



Schlussbericht zum Vorhaben
**„Implementierung eines Regelalgorithmus zur Eigenver-
brauchsoptimierung mit anschließender Bewertung des
Gesamtsystems in einem Pilotsystem“**

im Rahmen des Eurostars Projekts
E! 1853 EuteQ
**„Eutektische Salzhydratmischungen mit hoher Energiedichte für Wärmepumpen-Puffer-
speicher zur Steigerung der Heizautarkie“**

Dr. Andreas Wimmer

varmecco GmbH & Co. KG
Johann-Georg-Weinhart-Straße 1, D-87600 Kaufbeuren

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2252B
Projektlaufzeit: 01.10.2022 - 31.03.2025

Inhalt

Teil I: Kurzbericht.....	3
Ziel des Verbundvorhabens / Aufgabenstellung	3
Planung und Ablauf des Vorhabens	4
Wesentliche Ergebnisse	4
Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
Teil II: Eingehende Darstellung.....	5
Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	5
AP7: Entwicklung eines Steuerungssystems zur Maximierung des PV-Selbstverbrauchs	5
AP8: Implementierung des Regelungsalgorithmus	6
AP10: Installation und Bewertung eines Pilotsystems.....	6
Energiebilanz der Heizzentrale.....	7
COP der Wärmepumpenkaskade	8
Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	9
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	10
Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses	10
Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	10
Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	10

Teil I: Kurzbericht

Ziel des Verbundvorhabens / Aufgabenstellung

Gesamtziel des 30-monatigen Verbundprojektes der Partner Cowa Thermal Solutions AG (Root Schweiz), ZAE - Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (Garching, Deutschland), HSLU - Hochschule Luzern (Luzern, Schweiz) und varmeco GmbH & Co.KG (Kaufbeuren, Deutschland) war die Entwicklung von Eutektischen Salzhydratmischungen mit hoher Energiedichte für Wärmepumpen-Pufferspeicher zur Steigerung der Heizautarkie.

PV-betriebene Wärmepumpensysteme sind eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des europäischen Gebäudebestands. Eine große Herausforderung ist die zeitliche Diskrepanz zwischen PV-Produktion und Energieverbrauch, die zu einer begrenzten Selbstversorgung führt. Um die Heizungs-Selbstversorgung zu erhöhen, wird eine Wärmespeicherkapazität benötigt, die es ermöglicht, überschüssige PV-Energie vom Mittag (über die Wärmepumpe) auf die Nacht zu übertragen, wo ein großer Heizbedarf besteht. In Gebäuden ist der Platz begrenzt und teuer, daher besteht ein großer Bedarf an Lösungen zur Speicherung thermischer Energie mit erhöhter Kapazität. PCM-basierte Speicher, die einen Fest-Flüssig-Phasenübergang nutzen, bieten eine bis zu viermal höhere Energiedichte als wasserbasierte Speicher. Die erhöhte Speicherkapazität ermöglicht eine erhebliche Steigerung der Selbstversorgung, ohne das Speichervolumen zu vergrößern. Auf den für Nachrüstungsanwendungen relevantesten Temperaturniveaus, 45 °C (Raumheizung) und 65 °C (Warmwasser), gibt es derzeit noch keine brauchbare, auf Salzhydrat basierende PCM-Lösung und keine langlebige Kapselungslösung auf dem Markt.

Im Projekt „EuteQ“ wird ein neuartiger thermischer Energiespeicher (TES) auf Basis von makroverkapselten Phasenwechselmaterialien (PCM) für photovoltaikgestützte Heizsysteme entwickelt. Die PCM-Kapseln („CowaCaps“) werden als Festbett in herkömmliche Wasserspeichertanks gestapelt, die ein Standardbestandteil von Heizsystemen sind. Die Kapseln erhöhen ihre Speicherkapazität um bis zu viermal, indem sie die Phasenübergänge des PCM nutzen. Die verwendeten Materialien sind Salzhydratgemische mit außergewöhnlicher Energiedichte, Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz. Im Rahmen des „EuteQ“-Projekts wird ein Demonstrator in einem repräsentativen Gebäude (Pilotsystem) realisiert.

