

SACHBERICHT

WP2Q

Wärmepumpe mit zwei regenerativen Wärmequellen

FKZ: 03ENM0024

An das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

ratiotherm
Smart Energy Systems

ratiotherm GmbH & Co. KG
Wellheimer Str. 34
91795 Dollnstein

Julian Kruck
Telefon: 08422 997742
E-Mail: j.kruck@ratiotherm.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Stand der Technik

Am Markt sind verschiedene Wärmepumpen (WP), die zwei regenerative Wärmequellen nutzen, verfügbar. Hier sind die Produkte von *ENVOLA*¹, *Viessmann (Vitoset)*², *Consolar*³ (*Solaera*) und *res*⁴ zu nennen. Diese aktivieren die Wärmequellen über einen einzelnen Solekreislauf. Im Gegensatz hierzu wird bei WP2Q nur der Eisspeicher über einen Solekreislauf aktiviert, während Luft über Direktverdampfung für Heizbetrieb und eine aktive Regenerierung des Eisspeichers während des Betriebs genutzt werden soll. Eine solche aktive Regeneration während des Betriebes ist lediglich mit dem *Solaera*-System möglich (auf solarthermischer Basis). Allerdings dient dort der sehr kleine Eisspeicher (320 l) nur als Puffer, da er sehr wenig Energie zur Verfügung stellen kann und auch positive Temperaturspitzen abschwächt. Mit keinem der übrigen verfügbaren Marktprodukte ist eine aktive Regenerierung über den Kältekreis während des Betriebs möglich. Die Eisspeicher müssen daher üblicherweise deutlich größer als 5 m³ dimensioniert werden, weil sie über längere Phasen Wärmeenergie ohne zwischenzeitliche Regeneration bereitstellen müssen.

In der Wissenschaft werden üblicherweise Solarthermiekollektoren, vereinzelt auch passive Luftkühler, verwendet, um bspw. Bohrlöcher zu regenerieren. Aktive Regeneration, d.h. den Kältekreis und die Luftwärmequelle zu nutzen, um die Unterkühlung des Kältemittels wärmetechnisch zu nutzen, ist noch nicht untersucht worden.

In einem Vorprojekt wurde die *Hybridwärmepumpe+* (FKZ: 16KN056420) entwickelt, welche der Ausgangspunkt für das hier beschriebene Vorhaben ist. Dort wurden mehrere innovative Betriebsmodi integriert wie Parallelbetrieb beider Wärmequellen (über zwei Verdichter), Abtauung über die dort noch betrachtete horizontale Erdwärmequelle sowie verschiedene aktive Kühlbetriebe. Die *Hybridwärmepumpe+* zeigte signifikante Effizienzerhöhung gegenüber konventioneller Solewärmepumpen bei deutlich verringerter Entzugsenergie (und damit geringerer Fläche) aus dem Erdwärmekollektor. Jedoch stellte sich im Projektverlauf heraus, dass die Verschaltung und Regelung der Anlage zu komplex und damit insbesondere investitionstechnisch (sowohl in der Steuerungsentwicklung als auch für den Endkunden) nicht ökonomisch darstellbar waren. Darüber hinaus konnten während der experimentellen Untersuchungen weitere negative systemische Effekte (Kältemittel- und Ölverschiebungen) identifiziert werden, die im Regelbetrieb ein bedeutsames Havarierisiko darstellen. Insbesondere die Ölproblematik wurde bereits in der Literatur vermutet, jedoch nicht tiefergehend analysiert. Damit ergaben sich große technische Herausforderungen, die eine zeitnahe Produktentwicklung verhinderten.

2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Technische Hochschule Ingolstadt wurde als Unterauftragnehmer beschäftigt. Zwischen den Projektpartnern hat sich eine angenehme und produktive Arbeitsatmosphäre entwickelt. Durch regelmäßige Telefonate, Vor-Ort-Treffen für technische Analysen und Emailverkehr sowie halbjährliche Treffen zum Projektfortschritt fand ein reger Austausch zum Projektgegenstand statt. Die Projekt-Meilensteine wurden kontinuierlich diskutiert und die zeitlichen Vorgaben eingehalten.

3 Ergebnisse

Ziel des Projektes *WP2Q* war, ein geringeres Eisspeichervolumen V_{ES} als 5 m³ zu implementieren und die JAZ zu maximieren auf vergleichbare Werte mit reinem Solebetrieb. Gemäß des Projektantrages werden die Ergebnisse entsprechend der vier Arbeitspakete dargestellt. Es wurde ein Schema einer Kältekreisverschaltung entwickelt, welches wegen laufender Patentierungsplanung noch als vertraulich behandelt wird.

Die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes wurden an einem Prototyp aus dem Vorprojekt *Hybridwärmepumpe+* durchgeführt. Dieser war signifikant komplexer aufgebaut und verfügte über getrennte Verdichter für den Betrieb mit Luft und Sole als Wärmequelle und konnte die relevanten Betriebsmodi für *WP2Q* darstellen. Wegen zusätzlicher Wärmeübertrager und Ventile

¹ <https://www.envola.eu/>

² <https://www.viessmann.de/de/produkte/waermepumpe/vitoset-eis-energiespeicher.html>

³ <https://www.consolar.de/de/home/>

⁴ <https://res-energie.de/basiswissen/basis-eisspeicher/>

sind energetische Einbußen erwartbar, da die Verschaltung nicht auf das o.g. Kältekreischema optimiert ist. Jedoch wurde bereits festgestellt, dass der Solebetrieb im Vergleich zum Luftbetrieb verhältnismäßig ineffizient ist. Grund dafür sind zusätzliche Ventile und ein Wärmetauscher im Kältemittelstrom im Solebetrieb, während der Luftbetrieb über einen Economizer verfügt.

