

Carsten Wemhöner, Christoph Meier, Marc Werro, IET - Institut für Energietechnik,
OST – Ostschweizer Fachhochschule
Philipp Roos, Remo Waser, Cowa Thermal Solutions AG

BFE P&D-Projekt **SI/502289** (in Bearbeitung 2021 – 2025)

SunStore

Latenter, kompakter Pufferspeicher für mit Photovoltaik betriebene Wärmepumpen

Zusammenfassung

Im Projekt SunStore wird ein neues, auf Phasenwechselmaterialien (PCM) basiertes Wärmespeicherkonzept unter realen Bedingungen eingebaut, getestet und evaluiert. Das PCM wird verkapselt als Schüttgut in den Pufferspeicher gefüllt. Im Projekt werden insbesondere die Vorteile von PCM mit Wärmepumpen für einen hohen PV-Eigenverbrauch untersucht. In einer Pilotanlage mit Luft/Wasser-Wärmepumpe und PCM- Nachrüstung werden Erfahrungen im realen Betrieb über drei Heizperioden ausgewertet. Es wurde eine Referenzperiode mit konventionellem Wasserspeicher und je eine Heizperiode mit zwei Generationen von PCM-Kapseln gemessen. Ergebnisse zeigen eine Steigerung des PV-Eigenverbrauchs und der Heizautarkie mit PCM, die sich aufgrund geänderter Randbedingungen in der Heizperiode zwar nicht exakt quantifizieren lässt, aber an Tagesgänge der Speichertemperatur bestätigt wird. Eine Steigerung der Jahresarbeitszahl konnte nicht verifiziert werden, scheint aber durch Potenziale bei der Regelung erreichbar. Die Kapseltechnologie wird vom Hersteller Cowa nicht weiterverfolgt, sondern ein PCM gefüllter Speicher als Nachfolgeprodukt und Weiterentwicklung auf den Markt gebracht.

Abstract

In the SunStore project, a new heat storage based on phase change materials (PCM) is being installed, tested and evaluated under real conditions. The PCM is filled in capsules in the buffer storage tank. In particular, the project aims to investigate the advantages of PCM storage in terms of achieving high self-consumption of PV electricity with heat pumps. The pilot system with air-to-water heat pump and a PCM in the existing buffer storage is used to evaluate experiences in real operation over three heating periods. A reference period with a conventional water buffer storage and each one heating period with two generations of PCM capsules have been evaluated. Results show an increase in PV self-consumption and self-sufficiency in heating, which, however, cannot be exactly quantified due to changing boundary conditions in the heating periods, but verified by daily storage temperature evolution. The increase of the seasonal performance factor could not be verified but seems reachable with control improvements. In the meantime, the capsule technology is no longer being pursued, but a PCM-filled storage is being launched on the market as a successor product and further development.

Motivation und Projektübersicht

Die Cowa Thermal Solutions AG ist ein Spin-off des Kompetenzzentrums für thermische Energiespeicher (CC TES) der Hochschule Luzern (HSLU), das mit dem Ziel gegründet wurde, thermische Speicher auf Basis von Phasenwechselmaterial (Phase Change Materials - PCM) zu kommerzialisieren. Cowa hat dazu in Zusammenarbeit mit der HSLU verschiedene, auf Salzhydrat basierende, PCM entwickelt, die für typische Temperaturbereiche von Wärmepumpen im Gebäudebereich ausgelegt sind.

Im Rahmen dieses Projekts wird die Technologie in einer ersten realen Pilotanlage getestet. Es wurden inzwischen vier Heizperioden gemessen, wovon die Auswertung der drei abgeschlossenen Heizperioden hier präsentiert werden.

Projektziele

Die Projektziele umfassen die folgenden Einzelziele in Bezug auf die Herstellung und Qualitätssicherung der Kapseln als auch der energetischen Erfolgsfaktoren (Key Performance Indicators - KPIs):

- Herstellung der für die Pilotanlagen benötigten PCM-Kapseln.
- Erfassung aller relevanten Massen- und Energieströme zur vollständigen Bilanzierung des Systems sowie zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl (JAZ) und der Heizautarkie über die drei Heizperioden.
- Evaluation der KPI und Vergleich der PCM-Systemlösung mit dem state-of-the-art.
 - Der Eigenverbrauch soll um 10% im Vergleich zur Referenzmessung erhöht werden.
 - Die Heizautarkie soll im Vergleich zur Referenzmessung um 50% erhöht werden.
 - Der Netzbezug des ganzen Gebäudes soll im Vergleich zur Referenzmessung um 10% reduziert werden.
 - JAZ und Energieeffizienz der Wärmepumpe sollen erhöht werden mit dem Ziel, die JAZ über die Heizperiode um 2 – 4% zu erhöhen.
- Erweiterung des Wissensstands bezüglich der Langlebigkeit der Kapseln.
- Bestimmung idealer Regelparameter zur möglichst effektiven Nutzung.

Tabelle 1: Erfolgsfaktoren und die dafür benötigten Kenngrössen.

Erfolgsfaktor	Benötigte Kenngrössen	Quellen
Eigenverbrauch Heizautarkie Netzbezug	Produktion PV Netzbezug und Netzeinspeisung Strombedarf Total Strombedarf WP	Wechselrichter mit Smartmeter Stromzähler WP, Stromzähler Heizkreispumpe
Energieeffizienz: JAZ und WNG für - Heizung, - WW, - Gesamtsystem SNG für Heizung	Strombedarf WP mit Unterscheidung H/WW Wärmeproduktion Heizbetrieb Wärmeproduktion WW-Betrieb Wärmebedarf Heizkreis	Zweitarif-Stromzähler WP mit Tarifumschaltung über WW- Umschaltventil Stromzähler Heizkreispumpe Wärmezähler 1 Wärmezähler 2 Wärmezähler 3

Zur Überprüfung der Erfolgsfaktoren sind die Kenngrößen und die entsprechende Datenquelle in Tabelle 1 aufgeführt, für deren Messung ein Messsystem zum Anlagenmonitoring der Pilotanlage eingebaut wurde.

Anlagenbeschrieb Pilotanlage

Das Pilotobjekt ist ein Einfamilienhaus mit Einliegerwohnung, die als Ferienwohnung vermietet wird, auf einer Sonnenterrasse in Pany (GR) auf 1178 m.ü.M mit Baujahr 1988 und folgenden technischen Anlagenkomponenten und Wärmebedarf, die teils aus Eigentümerangaben geschätzt wurden. Abbildung 1 zeigt das Pilotobjekt und die Lage.

- Geschätzter Wärmebedarf von $100 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$, Energiebezugsfläche 200 m^2 .
- Warmwasserverbrauch 180 l/Tag (16°C auf 55°C).
- Geschätzter Stromverbrauch 4000 kWh/a .
- Luft-Wasser Wärmepumpe Oertli LSI 140 SHW-SG mit Leistung $5.7 - 15.8 \text{ kW}$.
- PV-Anlage mit 17 kW_p , 84 m^2 , 26 Module in West- und 24 Module in Ostorientierung.
- Elektrische Batterie mit 7.7 kWh zur Solarladung.
- 800 l Heizungspufferspeicher und 500 l Warmwasserspeicher.
- Betrieb Pufferspeicher zwischen 40°C und 52°C , Kapazität von 11.2 kWh
Mit CowaCaps ergibt sich eine rechnerische Kapazität von 39.1 kWh .



Abbildung 1: Ansicht (links), Luftbild (Mitte) und Lage des Pilotobjekts in Pany.

