



Zwischenbericht vom 2.12.2022

---

# HiTemHP - Effizienter Einsatz von Hochtemperatur- Wärmepumpen in Altbauten und bei Sanierungen

---



CO<sub>2</sub> Wärmepumpe in NEST © Empa 2021



# Empa

Materials Science and Technology

**Datum:** 2.12.2022

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

Empa  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
[www.empa.ch](http://www.empa.ch)

**Autor/in:**

Robert Weber, Empa, [robert.weber@empa.ch](mailto:robert.weber@empa.ch)

**BFE-Projektbegleitung:**

Nadège Vetterli, [nadege.vetterli@anex.ch](mailto:nadege.vetterli@anex.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502168-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

Hochtemperatur CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen bis 90°C sind Kandidaten um Ölheizungen in (geschützten) Altbauten zu ersetzen, da sie einen hohen Temperaturhub ermöglichen. Bei diesen Wärmepumpen fällt allerdings nicht nur Wärme bei hohen Temperaturen an, sondern auch Wärme bei tieferen Temperaturen. Um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen, muss die gesamte Wärme genutzt werden (vom hohen bis zum tiefen Temperaturbereich). Damit dies möglich ist, muss die Rücklauftemperatur aus dem Gebäude möglichst niedrig sein. In diesem Projekt soll untersucht werden, wie das System Wärmequelle, Wärmepumpe, Wärmeabgabe ausgelegt werden muss, damit einerseits ein behagliches Raumklima erreicht wird und andererseits hohe Energieeffizienz gewährleistet werden kann. Die Untersuchungen werden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS durchgeführt. Standardmässig nicht vorhanden Module (CO<sub>2</sub> und HFO Wärmepumpe) werden neu erstellt und mit Messwerten von der NEST - Datenbank kalibriert. Mit Jahressimulationen werden verschiedenen Typen von Hochtemperaturwärmepumpen und eine Ölheizung bezüglich Effizienz, Behaglichkeit und CO<sub>2</sub> Emissionen verglichen.

Es wurden Auswertungen der Messwerte der CO<sub>2</sub> Wärmepumpe in der SFW Unit durchgeführt, um physikalische Zusammenhänge zu verstehen und richtig zu modellieren. Ein Matlab Modell wurde erstellt (ideale Modellierung). Die Messwerte wurden mit dem Modell verglichen um zu verstehen, wieso der bestehende Prototyp in gewissen Betriebspunkten noch nicht optimal arbeitet.

## Summary

High-temperature CO<sub>2</sub> heat pumps with supply temperatures up to 90°C are candidates to replace oil heating in (protected) old buildings, as they allow a high temperature swing. However, these heat pumps do not only produce heat at high temperatures, but also heat at lower temperatures. To achieve high energy efficiency, the entire heat must be used (from the high to the low temperature range). For this to be possible, the return temperature from the building must be as low as possible. In this project it will be investigated how the system heat source, heat pump, heat output has to be designed, so that on the one hand a comfortable indoor climate is achieved and on the other hand high energy efficiency can be guaranteed. The investigations are carried out with the simulation program TRNSYS. Standard modules not available (CO<sub>2</sub> and HFO heat pump) are newly created and calibrated with measured values from the NEST database. With annual simulations different types of high temperature heat pumps and an oil heating system are compared regarding efficiency, comfort and CO<sub>2</sub> emissions.

Evaluations of the measured values of the CO<sub>2</sub> heat pump in the SFW unit were performed in order to understand physical relationships and to model them correctly. A Matlab model was created (ideal modeling). The measured values were compared with the model to understand why the existing prototype does not yet work optimally at certain operating points.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	6
1.2 Motivation des Projektes .....	6
1.3 Projektziele .....	6
<b>2 Anlagenbeschrieb</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>9</b>
<b>4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>10</b>
<b>5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse</b> .....	<b>12</b>
<b>6 Weiteres Vorgehen</b> .....	<b>13</b>
<b>7 Nationale und internationale Zusammenarbeit</b> .....	<b>13</b>
<b>8 Kommunikation</b> .....	<b>13</b>
<b>9 Publikationen</b> .....	<b>13</b>
<b>10 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>14</b>



## Abkürzungsverzeichnis

COP	Coefficient of performance
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DeCarbCH	Acronym des Projektes "Decarbonisation of Cooling and Heating in Switzerland"
EN ISO	Europäische und Internationale Norm
GC	Gas Cooler
HFO	Hydrofluorolefin, Hochtemperaturkältemittel
NEST	Demonstrationsgebäude an der Empa
PMV	Predicted Mean Vote, Index für thermischen (Dis-)Komfort
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied person in a room
SFW	Solar, Fitness and Wellness unit in NEST
SWEET	"SWiss Energy research for the Energy Transition", BFE Call
WP	Work Package
WT	Wärmetauscher



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Um bis 2050 die Ziele des CO<sub>2</sub> Reduktion in Gebäuden zu erreichen, werden früher oder später die fossilen Heizungen ersetzt werden müssen. In Altbauten, wo eine Isolierung finanziell oder aus Gründen des Heimat- bzw. Ortsbildschutzes nicht oder nur teilweise realisiert werden kann, sind häufig noch sehr hohe Vorlauftemperaturen für die Radiatorenheizung üblich und nötig [1]. In solchen Gebäuden ist ein Ersatz von fossilen Heizungen durch Standardwärmepumpen in der Regel nicht einfach möglich. Eine Lösung des Problems könnte der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen darstellen. Da schwach oder nicht isolierte Gebäude typischerweise einen hohen Wärmebedarf haben, ist ein hoher Wirkungsgrad Voraussetzung für einen erfolgreichen Ersatz. Es wäre fatal, wenn in Peak Load Situationen die Heizenergie praktisch rein elektrisch erbracht werden müsste.

