



Schlussbericht vom 29. August 2025

SunStore

Latenter, kompakter Pufferspeicher für mit Photovoltaik betriebene Wärmepumpen



Quelle: ©Cowa



Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Subventionsempfänger/innen:

Cowa Thermal Solutions AG
Technopark Luzern Platz 4, CH-6039 Root D4
www.cowa-ts.com

OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energietechnik IET
Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil
www.ost.ch

Autor/in:

Christoph Meier, OST IET, christoph.meier@ost.ch
Carsten Wemhöner, OST IET, carsten.wemhoener@ost.ch
Marc Werro, OST IET, marc.werro@ost.ch
Bercan Siyahhan, OST IET, bercan.siyahhan@ost.ch
Philipp Roos, Cowa TS, philipp.roos@cowa-ts.com
Roger Zimmermann, Cowa TS, roger.zimmermann@cowa-ts.com
Remo Waser, Cowa TS, remo.waser@cowa-ts.com

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502289-01

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



Zusammenfassung

Ziel des Projekts ist die Bewertung eines neuen, auf makroverkapseltem PCM beruhenden Speicherkonzepts in einer Pilotanlage über vier Heizperioden. Die PCM-Kapseln auf Salzhydratbasis können in bestehenden Wasserspeichern nachgerüstet werden und die Speicherkapazität basierend auf Stoffwertbetrachtungen um den Faktor 2-3 erhöhen. In der Pilotanlage in Pany, GR, auf einer Höhe von 1178 m. ü. M. wurde die erste Heizperiode mit dem bestehenden, wassergefüllten Heizungspufferspeicher als Referenz gemessen und für die Heizperioden 2-4 unterschiedliche Ausführungen der PCM-Kapseln ausgewertet. Mit der erhöhten Speicherkapazität soll der Eigenverbrauch der installierten PV-Anlage von 17 kW_p erhöht, sowie die Jahresarbeitszahl gesteigert und der Netzbezug reduziert werden.

Die Ergebnisse der Heizperioden mit PCM-Kapseln gefülltem Speicher bestätigen, dass der Eigendeckungsgrad (Anteil des selbst erzeugten Stroms am gesamten Stromverbrauch) um bis zu 50% von 21% auf 35-40% gesteigert werden konnte. Der Eigenverbrauchsgrad (Anteil des selbst verbrauchten Stroms am gesamten PV-Ertrag) wird nur geringfügig beeinflusst, da gleichzeitig auch der PV-Ertrag angestiegen ist. Zudem war der Heizbedarf durch wechselnde Belegung und Aussentemperaturbedingungen in den vier Heizperioden sehr unterschiedlich, so dass sich nicht alle Effekte eindeutig zuordnen liessen. Eine Steigerung der Jahresarbeitszahl konnte in der Pilotanlage nicht beobachtet werden. Zudem zeigt der PCM-Speicher ein erhöhtes Taktverhalten, was auf die reduzierte Speicherkapazität im festen Zustand des PCM zurückzuführen ist.

Eine detaillierte Betrachtung des Speicherverhaltens zeigt jedoch, dass die Speicherkapazität verglichen mit dem Wasserspeicher um bis ca. 80% zugenommen hat und die Speicherung bei tieferem Temperaturniveau erfolgt. Allerdings wurde auch die Einschränkung festgestellt, dass die Be- und Entladeleistung des mit PCM gefüllten Speichers durch limitierten Wärmeübergang zwischen dem Speicherwasser und den Kapseln begrenzt ist, was die Nutzung der gesamten Speicherkapazität einschränkt. Dies wird durch eine Speicherneuentwicklung adressiert.

Aufgrund von fehlender Skalierbarkeit, Qualitätsproblemen bei den Kapseln und einer weit fortgeschrittenen Parallelentwicklung wurde Anfang 2024 entschieden, das Kapselkonzept nicht weiterzuverfolgen und durch ein neues Konzept, basierend auf einem kompakten, vollständig mit PCM gefüllten Speicher, der Compact Cell, abzulösen. Das neue Konzept ermöglicht eine sehr kompakte Speicherung im Vergleich zu Wasserspeichern. Gerade in Sanierungsanwendungen ist der Platzbedarf oft sehr knapp, so dass kein ausreichend dimensionierter Pufferspeicher eingebaut werden kann. Ein zu kleiner Speicher kann zu Problemen wie übermässiges Takten (Lebensdauerreduktion) führen. Hier bietet die Compact Cell eine Lösung, um genügend Speicherkapazität auf kleinem Raum unterzubringen. Des Weiteren ist auch ein Trinkwarmwasserspeicher in das Konzept integriert, so dass ein deutlich grösserer Anwendungsbereich adressiert wird. Das neue Produkt konnte im Zeitrahmen dieses Projekts nicht mehr in der Pilotanlage eingebaut werden, aber es sind ebenfalls Feldtests in der gleichen Anlage geplant.

Die Wirtschaftlichkeit des Speichers mit den Kapseln konnte in dem Projekt nicht eindeutig nachgewiesen werden, da sich die Vergleichsperioden bezüglich Heizwärmeverbrauch und PV-Ertrag sehr stark unterscheiden und auch eine grosse Abhängigkeit von den künftigen Stromtarifen besteht. Im besten Fall könnte von einer Amortisationszeit von 12 Jahren mit den hier untersuchten Tarifen ausgegangen werden.



Résumé

L'objectif du projet est d'évaluer un nouveau concept de stockage basé sur des matériaux à changement de phase (MCP) macro-encapsulés dans une installation pilote sur quatre périodes de chauffage. Les capsules de MCP à base d'hydrates salins peuvent être installées dans des réservoirs d'eau existants et augmenter la capacité de stockage, selon les analyses des propriétés des matériaux, d'un facteur de 2 à 3.

Dans l'installation pilote de Pany, GR, située à 1178 m d'altitude, la première période de chauffage a été mesurée avec le réservoir tampon rempli d'eau existant comme référence. Pour les périodes 2 à 4, différentes configurations de capsules MCP ont été évaluées. Avec l'augmentation de la capacité de stockage, l'autoconsommation de l'installation photovoltaïque (PV) de 17 kW_c devait être augmentée, le coefficient de performance annuel amélioré et la dépendance au réseau réduite.

Les résultats des périodes de chauffage avec réservoir rempli de MCP confirment que le taux d'autonomie (part de l'électricité autoproduite dans la consommation totale) a pu être augmenté jusqu'à 50 %, passant de 21 % à 35–40 %. Le taux d'autoconsommation (part de l'électricité PV consommée sur place dans la production totale) n'a été que légèrement influencé, la production PV ayant augmenté en parallèle. De plus, la demande de chauffage a varié considérablement au cours des quatre périodes en raison des variations d'occupation et des conditions de température extérieure, rendant l'attribution précise des effets difficile. Une augmentation du coefficient de performance annuel n'a pas pu être observée dans l'installation pilote. Par ailleurs, le réservoir MCP a présenté une fréquence de cycles plus élevée, liée à la capacité réduite de stockage en phase solide.

Une analyse détaillée du comportement du réservoir montre toutefois que la capacité de stockage a augmenté jusqu'à environ 80 % par rapport au réservoir d'eau et que l'accumulation d'énergie se fait à un niveau de température plus bas. Cependant, il a été constaté que la puissance de charge et de décharge du réservoir rempli de MCP est limitée par le transfert thermique entre l'eau de stockage et les capsules, ce qui réduit l'utilisation complète de la capacité. Ce point est pris en compte dans un nouveau développement de réservoir.

En raison d'un manque de scalabilité, de problèmes de qualité des capsules et de l'avancement d'un développement parallèle, il a été décidé début 2024 de ne plus poursuivre le concept à capsules et de le remplacer par un nouveau concept de réservoir compact entièrement rempli de MCP, appelé Compact Cell. Ce nouveau concept permet un stockage beaucoup plus compact que les réservoirs d'eau. Dans les projets de rénovation, l'espace disponible est souvent très limité, ce qui empêche l'installation d'un réservoir tampon suffisamment dimensionné. Un réservoir trop petit peut entraîner des problèmes comme un nombre excessif de cycles (réduction de la durée de vie). La Compact Cell offre une solution en permettant de loger une capacité de stockage suffisante dans un espace restreint. De plus, le concept intègre un ballon d'eau chaude sanitaire, ce qui élargit considérablement le champ d'application. Le nouveau produit n'a pas pu être installé dans l'installation pilote dans le délai du projet, mais des essais sur site sont prévus.

La rentabilité du système avec capsules n'a pas pu être démontrée de manière concluante dans le cadre du projet, car les périodes de comparaison présentaient de grandes différences en termes de consommation de chaleur et de production PV, et la rentabilité dépend également fortement des futurs tarifs de l'électricité. Dans le meilleur des cas, la période d'amortissement pourrait être estimée à 12 ans sur la base des tarifs étudiés.



Summary

The aim of the project is to evaluate a new storage concept based on macro-encapsulated PCM in a pilot plant over four heating periods. The salt-hydrate-based PCM capsules can be retrofitted into existing water storage tanks and, according to material property analyses, increase the storage capacity by a factor of 2–3. In the pilot plant in Pany, GR, at an altitude of 1178 m a.s.l., the first heating period was measured using the existing water-filled buffer tank as a reference. For heating periods 2–4, different designs of PCM capsules were tested. With the increased storage capacity, the self-consumption of the installed 17 kW_p PV system is expected to rise, along with the annual performance factor, while grid dependency is reduced.

The results of the heating periods with the PCM-filled storage confirm that the self-sufficiency rate (share of self-generated electricity in total electricity consumption) could be increased by up to 50% from 21% to 35–40%. The self-consumption rate (share of self-consumed electricity in total PV output) was only slightly affected, as PV output increased at the same time. Furthermore, heating demand varied greatly over the four periods due to changes in occupancy and outdoor temperature, making it difficult to attribute all effects precisely. An increase in the annual performance factor was not observed in the pilot plant. Consequently, the PCM storage also showed higher cycling behaviour due of the lower heat capacity in solid state of the PCM.

A detailed analysis of storage behaviour shows that the storage capacity increased by up to approx. 80% compared to the water tank, and storage occurred at a lower temperature level. However, a limitation was identified: the charging and discharging performance of the PCM-filled storage is restricted by limited heat transfer between the storage water and the capsules, which reduces the use of the full capacity. This is being addressed through a new storage design.

Due to lack of scalability, quality issues with the capsules, and advanced parallel development, it was decided at the beginning of 2024 not to continue the capsule concept and to replace it with a compact, fully PCM-filled storage concept – the Compact Cell. The new concept allows for very compact storage compared to water tanks. Space is often very limited, especially in renovation projects, and installing a sufficiently large buffer tank is not always possible. An undersized tank can cause problems such as excessive cycling (reducing service life). The Compact Cell provides a solution by offering sufficient storage capacity in a small space. Furthermore, a domestic hot water tank is integrated into the concept, which significantly expands its range of applications. The new product could not be installed in the pilot plant within the timeframe of this project, but field tests are also planned.

The economic viability of the capsule-based storage could not be conclusively demonstrated in this project because the comparison periods varied greatly in terms of heating demand and PV yield and because future electricity tariffs play a major role. In the best case, a payback period of 12 years could be assumed based on the tariffs investigated here.



Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Mit dem Nachrüsten der PCM-Kapseln kann die Speicherkapazität nennenswert gesteigert werden. In der Pilotanlage wurde eine Erhöhung der Speicherkapazität von 80% ausgewertet.
- Durch die erhöhte Speicherkapazität konnte der Heiz-Eigendeckungsgrad von 21% auf 35-40% und die Eigenverbrauchsgrad um 10-20% (von 28% auf 33-34%) gesteigert werden. Eine Steigerung der Jahresarbeitszahl scheint mit verbessertem Nachtbetrieb möglich, konnte aber durch die begrenzte Be- und Entladeleistung in der Pilotanlage nicht demonstriert werden.
- Eine Begrenzung der Speicherkapazität entsteht durch die limitierte Wärmeübertragung des Wassers an die PCM-Kapseln, was die Be- und Entladeleistung einschränkt. Diese Einschränkung wird mit dem neuen Speicherkonzept der Compact Cells massiv entschärft, da diese für den Trinkwarmwasserbetrieb auf deutlich höhere Leistungen optimiert wurden, wodurch bei den gleichen Temperaturen eine um Faktor 5 höhere Leistung möglich ist.
- Während des Projekts wurde entschieden, auf ein neues und verbessertes Speicherkonzept zu wechseln, was im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht mehr in der Pilotanlage ausgewertet werden konnte. Das neue Konzept der Compact Cell verspricht eine deutliche Platzreduktion, was insbesondere für Sanierungsanwendungen interessant ist.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Glossar	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	10
1.1.1. Prinzip der Latentwärmespeicherung	10
1.1.2. Neue PCM-Materialien für Wärmepumpensysteme	10
1.1.3. Stand der Technik und Mitbewerber.....	11
1.2 Motivation des Projekts	11
1.3 Projektziele	12
2 Anlagenbeschreibung	14
2.1 Pilotobjekt	14
2.2 Pufferspeicher.....	15
2.3 PCM-Speicher	15
3 Vorgehen und Methode.....	16
3.1 Erfolgsfaktoren	16
3.2 Überprüfung der energetischen Kennzahlen.....	17
3.3 Messsystem zum Anlagenmonitoring.....	17
3.3.1. Messmittel und Messunsicherheiten	18
3.3.2. Ausfälle des Messsystems	18
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	19
4.1 Resultate des Monitorings	19
4.1.1. Klimatische Bedingungen	19
4.1.2. Eigenverbrauch: Steuerung und Berechnung	20
4.1.3. Stromverbrauch und Key Performance Indicators	21
4.1.4. Latenter Speicher	23
4.1.5. Taktverhalten	29
4.1.6. Anlageneffizienz	29
4.1.7. Wirtschaftlichkeit.....	33
4.2 Produktion und Qualitätssicherung der Kapseln	34
4.2.1. Phasenwechselmaterial (PCM)	34
4.2.2. Verkapselung und Produktion	35
4.2.3. Qualitätskontrollen	35



4.2.4.	Installation der Kapseln und Wiederinbetriebnahme der Anlage	38
4.2.5.	Überwachung der Anlage mittels elektrischer Leitfähigkeit.....	39
4.2.6.	Entleerung des Speichers nach HP2 und Sichtprüfung der Kapseln	39
4.2.7.	Produktion der neuen Kapseln und Wiederinbetriebnahme der Anlage	39
4.3	Strategiewechsel bei Cowa	39
4.3.1.	Die Cowa Compact Cell.....	40
4.3.2.	Einbindung in Pany	41
4.3.3.	Kosten und Entwicklungspfad	42
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	43
6	Publikationen und andere Kommunikation	44
	Literaturverzeichnis	45
	Abbildungsverzeichnis	46
	Tabellenverzeichnis	47
	Anhang	48
	Anhang A: Erfasste Messdaten.....	48
	Anhang B: Detailliertere Auswertungen der 1. Heizperiode.....	49



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CCTES	Competence centre of thermal energy storage (Kompetenzzentrum für thermische Energiespeicher, HSLU)
COP	Coefficient of Performance
CT	Computertomograph
EH	Elektroheizeinsatz
H	Heizung
HDPE	High-density Polyethylen
HGT	Heizgradtage
HSLU	Hochschule Luzern
JAZ	Jahresarbeitszahl
KPI	Key Performance Indicator / Kennzahl
PCM	Phase Change Material (Phasenwechselmaterial)
PV	Photovoltaik
TWW	Trinkwarmwasser
SAT	Sodium acetate trihydrate (Natriumacetat Trihydrat)
SNG	Systemnutzungsgrad
WP	Wärmepumpe
WNG	Wärmeerzeugernutzungsgrad
WPSM	Wärmepumpen-Systemmodul

Glossar

Arbeitszahl	Der Begriff wird Anstelle der Jahresarbeitszahl JAZ verwendet, da sie sich auf die Auswerteperiode Dezember bis Mai oder je nach Angabe auch auf Tages- oder Monatsbilanz bezieht und nicht auf das ganze Jahr.
Eigenverbrauch	Energiemenge, welche zeitgleich produziert (PV, Batterieentladung) und verbraucht wird
Eigenverbrauchsgrad	Verhältnis des Eigenstromverbrauchs zur gesamten PV-Produktion
Eigendeckungsgrad	Verhältnis des Eigenverbrauchs zum Gesamtverbrauch (energetische Kennzahl). Oft wird für diesen Begriff auch «Autarkiegrad» verwendet. In diesem Bericht wird auf das Wort «Autarkie» verzichtet, da es suggeriert, dass kein Anschluss an das Stromnetz mehr benötigt wird.
Ohmpilot	Steuerungseinheit von Fronius für Elektroheizeinsatz



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

1.1.1. Prinzip der Latentwärmespeicherung

Latentwärmespeicher sind Energiespeicher, die Wärme in Form eines Phasenwechsels, meist zwischen fest und flüssig, aufnehmen und wieder abgeben. Sie nutzen sogenannte Phasenwechselmaterialien (PCM), die beim Übergang von einem Aggregatzustand in einen anderen eine große Energiemenge – die sogenannte «latente Wärme» – speichern, ohne dass sich ihre Temperatur während des Prozesses wesentlich verändert. Beim Schmelzen nimmt das Material Wärme auf, beim Erstarren gibt es diese wieder ab.

Im Gegensatz zu sensiblen Wärmespeichern, bei denen sich die gespeicherte Energiemenge direkt aus der Temperaturänderung ergibt, bieten Latentwärmespeicher den Vorteil einer hohen Energiedichte bei konstantem Temperaturniveau. Dies macht sie besonders effizient für Anwendungen, bei denen Temperaturstabilität entscheidend ist.

Einsatzgebiete sind vielfältig: In der Gebäudeklimatisierung können Latentwärmespeicher Lastspitzen im Heiz- oder Kühlbedarf ausgleichen, indem überschüssige Wärme zwischengespeichert und bei Bedarf wieder abgegeben wird. In der Solartechnik speichern sie tagsüber gewonnene Wärme für die Nutzung in der Nacht oder bei Bewölkung. In der Industrie dienen sie zur Wärmerückgewinnung aus Prozessen und zur Stabilisierung von Produktionsbedingungen. Auch in der Kühlkette von Lebensmitteln und Medikamenten werden PCMs eingesetzt, um die Temperatur über längere Zeiträume konstant zu halten.

Die Phasenwechseltemperatur ist eine Materialeigenschaft und abhängig von dessen chemischer Zusammensetzung. Das bekannteste PCM ist Wasser mit einem Schmelzpunkt von 0 °C. Die Schmelzenergie entspricht der Wärmemenge, welche benötigt wird, um die gleiche Menge Wasser im flüssigen Zustand um 80 K zu erwärmen. Eisspeicher finden in der Gebäudeheizung z.B. Anwendung als Quellspeicher für Wärmepumpen, welcher oft durch Abwärme oder mittels Solarthermie wieder aufgeschmolzen wird.

1.1.2. Neue PCM-Materialien für Wärmepumpensysteme

Cowa Thermal Solutions AG ist ein Spin-off des Kompetenzzentrums für thermische Energiespeicher (CCTES) der Hochschule Luzern (HSLU), das mit dem Ziel gegründet wurde, thermische Energiespeicher auf Basis von Phasenwechselmaterialien zu kommerzialisieren. Cowa hat dazu in Zusammenarbeit mit der HSLU verschiedene, auf Salzhydraten basierte, Phase Change Materials (PCM) entwickelt, die für den typischen Temperaturbereich (senkenseitig) von Wärmepumpen im Gebäudebereich ausgelegt sind. Der Markteintritt mit dem Produkt Compact Cell erfolgte im Jahr 2025 mit Meier Tobler und es wurden bereits über 40 Speicher installiert.

Im Rahmen dieses Projektes wird die Technologie anhand des Vorgänger-Produkts, der Cowa Caps, in einem ersten realen Piloten getestet. Die Cowa Caps sind makroverkapseltes Salzhydrat, das als Kapseln in bestehenden Heizungspufferspeichern nachgerüstet werden kann, um deren Kapazität im Temperaturbereich des Phasenwechsels zu erhöhen. Die Erprobung umfasst dabei die Produktion der Kapseln für die Pilotanlage inklusive der benötigten Qualitätssicherung und Funktionsprüfungen, die Planung der Messinstallationen für die Pilotanlage, um eine vollständige Energiebilanzierung des Heizsystems zu ermöglichen, die Installation und Inbetriebnahme der Pilotanlage, und deren Überwachung und periodische Überprüfung einzelner Kapseln, um deren Funktionalität und Lebensdauer zu erproben. Dadurch sollen am Ende des Projekts klare Aussagen über die energetischen Vorteile der mit PCM gefüllten Pufferspeicher und deren Wirtschaftlichkeit gemacht werden können.



1.1.3. Stand der Technik und Mitbewerber

Im Markt der PCM für gebäudetechnische Anwendungen sind im Wesentlichen folgende Unternehmen tätig:

Axiotherm:

Die Firma Axiotherm mit Sitz in Deutschland bietet makroverkapselte PCM in verschiedenen Kapselformen an. Die vergleichbarsten Produkte sind dabei HeatSel® und HeatStixx®, wobei letzteres als Retrofitlösung angeboten wird, da die Kapseln durch gängige Speicheranschlussrohre passen. Die Verwendung von Paraffinen als PCM ermöglicht hohe materialspezifische Phasenwechselenthalpie mit Werten von 240 kJ/kg (ATP 36, Schmelztemperatur von 36 °C). Allerdings sind bei diesen Materialien die Kosten sehr hoch (260 CHF/kWh) und durch die Form der Kapseln werden lediglich Packungsdichten von ca. 40% erreicht, was zu niedrigen Systemenergiedichten im Bereich von 27 kWh/m³ führt. Zudem ist aufgrund der geringen Dichte (typischerweise < 900kg/m³) die volumetrische Energiedichte bedeutend kleiner als bei von Cowa verwendeten Salzhydraten (Dichte < 1'300 kg/m³). Unter all diesen Faktoren wird mit den Axiotherm HeatStixx® maximal ein Faktor 1.7 in der Kapazitätserhöhung im Vergleich zu Wasser erreicht.

Sunamp:

Sunamp produziert Stand-Alone Speicher-Units, so genannte Heat Batteries. Diese sind im wesentlichen metallische Lamellen-Wärmeübertrager, welche vom PCM umgeben sind. Das Heiz- oder Trinkwasser fließt durch die Innenrohre des Wärmeübertragers, wobei dank der grossen Übertragungsfläche sehr hohe Leistungen erzielt werden können. Die grösste Heat Battery mit etwa 12 kWh Kapazität "Thermino 300" ist umgerechnet für rund 4'000 CHF erhältlich, was rund 330 CHF/kWh entspricht. Cowa differenziert sich im Produktportfolio durch tiefere Kosten und ein grösseres Spektrum an angebotenen Phasenwechselmaterialien. Sunamp bietet aktuell nur ein Material mit 58 °C als Schmelzpunkt an, wogegen Cowa zwei marktreife Materialien bereits anbietet (58 °C und 48 °C) und weitere Temperaturniveaus in der Entwicklung hat. Das Material bei 48 °C ist dabei besonders hervorzuheben, da es die Kompatibilität mit fast allen am Markt erhältlichen Wärmepumpen bei relativ guter Ladeeffizienz ermöglicht und gleichzeitig die hygienische Warmwasseraufbereitung im Durchflussprinzip mit über 40 °C am Austritt ermöglicht.