Das Verbundprojekt wurde in 11 Arbeitspakete (AP) aufgeteilt mit folgenden Titeln und Verantwortlichen :

AP1	Modellgestützte Identifizierung von eutektischen Salzhydratmischungen	ZAE
AP2	Charakterisierung der thermophysikalischen Eigenschaften von identifizierten Gemischen	ZAE
AP3	Bewertung der identifizierten Gemische und Identifizierung der Keimbildner	HSLU
AP4	Experimentelle Untersuchung und Überprüfung der Zyklenstabilität	HSLU
AP5	Optimierung von Form und Material der Verkapselung	Cowa
AP6	Prototyping und Tests von Kapseln	Cowa
AP7	Entwicklung eines Steuerungssystems zur Maximierung des PV-Selbstverbrauchs	HSLU
AP8	Implementierung des Kontrollalgorithmus	varmeco
AP9	Herstellung und Erprobung eines Speicherprototyps	Cowa
AP10	Installation und Bewertung des Pilotsystems	varmeco
AP11	Projektmanagement	Cowa

Die von varmeco verantworteten Arbeitspakete AP8 und AP10 sowie teils AP7 wurden im Teilprojekt "Implementierung eines Regelalgorithmus zur Eigenverbrauchsoptimierung mit anschließender Bewertung des Gesamtsystems in einem Pilotsystem" gebündelt und bearbeitet.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde am 01.10.2022 begonnen und nach einer kostenneutralen Verlängerung von sechs Monaten am 31.03.2025 abgeschlossen.

Verzögerungen in AP7 führten zu einer Verkürzung des ursprünglich geplanten Monitoringzeitraums am Pilotsystem in AP10. Ausgleichend wurde neben der Laufzeitverlängerung das Monitoringsystem auf ein vergleichbares Wohnobjekt als Referenzanlage erweitert. Hierfür konnten eingesparte Materialkosten umgewidmet und für die Anschaffung und Integration der erweiterten Messtechnik eingesetzt werden.

Im Verbundprojekt wurden die Arbeitspakete und Meilensteine geeignet aufeinander abgestimmt, um technische Risiken gering zu halten.

Für das hier besprochene Teilvorhaben wichtige Meilensteine der Verbundpartner waren der erfolgreiche Komponententest des PCM-gefüllten Testspeichers (AP9 - Herstellung und Erprobung eines Speicherprototyps) sowie die Ergebnisse der dynamische Systemsimulation (AP7 - Entwicklung eines Steuerungssystems zur Maximierung des PV-Selbstverbrauchs) basierend auf dem Optimierungsalgorithmus.

Wesentliche Ergebnisse

Hauptergebnis

Der vom Projektpartner Hochschule Luzern entwickelte Regelalgorithmus (AP7, Strategie: PV-Stromangebotsorientiert mit thermischer Energiespeicherung) lieferte in Simulationsstudien für die Pilotanlage kaum Einspareffekte. Dies war der wesentliche Grund, Arbeitspaket 8 (Implementierung des Kontrollalgorithmus) nicht umzusetzen. Damit konnte das aufgebaute Pilotsystem nicht wie geplant getestet werden (AP10, Installation und Bewertung des Pilotsystems).

Nebenergebnis

Sowohl die Pilotanlage als auch die Referenzanlage im Nachbargebäude funktionieren bestimmungsgemäß konventionell und versorgen die bewohnten Mehrfamilienhäuser zuverlässig mit Raumwärme und Warmwasser.

- Das Monitoring erlaubt den Vergleich des nicht optimierten Betriebsverhaltens der beiden Anlagen mit und ohne Phasenwechsel-Salzhydratmischung.
- Zukünftige Maßnahmen der Anlagenoptimierung können sofort bewertet werden.
- Der Systemregler VarCon380 eignet sich zuverlässig als Datensammler.
- Die eXergiemaschine arbeitet stabil mit hohen COPs als Booster-Wärmepumpe.

Der Projektpartner Cowa als Hersteller der Phasenwechsel-Kapseln hat die Produktion der Kapseln mittlerweile eingestellt.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Entsprechend der Vorhabenbeschreibung erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern und gemeinsamem Austausch in überwiegend online-Meetings.

Teil II: Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendungen wurden entsprechend der im Projektantrag definierten Ziele eingesetzt. Die Projektmittel wurden für die Materialkosten zur Ausstattung der Pilotanlage und die Messtechnik sowie die Personalkosten eingesetzt.