## 1.2 Motivation des Projektes

Einstufige Hochtemperaturwärmepumpen mit dem Kältemittel CO<sub>2</sub> erreichen theoretisch für hohe Temperaturhübe noch gute Wirkungsgrade. So wird z.B. in der solaren Fitness und Wellness Unit im Demonstrationsgebäude NEST an der Empa bei einer Zulufttemperatur von 10°C in den Verdampfer und einer Auslasstemperatur von 115°C im Hochtemperatur-Gaskühler ein Gesamt-COP von ca. 2.9 erreicht. Allerdings gelingen solch hohe COP's nur, wenn tiefe Rücklauftemperaturen möglich sind.

Der COP warmseitig (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** & 3) berechnet sich aus der Summe der abgegebenen Wärme der Wärmetauscher a,b und c im Vergleich zur aufgewendeten elektrischen Energie:

$$COP = \frac{\sum_a Q_{Warmwasser}}{Q_{Kompressor}} \quad (1)$$

Dabei ist die aufgewendete Energie des Kompressors proportional zur Druckerhöhung (2 → 3, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** & 3) und hängt ab von der Eingangstemperatur des Gases und der Drehzahl des Motors, bzw. Frequenz (Anzahl Hübe pro Minute).

Um einen hohen COP zu erreichen, muss auf der Warmseite des Gaskreislaufes möglichst die gesamte Wärme nutzbringend "verbraucht" werden. Das ist eine Herausforderung, denn damit in den Wärmetauscher c, z.T. auch b die gesamte Wärme ins Wasser übertragen werden kann, muss die Eintrittstemperatur des Wassers tiefer sein (möglichst <35°C) als die Austrittstemperatur des Gases (Punkt 6, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Je tiefer die Rücklauftemperatur des Gebäudes ist, desto grösser ist die auskoppelbare Wärme aus dem Gas. Das bedeutet, dass das Wärmeabgabesystem im Gebäude entsprechend modifiziert werden muss damit mehrere und/oder verschiedene Verbraucher mit unterschiedlichen Temperaturanforderungen verwendet werden können. In diesem Projekt geht es darum, solche Modifikationen und Anpassungen zu untersuchen.

## 1.3 Projektziele

Ziel des Projekts ist es, für (schlecht sanierbare) Altbauten Wärmepumpenalternativen zu fossil befeuerten Heizungen aufzuzeigen, welche vor allem während der Wintermonate einen möglichst hohen COP erreichen, damit der Anteil nichterneuerbarer Energien reduziert werden kann und die elektrischen Netze nicht unnötig belastet werden. Darunter soll aber das Raumklima, vor allem die Strahlungsverteilung, nicht leiden müssen. Das Heizsystem mit transkritischer Hochtemperatur-Wärmepumpe wird für spezielle Altbauten mit Hilfe von Simulationen mit einer Ölheizung und einer zweistufigen Wärmepumpe verglichen. Vor allem Energieeffizienz und Raumkomfort sind die wesentlichen Bewertungskriterien.



## 2 Anlagenbeschreibung

Die Untersuchung wird hauptsächlich mit dem Simulationstool TRNSYS 18 [2] durchgeführt. TRNSYS arbeitet mit einem Solver und einer Sammlung von vorbereiteten Standard Modellen (Types) für Gebäude und Komponenten, welche in internationalen Vergleichen immer wieder validiert wurden und werden. Dies garantiert eine hohe Aussagekraft für energetische Simulationen.

Haustechnikkomponenten, die nicht als Standard-Types vorhanden sind, werden selber entwickelt und in FORTRAN [3] programmiert. In diesem Projekt werden neue Types für die CO<sub>2</sub> und die HFO Wärmepumpen entwickelt und mit bestehenden Anlagen im NEST abgeglichen. Die NEST Datenbank enthält mittlerweile Messreihen von verschiedener Prototypen und neu entwickelten Geräten.

Als Vorlage für den TRNSYS Type wird die im NEST installierte CO<sub>2</sub> Wärmepumpe verwendet. In diesem Bericht wird davon ausgegangen, dass CO<sub>2</sub> Hochtemperatur- Wärmepumpen in einem transkritischen Prozess betrieben werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, rote Kurve). Das bedeutet, dass die Wärmeabgabe über der kritischen Temperatur erfolgt und das Kältemittel daher auf der Warmseite keinen Phasenwechsel durchläuft. Das Kältemittel ist in diesem Temperaturbereich während der gesamten Wärmeübertragung gasförmig.