PCM-Kapseln

Die verwendete Kapsel heisst: «*BOOSTER CAPSULE 45*». Sie besteht aus *PCM45* und hat eine Schmelztemperatur von 45°C . Die Speicherdichte des befüllten Speichers im relevanten Temperaturbereich beträgt 50 kWh/m^3 . Das PCM basiert auf Salzhydraten, welche im Vergleich zu anderen Phasenwechselmaterialien durch hohe Dichte und hoher Schmelzenthalpie (205 J/g bei diesem Material) zur hohen Speicherdichte führt. Die Verkap-selung wurde auf Packungsdichte, thermische Leistung, und Produktionskosten optimiert, was zur Form in Abbildung 2 führte und eine Packungsdichte von 62% ermöglicht. Dadurch soll eine Kapazitätserhöhung im Vergleich zu Wasser von über Faktor 2 erreicht werden.



Abbildung 2:
Cowa *BOOSTER CAPSULE 45*

Messsystem

Für die Messdatenerfassung werden die vom Wechselrichter aufgezeichnete Daten (Import aus der Fronius-Cloud-Plattform) und eine Datenerfassung basierend auf einem Raspberry-Pi genutzt. Die Daten werden im 5-min Takt aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt in Matlab.

Abbildung 3 zeigt das Anlagenschema mit den installierten Messpunkten und den Systemgrenzen für die Kennzahlberechnung.

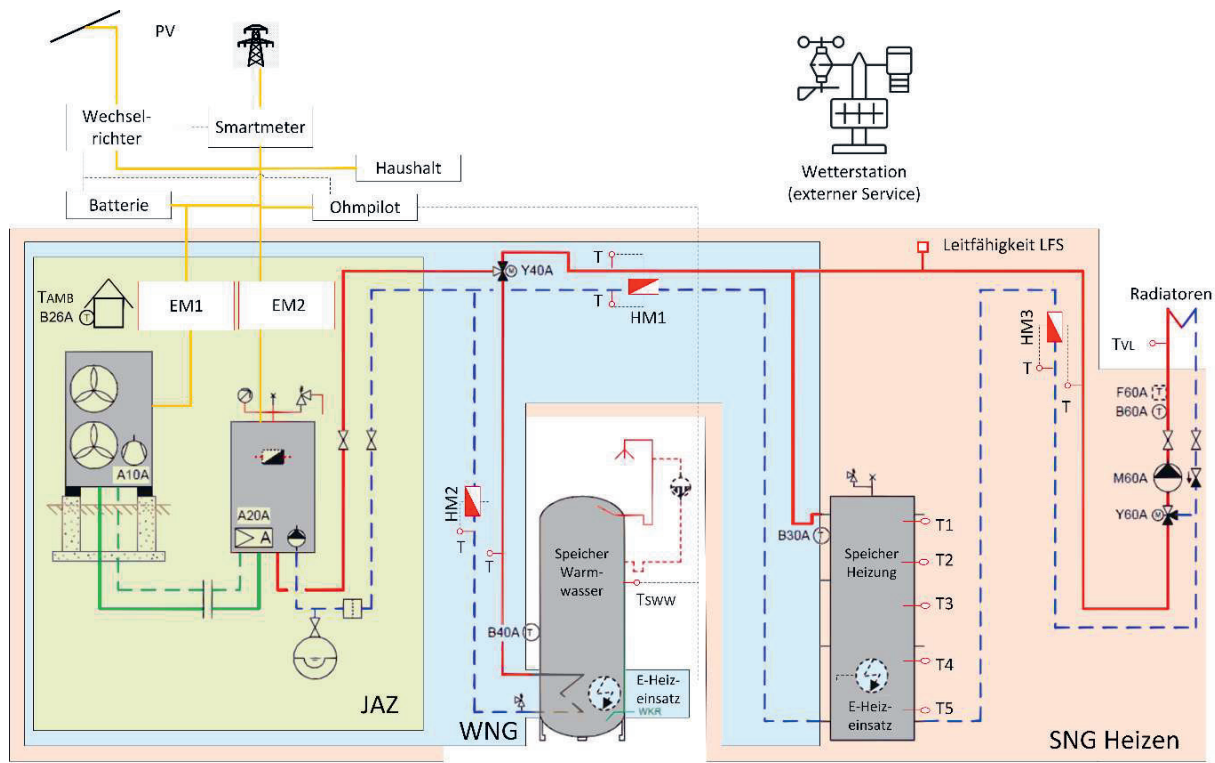


Abbildung 3: Anlagenschema mit den Messpunkten und Bilanzgrenzen für die Kennzahlen.

Messresultate

Für die Referenzmessungen in Heizperiode 21/22 (HP1) wurde der mit Wasser gefüllte bestehende konventionelle Heizungs-Pufferspeicher gemessen. In der Heizperiode 22/23 (HP2) wurde der Speicher mit PCM-Kapseln befüllt und gemessen. Für die Heizperiode 23/24 (HP3) wurden die Kapseln nochmals mit einem modifizierten PCM und neuen Kapseldesign ausgetauscht. Es weist eine verbesserte Rezeptur auf, welche sich auf eine höhere Erstarrungstemperatur und eine geringere Unterkühlung auswirkt.

Wetterrandbedingungen

Für die Vergleichbarkeit der einzelnen HP wurden die Heizgradtage (HGT) erfasst und mit dem langjährigen Durchschnitt über 10 Jahre (2014-2023, gemäss Berechnungsvorschrift der archivierten SIA-Norm 381/3) verglichen. Die Daten der durchschnittlichen Tagestemperatur für den Vergleich stammen von Meteoschweiz. Als Standort wurde Disentis ausgewählt, da sich Disentis in ähnlicher Höhenlage wie Pany befindet. Die Abbildung 4 links zeigt die Verteilung der Heizgradtage über die Messjahre. Auffällig ist, dass in den HP2 und HP3 deutlich weniger Wärme gebraucht wurde als in HP1, wie aus Abbildung 4 rechts ersichtlich ist. Der Grund dafür erschliesst sich, wenn der tägliche Wärmebedarf pro Heizgradtag mit der Belegung verglichen wird, wie in Abbildung 5 dargestellt ist.

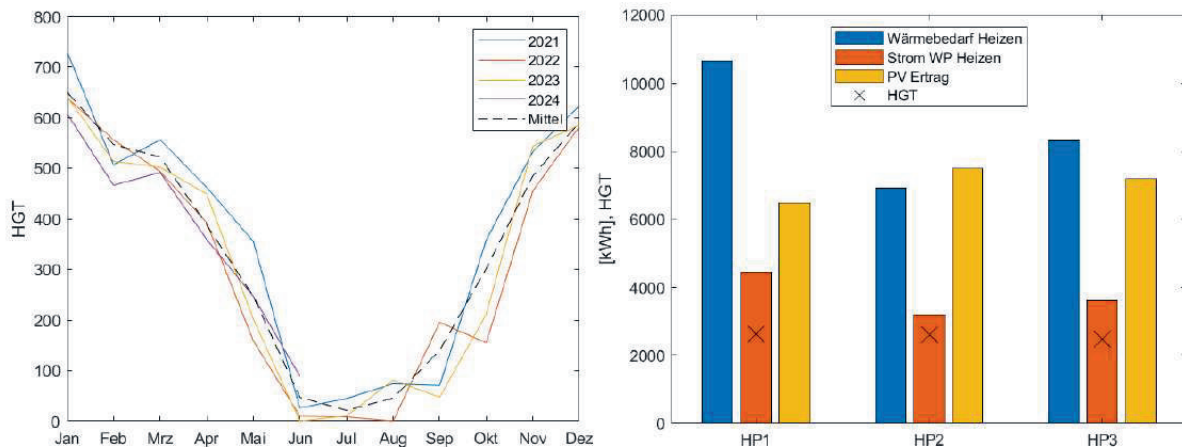


Abbildung 4: Heizgradtage (links) und Energiedaten (rechts) der drei Heizperioden.