AP7: Entwicklung eines Steuerungssystems zur Maximierung des PV-Selbstverbrauchs

Unter Federführung der Hochschule Luzern wurde mit Simulationstechniken eine Regelstrategie und ein Algorithmus zur Optimierung des PV-Eigenverbrauchs des definierten hybriden Heizsystems erarbeitet. Das Ergebnis in Form des Regelungsalgorithmus zur PV-Eigenverbrauchsoptimierung stellte den Input für AP8 dar.

varmeco hatte hier lediglich beratende Funktion zu verfügbaren Regler-Schnittstellen und geeigneten Simulationsparametern zur Modellierung der realen Anlage.

Das Anlagenschema der Pilotanlage des Hybriden Heizsystems zeigt Abbildung 1 mit Heizungs-Wärmepumpen-Kaskade (1), Raumwärmeabgabe (2), Niedertemperaturspeicher (3), eXergiemaschine (4), PV-Strom-Elektrodurchlauferhitzer (5), PV-Kollektoren (6), Hochtemperaturspeicher (7) Durchfluss-Trinkwassererwärmer (8) und Systemregler (9).

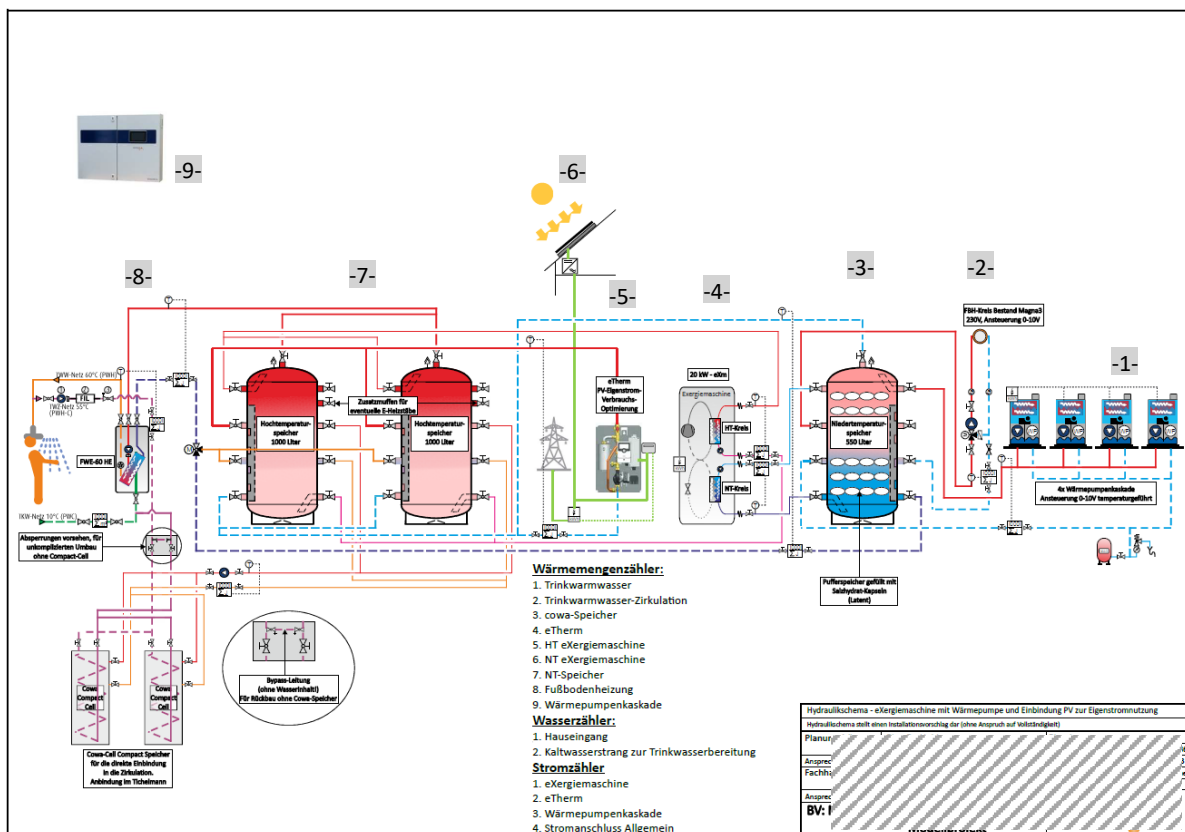


Abbildung 1: Schema der Pilotanlage

Die dynamischen Systemsimulationen des Verbundpartners HSLU ergaben, dass der Einsatz von Latentspeichermaterial bei relativ geringem Speichervolumen von 550 Litern nur geringen Einfluss auf den Photovoltaik-Eigenverbrauch hat, konkret von ca. 2 Prozentpunkten von 73,4 auf 75,6 %.