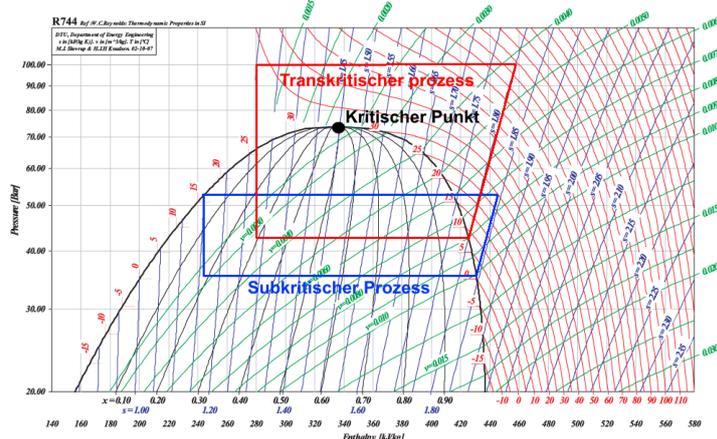


Abbildung 1: Schematische Gegenüberstellung eines transkritischen Prozesses (rot) mit einem subkritischen Prozesses (blau).

Die im NEST-SFW installierte CO<sub>2</sub> Wärmepumpe wurde für die Speisung von Saunen designt (hohe Heisswassertemperaturen). Diese Wärmepumpe muss Heisswasser mit bis zu 115°C erzeugen. Es sind fünf Wärmetauscher im Einsatz (WT1-5 in Abbildung 4), wobei der vierte als interner Rekuperator dient. Mit dem Rekuperator wird auf der Hochdruckseite das Heissgas weiter abgekühlt (6 – 7 in Abbildung 2 & 3) und auf der Niederdruckseite wird damit das Gas nach dem Verdampfer vorgewärmt (1 – 2 in Abbildung 2 & 3). So wird sichergestellt, dass keine Flüssigkeitströpfchen in den Kompressor gelangen.

Die Wärmekapazität von gasförmigem CO<sub>2</sub> im verwendeten Temperatur/Druckbereich ist nicht linear. Dies kann in den Abbildung 3 erkannt werden. Im T-s Diagramm wird die Abkühlung des Gases isobar dargestellt (T3 - T7). Deutlich ist zu erkennen, dass diese Kurve kein Gerade ist. Die Abkühlung von T3→T4 beträgt 60°C und die von T4→T5 40°C. Im p-h Diagramm (Abbildung 3) ist zudem sichtbar, dass die Enthalpiedifferenz zwischen den Punkten 3 & 4 trotz grösserer Temperaturdifferenz kleiner ist, als die Enthalpiedifferenz zwischen den Punkten 4 & 5. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Linearität der Wärmekapazität auf den Isobaren mit tieferem Druck noch weiter abnimmt. Dieser Effekt kommt von der Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität des CO<sub>2</sub> und tritt in der Nähe des kritischen Punktes verstärkt auf. Da die Wärmekapazität von Wasser hingegen nur schwach von der Temperatur abhängt, kann eine Temperaturänderung im T - s Diagramm in erster Näherung linear eingezeichnet werden (grüne Geraden in Abbildung 2). Die Steigung dieser Geraden hängt fast



gänzlich vom Wassermassendurchfluss ab. Durch die Verwendung von drei Wärmetauschern anstelle von einem kann der Massenstrom pro Wärmetauscher und die Tauscherfläche so eingestellt werden, dass eine optimale Wärmeübertragung vom Gas aufs Wasser stattfinden kann (Kurve vom Gas und vom Wasser möglichst parallel und nahe beieinander).

Wie in Abbildung 4 sichtbar, durchströmt das vom Kompressor komprimierte Gas der Reihe nach den Hochtemperatur- (WT1), den Mittentemperatur- (WT2) und den Tieftemperatur-Wärmetauscher (WT3) sowie den Rekuperator (WT4). Das Heisswasser von WT1 und WT2 wird in einen Schichtspeicher geleitet, das Wasser von WT3 wird im SFW während der Wintermonate für Niedertemperaturheizung (Flächenheizung) eingesetzt und im Sommer für die Regenerierung von Erdsonden. Die Wärme für den Verdampfer wird im Winter von der Erdsonde geliefert und im Sommer wird damit der Raum gekühlt. Beim bestehenden System im NEST wird das Wasser des Schichtspeichers für die Beheizung der drei Saunen (Finnisch, Bio und Dampf) sowie für Duschwasser verwendet. Der Speicher hilft die unterschiedlichen Massenströme der Wärmetauscher auszugleichen und erlaubt dank der Schichtung, der Wärmepumpe möglichst tiefe Vorlauftemperaturen im Punkt T6 zuzuführen.