So wurde im April und Mai in HP2 und HP3 die Heizung reduziert, da das Haus unbelegt war. Im Dezember der HP2 und 3 wurde die Heizung jedoch nicht reduziert. Daher können die Belegungsangaben nicht genutzt werden, um den Heizwärmebedarf zu korrigieren. Im Weiteren konnte in HP2 und HP3 mit der PV-Anlage mehr Strom produziert werden, u.a. da in HP2 und HP3 weniger Schnee auf der Anlage lag.

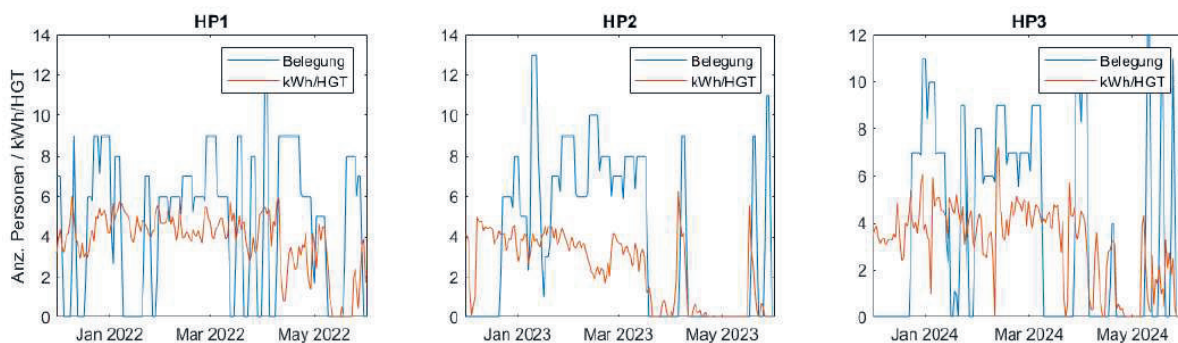


Abbildung 5: Vergleich der Belegung und Heizenergie pro Heizgradtage für die Heizperioden.

Anlagenbetrieb

Sowohl für die Referenzmessungen als auch für beide HP mit Cowa BOOSTER Caps wurde die Anlage so betrieben wie vom Eigentümer vor dem Forschungsprojekt eingestellt:

- Der Wechselrichter ermittelt den aktuellen Leistungsbedarf des Gebäudes. Er kann dabei nicht zwischen Haushaltsstrom und Bedarf der Wärmepumpe für Heizung und Trinkwarmwasser (TWW) unterscheiden.
- Wenn die durch die PV-Anlage produzierte Leistung grösser als der Leistungsbedarf des Gebäudes ist, wird die Batterie zugeschaltet. Diese kann bis 7 kW Leistung aufnehmen.
- Wenn die Batterie vollgeladen ist und die Solaranlage immer noch einen Überschuss liefert, wird über das SG-Ready Signal die Wärmepumpe (Überschuss > 2 kW) oder der Ohmpilot (Überschuss < 2 kW) leistungsgeregelt zugeschaltet. Sowohl bei der Wärmepumpe als auch beim Ohmpilot wird primär der Trinkwarmwasserspeicher geladen. Erst wenn dieser durchgeladen ist, wird der Heizungsspeicher geladen bzw. überladen.

Damit ergibt sich für die Auswertung eine Prioritätenreihenfolge, nach welcher der Eigenverbrauch zugeordnet wird, die in Tabelle 2 aufgeführt ist.

Tabelle 2: Prioritäten für Eigenverbrauch.

Priorität	Bezeichnung	Bemerkung
1	Haushaltsstrom	Keine Unterscheidung durch den Wechselrichter. Unterscheidung erfolgt in der Auswertung.
2	WP Warmwasser (TWW)	
3	WP Heizung	
4	Batterie Laden	
5	WP Warmwasser forciert	Zuschaltung über SG-Ready, Signal über mind. 30 min mit mind. 2 kW Überschuss nötig. Wahl Heizen oder TWW erfolgt durch WP, prioritär TWW
6	WP Heizung forciert	
7	Heizstab Warmwasser	Leistungsgeregelt nach Überschuss. Prioritär WW, Umschaltung auf Heizungsspeicher, wenn maximale Temperatur in WW-Speicher erreicht ist
8	Heizstab Heizung	

Die Prioritäten 4 bis 8 werden also nur mit solarem Überschuss betrieben. Für die Prioritäten 1 bis 3 kann auch Netzbezug oder Strom aus der Batterie verwendet werden. Der aus der Batterie entnommene Strom wird dabei ebenfalls als Eigenverbrauch gerechnet.

Die Prioritäten 1 bis 3 repräsentieren die Möglichkeiten der einzelnen Systeme, ihren Verbrauch auf eine andere Zeit verschieben zu können. Der Haushaltsstrom (z.B. Licht, Kochen) muss stets sofort zur Verfügung stehen. Die Warmwasserladung oder Ladung des Heizungsspeichers könnte (theoretisch) in eine Zeit mit besserem Solarertrag verschoben werden und bekommt daher den zur Verfügung stehenden Solarstrom erst in zweiter Priorität.

Die Auswertung des Eigenverbrauchs für die einzelnen Prioritäten erfolgt in 5 min Schritten. Für die Ermittlung der KPI wurden die einzelnen Prioritäten in die Verbrauchsgruppen Haushalt, Warmwasser und Heizung zusammengefasst.

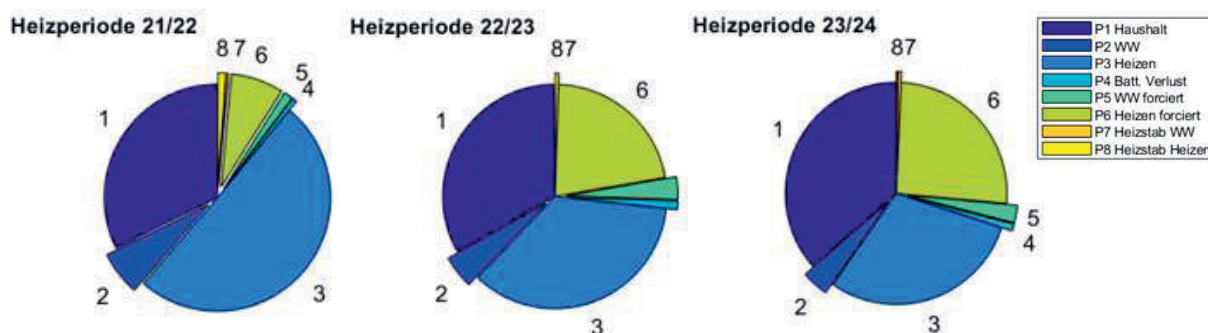


Abbildung 6: Verbrauch der einzelnen Verbrauchergruppen.

In der Abbildung 6 ist der Verbrauch auf die einzelnen Gruppen über die drei Heizperioden aufgeschlüsselt. Mit dem Einsatz der CowaCaps läuft die Wärmepumpe deutlich mehr im forcierten Heizbetrieb (hellgrün) als ohne CowaCaps. Der Heizstabeinsatz ist gegenüber der Referenzperiode in HP 2 und HP3 zurückgegangen, da der forcierte Betrieb genug Potenzial für die Aufnahme der Überschuss PV-Ertrags bietet.

Es wird deutlich ersichtlich, dass eine signifikante Reduktion nahezu aller Energieverbraucher in HP2 und HP3 stattgefunden hat. Lediglich die Verluste in der Batterie haben zugenommen. Dieser Anstieg ist jedoch auch auf die gesteigerte solare Einstrahlung zurückzuführen, die zu einer häufigeren Aufladung der Batterie geführt hat.

