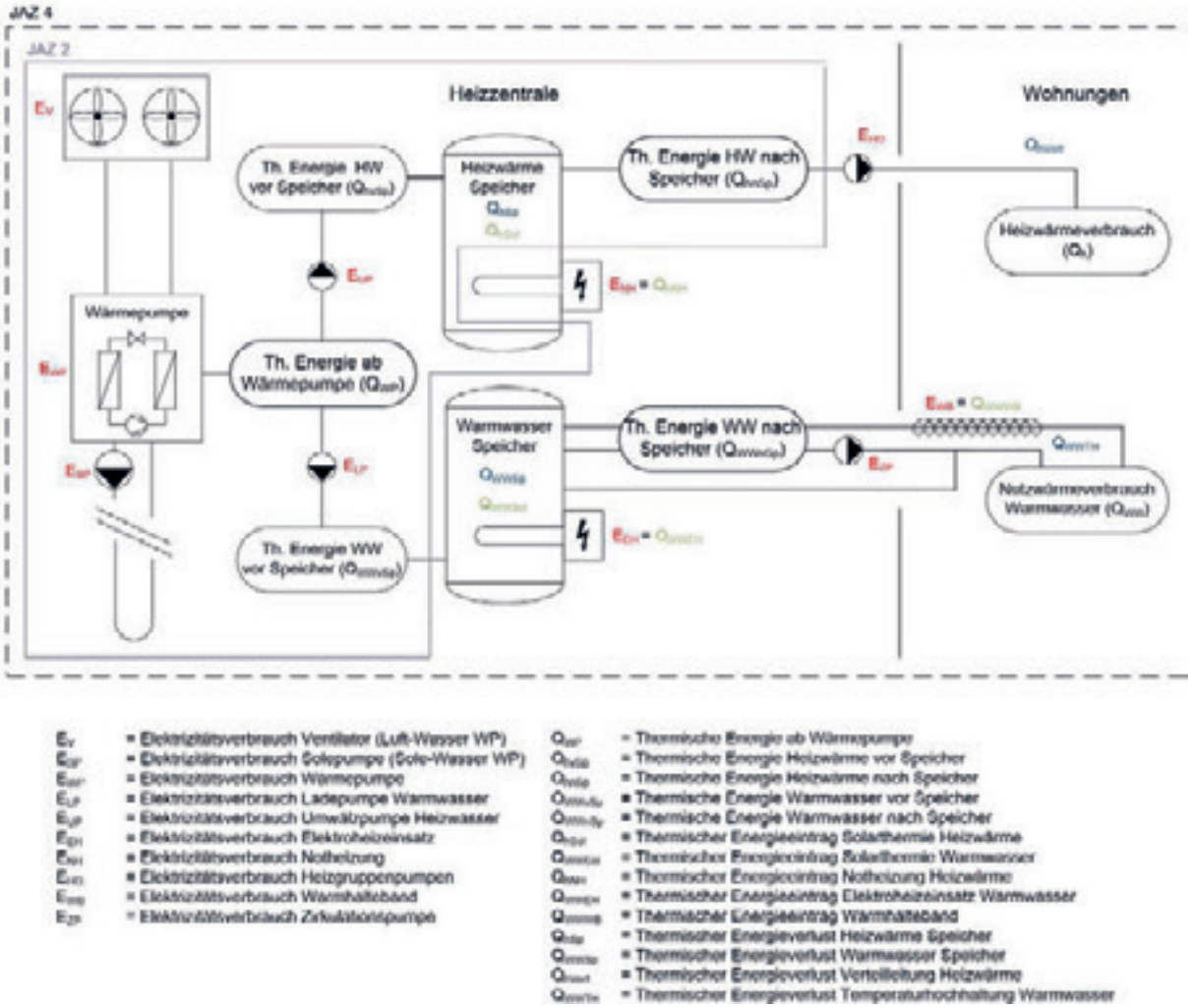


Abbildung 1: Systemgrenzen zur Berechnung der JAZ 1, 2, 3 und 4. Es wird JAZ 4 verwendet Quelle: Erb et al. 2004

Erhebung der Grundlagendaten

Bei 81 Mehrfamilienhäusern in der Stadt Zürich sowie in den Kantonen Basel-Stadt, Basel-Landschaft und im Kanton Solothurn wurde, eine Objektbegehung durchgeführt.

Dabei wurden die aktuellen Anlagenparameter, Gebäudedaten und wo vorhanden Energieverbräuche (Elektrizität & Wärme) mit Hilfe eines Erfassungstools erhoben. Die Anlagenparameter dienen zur Berechnung der Effizienz der Wärmepumpenanlagen. Die Gebäudedaten helfen, die Situation und somit das Optimierungspotenzial einschätzen zu können. Die Energieverbrauchsdaten wurden zur Validierung des Berechnungsmodells verwendet.

Tabelle 1 beinhaltet die eingesetzten Parameter für den Sollwert 1. Dieser stellt die Anlageneffizienz nach einer Optimierung der Wärmeerzeugungsanlage dar. Die Auflistung der Parameter ist nicht abschliessend.

Warmwasser	Sollwert 1
Stetige Warmwasser Temperatur	Wenn Ist-Temperatur >= 55°C, dann Absenken auf 55°C Wenn Ist-Temperatur < 55°C, dann Absenken auf 50°C
Legionellenschaltung (60°C)	Wenn Ist-Temperatur > 60°C, dann Absenken auf 60°C Wenn Ist-Temperatur < 60°C, dann Inaktivieren der Legionellenschaltung
Raumwärme	
Heizkurve	Anpassung der Parameter in Abhängigkeit des Gebäudestandards und des Wärmeabgabesystems (die Mindestwerte der Heizkurve orientieren sich an der MuKEn 2014)
Heizgrenze	

Tabelle 1: Übersicht Parameterwerte Sollwert 1.

Tabelle 2 zeigt die eingesetzten Parameterwerte für die Sollwerte 2 bis 4a/b. In diesen Szenarien wird der Einfluss der Art und Häufigkeit der Legionellenschaltung auf den Endenergieverbrauch der Wärmepumpenanlage untersucht.

Warmwasser	Sollwert 2	Sollwert 3a/b	Sollwert 4a/b
Stetige Warmwasser Temperatur	55°C (100 % mit WP)	3a/b) 50°C (100 % mit WP)	4a) Bis 60°C mit WP 4b) Bis 50°C mit WP, bis 60°C mit Heizeinsatz
Legionellenschaltung (60°C)	Nicht vorhanden	3a) 1 x pro Tag mit WP 3b) 1 x pro Tag mit Heizeinsatz	-
Raumwärme	Gleich wie Sollwert 1		

Tabelle 2: Eingesetzte Parameterwerte der Sollwerte 2 bis 4a/b

Resultate

Die häufigsten Fehleinstellungen und deren Auswirkung auf den Energieverbrauch werden im Folgenden dargestellt.

Fehleinstellungen
Tabelle 3 zeigt die eingestellten Heizgrenzen differenziert nach Fussbodenheizungen, Radiatoren und Gebäudekategorie.

Heizgrenzen in °C bei Fussbodenheizung	**Minimum**	**Median**	**Maximum**	**Anzahl Objekte**
Bei Neubau und Gesamterneuerung	13	17	20	52
Bei Teilerneuerung	16	17	20	5
Bei unsaniert	17	17	18	4
Heizgrenzen in °C bei Radiatorheizung	Minimum	Median	Maximum	Anzahl Objekte
Alle	15	18	35	16

Tabelle 3: Übersicht der eingestellten Heizgrenzen

Es fällt auf, dass der Median der Heizgrenzen, unabhängig von der Gebäudekategorie, bei 17°C liegt. Dies lässt vermuten, dass insbesondere bei den Neubauten oder Gesamterneuerungen eine zu hohe Heizgrenze eingestellt ist. Der geringe Stichprobenumfang bei den Teilerneuerungen und unsanierten Gebäuden ist zu berücksichtigen.

Die Heizkurven von Anlagen mit Fussbodenheizungen sind im Median auf eine Vorlauftemperatur von 38°C bei -8°C Aussentemperatur eingestellt. Der Median bei den Radiatorheizungen liegt bei 51°C. Beide Werte liegen somit knapp über den Grenzwert gemäss MuKEn 2014 (35°C Fussbodenheizung, 50°C Radiatoren)

Vereinzelt wurden zudem falsch eingestellte Elektroheizeinsätze (z.B. 70°C oder Freigabe über Rundsteuersignal und somit Dauerbetrieb am Wochenende) angetroffen.

Beurteilung Anlagenbetrieb

Die untersuchten Objekte wurden anhand der realisierbaren Einsparpotenzials (E-Pot) in Effizienzklassen eingeteilt (Abbildung 2). Die Endenergieeinsparung wurde aus dem Vergleich zwischen den vorgefundenen Einstellungen und den optimalen Anlageparametern für einen energieeffizienten Betrieb (Sollwert 1) ermittelt.

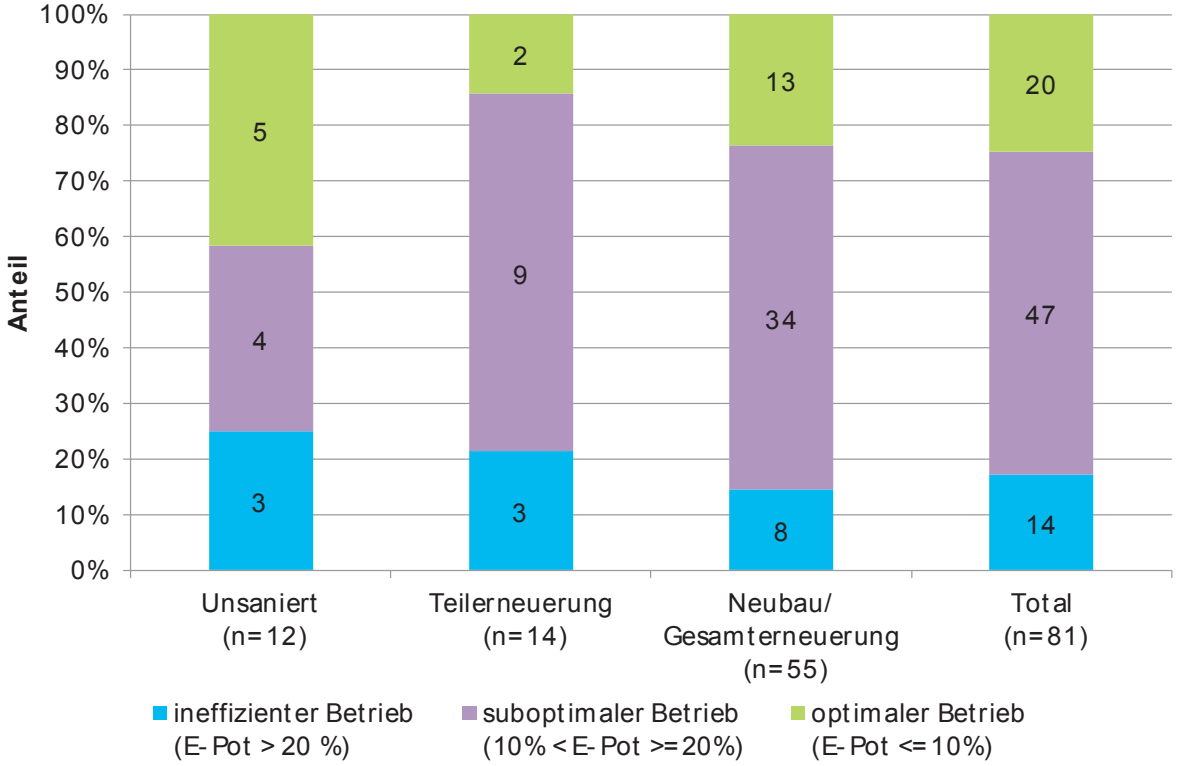


Abbildung 2: Vergleich der Einsparpotenziale nach Gebäudekategorie.