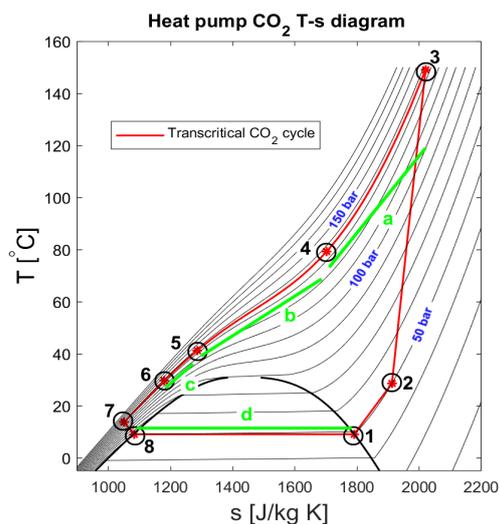


Abbildung 2: Temperatur – Entropiediagramm eines Hochtemperatur CO<sub>2</sub> Kreislaufes

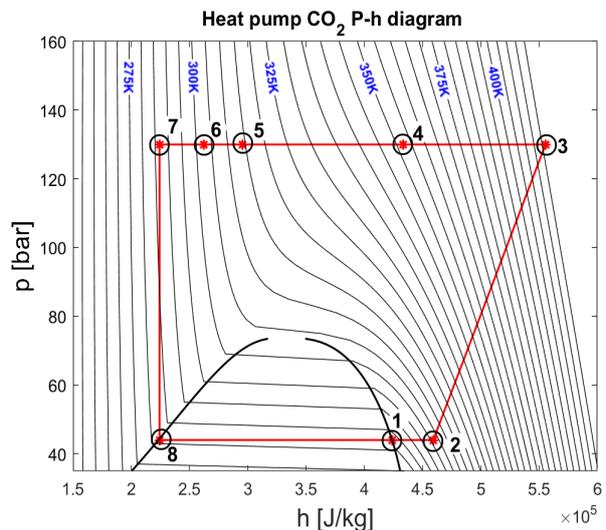


Abbildung 3: Druck – Enthalpiediagramm des gleichen Hochtemperatur CO<sub>2</sub> Kreislaufes

- 1 – 2: Gaserwärmung mit innerem Wärmetauscher (Rekuperator), Wärme kommt von 6 – 7, (WT4)
- 2 – 3: Kompressor (adiabate Komprimierung)
- 3 – 4: Heissgaskühler (a), (WT1)
- 4 – 5: Gaskühler mittlere Temperaturen (b), (WT2)
- 5 – 6: Gaskühler tiefe Temperaturen (c), (WT3)
- 6 – 7: Rekuperator, Wärme geht nach 1 – 2, (WT4)
- 7 – 8: Drosselventil (isenthalpe Entspannung)
- 8 – 1: Verdampfer (isobare Verdampfung) (d), (WT5)