3.1 Arbeitspaket 1: Kältemittelverschiebung

Als erstes wurde der Effekt der Kältemittelverschiebung untersucht und Gegenmaßnahmen getestet. Als Kältemittelverschiebung wird hier bezeichnet, wenn bei einem Wechsel der genutzten Wärmequellen ein Teil des Kältemittels in dem nicht mehr genutzten Verdampfer verbleibt und somit dem Prozess mit dem dann genutzten Verdampfer nicht mehr zur Verfügung steht. Dies kann im Extremfall zu Kältemittelmangel und damit niedrigen Verdampfungsdrücken, hohen Überhitzungstemperaturen, hohen Heißgastemperaturen und niedriger Leistung und Effizienz führen.

Es wurden zwei Gegenmaßnahmen entwickelt:

1. Es ist möglich, eine größere Menge an Kältemittel in den Kältekreis zu geben. Durch einen großen Sammler kann diese Menge entsprechend gepuffert und dem jeweiligen Kreisprozess zur Verfügung gestellt werden. Diese Menge müsste allerdings so groß sein, dass sie die Ansammlung von Kältemittel in den jeweiligen Verdampfern übersteigt. Insbesondere bei Split-WPs (welches der genutzte Prototyp war) führt dies allerdings zu hohen Kältemittelfüllmengen. Diese sind aus Kostengründen – und bei natürlichen Kältemitteln aus Sicherheitsgründen – möglichst zu vermeiden.
2. Die Verdampfer können auf Niederdruckseite kurzgeschlossen werden. Dies kann entweder über entweder über ein 3-2-Wege-Ventil oder ein Druckminderungsventil (welches sonst für die aktive Regeneration genutzt wird). Damit kann der Verdichter das Kältemittel aus beiden Verdampfern entziehen und aktivieren. Über das Schließen der entsprechenden Expansionsventile kann der nicht mehr zu nutzende Verdampfer dann entleert werden. Sollte der nicht mehr zu nutzende Verdampfer einer signifikant niedrigeren Temperatur ausgesetzt sein als der zu nutzende Verdampfer, kann sich allerdings sogar zusätzliches Kältemittel dort anreichern und verflüssigen. Dem kann entgegengewirkt werden, indem das entsprechende Expansionsventil zu dem genutzten Verdampfer leicht geschlossen wird: Dadurch entsteht ein künstlicher niedriger Verdampfungsdruck, welcher dann eine Verdampfungstemperatur unterhalb des Temperaturniveaus des kalten, nicht mehr genutzten Verdampfers liegt. Dadurch wird dieser wieder entleert, statt dass sich Kältemittel dort anlagert. Dieser Prozess wurde am realen Prototyp erfolgreich getestet.

Zusammenfassend wurde eine Strategie entwickelt und getestet, um mit dem Problem der Kältemittelverschiebung umzugehen. Die entsprechende Logik muss in einer Kältekreisregelung konkret umgesetzt und im realen Betrieb analysiert werden.

3.2 Arbeitspaket 2: Ölverschiebung

Für die vermutete Ölverschiebung wurde zunächst der defekte Verdichter analysiert, welcher bei der *Hybridwärmepumpe+* nach etwa 110 Betriebsstunden ausfiel. Dies war ein Verdichter für den Luftbetrieb. Hier wurde eine Ölverschiebung vermutet, was bei Zwei-Kompressor-Systemen bereits in der Literatur für möglich gehalten wurde, ohne dass es genauer analysiert wurde. Ölverschiebung könnte zu einem lokalen Ölmenge in einem Verdichter und damit zu Schmierschäden führen.

Zunächst wurde daher eine Schadensanalyse am defekten Verdichter durchgeführt, um zu bestätigen, dass Schmierschäden vorliegen. Abbildung 2 zeigt die beiden Gleitlagerflächen inklusive der sichtbaren, makroskopischen Oberflächenschäden, sogenannter Fresser. Diese sind ein deutlicher Hinweis auf Schmierprobleme, bestätigt durch den technischen Support des Verdichterslieferanten.



Abbildung 1: Gleitlager des defekten Verdichters. Erkennbar sind die sog. Fresser (rote Markierungen), welche auf Schmierungsprobleme hindeuten.

Schmierschäden haben üblicherweise vor allem zwei Gründe: Zu hohe Heißgastemperaturen, welche das Verdichterschmieröl zersetzen und damit die Schmierfähigkeit langfristig schädigen können, und flüssige Kältemittelinjektion auf der Saugseite, welches sich mit dem Verdichteröl mischen und damit an den Gleitflächen die Schmierfähigkeit reduzieren kann.

Die 110 Betriebsstunden, in denen der Verdichter lief, wurden auf diese zwei möglichen Schadensursachen hin analysiert. Zu hohe Heißgastemperaturen traten nicht auf und konnten damit als Ursache ausgeschlossen werden. Flüssiges Kältemittel im Sauggas jedoch konnte nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Durch ein fluktuierendes Expansionsventil schwankte die Überhitzung an der Sauggasseite. Trotz Flüssigkeitsabscheider konnte somit nicht garantiert werden, dass kein flüssiges Kältemittel in den Verdichter gelangte. Nach der geringen Anzahl an Betriebsstunden ist dies als Ursache möglich, aber erfahrungsgemäß nicht wahrscheinlich.

Damit bleibt ein Ölmanangel als Schadensursache. Die Verdichter stehen am Boden der WP und die Rohrführung ist zu diesen hinab aufgebaut, um möglichst kein Öl im Kältekreis anzusammeln. Jedoch kann sich Öl über mehrere Wechsel der Wärmequelle hinweg in einem Verdichter ansammeln, wodurch in dem anderen ein Mangel entsteht, welcher zu reduzierter Schmierung führen kann. Dies kann durch Analyse des Öls – Menge und Zustand – in dem defekten Verdichter festgestellt werden, welches allerdings beim Ausbau nicht aufgefangen wurde. Damit ist eine Ölverschiebung wahrscheinlich, (zusätzliche) Probleme durch flüssiges Kältemittel aber nicht gänzlich ausgeschlossen.