Abbildung 2 zeigt den Anteil der drei Effizienzklassen aufgeteilt auf die verschiedenen Gebäudekategorien. Es ist ersichtlich, dass nur 25 % aller Anlagen über eine optimale Einstellung verfügen. Bei 17 % der Anlagen ist die Betriebsweise ineffizient. Bei den unsanierten Objekten ist der Anteil an optimal betriebenen Anlagen am grössten. Dies mag daran liegen, dass die oft angetroffenen Werkseinstellungen der Wärmepumpen im Falle von unsanierten Gebäuden besser auf die Realität zutreffen als bei den übrigen Anlagen. Zudem haben Optimierungsmassnahmen im Bereich Warmwasser bei unsanierten Gebäuden auf Grund des geringeren Energieanteils des Warmwassers am Gesamtenergieverbrauch einen reduzierten Einfluss.

Von den insgesamt 81 untersuchten Anlagen wurden 29 Anlagen in der Stadt Zürich durch den Stromsparfonds gefördert. Die Förderung bedingte den Einbau eines Wärmezählers und die Kontrolle der Anlage nach einem Betriebsjahr durch einen Experten der Elektrizitätswerke Zürich (ewz). Von den 29 geförderten Anlagen wird nur eine Wärmepumpe (3.5%) ineffizient betrieben. Im Vergleich dazu beträgt der Anteil der ineffizienten Anlagen im verbleibenden Anlagensample 25 %. Dieses Ergebnis illustriert, wie wirksam die Kontrolle der Betriebsweise von Anlagen ist. Gerade bei subventionierten Anlagen lässt sich dies über die Festlegung der Förderbedingungen umsetzen.

Einsparpotenzial Raumwärme und Warmwasser (Sollwert 1)

In Abbildung 3 ist das mit den optimierten Betriebsparametern (Sollwert 1) erreichbare Einsparpotenzial des Endenergieverbrauchs in Bezug auf Raumwärme und Warmwasser aufgezeigt. Die angezeigten Werte beziehen sich auf den Median der relativen Endenergieeinsparung über alle untersuchten Objekte (81 Anlagen).

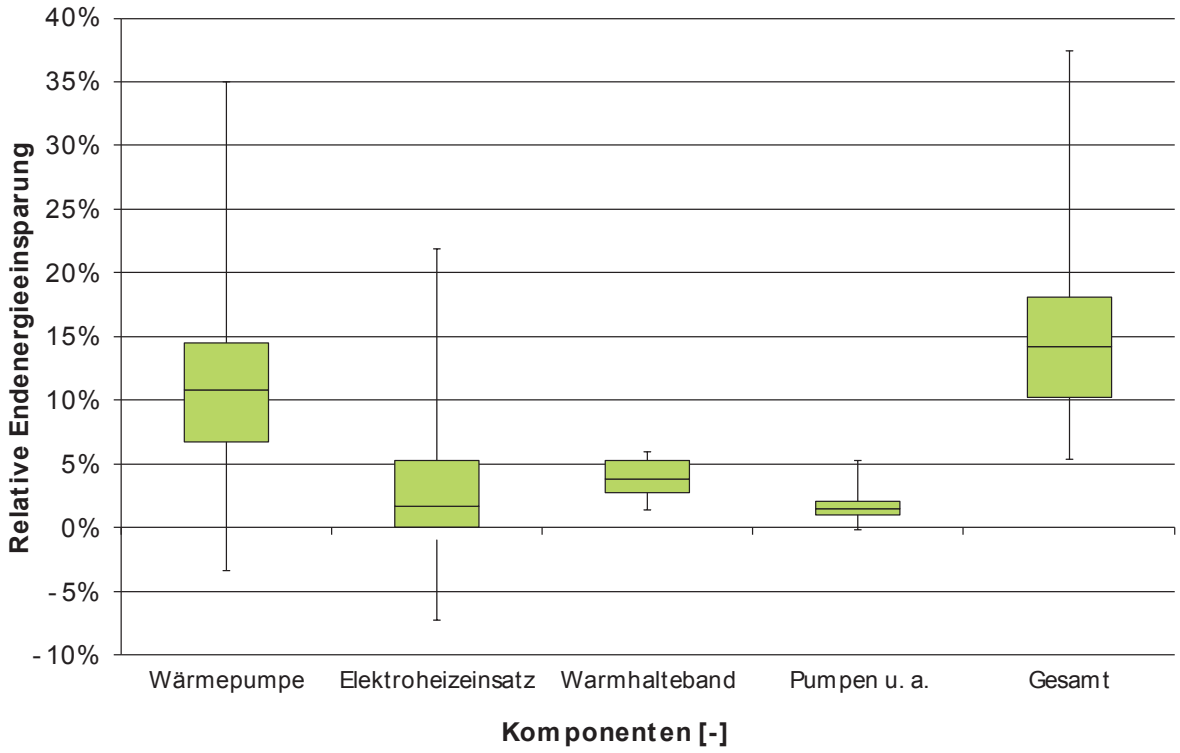


Abbildung 3: Verteilung des Effizienzpotenzials auf die verschiedenen Verbraucher

Der Median der Energieeinsparung über alle untersuchten Objekte liegt bei 14% (Mittelwert 14.6%). Eine mögliche Ursache für diesen Wert sind die eher konservativen Werte der Optimierungsparameter, die sich an den Auslegungstemperaturen der MuKEn 2014 orientieren. Deutlich sichtbar wird der grosse Einfluss des Elektroheizeinsatzes. Die teilweise negativen Einsparungen (Mehrverbrauch nach Optimierung) bei einzelnen Anlagen sind ein Ergebnis aus Zusammenspiel zwischen Wärmepumpe und Elektroheizeinsatz.

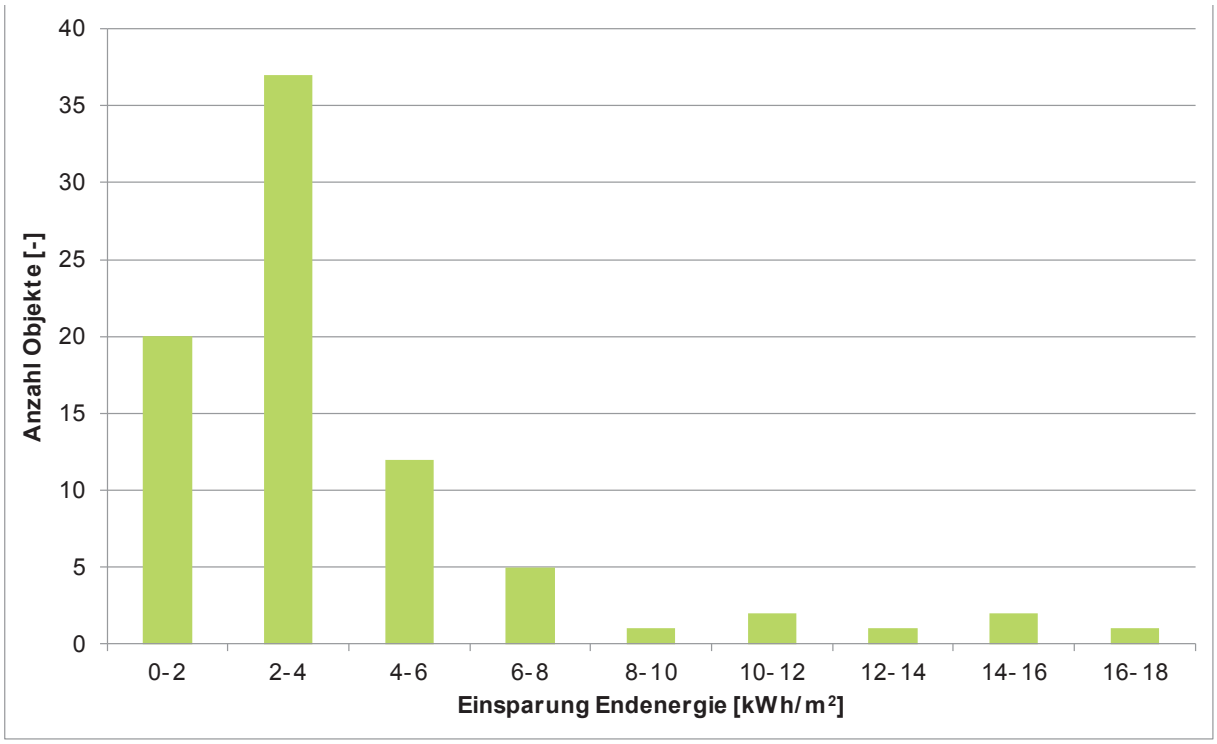


Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der spezifischen, potenziellen Endenergieeinsparung.

Abbildung 4 zeigt die Häufigkeitsverteilung der erzielbaren Endenergieeinsparungen pro m^2 Energiebezugsfläche. Die meisten Objekte bewegen sich im Bereich von 0-6 kWh/m^2. Es sind jedoch auch Abweichungen von bis zu 18 kWh/m^2 vorhanden. Zu hoch eingestellte Heizkurven bzw. Heizgrenzen und Elektroheizeinsätzen lassen diese Extremwerte zu. Der Median der Energieeinsparung liegt bei 3.2 kWh/m^2

Energetische Auswirkung der Legionellenschaltung

Tabelle 4 zeigt eine Gegenüberstellung des spezifischen Endenergieverbrauchs in Bezug auf das Warmwasser in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen an die Warmwassertemperatur.