1.2 Motivation des Projekts

Der Gebäudesektor verursacht 45% des schweizerischen Primärenergieverbrauchs. Im Jahr 2023 wurden über 30% des Endenergieverbrauchs für Raumwärme aufgewendet. Der fossile Anteil ist nach wie vor hoch - Schweizer Gebäude werden zu 37.2% mit Öl und zu 17.7% mit Gas beheizt [1].

Das Projekt SunStore soll einen wichtigen Beitrag leisten, um erneuerbare, mit Photovoltaik betriebene Wärmepumpen-Heizsysteme mit hohem Eigendeckungsgrad weiter zu verbreiten. Dank der erhöhten Speicherkapazität durch den Einsatz von PCM-Kapseln soll der Anteil der erneuerbaren Energie des Wärmepumpensystems (WP-System) bei gleich hoher (Sole/Wasser) oder sogar verbesserter (Luft/Wasser) Systemeffizienz gesteigert werden. Dadurch soll der Bezug von Netzstrom mit dem vorgeschlagenen System in der Übergangszeit und im Winter gesenkt werden, was sich positiv auf die Verkleinerung der Stromlücke im Winter und somit die Umweltbilanz und Versorgungssicherheit des schweizerischen Energiesystems auswirken würde. Somit entspricht das Projekt der strategischen Ausrichtung der Energieperspektiven 2050+ [2], sowohl hinsichtlich der Steigerung der Gesamteffizienz als auch dem Ausbau der Erneuerbaren.

In Neubau-Objekten soll durch die Befüllung des Heizungspufferspeichers mit PCM-Kapseln die Speicherkapazität um einen Faktor bis zu 3.5 erhöht werden. In Verbindung mit einer Photovoltaikanlage könnte dadurch der Eigenverbrauch von Solarstrom im Winter und in der Übergangszeit erhöht werden, was den Netzbezug verkleinert. Gleichzeitig wird durch die latente Energiespeicherung die gemittelte Temperatur vom Pufferspeicher gegenüber sensiblen Speichern gesenkt, was sich vorteilhaft auf Wärmeverluste und den Coefficient of Performance (COP) der Wärmepumpe auswirken kann. Die



Temperaturabsenkung wird noch stärker ausgeprägt sein, wenn der Pufferspeicher vorher mit einer Temperaturüberhöhung betrieben wurde, um eine Eigenverbrauchsoptimierung zu erzielen.

Zusätzliche Effizienzvorteile für den COP sollen sich dank der erhöhten Speicherkapazität durch die Möglichkeit ergeben, bei Luft/Wasser-Wärmepumpen die Betriebszeit auf den Tag zu konzentrieren (höhere Aussentemperatur).

1.3 Projektziele

Als Projektziele wurden die folgenden Einzelziele definiert

- 1) Herstellung der für die Pilotanlagen benötigten PCM-Kapseln
- 2) Planung, Installation und Inbetriebnahme der beschriebenen Wärmepumpensysteme inkl. benötigtem Messsystem mit einem mit PCM-Kapseln befüllten Pufferspeicher. Evaluation der Kosten der Installation und Inbetriebnahme. Die Befüllung der vorbereiteten Pufferspeicher mit Kapseln soll unter 1 h/m^3 möglich sein
- 3) Erfassung aller relevanten Massen- und Energieströme zur vollständigen Bilanzierung des Systems sowie zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl (JAZ) und des Heiz-Eigendeckungsgrads über drei Heizperioden. Evaluation dieser Key Performance Indicators (KPIs) und Vergleich der PCM-Lösung mit dem state-of-the-art
- 4) Der Eigenverbrauch des ganzen Gebäudes soll um mindestens 10% im Vergleich zur Referenzmessung erhöht werden
- 5) Der Eigendeckungsgrad für die Heizung soll im Vergleich zur Referenzmessung um 50% erhöht werden
- 6) Der Netzbezug des ganzen Gebäudes soll im Vergleich zur Referenzmessung um 10% verkleinert werden. Zusätzlich soll getestet werden, inwiefern durch die Kapazitätserhöhung auf eine Variabilität in der Stromversorgung reagiert werden kann
- 7) JAZ und Energieeffizienz der Wärmepumpe sollen durch mehr Betriebsstunden am Tag erhöht werden mit dem Ziel, den gemittelten COP über die Heizperiode um 2 – 4% zu erhöhen
- 8) Erweiterung des Wissensstands bezüglich der Langlebigkeit der Kapseln (Validierung der 20 Jahre Lebensdauer)
- 9) Bestimmung idealer Regelparameter zur möglichst effektiven Nutzung des Phasenübergangs im Latentspeicher, ohne dabei eine Komforteinbusse zu riskieren.

Fragestellungen

Basierend auf den formulierten Zielen lassen sich folgende technischen Fragestellungen ableiten:

- 1) Wie können Pufferpeicher effizient und unkompliziert mit den PCM-Kapseln befüllt werden, so dass der Installationsaufwand nicht mehr als 1 h/m^3 beträgt?
- 2) Wie verhält sich das System mit Latentspeicher im Vergleich zu einem herkömmlichen, sensiblen Speicher in Bezug auf Energieverbrauch, Eigendeckungsgrad der Heizung und JAZ für Sole/Wasser-WP-Systeme sowie Luft/Wasser-WP-Systeme?
- 3) Welche Alterungsprozesse der Kapseln (insbesondere Wasserkonzentrationszunahme in der Kapsel) können festgestellt werden und wie verhält sich die Wasserdiffusionsbarriere der Cowa-Kapseln im Vergleich zu herkömmlichen Wasserbarrieren und in Abhängigkeit der mittleren Systemtemperatur? Beeinflussen diese Alterungsprozesse die Qualität des Heizungswassers?
- 4) Welche Schnittstellen sind nötig, um den Speicher effektiv bewirtschaften zu können? (Smart-Grid-Ready Schnittstelle, übergeordneter Energiemanager)



- 5) Welche Systemtests garantieren die korrekte Funktion des Gesamtsystems inklusive der Wärmepumpe und wie müssen dazu die Regelparameter eingestellt werden?

Des Weiteren sollen folgende wirtschaftliche Fragestellungen weiter geklärt werden:

- 6) In welcher Zeitspanne kann eine Mehrinvestition in einen PCM-Speicher mit den heutigen und zukünftigen Preismodellen für Elektrizität amortisiert werden?
- 7) Wie verhalten sich die Herstellungskosten (Cost of Goods) der PCM-Technologie bei grösseren Stückzahlen und ergeben sich damit neue Marktchancen?
- 8) Können PCM-Speicher bei Gebäuderenovationen mit Wärmepumpen, wo sehr häufig Pufferspeicher in engen Platzverhältnissen notwendig sind, eine wichtige Rolle zur Steigerung der Renovationsrate übernehmen?



2 Anlagenbeschreibung

2.1 Pilotobjekt

Das Pilotobjekt ist ein Einfamilienhaus mit Einliegerwohnung (als Ferienwohnung vermietet) auf einer Sonnenterrasse in Pany (GR) auf 1178 m.ü.M. mit Baujahr 1988.



Abbildung 1: Luftbild und Kartenausschnitt des Pilotobjekts in Pany

Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist die PV-Anlage west- und ostseitig mit 26 Modulen in Westorientierung und 24 Modulen in Ostorientierung ausgerichtet, was eine Gesamtfläche von 84.4 m² und eine Leistung von 17 kW_p ergibt. Eine elektrische Batterie mit 7.7 kWh Kapazität und 7 kW Ladeleistung wird mit überschüssigem Solarstrom geladen und kann auch im Inselbetrieb genutzt werden. Die Heizanlage besteht aus einer leistungsgeregelten Luft-Wasser-Wärmepumpe (Oertli LSI 140 SHW-SG) mit einer thermischen Leistung von 5.7 – 15.8 kW, welche mit einem 800 l Heizungs-Pufferspeicher und einem 500 l Warmwasserspeicher verbunden ist. Beide Speicher sind zusätzlich mit je einem Heizstab ausgestattet.

Daraus und aus weiteren Kenndaten sowie Gesprächen mit den Eigentümern wurden folgende Modellinputs und Annahmen abgeleitet:

- PV-Leistung 17 kW_p, 84.4 m², 26 Module westseitig, 24 ostseitig
- Geschätzter Wärmebedarf von 100 kWh/m²/a, Energiebezugsfläche von 200 m²
- Stromverbrauch von 4000 kWh/a gemäss Schätzung der Eigentümer
- Geschätzter Warmwasserverbrauch von 180 l/Tag, berechnet als verteilte Last mit Warmwasseraufbereitung von 16 °C auf 55 °C.
- Konstante Wärmepumpeneffizienz einer JAZ von 3.2 (Annahme)
- Wärmepumpenleistung von 5.7 kW_{th} bis 14 kW_{th} gemäss Datenblatt
- Der Pufferspeicher wird gemäss Hauseigentümer zwischen 40 °C und 52 °C betrieben (bis 60 °C mit dem Heizstab), woraus eine Pufferspeicherkapazität von 11.2 kWh resp. 14 kWh (mit Nutzung des Heizstabs) resultiert. Mit CowaCaps ergibt sich eine rechnerische Kapazität von 39.1 kWh (ohne Nutzung des Heizstabs). Der Heizstab wurde nach der Referenzperiode ausgeschaltet.



2.2 Pufferspeicher

Der 760-Liter Pufferspeicher von Feuron verfügt über zwei Revisionsflansche mit 200 mm Durchmesser (Nr. 86) und fünf Tauchhülsen (L=130 mm) für Temperaturfühler (Nr. 8, Nr. 76). Der Speicherfühler der Wärmepumpe befindet sich in der Tauchhülse auf Höhe 1680 mm über Boden. In allen fünf Hülsen wurden Fühler für das Monitoring angebracht.

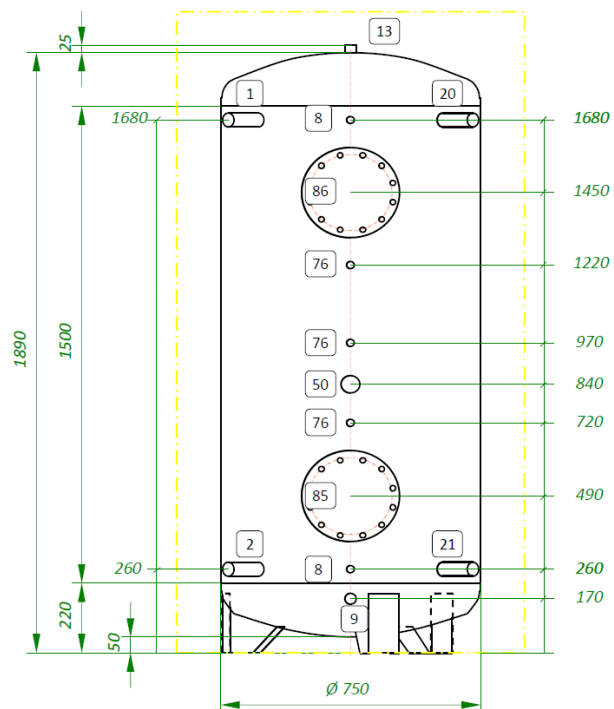


Abbildung 2: links: Geöffneter Speicher für das Befüllen mit Cowa Caps. Rechts: Massblatt des Pufferspeichers Feuron (Quelle: Datenblatt Meier Tobler)

2.3 PCM-Speicher

Die Speicherdichte wird durch ein neu entwickeltes PCM und eine optimierte Kunststoffkapsel erreicht. Das PCM basiert auf Salzhydraten, welche im Vergleich zu anderen Phasenwechselmaterialien durch eine hohe Dichte und hohe Schmelzenthalpie (205 J/g bei diesem Material) zur hohen Speicherdichte führt. Die Verkapselung wurde auf thermische Leistung, Packungsdichte und Produktionskosten optimiert, was zur rechts gezeigten Form führte und Packungsdichten von 62% ermöglicht. Dadurch soll eine Kapazitätserhöhung im Vergleich zu Wasser von einem Faktor über 2 erreicht werden.

BOOSTER CAPSULE 45

Einsatz in Altbau/Renovation (Heizsystem)

Material: PCM45

Schmelztemperatur 45 °C

Speicherdichte: 50 kWh/m³ (Labormessung mit $\Delta T = 30$ K, 60% Kapseln / 40% Wasser)



Abbildung 3: COWA Booster Capsule 45



3 Vorgehen und Methode

3.1 Erfolgsfaktoren

Für die Bewertung des Nutzens der Cowa BOOSTER Caps wurden Erfolgsfaktoren definiert, welche in die Kategorien «Energetische Kennzahlen» und «Praktische Erfolge» unterteilt werden:

Die Zielvorgaben zu den energetischen Kennzahlen lauten:

- Der Eigenverbrauch des ganzen Gebäudes soll um mindestens 10% im Vergleich zur Referenzmessung erhöht werden
- Der Eigendeckungsgrad Heizen soll im Vergleich zur Referenzmessung um 50% erhöht werden
- Der Netzbezug des ganzen Gebäudes soll im Vergleich zur Referenzmessung um 10% verkleinert werden
- Die Energieeffizienz bzw. JAZ der Wärmepumpe sollen durch mehr Betriebsstunden am Tag erhöht werden mit dem Ziel, die Arbeitszahl über die Heizperiode um 2 – 4% zu erhöhen
- Der Nutzen im Bezug auf Kosteneinsparungen soll validiert werden. Die Einsparungen sollen durch reduzierten Netzbezug, erreicht durch den höheren Eigendeckungsgrad, zu einem positiven Ertrag innerhalb der Lebenszeit der Kapseln führen. Des Weiteren soll gezeigt werden wie durch Netzdienstleistungen, für welche noch Business Modelle realisiert werden müssten, wie peak shaving, Regelernergie, und Tag/Nacht Speicherung mögliche Einnahmequellen entstehen könnten.

Die praktischen Erfolgsfaktoren sind:

- Zeitgerechte Herstellung, Verpackung und Qualitätskontrolle der PCM-Kapseln
- Berechnung der Kosten der Kapseln (und deren Wirtschaftlichkeit) unter Berücksichtigung der nicht industrialisierten Herstellung
- Prüfbericht der Kapseln (Qualitätsmanagement) als Funktionsnachweis
- Lieferung und Einbringung der Kapseln in den Pufferspeicher
- Abschätzung der Kosten für diese Arbeiten
- Funktionsfähigkeit der Befüllhilfe
- Inbetriebnahme und Einstellung der Regler für den erfolgreichen Betrieb der Anlage mit PCM-Kapseln
- Bericht zur Inbetriebnahme mit Funktionstests und/oder genauer Überwachung der ersten Woche im Heizbetrieb
- Einstellung/Verifikation der optimalen Regelparameter (z.B. Schalthysterese der Wärmepumpe)
- Verhalten der Kapseln über mehrere Heizperioden (mechanische und energetische Langzeitstabilität), Überwachung der Anlage mittels Leitfähigkeitsmessung des Heizungswassers



3.2 Überprüfung der energetischen Kennzahlen

Zur Überprüfung der Erfolgsfaktoren sind die Kenngrößen und Datenquelle in Tabelle 1 aufgeführt. Zur Überprüfung der Erfolgsfaktoren wurde ein Messsystem zum Anlagenmonitoring eingebaut (siehe Abschnitt 3.3). In der ersten Heizperiode 21/22 erfolgten Referenzmessungen ohne Cowa BOOSTER Caps im Speicher.

Tabelle 1: Erfolgsfaktoren und die dafür benötigten Kenngrößen

Erfolgsfaktor	Benötigte Kenngrößen	Quellen
Eigenverbrauch Eigendeckungsgrad Heizen Netzbezug	Produktion PV Netzbezug und Netzeinspeisung Strombedarf Total Strombedarf WP	Wechselrichter mit Smart Meter Stromzähler WP, Stromzähler Heizkreispumpe
Energieeffizienz: JAZ und WNG für Heizung, TWW, Gesamtsystem SNG für Heizung	Strombedarf WP mit Unterscheidung H/WW Wärmeproduktion Heizbetrieb Wärmeproduktion TWW-Betrieb Wärmebedarf Heizkreis	Zweitarif-Stromzähler WP mit Tarifschaltung über WW-Umschaltventil Stromzähler Heizkreispumpe Wärmezähler 1 Wärmezähler 2 Wärmezähler 3

3.3 Messsystem zum Anlagenmonitoring

Für die Messdatenerfassung werden die vom Wechselrichter aufgezeichneten 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. Ein Überblick der erfassten Messgrößen befindet sich im Anhang A. Abbildung 4 zeigt das Anlagenschema mit den installierten Messpunkten und den Systemgrenzen für die Kennzahlberechnung.

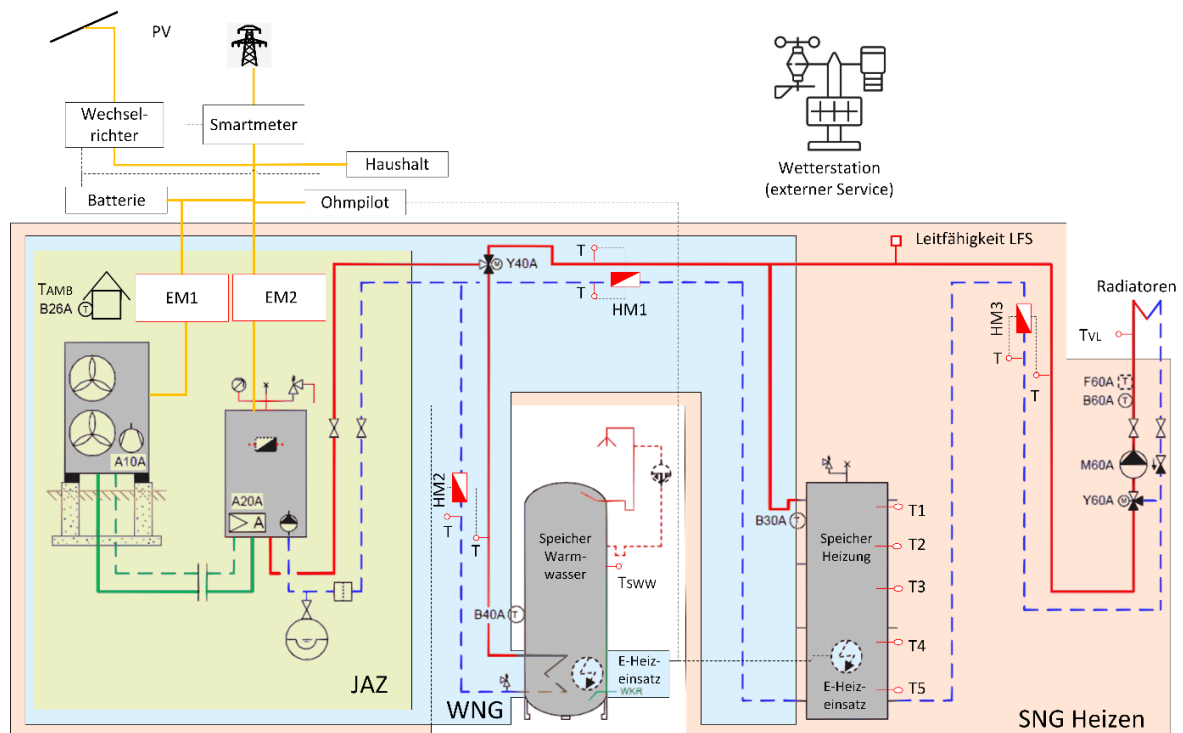


Abbildung 4: Anlagenschema mit der Messdatenerfassung und Bilanzgrenzen für die Kennzahlen



3.3.1. Messmittel und Messunsicherheiten

Wärmezähler:

Es werden für Abrechnungszwecke zugelassene Wärmezähler verwendet. Der zulässige Messfehler ist in der EU-Richtlinie 2004/22/EG [3], Anhang MI-004 definiert. Er ergibt sich aus der Summe der Fehler aus der Durchflussmessung, der Temperaturmessung und des Rechenwerks.

Der zulässige Messfehler wurde über alle Messdatenpunkte ausgewertet und liegt im Schnitt bei 5.5% für die Speicherbeladung (Heizungsspeicher und Trinkwarmwasserspeicher) und bei 5.7% für die Speicherentladung (Heizungsspeicher).

Die Auflösung liegt bei 1 kWh, wodurch sich in den kurzfristigen Ausleseintervallen von 5 min ein relativ grosser Fehler durch die Auflösung ergibt. Da jedoch die kumulierten Energiewerte ausgelesen werden, gleicht sich diese Abweichung über längere Zeit wieder aus.

Stromzähler:

Der elektrische Energie- und Leistungsbedarf der Wärmepumpe (EM1 und EM2) wird mit Stromzählern nach Genauigkeitsklasse B erfasst. Die Eichfehlergrenze liegt im genutzten Bereich bei 1.5% [4]. Der Dreiphasenzähler EM1, welcher die Verdichterleistung erfasst, besitzt einen Eingang für eine Tarifschaltung. Auf diesen Eingang wird das elektrische Signal, welches das Warmwasserumschaltventil (Y40A) schaltet, geführt. Die gemessene Energie wird damit für das Heizen und für die Warmwasserbereitung in separate Register geschrieben, womit eine klare Unterscheidung der beiden Betriebszustände möglich ist.

Energiedaten aus dem Wechselrichter:

Die Leistungsmesswerte aus den Wechselrichtern werden jeweils über 5 Minuten kumuliert an das Fronius Webportal übergeben, von welchem die Werte für das Monitoring ausgelesen werden. Nach Aussage des technischen Supports von Fronius kann damit mit einem Messfehler von ca. 3-4% gerechnet werden.

Temperaturfühler:

Für die Temperaturen im Heizungsspeicher, Vorlauftemperatur und Aussentemperatur werden Temperaturfühler vom Typ Pt1000, Klasse A¹ mit Zweileiter-Verdrahtung, verwendet. Im gemessenen Temperaturbereich bis 60 °C ist der Fehler, inkl. Leitungswiderstand, kleiner als 0.22 K. Der Fühler T1 im Speicher ist in der gleiche Tauchhülse wie der Speicherfühler der Wärmepumpe.

Elektrische Leitfähigkeit:

Die elektrische Leitfähigkeit wird mit einer Jumo Aquis 500 CR Auswerteeinheit und einem Jumo Black-Line CR 2-Elektroden-Sensor gemessen. Diese Paarung erlaubt einen Messbereich von 0.01 mS/cm bis zu 10 mS/cm.