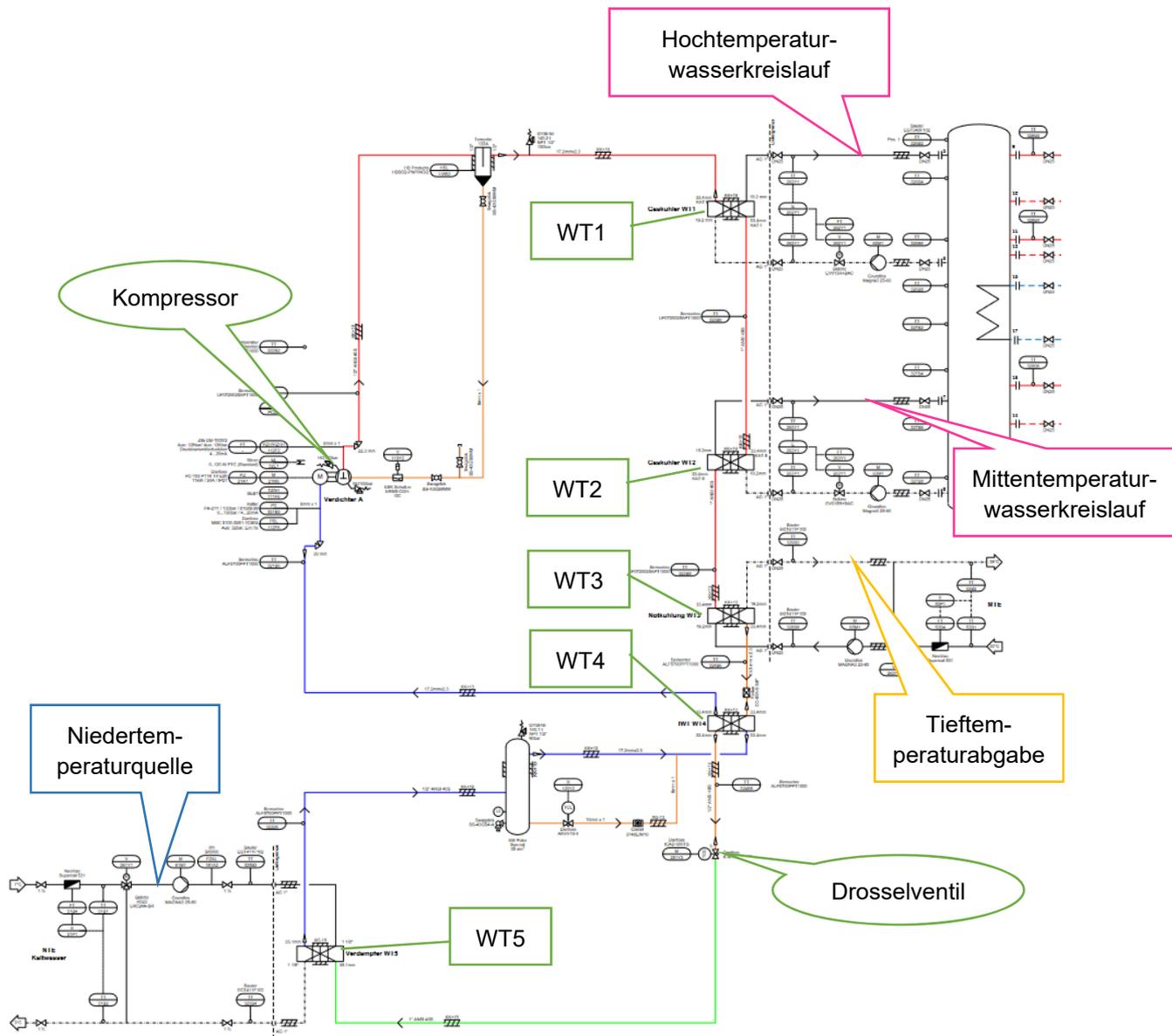


Abbildung 4: Hydraulisches Schema der CO<sub>2</sub> Wärmepumpe im NEST

### 3 Vorgehen und Methode

Das Projekt ist in vier Arbeitspakete gegliedert:

Im Rahmen von WP1 werden verschiedene archetypischen Gebäude identifiziert, welche nur bedingt energetisch saniert werden können, so dass hohe Vorlauftemperaturen > 75°C für die Raumheizung zwingend sind. Die Auswahl soll so gelegt werden, dass sowohl kleinere als auch grössere Gebäude in einem Heizleistungsbereich von 20-50 kW vertreten sind. Zusammen mit der Denkmalpflege Zürich wird ein Gebäude gesucht, das für Altbauten einen repräsentativen Energieverbrauch und ein repräsentatives Heizsystem aufweist und bei dem auch Konstruktionspläne vorliegen, die detailliert genug sind, dass sie für die TRNSYS Simulation verwendet werden können.

Im WP2 werden unterschiedliche Systemkomponenten und Systemkombinationen untersucht, insbesondere Wärmepumpen, Wärmeabgabesysteme, thermische Speicher und verschiedene hydraulische Systeme. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf transkritische Wärmepumpen mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel gelegt. Diese Technologie gilt als vielversprechend [6] und das Kältemittel weist keine



wesentlichen Klimarisiken auf. Das Potential der CO<sub>2</sub> Wärmepumpen kann nur dann ausgeschöpft werden, wenn die Rücklaufemperatur niedrig ist (siehe Erklärungen oben). Daher werden unterschiedliche Wärmeabgabe- und Speicherkonzepte für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb identifiziert und charakterisiert. Als Resultat liegt eine Übersicht über mögliche Systemkonzepte vor, sowie eine Auswahl der am besten geeigneten Konzepte, welche für die weitere Untersuchung verwendet werden.

Im WP 2 ist ein wichtiger Teil des Projektes die korrekte Programmierung der CO<sub>2</sub> – Wärmepumpe. Für diese existiert in TRNSYS kein Standard Type, das Modell muss von Grund auf neu programmiert werden. Zu diesem Zweck wurden theoretische Untersuchungen und die Messdaten der bestehenden Wärmepumpe (Prototyp) im SFW ausgewertet. Ziel ist es, die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen und Korrelationen zu erhalten, welche in das mathematische Modell übernommen werden können. Die Arbeiten im Projekt werden nur teilweise in der Reihenfolge der Workpackages (WP's) durchgeführt. WP 1 und 2 werden zurzeit parallel abgearbeitet.

Auf Basis der identifizierten Gebäudetypen (WP1) und Systemkonfigurationen (WP2) wird in WP3 eine Untersuchung mit dem Simulationstool TRNSYS durchgeführt. Sofern möglich wird auf Standardmodelle für einzelne Komponenten zurückgegriffen. Für angepasste Komponentenmodelle, wie die Modellierung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe mit HFO-Kältemittel oder die transkritische Wärmepumpe mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel werden sog. "grey box" Modelle verwendet, welche mit Messdaten aus NEST kalibriert werden. Bei der Modellierung und Validierung der CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe unterstützt uns auch die Firma Scheco, welche Messdaten, Kenngrößen zu Wärmepumpenkomponenten, Auslegungs- und Dimensionierungsgrundlagen und Hilfestellung zur Regelungstechnik bereitstellt. Es werden Jahressimulationen für das Klima Zürich durchgeführt. Beurteilt werden Effizienz, Teillastverhalten des Gesamtsystems und die Behaglichkeit in den Räumen. Während der Simulation werden in einem ersten Schritt die Grobauslegungen aus WP2 überprüft und bei Bedarf in einem iterativen Prozess angepasst. Ebenso werden Regelungsstrategien entworfen, implementiert, verifiziert und angepasst. Der Kühlbetrieb im Sommer wird ebenfalls mitbetrachtet, steht aber nicht im Vordergrund der Untersuchungen.