Szenario	Beschreibung	Spez. Endenergie Warmwasser	Index im Vergleich zu IST
IST	Ist	8.8 kWh/m^2*a	100 %
SOLL 1	energieoptimierter Betrieb	7.7 kWh/m^2*a	88 %
SOLL 2	konstant 55°	9.1 kWh/m^2*a	104 %
SOLL 3a	konstant 55° plus tägliche Legionellenschaltung mit Wärmepumpe	7.7 kWh/m^2*a	88 %
SOLL 3b	konstant 55° plus tägliche Legionellenschaltung mit Elektroheizeinsatz	11.1 kWh/m^2*a	126 %
SOLL 4a	konstant 60° mit Wärmepumpe	10.3 kWh/m^2*a	118 %
SOLL 4b	konstant 60°, von 50° auf 60° mit Elektroheizeinsatz	12.1 kWh/m^2*a	138 %

Tabelle 4: Darstellung der energetischen Auswirkungen unterschiedlicher Legionellenschaltungen.

Sollwert 3a und 3b
In diesem Szenario wird der Einfluss der Art der Legionellenschaltung, also ob diese mit der Wärmepumpe oder mit dem Elektroheizeinsatz durchgeführt wird, deutlich sichtbar.
Im ersten Fall (3a) reduziert sich der Endenergieverbrauch auf Grund der Durchführung der Legionellenschaltung mit der Wärmepumpe im Vergleich zum IST Zustand um 12%. Im Gegensatz dazu muss in Szenario 3b 38 % mehr Endenergie aufgewendet werden, um denselben Ansprüchen zu genügen.

Sollwert 4a und 4b
Auch bei diesen beiden Szenarien ist der Einfluss der Art der Legionellenschaltung wie bei den Szenarien 3a und 3b klar erkennbar. Obwohl das Warmwasser im Fall von Szenario 4a monovalent mit der Wärmepumpe erzeugt wird, ist ein stark überhöhter Endenergieverbrauch erkennbar. Szenario 4b fällt entsprechend noch markanter aus. Dennoch ist dies die Situation, welche bei einer Verschärfung der SIA 385/1:2017 wohl am meisten angetroffen würde. In diesem Fall würden sämtliche mit einem energieoptimierten Betrieb gemäss Sollwert 1 erzielten Einsparungen mehr als rückgängig gemacht.

Die Berechnungen des Szenario 4b gehen davon aus, dass das Warmwasser nur von 50° um 10 K bis zur Erreichung der stetigen Warmwassertemperatur von 60°C direkt elektrisch erhitzt wird.

Abbildung 5 zeigt jedoch, dass dies in der Realität nicht immer der Fall ist. In dem gezeigten Beispiel erfolgt die Erzeugung des Warmwassers während den Freigabezeiten (Mo-Fr 01:00-05:00 Uhr, Sa 01:00-05:00 und 16:00 bis 24:00 Uhr, So 00:00-24:00 Uhr) des Elektroheizeinsatzes praktisch rein elektrisch. Die Ursache dafür findet sich in diesem konkreten beobachteten Fall in der Position des Elektroheizeinsatzes und dessen Temperaurfühler. Der Temperaturfühler des Elektroheizeinsatzes, meist ein in das Bauteil integrierter Bimetall-Fühler, befindet sich

weiter unten im Speicher als derjenige der Wärmepumpe. Dies führt dazu, dass das nachströmende Kaltwasser den Temperaturfühler des Elektroheizeinsatzes zuerst erreicht und den Elektroheizeinsatz einschaltet bevor die Wärmepumpe ein Einschaltsignal durch den höheren liegenden Temperaturfühler erhält. Wäre nun der Elektroheizeinsatz ganzjährig freigegeben um die stetige Warmwassertemperatur von 60°C zu gewährleisten, so hätte dies weitreichendere Konsequenzen auf den zusätzlichen Endenergieverbrauch als in Szenario 4b errechnet. Diese Anlagen- bzw. Betriebskonfiguration ist daher zwingend zu vermeiden.

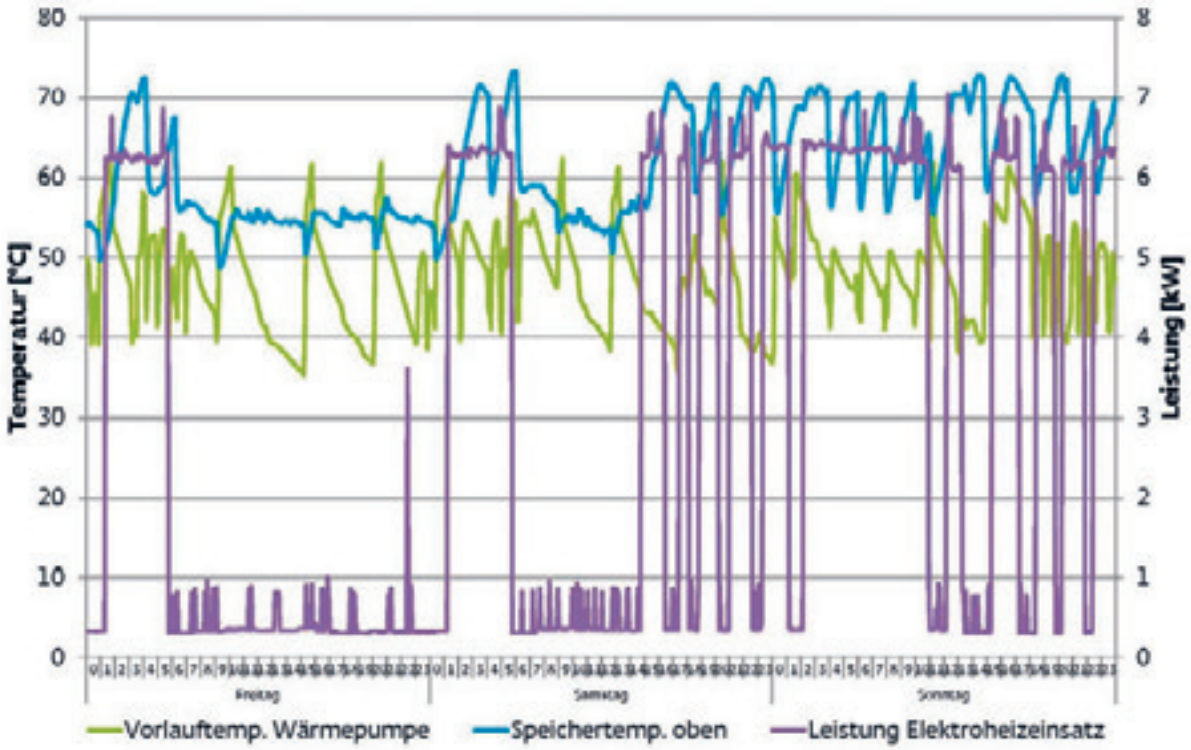


Abbildung 5: Darstellung der Einschaltzyklen des Elektroheizeinsatzes im Falle einer Freigabe durch das Rundsteuersignal.

Schlussfolgerung

Die Studie zeigt, dass im Bereich von Wärmepumpenanlagen in MFH, Optimierungspotenzial vorhanden ist.

Wie die weiterführenden Untersuchungen der Studie zeigen (siehe Schlussbericht), liegt im Bereich der Raumwärme die Problematik zur Erschliessung des Einsparpotenzials eher in der Klärung der Zuständigkeiten, der Ausbildung der für den Betrieb der Anlage zuständigen Person und dem mangelnden Anreiz für einen effizienten Anlagenbetrieb für den Gebäudeeigentümer als in der technischen Machbarkeit.

Neue Geschäftsmodelle, wie z.B. Effizienzcontrating von Wärmepumpen-Herstellern, Installateuren, Abrechnungsdienstleistern oder Elektrizitätswerken könnten hier Abhilfe schaffen. Eine Möglichkeit sieht das Projektteam zudem in der Aktivierung der Hauswarte/innen. Darunter wird deren Ausbildung und Sensibilisierung in Bezug auf Energieeffizienz verstanden. Die Hauswarte/innen sind oft vor Ort und kennen die Gebäude sowie die Bewohner/innen gut. Das wären ideale Voraussetzungen, um die Wärmeerzeugungsanlagen energieeffizient und dennoch nutzungsadäquat zu betreiben.

Im Bereich Warmwasser besteht die Problematik aktuell hauptsächlich im Interessenskonflikt zwischen Gesundheitsschutz und Energieeffizienz. An den Resultaten ist deutlich erkennbar, dass der Mehrverbrauch an Endenergie mit steigenden Anforderungen an die Hygiene auf bis zu 140% ansteigt, was vom Projektteam als nicht vernachlässigbar betrachtet wird. Insbesondere gilt dies bei Neubauten, bei denen der Anteil an Endenergie für Warmwasser am Gesamtwärmeenergieverbrauch höher ist als bei Altbauten.

Die Gewährleistung von dauerhaft überhöhten Temperaturen (60°C) in den Warmwassersystemen wird jedoch aktuell meist als einziger Ansatz betrachtet, Trinkwasserinstallationen hygienisch einwandfrei zu betreiben. Das Zusammenspiel und die Auswirkungen auf die Häufigkeit und Virulenz von Legionella species der verschiedenen Einflussfaktoren wie Temperaturen, Materialwahl oder vorhandene Mikroorganismen, sind jedoch bis anhin nur teilweise untersucht und in der Diskussion berücksichtigt (Borella et al 2014).

Auch weitere ungeklärte Themen wie die Ursache der Saisonalität der gemeldeten Legionellen-Infektionen, starke regionale Unterschiede der Fallzahlen, das erhöhte Infektionsrisiko von Männern, das bestehende Dosis-Wirkungs-Paradoxon, oder die Frage nach der Ursache für die stetig steigenden Fallzahlen weisen darauf hin, dass die Temperatur nicht alleinig entscheidend für eine Kontamination mit Legionellen sein kann (Meyer 2017).

Zudem liegt der Fokus oftmals auf dem Warmwasser. Allerdings können auch Kaltwasserleitungen auf Grund von zu hohen Temperaturen (>20°C), welche sich durch eine nicht fachgerechte Planung und Ausführung einstellen (fehlende thermische Trennung Kalt- und Warmwassersystem) Legionellen-Kontaminationen auftreten. Weiter wird die Wirksamkeit von technischen Ansätzen wie neuartige Leitungsführungen (Ringleitung) oder Frischwasserstationen nach Ansicht des Projektteams in der Diskussion bis anhin vernachlässigt.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesamt für Energie, Sektion Energieforschung, dem Amt für Hochbauen der Stadt Zürich, dem Stromsparfonds der ewz, der AEK Onyx AG, dem Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt, dem Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft und der Energiefachstelle des Kantons Solothurn für die Unterstützung des Projektes. Ein grosser Dank gilt den Mitgliedern der Begleitgruppe und den Interviewpartnern für die wertvollen Diskussionen und Inputs zur Studie.