Lösungen für Zwei-Verdichter-Kältekreise würden aufwändiges Ölmanagement erfordern, welches bei Anlagen für Einfamilienhäuser i.d.R. zu kostspielig ist, um ökonomisch durchführbar zu sein. Darum wird sich bei WP2Q auf ein Konzept mit einem einzelnen Verdichter konzentriert. Hierbei müssen die Expansionsventile weiterhin optimal eingestellt werden, um Flüssigkeit im Sauggas zu vermeiden, aber eine Verschiebung des Schmieröls kann nicht mehr auftreten.

3.3 Aktive Regeneration

Aktive Regeneration ist ein Betriebsmodus, bei dem die Luftwärmequelle Wärme bereitstellen soll, welche über den Verdichter dem Eisspeicher (inklusive oder exklusive dem Heizungswärmeübertrager, also seriell oder parallel zum Heizbetrieb) zugeführt werden soll. Das entwickelte, vertrauliche Kältekreischema erlaubt entsprechende Kältemittelflüsse und Wärmeübergaben.

Für die Messungen wurde ein kleiner Eisspeicher gebaut. Dieser umfasste etwa 200 l Wasser und enthielt einen etwa 10 m langen Wellrohr-Spindelwärmeübertrager. Damit konnte die Solesseite mit genügend Wärmekapazität ausgestattet werden, um auch im Regenerationsbetrieb stabilen Senkenbetrieb auf niedrigem Temperaturniveau darstellen zu können. Aufgrund der geringen Größe des Wärmeübertragers und dem erhöhten Strömungswiderstand des Wellrohrs, waren Volumenstrom

und Wärmepumpenleistung insbesondere im seriellen Regenerationsbetrieb limitiert, um hohe Temperaturdifferenzen (in der Sole selbst sowie zum Eisspeicher) zu vermeiden.

Die Ergebnisse sind aufgelistet in Tabelle 1. Auf die einzelnen Messungen wird im Folgenden genauer eingegangen. A7W45 als Messung Nr. 7 dient als Vergleich für die parallelen Heizungs- und Regenerationsmessungen bei hohen Heizungstemperaturen. COP_{ges} wird berechnet durch die Summierung der Heiz- und Regenerationsleistung für die Nutzleistung.

Tabelle 1: Ergebnisse der aktiven Regenerationsmessungen, seriell und parallel (H+R) mit verschiedenen Einstellungen des Druckreduzierventils. Ebenso gezeigt ist die Vergleichsmessung A7W45 für die Messungen mit hohen Heizungstemperaturniveaus.

Nr.	Messung	T_A	$T_{heiz,RL}$	$T_{heiz,VL}$	$T_{sole,RL}$	$T_{sole,VL}$	\dot{Q}_{heiz}	\dot{Q}_{reg}	P_{el}	COP_{heiz}	COP_{ges}
-	-	°C	°C	°C	°C	°C	kW	kW	kW	-	-
1	Ser. Reg.	5,8	-	-	13,3	17,6	0,0	2,3	0,3	-	7,3
2	H+R Byp.	4,5	25,0	28,3	5,0	6,8	3,8	0,5	0,8	4,8	5,4
3	H+R Byp.	6,3	29,9	30,9	13,1	22,2	0,8	2,5	0,8	1,0	4,2
4	H+R Byp.	7,1	40,0	40,9	14,0	24,7	0,9	3,0	1,0	0,9	3,8
5	H+R V100	7,0	40,0	44,3	11,3	16,3	3,6	1,4	1,1	3,3	4,4
6	H+R V50	3,9	40,0	44,6	8,6	11,4	4,0	0,9	1,1	3,6	4,5
7	A7W45	7,0	40,0	45,1	-	-	4,7	0,0	1,1	4,1	4,1

3.3.1 Messungen serielle Regeneration

Die serielle Regeneration kann mit dem vertraulichen Kältekreischema dargestellt werden. In dem genutzten Prototyp wurde ein Bypass genutzt, welcher im Kältekreischema nicht vorgesehen ist. Kleine Abweichungen im Betrieb sind somit zu dem Kältemittelschema aus WP2Q vorhanden, weshalb die hier gemessenen Effizienzen etwas niedriger erwartet werden als bei einem optimierten Prototyp.

Abbildung 3 zeigt die Leistungen und Temperaturen im seriellen aktiven Regenerationsbetrieb. Der Verdichter fährt mit 25 % der maximalen Drehzahl. Nach einer etwa 15-minütigen Stabilisierungsphase – sowohl des Kältekreises selbst als auch der sensiblen Wärmekapazitäten – beginnt eine etwa einstündige Eis-Abtauphase. Hierbei bleiben die Soletemperaturen annähernd konstant, da sowohl die Regenerationsleistung als auch die Senkentemperaturen konstant bleiben. Insgesamt ist der Betriebsmodus erwartbar effizient mit einer Regenerationsleistung von etwa 2,3 kW und einem COP_{ges} von 7,3. Anschließend steigen die Soletemperaturen aufgrund der sensiblen Temperaturerhöhung im Eisspeicher an, wodurch Regenerationsleistung und COP_{ges} sinken. Die Ergebnisse in Relation zu den anderen Messungen sind in Tabelle 1 als Messung Nr. 1 dargestellt.

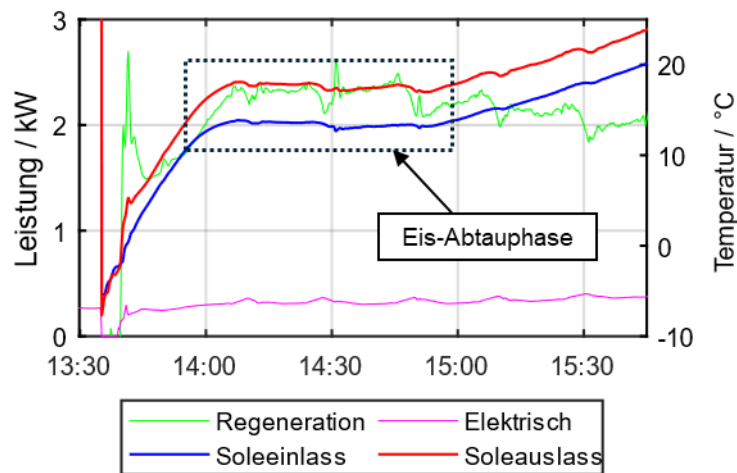


Abbildung 2: Serieller aktiver Regenerationsbetrieb bei etwa 7 °C Außenlufttemperatur. Während der Eis-Abtauphase sind konstante Soletemperaturen erkennbar.