Der vom Projektpartner HSLU favorisierte Regelalgorithmus wurde einer intensiven Machbarkeitsprüfung unterzogen und die Plausibilisierung der Simulationsergebnisse durch Vorgabe von weiteren Variationsparametern an den Projektpartner abgesichert.

Abweichend von der ursprünglichen Planung wurde die reale Anlage vom Betreiber mit Stromspeichern ausgestattet, wodurch die PV-Energiespeicherung von der thermischen auf die Stromseite verlagert werden kann.

Überwiegend die ernüchternden Simulationsergebnisse und nachrangig die gegebene Abweichung von geplanter/simulierter zu realer Anlage führten nach intensiver Diskussion zum Entscheid, Arbeitspaket 8 nicht abzuarbeiten.

AP8: Implementierung des Regelalgorithmus

Der Regelalgorithmus des AP7 sollte auf dem Heizungssystemregler VarCon380 XL (Serienprodukt von varmeco) implementiert und in ein neues Funktionsmodul "Eigenverbrauchsoptimierung" inklusive grafischer Benutzeroberfläche integriert werden.

Die Arbeiten an der Implementierung des Regelalgorithmus auf dem Regler des Pilotsystems wurden nach intensiver Diskussion mit den Projektpartnern und unter der Maßgabe wirtschaftlicher Fördermittelverwendung nicht begonnen, da die letzten Erkenntnisse aus AP7 kein nennenswertes Optimierungspotential erwarten ließen.

AP10: Installation und Bewertung eines Pilotsystems

Zeitparallel zu AP7 musste ein Bauvorhaben identifiziert werden, das alle Randbedingungen für die Eignung als Pilotsystem einschließlich Aufgeschlossenheit von Planungsbeteiligten und Bauherren erfüllte. Ausgewählt wurde ein Objekt aus einem Sanierungsvorhaben in Norddeutschland, bei dem mehrere Wohnblöcke Baujahr 1978 mit 18 Wohneinheiten kernsaniert und mit der passenden Anlagentechnik ausgestattet wurden.

Zusätzlich wurde zeitversetzt eines der Nachbargebäude aus umgewidmeten Mitteln mit ins Monitoring aufgenommen und dient als Referenz ohne Latentwärmespeicher.

Erst während der Ausführungsphase stellte sich heraus, dass aus statischen Gründen in der Dachzentrale statt angedachter 2000 Liter nur 550 Liter Volumen für den Niedertemperaturspeicher möglich waren. Die negativen Auswirkungen auf die Ergebnisse von AP7 waren zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt, die Ergebnisse selbst lagen noch nicht vor.

Final ist ein Pilotsystem entstanden mit ungeplant kleinen Latentwärmespeichern und ohne die gewünschte Regelungsergänzung „PV-Selbstverbrauchsoptimierung“.

Der geplante Meilenstein und das Ziel „Funktionierendes Pilotsystem und Nachweis eines neuen, hoch autarken Wärmepumpensystems“ konnten so gar nicht erreicht werden.

Dennoch bietet das Monitoring von Pilot- und Referenzanlage mit konventioneller Regelungsweise interessante Einblicke in die Wechselwirkungen heizungstechnischer Komponenten und Potential für gut bewertbare Parametriermaßnahmen zur Anlagenoptimierung.

Der Heizungssystemregler VarCon380 dient als Datensammler und wurde mit dem Varmeco-Management-System VMS als Datenhost per Internet verbunden. Insgesamt werden beim Pilotsystem 97 Datenpunkte bei einer zeitlichen Auflösung von 15-Minuten übertragen, die sich aus 16 Energie-Zählwerten sowie Analogwerten und Betriebszuständen zusammensetzen. Beim Referenzsystem sind es 56.