Eine Übersicht aller verwendeten Messmittel ist in Anhang A aufgeführt.

3.3.2. Ausfälle des Messsystems

Vom 5. Februar bis 12. März 2022 fehlen die Daten des Wechselrichters aufgrund eines Ausfalls des Internet-Routers. Somit konnte der Wechselrichter die Daten nicht in die Fronius-Cloud senden. Der interne Datenspeicher im Wechselrichter reicht nicht für so eine lange Zeitspanne. Die Daten ab dem 17. Februar 2022 konnten wieder rekonstruiert werden, wodurch nur noch die Periode vom 5. – 17. Februar 2022 fehlt. Nach Aussage des Anlagenbesitzers gab es in dieser Zeit kaum Solarstromertrag, da das Dach voll Schnee war. Für den Haushaltsstrom wurden die Verbrauchsdaten aus der zweiten Februarhälfte übernommen.

¹ Oft auch als 1/3-DIN B bezeichnet



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Winter 21/22 erfolgte die Referenzmessung mit dem bestehenden Wasserspeicher. In den nachfolgenden drei Winterhalbjahren wurden Messungen mit den PCM-Kapseln im Speicher durchgeführt. In der Auswertung zeigte sich, dass die teils stark unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

4.1 Resultate des Monitorings

4.1.1. Klimatische Bedingungen

Für die Vergleichbarkeit der einzelnen Heizperioden wurden die Heizgradtage (HGT) erfasst und mit dem langjährigen Durchschnitt über 10 Jahre (2014-2023, gemäss Berechnungsvorschrift der archivierten SIA Norm 381/3 [5]) verglichen. Die Daten dafür stammen von MeteoSchweiz (durchschnittliche Tagestemperatur). Als Standort wurde Disentis ausgewählt, da sich dieser Ort in einer ähnlichen Höhenlage wie Pany befindet. Die Abbildung 5 links zeigt die Verteilung der Heizgradtage über die Messjahre.

Auffällig ist, dass in den Heizperioden 2, 3 und 4 deutlich weniger Wärme gebraucht wurde als in HP1, obwohl sich die Anzahl Heizgradtage nicht gross unterscheiden, wie aus Abbildung 5 rechts ersichtlich ist. Eine Erklärung dafür liefert der Vergleich mit der Belegung des Hauses, die in Abbildung 6 dargestellt ist, welche aufgrund von längeren Abwesenheiten der Besitzer und der Nutzung der Einliegerwohnung als Ferienwohnung nicht in jedem Winter gleich ist. So wurde im März und April in HP2 und HP3 die Heizung reduziert, da das Haus kaum belegt war, was den Wärmebedarf reduziert hat. Andererseits gab es auch Perioden wie im Herbst 23 und 24, in denen trotz fehlender Belegung weitergeheizt wurde. Des Weiteren konnte in HP2 und HP3 mit der Solaranlage mehr Strom produziert werden, da die PV-Anlage weniger mit Schnee bedeckt war.

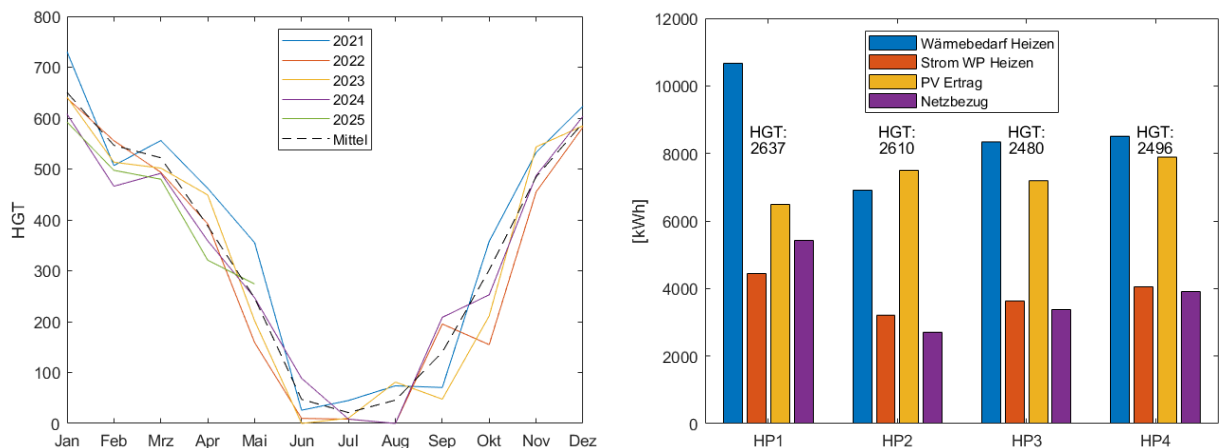


Abbildung 5: links: HGT-Verteilung über die Messjahre und der Mittelwert von 2014-2023 für die Meteostation Disentis. rechts: Kennwerte Heizwärmebedarf, WP-Strombedarf, PV-Ertrag und HGT für die vier Heizperioden.

Diese Unterschiede in den verschiedenen Messperioden erschweren einen direkten Vergleich der Kennzahlen, welche sich auf eine ganze Heizperiode beziehen. Diesen Umständen wurde Rechnung getragen, indem für den Vergleich der Wirkung des PCM-Speichers auch einzelne Tage herangezogen wurden, an denen ähnliche Bedingungen herrschten.

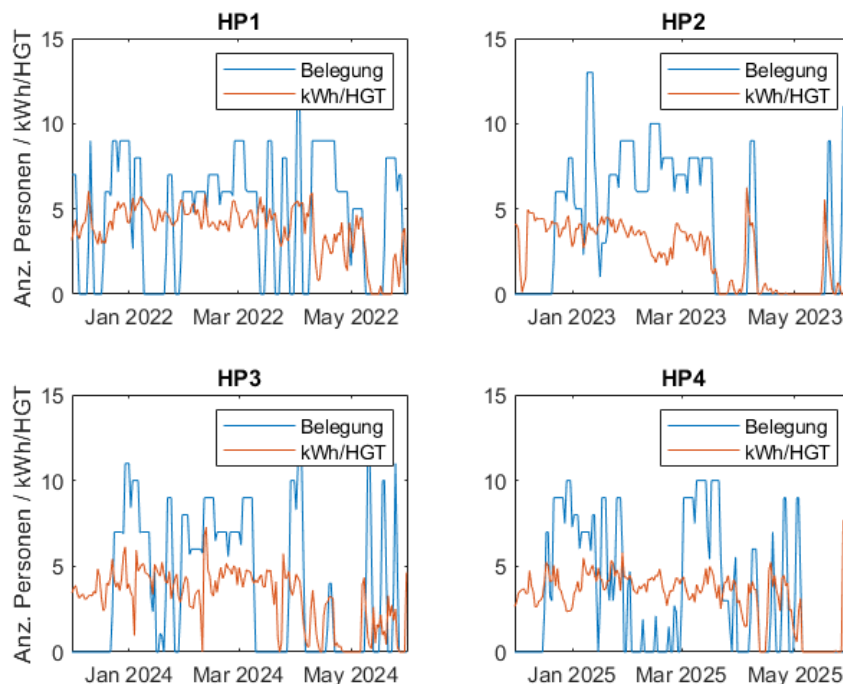


Abbildung 6: Vergleich des Heizwärmebedarf pro Heizgradtag (HGT) mit der Belegung

4.1.2. Eigenverbrauch: Steuerung und Berechnung

Sowohl für die Referenzmessungen als auch für beide Heizperioden mit den Cowa BOOSTER Caps wurde die Anlage so betrieben, wie sie von den Eigentümern vor dem Forschungsprojekt eingestellt wurde:

- Der Wechselrichter ermittelt den aktuellen Leistungsbedarf des Gebäudes. Er kann dabei nicht zwischen Haushaltsstrom und Bedarf der Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser unterscheiden.
- Wenn die durch die PV-Anlage produzierte Leistung grösser ist als der Leistungsbedarf des Gebäudes 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 gemäss Tabelle 2, nach welcher der Eigenverbrauch zugeordnet wird. 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 in zweiter resp. in dritter Priorität.

Beispiel: Produktion: 3 kW, Bedarf Priorität 1: 2 kW, Bedarf Priorität 2: 2 kW. Damit wird die Priorität 1 mit 2 kW Solarstrom versorgt (100% Eigendeckungsgrad), die Priorität 2 hat nur noch 1 kW Solarstrom übrig und bezieht zusätzlich 1 kW Netzstrom, was zu einem Eigendeckungsgrad von 50% führt.



Tabelle 2: Priorität im Eigenverbrauch

Priorität	Bezeichnung	Bemerkung
1	Haushaltsstrom	Keine Unterscheidung durch den Wechselrichter. Unterscheidung erfolgt in der Auswertung.
2	WP Warmwasser	
3	WP Heizung	
4	Batterie Laden	
5	WP Warmwasser forciert	Zuschaltung über SG-Ready, Signal mind. 30 min 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 TWW, Umschaltung auf Heizungsspeicher, wenn maximale Temperatur in TWW-Speicher erreicht ist
8	Heizstab Heizung	

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

4.1.3. Stromverbrauch und Key Performance Indicators

In der Abbildung 7 ist der Verbrauch auf die einzelnen Gruppen über die vier Heizperioden aufgeschlüsselt. Der blaue (3) und der hellgrüne (6) Bereich repräsentiert den Stromverbrauch der Wärmepumpe im Heizbetrieb. Mit dem Einsatz der CowaCaps läuft die Wärmepumpe mehr im forcierten Heizbetrieb (hellgrün) als ohne CowaCaps. Insgesamt ist der Anteil der Wärmepumpe im Heizbetrieb jedoch etwa gleichgeblieben.

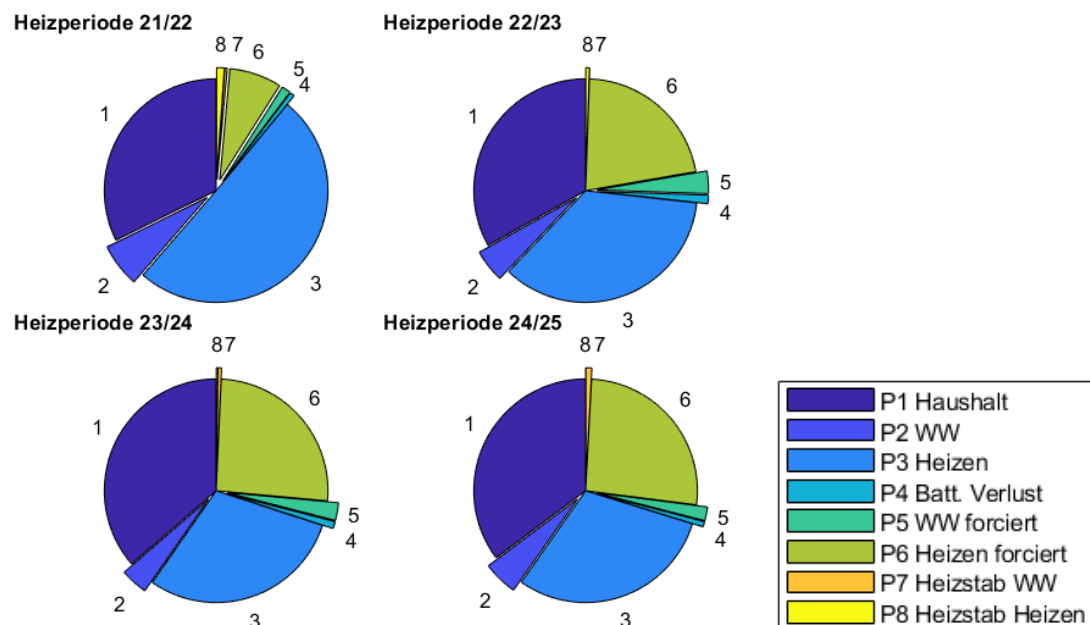


Abbildung 7: Verbrauch der einzelnen Verbraucherguppen



In Abbildung 8 wird deutlich ersichtlich, dass im Allgemeinen eine signifikante Reduktion nahezu aller Energieverbraucher stattgefunden hat. Lediglich die Verluste in der Batterie haben zugenommen. Dieser Anstieg ist jedoch auf die gesteigerte solare Einstrahlung zurückzuführen, die zu einer häufigeren Aufladung der Batterie geführt hat. Neben dem generellen Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs ist auch zu bemerken, 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 gefallen ist als in der ersten Heizperiode, konnte während beinahe des gesamten Winters PV-Strom produziert werden. Dieser konnte in die Batterie eingespeist werden, welche anschliessend am Abend eingesetzt wurde.

Die Abbildung 8 zeigt eine Zusammenfassung der KPI über alle vier Heizperioden. Gegenüber der Referenzperiode HP1 ist der Stromverbrauch der Wärmepumpe in den Heizperioden 2-4 deutlich reduziert, was auf die niedrigere Belegung zurückzuführen ist.

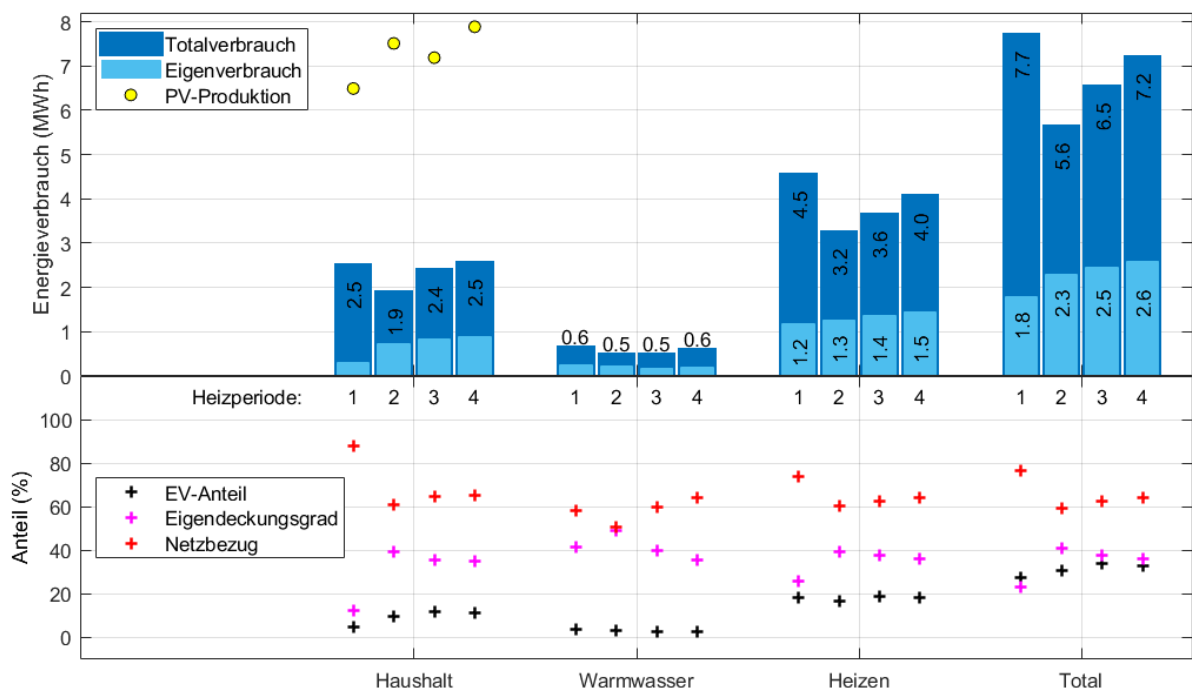


Abbildung 8: Energieverbrauch und KPI über die vier Heizperioden

Trotz der niedrigeren Heizwärmeproduktion in HP2 und HP3 gegenüber HP1 konnte der Eigenverbrauch fürs Heizen absolut sogar gesteigert werden. Der Heiz-Eigendeckungsgrad konnte so um gut 50% erhöht werden gegenüber HP1. Der Eigenverbrauchsgrad für das Heizen ist in etwa gleichgeblieben, da sich zwar der Eigenverbrauch leicht erhöht hat, jedoch auch die Stromproduktion.

Der Eigenverbrauchsgrad Total konnte in HP2 um 10%, in HP3 um 20% gegenüber HP1 gesteigert werden (von 28% auf 33-34%). Der Netzbezug konnte gegenüber HP1 von fast 80% auf 60%-65% reduziert werden.

Die Erhöhung des Heiz-Eigendeckungsgrads (Anteil des Solarstroms, ermittelt nach der Priorisierung gemäss Tabelle 2, am Gesamtstromverbrauch für die Wärmepumpe für das 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 Heizperioden 2 und 3 stark von der Heizperiode 1 unterscheiden. Im Abschnitt 4.2.1 wird jedoch etwas detaillierter auf einzelne Tage und die erhöhte Speicher kapazität durch das PCM eingegangen.

Die Speicherverluste im Heizungsspeicher betragen in der ersten Heizperiode 9.5%, in der zweiten und dritten Heizperiode 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.

Für die vier Heizperioden von Anfang Dezember bis Ende Mai ergibt sich eine Arbeitszahl gemäss Tabelle 3. Es zeigt sich dabei eine Streuung der Arbeitszahl zwischen 2.38 und 2.63, wobei jedoch auch mit PCM Werte von 2.61 erreicht werden.

Tabelle 3: Arbeitszahl über die vier Heizperioden

	HP1	HP2	HP3	HP4
Heizen	2.63	2.49	2.61	2.38
Warmwasser	2.94	2.65	2.77	2.87
Total	2.67	2.51	2.63	2.43

Auf die Ursachen der wider Erwarten niedrigeren Effizienz im Heizbetrieb wird in Abschnitt 4.1.6 eingegangen.

4.1.4. Latenter Speicher

Die Abbildung 9 zeigt die aus dem Speicher entnommene Wärmemenge für ausgewählte Tage in den drei Heizperioden. Die Wärmemenge wurde ermittelt zwischen dem Ausschalten und dem Wiedereinschalten der Wärmepumpe am nächsten Morgen. 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 ermittelt mit der Temperaturdifferenz der 5 Fühler zwischen dem Start- und dem Stop-Zeitpunkt der Messung der Entladung. Die Masse wurde entsprechend der Speichergeometrie ermittelt, wobei der Schnittpunkt zweier Masseelemente 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 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 zwischen 10 und 80% höher liegt als mit dem Wasserspeicher. Obwohl nur wenige Tage ausgewertet wurden, ist jedoch ersichtlich, dass beim PCM-Speicher generell tiefere Temperaturdifferenzen erreicht wurden als beim Wasserspeicher und damit die Kapazitätserhöhung des PCM gegenüber dem Wasser gar nicht voll ausgeschöpft werden konnte. Obwohl der Phasenwechsel und damit ein Grossteil des Speicherpotentials in einem sehr kleinen Temperaturbereich liegt, ist das Erreichen einer grösseren Temperaturdifferenz notwendig, da diese treibend ist für die Entladeleistung aus dem PCM (Überwindung des Wärmewiderstandes).

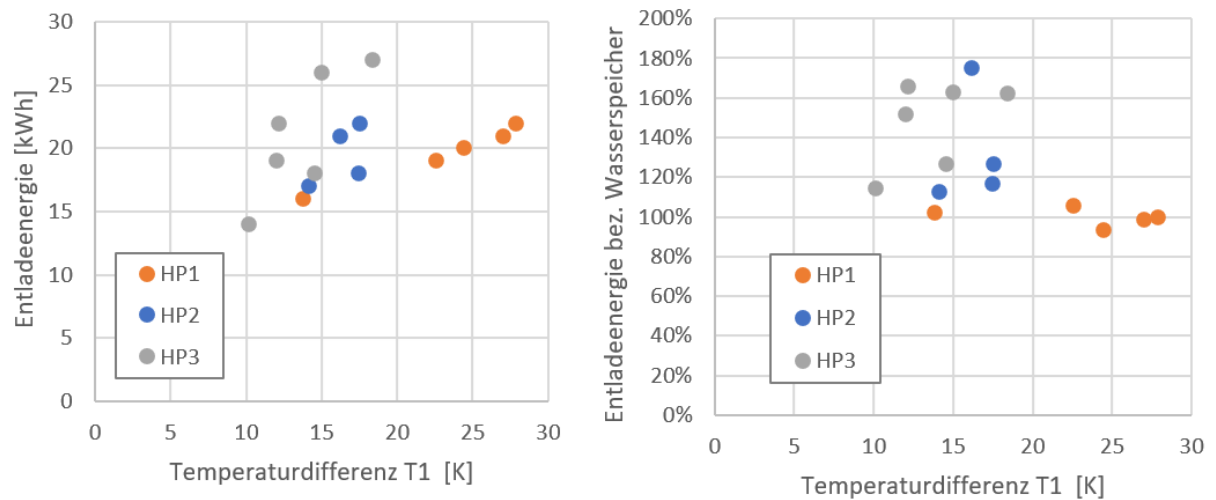


Abbildung 9: Aus dem Speicher entnommene Wärmemenge für verschiedene Temperaturdifferenzen

Die Abbildung 10 zeigt die Differenz zwischen der Austrittstemperatur aus dem Speicher und dem obersten Speicherfühler T1 (auf gleicher Höhe wie der Austritt) in Abhängigkeit der Fühlertemperatur. Der oberste Fühler repräsentiert in diesem Fall indirekt den Leistungsbedarf, da die Temperatur des Fühlers, bei der die Wärmepumpe wieder einschaltet, von der Heizkurve und damit von der Aussentemperatur resp. vom Heizleistungsbedarf abhängt. Es fällt auf, dass mit dem sensiblen Speicher in HP1 die Speichertemperatur bis auf die benötigte Vorlauftemperatur reduziert werden konnte ($\Delta T = 0$ K), während mit dem PCM-Speicher in HP3 eine Temperaturdifferenz von 8-12 K resultierte. Für HP2 sind die Ergebnisse nicht so eindeutig.

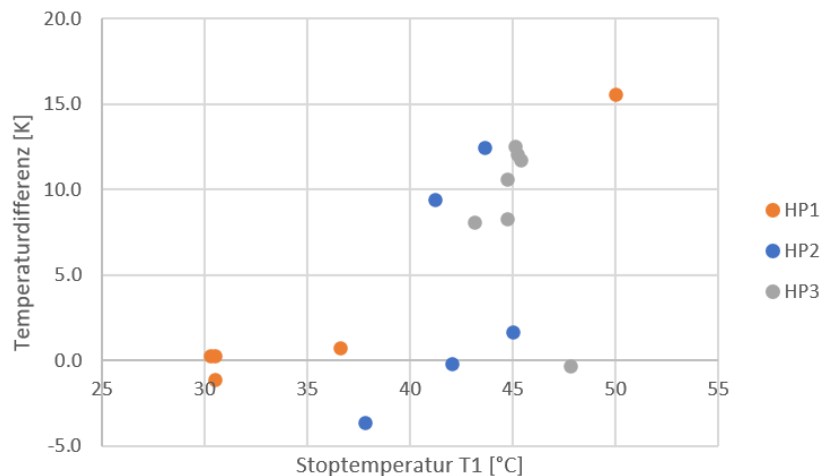


Abbildung 10: Differenz zwischen der Austrittstemperatur am Speicher und der Temperatur am obersten Fühler in Abhängigkeit der Fühlertemperatur am Ende der Entladeperiode

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist jeweils ein Tag mit Speicherbeladung und Entladung in HP1 resp. 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 rapide ab. Beim Latentspeicher sinkt die Temperatur des obersten Fühlers schneller ab.