Quellen

[1] Borella P. Montagna MT et al. Legionella infection risk from domestic hot water. Available at http://cdc.gov/eid März 2004

[2] Erb M., Hubacher P., Ehrbar M. (2004): Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen – FAWA 1996-2003. Dr.Eicher+Pauli AG und Hubacher Engineering im Auftrag des Bundesamts für Energie. April 2004

[3] Meyer E. (2017): Legionellen-Infektionsprävention: extrem teuer und wenig effektiv. In: Krankenhaushygiene up2date 2017;12 (2): 159-175. Georg Thieme Verlag KG

[4] Reimann W., Bühlmann E., Lehmann M., Bade S., Krämer S., Ott W., Montanari D., Ménard M. (2016): Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015. DemoSCOPE AG, econcept AG und Lemon Consult AG im Auftrag des Bundesamts für Energie, 18.5.2016

Lukas Gasser, Alera energies AG
Beat Wellig, Mario Rosso, Peter Schärli, Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Stefan Lutz, Amt für Hochbauten (AHB) der Stadt Zürich
Toni W. Püntener, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)

Grosse Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Umfeld: Herausforderungen und Lösungsansätze

Zusammenfassung

Hinsichtlich des Konzepts Energieversorgung 2050 der Stadt Zürich ist es notwendig, den Anteil an Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) markant zu erhöhen. Das Ziel dieses Projekts ist, breit anwendbare technische Lösungen für den Einsatz von L/W-WP in städtischen Bestand-Gebäuden mit Heizleistungen von 50-100 kW zu erarbeiten. Die Marktanalyse zeigt, dass nur wenige Standardprodukte die hohen Anforderungen erfüllen. Heute verwendete Lösungen beschränken sich meist auf relativ teure Spezialanlagen. Für eine einfache und kostengünstige Umsetzung von L/W-WP in städtischen Gebieten werden jedoch Standardlösungen benötigt. Wichtige Kriterien sind u.a. tiefe Schallemissionen, gute Effizienz, kleine Abmessungen und geringes Gewicht. Modulare, «kaskadierbare» Produkte weisen bezüglich Umsetzbarkeit klare Vorteile auf. Es wurden vier konkrete Lösungsansätze für die Integration von L/W-WP ausgearbeitet. In einem nächsten Schritt werden Projektierungen für zwei Gebäudetypen durchgeführt, eine Pilotanlage realisiert und machbare Lösungen in einer Wegleitung beschrieben. Der entstehende Markt stellt eine Chance für die Wärmepumpen-Branche dar, die es mit der Entwicklung geeigneter Produkte zu nutzen gilt.

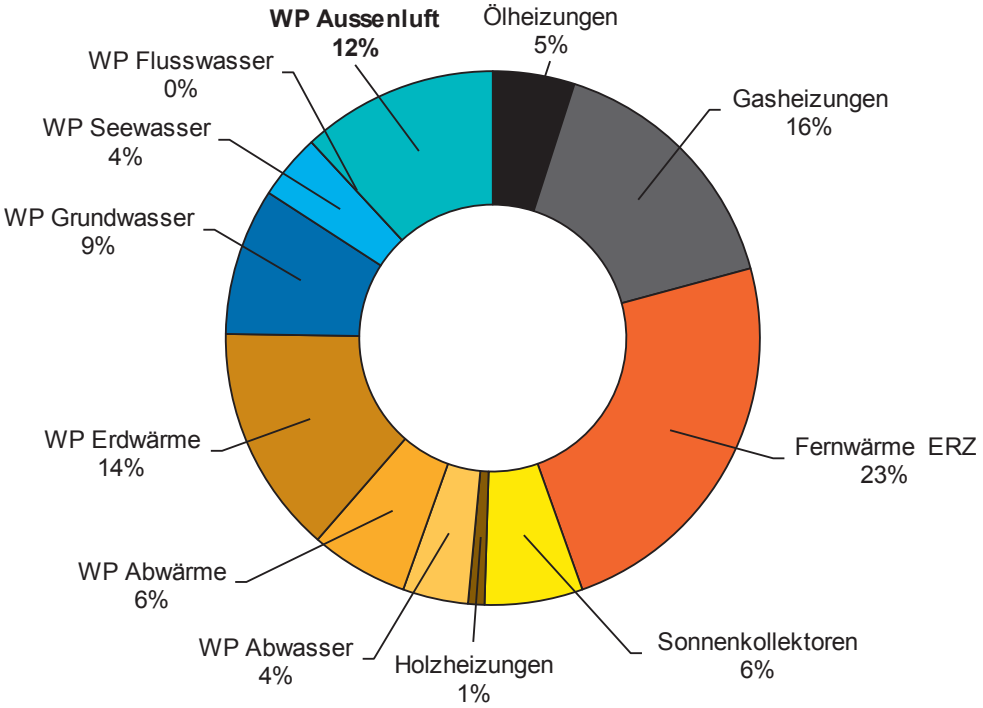
Summary

In regard to the city of Zurich's energy supply 2050 concept, it will be necessary to significantly increase the proportion of air/water heat pumps (A/W-HP). The aim of this project is to develop widely applicable technical solutions for the use of an A/W-HP in existing urban buildings with heating capacities of 50-100 kW. The market analysis shows that only a few standard products meet such demanding requirements. Today's solutions are usually limited to relatively expensive specially designed installations. For a simple and cost-effective implementation of an A/W-HP in urban areas, standard solutions are required. Important criteria include low noise emissions, good efficiency, small dimensions and low weight. Modular, "cascadable" products have clear advantages in terms of feasibility. Presently, four concrete solutions for the integration of an A/W-HP have been developed. In a next step, project planning is to be carried out for two building types, a pilot plant implemented and feasible solutions described in a guide. The emerging market for A/W-HP represents an opportunity for the heat pump industry that must be met by developing suitable products.

Ausgangslage

Das Heizen von Gebäuden ist energieintensiv und bietet grosses Potenzial für künftige Einsparung von Primärenergie. In der Schweiz werden heutzutage insbesondere beim Neubau meist Wärmepumpen für die Gebäudeheizung eingesetzt. In den Jahren 2008 bis 2017 wurden schweizweit rund 194'000 Wärmepumpen für die Gebäudeheizung verkauft. Experten gehen davon aus, dass bis im Jahr 2020 etwa 400'000 Wärmepumpen in Betrieb sein werden. Insbesondere für den Neubau im Einfamilienhaus- als auch im Mehrfamilienhaussegment sind eine Vielzahl technisch erprobter Lösungen für den Einsatz von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwarmwasser verfügbar, so dass hier mehrheitlich Wärmepumpen verwendet werden. Grössere Herausforderungen stellen sich dagegen bei Sanierungsprojekten in dicht besiedelten städtischen Gebieten. Typischerweise handelt es sich hierbei um Gebäude mit grösseren erforderlichen Heizleistungen im Bereich von 60 kW bis 100 kW und teilweisem Denkmalschutz der Gebäude.

Das Konzept Energieversorgung 2050 der Stadt Zürich [1] prognostiziert im Effizienz-Szenario für das Jahr 2050 einen Anteil der Wärmepumpen an der Bereitstellung des Wärmebedarfs für Raumwärme und Brauchwarmwasser von rund 49 %. In Gebieten, wo Alternativen durch leitungsgebundene Wärmeversorgung fehlen oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht von einer Anschlussfähigkeit an Energieverbunde ausgegangen werden kann, sollen Wärmepumpen als Ersatz für Heizsysteme mit fossilen Brennstoffen eingesetzt werden. Bisher gelten Sole/Wasser-Wärmepumpen (S/W-WP) aufgrund der hohen Effizienz und des geräuscharmen Betriebs insbesondere in urbanen Gebieten als Standardlösung für das nachhaltige Heizen, jedoch zeichnen sich durch ihren vermehrten Einsatz Probleme ab [2]. In Gebieten mit hoher Dichte an Erdwärmesonden, wie dies in urbanen Gebieten oft der Fall ist, entziehen sich die Sonden gegenseitig Wärme und kühlen das Erdreich im Aktionsradius der Erdwärmesonde langfristig ab. Auch die Planung, Bewilligung und Umsetzung neuer Anlagen in Gebieten mit hoher Dichte bestehender Sonden wird zunehmend schwierig. Zudem sind in gewissen Gebieten der Stadt Zürich Erdsonden nicht zulässig.



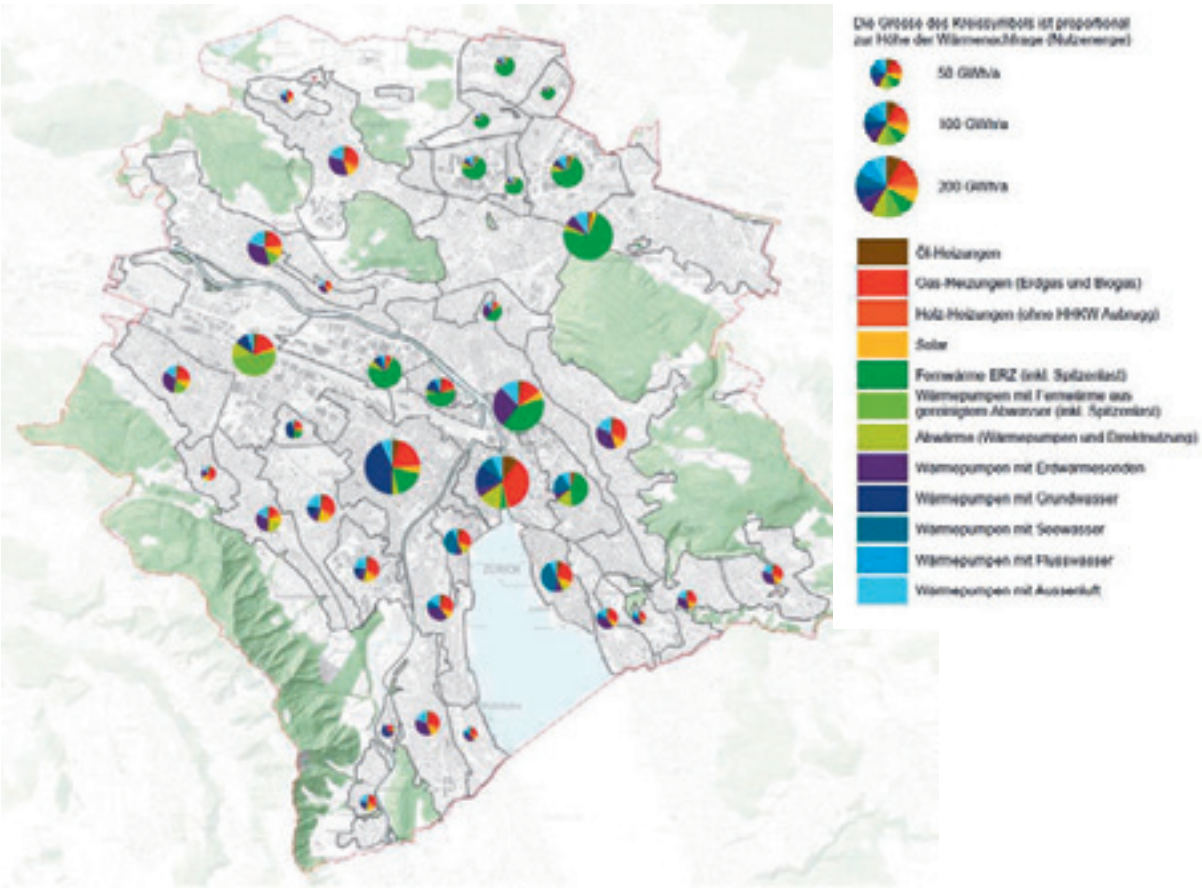


Abbildung 1: Oben: Aufteilung der in der Stadt Zürich angewendeten Systeme im Jahr 2050 zur Bereitstellung des Wärmebedarfs für Raumwärme und Brauchwarmwasser. Unten: Energieträgermix auf Stufe Endenergie der Stadt Zürich 2050, gemäss Effizienz-Szenario Konzept Energieversorgung 2050 [3].