Der Regenerationsbetrieb ist somit hocheffizient und stabil durchführbar. Bei einem entsprechend größer dimensionierten Eisspeicherwärmeübertrager samt Umwälzpumpe sollten Leistung und Effizienz noch höher sein, da der Temperaturgradient zwischen Sole und Eisspeicher geringer wäre. Dies war mit dem vorhandenen Eisspeicher aber nicht darstellbar, die Funktion des Koneptes ist aber nachgewiesen und kann weiter optimiert werden.

3.3.2 Messungen parallele Regeneration

Bei dem aktiven Regenerationsbetrieb parallel zum Heizbetrieb (Heizen und Regenerieren; H+R) wird Wärme auf zwei verschiedenen Temperaturniveaus abgegeben. Dies kann grundsätzlich zugunsten von Heizungswärme oder WW-Bereitung und zusätzlich zur Regeneration des Eisspeichers. Anschließend entspannt es und kann im Luftwärmeübertrager wieder verdampfen. Dieser muss eine höhere Wärmeleistung übertragen als ohne Unterkühlung im Eisspeicherwärmeübertrager, weshalb dieser Wärmeübergang einen erhöhten Temperaturgradienten benötigt und damit einen niedrigeren Verdampfungsdruck. Theoretisch ist dieser Betriebsmodus daher weniger effizient als ein reiner Heizbetrieb.

Auch hier wurde zunächst ein Bypass genutzt, um Druckverluste zu minimieren. Der Sammler befand sich hinter dem Heizungswärmetauscher. Die Beobachtung bei etwa 7 °C Außenlufttemperatur und 40 °C Heizungsrücklauftemperatur werden in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei läuft der Kompressor auf 50 % der möglichen Drehzahl, da bei diesem Betriebsmodus der Eisspeicher – aufgrund nur geringer Regenerationsleistung – nicht der limitierende Faktor sein würde, gleichzeitig aber diese Drehzahl üblicherweise reproduzierbarere Ergebnisse liefert. Es ist beobachtbar, dass die Regenerationsleistung sehr hoch ist und die Heizleistung noch unterhalb der elektrischen Leistung. Der COP_{heiz} ist entsprechend gering, während der gesamte COP_{heiz} mit etwa 3,8 nur geringfügig unter der Vergleichsmessung A7W45 liegt ($COP_{\text{heiz}} = 4,1$). Bei geringerer Heizungstemperatur konnte sowohl die Stabilisierungsphase verkürzt werden als auch das Verhältnis von Regenerationsleistung zu Heizleistung zugunsten der Heizleistung beeinflusst werden. Tabelle 1 zeigt u.a. die Messwerte bei verschiedenen Heizungsrücklauftemperaturen als Messung Nr. 2 bis 4.

Es wurde vermutet, dass der Effekt auftrat, weil sich ein Großteil der Kondensation in den Eisspeicherwärmeübertrager verschiebt. Da dort signifikant niedrigere Senkentemperaturen auftreten, gibt das Kältemittel seine Kondensationswärme an den Eisspeicher ab. Der Hochdruck sinkt und die Kondensationstemperatur ist nur vergleichbar mit der Heizungstemperatur. Damit passiert im Heizungswärmeübertrager quasi nur noch Heißgasauskühlung. Bei geringeren Heizungstemperaturen ist der Temperaturgradient zwischen Eisspeicherwärmeübertrager und Heizungswärmeübertrager geringer, weshalb sich die Kondensation nicht mehr (vollständig) in den Eisspeicherwärmeübertrager verschiebt, sondern im Heizungswärmeübertrager bleibt.

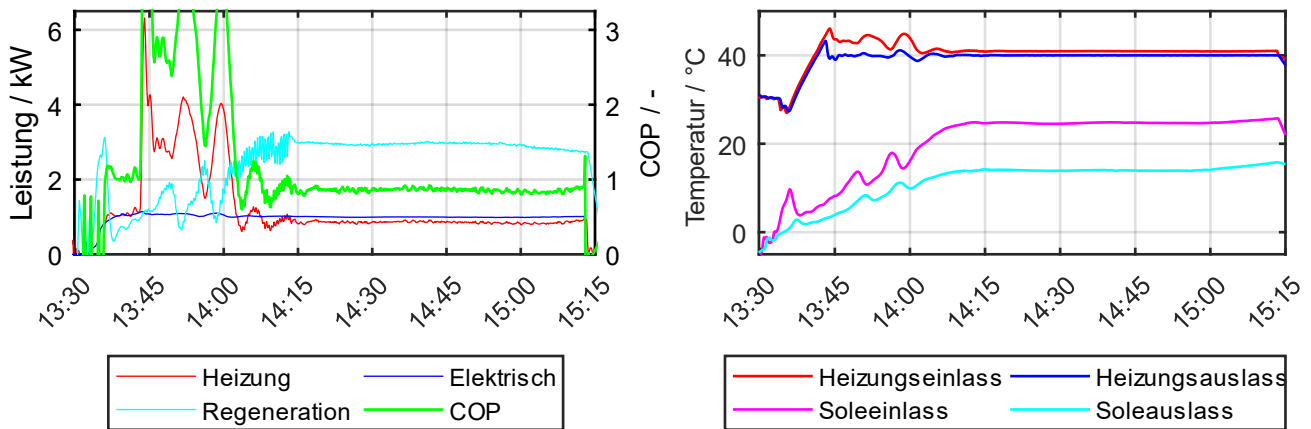


Abbildung 3: Darstellung des aktiven Regenerationsmodus mit parallelem Heizbetrieb bei hoher Senkentemperatur. Zwischen Heizungs- und Eisspeicherwärmeübertrager ist ein Bypass geöffnet. Links werden die Leistungen und die Effizienz dargestellt, rechts die Temperaturniveaus der beiden Wärmesenken Heizung und Eisspeicher.