Der zweitoberste Fühler kann im Latentspeicher die Temperatur lange halten und fällt dann kurz vor Schluss stark ab. Vermutlich kann 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 12 ist erkennbar, dass nach dem Ausschalten der Wärmepumpe um 15:00 Uhr weiterhin Solarstrom zur Verfügung gestanden hätte, welcher ins Netz eingespeist wurde. Die Wärmepumpe wurde ausgeschaltet, weil die maximale Speichertemperatur erreicht wurde. Nach 15:00 bis 21:00 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 21:00 und 2:00 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 13 zeigt die Beladung des Speichers Ende Mai. Nachdem die Wärmepumpe abgeschaltet hat, ruht der Speicher, da es im Gebäude keinen Wärmebedarf gibt. 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 11), was darauf hinweist, dass das kein Wärmeverlust durch die Speicherwand ist, zumal es sich um den gleichen Speicher mit der gleichen Isolation handelt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die PCM-Kapseln noch nicht vollständig geschmolzen waren, als die Wärmepumpe abgeschaltet wurde. Nach dem Stopp 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.

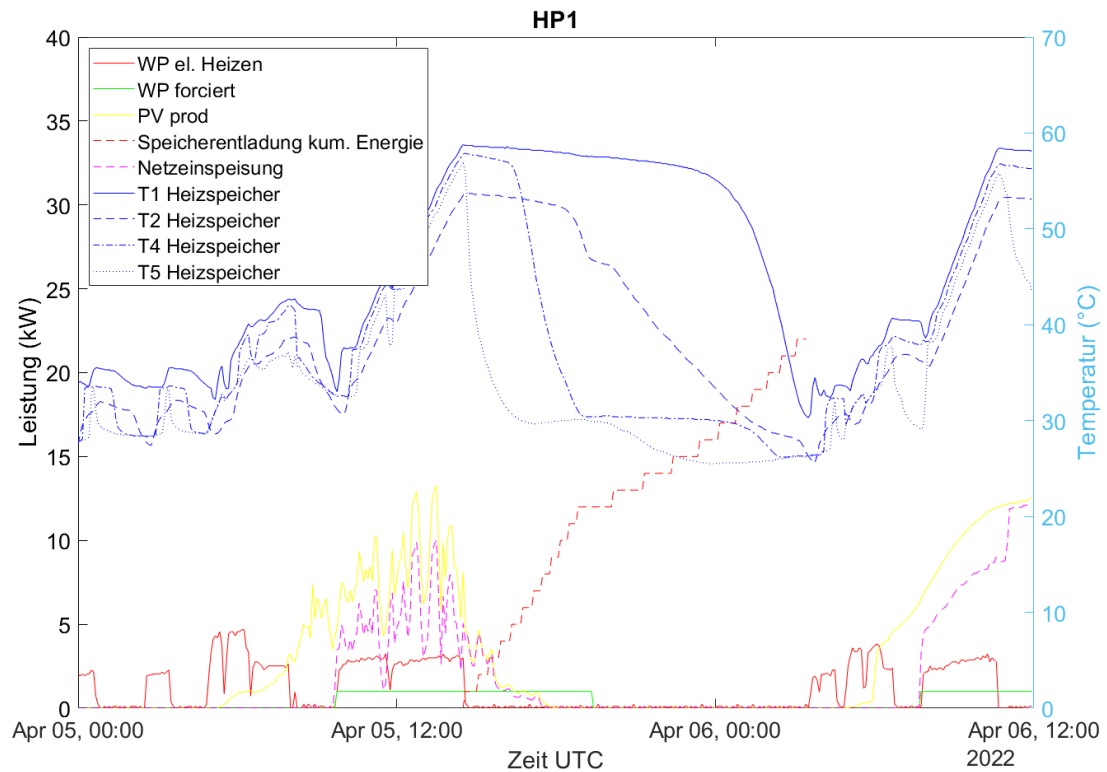


Abbildung 11: Speicherentladung ohne PCM in HP1

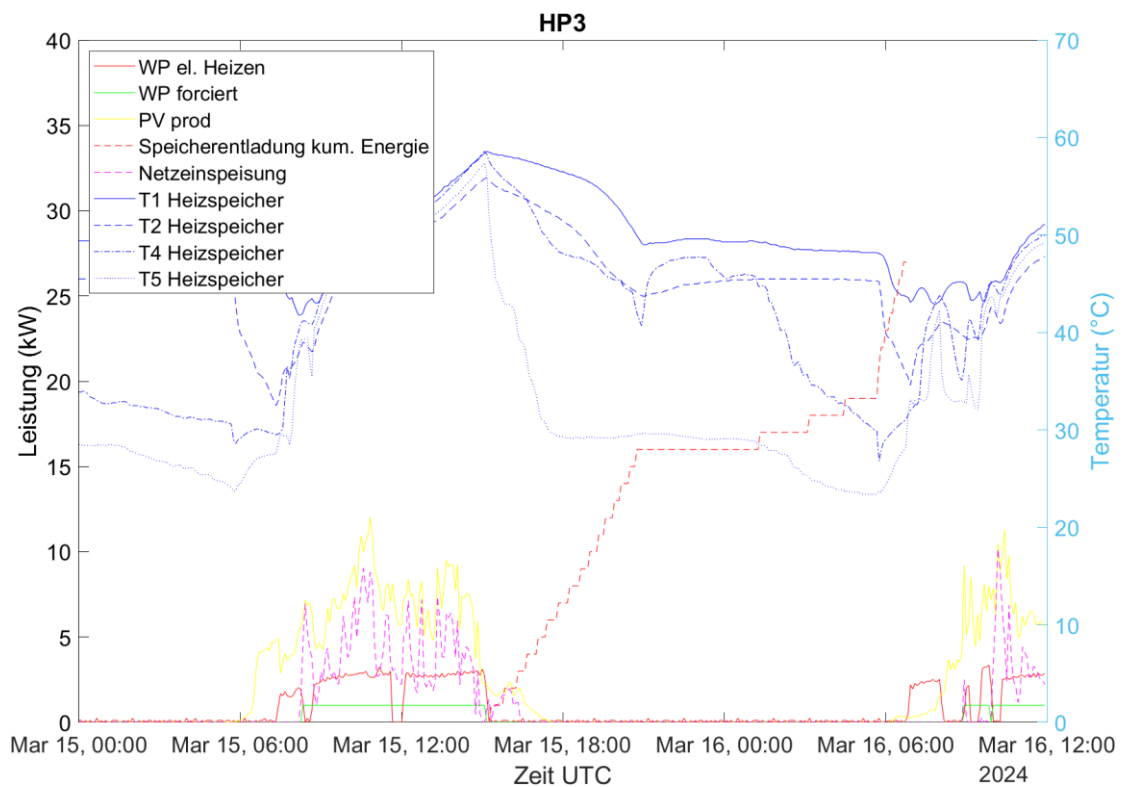


Abbildung 12: Speicherentladung mit PCM in HP3

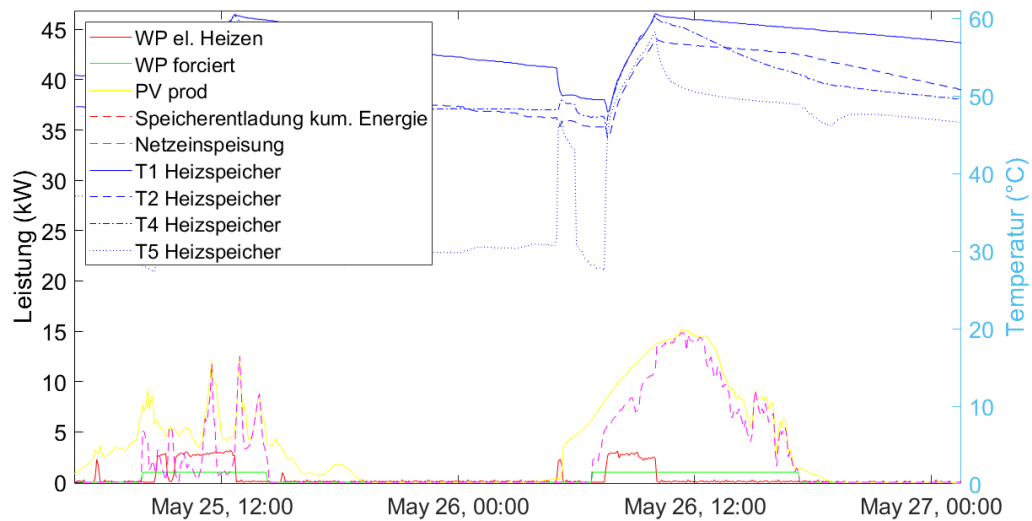


Abbildung 13: Speicherbeladung mit PCM in HP3 am 26.5.2024

Aus obigen Untersuchungen lassen sich folgende Vermutungen ableiten

- Das Bottleneck ist die Wärmeentzugsleistung. Labortests haben eine Leistungsdichte von 8-12 kW/m³ (oder 0.2 kW/kWh) bei 5 K Temperaturdifferenz zwischen Phasenwechsel- und Entladetemperatur nachgewiesen. Die Leistungs- und Kostenoptimierung der Kapselform hat zu dieser relativ niedrigen Leistungsdichte geführt, was aber nach Ansicht von Cowa damals ausreichend war für die Pufferspeicheranwendung. Die Compact Cell kann mindestens 1 kW/kWh bei 5 K Temperaturdifferenz liefern, im Anwendungsfall Trinkwarmwasser mehr als 3 kW/kWh. Das heisst die Wärmepumpe schaltet nicht wieder ein, weil zu wenig Energie im Speicher ist, sondern weil diese Energie zu lange braucht, um aus den PCM-Kapseln ins Wasser zu gelangen und dadurch nicht genügend Temperatur zur Verfügung steht.
- 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 (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.
- Mit einer optimierten Regelstrategie wird die Beladeleistung der Wärmepumpe vor Erreichen der Ladeschlusstemperatur kontinuierlich reduziert. Die Wärmepumpe liefert mit minimaler Leistung, solange 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.
- 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 (vgl. Abbildung 13).

Die ersten beiden Punkte zum Wärmeübergang werden mit der neuen COWA Compact Cell (siehe Abschnitt 4.3.1) adressiert. Eine optimierte Regelstrategie kann am Pilotprojekt in Pany nicht getestet werden, da sich die Wärmepumpensteuerung nur begrenzt parametrieren lässt. Als Versuch wurde jedoch Anfang Februar 2025 die Nachstellzeit angepasst, um die Leistung mit Annäherung an die Ausschalttemperatur stärker zu begrenzen. Es konnte jedoch kein Effekt auf die PCM-Beladung festgestellt werden, da die Leistung auch vor der Anpassung der Nachstellzeit gut heruntergeregelt wurde.

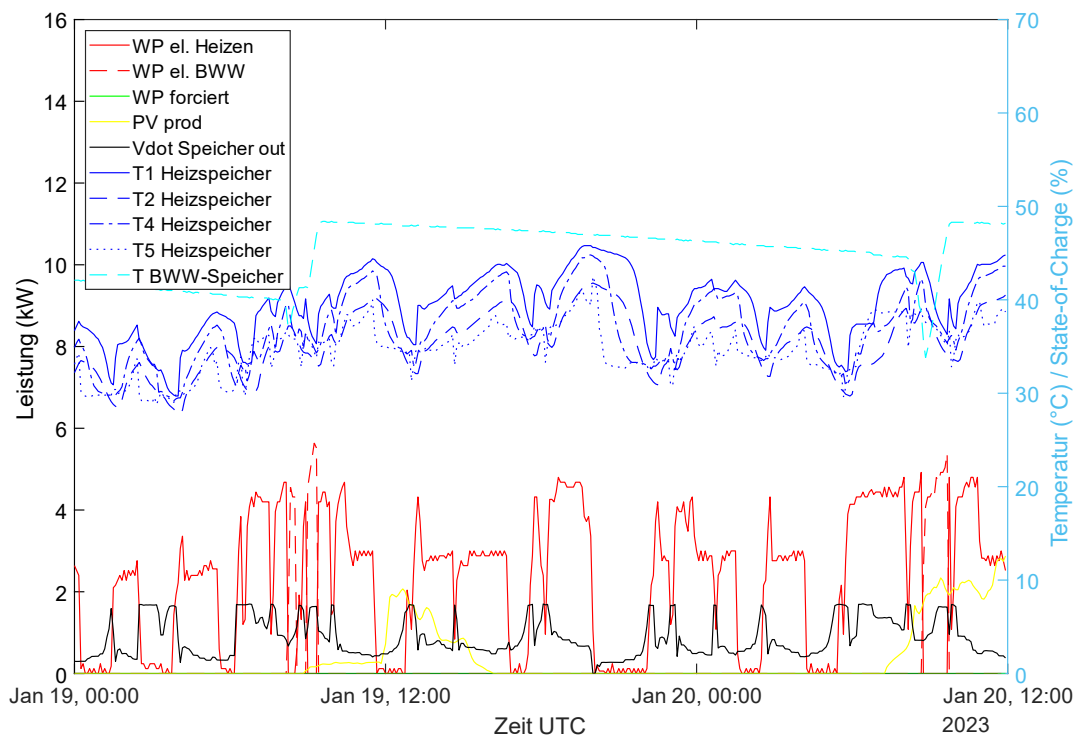
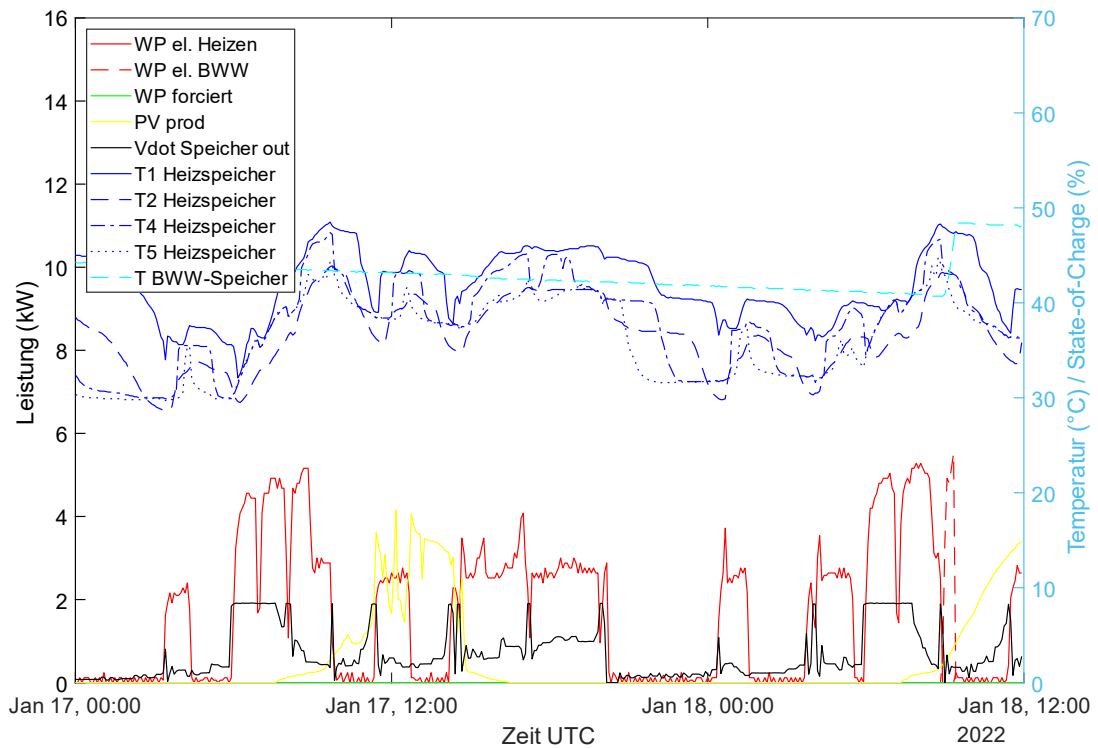


Abbildung 14: Tagesgang eines kalten Tages mit wenig Sonneneinstrahlung. Oben: Heizperiode 1, unten: Heizperiode 2



4.1.5. Taktverhalten

Während der zweiten Heizperiode ist aufgefallen, dass die Laufzeiten der WP nicht wie erwartet gestiegen, sondern sogar abgesunken sind. Es wurden auch mehr Schaltzyklen der WP in der zweiten Heizperiode verzeichnet. Dies deutet darauf hin, dass der PCM-Speicher zu erhöhtem Takten geführt hat.

Zunächst scheint dies kontraintuitiv, da die Speicherkapazität um das 2-fache erhöht wurde. Jedoch kann dies einfach anhand der Tagesverläufe in Abbildung 14 erklärt werden. In den kalten Monaten wird auch der PCM-Speicher gleitend betrieben, meist unterhalb der Schmelztemperatur. Das bedeutet, dass das Potential der Schmelzenthalpie des PCM nicht ausgenutzt werden kann. Da beim gleitenden Betrieb das PCM in fester Form vorliegt, sinkt die mögliche Entladeleistung des Speichers, da der Wärmetransport im festen PCM schlechter ist als in Wasser. Da nun der Wassergehalt im Speicher gesunken ist, ist die relative Speicherkapazität bei gleitendem Betrieb ebenso gesunken. 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 die Temperatur wieder bereitzustellen.

In Abbildung 14 unten ist erkennbar, dass die Speichertemperatur in der zweiten Heizperiode schneller abfällt als in der ersten Heizperiode. Der Volumenstrom (schwarz) ist dabei mehr oder weniger derselbe. Dies bestätigt die Vermutung, dass die fehlende Leistung durch eine stärkere Temperaturabsenkung kompensiert wird.

4.1.6. Anlageneffizienz

Wie in Tabelle 3 ersichtlich, wurde in der ersten Heizperiode die höchste Arbeitszahl erreicht. Es zeigte sich jedoch in den Messwerten, dass die Vorlauftemperaturen in HP1 die meiste Zeit um ca. 5 K höher lagen (Abbildung 15). Die beste Arbeitszahl wurde also trotz höherer Vorlauftemperatur erreicht.

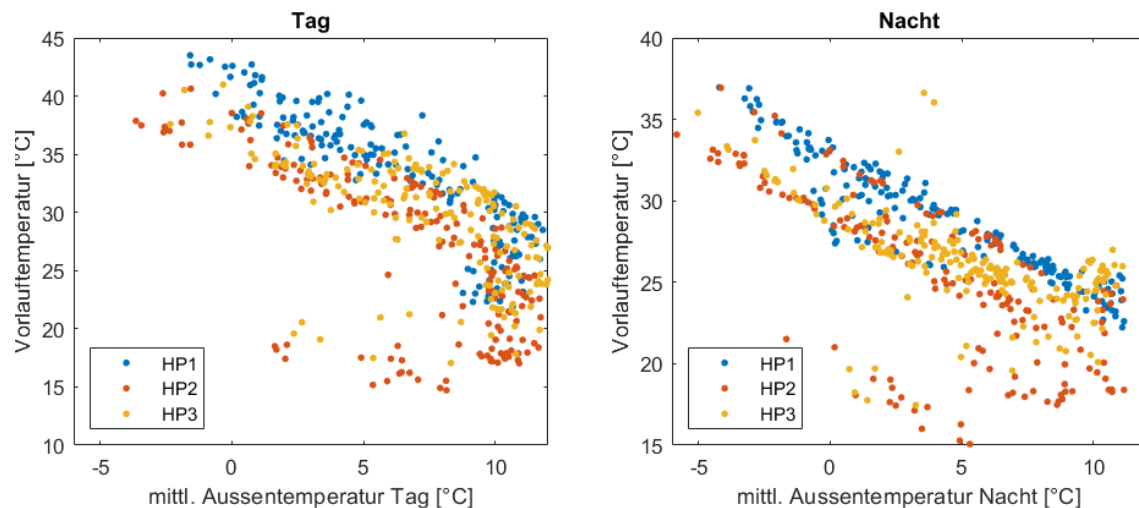


Abbildung 15: Gemessene Vorlauftemperaturen (Tagesmittelwerte)

Effizienzgewinn durch Tag/Nacht-Verlagerung?

Kann mit einer Verschiebung der Wärmeproduktion von der Nacht in den Tag die Effizienz dank höherer Quellentemperatur gesteigert werden?

Der Verdampfer (Ausseneinheit) 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. Dieser Zeitraum wird in der folgenden Auswertung auch als «Nacht» bezeichnet.



Die für das Monitoring erfasste Temperatur T_{AMB} wird beim Verdampfer gemessen, widerspiegelt also nicht die für die Heizkurve von der Wärmepumpe verwendete Temperatur, sondern liegt wegen der Südlage eher höher.

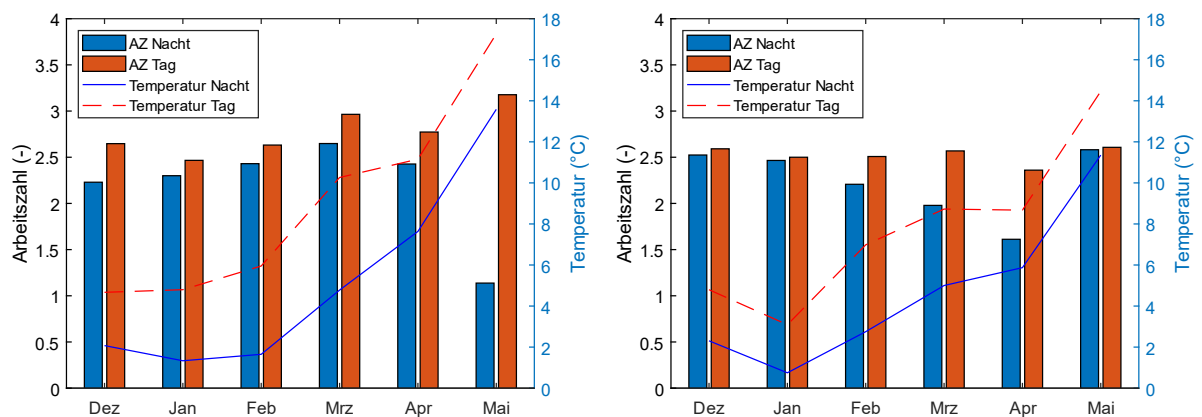


Abbildung 16: Monatsarbeitszahl Heizen (Systemgrenze JAZ) und der Aussentemperatur mit Unterscheidung Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2)

Die Abbildung 16 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 17 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, welcher bereits in Abschnitt 4.1.4 besprochen wurde. 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 öfter in der Nacht eingeschaltet. Dies dreht sich beim 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.