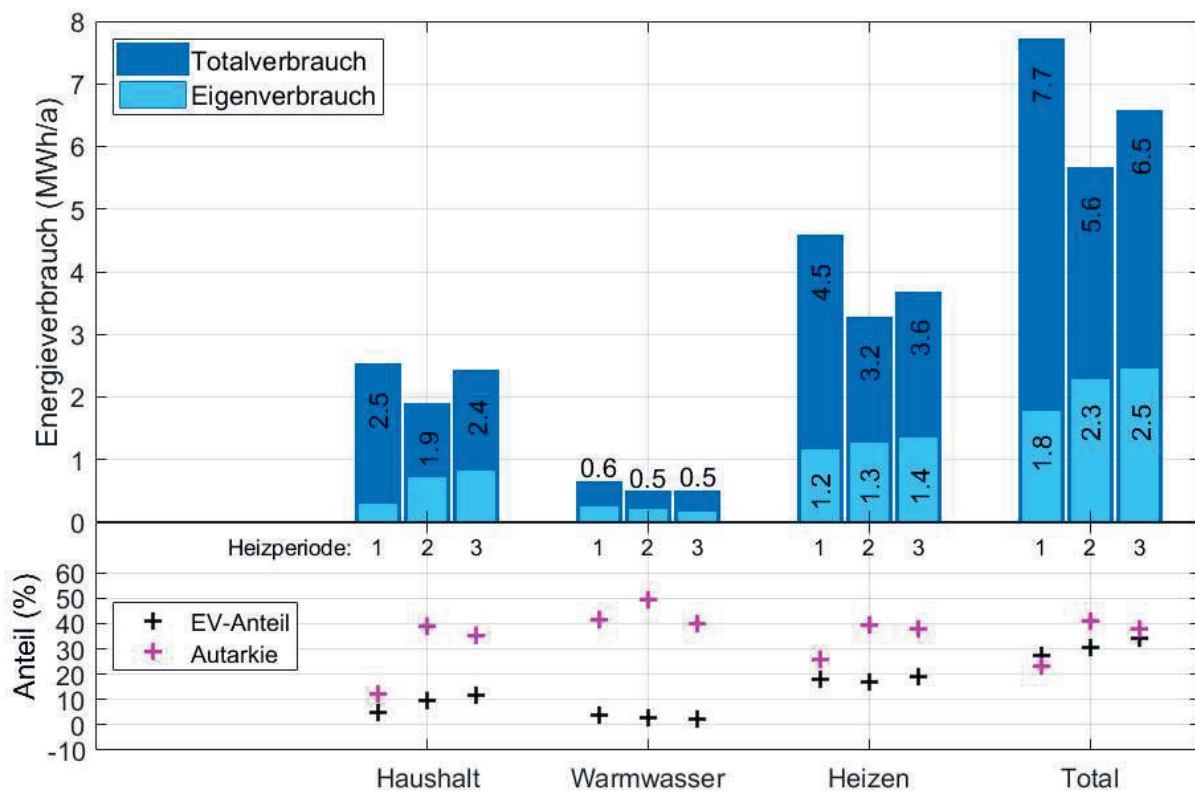


Abbildung 7: Energieverbrauch und KPI über die drei Heizperioden.

Abbildung 7 zeigt die Verbrauchswerte und KPI über die drei Heizperioden. Neben dem generellen Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs fällt ebenfalls auf, dass der Eigenverbrauch im Haushalt und beim Heizen gestiegen ist. Der Anstieg des Eigenverbrauchs im Haushalt kann mit dem Anstieg an PV-Produktion erklärt werden. Da weniger Schnee als in der ersten Heizperiode gefallen ist, wurde während beinahe des gesamten Winters PV-Strom produziert. Dieser wurde in die Batterie eingespeist, welche anschliessend am Abend eingesetzt wurde.

Trotz der niedrigeren Heizwärmeproduktion in HP2 und HP3 gegenüber HP1 konnte der Eigenverbrauch fürs Heizen absolut sogar gesteigert werden. Der Heizautarkiegrad konnte so um gut 50% gegenüber HP1 erhöht werden. Der Eigenverbrauchsanteil fürs Heizen ist in etwa gleichgeblieben, da sich zwar der Eigenverbrauch leicht erhöht hat, jedoch auch die Stromproduktion. Der Eigenverbrauchsanteil Total konnte in HP2 um 10%, in HP3 um 20% gegenüber HP1 gesteigert werden.

Die Erhöhung des Autarkiegrad Heizen in HP2 und HP3 kann einerseits auf das PCM, andererseits auf den höheren PV-Ertrag zurückgeführt werden, welcher öfter erlaubt, den Speicher zu überladen. Allerdings konnte der Einfluss der beiden Effekte nicht detailliert quantifiziert werden, da sich die Randbedingungen der HP2 und HP3 stark von der HP1 unterscheiden. Im Rahmen der detaillierteren Auswertung des Latentspeichers anhand von Tagesgängen im nächsten Abschnitt wird aber auf die erhöhte Speicherkapazität durch das PCM eingegangen. Die Speicherverluste im Heizungsspeicher betragen in der HP1 9.5%, in der HP2 und HP3 12-13.5%. Zu beachten ist jedoch, dass diese Wärme nicht verloren ist, sondern über die Speicherwand in den Heizungsraum abgegeben wird, welcher ebenerdig zur Wohnung liegt und nur über eine einfache Tür von dieser getrennt ist.

Latentspeicher

Die Abbildung 8 zeigt die aus dem Speicher entnommene Wärmemenge für ausgewählte Tage in den drei Heizperioden. Die Wärmemenge wurde zwischen dem Ausschalten und dem Wiedereinschalten der Wärmepumpe am nächsten Morgen ermittelt. Die Temperaturdifferenz bezieht sich auf den obersten Speicherfühler zum Ausschalt- und zum Wiedereinschaltzeitpunkt. Die maximale Temperatur des Speicherfühlers liegt zwischen 53 °C und 60 °C. Die linke Grafik zeigt die Wärmemenge absolut, die rechte Grafik relativ bezogen auf den Wasserspeicher. Für den Wasserspeicher wurde das theoretische Potential mit der Temperaturdifferenz der 5 Fühler zwischen dem Start- und dem Stop-Zeitpunkt der Messung der Entladung ermittelt. Die Masse wurde entsprechend der Speichergeometrie ermittelt, wobei der Schnittpunkt zweier Massenelemente jeweils in der Mitte zwischen den Fühlern liegt.

$$Q_{th} = \sum_{i=1}^5 (T_{i,stop} - T_{i,start}) * m_i * c_{p,Wasser}$$

Die gemessene Energie aus dem sensiblen Speicher (HP1) liegt zwischen 75% und 85% dieses theoretischen Potentials. Der Mittelwert aus den 5 Messwerten (80%) wurde als Korrekturfaktor definiert als Vergleichsbasis für den PCM-Speicher und neu als 100% definiert.

Für den PCM-Speicher (HP2 und HP3) wurde analog aus den Temperaturdifferenzen mit der Wärmekapazität von Wasser eine Speicherkapazität als Vergleichsbasis ermittelt und die tatsächlich gemessene Speicherkapazität mit der mit dem Korrekturfaktor multiplizierten, theoretischen Speicherkapazität verglichen. Damit ergibt sich für den PCM-Speicher eine Kapazität, welche 10 - 80% höher liegt als mit dem Wasserspeicher.

Obwohl nur wenige Tage ausgewertet wurden, ist ersichtlich, dass beim Wasserspeicher generell höhere Temperaturdifferenzen erreicht wurden als beim PCM-Speicher.