Gegen diesen Effekt wurde eine Gegenmaßnahme entwickelt und geprüft. Insbesondere bei hohen Heizungstemperaturen muss die Heizleistung gegenüber der Regenerationsleistung erhöht sein, um den Heizbetrieb nicht zu stören. Als Aktor wurde dabei ein Druckreduzierventil zwischen Heizungs- und Eisspeicherwärmeübertrager identifiziert. Dies führt zu einem Druck- und damit Temperaturabfall im Kältemittelstrom, wodurch der Temperaturgradient des Kältemittels zur Sole geringer ist. Damit kann sich die Kondensation nicht mehr in den Eisspeicherwärmeübertrager verschieben. Die durchgeführten Messungen bei vollständig und teil-geöffnetem Druckreduzierventil ohne Bypass sind in Tabelle 1 als Messungen 5 und 6 zu sehen.

Die Messung bei vollständig geöffnetem Druckreduzierventil ist in Abbildung 5 zu sehen. Dies führte bereits zu einem Druckabfall um ca. 6 bar zwischen Heizungs- und Eisspeicherwärmeübertrager. Erkennbar ist eine kurze Stabilisierungsphase und anschließend eine hohe Heizleistung und eine niedrige Regenerationsleistung. Nach etwa einer Stunde wird die Eis-Abtauphase erreicht, erkennbar an den konstanten Soletemperaturen. Die Kondensation findet vornehmlich im Heizungswärmeübertrager statt, die Maßnahme wird also als erfolgreich angesehen. Allerdings ist der COP_{heiz} mit etwa 3,3 relativ gering, der gesamte COP_{ges} mit 4,4 aber höher als bei reinem Heizbetrieb A7W45, wo der COP_{heiz} (gleichbedeutend mit COP_{ges}) bei 4,1 lag. Dies deutet darauf hin, dass die Aufteilung in Heiz- und Regenerationsleistung noch nicht optimiert ist. In einer Messung mit auf 50 % geöffnetem Druckreduzierventil E2 wurde der Anteil an Heizleistung weiter erhöht und an Regenerationsleistung reduziert. Der COP_{heiz} lag bei dieser Messung bei 3,6, der gesamte COP_{ges} bei 4,5.

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Der Aktuator zur Aufteilung auf Heiz- und Regenerationsbetrieb ist das Druckreduzierventil zwischen dem Heizungs- und dem Eisspeicherwärmeübertrager. Weitere Messungen sind nötig, um das Optimum bzw. eine Regelungslogik zu finden, um gleichzeitig die Heizlast zu bedienen und mit möglichst hohem (gesamt) COP_{ges} zu regenerieren. Dies beinhaltet Parameterstudien und darauf basierend bessere Modellierung zur Entwicklung von Wärmenamagementlogiken.
2. Der gesamte COP_{ges} , also durch die Berechnung der Nutzleistung als Summe von Heiz- und Regenerationsleistung, lässt sich gegenüber dem reinen Heizbetrieb signifikant erhöhen. Dies entspricht den Erwartungen und ermöglicht das hocheffiziente Einbinden von Niedertemperaturwärmesenken, beispielsweise Wärmenetze auf unterschiedlichen Temperaturniveaus oder Industrie- und Raumwärme zu verbinden, ohne das Temperaturniveau runtermischen zu müssen.

Die Regenerationsbetriebe konnten somit erfolgreich dargestellt werden, benötigen aber eine unerwartet höhere Regelungskomplexität. Ebenso sind die Ergebnisse prinzipiell übertragbar, der Prototyp ebenso wie der Eisspeicher sind aber nicht auf diese Betriebsmodi hin optimiert. Die Vermutung liegt nahe, dass die Effizienz insbesondere über den Eisspeicher sich noch erhöhen lässt. Auch bspw. Erdreichwärmeübertrager sind hier als Speicherkomponente denkbar.

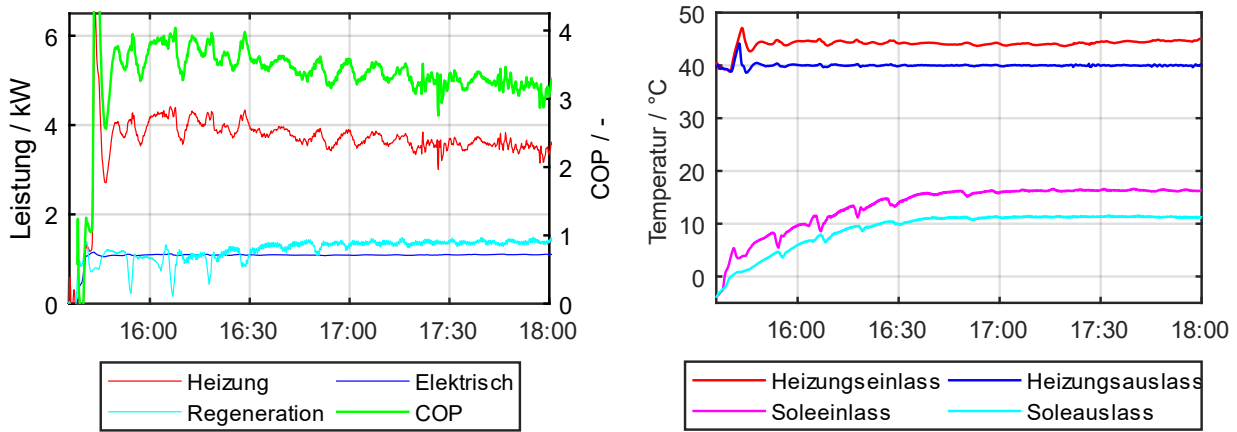


Abbildung 4: Darstellung des aktiven Regenerationsmodus mit parallelem Heizbetrieb bei hoher Senkentemperatur. Zwischen dem Heizungs- und dem Eisspeicherwärmeübertrager ist das Druckreduzierventil genutzt, aber vollständig geöffnet. Links werden die Leistungen und die Effizienz dargestellt, rechts die Temperaturniveaus der beiden Wärmesenken Heizung und Eisspeicher.