Eine lohnende Alternative zu erdgekoppelten Wärmepumpen bietet der Einsatz von Luft/Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP). Vor diesem Hintergrund prognostiziert die Stadt Zürich im Effizienz-Szenario für das Jahr 2050 einen Anteil der L/W-WP an der Bereitstellung des Wärmebedarfs von rund 12 %. Der heutige Anteil beträgt lediglich 1 %.

Im Bereich L/W-WP bieten Hersteller heute Standardprodukte bis rund 35 kW Heizleistung an, welche hohe Anforderungen an Effizienz und Schallemissionen einhalten können. Im dicht besiedelten Raum ist die Aussenaufstellung der Wärmepumpen jedoch nicht unproblematisch. Einerseits müssen strenge Auflagen betreffend Schallemissionen eingehalten werden, andererseits sind die Platzverhältnisse in städtischen Gebieten meist stark eingeschränkt. Deshalb scheiden klassische, aussenaufgestellte L/W-WP in vielen Gebieten aus. Ob das für das Jahr 2050 angestrebte Ziel erreichbar ist, hängt somit massgeblich davon ab, ob diese Systeme bei Anwendung geeigneter Lösungsansätze auch im dicht besiedelten Raum unter schwierigen Platzverhältnissen eingesetzt werden können.

Ziele und Vorgehen

Das Ziel dieses Projekts (welches im Auftrag des Amts für Hochbauten (AHB) der Stadt Zürich bearbeitet wird) ist, breit anwendbare technische Lösungen für den Einsatz von L/W-WP in Mehrfamilienhäuser im städtischen Umfeld (u. a. auch in denkmalgeschützten Gebäuden) mit erforderlichen Heizleistungen zwischen 50 kW und 100 kW zu entwickeln. Es sollen dabei keine Neuentwicklungen, sondern basierend auf heute verfügbarer Technologie und vorhandenem Knowhow technisch und wirtschaftlich umsetzbare Lösungen erarbeitet werden. Übergeordnete Ziele sind die Verbreitung von L/W-WP im städtischen Umfeld zu fördern, die Anwendung zu vereinfachen und das Potenzial dieses wachsenden Marktes aufzuzeigen.

Dazu werden in einem ersten Schritt verschiedene Referenzgebäude mit möglichst unterschiedlichen Anforderungen, Dachkonstruktionen, Heizleistungen, Vorlauftemperaturen usw. ermittelt und definiert. Im Rahmen einer Recherche und Marktanalyse sollen geeignete und bereits angewendete Lösungsansätze zusammengetragen und hinsichtlich Effizienz, Schallemissionen und Integration in das Gebäude bewertet werden. Anschliessend sollen breit anwendbare Lösungen erarbeitet und eine Pilotanlage realisiert werden. Weiter soll im Rahmen des vorliegenden Projekts untersucht und aufgezeigt werden, welche Anforderungen der Behörden bezüglich Umwelt- und Denkmalschutz die Installation von L/W-WP in städtischen Gebieten erschweren oder gar verunmöglichen. Schliesslich wird eine Wegleitung bezüglich der Realisierung von L/W-WP in Bestand-Gebäuden in urbanen Gebieten erstellt.

Allgemeine Anforderungen an stadtverträgliche L/W-Wärmepumpen

Als Kriterien für die Beurteilung von L/W-WP hinsichtlich ihrer Stadtverträglichkeit wurden in der Studie «Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger» [4] im Auftrag des Umwelt- und Gesundheitsschutzes Zürich (UGZ) hauptsächlich die Systemeffizienz und die Schallemissionen untersucht. Dabei wurden die unten aufgeführten Anforderungen für kleinere Systeme definiert:

- Coefficient of Performance (COP) bei A2/W35: 3.6
- Schallleistungspegel bei Empfindlichkeitsstufe II: < 50 dB(A)

Des Weiteren ergeben sich beim Einsatz von L/W-WP in städtischen Gebieten eine Vielzahl zusätzlicher Anforderungen bezüglich Gewicht, Abmessungen, Ästhetik und Integration in das Stadtbild sowie Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien. Als monovalente Wärmeerzeugung sind L/W-WP geeignet, wenn niedrige Vorlauftemperaturen (Fussbodenheizungen, VL < 35 °C, Radiatorenheizungen, VL < 50 °C) möglich sind. Bei bestehenden Gebäuden erfordert dies eine flächenspezifische Heizlast von weniger als 75 W/m^2. Auch die Dimensionierung und die hydraulische Einbindung ins Heizsystem müssen beachtet werden [4].

Marktanalyse

a) Standardanlagen

Um potenziell geeignete L/W-WP für den Einsatz in städtischen Gebieten zu finden, wurde eine umfangreiche Marktrecherche durchgeführt. Für die Bewertung wurden die unten aufgeführten Kriterien definiert und je nach Wichtigkeit für die vorliegende Anwendung unterschiedlich gewichtet. Es wurden 17 Standardprodukte bezüglich dieser Kriterien verglichen.

- Schallleistungspegel (hohe Gewichtung)
- Abmessungen bezogen auf Leistung (mittlere Gewichtung)
- Gewicht bezogen auf Leistung (geringe Gewichtung)
- Effizienz (mittlere Gewichtung): COP
- Modulierbarkeit (hohe Gewichtung)
  - kontinuierliche Leistungsregelung
  - mehrstufige Ein/Aus-Regelung
  - Ein/Aus-Regelung mit einem einzelnen Kompressor
- Verwendung von Kältemittel mit «Global Warming Potential» (GWP) < 150 (geringe Gewichtung)

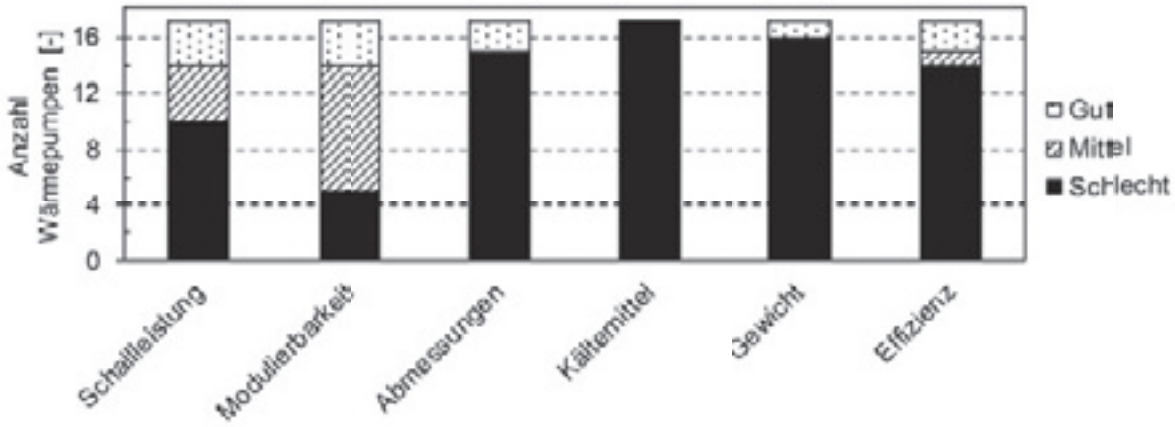


Abbildung 2: Bewertung der untersuchten Standardanlagen

Die Marktrecherche zeigt, dass auf dem Markt kaum Anlagen für die Bereitstellung grösserer Heizleistungen mit hoher Effizienz und ausreichend tiefem Schallleistungspegel erhältlich sind. Von den evaluierten, standardmässig verfügbaren L/W-WP erfüllt lediglich eine einzige Wärmepumpe die gemäss UGZ-Studie [4] definierte Anforderungskombination aus den Kriterien Effizienz und Schallemissionen. Alle übrigen Wärmepumpen scheitern insbesondere an zu hohen Schallleistungspegeln. Weiter erreichen nur wenige Produkte bei den Kriterien «Abmessungen bezogen auf Leistung» und «Gewicht bezogen auf Leistung» eine gute Bewertung. Sowohl die Abmessungen als auch das Gewicht der L/W-WP können die Einbringung in Bestand-Gebäude massgeblich erschweren oder gar verunmöglichen. Hier sind modulare Produkte, welche beispielweise in einzelne Baugruppen zerlegt werden können, klar im Vorteil.

b) Spezialanlagen

Gespräche mit Herstellern von «Spezialwärmepumpen» bestätigen, dass die Herstellung von L/W-WP mit den geforderten hohen Effizienzwerten und gleichzeitig sehr geringen Schallleistungspegeln durchaus möglich ist, dies jedoch höhere Kosten zur Folge hat. Die spezifischen Kosten von Spezialanlagen sind mit mehr als 2000 CHF/kW Heizleistung deutlich höher als bei Standardanlagen (ca. 1000-1500 CHF/kW Heizleistung). Solche Anlagen werden auf Kundenwunsch hin hergestellt.

Recherche bereits angewendeter Lösungsansätze

Im Rahmen einer detaillierten Recherche konnten verschiedene bereits angewendete Lösungsansätze ermittelt werden, welche teilweise als «gute Vorbilder» angesehen werden können. Die unterschiedlichen Ansätze werden nachfolgend kurz vorgestellt.

1) Dachwohnung eines Wiener Altbaus – aussenaufgestellte Standard-Wärmepumpe

Die Wärmepumpe, welche als aussenaufgestellte L/W-WP in Kompaktbauweise ausgeführt ist, verfügt über eine Nennheizleistung von ca. 30 kW bei -7 °C Umgebungstemperatur und übernimmt die monovalente Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwarmwasser für die Dachetage des Gebäudes [5].