Der hier dokumentierte Messzeitraum umfasst 01.11.2024 bis 31.08.2025.

Energiebilanz der Heizzentrale

Die Bilanz über die wesentlichen Grenzen der Heizzentrale liefert die Plausibilisierung der Energiezählerwerte und wesentliche Energie-Kenngrößen des Bauvorhabens.

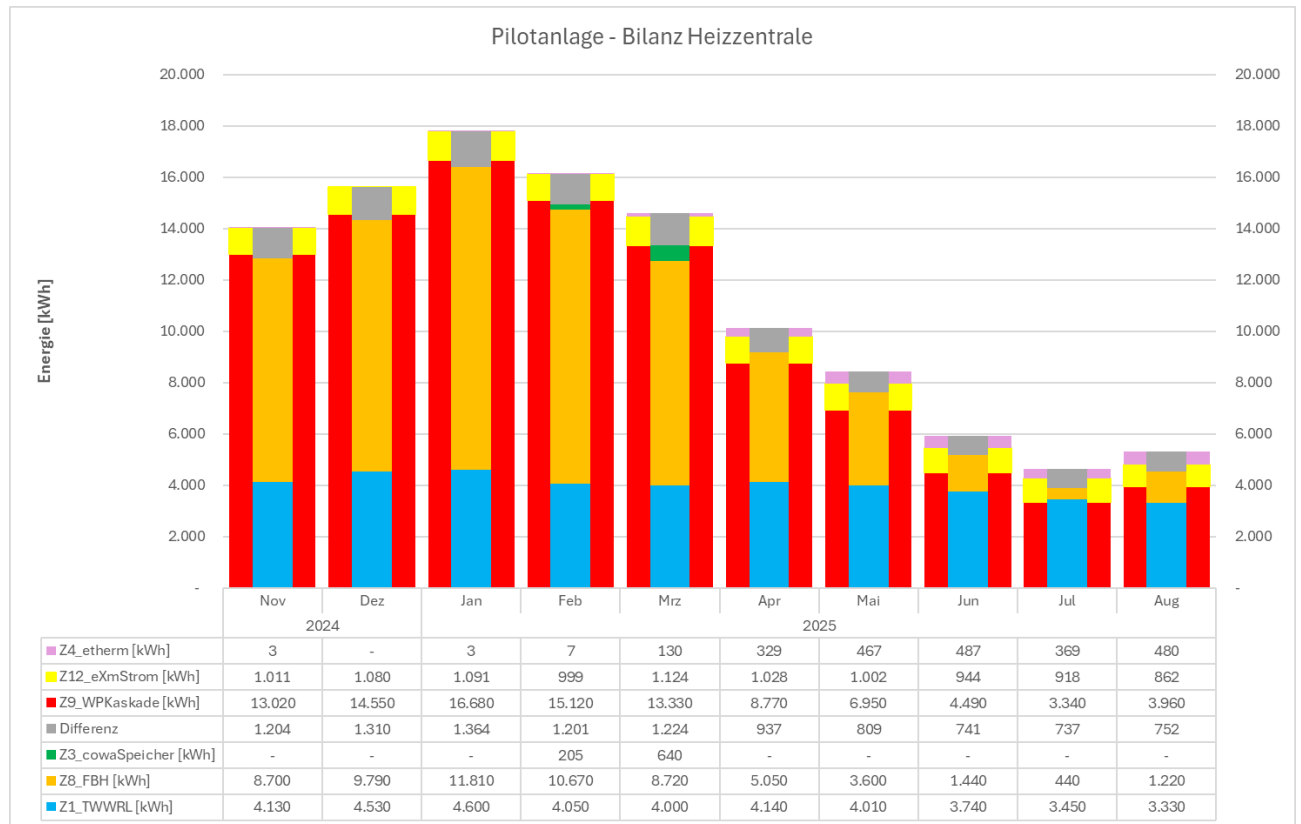


Abbildung 2: Pilotanlage – Monatsbilanzen

Schmale Säule: Energieverbräuche, breite Säule: Energiezufuhr

Energieverbräuche: Trinkwarmwasser inklusive Zirkulation (blau), Raumwärme (orange), Bilanzdifferenz (grau)