3.3.3 Simulative Potenzialanalyse

Mit den gemessenen Ergebnissen wurde eine Simulationsumgebung aufgebaut, um das Prinzip der aktiven Regeneration zu verdeutlichen und das Potenzial abzuschätzen. Diese wurde mit MATLAB/Simulink/CARNOT aufgebaut und inkludierte Raumheizung (RH) und WW als Wärmesenken, Umgebungsluft als Wärmequelle sowie einen flexibel genutzten Eisspeicher als Wärmesenke und Wärmequelle.

Die Modellierung der Betriebsmodi erfolgte folgendermaßen:

- (1) Heizen mit Luft als Wärmequelle: Kennfeld basierend auf Labormessungen aus dem Projekt *Hybridwärmepumpe+*;
- (2) Heizen mit Eisspeicher als Wärmequelle: Kennfeld basierend auf Labormessungen aus dem Projekt *Hybridwärmepumpe+*. Aufgrund des ineffizienten Solebetriebes wurde der COP_{heiz} insgesamt um 0,3 erhöht. Damit waren die Messungen bei 0 °C Soletemperatur vergleichbar mit den Messungen bei 2 °C Lufttemperatur. Bei höheren Sole- und Lufttemperaturen sowie höheren Senkentemperaturen (z.B. WW) fiel die Effizienz des Solebetriebes weiterhin deutlich ab. Zusätzlich wurde bei dem Prototyp ein deutlich kleinerer Verdichter für den Solebetrieb eingebaut. Um die Heizleistung mit dem Luftbetrieb vergleichbar zu machen, wurde diese im Solebetrieb um 4 kW erhöht;
- (3) aktive Regeneration des Eisspeichers, aufgeteilt in
 - (3a) serielle Regeneration nur wenn weder RH noch WW gefordert waren: Kennfeld basierend auf Labormessungen aus dem Projekt *Hybridwärmepumpe+*;
 - (3b) serielle Regeneration alternierend – mit fester zeitlicher Aufteilung – zu RH (3 h RH und 1 h aktive Regeneration im Wechsel): Kennfeld basierend auf Labormessungen aus dem Projekt *Hybridwärmepumpe+*;
 - (3c) parallele Regeneration zu RH (H+R): Kennfeld basierend auf Labormessungen aus dem Projekt *Hybridwärmepumpe+*. Korrekturen wurden anhand der Messungen folgendermaßen abgeschätzt: Der COP_{heiz} reduziert sich um 5 % gegenüber reinem Luftbetrieb, wodurch sich die elektrische Leistungsaufnahme entsprechend erhöht. Zusätzlich wird 10 % der Heizleistung als Regenerationsleistung übertragen.

Teillastbetrieb wurde stets entsprechend Invertermessungen zum Solebetrieb modelliert. Aufgrund der Verfügbarkeit von Messergebnissen erfolgte dies ebenso für den Luftwärmequellenbetrieb.

Das Wärmequellenmanagement wählte grundsätzlich – unter Rücksichtnahme auf realistische Mindestlaufzeiten, um Takten zu verhindern – zwischen den Heizungsbetriebsmodi (1) und (2) gemäß folgenden Kriterien aus:

- a) Ist die Soletemperatur um T_{biv} Kelvin höher als die Außenlufttemperatur?
- b) Ist die Lufttemperatur niedriger als $T_{\text{a,biv}}$?

Darüber hinaus wird der Bedarf an Regeneration (3) erkannt durch:

- c) Ist der SOC des Eisspeichers unter SOC_{reg} ?
- d) Ist die Lufttemperatur höher als $T_{a,reg}$?

Abbildung 6 zeigt exemplarisch den Winterbetrieb paralleler aktiver Regeneration nach (3c) mit einem Eisspeichervolumen von 5 m^3 . Die Einstellparameter sind als Simulation 1 in Tabelle 2 dargestellt. Serielle Regeneration nach (3a) und alternierender Regenerationsbetrieb nach (3b) hatten stets niedrigere JAZ als parallele Regeneration nach (3c).

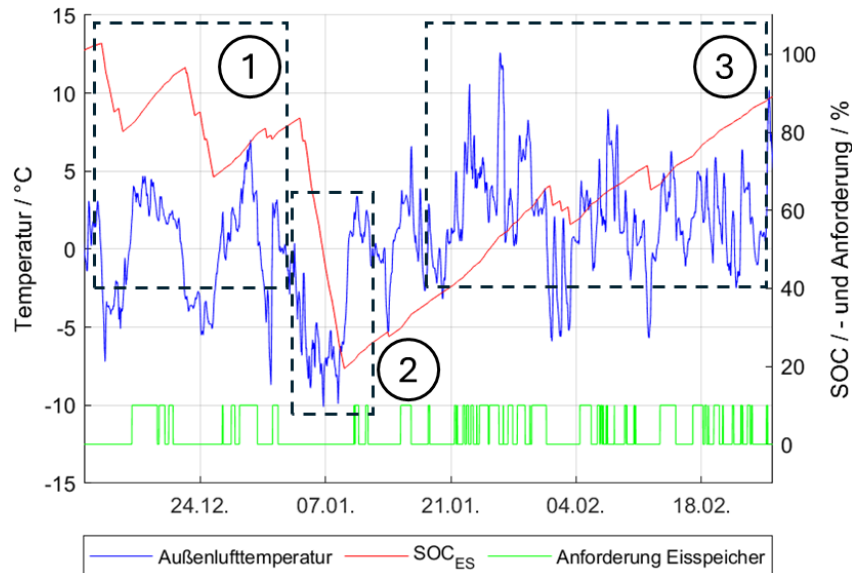


Abbildung 5: Betrieb der WP2Q-ZQWP über 8 Winterwochen. Die Zeiträume zeigen verschiedene Erkenntnisse: 1 zeigt erfolgreichen Regenerationsbetrieb, 2 den Grenzfall der Eisspeichergröße und 3 nicht nützliche aktive Regeneration.