Nach Abschluss der Simulationen, werden die Resultate im Rahmen von WP4 ausgewertet und mit sog. "key performance indicators" (KPIs) dargestellt. Diese beinhalten zumindest das elektrische Lastprofil mit Vergleich zwischen mittlerer Maximallast im Winter zur mittleren Maximallast im Sommer, den Winter-COP, sowie die Jahresarbeitszahl, die betrieblichen CO<sub>2</sub> Emissionen aufgrund des Netzstrombezugs. Für die Bewertung des Netzstroms wird ein dynamischer CO<sub>2</sub> Wert berechnet. Als Vergleichsbasis bezüglich der KPIs gilt generell ein fossiles Heizsystem mit Radiatoren, welches ebenfalls simuliert wird. Zudem ist eine qualitative Bewertung und Vergleich des Raumklimas mit Hilfe der PMV und PPD Werte sowie der Asymmetrie der Strahlung nach EN ISO 7730 [4] vorgesehen, um die Auswirkungen der Massnahmen auf die Wärmeabgabesysteme abschätzen zu können.

## 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten im WP 1 sind im Gange. Die Auswahl eines geeigneten Gebäudes ist noch nicht abgeschlossen.

Die Auswertungen in WP2 ergaben, dass bei der Produktion von Wasser mit 115°C ein COP von 2.9 erreicht wird (bei einer Quelltemperatur von ca. 10°C). Überraschenderweise zeigte die Auswertung aber auch, dass bei der Produktion von tieferen Heisswassertemperaturen der COP eher sinkt, statt höher wird. Im Rahmen einer Masterthesis wurde ein Matlab Modell erstellt, das in der Lage ist, stationäre Betriebszustände der Wärmepumpe zu berechnen und zu untersuchen. Dabei wird der ganze CO<sub>2</sub> Kreislauf ideal simuliert, d.h. Wärmeverluste von Gasleitungen und Wärmetauschern werden (noch) nicht berücksichtigt. Eine Simulation mit diesem Modell im gleichen Temperaturbereich



wurde mit Messwerten verglichen, um zu ermitteln, wo mögliche negative Einflüsse auf den COP herkommen.

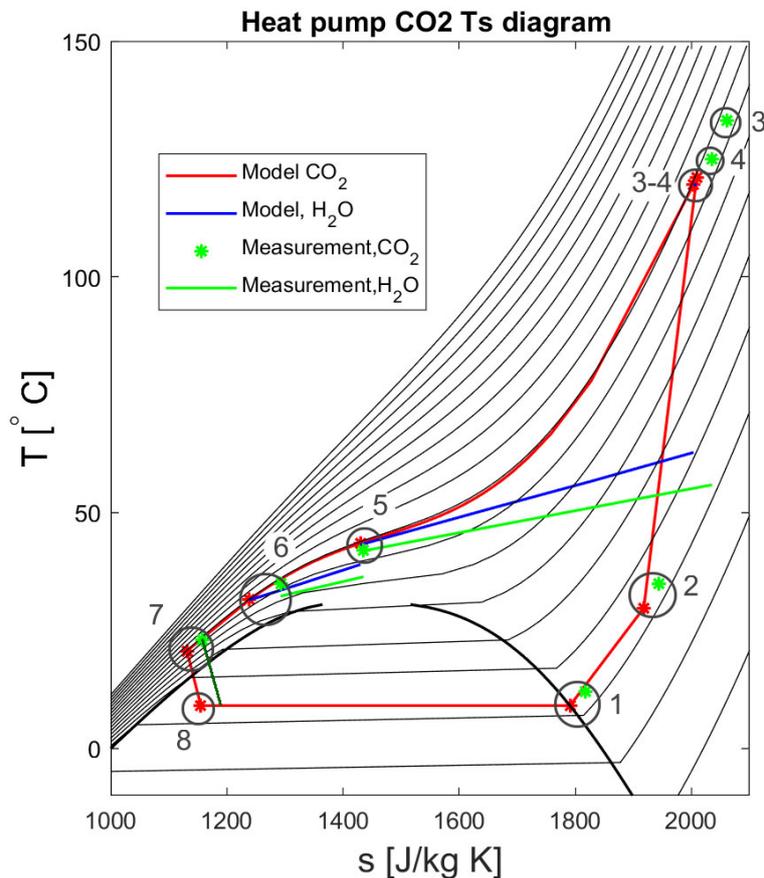


Abbildung 5: T-s Diagramm der CO<sub>2</sub> Wärmepumpe im tiefen Temperaturbereich

In Abbildung 5 ist der ideal modellierte CO<sub>2</sub> Kreislauf für eine tiefen Austrittstemperatur im T-s Diagramm rot dargestellt. Der gemessene Verdampfendruck (8-1) wurde als Basis für die Simulation verwendet. Die blauen Geraden stellen das Wasser in den simulierten Wärmetauschern dar. Die Wassermassenflüsse wurden gewählt um eine möglichst hohe Energie auskoppeln zu können. Die hellgrünen Punkte und Linien entsprechen Messwerten aus dem SFW System. Die Nummerierung entspricht in der Bedeutung derjenigen von den Abbildung 2 & 3.