Energiezufuhr: bereitgestellte Heizwärme der Wärmepumpen (rot), Strombezug der eXergiemaschine (gelb), bereitgestellte Heizwärme durch PV-Durchlauferhitzer (rosa)

Die Energieverbräuche der Pilotanlage über den Messzeitraum lagen bei 101.420 kWh mit anteilig:

- Trinkwarmwasser inklusive Zirkulation: 39.980 kWh (39 %)
- Raumwärme: 61.440 kWh (61 %)

Die zugeführten Energien betragen 112.544 kWh mit anteilig:

- Heizwärme der Wärmepumpen: 100.210 kWh
- Strombezug der eXergiemaschine: 10.059 kWh
- Heizwärme durch PV-Durchlauferhitzer: 2.275 kWh

Die bilanzielle Differenz durch Systemverluste oder Messfehler betrug:

- Differenz: 10.279 kWh (entsprechend $10.279/225.088 = 4,6 \%$)

Die Energieverbräuche der Referenzanlage im gleichen Zeitraum lagen sehr ähnlich bei 99.750 kWh:

- Trinkwarmwasser inklusive Zirkulation: 41.420 kWh (42 %)
- Raumwärme: 58.330 kWh (58 %)

Die zugeführten Energien betragen 108.926 kWh mit anteilig:

- Heizwärme der Wärmepumpen: 98.800 kWh
- Strombezug der eXergiemaschine: 10.126 kWh

Die beiden Anlagen weisen demnach sehr ähnliche Energieverbrauchswerte auf.

COP der Wärmepumpenkaskade

Die Bilanz über die Luft-Wasser-Wärmepumpenkaskade liefert den COP und bei monatlicher Darstellung die typische Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