Erkennbar ist die Nutzung des Eisspeichers bei niedrigen Außenlufttemperaturen dadurch, dass der SOC_{ES} sinkt. Aktive Regeneration ist durch die Anforderung Eisspeicher verdeutlicht, die aktive Regeneration beinhaltet. Dabei steigt der SOC_{ES} deutlich steiler an als bei passiver Regeneration aus dem Erdreich. In Zeitabschnitt 1 ist der aktive Regenerationsbetrieb gezeigt. Der SOC_{ES} variiert im Phasenwechsel und steht für die Kältephase in Zeitabschnitt 2 zur Verfügung. Dieser verdeutlicht auch den Grenzfall für diese Eisspeichergröße, da dieser weitgehend auskühlt. Zeitabschnitt 3 beinhaltet nicht nützliche aktive Regeneration: Da keine Kälteperiode in dem gewählten Wetterdatensatz folgt, wird der hohe SOC_{ES} nicht mehr benötigt und man könnte ihn passiv aus dem Erdreich regenerieren lassen. Hier wird durch die Regeneration elektrische Energie verbraucht, welche mit einer prädiktiven Logik eingespart werden könnte.

Tabelle 2 zeigt die Vergleiche mit reinen LWP und ESWPs. Erkennbar ist, dass die WP2Q-ZQWP vergleichsweise ineffizient zu diesen WPs ist. Es ist aber auch deutlich, dass dies primär an wenig effizientem Solebetrieb liegt: Die reine ESWP ist kaum effizienter als die LWP. **Der ineffiziente Solebetrieb ist ein signifikanter Einfluss auf die Jahreseffizienz der WP2Q-ZQWP.** Zusätzlich besteht beim **Wärmequellenmanagement** und bei der **Modellierung der aktiven Regeneration** noch weiteres **Verbesserungspotenzial** über die analysierten Maßnahmen und Parameter hinaus. Auch hier war aufgrund des ineffizienten Solebetriebs aber keine nennenswerte Verbesserung möglich. Während das Konzept der aktiven Regeneration also dargestellt werden konnte, wird ein optimiertes Gesamtsystem benötigt, um angemessene Effizienzen zu erreichen. Diese Punkte verhindern noch die Potenzialausschöpfung des WP2Q-Systems und müssen noch genauer untersucht werden.

Tabelle 2: Ergebnisse der simulativen Potenzialanalyse der aktiven Regeneration

Parameter	Sim.	T_{biv}	$T_{a,biv}$	SOC_{reg}	$T_{a,reg}$	V_{ES}	SOC_{min}	JAZ
Einheit	Nr.	K	°C	%	°C	m^3	%	-
WP2Q - parallel	1	3	0	90	2	5	19,4	3,5
LWP	2	-	-	-	-	-	-	3,5
ESWP	3	-	-	-	-	40	21,6	3,7

3.4 Gesamtevaluation

Das Projekt WP2Q hat das Potenzial der aktiven Regeneration demonstriert. Es wurde eine Kältekreisverschaltung entwickelt, welche auf einem Kompressor basiert. Dadurch wird die komponentenkritische Verdichterölverschiebungen vermieden, was bei Zwei-Kompressor-Verschaltungen ein Problem darstellte. Allerdings können noch immer Kältemittelverschiebungen auftreten: Es wurden Methoden entwickelt und am Prototyp verifiziert, um diese Verschiebung bei dem vorgestellten Ein-Kompressor-System zu beheben.

Darüber hinaus wurde die aktive Regeneration realisiert und getestet. Zunächst wurde dabei das serielle Regenerieren geprüft, welches die Luftwärmequelle nutzt, um dem Solekollektor (ob Erdwärme oder Eisspeicher) Wärme zuzuführen. Aufgrund des genutzten Kältekreises funktionierte dieser Betriebsmodus mit hoher Effizienz ($\text{COP}_{\text{ges}} = 7,3$) sowie hoher Leistung ($\dot{Q}_{\text{reg}} = 2,3 \text{ kW}$ bei 25 % Verdichterdrehzahl) auch bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Wärmequelle und Wärmesenke.

Ebenso wurde der Betrieb des parallelen Regenerierens demonstriert. Hierbei wird im üblichen Luft-Heizbetrieb – Luftwärmequelle und Kondensation im Heizungswärmeübertrager – das Kältemittel anschließend im Sole-Wärmeübertrager zusätzlich unterkühlt. Die dort freiwerdende Wärme kann dem Solekollektor zugeführt werden, welcher so mit geringem Aufwand regeneriert werden kann. Prinzipiell funktioniert der Betriebsmodus, allerdings muss ein zusätzliches Druckreduzierventil zwischen den Wärmesenken genutzt werden, um die Aufteilung der Wärmeabgaben zu steuern.

Die Betriebsstrategie der aktiven Regeneration wurde intensiv analysiert. **Für die Logik des Wärmequellenmanagements wurde eine Lösung gefunden, welche aber noch Verbesserungspotenzial birgt.** Aktuell ist aufgrund nicht optimierter Hardware und dem Wärmequellenmanagement zwar das Potenzial der Betriebsstrategie dargestellt worden, die JAZ sowie die Eisspeichergröße aber noch nicht optimiert für eine ökonomische Lösung.