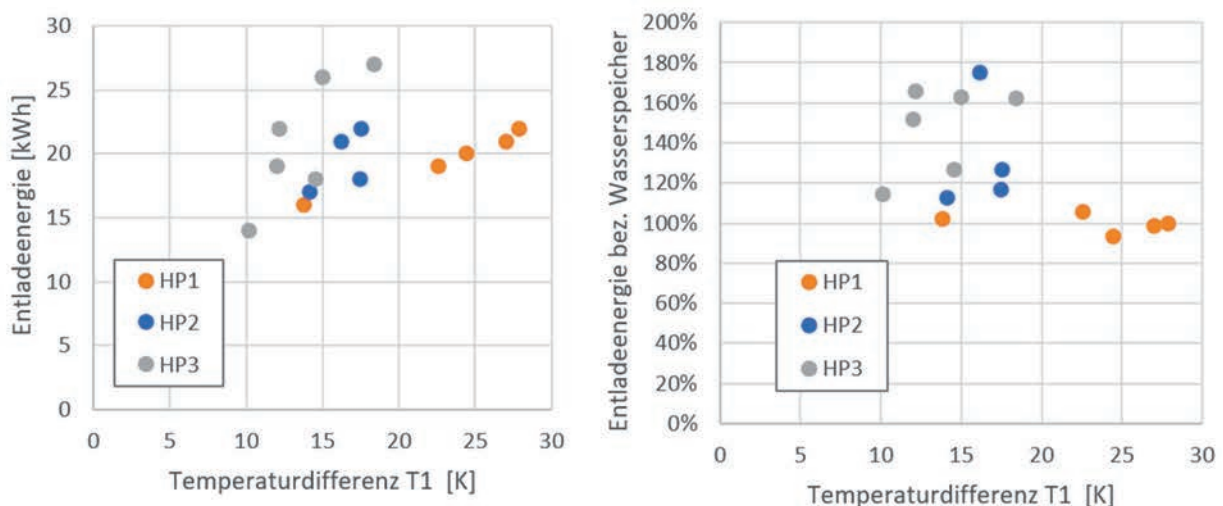


Abbildung 8: Aus Speicher entnommene Wärmemenge für verschiedene Temperaturdifferenzen.

Zu erwarten ist, dass sich mit zunehmender Temperaturdifferenz die Kapazität dem Wasserspeicher annähert, da der sensible Anteil gegenüber dem latenten Anteil zunimmt. Mit dem Latentspeicher konnten jedoch gar nicht so grosse Temperaturdifferenzen erreicht werden wie mit dem sensiblen Speicher.

In Abbildung 9 und Abbildung 10 ist jeweils ein Tag mit Speicherbeladung und Entladung in HP1 respektive HP3 dargestellt. Die durchschnittliche Entladeleistung liegt in beiden Fällen bei ca. 1.7 bis 1.8 kW.

Beim sensiblen Speicher bleibt die oberste Temperatur lange Zeit fast konstant und fällt dann schnell ab. Beim latenten Speicher sinkt die Temperatur des obersten Fühlers schneller ab. Der zweitoberste Fühler kann im latenten Speicher die Temperatur lange halten und fällt dann kurz vor Schluss stark ab. Vermutlich kann sich das von unten im Speicher nachfliessende Wasser im PCM-Speicher nicht genügend schnell aufwärmen, weil der Wärmewiderstand der Cowa-Caps zu gross ist. Dadurch stellt sich eine grössere Temperaturdifferenz zwischen PCM und umgebendem Wasser ein. Damit wird der Wärmewiderstand der PCM-Kapseln (Wärmeleitung innerhalb der Kapseln und durch die Kapselwand) zum begrenzenden Faktor für die Speicherkapazität.

In Abbildung 10 ist erkennbar, dass nach dem Ausschalten der Wärmepumpe um 15:00 Uhr weiterhin Solarstrom zur Verfügung gestanden hätte, welcher ins Netz eingespeist wurde.

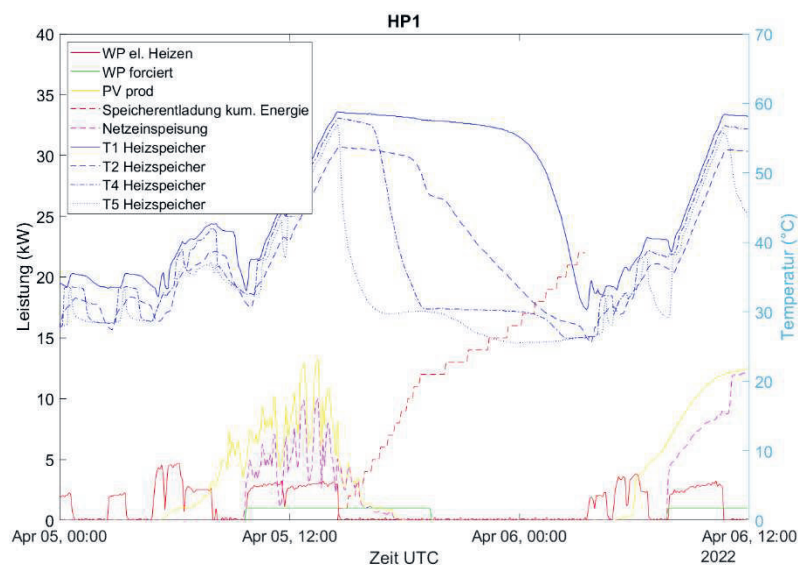


Abbildung 9: Speicherentladung ohne PCM in HP1.

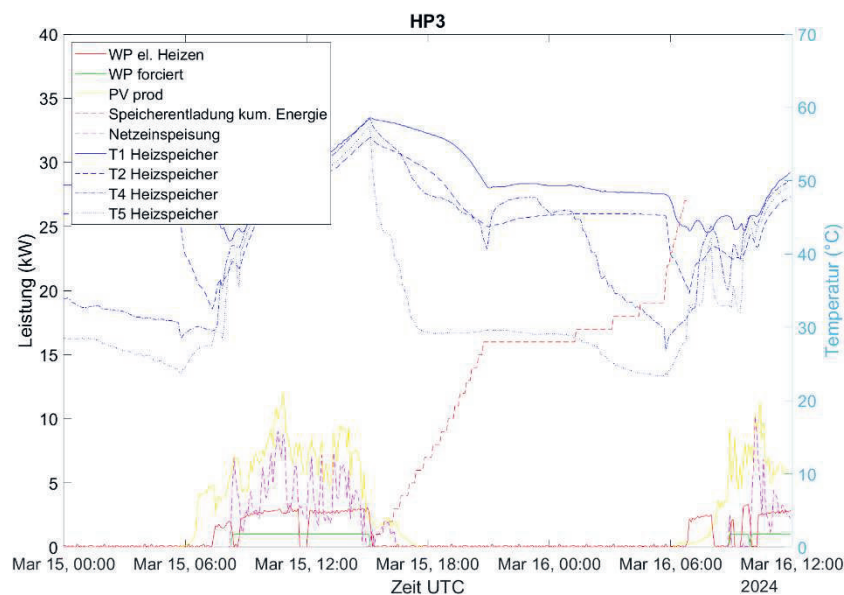


Abbildung 10: Speicherentladung mit PCM in HP3.