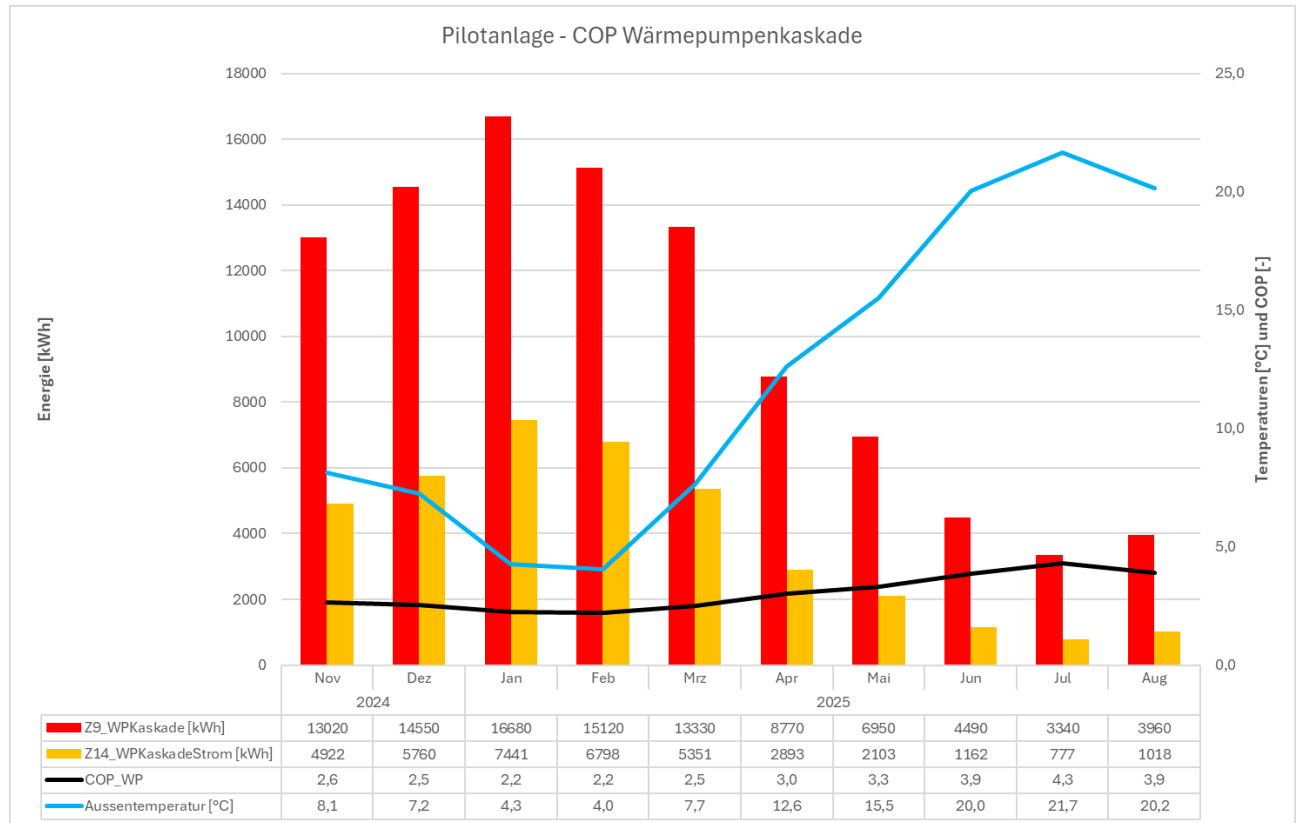


Abbildung 3: Pilotanlage – Monatlicher COP über der Außentemperatur

Die COP-Werte lagen bei der Pilotanlage monatlich zwischen 2,2 und 4,3 und über den gesamten Zeitraum bei 2,6.

Die für die Referenzanlage gemessenen COP-Werte lagen monatlich zwischen 2,3 und 3,6 und über den gesamten Zeitraum ebenso bei 2,6.

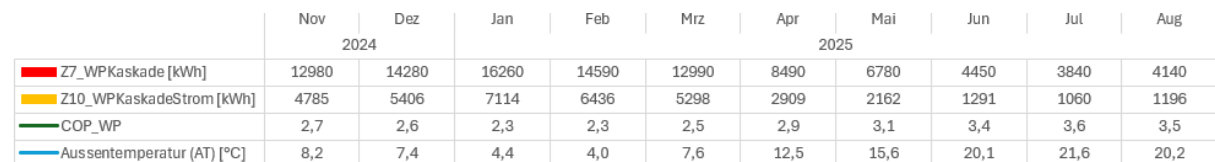


Abbildung 4: Referenzanlage - Monatlicher COP über der Außentemperatur

Nach dieser Betrachtung haben die beiden unterschiedlichen Niedertemperaturspeicher, in der Pilotanlage mit Latenspeichermaterial und damit etwa 3-facher nomineller Speicherkapazität gegenüber die Referenzanlage, keinen unterschiedlichen Einfluss auf die Jahreseffizienz der Wärmepumpenkaskaden.

Werden die täglichen COPs über der Außentemperatur aufgetragen und die COP-Werte der eXergie-maschine ergänzt, zeigt sich etwas unterschiedliche Charakteristik der beiden Anlagen:

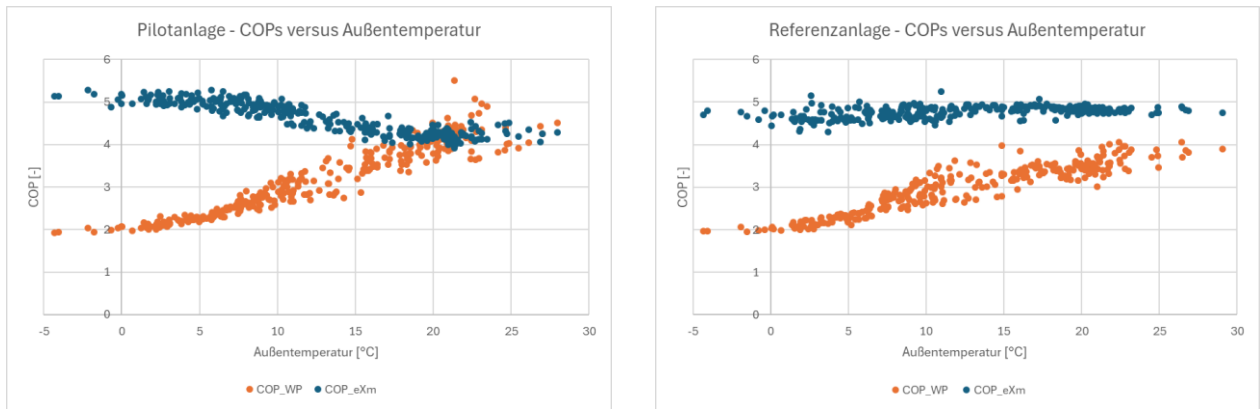


Abbildung 5: COP von Wärmepumpe und eXergiemaschine über der Außentemperatur

Erklärung und möglicherweise Optimierungspotential liefert die detaillierte Auswertung der Temperaturen im Niedertemperaturspeicher, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