4 Verwertung

Die ZQWP mit einem Kompressor entspricht dem erwarteten Potenzial. Die Probleme, welche bei Kältekreisen mit zwei Kompressoren auftreten, sind entweder beherrschbar bzw. sollten nicht auftreten. Darüber hinaus kann der aktive Regenerationsbetrieb (sowohl seriell als auch parallel zum Heizbetrieb) durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurde ein signifikanter Markt für das WP2Q-Konzept identifiziert: Dicht bebaute, urbane Siedlungen (von Reihenhaus- zu Holz-Neubaugebieten) haben oftmals platz- sowie schalltechnische Limitationen. *ratiotherm* als regionaler Wärmepumpenhersteller und KMU benötigt diese Nischenprodukte, um mit großen Serienherstellern konkurrieren zu können. Spezielle Lösungen für dieses Marktsegment werden entsprechend als vielversprechend eingeschätzt.

Allerdings besteht noch ein markantes Risiko in der Umsetzung des WP2Q-Konzeptes: Die Lösungsansätze der Verschiebungsproblematiken sowie die Effizienz der Betriebsmodi sind noch nicht in praktischem Umfeld getestet. Dies erfordert nicht nur eine optimierte Kältekreisverschaltung (anstelle der für dieses Projekt verwendete sehr flexible Verschaltung), sondern auch eine entsprechende Steuerung der Komponenten (Kältemittelaktivierung sowie Wärmequellenmanagement). Diese Entwicklung und Analyse eines optimierten Prototyps sind von hoher Komplexität und das Erreichen eines effizienten Gesamtsystems herausfordernd. Aus diesem Grund ist eine unmittelbare Verwertung in einem marktverfügbaren Produkt nicht realistisch und die Entwicklung mit hohem finanziellem Risiko für ein KMU verbunden.

Die Ergebnisse des Projektes sind vielversprechend, sodass *ratiotherm* ein Folgeprojekt anstrebt. Hierbei soll die Idee einer klein dimensionierten Wärmequelle weiter, zusätzlich aber noch die Schallthematik verfolgt werden. Eine marktnahe WP soll konstruiert und zusammen mit einem Spitzenlastkollektor als ein abgestimmtes Gesamtsystem entwickelt werden. Dieses soll anschließend im Labor vermessen und in einem Demonstrationsgebäude verbaut, gemonitort und optimiert werden. Dafür wird mit der *Technischen Hochschule Ingolstadt*, dem (Erd-)Wärmekollektorhersteller *MEFA* und dem Haushersteller *Taglieber* in dem Projekt *SLEEK-WP* (siehe Projektskizze im Anhang) kooperiert.

Im Rahmen von **SLEEK-WP** soll über eine Patentierung des Kältekreisconzeptes entschieden werden.

4.1 Verwertungsplan

Die Projektskizze für **SLEEK-WP** wurde im Juli 2024 eingereicht. Geplant wird ein Projektstart Anfang 2025. Durch die Projektlaufzeit von drei Jahren wird eine anschließende Markteinführung im Jahr 2028 angestrebt, wie in Tabelle 1 gezeigt. Details zur weiteren geplanten Verwertung sind im Skizzentext **SLEEK-WP** zu finden.

Tabelle 3: Verwertungsplan

	2024	2025	2026	2027	2028
WP2Q					
SLEEK-WP					
Markteinführung					

5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Auf dem Markt verfügbar sind lediglich Mehr-Quellen-WPs, welche weiterhin mit sehr großen Wärmequellen als Saisonspeicher arbeiten (bspw. *Vitaset* von *Viessmann*) oder als wenig flexible Kurzzeitspeicher (bspw. „Speicherwärmepumpe“ von *Envola*). Forschungsprojekte beschäftigen sich ebenso mit der Verkleinerung von Wärmequellen, jedoch ist weiterhin kein System bekannt, welches aktiv über den Kältekreis regeneriert. Bisher wird Regeneration zumeist über Solarthermie realisiert. Das Projekt **WP2Q** hat somit den Wissensstand im Bereich der Mehr-Quellen-WPs und insbesondere der Wärmeabgabe durch Unterkühlung nennenswert erweitert.

6 Veröffentlichungsplan

Die Ergebnisse werden einerseits in studentischen Abschlussarbeiten beschrieben, andererseits im Rahmen einer Dissertation in wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht. Hierbei ist mindestens eine Publikation vorgesehen bezüglich der hier durchgeführten Messungen und der simulativen Potenzialstudie. Um eine eventuelle Patentierung der Kältekreisverschaltung zu ermöglichen, muss mit der detaillierten Veröffentlichung allerdings noch abgewartet werden.

7 Bezug zu förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben **WP2Q** beinhaltet wesentliche Ziele des 7. Energieforschungsprogramms. Insbesondere das Ziel 3.1.1 Energieoptimierte und klimaneutrale Gebäude mit dem Unterpunkt a) Maßnahmen der angewandten Forschung und Entwicklung (FuE) wird mit der hier entwickelten dezentralen Wärmepumpenlösung bearbeitet, welche als Lösung für den großen Reihenhausmarkt entwickelt wurde. Darüber hinaus beschäftigt sich das Projekt mit der Weiterentwicklung geothermischer Energiequellen 3.8.2, indem neue Betriebsstrategien für Eisspeicher analysiert werden, welche diese nur noch als Spitzenlastwärmequelle mit aktiver Regeneration in Wärmepumpensysteme einbinden. Diese förderpolitischen Ziele werden grundsätzlich in der „Mission Wärmewende 2045“ des 8. Energieforschungsprogramms des BMWK fortgeführt.

8 Weitere Verwendung

Die Ergebnisse aus dem Mikroprojekt werden für einen Folgeantrag genutzt, um die Potenziale des Konzeptes final bewerten zu können. **Hierfür wurde mit weiteren Forschungspartnern eine Skizze für das Projekt SLEEK-WP eingereicht.** Der Skizzentext ist im Anhang zu finden.

9 Anhang

- Skizzentext **SLEEK-WP**