In Abbildung 6 sind gemessene Werte der Eintrittstemperatur (schwarz gestrichelt) und der Austrittstemperatur (schwarz) in und vom Wärmetauscher 2 zu sehen. Es ist klar zu sehen, dass die Austrittstemperatur auf  $56^{\circ}\text{C}$  geregelt wird. Die Eintrittstemperatur liegt zwischen  $42$  und  $44^{\circ}\text{C}$  und nimmt jeweils mit zunehmender Zeit zu. Das Verhalten kommt daher, dass mit zunehmender Füllung des Speichers die Temperatur zunimmt. Die rote Kurve ist die zugeführte Energie im Verdampfer ( $T_8 - T_1$ ). Abbildung 7 zeigt die COP Verteilung für diesen Betriebszustand.

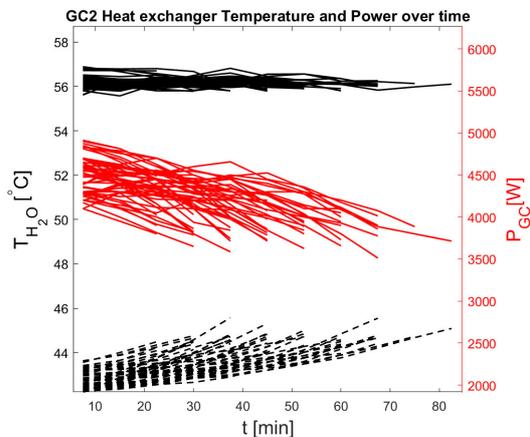


Abbildung 6: Verdampferleistung ( $T_8 - T_1$ ) (rot) für eine Heisswassertemperatur von  $56^\circ\text{C}$  (schwarz).

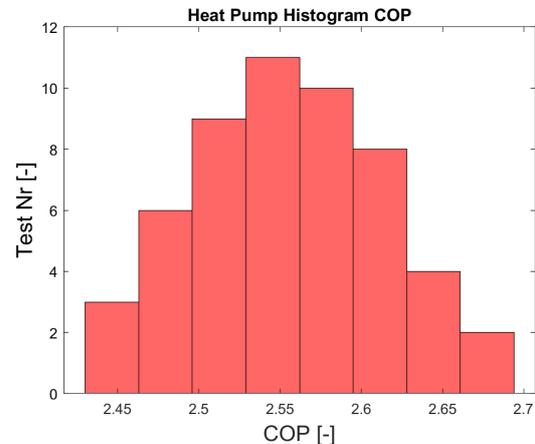


Abbildung 7: Resultierende COP's bei  $55^\circ\text{C}$

Aus heutiger Sicht kommt der niedere COP bei tiefen Heisswassertemperaturen aus zwei verschiedenen Gründen zustande. Es ist allerdings noch nicht ganz klar, ob nicht noch weitere Einflüsse vorhanden sind.

1. Bei tiefen Heisswassertemperaturen ist der WT1 ( $T_3 - T_4$ ) wasserseitig nicht im Betrieb um die Schichtung im Speicher nicht zu stören. Trotzdem strömt das Heissgas nach dem Kompressor ( $T_2 - T_3$ ) durch diesen WT. Durch Konvektion in den Wasseranschlüssen ergeben sich hier grössere Verluste.
2. Für die Berechnung der verschiedenen COP aufgrund der Messungen, wurde der Mittelwert der letzten Jahre verwendet. Hohe Endtemperaturen werden vor allem im Winter verlangt, da dann die Saunas im Betrieb sind. Niedere Heisswassertemperaturen werden vor allem im Sommer verlangt. Im Sommer ist die Eintrittstemperatur des Wassers in den WT3 (Wassertemperatur bei  $T_6$ ) systembedingt höher ist als im Winter. Damit kann nicht die gesamte zur Verfügung stehende Wärme genutzt werden und das Verhältnis von aufgebrauchter elektrischer Energie und ausgekoppelter Wärme verschlechtert sich, was sich in einem reduzierten COP widerspiegelt.

In den WP 3&4 wurden noch keine Arbeiten durchgeführt.

## 5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Für die  $\text{CO}_2$  Wärmepumpe wurde ein mathematisches Modell erstellt, welches den idealen  $\text{CO}_2$  Kreislauf simulieren kann. Dieses Modell hat geholfen, unrealistische Messwerte zu identifizieren.