Abbildung 3: Heizungsersatz mit aussenaufgestellter Standard-L/W-WP in Monoblock-Bauweise in denkmalgeschütztem Altbau in Wien (Quelle: iDM-Energiesysteme GmbH).

2) Wohngebäude in der Stadt Genf – aussenaufgestellte Standard-Wärmepumpen

Um die Ziele des Bundes der Energiestrategie 2050 umzusetzen, werden in Genf im Rahmen des eco21 Programms [6] Heizsysteme mit L/W-WP realisiert. Das eingesetzte, monovalente L/W-WP-System basiert auf sechs kaskadierten, aussenaufgestellten Standard-Wärmepumpen in Kompaktbauweise. Zur Erreichung einer einfachen und kostengünstigen Installation wurden die Leitungen für Vor- und Rücklauf der Wärmepumpen ausserhalb des Gebäudes an der Fassade verlegt.

Abbildung 4: Links: Aufstellung der L/W-WP in Kompaktbauweise auf dem Dach des Gebäudes. Rechts: Wärmegedämmte Vor- und Rücklaufleitungen der Wärmepumpen ausserhalb der Fassade verlaufend (Quelle: Services Industriels de Genève (SIG)).

3) Pflegeheim Mauren (Liechtenstein) - unter Dach aufgestellte Spezialwärmepumpe

Das im Pflegeheim eingesetzte Wärmepumpen-System basiert auf einer L/W-WP in Splitbauweise. Die Ausseneinheit der Splitwärmepumpe wurde in Form eines Tischrückkühlers ausgeführt und unter dem Dach des Gebäudes im Dachstock aufgestellt. Der angewendete Lösungsansatz erlaubt es nicht nur die Wärmepumpe von aussen nicht sichtbar aufzustellen, sondern ermöglicht bei richtiger Dimensionierung des verwendeten Tischrückkühlers auch einen äusserst leisen Betrieb der Wärmepumpe.

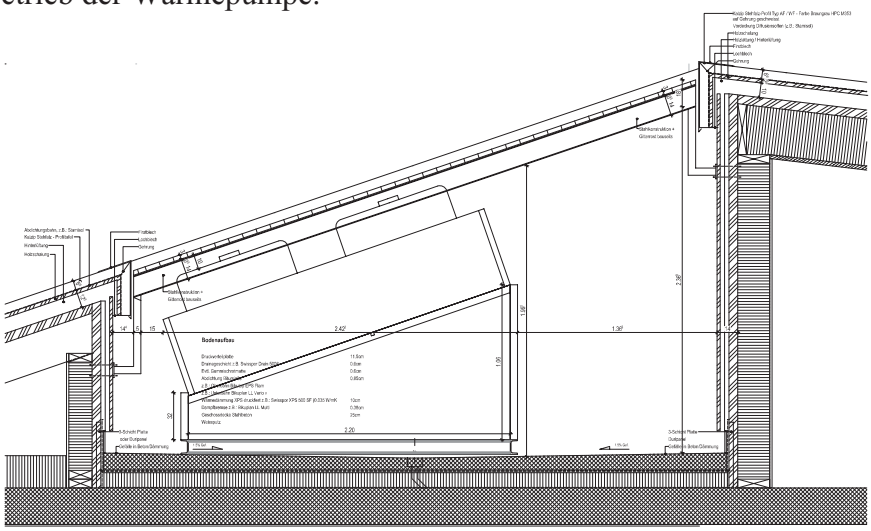


Abbildung 5: Querschnitt Aufstellung Tischrückkühler unter Dach einer Spezial-L/W-WP in Split-Bauweise im LAK Pflegeheim in Mauren, Liechtenstein (Quelle: Scheco AG).

4) Klimakälteanlagen Bundeshaus Bern & Altmarkt Galerie Dresden

Bei diesen Projekten handelt es sich nicht um neuartige Wärmepumpensysteme, sondern um klassische Klimakälteanlagen. Die präsentierten Ansätze werden jedoch als lohnend für die künftige Verbreitung von L/W-WP in städtischen Gebieten mit teilweisem Denkmalschutz der Gebäude erachtet.

Abbildung 6: Links: Bundeshaus Bern, Rückkühler der Kälteanlage unter Dach montiert mit Sichtschutz-Gitter (Quelle: CTA AG). Rechts: Dresdner Altmarkt Galerie, Rückkühler der Kälteanlage mit Sichtschutz (Quelle: Günter GmbH & Co. KG).

Zusammenfassung umgesetzter Lösungsvarianten

Basierend auf den recherchierten Projekten werden vier bereits heute angewendete Lösungsvarianten abgeleitet und in den nachfolgenden Beschreibungen zusammengestellt. Die Varianten unterscheiden sich insbesondere bezüglich der Bauart der verwendeten Wärmepumpen, des verwendeten Anlagetyps, der Art der Integration der Wärmepumpe in das Gebäude, des Betriebskonzepts sowie weiteren Randbedingungen zur Beheizung des Gebäudes.

	Variante 1	**Variante 2**	**Variante 3**	**Variante 4**
Bauart der Wärmepumpe	Kompaktwärmepumpe für Innenaufstellung oder Splitwärmepumpe	Kompaktwärmepumpe für Aussenaufstellung	Kompaktwärmepumpe für Innenaufstellung	Kompaktwärmepumpe für Innen- oder Aussenaufstellung oder Splitwärmepumpe für Aussenaufstellung
Anlagentyp	Spezialanlage	Standardanlage	Standardanlage	Standardanlage
Integration ins Gebäude	Aufstellung unter Dach	Aufstellung auf Dach	Aufstellung unter Dach	Aufstellung unter Dach oder Aufstellung auf Dach
Betriebskonzept	monovalent oder bivalent parallel	monovalent	monovalent	monovalent oder bivalent parallel
Weitere Randbedingungen	vollständige Beheizung des Gebäudes	partielle Beheizung des Gebäudes (z. B. Dachetage)	partielle Beheizung des Gebäudes (z. B. Dachetage)	vollständige Beheizung des Gebäudes

Tabelle 1: Morphologischer Kasten bestehender Lösungsvarianten.

In **Variante 1** wird das Gebäude mit einer von aussen nicht sichtbaren Spezialwärmepumpe in Kompakt- oder Splitbauweise, die unter dem Dach platziert ist, beheizt. Es kann dabei zwischen bivalenter oder monovalenter Betriebsweise gewählt werden. Die Umgebungsluft wird bei Verwendung von Anlagen in Kompaktbauweise über schall- und wärmegedämmte Luftkanäle und grosszügig dimensionierte, mit dachfarbigen Wetterschutzgittern versehenen Aussparungen in den Dachflächen angesaugt und ausgeblasen. Diese Variante kann bezüglich Denkmalschutz zielführend sein, ist jedoch infolge Verwendung von Spezialanlagen kostenintensiv. Ausserdem

muss im Falle der Verwendung von Anlagen in Splitbauweise ohne Einbindung der Verdampfereinheit unter dem Dach mittels Luftkanälen der gesamte Dachstock abgedichtet und wärmegedämmt werden.

Variante 2 zeichnet sich durch die Verwendung von kostengünstigen Standardanlagen aus. Die erforderliche Heizleistung der Wärmepumpe wird durch die partielle Beheizung des Gebäudes reduziert, was den Einsatz von Standard-Wärmepumpen vereinfacht. Die Wärmepumpe arbeitet dabei in monovalenter Betriebsweise. Bei dieser Variante ergeben sich grosse Herausforderungen bezüglich Denkmalschutz und Schallemissionen, da die Kompaktwärmepumpe auf dem Dach aufgestellt wird. Ein Sicht- und Schallschutz ist unumgänglich.

Auch bei **Variante 3** können kostengünstigen Standardanlagen aufgrund der verhältnismässig geringen Heizleistung durch die partielle Beheizung des Gebäudes verwendet werden. Diese Variante stellt auch bezüglich Denkmalschutz eine interessante Lösung dar, da die Kompaktwärmepumpe von aussen nicht sichtbar unter dem Dach eingebaut wird.

Bei **Variante 4** werden mehrere kaskadierte Standard-Wärmepumpen verwendet, was die Regelbarkeit sowie die Betriebssicherheit verbessert. Je nach Gebäudemerkmalen kann zwischen Innen- oder Aussenaufstellung gewählt werden, wobei aber immer eine Innenaufstellung empfohlen wird. Die Wärmepumpe soll bei dieser Variante die vollständige Beheizung des Gebäudes sowie die Brauchwarmwasseraufbereitung übernehmen. Falls eine bestehende Gaszuleitung vorhanden ist, kann eine bivalente, parallele Betriebsweise der Wärmepumpe in Kombination mit einem Gaskessel geprüft werden. Für eine kostengünstige und einfache Installation können die Wasserleitungen zwischen Wärmepumpen und Pufferspeicher des Heizsystems im Keller ausserhalb des Gebäudes an der Fassade verlegt werden. Diese Option wird bezüglich Denkmalschutz jedoch als nicht zielführend erachtet.

Empfohlene Lösungsansätze

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Recherche und Marktanalyse sowie unter Berücksichtigung typischer, relevanter Gebäudemerkmale wurden vier Lösungsansätze erarbeitet. Die Ansätze unterscheiden sich insbesondere in der Bauart der Wärmepumpe (Split- oder Kompaktbauweise) sowie im Aufstellungsort der Wärmepumpe bzw. der Verdampfereinheit bei Splitanlagen. Bei allen Ansätzen werden zur Erleichterung der Einbringung der Geräte sowie zur Verbesserung der Regelbarkeit mehrere Standardgeräte kaskadiert. Es wurde darauf geachtet, dass nach Möglichkeit Standardanlagen verwendet werden können. Dies insbesondere vor dem Hintergrund reduzierter Planungs- und Umsetzungskosten. Die Betriebsweise der Wärmepumpen kann abhängig von der bestehenden Infrastruktur zwischen monovalent oder bivalent parallel gewählt werden bei vollständiger Beheizung des Gebäudes. Bei bestehender Gas- oder Öl-Infrastruktur kann ein bivalent paralleler Betrieb zur Reduktion der Leistungsgrösse der Wärmepumpe gegebenenfalls sinnvoll sein. Die Lösungsansätze sind in Tabelle 2 und Abbildung 7 charakterisiert.