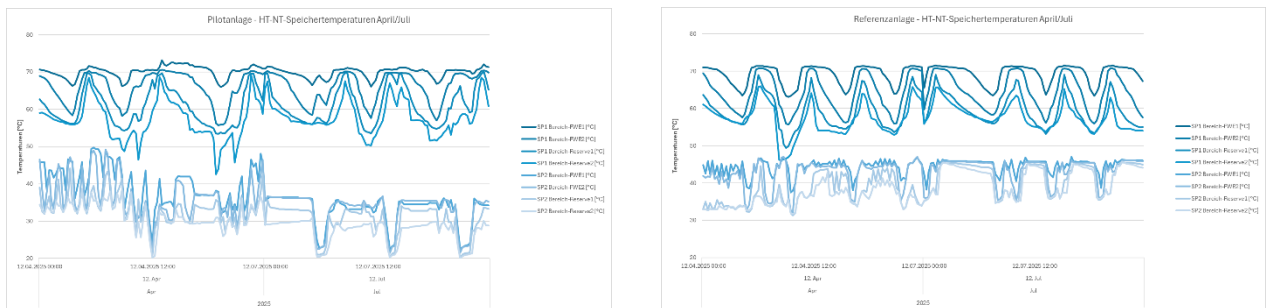


Abbildung 6: Temperaturverläufe in Hoch- und Niedertemperaturspeicher (12.04.2024 + 12.07.2025)

Die nächsten Monate sind vorgesehen für Maßnahmen zur Anlagenoptimierung gemeinsam mit dem Anlagenbetreiber und sind nicht mehr Gegenstand des Förderprojektes.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Verwendungsnachweis / Zahlenmäßiger Nachweis

varmeco GmbH & Co. KG

Laufzeit: 01.10.2022 - 31.03.2025

Förderkennzeichen: 01QE2252B

Verbundprojekt: "Eutektische Salzhydratmischungen mit hoher Energiedichte für Wärmepumpen-Pufferspeicher zur Steigerung der Heizautarkie"

Kostenart lt. AZK	Zeitraum:	Plankosten in €	Plankosten gesamt €	Istkosten in €	Istkosten gesamt €
0813 Materialkosten	10.-12./22	0,00		0,00	
	01.-12./23	120.000,00		44.177,20	
	01.-12./24	0,00		22.685,27	
	01.-03./25	0,00	120.000,00	0,00	66.862,47
0837 Personalkosten	10.-12./22	0,00		0,00	
	01.-12./23	129.065,20		26.759,24	
	01.-12./24	41.342,00		28.348,03	
	01.-03./25	0,00	170.407,20	6.374,19	61.481,46
0838 Reisekosten	10.-12./22	0,00		0,00	
	01.-12./23	1.500,00		0,00	
	01.-12./24	0,00		0,00	
	01.-03./25	0,00	1.500,00	0,00	0,00
Gesamtsumme:			291.907,20		128.343,93

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projektzeitraum durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung zur Zielerreichung entsprechen. Die Entscheidung, AP8 nach Erkenntnissen aus AP7 nicht zu bearbeiten, wird unter der Maßgabe wirtschaftlicher Fördermittelverwendung als richtig angesehen.

Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das Projekt hat nicht die gewünschten Produkterweiterungen bei den Systemregler-Funktionen und den thermischen Speichern gebracht.

Es ist allerdings gut geeignet, anhand ausgewählter Monitoringthemen bestehende Produkte wie den Systemregler VarCon380 und die eXergiemaschine in Fachbeiträgen zu besprechen und damit zu bewerben.

Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keiner.

Erfolge oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Bisher wurde nicht veröffentlicht, weil das angestrebte Ergebnis nicht erreicht wurde.

An den beiden Monitoringanlagen wurden unabhängig von der Latentwärmethematik Anlagenoptimierungsstrategien gestartet, deren Ergebnisdarstellung in der Fachpresse der Heizung-lüftung-Klima-Branche angestrebt wird.