Die Wärmepumpe hat ausgeschaltet, weil die maximale Speichertemperatur erreicht wurde. Nach 15 bis 21 Uhr wurde der Speicher bereits wieder entladen. Diese Energie hat dann am nächsten Morgen gefehlt, so dass die Wärmepumpe einschalten musste, bevor Solarstrom zur Verfügung stand. Die thermische Entzugsleistung aus dem Speicher betrug in diesem Zeitraum ca. 3 kW. Im Weiteren ist ersichtlich, dass zwischen 21 und 2 Uhr in der Nacht keine Wärme aus dem Speicher entnommen wurde. Dadurch ist die Temperatur am 2. Speicherfühler, welche kurz zuvor abgesackt ist, wieder erholt. Dies ist ein weiteres Zeichen dafür, dass benötigte Entzugsleistung zu einer grossen Temperaturdifferenz zwischen den Kapseln und dem umgebenden Wasser führt. Die Abbildung 11 zeigt die Beladung des Speichers Ende Mai. Nachdem die Wärmepumpe abgeschaltet hat, ruht der Speicher, da es im Gebäude keinen Wärmebedarf gibt.

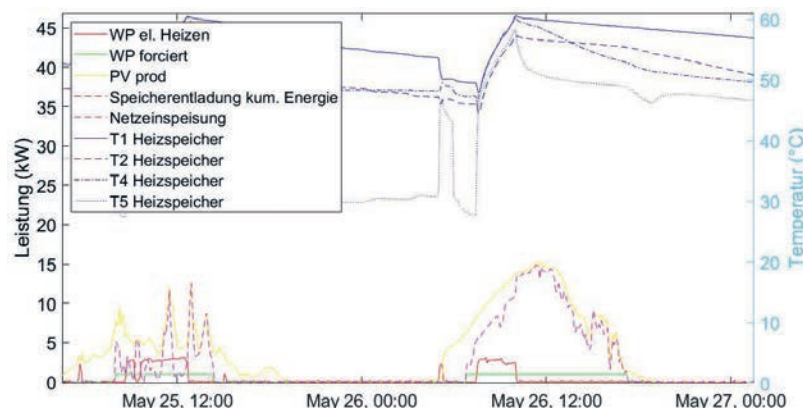


Abbildung 11: Speicherbeladung in HP3 am 26.5.2024.

Die Temperaturen der Fühler sinken ab, insbesondere des zweitobersten Fühlers. Der Temperaturverlust des obersten Fühlers ist stärker als in HP1 ohne PCM, welcher sogar entladen wird (vgl. Abbildung 9), was darauf hinweist, dass dies keine Wärmeverluste durch die Speicherwand sind, zumal es sich um den gleichen Speicher mit der gleichen Isolation handelt.

Es ist vielmehr ein Hinweis darauf, dass das PCM noch nicht vollständig geschmolzen war, als die Wärmepumpe abgeschaltet hat. Nach dem Abschalten der Wärmepumpe fliesst die Wärme aus dem Wasser in das PCM und schmilzt dieses weiter auf. Das heisst, der Speicher könnte weiter Wärme aufnehmen. In dieser Situation hätte eine weitere Überladung jedoch keinen Sinn, da die Wärme gar nicht mehr benötigt wird.

Aus obigen Untersuchungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen

1. Das Bottleneck ist die Wärmeentzugsleistung. Die Wärme kann nicht mehr genügend schnell aus dem PCM in das Wasser nachfliessen, d.h. die Wärmepumpe schaltet nicht wieder ein, weil zu wenig Energie im Speicher ist, sondern weil diese Energie zu lange braucht, um aus dem PCM ins Wasser zu gelangen und dadurch nicht genügend Temperatur zur Verfügung steht.
2. Das gleiche Bottleneck ist auch bei der Beladung erkennbar. Das Wasser, welches durch den Fühler gemessen wird, erreicht zwar die Solltemperatur und die Wärmepumpe schaltet aus. Die Wärme ist aber noch nicht vollständig in die PCM-Kapseln geflossen, d.h. wenn mit kleiner Leistung weiter Wärme in den Speicher gebracht wird, kann dieser weiter beladen werden, ohne dass die maximale Temperatur überschritten wird. Begrenzend dabei ist jedoch die minimale Leistung der Wärmepumpe, also die minimale Drehzahl, abzüglich der vom Heizkreis gleichzeitig bezogenen Leistung. Im Datenblatt der Wärmepumpe sind keine detaillierten Leistungsangaben, nach eigener Schätzung liegt die minimale thermische Wärmepumpenleistung A5/B60 bei ca. 3 kW bei einer elektrischen Leistung von ca. 1.7 kW.

3. In einer optimierten Regelstrategie wird die Beladeleistung der Wärmepumpe vor Erreichen der Ladeschlusstemperatur kontinuierlich reduziert. Die Wärmepumpe liefert mit minimaler Leistung so lange Sonne verfügbar ist, damit die Wärme nicht vom Heizkreis aus dem Speicher gezogen wird. Die Wärme im Speicher hat damit Zeit, aus dem Wasser ins PCM zu fließen und die Kapazität kann damit erhöht werden.
4. Die Regelstrategie sollte auch einen Ausschaltpunkt der Eigenstromoptimierung umfassen. In der Übergangszeit wird sonst der Speicher unnötig oft geladen, obwohl die Wärme gar nicht benötigt wird, siehe auch Abbildung 11.

Die ersten beiden Punkte hinsichtlich Wärmeübergang werden mit der neuen COWA Compact Cell (siehe unten) adressiert. Eine optimierte Regelstrategie kann am Pilotprojekt in Pany nicht getestet werden, da die Wärmepumpensteuerung dies nicht zulässt.

Schaltverhalten und Arbeitszahlen der Wärmepumpe

Während HP2 ist aufgefallen, dass die Laufzeiten der WP mit PCM-Speicher nicht wie erwartet gestiegen, sondern sogar abgesunken sind, und es wurden auch mehr Schaltungen der WP verzeichnet. Dies deutet darauf hin, dass der PCM-Speicher zu erhöhtem Takten geführt hat. Zunächst scheint dies kontraintuitiv, da die Speicherkapazität um das Zweifache erhöht wurde. In den kalten Monaten wird auch der PCM-Speicher gleitend betrieben. Das bedeutet, dass das Potential des PCM nicht ausgenutzt werden kann. Da bei gleitendem Betrieb das PCM in fester Form vorliegt, sinkt die mögliche Entladeleistung des Speichers, weil die feste Phase des PCM länger als Wasser benötigt, um dieselbe Energiemenge abzugeben. Da nun der Wassergehalt im Speicher gesunken ist, sinkt auch die relative Speicherkapazität bei gleitendem Betrieb. Der Verbraucher merkt davon nichts, weil einfach der Massenstrom und/oder die Temperaturentladung des Wärmeträgers ins Gebäude erhöht wird. Für die WP bedeutet dies jedoch ein häufigeres Einschalten, um das Temperaturniveau wieder bereitzustellen.

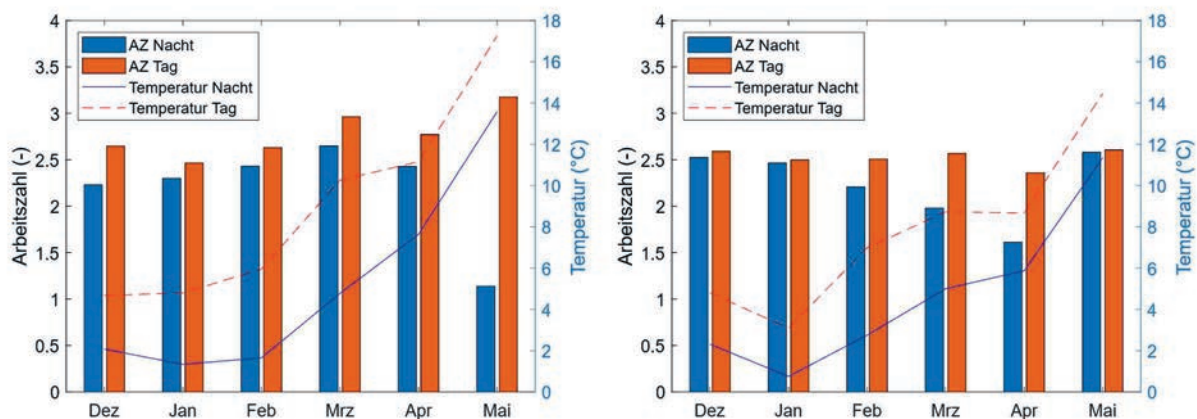


Abbildung 12: Monatsarbeitszahl Heizen (Systemgrenze JAZ) und der Aussentemperatur mit Unterscheidung Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2).