	Ansatz 1.1	Ansatz 1.2	Ansatz 2	Ansatz 3
Bauart der Wärmepumpe	Kompaktwärmepumpe für Innenaufstellung	Splitwärmepumpe für Innenaufstellung	Splitwärmepumpe für Aussenaufstellung	Kompaktwärmepumpe für Aussenaufstellung
Anlagentyp	Standardanlagen Kaskadierung mehrerer Geräte	Standardanlagen Kaskadierung mehrerer Geräte	Standardanlagen Kaskadierung mehrerer Geräte	Standardanlagen Kaskadierung mehrerer Geräte
Integration ins Gebäude	Aufstellung unter Dach Einbindung mittels Luftkanälen	Aufstellung Aussengerät unter Dach, Aufstellung Innengerät im Keller	Aufstellung Aussengerät auf Dach, Aufstellung Innengerät unter Dach oder in Keller	Aufstellung auf Dach
Betriebskonzept	monovalent oder bivalent parallel	monovalent oder bivalent parallel	monovalent oder bivalent parallel	monovalent oder bivalent parallel
Weitere Randbedingungen	vollständige Beheizung des Gebäudes	vollständige Beheizung des Gebäudes	vollständige Beheizung des Gebäudes	vollständige Beheizung des Gebäudes

Tabelle 2: Lösungsansätze.

Falls der Dachstock nicht bewohnt ist und eine genügend grosse Fläche hat, soll der Ansatz 1.1 dem Ansatz 2 vorgezogen werden, um die Sichtbarkeit der Anlage auf ein Minimum zu reduzieren. Vor dem Hintergrund des Denkmalschutzes sowie der strengen Vorgaben bezüglich Schallemissionen wird die Umsetzung von Ansatz 3 im Vergleich zu den Lösungsansätzen 1.1 und 2 als deutlich kritischer erachtet. Dieser Lösungsansatz sollte ausschliesslich in Betracht gezogen werden, falls eine Umsetzung gemäss Ansätzen 1.1 und 2 nicht möglich ist.

Der Ansatz 1.2 wird nur als sinnvoll erachtet, wenn Sole-Split-Anlagen verwendet werden können. Ein Betrieb mit klassischen Kältemittel-Split Anlagen kann aufgrund der grossen Höhendifferenz zwischen den Geräten zu Betriebsproblemen der Wärmepumpen führen. Weiter ist dieser Lösungsansatz nur sinnvoll bei einer Einbindung des Splitgerätes mittels Luftkanälen, damit nicht der gesamte Dachstock wärmegedämmt und abgedichtet werden muss. Die Vorteile des Ansatzes 1.2 sind die Reduktion von Körperschall und Gewicht im Dachstock. Als Nachteile können die aufwändige Installation und die notwendige, gute Isolation der Splitleitungen (Vermeidung von Kondensat) genannt werden. Ausserdem sind aktuell keine geeigneten Standardprodukte für die Umsetzung dieses Lösungsansatzes verfügbar.

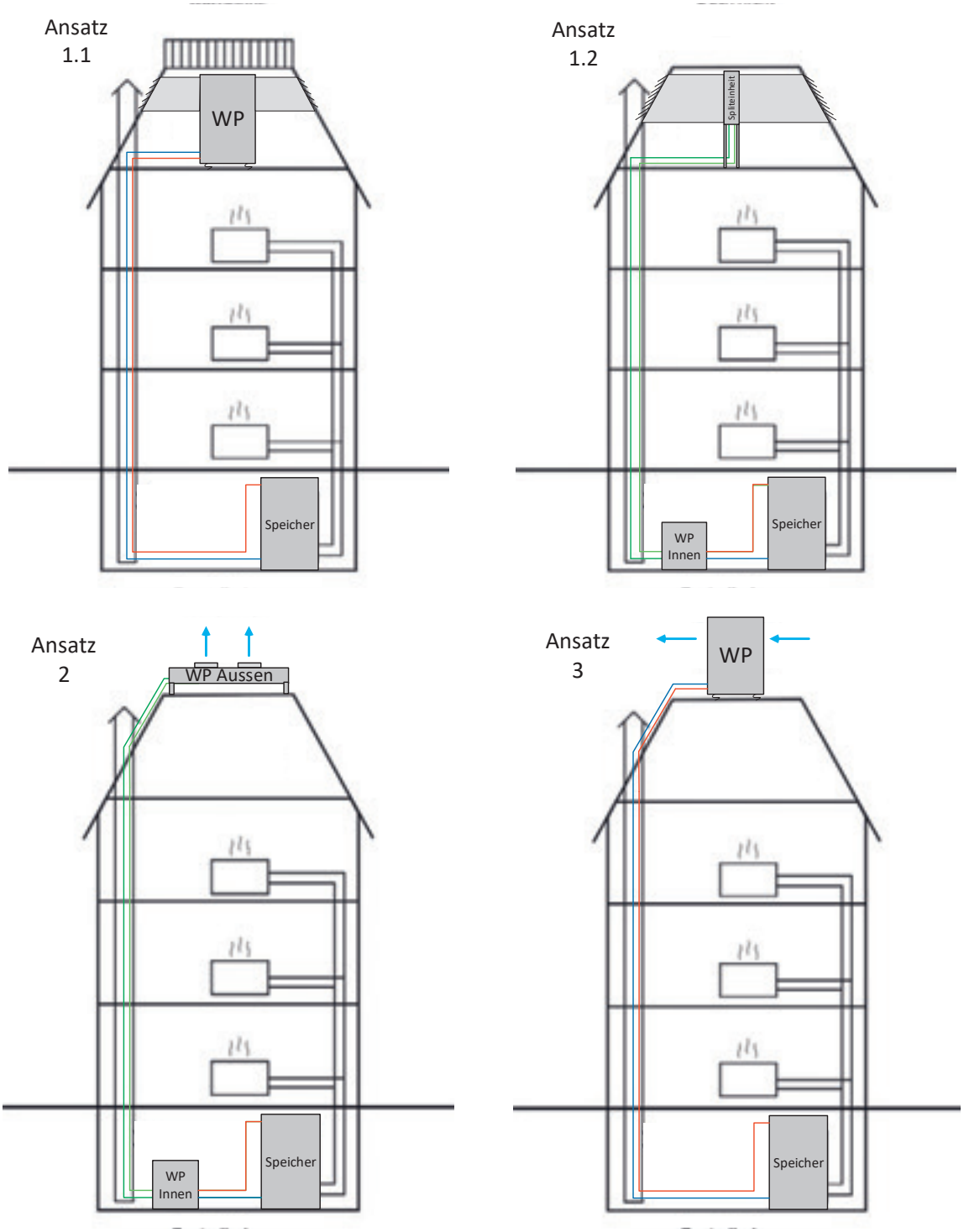


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Lösungsansätze 1 bis 3

Unabhängig vom jeweiligen Lösungsansatz können die Wärmepumpen eine monovalente Beheizung des gesamten Gebäudes oder alternativ gekoppelt mit einem zusätzlichen Heizsystem eine bivalent parallele Beheizung des Gebäudes übernehmen. Vorteilhaft werden bei bivalenten Systemen zur Erreichung minimaler jährlicher Gesamtkosten Öl- oder Gasheizungen in Kombination mit Wärmepumpen eingesetzt. Bei der bivalent, parallelen Betriebsweise kann die

Wärmepumpe gegenüber einer monovalenten Betriebsweise um ca. 40 bis 50 % kleiner dimensioniert werden. Trotz dieser Massnahme können je nach klimatischen Bedingungen während der Heizsaison über 80 % der jährlich erforderlichen Wärmeenergie für Heizung und Brauchwarmwasser durch die Wärmepumpe bereitgestellt werden. Gleichzeitig entschärft eine solche Auslegung der Wärmepumpe die Problematik bezüglich Schallemissionen. Ebenfalls interessant können bivalente Heizsysteme mit Wärmepumpen sein, wenn die elektrische Zuleitung des Gebäudes die maximale Leistung der Wärmepumpe limitiert und der Ausbau der elektrischen Zuleitung nicht möglich oder mit hohen Investitionskosten verbunden ist.
Zur Kompensation allfälliger Sperrzeiten durch das Energieversorgungs-Unternehmen (EVU-Sperren) ist das Heizsystem zwingend mit ausreichend dimensionierten thermischen Speichern auszustatten. Die Aufstellung der Speicher erfolgt aufgrund des grossen Gewichts vorteilhaft im Keller. Die Verlegung der Leitungen für Vor- und Rücklauf der Wärmepumpen (zwischen Speicher und Wärmepumpe) kann bei Umsetzung eines monovalenten Heizsystems mit L/W-WP durch die bestehenden Kamine des Gebäudes, welche infolge der Heizungssanierung überflüssig werden, erfolgen. Bedingt die Heizungssanierung die Umsetzung eines bivalenten Heizsystems mit L/W-WP und zusätzlichen Wärmeerzeugern, wird dadurch die Verwendung bestehender Kamine für die Verlegung der Leitungen der Wärmepumpe verunmöglicht.

Die Entscheidung, welcher Lösungsansatz bei einem bestimmten Gebäude vorteilhaft angewendet wird, soll mit Hilfe der zu erarbeitenden Wegleitung unter Berücksichtigung der relevanten Gebäudemerkmale getroffen werden können.

Konkretisierung der Anforderungen an «grosse» L/W-Wärmepumpen

Wichtige Kriterien für den Einsatz von L/W-WP in städtischen Bestand-Gebäuden sind deren Abmessungen und Gewicht. Wärmepumpen mit modularer Bauweise, welche für den Transport und die Einbringung in einzelne Baugruppen zerlegt werden können, sind in diesem Zusammenhang sehr interessant. Zur Erreichung einer möglichst einfachen Einbringung sowie einer guten Regelbarkeit wird empfohlen, mehrere kaskadierte kleinere Wärmepumpen anstelle einer grossen Wärmepumpe zu verwenden. Um die Anforderungen bezüglich Schallemissionen einzuhalten, müssen Verdampfereinheiten mit grossen und langsam laufenden Ventilatoren eingesetzt werden. Zur Vermeidung von Strömungsgeräuschen sind luftführende Kanäle und Aussparungen in den Dachflächen so zu dimensionieren, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von 2.5 m/s nicht überschritten wird.
Im Hinblick auf die Schallemissionen ist es neben der Verwendung ohnehin möglichst leiser Wärmepumpen wichtig, dass die Anlage mit einer einwandfreien Körperschall-Entkopplung zwischen Wärmepumpe und Gebäudestruktur ausgestattet wird. Ausserdem muss darauf geachtet werden, dass die Wärmepumpe mit schalldämmenden Wandelementen bestückt wird, um den Ansprüchen bezüglich Schallemissionen gerecht zu werden.
Bei den Abmessungen sollte darauf geachtet werden, dass eine einfache Einbringung durch Standard-Türen mit einer Breite von 0.8 m möglich ist. Andernfalls ist mit einem erheblichen Mehraufwand für die Installation zu rechnen. Auch das Gewicht ist ein entscheidender Faktor: Je nach Aufstellungsort muss die Wärmepumpe durch das Treppenhaus transportiert werden. Im Falle einer Aufstellung der Wärmepumpe oder einzelner Komponenten im Dachstock muss die maximal zulässige Flächenlast beachtet und eingehalten werden.
Weiter muss die elektrische Anschlussleistung des Gebäudes ausreichend sein. Für eine Wärmepumpe mit 60 kW Heizleistung wird eine elektrische Zuleitung für das gesamte Gebäude mit einer Absicherung von rund 200 A bei 400 V benötigt. Falls keine ausreichende elektrische

Zuleitung vorhanden ist, muss diese nachgerüstet werden oder auf einen bivalenten Betrieb mit zusätzlichem Wärmeerzeuger ausgewichen werden. Zur Entschärfung dieser Problematik ist es wichtig, dass die Anlaufströme der Wärmepumpen durch geeignete Massnahmen (Softstarter oder Frequenzumrichter) auf ein Minimum reduziert werden.