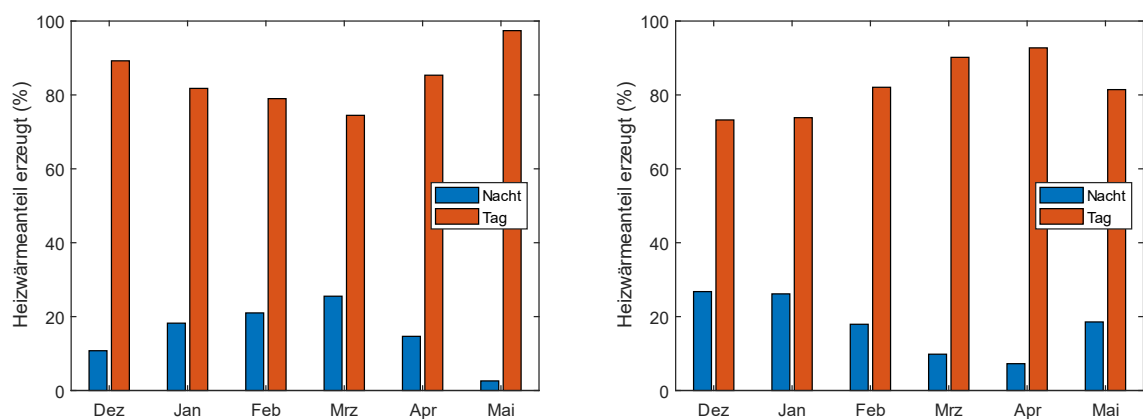


Abbildung 17: Erzeugter Heizwärmeanteil, unterschieden nach Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2)



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 Senken-Temperatur produzieren 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. Bei Anlagen, welche mit gleitender Vorlauftemperatur betrieben werden, was in der Mehrheit der Anlagen der Fall ist, ist die erforderliche Schmelztemperatur auch von diesem Einstellungsparameter abhängig, was die Auswahl des passenden PCM noch erschwert.

Um das Potential der Effizienzsteigerung über die Verlagerung der Wärmeproduktion von der Nacht in den Tag abzuschätzen wurde mittels einfacher Carnot-Gütegrad-Berechnung die Arbeitszahl und daraus der Strombedarf ermittelt. Für den Wärmebedarf und die Aussentemperatur (= Quelltemperatur) wurde auf die Messdaten von HP2 zurückgegriffen. Die Arbeitszahl wurde berechnet als

$$AZ = g \cdot \frac{T_{vl}}{T_{vl} - T_{amb}}$$

Mit einem Gütegrad $g=0.31$ ergibt sich eine gute Korrelation zu den Messwerten für Tagesmitteltemperaturen $< 4^\circ \text{C}$, bei denen der Speicher kaum überladen wurde.

Damit wurden die Arbeitszahlen und der Strombedarf (Tageswerte) für folgende Varianten berechnet:

- Ohne Speicher: Die Wärmepumpe ist 24 h in Betrieb, ohne Nachtabenkung. Quelltemperatur als Tagesmittelwert (24 h-Mittel)
- Mit Speicher ideal: Die Wärmepumpe ist nur 12 h in Betrieb und erzeugt in dieser Zeit die total benötigte Wärme. Die Quelltemperatur ist der Mittelwert über den Tag (12 h).
- Mit Speicher 45°C : Analog wie Speicher ideal, jedoch wird die Senktemperatur zur Speicherbeladung während 4 h auf 45°C erhöht. Dieser Wert wird gewichtet mit $1/3$ (4 h von 12 h) in den Mittelwert eingerechnet.

Die Abbildung 18 zeigt die tägliche Arbeitszahl und den Strombedarf für die drei obigen Varianten. Mit einem idealen Speicher kann eine Verlagerung in den Tag eine leichte Verbesserung der Arbeitszahl bewirken. Jedoch wird diese vernichtet, sobald ein realer Speicher ins Spiel kommt. Die 45°C als Speicherladetemperatur wurde gewählt, weil hiermit bei den kälteren Temperaturen in der Effizienz eine Parität zum System ohne Speicher erreicht wird. Bei dieser Temperatur wird jedoch das PCM noch gar nicht geschmolzen (der Speicher ist also auch noch idealisiert) und weitere Speicherverluste sind noch nicht berücksichtigt.

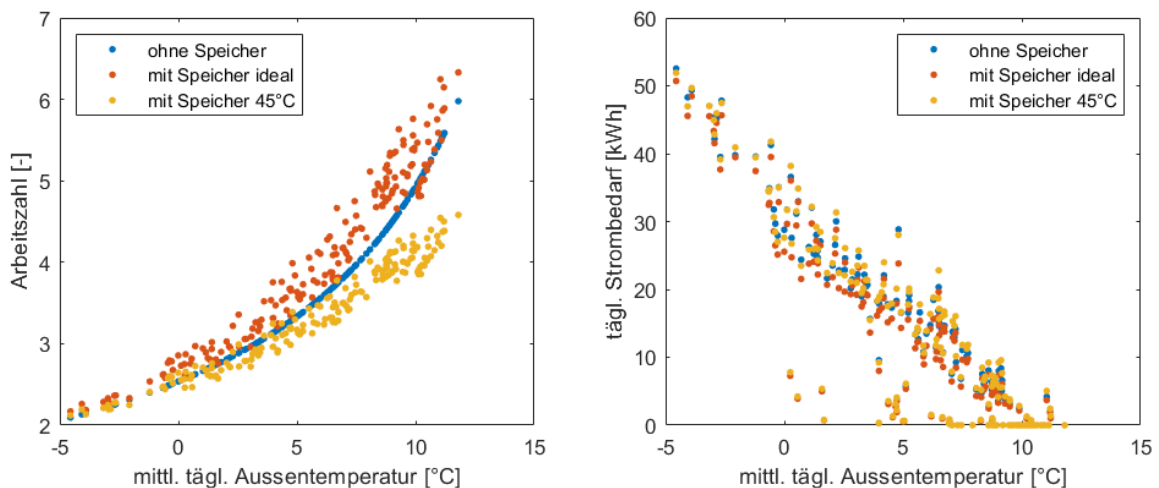


Abbildung 18: Abschätzung des Effizienzpotentials für die Tag-Nacht-Verlagerung. Links: Arbeitszahl, rechts: Strombedarf Heizen.



Der Effizienzgewinn durch die Tag/Nacht-Verlagerung wird also durch den COP-Rückgang wegen der für die Speicherung benötigten Übertemperatur wieder vernichtet. Eine Erhöhung der Arbeitszahl über die Verlagerung der Wärmeproduktion in den Tag und die Speicherung im PCM-Speicher ist damit nicht möglich.

Wie wird die Effizienz bei gleitendem Betrieb beeinflusst?

Wenn kein Überfluss-Strom von der PV-Anlage zur Verfügung steht, wird der Speicher gleitend betrieben. Beim Wasserspeicher ist die gespeicherte Energiemenge bei gegebener Temperaturdifferenz immer gleich gross.

Die Abbildung 19 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen dem obersten Speicherfühler und der Vorlauf-temperatur in den Heizkreis auf die aus dem Speicher entladene Wärmemenge (Tageswerte). In HP1 ist bei den höheren Wärmemengen eine klare Absetzung der Temperaturdifferenzwerte < 8 K erkennbar, während die Punktwolke in HP2-4 deutlich mehr Streuung aufweist. In HP1 liegen 58% der Werte unterhalb von 8 K (graue Linie), in den anderen Heizperioden sind es nur 22 bis 38%. Die Übertemperatur reduziert die Effizienz der Wärmepumpe. Die Übertemperatur ist auf zwei Ursachen zurückzuführen:

- Gezielte Speicherüberladung bei solarem Überschuss
- Zu geringe Wärmekapazität des PCM unterhalb des Schmelzpunktes.

Bei kälteren Temperaturen kann die Wärmepumpe durchlaufen, die erzeugte Wärme wird direkt vom Heizkreis abgenommen. Mit zunehmender Aussentemperatur nimmt der Wärmebedarf ab, jedoch die Heizleistung der Wärmepumpe bei minimaler Drehzahl wegen der höheren Quellentemperatur zu, bis sie nicht mehr weiter runterregeln kann. Die Speichertemperatur steigt um die Hysterese über die Solltemperatur und die Wärmepumpe wird ausgeschaltet. Beim PCM-Speicher wird wegen der geringeren Wärmekapazität unterhalb des Schmelzpunktes die Ausschalttemperatur schneller erreicht. Damit die Wärmepumpe nicht zu oft taktet ist vom Hersteller eine Mindestlaufzeit definiert, wodurch der Speicher dann weiter geladen und die Temperatur unnötig überhört wird.

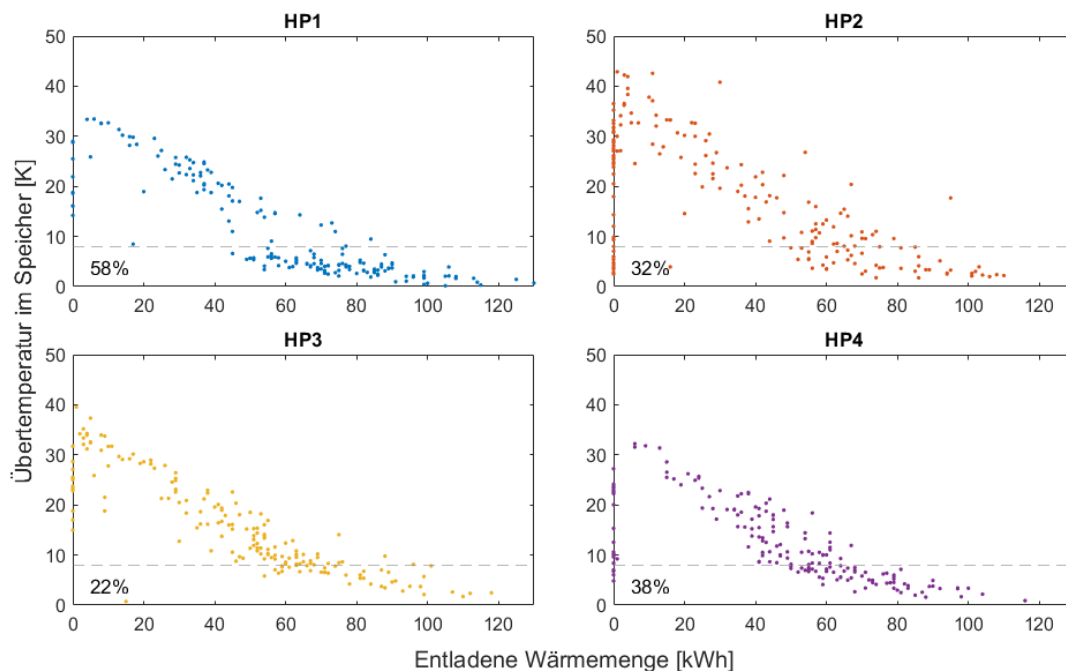


Abbildung 19: Übertemperatur im Speicher im Vergleich zur entladenen Wärmemenge (Tageswerte) mit Angabe des Anteils der Werte, welche unterhalb von 8 K (graue Linie) liegen.



Die Abbildung 20 zeigt die Speicherkapazität für verschiedene Anteile von PCM-Kapseln im Speicher, relativ zur Speicherkapazität von Wasser. Die Speicherkapazität des festen PCM ist unterhalb des Schmelzpunkts etwas niedriger als diejenige von Wasser, kann aber aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit nur langsam aktiviert werden. In Pany ist der Speicher zu 2/3 des Volumens mit Kapseln gefüllt, 1/3 mit Wasser, welches die Hauptlast der Kapazität übernimmt. Die Wärmeübertragung an das PCM verläuft nur langsam, was dann zur verminderten Speicherkapazität und damit zu den Temperaturüberhöhungen führt.

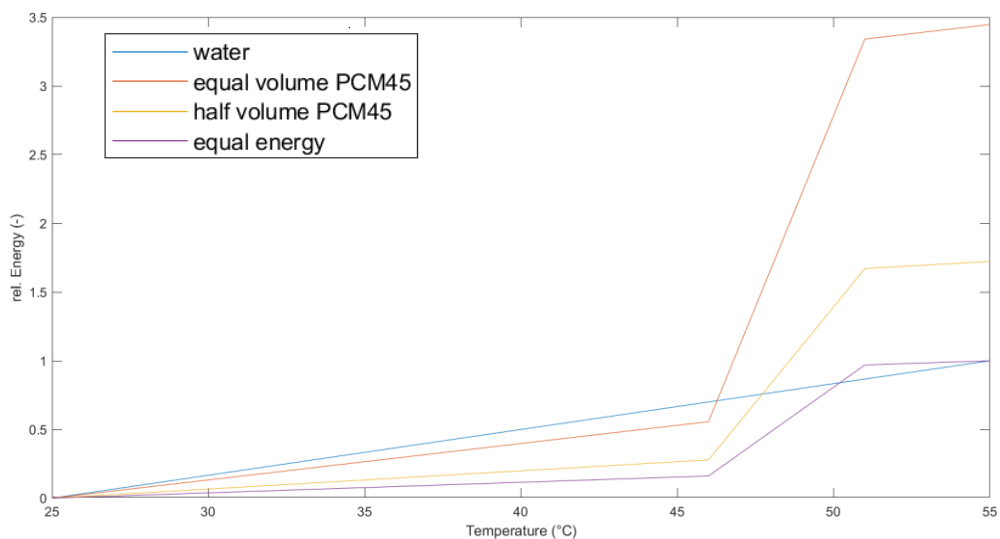


Abbildung 20: Vergleich der relativ gespeicherten Energie von Wasser mit PCM bei verschiedenen Volumina über Temperaturerhöhung. Die Volumina beziehen sich hier auf PCM, bzw. Wasservolumen.

4.1.7. Wirtschaftlichkeit

Die Abbildung 21 zeigt die Stromkosten für die einzelnen Heizperioden bei unterschiedlichen Tarifen für Bezug und Einspeisung. Die Kosten wurden wie folgt berechnet:

- $\text{Stromkosten}_{\text{total}} = \text{Netzbezug}_{\text{total}} * \text{Bezugstarif} - (\text{PV-Produktion} - \text{EV}_{\text{total}}) * \text{Einspeisetarif}$
- $\text{Stromkosten}_{\text{heizen}} = \text{Netzbezug}_{\text{heizen}} * \text{Bezugstarif}$

Aufgrund der neuen Stromgesetze sind in den nächsten Jahren starke Änderungen in den Tarifstrukturen der Versorger zu erwarten. Verschiedene EVU's haben sich schon heute von den herkömmlichen Hoch/Niedertarifen mit niedrigen Tarifen in der Nacht verabschiedet und dynamische Strompreise in verschiedensten Ausprägungen eingeführt. Da auch die einzelnen Heizperioden starke Unterschiede im Wärmebedarf, des PV-Ertrags und der Belegung zeigen, wurde auf eine detaillierte Auswertung der Stromkosten verzichtet. Mit den unterschiedlichen Tarifen soll eine Bandbreite möglicher Einsparungen aufgezeigt werden.

Bei den Kosten für den Netzbezug Heizen zeigen sich, je nach Tarif, Reduktionen von ca. 100-300 Fr. im Vergleich zu HP1. Wegen der grossen Unterschiede im Heizwärmebedarf und der Solareinstrahlung zwischen den einzelnen Heizperioden können die Einsparungen auch nicht eindeutig auf den Speicher zurückgeführt werden. Die Kapselfüllung wurde mit einem Listenpreis von 4500.- CHF/m³ vertrieben (3600 CHF für den Speicher in Pany mit 800 L Volumen), was einer Amortisationszeit von 12-36 Jahren entspräche. Eine Amortisation ist damit innerhalb der Lebenszeit des Produkts nicht eindeutig nachweisbar.

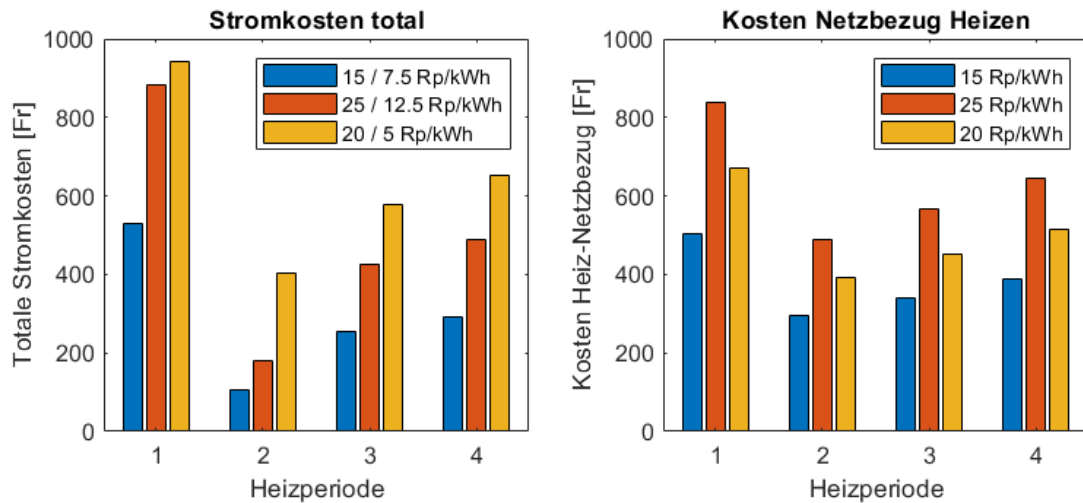


Abbildung 21: Stromkosten bei unterschiedlichen Tarifen (Bezug / Einspeisung) für das gesamte Gebäude (links) und nur für den Netzbezug im Heizbetrieb (rechts).

4.2 Produktion und Qualitätssicherung der Kapseln

4.2.1. Phasenwechselmaterial (PCM)

Um möglichst viel Energie bei nutzbaren Temperaturen und etwas Reserven für Verluste beim Wärmeübergang zwischen Kapseln und Wasser sowie Verlusten im Heizsystem zu haben, wurde eine PCM Mischung mit Schmelztemperatur um die 45 °C entwickelt.

Die Basis des PCM bildet Natriumacetat Trihydrat (SAT), wobei ein neues Additiv den Schmelzpunkt von 58 °C auf 48 °C senkt. Damit liegt die Schmelztemperatur noch immer etwas höher als angestrebt. Zusätzlich wurde noch ein Keimbildner hinzugefügt, um die Erstarrung des PCM möglichst nahe an der Schmelztemperatur zu ermöglichen. Tabelle 3 zeigt die Grundzusammensetzung des neuen PCM.

Tabelle 4: Ungefähre Grundzusammensetzung des PCM45, aufgrund einer hängigen Patentanmeldung wurde hier auf Detailangaben verzichtet.

Materialname	Chemische Formel	CAS	Massen %*
Sodium Acetate Trihydrate (SAT)	NaCH ₃ COO·3H ₂ O	6131-90-4	>75
Schmelzpunkt Minderer	-	-	<25
Keimbildner	-	-	<2

*% der Gesamtmasse

Durch eine Weiterentwicklung der PCM Mischung kann in HP3 auf ein wesentlich verbessertes Material zurückgegriffen werden, welches die bestehenden Probleme der Einschaltzyklen der WP sowie der Unterkühlung des PCM deutlich verbessern sollte. Die Verbesserung des PCM-Rezepts wirkt sich auf die höhere Erstarrungstemperatur und die geringere Unterkühlung aus, wie in Abbildung 22 ersichtlich.

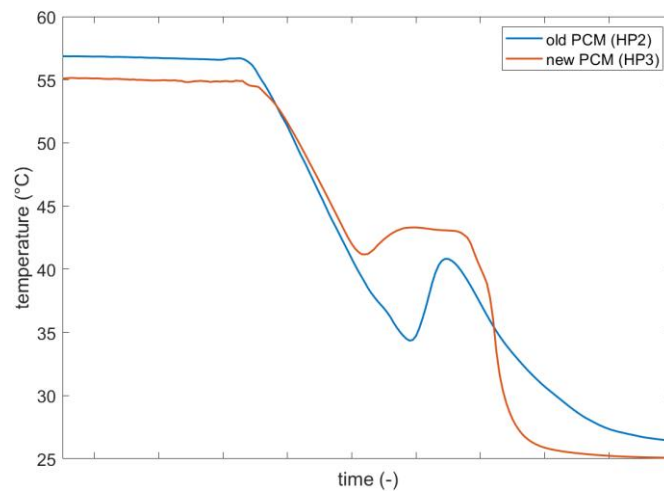


Abbildung 22: Vergleich der Erstarrungskurven der zwei PCM. HP3 wird mit einer weiterentwickelten Mischung betrieben

4.2.2. Verkapselung und Produktion

Die Serienproduktionsanlage konnte im Sommer 2023 final in Betrieb genommen werden. Seither produziert die Anlage bis zu 20'000 Kapseln pro Tag (dies entspricht 4.5 m³ Speichervolumen). Abbildung 23 zeigt ein paar Eindrücke aus der Produktionsanlage, im grossen Bild die Schweissstation für die Kapseldeckel, rechts oben eine Übersicht der ganzen Strasse, darunter eine Detailaufnahme der Gewichtskontrolle und zuletzt die vollautomatische Palettierung der verpackten Kapseln.



Abbildung 23: Eindrücke aus der Serienproduktionsanlage für Cowa Booster Caps, welche im Juli 2023 final in Betrieb genommen werden konnte

4.2.3. Qualitätskontrollen

Um die Qualität der Kapseln und der PCM Mischung sicherzustellen wurden verschiedene Prüfmethoden eingesetzt, die in die Kategorien PCM, Kapsel- und Systemprüfungen unterteilt folgend erläutert werden.



PCM Qualitätskontrolle:

1. Der Wassergehalt der Mischung ist entscheidend für die Enthalpie und den Schmelzpunkt. Um zu überprüfen wie nahe die Mischung am theoretischen Wassergehalt von ca. 30% liegen, wurden mittels eines Halogentrockners Messungen von mehreren Proben pro Produktionsbatch gemacht. Über die verschiedenen Produktionen konnte der Wassergehalt immer zwischen 29% – 31% nachgewiesen werden. Dadurch liegen die Mischungen im erlaubten Toleranzbereich.
2. Mit den Proben wurden Messungen in einem eigens entwickelten Differenzkalorimeter vorgenommen, in welchem unter kontrollierten Bedingungen eine PCM-Probe neben einer Wasserprobe aufgeheizt werden, während die Energie für beide Proben genau gemessen wird. Über den Energieunterschied können die Wärmekapazitäten sowie die Schmelzenthalpie der PCM-Mischung errechnet werden. Es konnte dabei eine Schmelzenthalpie von $>200 \text{ J/g}$ für mehrere Proben gemessen werden, was den Erwartungen aus den Labormessungen entspricht.