Bevor die  $\text{CO}_2$  Wärmepumpe eingebaut wurde, hat man sie auf einem Prüfstand ausgemessen. Die COP's im System können allerdings abweichen, da die Randbedingungen nicht mit den Bedingungen im Prüfstand übereinstimmen müssen. Die Ergebnisse der Auswertung für hohe Temperaturhübe unter Voll- und Teillast im System entsprechen den Erwartungen. Unter Volllast wurde im Prüfstand ein COP von ca. 3.1 erreicht, im Teillastbereich einer von ca. 2.9. Die Auswertungen im System ergaben einen COP von 2.9 - 3.0 im Volllastbereich und von 2.8 im Teillastbereich. Der geringere Wert im Teillastbereich kann erklärt werden mit einem Abfall des isentropischen Wirkungsgrades des Kompressors für tiefere Frequenzen. Für kleinere Temperaturhübe werden allerdings geringere COP's erreicht als erwartet. Im Prüfstand wurden COP's zwischen um 3.3 erreicht, im System dagegen liegen diese Werte nur bei 2.4 - 2.7 (siehe Abbildung 7).



Da dies ein Prototyp ist, der für tiefere Heisswassertemperaturen noch nicht über alle Betriebspunkte optimiert wurde, ist es notwendig, dass die Regelung nochmals überarbeitet wird. So könnte man sich grundsätzlich vorstellen, dass auch für tiefere Heisswassertemperaturen der WT1 in Betrieb ist und Warmwasser produziert. Dies reduziert die Verluste und umgeht die Problematik der begrenzten Leistung des WT2. Allerdings ist dann unter Umständen die thermische Schichtung im Speicher nicht mehr ideal. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Änderung des Kompressionsdruckes. Wir sind mit dem Hersteller in Kontakt. Die Schwierigkeit dieser Änderungen besteht darin, dass zwar die Wärmepumpe für sich allein betrachtet einen höheren COP erreichen kann, aber das System (mit Speicher und Verbrauchern) einerseits die gewünschten Temperaturen nicht mehr liefern kann und andererseits auch höhere Verluste generiert.

Grundsätzlich ist es aber so, dass der Prototyp im vorgesehenen hochtemperaturigen Arbeitspunkt sehr gut optimiert wurde, sonst würde da kein COP von 2.9 erreicht. Ein Abweichen vom Auslegungspunkt (tieftemperaturiger Arbeitspunkt) kann daher schon dazu führen, dass die Wärmepumpe etwas weniger gut arbeitet. Der Grund für die Diskrepanz zwischen den Werten im Prüfstand und im System ist noch nicht vollständig verstanden und wir weiter untersucht.

## **6 Weiteres Vorgehen**

Aus heutiger Sicht werden alle WP's, entsprechend dem Antrag durchgeführt. Für die Gebäudewahl sind wir mit der Denkmalpflege Zürich (Lukas Knörr) in Kontakt. Von dem ausgewählten Gebäude wird ein Gebäudemodell für TRNSYS erstellt. Das bestehende Matlab Modell wird im Moment ergänzt, damit Wärme- und Druckverluste einbezogen werden können. Aus diesem Modell wird entweder ein physikalisches oder ein Greybox Modell für TRNSYS abgeleitet.

Die Haustechnikkomponenten werden mit Scheco diskutiert und das Potential für die optimale Wärmeabgabe wird evaluiert. Parallel dazu werden die benötigten zusätzlichen Types ausprogrammiert. Die Jahressimulationen werden danach durchgeführt und ausgewertet.

## **7 Nationale und internationale Zusammenarbeit**

Durch die Teilnahme am SWEET DeCarbCH WP5 [7] wird eine nationale Zusammenarbeit im Bereich der Hochtemperaturwärmepumpen gewährleistet.

## **8 Kommunikation**

Das Projekt ist noch nicht soweit fortgeschritten, dass eine Kommunikation gegen aussen sinnvoll wäre.

## **9 Publikationen**

Publikationen in einem wissenschaftlichen Journal sind zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.



## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Wohleben M., Moeri S. et al: Energie und Baudenkmal, Teil III: Haustechnik, Kantonale Denkmalpflege Bern und Kantonale Denkmalpflege Zürich, V1 – 2014
- [2] TRNSYS: **TR**ansient **SY**stem **S**imulation Tool, Vers. 18, Thermal Energy System Specialists, Madison, Wisconsin 53703
- [3] FORTRAN: Intel® Fortran Compiler 19.0 for Windows, Intel corporation
- [4] Zürcher C., Frank Th.: Bauphysik: Bau und Energie, vdf Hochschulverlag, ISBN 978-3-7281-3887-3, Zürich 2018
- [5] Brian T. Austin, K. Sumathy: Transcritical carbon dioxide heat pump systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pg 4013–4029, 2011
- [6] Le K.X. et al.: High Temperature Air Source Heat Pump Coupled with Thermal Energy Storage: Comparative Performances and Retrofit Analysis, Energy Procedia 158, pg. 3878-3885, 2019
- [7] SWEET DeCarbCH WP5: BFE SWEET, Decarbonisation of Cooling and Heating in Switzerland, WP5: Combination of renewables, heat transformation and storage for medium and high temperature heating as well as cooling, 2021-2025