Der Verdampfer befindet sich gut geschützt an der südlichen Fassade. Dadurch werden bei Besonnung höhere Lufttemperaturen als in der Umgebung erreicht. Um diesen Umstand auszunützen, ist eine Nachtabsenkung einprogrammiert, welche zwischen 20:30 Uhr und 6:30 Uhr angewendet wird. Die Abbildung 12 zeigt die Monatsarbeitszahlen der Wärmepumpe im Heizbetrieb und die Aussentemperatur mit Unterscheidung zwischen Tag und Nacht. Der Tag-Nacht Unterschied ist in HP2 kleiner als in HP1.

In Abbildung 13 wird sichtbar, dass der Unterschied der Heizwärmeproduktion zwischen Tag und Nacht, vor allem in den kalten Monaten (Dezember, Januar, Februar), kleiner ist in HP2 als in HP1. Dies liegt an dem Effekt der tieferen sensiblen Speicherkapazität. Dieser Effekt führt dazu, dass die Regelung öfter gezwungen ist, die WP auch in der Nacht laufen zu lassen, damit die Temperatur im Speicher gehalten werden kann. Beim sensiblen Wasserspeicher wird in den wärmeren Monaten die WP häufiger in der Nacht eingeschaltet. Dies dreht sich beim latenten PCM-Speicher um. Da in den wärmeren Monaten allgemein weniger Heizwärme gebraucht wird, wird der Speicher auch weniger schnell entladen und kann somit die Wärme über die ganze Nacht zur Verfügung stellen, ohne die WP einschalten zu müssen. Für den Frühling und folglich auch den Herbst scheint dies beim Wasserspeicher nicht der Fall zu sein. Denn in HP1 musste die WP zu einem grösseren Anteil auch bei Nacht einschalten.

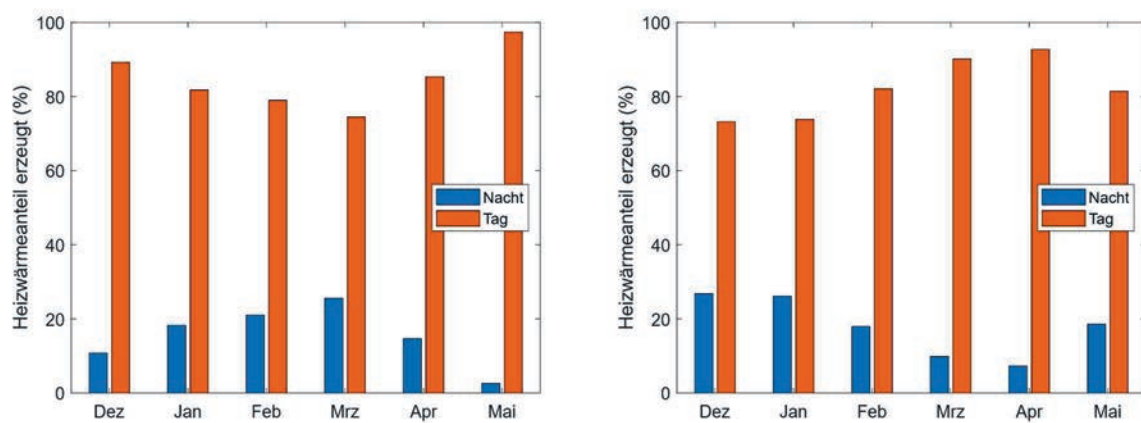


Abbildung 13: Erzeugter Heizwärmeanteil, unterschieden nach Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2).

Dies ist eine mögliche Stellschraube, an der der PCM-Speicher optimiert werden kann. Die Schmelztemperatur des PCM spielt dabei eine zentrale Rolle. Wenn diese zu hoch ist, muss die WP eine zu hohe Senktemperatur bereitstellen und kann nicht von einem potenziellen Effizienzgewinn profitieren. Wenn hingegen die Schmelztemperatur zu niedrig ist, kann der Speicher nie von der latenten Wärme profitieren und ist während der meisten Zeit ein sensibler Speicher.

Strategiewechsel bei Cowa

Anfang des Jahres 2024 wurde im Verwaltungsrat von Cowa entschieden, die Vermarktung und Produktion der CowaCaps per sofort einzustellen. Die Gründe dieses Entscheids waren:

1. Zu geringes Skalierungspotential des Produktes, da spezielle Pufferspeicher mit Füllöffnungen benötigt werden. Dies führte bei der Vermarktung zu grossen Einschränkungen der potentiellen Geschäftspartner. Ein Nachrüsten in bestehende Puffer wurde ebenfalls geprüft, aber als nicht wirtschaftlich befunden.
2. Haarrisse im Kapseldeckel führten zu Ausschuss in der Grössenordnung von $< 1\%$. Für einen sicheren Betrieb über die Lebensdauer wären aber $< 0.1\%$ nötig gewesen. Dies und die Unsicherheit, was Risse ohne Leckage für die Lebensdauer bedeuten, hätten sehr grossen Mehraufwand in der Produktion für die Qualitätskontrolle, sowie sehr intensive Tests bedeutet. Dies wurde als zu risikobehaftet und kostspielig bewertet.

3. Die Arbeit an Cowas neuem Produkt, der Compact Cell, war bereits weit genug fortgeschritten, um einen relativ schnellen Wechsel zu ermöglichen. Das Produkt wurde ursprünglich mit Fokus auf Trinkwassererwärmung entwickelt, ist aber auch für den Einsatz als Pufferspeicher oder in der Kombination geeignet (siehe unten).

Die Cowa Compact Cell

Cowa COMPACT Cells [1] sind hochkompakte Wärmespeicher befüllt mit Phasenwechsel-Material. Dank der Cowa-Technologie sind die Speicher kompakter und leistungsfähiger als vergleichbare Wasserspeicher und sind zudem einfach zu installieren. Das Konzept basiert auf einem Wärmetauscher umgeben von PCM, verpackt in einem Gehäuse mit exzellenter Wärmedämmung.

Tabelle 3: Technische Daten des neuen Cowa-Speichers "Compact Cell".

Compact Cell	45-400	58-400	
Breite	600		mm
Tiefe	340		mm
Höhe	1400		mm
Gewicht (Prototyp)	215		kg
Speicherkapazität vollgeladen	11	13	kWh
Wasser-Äquivalent	350	-	l
Zapfvolumen V40	-	400	l
Speicherkapazität pro m ³	75	-	kWh/m ³
Wärmeverluste Energielabel C	70	80	W
Druckverlust bei max. Volumenstrom	50	-	kPa
Möglicher Volumenstrom Entladekreis	20	20	l/min
Möglicher Volumenstrom Ladekreislauf	30	20	l/min
Minimaler Betriebsdruck	1.5	1.5	bar
Maximaler Betriebsdruck	-	8	bar
Maximale Betriebstemperatur	-	75	°C



Durch die zwei Wärmetauscher-Wasserkreisläufe ermöglicht das Produkt die Beladung über eine Wärmepumpe und die Nutzung als Warmwasserspeicher und mit dem zweiten Kreis als Hygienekreislauf für Trinkwarmwasser. Bei Nutzung als Pufferspeicher werden beide Kreisläufe für minimierte Druckverluste und maximale Übertragungsleistung parallel verschaltet. Weiter kann das System als Kombispeicher oder klassisch als Pufferspeicher mit TWW-Speicher betrieben werden, letztere Lösung wird im Weiteren genauer beschrieben.