Kapsel Qualitätskontrolle:

Während der Tests im Labor über die HP2 wurden zwei technische Schwachstellen in der Kapselhülle festgestellt und behoben. Erstens konnten wir feststellen, dass sich durch die Druckzyklen, welche im Inneren der Kapseln wegen der Dichteänderung des PCM entstehen, Dellen in der Hülle bilden können, was mit der Zeit Rissbildungen zur Folge haben könnte. Diese potenzielle Fehlerquelle wurde durch eine Verbesserung der Wandstärkenverteilung, sowie eine allgemeine Erhöhung der Wandstärke gelöst. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Füllhöhe in der Kapsel, welche durch eine kleine Anpassung in der Halsgeometrie optimiert werden konnte. Abbildung 24 links zeigt die angepasste Kapselgeometrie neben der rechts abgebildeten ursprünglichen, in HP2 eingesetzten, Kapselgeometrie.

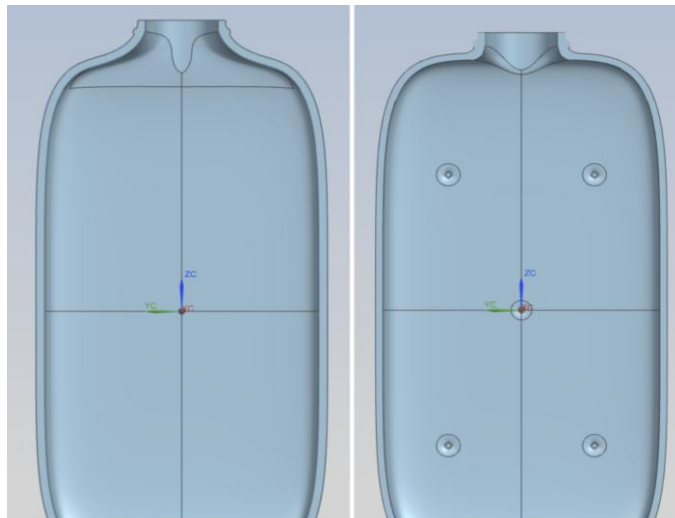


Abbildung 24: Links neue, angepasste Kapselgeometrie, rechts alte Kapselgeometrie.

Systemtests:

Thermische und mechanische Zyklen werden in verschiedenen Messaufbauten von 20 – 300 Litern Grösse durchgeführt um die Funktionalität der PCM-Kapseln im System nachzuweisen:

1. Thermomechanische Belastung: In dem Betriebsfenster von etwa 20°C – 60°C durchlaufen PCM Dichteänderungen von bis zu 10%. Dies führt zu einer Druckänderung in der Kapsel, da sie ein geschlossenes Volumen darstellt. Da die Kapseln sich jedoch gleichzeitig verformen können, entsteht ebenfalls eine Volumenänderung. Diese beiden Effekte resultieren in Wechsellastspannungen im Kunststoff, was mit der Zeit zu Rissen in der Kapsel führen kann.

Um die Prüfbedingungen zu bestimmen wurde eine Kapsel im CT unter Aussendruck während des Erstarrungsprozesses aufgenommen und die Volumenänderung ausgewertet. Diese Volumenänderung wurde anschliessend in einem Prüfstand mittels Anlegen von Aussendruckänderungen bei konstanter Temperatur nachgebildet. In diesem Test werden 100 der neuen Kapseln



bei 50°C von 1 bis 6 bar mit einer Haltezeit von je 4 Minuten getestet. Diese Methode erlaubt das Durchfahren von mehr als 100 Zyklen pro Tag. Die bisherigen Resultate zeigen keine Schadensbilder nach >5'000 Zyklen (20'000 Zyklen sind die Zielgrösse).

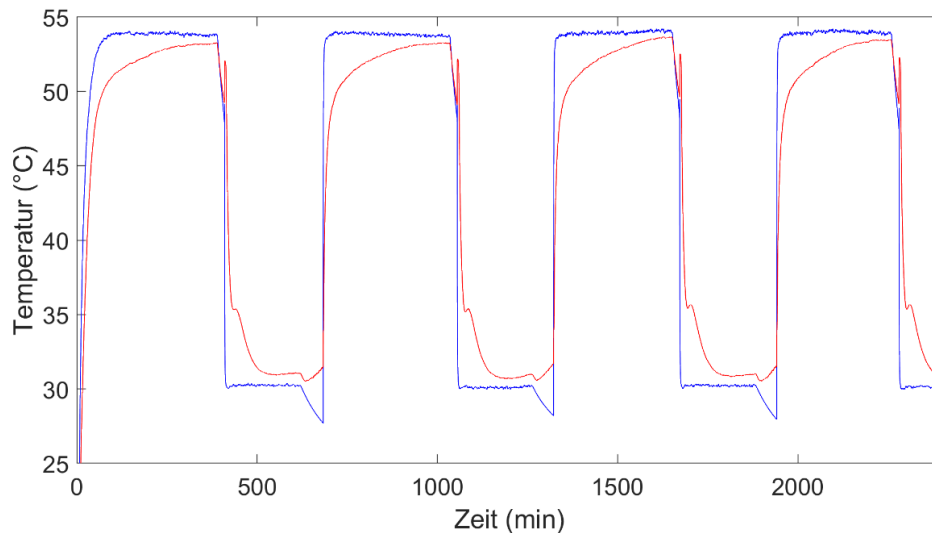


Abbildung 25: Temperaturverläufe im 10-Liter-Zyklersetup (Vorgänger des 20-L-Setup) mit der neuen PCM-Mischung

2. Thermische Zyklen in 20 Litern: Ein eigens entwickelter Prüfstand erlaubt es 100 Kapseln unter kontrollierten Bedingungen mit konstanten Lade- und Entladetemperaturen und Massenströmen zu zyklieren. Dabei werden zum einen schnelle Zyklen gefahren um den Alterungsprozess der Kapseln und des PCM zu beschleunigen, und zum anderen werden periodisch langsamere Zyklen gefahren um die Energiebilanz der Kapseln aufzunehmen. Die Energiebilanzen erlauben eine Aussage über die Energiedichte der Kapseln und des PCM und damit Schlussfolgerungen zur Langlebigkeit und Performance der Kapseln.
3. Thermische Zyklen in 300 Litern und Prototypensystem: In den Labors der Hochschule Luzern wurde in einem 300 Liter Pufferspeicher, welcher mit einer Wärmepumpe beladen und über eine Senke, welche ein Heizsystem nachbildet der Systemtest analog zum System in Pany durchgeführt. Das System entspricht der Schaltung WNG in Abbildung 3 ohne die Verbindung zum Boiler und mit einer Sole/Wasser Wärmepumpe (neu wurde auch eine Inverter-gesteuerte Wärmepumpe eingebaut). In diesem Prototyp wurden bereits mehrere Zyklen mit und ohne Kapseln gefahren um einen direkten Vergleich machen zu können. Abbildung 26 zeigt den Vergleich zwischen sensiblem und latentem Pufferspeicher, die Energie ist für je einen Entladezyklus eingetragen. Dabei wurde erst ein Kapazitätsfaktor von 1.6 erreicht, was nicht den Erwartungen aus den 10 Liter Experimenten entspricht. Ein möglicher Grund dafür könnte die nicht vollständige Beladung des latenten Speichers sein.

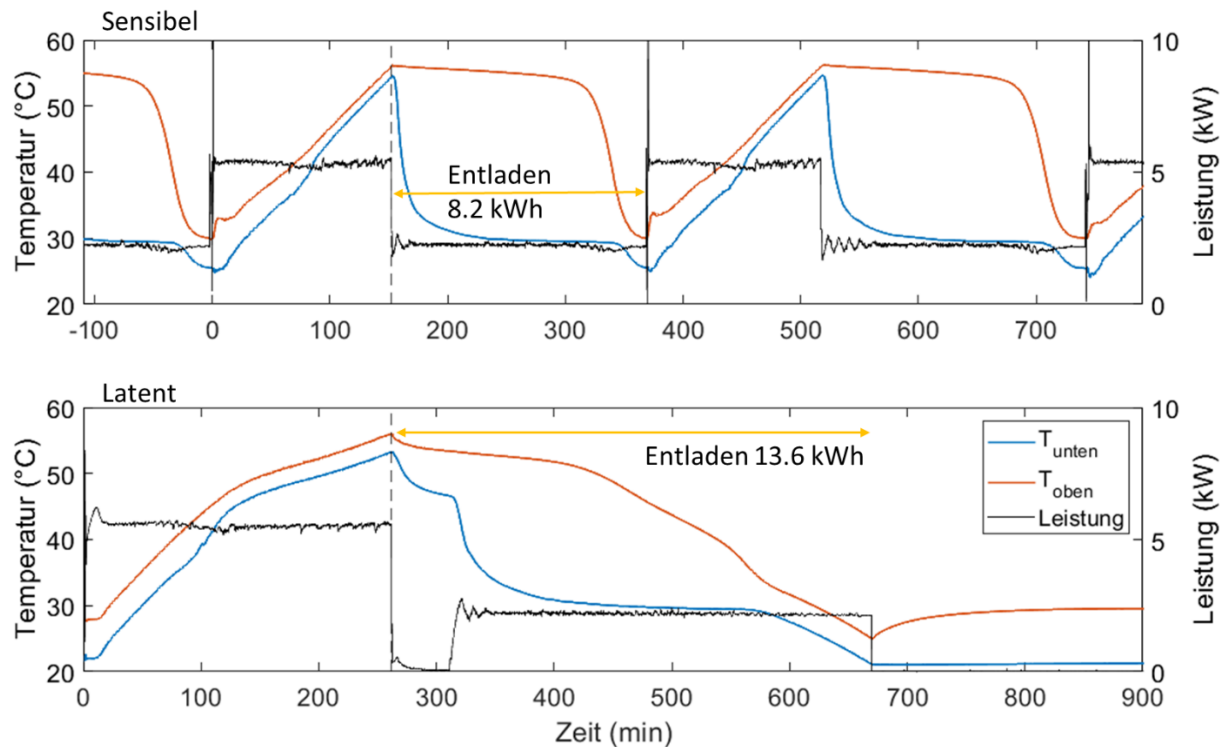


Abbildung 26: Ausschnitt aus zwei Zyklen Experimenten mit sensiblem Pufferspeicher (oben) und Kapsel befülltem, latentem Pufferspeicher (unten). Die beiden Temperaturen zeigen die Werte ganz oben und unten im Speicher, und auf der rechten Y-Achse die thermische Leistung über den Pufferspeicher.

4.2.4. Installation der Kapseln und Wiederinbetriebnahme der Anlage

Die Anlieferung und Installation der 26 Schachteln mit je 25 Kapseln konnte gut innerhalb eines Arbeitstages durchgeführt werden. Dabei wurde der für die Anlage verantwortliche, lokale Heizungsinstallateur beteiligt, um den Speicher am Morgen zu entleeren und am Abend die Anlage wieder in Betrieb zu nehmen. Abbildung 27 zeigt einige Impressionen der Befüllung des 800 Liter Pufferspeichers in Pany. Links im Bild ist die 3D gedruckte Befüllhilfe (ein angeschraubter Trichter) zu sehen.

Es wurden verschiedenste Entwürfe gedruckt und getestet, wobei in Pany auf Grund der engen Platzverhältnisse nicht die aktuell beste Version verwendet werden konnte. Diese Befüllhilfe wird im weiteren Verlauf des Projektes weiter optimiert und als nächsten Schritt in eine Steck- und Faltkonstruktion aus Karton/Holz umkonstruiert, damit eine günstige Herstellung und einfache Beilage in die Kapselverpackung möglich wird. Die Befüllung des Speichers konnte in unter 4 Stunden durchgeführt werden, wobei wieder die Platzverhältnisse und ein etwas zu tief angebrachter Wartungsflansch die Installationszeit massgeblich verlängert haben. Insgesamt konnten 3546 Kapseln in den Speicher eingefüllt werden, was bei einem Nettovolumen von 760 Litern Speicher einer Packungsdichte von über 62% und damit dem Erwartungswert entspricht.

Die ersten Messdaten konnten ebenfalls ausgewertet werden und zeigen einen «normalen» Betrieb der Heizung, wobei der Phasenübergang der PCM Kapseln deutlich ersichtlich ist. Eine genaue energetische Analyse folgt im weiteren Projektverlauf.



Abbildung 27: Impressions des Pufferspeichers und der Befüllung des Puffers mit Cowa BOOSTER CAPSULES.

4.2.5. Überwachung der Anlage mittels elektrischer Leitfähigkeit

Die Überwachung der Leitfähigkeit zeigte einen relativ konstanten Anstieg, was einzelne undichte Kapseln als Ursache hatte. Als Vorsichtsmassnahme wurde während der Heizperiode 2 Mal das Wasser im Speicher gewechselt, damit der Wert von 1 mS/cm eingehalten wird. Dieser Anstieg sollte in HP3 nicht mehr zu sehen sein, da die Kapseldichtheit durch die optimierte Kapsel, den Deckel und die Schweissparameter stark verbessert werden konnte. Interne Korrosionsmessungen haben ergeben, dass der kritische Grenzwert für Korrosion bei Kontakt mit gängigen Materialien in Heizsystemen bei über 20 mS/cm liegt.

4.2.6. Entleerung des Speichers nach HP2 und Sichtprüfung der Kapseln

Die Kapseln wurden am 30.05.2023 aus dem Speicher entnommen. Mittels genauer Sichtprüfung und Sortierung konnte festgestellt werden, dass bei etwa 5 Prozent der Kapseln das PCM keinen Phasenwechsel vollzog und bei etwas über 5 Prozent der Kapseln signifikante Deformationen zu sehen waren, welche sich negativ auf die Lebensdauer auswirken könnten. Die Massnahmen gegen die Deformation wurden bereits in 4.2.2 erläutert.

4.2.7. Produktion der neuen Kapseln und Wiederinbetriebnahme der Anlage

Im Herbst 2023 wurden die Kapseln mit der neuen Rezeptur eingefüllt und in Betrieb genommen.

4.3 Strategiewechsel bei Cowa

Anfang des Jahres 2024 wurde im Verwaltungsrat von Cowa entschieden die Vermarktung und Produktion der Cowa Caps per sofort einzustellen. Die Gründe zu diesem Entscheid waren:

1. Zu geringes Skalierungspotential des Produktes, da spezielle Pufferspeicher mit Füllöffnungen benötigt werden. Dies führte bei der Vermarktung zu grossen Einschränkungen der potenziellen 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 entwickelt mit Fokus auf Trinkwassererwärmung, ist aber auch für den Einsatz als Pufferspeicher oder in der Kombination geeignet (siehe unten).

4.3.1. Die Cowa Compact Cell

Cowa COMPACT Cells 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. Die Speicher werden mit zwei verschiedenen Phasenwechselmaterialien mit Schmelzpunkten bei $58\text{ }^{\circ}\text{C}$, bzw. $48\text{ }^{\circ}\text{C}$, angeboten. Beide PCM können sowohl für TWW und Pufferspeicher verwendet werden. 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 parallel verschaltet für minimierte Druckverluste und maximale Übertragungsleistung. Weiter kann das System als Kombispeicher oder klassisch als Pufferspeicher mit TWW-Speicher betrieben werden. Letztere Lösung wird im Weiteren genauer beschrieben, da sie im Anschluss an das Projekt in Pany im Oktober 2025 umgesetzt werden soll. Eine schematische Darstellung in Abbildung 28 zeigt, wie viel Platz im vorhandenen Heizungskeller der Pilotanlage gespart werden kann. Die Stellfläche der 5 Zellen beträgt ungefähr einen Quadratmeter und ermöglicht die Speicherung von 36 kWh Pufferenergie, und 24 kWh (oder 720 Liter V_{40}) Warmwasser.

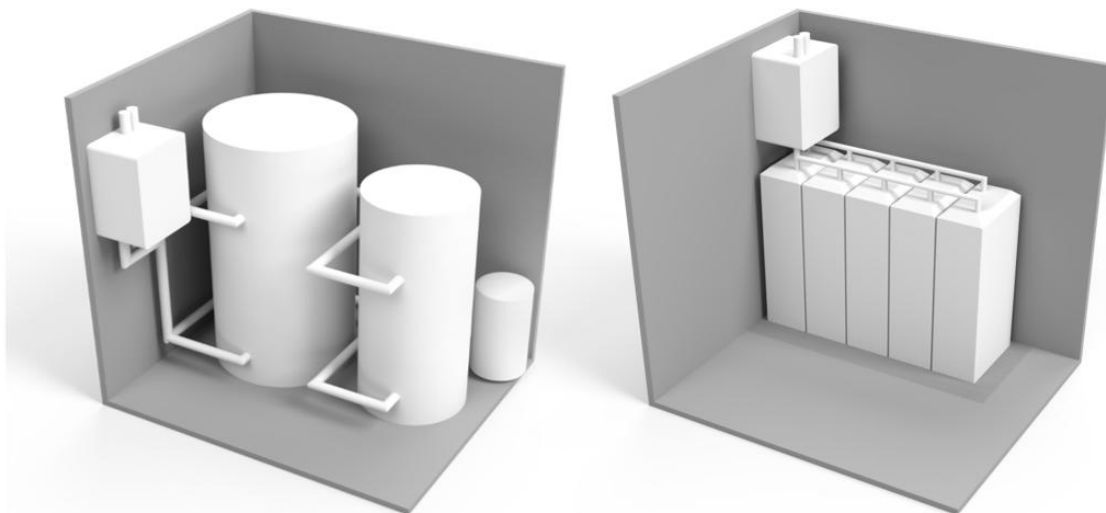


Abbildung 28: Links Istzustand, rechts Umrüstung auf Compact Cells.

Der Speicher ist äusserst platzsparend und entspricht vollgeladen einem wasserbasierten Speicher mit rund 300 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. Die Zellenhöhe ist optimiert darauf die grösstmögliche Kapazität bei möglichst einfacher Installation zu bieten. Im Vergleich zu konventionellen Pufferspeichern sind die Anschlüsse kompakt an der Oberseite angeordnet.

Weitere technische Details können aus Tabelle 5 entnommen werden.



Tabelle 5: Technische Daten des neuen Cowa-Speichers "Compact Cell"

Cowa COMPACT Cell DHW	48 TWW	48 Puffer	
Höhe	1400	1400	mm
Breite	600	600	mm
Tiefe	340	340	mm
Gewicht	262	262	kg
Speicherkapazität pro m ³	70	70	kWh/m ³
Speicherkapazität ¹ geladen bis 65 °C	12	12	kWh
Speicherkapazität ¹ geladen bis 55 °C	10	10	kWh
Zapfvolumen V ₄₀ geladen bis 65 °C	360	-	L
Zapfvolumen V ₄₀ geladen bis 55 °C	300	-	L
Entladetemperatur	45	45	°C
Energielabel ²	B	B	
Möglicher Wasservolumenstrom	25	25	L/min
Druckverlust bei max. Volumenstrom	48	18	kPa
Minimaler Betriebsdruck	1.5	1.5	Bar
Maximaler Betriebsdruck	6	6	bar
Maximale Betriebstemperatur	75	75	°C

¹ Speicherkapazität gemessen von Ladezustand > 65°C resp. 55°C bis Temperatur am Austritt < 40°C bei einem Volumenstrom von 10 L/min

² Bei durchschnittlicher Speichertemperatur von 60°C und Umgebungstemperatur von 15°C

Im gleitenden Betrieb gemäss Heizkurve übernimmt die Cowa COMPACT Cell 48 die Funktion des klassischen Pufferspeichers, bei PV-Überschuss wird die Zelle über den Schmelzpunkt beladen und ermöglicht hohe Eigendeckungsgrade. Zudem reicht die passive Kapazität (im sensiblen Bereich) dreier Zellen aus, um genügend Energie für einen Enteisungsprozess bereitzustellen.

4.3.2. Einbindung in Pany

Um die gewünschte Kapazitätserhöhung für den Piloten zu erreichen, sind 2-3 Pufferzellen sowie 1-2 Warmwasserzellen wünschenswert. Die benötigte Grundfläche dafür ist 0.6 m² – 1 m², was eine bedeutende Platzeinsparung im Heizungsraum darstellt und die Möglichkeit für alternative Nutzungen eröffnen würde. Die Zellen würden dabei nach Tichelmann parallel eingebunden.

Abbildung 30 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 ersichtliche.

Die hydraulische Einbindung vor Ort wird mit drei parallelen Pufferzellen und zwei parallelen TWW Zellen umgesetzt. Die Zellen werden wie in Abbildung 25 gezeigt verschaltet, was dem Wärmepumpensystemmodul (WPSM), Schema 1.6 entspricht.

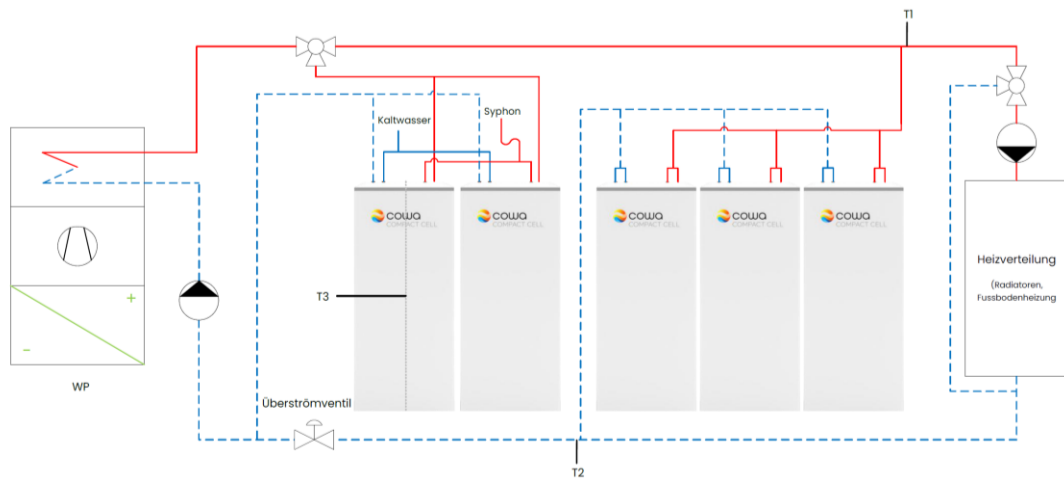


Abbildung 29: Hydraulikschema der drei Compact Cells 48 als Puffer mit zwei Compact Cells 48 als TWW-Speicher (WPSM 1.6)



Abbildung 30: Zwei Installationsbeispiele von Pilotanlagen, umgesetzt in Q3 2024. Warmwasser- und Pufferspeicher (links), sowie drei Pufferspeicher (rechts).

4.3.3. Kosten und Entwicklungspfad

Aktuell wird die Compact Cell für rund 4000 CHF an Endkunden vertrieben. Dies hätte Kosten zur Folge von 12'000 – 20'000 CHF für 3-5 Zellen. Im Vergleich wurde die Kapselfüllung für den 800 Liter Speicher mit ca. 4'000 CHF beziffert. Dies würde schätzungsweise 10'000 CHF Gesamtkosten mit dem Pufferspeicher und TWW Speicher zur Folge haben. Die Compact Cell Lösung ist momentan also noch teurer, bietet aber eine deutlich einfachere und platzsparende Installation.