Vorläufiges Fazit und weiteres Vorgehen

Hinsichtlich des Konzepts Energieversorgung 2050 ist es unumgänglich, dass Lösungen für stadtverträgliche L/W-WP geschaffen werden. In diesem Zusammenhang sind nicht nur die Verantwortlichen für Planung und Ausführung, sondern auch die Hersteller von Wärmepumpen gefordert. Die Nachfrage nach Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen in städtischen Gebieten und damit die Nachfrage nach geeigneten L/W-WP wird in Zukunft steigen. Der entstehende Markt stellt eine Chance für die Wärmepumpen-Branche dar, die es mit der Entwicklung geeigneter Produkte wahrzunehmen gilt.
Es gibt bereits gute und technisch machbare Lösungsansätze, welche die relevanten Vorgaben für städtische Gebiete einhalten können und sich mit dem Denkmalschutz vertragen, jedoch beschränken sich diese Ansätze meist auf teure Spezialanlagen, welche preislich nicht mit der Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger mithalten können. Für eine einfache und kostengünstige Umsetzung von L/W-WP in städtischen Gebieten werden Standardlösungen und für diese Anwendung optimierte Standardanlagen benötigt. Ein wichtiges Kriterium bezüglich geeigneter L/W-WP ist neben geringen Schallemissionen, kleinen Abmessungen und möglichst geringem Gewicht eine einfache «Kaskadierbarkeit» mehrerer Wärmepumpen. Die Entwicklung von L/W-WP muss in die Richtung von kleineren, modularen und leisen Geräten gehen, um die Stadtverträglichkeit, die Einbringung sowie die Umsetzbarkeit zu gewährleisten.

Feedback und Inputs aus der Branche zu diesen Themen sollen im Projekt aufgegriffen und diskutiert werden, um zielführende Lösungen zu erarbeiten. In einem nächsten Schritt sollen virtuelle Projektierungen für zwei Gebäudetypen durchgeführt, eine Pilotanlage realisiert und Lösungen für die verschiedenen Gebäudetypen in einer Wegleitung beschrieben werden.

Danksagung

Das Projektteam bedankt sich beim AHB für die sehr gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit sowie beim BFE für die finanzielle Unterstützung des Projekts.

Quellen

[1] M. Jakob, K. Flury, N. Gross: Konzept Energieversorgung 2050 – Kurzber. Juli 2014.

[2] T. Weisskopf, R. Wagner: Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik, 2014.

[3] Stadt Zürich: Kommunale Energieplanung der Stadt Zürich, Überarbeitung 2014 bis 2016, PLANUNGSBERICHT ENERGIEVERSORGUNG, Stadtratsbeschluss 1077/2016 vom 21. Dezember 2016

[4] R. Dott, T. Afjei: Stadtverträgliche Luft/Wasser-Wärmepumpen als Hauptwärmeerzeuger. Stadt Zürich, Umwelt- und Gesundheitsschutz, Energie und Nachhaltigkeit, 2014. [Aktualisierung und Erweiterung bis Herbst 2018 im Gange]

[5] iDM-Energiesysteme GmbH: Heizung, Kühlung & Warmwasserbereitung mit einer Luftwärmepumpe, 2018.

[6] SuisseEnergie, Services Industriels de Genève, CSD: Vademecum PAC air-eau en toiture, 2018.

Abkürzungsverzeichnis

Die im Bereich Wärmepumpe meist gebrauchten Abkürzungen sind nachfolgend alphabetisch aufgelistet

AZ	Arbeitszahl (COP über eine bestimmte Messdauer)
BFE	Bundesamt für Energie
BWW	Brauchwarmwasser (gleich wie WW)
COP	Coefficient of performance
eff.	effektiv
EFH	Einfamilienhaus
El. oder el.	Elektrisch
FKW	Fluor-Kohlen-Wasserstoffe (Kältemittel)
FWS	Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz
HFO	Hydro-Fluor-Olefine (Kältemittel)
HFKW	teilhalogenierte Fluor-Kohlen-Wasserstoffe
HPT	Heat Pumping Technologies (IEA Collaboration Programme)
Hzg	Heizung
IEA	Internationale Energie-Agentur
JAZ	Jahresarbeitszahl (AZ über ein Jahr oder eine Heizperiode gemessen)
L/W	Luft/Wasser
LZ	Leistungsziffer, siehe AZ
Min.	Minimum
Max.	Maximum
PV	Photovoltaik
RL	Rücklauf
S/W	Sole/Wasser
SP	Technischer Speicher
Temp.	Temperatur
th	thermisch
VL	Vorlauf
WA	Wärmeabgabe (meist Radiatoren oder Fussbodenheizung)
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser (gleich wie BWW)
W/W	Wasser/Wasser

Nützliche Adressen

Leiterin des BFE-Forschungsbereichs Wärmepumpen und Kältetechnik

Dr. Carina Alles
Sektion Energieforschung
Bundesamt für Energie
Postfach
3003 Bern
Tel. 031 322 49 06
carina.alles@bfe.admin.ch

Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kältetechnik

Stephan Renz
Beratung Renz Consulting
Elisabethenstrasse 44
4010 Basel
Tel. 061 271 76 36
info@renzconsulting.ch

Leiterin des BFE-Marktbereichs Wärmepumpen

Rita Kobler
Sektion Erneuerbare Energie
Bundesamt für Energie
3003 Bern
Tel. 031 323 30 14
rita.kobler@bfe.admin.ch

www.bfe.admin.ch oder www.energie-schweiz.ch: Alles über das Bundesamt für Energie und EnergieSchweiz (Informationen über Wärmepumpen-Forschung unter www.bfe.admin.ch/forschung/ waermepumpe)

Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS

Stephan Peterhans, Geschäftsführer, stephan.peterhans@fws.ch
Claudia Müller, Informationsstelle Wärmepumpen, claudia.mueller@fws.ch

- Informationsstelle Wärmepumpen, Steinerstrasse 37, 3006 Bern, info@fws.ch
- Centre d'information pour les pompes à chaleur, Chemin de Tabac-Rhône 12, 1893 Illarsaz, info@pac.ch
- Centro d'informazione per le pompe di calore, c/ o Associazione TicinoEnergia, Via San Giovanni 10, 6500 Bellinzona, milton.generelli@ticinoenergia.ch

Internet: www.fws.ch, www.pac.ch, www.app-si.ch

WPSYSTEMMODUL

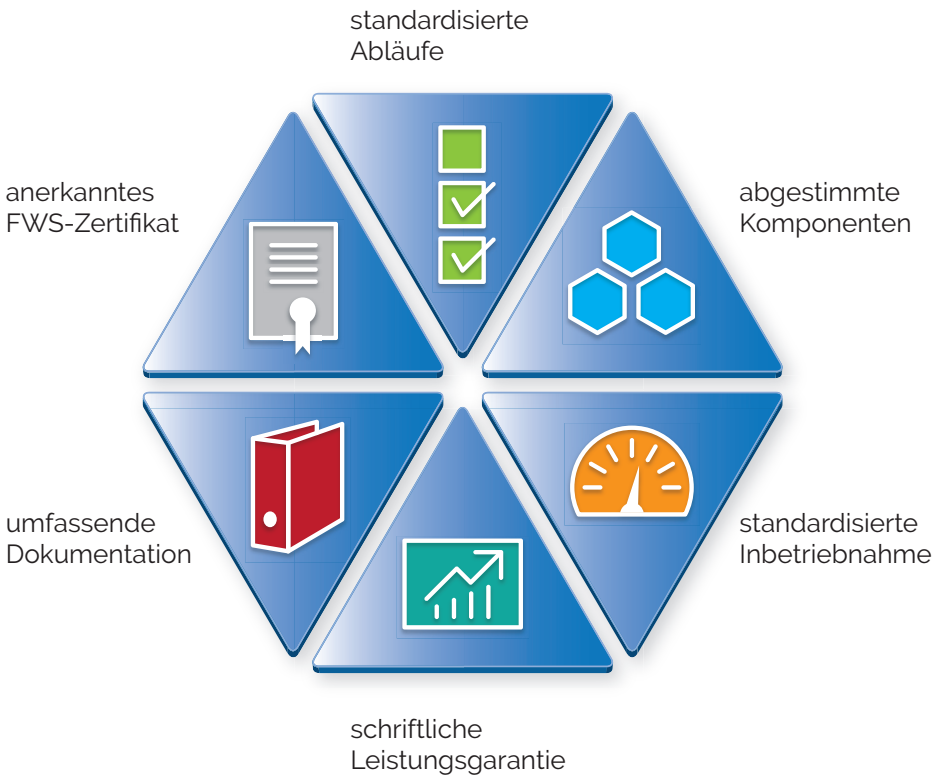
EFFIZIENTE WÄRMEPUMPEN MIT SYSTEM

Das Wärmepumpen-System-Modul ist ein Schweizer Standard für die optimale Planung und Erstellung von Wärmepumpen-Anlagen für Neubau und Sanierung. Das Wärmepumpen-System-Modul baut auf dem bestehenden internationalen Gütesiegel für Wärmepumpen auf.

Ihre Vorteile:

> Optimal aufeinander abgestimmte Systemkomponenten sorgen für hohe Qualität.
> FWS-zertifizierte Wärmepumpen-System-Module sparen Energie und senken Betriebskosten.
> Verbindlich geregelte und standardisierte Abläufe von der Planung bis zur Inbetriebnahme.

GARANTIERTER, NACHVOLLZIEHBARER NUTZEN MIT NACHHALTIGER WIRKUNG



Das Wärmepumpen-System-Modul ist eine Initiative von EnergieSchweiz und eine gemeinsame Entwicklung namhafter Wärmepumpen-Hersteller, Lieferanten und führender Branchenverbände.

Weil uns Ihre Zufriedenheit und die Energieeffizienz am Herzen liegen.

WWW.WP-SYSTEMMODUL.CH

Mit Unterstützung von

FWS Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz · GebäudeKlima Schweiz · suissetec · SWKI SICC SITC · energieschweiz Unser Engagement: unsere Zukunft.