Beide Zellen werden nach Wärmepumpensystemmodul Schema 1.6 wie in Abbildung 14 gezeigt verschaltet. Der Speicher ist äusserst platzsparend und entspricht vollgeladen einem wasserbasierten Speicher mit rund 350 l Nennvolumen. Durch die kompakte, kubische Formgebung und dank den oben angebrachten Anschlüssen können die Zellen parallel nach Tichelmann zusammengeschaltet werden, um die Speicherkapazität modular und platzsparend zu erweitern. Im gleitenden Betrieb gemäss Heizkurve übernimmt die Cowa COMPACT Cell 45 die Funktion einer hydraulischen Trennung zwischen Wärmepumpe und Wärmeabgabe wie ein herkömmlicher Parallel-Pufferspeicher. Zudem reicht die passive Kapazität im sensiblen Bereich zweier Zellen aus, um genügend Energie für den Enteisungsprozess bereitzustellen.

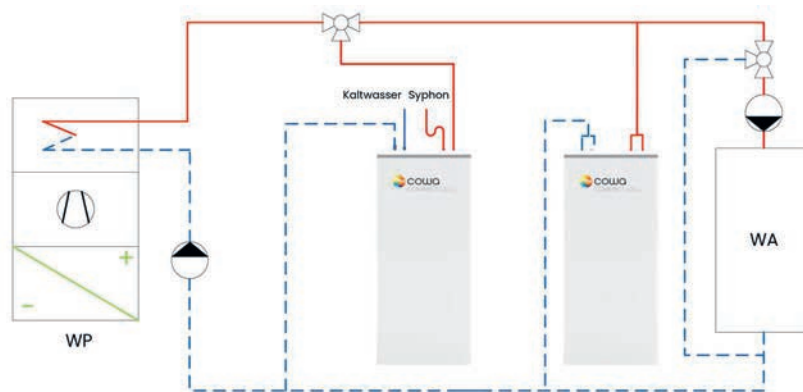


Abbildung 14: Hydraulikschema der Compact Cell 45 mit Compact Cell 58 als TWW-Speicher (WPSM 1.6) [2].

Theoretische Einbindung in Pany

Um die gewünschte Kapazitätserhöhung für den Piloten zu erreichen, wären 2-3 Pufferzellen, sowie 1-2 Warmwasserzellen wünschenswert. Die benötigte Grundfläche dafür wäre 0.6 m² bis 1 m², was eine bedeutende Platzeinsparung im Heizungsraum wäre und die Möglichkeit für alternative Nutzungen eröffnen würde. Die Zellen würden dabei nach Tichelmann parallel eingebunden. Abbildung 15 zeigt an zwei realen Kundenbeispielen, wie so ein Speichersystem installiert und platzsparend im Heizungskeller eingebunden werden kann. Links ist eine Puffer/TWW-Zelle eingebaut und im rechten Bild sind drei Pufferzellen installiert.



Abbildung 15: Zwei Installationsbeispiele von Pilotanlagen, umgesetzt in Q3 2024: Warmwasser- und Pufferspeicher (links) sowie drei Pufferspeicher (rechts).

Auswirkung auf das Projekt

Der Strategiewechsel hat auf den direkten Verlauf des Projektes keinen Einfluss. Die grundlegenden Erkenntnisse zur PCM-Technologie können auf die neuen Speicher übertragen werden und mit Simulationen können auch Aussagen über die Performance der neuen Speicher in Pany getroffen werden. Für die Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Technologie müssen die Erkenntnisse auf die neuen Speicher übertragen werden, was problemlos möglich ist. Insgesamt ist das Projekt und die resultierenden Erkenntnisse noch immer relevant für Cowa und trägt zur erfolgreichen Kommerzialisierung der PCM-Technologie bei.

Zusammenfassung und Ausblick

Im P&D Projekt wurde ein neuartiges PCM Speicherkonzept, bei dem bestehende Heizungs-Pufferspeicher mit makroverkapselten PCM nachgerüstet werden können, um damit den PV-Eigenverbrauch in Kombination mit Wärmepumpe zu steigern. Die erste Heizperiode diente als Referenz mit Wasserspeicher. In Heizperiode 2 und 3 konnte eine deutliche Steigerung des Eigenverbrauchs und der Heizautarkie festgestellt werden, womit zwei der KPI der Projektziele erreicht wurden. Allerdings kann der Anteil der PCM an die Steigerung nicht quantifiziert werden, da auch die Betriebsbedingungen, insbesondere die Hausbelegung, über drei Heizperioden variieren. Die Analyse von Tagesgängen des PCM und Wasserspeichers bestätigen aber die deutlich höhere Speicherkapazität der PCM im Bereich von 10-80%, allerdings auch eine Limitierung der Be- und Entladeleistung durch limitierten Wärmeübergang zwischen Wasser und PCM, so dass über angepasste Wärmepumpenregelung die Speicherkapazität noch besser genutzt werden kann, was eine weitere Erhöhung der KPIs bewirken kann. Die Steigerung der JAZ konnte in den Heizperioden nicht nachgewiesen werden, allerdings bestehen hierfür ebenfalls Potenziale in der Regelstrategie, die aufgrund von Limitierung der installierten Wärmepumpe nicht in der P&D Anlage getestet werden konnten.

Nach drei Heizperioden wurde bei Cowa ein Strategiewechsel und Übergang auf einen reinen PCM-Speicher beschlossen, der als Cowa Compact Cell parallel entwickelt worden ist. Aktuell wird die Compact Cell für rund 4000.- CHF an Endkunden vertrieben. Dies hätte Kosten von 12'000 – 20'000 CHF für 3 – 5 Zellen zur Folge. Im Vergleich wurde die Kapselfüllung für den 800 Liter Speicher mit ca. 4000.- CHF beziffert. Dies würde schätzungsweise 10'000.- Franken Gesamtkosten mit dem Pufferspeicher und TWW-Speicher zur Folge haben. Die Compact Cell Lösung ist momentan also noch etwas teurer, bietet aber eine deutlich einfachere und platzsparendere Installation.

Die aktuelle Entwicklungsrichtung von Cowa zielt auf Kostenreduktion des PCM-Materials durch Skalierungseffekte und verbesserte Rezepturen. Der wichtigste Entwicklungspfad für die Kostenreduktion auf Speichersystemebene stellt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der PCM dar, da dies die Verwendung von alternativen Wärmeübertragungskonzepten ermöglicht. Aktuell wird geschätzt, dass die aktuellen Produkte mit der nächsten Generation an PCM und Wärmeübertragern zu einem Preis von 1000 – 2000 CHF angeboten werden können. Damit wären die Produkte mit aktuellen Puffer- und Trinkwarmwasserspeichern konkurrenzfähig.

Quellen

- [1] Cowa thermal solutions AG, Datenblatt Cowa Compact Cell Kombi, download unter cowa-ts.com/uploads/files/Produkte/CompactCell_Kombi_Datenblatt_DE_WEB.pdf, abgerufen am 14.4.2025.
- [2] Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, Wärmepumpensystemmodul, Funktionsschemata, download unter <https://www.wp-systemmodul.ch/files/Downloads%20DE/Installateure-2021/Funktionsschemata-20200425.pdf>, abgerufen am 14.4.2025.