Die aktuelle Entwicklungsrichtung von Cowa zielt auf Kostenreduzierung auf dem PCM-Material durch Skalierungseffekte und verbesserte Rezepturen. Der wichtigste Entwicklungspfad für die Kostenreduktion auf Speichersystemebene stellt die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Cowa-PCM dar, da dies die Verwendung von alternativen Wärmeübertragungskonzepten ermöglicht. Aktuell schätzen wir, dass die Produkte mit der nächsten Generation an PCM und Wärmeübertragern zum Preis von 1000-2000 CHF angeboten werden können. Damit wären die Produkte konkurrenzfähig mit aktuellen Puffer- und Trinkwarmwasserspeichern. Bis dahin wird das Produkt als extrem platzeffizientes Speicherprodukt vermarktet und soll vor allem im urbanen Bereich Einsatz finden.



5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen in Pany haben gezeigt, dass die Nutzung von Phasenwechselmaterialien (PCM) als Pufferspeicher für Wärmepumpen technisch funktioniert und zu einer deutlichen Erhöhung der Speicherkapazität führt. In den Heizperioden mit PCM-Kapseln konnte der **Eigendeckungsgrad** (Anteil des selbst erzeugten PV-Stroms am Gesamtverbrauch) um bis zu **50% gesteigert werden**, von ursprünglich 21% auf Werte zwischen **35–40%**. Auch der Eigenverbrauchsgrad wuchs im Vergleich zur Referenzperiode um **10–20%**, von **28% auf 33–34%**. Die effektive Speicherkapazität des Puffers stieg dabei um bis zu **80%** gegenüber dem reinen Wasserspeicher. Diese Erkenntnisse wurden über 3 Heizperioden mit PCM-Kapseln gesammelt, jedoch nicht von klimatischen Einflüssen oder Nutzerverhaltensänderungen bereinigt. Eine Verbesserung in den erwähnten KPIs kann also nicht ausschliesslich der erhöhten Speicherkapazität zugeschrieben werden, eine Verbesserung wegen der PCM-Kapseln ist aber eindeutig vorhanden.

Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass das ursprüngliche Kapselkonzept durch eine limitierte Wärmeübertragung eingeschränkt war: die Be- und Entladeleistung blieb hinter den Erwartungen zurück. Zudem konnte eine Verbesserung der **Jahresarbeitszahl (JAZ)** im Feldtest nicht nachgewiesen werden (gemessene Werte lagen zwischen 2.38 und 2.63, was auch keine Verschlechterung gegenüber der Referenz darstellt), da die verfügbare Speicherkapazität im realen Betrieb nicht optimal genutzt werden konnte. Der Einsatz von PCM Speichern für die Kapazitätserhöhung zur Optimierung des Eigendeckungsgrads bleibt damit vorerst eine Nischenanwendung. Es kann zwar eine Amortisation der zusätzlichen Kosten innerhalb der Lebensdauer des Heizsystems durch Einsparungen in den Stromkosten errechnet werden, bei den heutigen Stromkosten ist dies aber nicht Kaufentscheidend. Je nachdem welche Kostenmodelle in naher Zukunft im Strommarkt umgesetzt werden, kann aber aus Privatkundensicht durchaus dezentrale Speicherkapazität relevanter werden. Auch könnten dezentrale Wärmespeicher zukünftig grossen Nutzen für Stromnetze haben, indem Wärmebedarf und Erzeugung zeitlich entkoppelt und erneuerbare Energien gezielt genutzt werden.

Ende 2023 wurde bei Cowa ein Strategiewechsel vollzogen, bei dem das Kapselprodukt aus dem Produktportfolio gestrichen wurde und dafür die Entwicklung auf die **Compact Cell** umgestellt wurde – ein kompakter, vollständig mit PCM gefüllter Speicher. Dieser bietet im Vergleich zu Wasser ein bis zu **dreifach höheres Energievolumen pro Liter Speichervolumen** und integriert sowohl Heiz- als auch Trinkwarmwasserspeicherung. Gerade in Sanierungsprojekten, in denen Platz ein limitierender Faktor ist, bedeutet dies einen klaren Wettbewerbsvorteil. Durch die strikte Systemtrennung (ein Wärmetauscher ist umgeben von PCM) wird ein viel weniger fehleranfälliges System, welches auch noch in kubischer Bauform entworfen werden kann, realisiert. Dabei bietet die Warmwasserbereitung im Durchlaufprinzip die Funktionalität einer Frischwasserstation ohne den Einsatz von Regelelektronik oder Wasserpumpen.

Ein technologischer Durchbruch besteht in der Optimierung des PCM auf eine **Schmelztemperatur von 48 °C**. Damit verfügt Cowa über ein Alleinstellungsmerkmal im Markt: Während Wettbewerber wie Axiotherm oder Sunamp Produkte mit geringerer volumetrischer Energiedichte anbieten, kombiniert Cowa hohe Speicherdichte (**75 kWh/m³**) mit Wärmepumpenkompatibilität im praxisrelevanten Temperaturbereich, was zu bisher unerreichter Ladeeffizienz für PCM-Speicher führt.

Die Markteinführung der Compact Cell erfolgte 2025 in Zusammenarbeit mit Meier Tobler. Bereits **über 40 Speicher** wurden in der Schweiz installiert. Parallel dazu läuft die Einbindung in die Pilotanlage in Pany, wo das bestehende System durch **fünf Compact Cells** erneuert wird. Damit steht ein repräsentatives Schaufensterprojekt zur Verfügung, das nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die Praxistauglichkeit dokumentiert.

Für die Expansion in den DACH-Raum ist das Marktpotenzial erheblich: Allein in Deutschland wurden 2023 über **350.000 Wärmepumpen** neu installiert – eine Zahl, die sich bis 2030 laut Prognosen mehr als verdoppeln dürfte. Speicherlösungen, die Platzersparnis, Effizienzsteigerung und Eigenverbrauchsoptimierung kombinieren, haben daher ein realistisches Volumen im **hohen sechsstelligen Bereich pro Jahr**.



Ein zentraler Hebel für die weitere Marktdiffusion ist die Kostenreduktion. Während herkömmliche Pufferspeicher bei **500–1.000 CHF** liegen, bewegen sich PCM-Speicher derzeit noch im Bereich **3.000–4.000 CHF**. Durch Skaleneffekte in der Produktion und Materialoptimierungen soll der Preis mittelfristig auf **1.000–2.000 CHF pro Speicher** gesenkt werden. Damit wäre die Compact Cell direkt wettbewerbsfähig und könnte herkömmliche Speicherlösungen zunehmend verdrängen.

Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- **Technische Machbarkeit belegt:** bis zu **80 % höhere Speicherkapazität**, bis zu **50 % höherer Eigendeckungsgrad**.
- **Strategiewechsel vollzogen:** von Kapseln zur Compact Cell, mit besserer Wärmeübertragung, höherer Energiedichte und integriertem Warmwassermodule, SVGW zertifiziert.
- **Markteintritt erfolgreich:** bereits **>40 Anlagen** installiert, Pilotprojekt in Pany mit **5 Compact Cells** wurde im Herbst 2025 umgesetzt.
- **Alleinstellungsmerkmal:** PCM mit **48 °C** Schmelzpunkt, ideal auf Wärmepumpen abgestimmt.
- **Wachstumspotenzial:** hoher Bedarf im DACH-Raum, mittelfristig mehrere **100.000 Speichereinheiten pro Jahr** realisierbar.
- **Kostenperspektive:** Reduktion auf **1.000–2.000 CHF** pro Speicher angestrebt.

Die Compact Cell-Technologie ist somit ein vielversprechender Baustein für die Energiewende. Sie unterstützt die Dekarbonisierung des Gebäudesektors, erhöht die Unabhängigkeit vom Stromnetz und eröffnet durch ihre Kompaktheit neue Einsatzfelder in Sanierungen und urbanen Kontexten. Mit klaren Alleinstellungsmerkmalen und einer konsequenten Internationalisierungsstrategie positioniert sich Cowa als Innovationsführer im Bereich thermischer Energiespeicherung.

6 Publikationen und andere Kommunikation

Über das Projekt wurde an den folgenden Veranstaltungen bzw. Plattformen berichtet:

- Kurzreferat an der 28. Wärmepumpentagung, 22.06.2022
- Social Media Beitrag zum Piloten: LinkedIn
- Kurzreferat Gebäudetechnik Kongress, 14.09.2022
- Energiefachbuch Schweiz 2022
- Online Auftritt Cowa Thermal Solutions:
<https://www.cowa-ts.com/referenzen/referenzobjekt-pany>
- Präsentation an der 31. Wärmepumpentagung in Bern

Folgende Publikationen wurden veröffentlicht:

- Poster und Kurzbeitrag im Tagungsband an der 30. Wärmepumpentagung in Bern [6]
- Beitrag im Tagungsband an der 31. Wärmepumpentagung in Bern [7]



Literaturverzeichnis

- [1] Website BFS, Rubrik Statistik, Bau- und Wohnungswesen, Energiemerkmale der Wohngebäude, <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen/gebaeude/energiebe-reich.html>, (abgerufen am 18.08.2025)
- [2] Energieperspektiven 2050+, Kurzbericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2022
- [3] Richtlinie 2004/22/EG des europäischen Parlaments und des Rates über Messgeräte: Europäische Union, 2004
- [4] Saia *Energiezähler erfüllen die Messgeräte Richtlinie Measurement Instrument Directive (MID)*, 2008. https://sbc-support.com/uploads/tx_srcproducts/26-452_DE_SI_MID.pdf (abgerufen am 15. November 2024)
- [5] Schweizer Ingenieur- und Architektenverband, SIA Norm 381/3 Heizgradtage der Schweiz, archiviert,
- [6] Christoph Meier, Marc Werro, Carsten Wemhöner, Philipp Roos, Remo Waser, *SunStore - Latenter, kompakter Pufferspeicher für mit Photovoltaik betriebene Wärmepumpen*, Tagungsband 30. Tagung des BFE-Forschungsprogramms, Bern, 2024
- [7] Carsten Wemhöner, Christoph Meier, Philipp Roos, Remo Waser, *SunStore - Latenter, kompakter Pufferspeicher für mit Photovoltaik betriebene Wärmepumpen*, Tagungsband 31. Tagung des BFE-Forschungsprogramms, Bern, 2025



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Luftbild und Kartenausschnitt des Pilotobjekts in Pany	14
Abbildung 2: links: Geöffneter Speicher für das Befüllen mit Cowa Caps. Rechts: Massblatt des Pufferspeichers von Feuron (Quelle: Datenblatt Meier Tobler)	15
Abbildung 3: COWA Booster Capsule 45	15
Abbildung 4: Anlagenschema mit der Messdatenerfassung und Bilanzgrenzen für die Kennzahlen..	17
Abbildung 5: links: HGT-Verteilung über die Messjahre und der Mittelwert von 2014-2023 für die Meteostation Disentis. rechts: Kennwerte Heizwärmebedarf, WP-Strombedarf, PV-Ertrag und HGT für die vier Heizperioden.....	19
Abbildung 6: Vergleich des Heizwärmebedarf pro Heizgradtag (HGT) mit der Belegung	20
Abbildung 7: Verbrauch der einzelnen Verbraucherguppen	21
Abbildung 8: Energieverbrauch und KPI über die vier Heizperioden	22
Abbildung 9: Aus dem Speicher entnommene Wärmemenge für verschiedene Temperaturdifferenzen	24
Abbildung 10: Differenz zwischen der Austrittstemperatur am Speicher und der Temperatur am obersten Fühler in Abhängigkeit der Fühlertemperatur am Ende der Entladeperiode	24
Abbildung 11: Speicherentladung ohne PCM in HP1	26
Abbildung 12: Speicherentladung mit PCM in HP3.....	26
Abbildung 13: Speicherbeladung mit PCM in HP3 am 26.5.2024	27
Abbildung 14: Tagesgang eines kalten Tages mit wenig Sonneneinstrahlung. Oben: Heizperiode 1, unten: Heizperiode 2	28
Abbildung 15: Gemessene Vorlauftemperaturen (Tagesmittelwerte)	29
Abbildung 16: Monatsarbeitszahl Heizen (Systemgrenze JAZ) und der Aussentemperatur mit Unterscheidung Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2)	30
Abbildung 17: Erzeugter Heizwärmeanteil, unterschieden nach Tag und Nacht (links: HP1, rechts: HP2)	30
Abbildung 19: Abschätzung des Effizienzpotentials für die Tag-Nacht-Verlagerung. Links: Arbeitszahl, rechts: Strombedarf Heizen.....	31
Abbildung 19: Übertemperatur im Speicher im Vergleich zur entladenen Wärmemenge (Tageswerte) mit Angabe des Anteils der Werte, welche unterhalb von 8 K (graue Linie) liegen.	32
Abbildung 20: Vergleich der relativ gespeicherten Energie von Wasser mit PCM bei verschiedenen Volumina über Temperaturerhöhung. Die Volumina beziehen sich hier auf PCM, bzw. Wasservolumen.....	33
Abbildung 21: Stromkosten bei unterschiedlichen Tarifen (Bezug / Einspeisung) für das gesamte Gebäude (links) und nur für den Netzbezug im Heizbetrieb (rechts).....	34
Abbildung 22: Vergleich der Erstarrungskurven der zwei PCM. HP3 wird mit einer weiterentwickelten Mischung betrieben	35
Abbildung 23: Eindrücke aus der Serienproduktionsanlage für Cowa Booster Caps, welche im Juli 2023 final in Betrieb genommen werden konnte.....	35
Abbildung 24: Links neue, angepasste Kapselgeometrie, rechts alte Kapselgeometrie.	36
Abbildung 25: Temperaturverläufe im 10-Liter-Zyklersetup (Vorgänger des 20-L-Setup) mit der neuen PCM-Mischung	37



Abbildung 26: Ausschnitt aus zwei Zyklen Experimenten mit sensiblem Pufferspeicher (oben) und Kapsel befülltem, latentem Pufferspeicher (unten). Die beiden Temperaturen zeigen die Werte ganz oben und unten im Speicher, und auf der rechten Y-Achse die thermische Leistung über den Pufferspeicher.	38
Abbildung 27: Impressionen des Pufferspeichers und der Befüllung des Puffers mit Cowa BOOSTER CAPSULES.	39
Abbildung 28: Links Istzustand, rechts Umrüstung auf Compact Cells.	40
Abbildung 29: Hydraulikschema der drei Compact Cells 48 als Puffer mit zwei Compact Cells 48 als TWW-Speicher (WPSM 1.6)	42
Abbildung 30: Zwei Installationsbeispiele von Pilotanlagen, umgesetzt in Q3 2024. Warmwasser- und Pufferspeicher (links), sowie drei Pufferspeicher (rechts).....	42
Abbildung 30: Übersicht über alle Messgeräte	48
Abbildung 31: Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtverbrauch	49
Abbildung 32: Situation am 26. Januar mit verstärktem Heizstab-Einsatz	51
Abbildung 33: Situation am 21. November 2021 mit übernässigen Heizstabeinsatz	52
Abbildung 34: Monatsarbeitszahl Heizen (Systemgrenze JAZ) und der Aussentemperatur mit Unterscheidung Tag und Nacht.....	53
Abbildung 35: Erzeugte Heizwärme, unterschieden nach Tag und Nacht	54
Abbildung 36: Monatliche mittlere Speicher- und Heizungsvorlauftemperaturen unterschieden nach Tag und Nacht.....	54
Abbildung 37: Monatsdaten der Produktion der Solaranlage und des Verbrauchs des Gebäudes (Referenzdaten).....	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erfolgsfaktoren und die dafür benötigten Kenngrössen	17
Tabelle 2: Priorität im Eigenverbrauch	21
Tabelle 3: Arbeitszahl über die vier Heizperioden.....	23
Tabelle 4: Ungefähre Grundzusammensetzung des PCM45, aufgrund einer hängigen Patentanmeldung wurde hier auf Detailangaben verzichtet.	34
Tabelle 5: Technische Daten des neuen Cowa-Speichers "Compact Cell"	41
Tabelle 6: Kennzahlen des elektrischen Verbrauchs nach den einzelnen Verbrauchsgruppen	49
Tabelle 7: Systemeffizienz mit (WNG) und ohne (JAZ) Berücksichtigung des Elektroheizeinsatz (EH)	50
Tabelle 8: Zusammenfassung der energetischen Kenngrössen am 26. Januar 2022	51
Tabelle 9: Zusammenfassung der energetischen Kenngrössen am 21. November 2021	52



Anhang

Anhang A: Erfasste Messdaten

Daten- erfassung	Messgerät	Typ	Messgrösse	Benennung Gerät
Raspberry-Pi	Stromzähler Ausseneinheit	Saia ALE3 Drehstromzähler 2-Tarif MID	kum. Energie Heizen	EM1
			kum. Energie BWW	
			Akt. Leistung	
			Tarif (H(0)/BWW(4))	
	Stromzähler Inneneinheit	Saia ALD1 Wechselstromzähler, MID	kum. Energie	EM2
			akt. Leistung	
	Wärmezähler Speicherladung	Zesius C5 IUF Ultraschall- Kompaktwärmezähler qp 2.5, MID Klasse 2	kum. Energie	HM1
			T Vorlauf	
			T Rücklauf	
			Volumenstrom	
	Wärmezähler BWW-Ladung	Zesius C5 IUF Ultraschall- Kompaktwärmezähler qp 2.5, MID Klasse 2	Leistung	HM2
			kum. Energie	
			T Vorlauf	
			T Rücklauf	
	Wärmezähler Heizen	Zesius C5 IUF Ultraschall- Kompaktwärmezähler qp 2.5, MID Klasse 2	Volumenstrom	HM3
			Leistung	
			kum. Energie	
			T Vorlauf	
Fronius Cloud	Temperaturfühler Speicher	PT1000 Klasse AA	T Rücklauf	T1 - T5
			Volumenstrom	
			Leistung	
			T1 oben	
	Temperaturfühler Aussen	PT1000 Klasse AA	T2 zweitoberst	T1 - T5
			T3 Mitte	
			T4 zweitunters	
			T5 unten	
	Digitaler Eingang		Aussentemperatur	T_AMB
			Vorlauftemperatur	
	Digitaler Eingang		Umschaltung Heizstab (BWW- Speicher (1) oder H-Speicher (0))	T_VL
			SG Ready	
Fronius Cloud	Wechselrichter	Fronius Symo mit Fronius Smart Meter	5min kum. Energie direkt Verbraucht	T_BWW
			5min kum. Energie aus Batterie bezogen	
			5min kum. Energie in Batterie gespeichert	
			5min kum. Energie ins Netz eingespeist	
			5min kum. Energie vom Netz bezogen	
			5min kum. Energie PV Produktion	
			5min kum. Energie Verbrauch	
			5min kum. Energie Ohmpilot	
			Temperatur BWW-Speicher	
			Ladezustand Batterie	

Abbildung 31: Übersicht über alle Messgeräte



Anhang B: Detailliertere Auswertungen der 1. Heizperiode

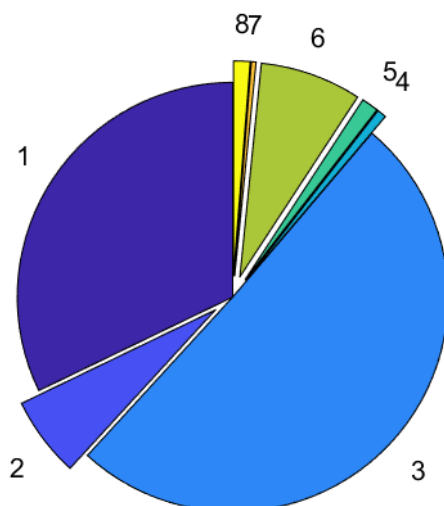
Folgende Auswertung wurde im 2. Zwischenbericht publiziert. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus sind in den Bericht eingeflossen.

Referenzmessung

In der Heizsaison 21/22 wurden Referenzmessungen ohne Cowa-Caps durchgeführt. Die Messungen begannen am 18. November 2021 und wurden bis Ende Mai 2022 ausgewertet. Vom 5. Februar bis 12. März fehlen die Daten aus dem Wechselrichter. Die Messdaten ab dem 18.2. konnten jedoch wieder rekonstruiert werden (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**). Die Hauseigentümer waren ab Februar bis Ende Juli abwesend, jedoch wurde die Einliegerwohnung fast durchgehend als Ferienwohnung genutzt.

Stromverbrauch und Key Performance Indicators

In der Abbildung 32 ist der Verbrauch auf die einzelnen Gruppen aufgeschlüsselt. Darin wird unterschieden zwischen forcierter und normaler Ladung. Als forcierte Ladung wird gewertet, wenn der Wechselrichter das Freigabesignal an die Wärmepumpe über den SG-Ready Eingang gibt, unabhängig davon, ob damit der Speicher überladen wird (Temperatur über Sollwert) oder nicht.



	Verbrauch kWh	Anteil %
1 Haushalt	2645	32.2
2 Warmwasser	496	6
3 Heizen	4161	50.6
4 Batt. Speicherverlust	57	0.7
5 Warmwasser forciert	105	1.3
6 Heizen forciert	626	7.6
7 Warmwasser Heizstab	29	0.4
8 Heizen Heizstab	102	1.2
Total	82221	100.0

Abbildung 32: Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtverbrauch

In der ausgewerteten Messperiode vom 18. November 2021 bis 31. Mai 2022 konnten die Kennzahlen in Tabelle 3 ermittelt werden.

Tabelle 6: Kennzahlen des elektrischen Verbrauchs nach den einzelnen Verbrauchsgruppen

	Totalverbrauch kWh	Eigenverbrauch kWh	Netzbezug kWh	Autarkiegrad %	EV-Anteil %
Haushalt	2645	378	2267	14.3%	5.7%
Warmwasser	630	244	387	38.7%	3.7%
Heizen	4888	1194	3695	24.4%	17.9%
Batterieverlust inkl. Ladezustandsänderung	57	57	0	100.0%	0.9%
Total	8220	1873	6349	22.8%	28.1%



Auf ein Jahr hochgerechnet ergibt sich für das Warmwasser ein Elektrizitätsverbrauch von 5.4 kWh/m² bzw. eine Wärmeproduktion von 15.6 kWh/(m²a) (inkl. Verluste). Aus der SIA 2024:2015 [4] ergibt sich für das Einfamilienhaus ein Standardwert von 13.5 kWh/(m²a) ohne Verluste.

Für die Einordnung des Heizwärmeverbrauchs wurden die Heizgradtage (HGT) in der Messperiode berücksichtigt. Es wurden die Heizgradtage der Station Disentis verwendet, da diese auf gleicher Höhe über Meer liegt. Damit ergibt sich ein mittlerer Heizwärmebedarf von 3.5 kWh/HGT. Auf das langjährige HGT-Mittel (2011-2020) und die Gebäudefläche umgerechnet ergibt sich damit ein spezifischer Heizwärmeverbrauch von 71 kWh/(m²a).

Das Verhältnis von Warmwasserverbrauch zu Heizwärmeverbrauch liegt somit bei ca. 20% zu 80%.

Tabelle 7: Systemeffizienz mit (WNG) und ohne (JAZ) Berücksichtigung des Elektroheizeinsatz (EH)

	JAZ ohne EH	WNG mit EH	SNG ohne EH	SNG mit EH
Heizen	2.62	2.58	2.36	2.33
Warmwasser	2.93	2.84	n/a	n/a
Total	2.29	2.61	n/a	n/a

Da die Messungen erst Mitte November begannen, ist der Herbst nicht vollständig abgebildet. Da dann tendenziell wärmere Temperaturen herrschen, liegt die in obiger Tabelle berechnete Systemeffizienz eher etwas zu tief.

Elektroheizeinsatz

Nachfolgend werden zwei Situationen, in welchen der Elektroheizeinsatz im Heizungsspeicher aktiv war, im Detail analysiert. Die in den Diagrammen dargestellten Leistungen wurden aus den Energiewerten über 5 min ermittelt, kurzfristige Leistungspeaks werden damit nicht abgebildet oder stark abgeschwächt.

Tagesgang 26. Januar 2022

Die Abbildung 33 zeigt einen Tag im Januar 2022.

- Von 6 bis 8 Uhr wird der Heizungsspeicher mit der Wärmepumpe geladen, da er zu kalt ist.
- Ab 8:30 Uhr gibt es solaren Überschuss, welcher in der Batterie gespeichert wird.
- Um 11 Uhr ist die Batterie vollgeladen. Um den Überschuss zu verbrauchen, wird gleichzeitig der Heizstab im TWW-Speicher und die Wärmepumpe über das SG-Signal («forciert») aktiviert. Der Heizstab läuft gleichzeitig mit der Wärmepumpe. Mit zunehmender Temperatur im Speicher erhöht sich der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpe wegen des höheren Hubs. Die Leistung des Heizstabs wird reduziert, da dieser dem restlichen Solarüberschuss nachgeführt wird.
- Kurz vor 12 Uhr ist der TWW-Speicher durchgeladen. Die Wärmepumpe und der Heizstab schalten auf den Heizungsspeicher um und laden diesen gleichzeitig. Dabei steigt der Leistungsbedarf der Wärmepumpe kontinuierlich, bis mehr Leistung benötigt wird als von der PV-Anlage geliefert, obwohl der Heizstab schon ausgeschaltet ist (13:50 Uhr)
- Das SG-Signal wird daher wieder ausgeschaltet, die Wärmepumpe schaltet aus. Dadurch wird wieder PV-Strom ins Netz eingespeist. Das SG-Signal und der Heizstab werden wieder aktiviert. Die Wärmepumpe macht noch eine kurze Pause wegen geräteintern konfigurierten Mindeststillstandszeiten. Danach lädt sie den Speicher weiter, bis sie um 15 Uhr mehr Leistung benötigt als von der PV-Anlage geliefert. Die Wärmepumpe stellt wieder aus, es ist aber unklar, ob wegen dem fehlenden SG-Ready-Signal oder wegen Erreichen der maximal eingestellten Speichertemperatur.



- Das SG-Ready Signal wird wieder eingeschaltet, diesmal läuft jedoch nur der Heizstab, vermutlich, weil die obere Speichersolltemperatur überschritten wurde.
- Das SG-Ready-Signal bleibt bis um 16 Uhr bestehen, obwohl es kaum solaren Überschuss gibt, der Grund ist unklar. Es ist eine Mindestzeit von 30 min konfiguriert, welche jedoch um 15:30 Uhr vorbei wäre.
- Um 17 Uhr sinkt die Speichertemperatur stark ab und erreicht um 17:30 Uhr den unteren Einschaltwert. Die Wärmepumpe startet, um den Speicher zu laden.

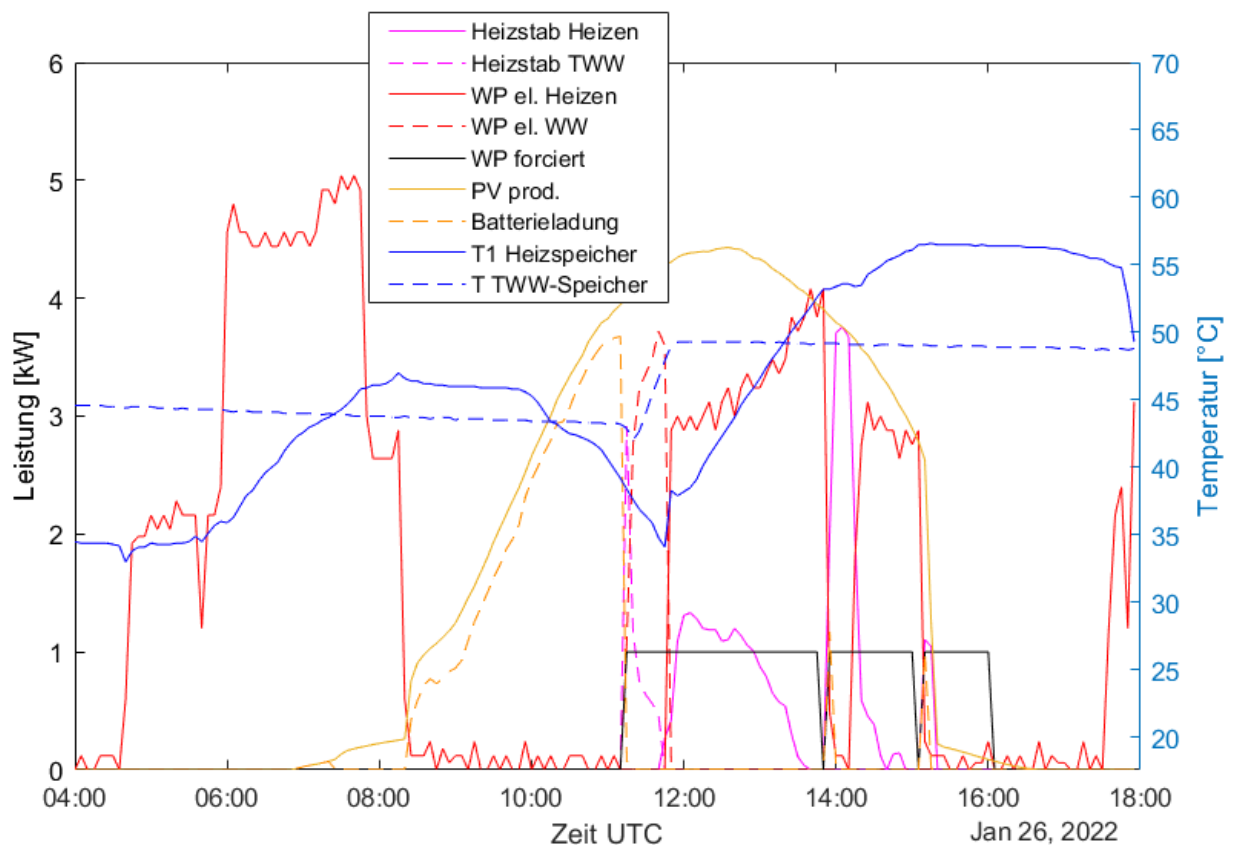


Abbildung 33: Situation am 26. Januar mit verstärktem Heizstab-Einsatz

Im dargestellten Zeitraum über 10 h wurden folgende Werte gemessen

Tabelle 8: Zusammenfassung der energetischen Kenngrößen am 26. Januar 2022

	Heizen	Warmwasser
Elektrische Energie WP	23.4 kWh	1.77 kWh
Thermische Energie WP (Messauflösung 1 kWh)	61 kWh (AZ: 2.6)	4 (AZ: 2.2)
Elektrische Energie Heizstab	3.2 kWh	0.54 kWh
Heizwärmeverbrauch	52 kWh	n/a
Ertrag PV	22.8 kWh	
Batterieladung	6.1 kWh	
Eigenverbrauch (ohne Batterie)	16.7 kWh	



Erkenntnis: Der Betrieb des Heizstabs und der Wärmepumpe überlagern sich, womit die Effizienz der Wärmepumpe wegen durch den Heizstab erhöhter Temperaturen im Speicher vermindert wird. Beim Übergang zwischen forciertem und nicht forciertem Betrieb gibt es keine Hysterese, was dazu führt, dass der Heizstab und die Wärmepumpe mehrmals unnötig ausgeschaltet werden (wobei dies für den Heizstab nicht problematisch ist).

Tagesgang 21. November 2021

Ein ähnliches Bild des gleichzeitigen Betriebs von Heizstab und Wärmepumpe zeigt sich am 21. November 2021 bei einer mittleren Aussentemperatur von $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Messstation Schiers von Meteo-schweiz)

Um 13 Uhr wird das Maximum der mit der Wärmepumpe erreichbaren Speichertemperatur erreicht, die weitere Überhöhung bis $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann nur noch mit dem Heizstab realisiert werden.

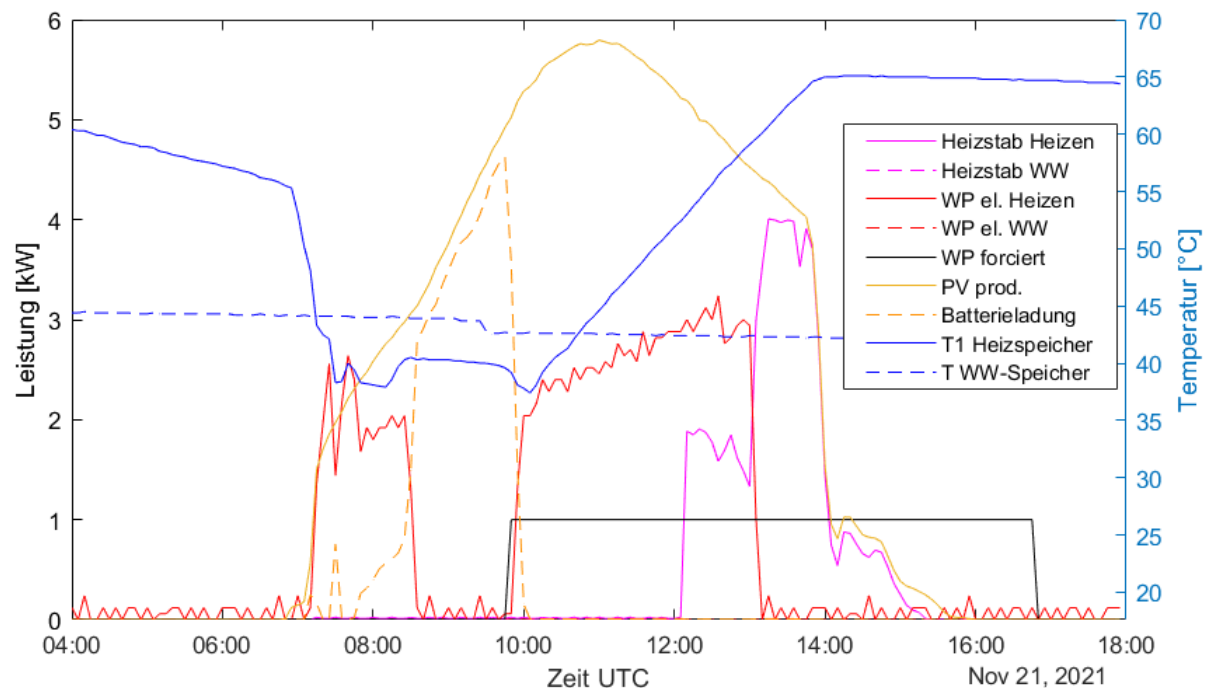


Abbildung 34: Situation am 21. November 2021 mit übermäßigem Heizstabeinsatz

Tabelle 9: Zusammenfassung der energetischen Kenngrößen am 21. November 2021

	Heizen	Warmwasser
Elektrische Energie WP	11.7 kWh	0 kWh
Thermische Energie WP (Messauflösung 1 kWh)	34 kWh (AZ 2.9)	0 kWh
Elektrische Energie Heizstab	5.8 kWh	0 kWh
Heizwärmeverbrauch	29 kWh	n/a
Ertrag PV	30.5 kWh	
Batterieladung	5.6 kWh	
Eigenverbrauch (ohne Batterie)	18.1 kWh	



Am 20. November ist das Bild sehr ähnlich. An diesen beiden Tagen zusammen hat der Heizstab im Heizungsspeicher 13.3 kWh umgesetzt, was 13% der in der gesamten Messperiode im Heizstab verbrauchten elektrischen Energie entspricht.

Am 13. März wurden die Thermostate der Heizstäbe auf das Minimum gestellt. Aus ungeklärten Gründen erfolgte trotzdem noch sporadisch ein minimaler Bezug durch die Heizstäbe, in der Summe 25 kWh über zweieinhalb Monate.

Für die Heizperiode (22/23) wurden die Heizstäbe daher deaktiviert.

Anlageneffizienz

Der Verdampfer (Ausseneinheit) 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 Nachtabenkung einprogrammiert, welche zwischen 20:30 Uhr und 6:30 Uhr angewendet wird. Dieser Zeitraum wird in der folgenden Auswertung auch als «Nacht» bezeichnet.

Die für das Monitoring erfasste Temperatur T_AMB wird beim Verdampfer gemessen, widerspiegelt also nicht die für die Heizkurve von der Wärmepumpe verwendete Temperatur, sondern liegt wegen der Südlage eher höher. Eine Messung der Aussentemperatur an der Schattenseite ist für die nächste Heizperiode vorgesehen.

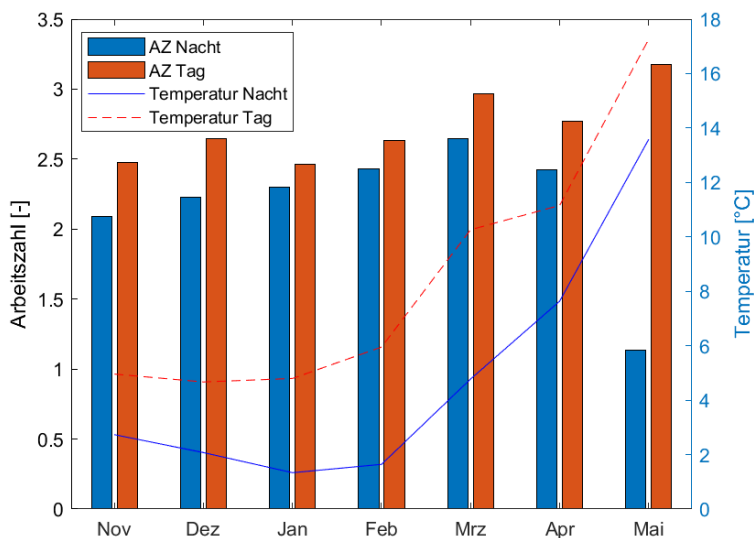


Abbildung 35: Monatsarbeitszahl Heizen (Systemgrenze JAZ) und der Aussentemperatur mit Unterscheidung Tag und Nacht

Die Abbildung 35 zeigt das Monatsarbeitszahlen der Wärmepumpe im Heizbetrieb und die Aussentemperatur mit Unterscheidung zwischen Tag und Nacht.

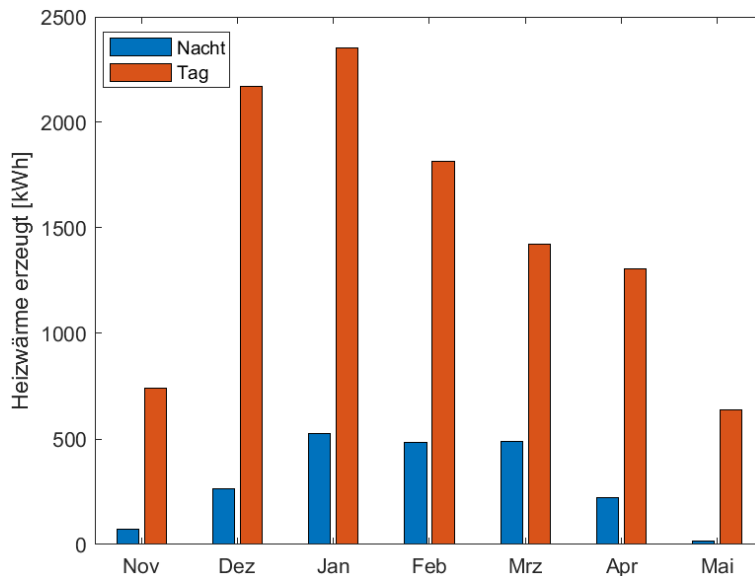


Abbildung 36: Erzeugte Heizwärme, unterschieden nach Tag und Nacht

Die Absenkung der Heizkurve führt dazu, dass in der Nacht, wenn die Arbeitszahl etwas tiefer ist, deutlich weniger geheizt wird, wie in Abbildung 36 dargestellt ist. In den Monaten April und Mai liegt die Arbeitszahl in der Nacht jedoch leicht höher bzw. wird kaum mehr eine Steigerung gegenüber dem März erreicht. Der Grund ist in der hohen Speichertemperatur Abbildung 37 ersichtlich, welche aus der Eigenverbrauchsoptimierung durch Speicherüberladung tagsüber resultiert.

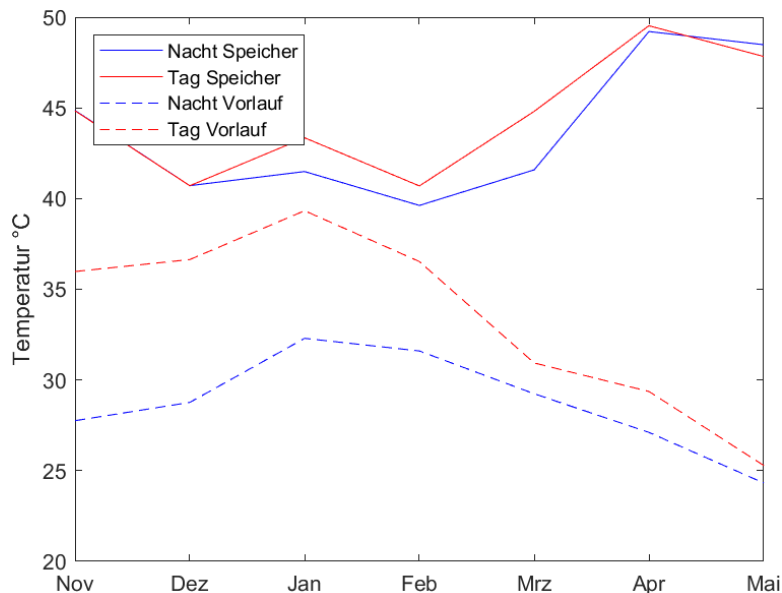


Abbildung 37: Monatliche mittlere Speicher- und Heizungsvorlauftemperaturen unterschieden nach Tag und Nacht

Batterie

In der Messperiode wurden insgesamt 639 kWh Solarstrom in der Batterie gespeichert und 582 kWh aus der Batterie bezogen. Der Unterschied im Ladezustand zwischen dem ersten und dem letzten Messwert wurde zu 60% bzw. 4.5 kWh ermittelt. Damit ergibt sich eine Differenz zwischen eingespeicherter und entladener Energiemenge von 52.5 kWh, die als Speicherverlust der Batterie gewertet.



PV-Anlage

Die Abbildung 38 zeigt die aus dem Wechselrichter ausgelesenen Energiemengen monatlich aufsummiert. Da die Messwerte erst ab dem 18. November ausgewertet wurden, sind die Werte im November tiefer. Von Dezember bis Ende Februar liegt oft Schnee auf der PV-Anlage.

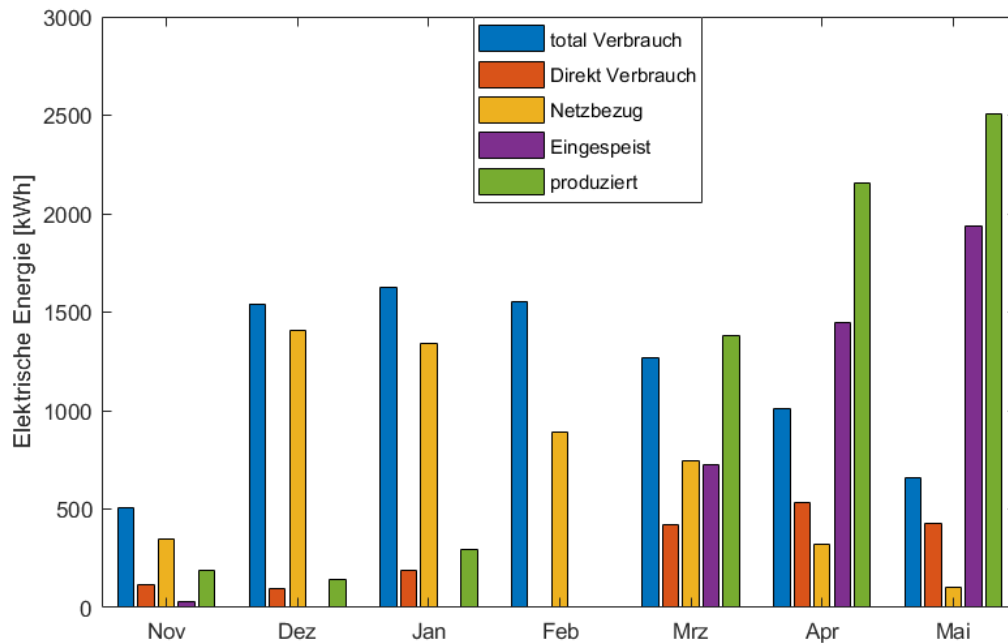


Abbildung 38: Monatsdaten der Produktion der Solaranlage und des Verbrauchs des Gebäudes (Referenzdaten)

Die in der ersten Heizperiode gesammelten Daten dienen als Referenz zum Nachweis der Zielerreichung. Jedoch müssen den unterschiedlichen Bedingungen in den Messperioden Rechnung getragen werden. Dies sind hauptsächlich

- Heizwärmebedarf, abhängig von der Belegung, Aussentemperatur (milder/harter Winter) und Solareinstrahlung (solare Gewinne)
- Nutzbare Temperaturüberhöhung, abhängig von der Vorlauftemperatur als Funktion der Aussentemperatur.
- Effizienz der Wärmepumpe, abhängig von der Aussentemperatur
- PV-Produktion, abhängig von der Solareinstrahlung und der Schneebedeckung auf dem Dach
- Verfügbarem eigenem Strom für die Heizung nach Abzug des Haushaltsstroms (Priorität 1) und dem Strom für die Warmwasseraufbereitung (Priorität 2)

Im Laufe des Projekts werden vergleichbare Tage (Meteorologische Bedingungen, Heizwärmebedarf) in den verschiedenen Messperioden gesucht, um auf dieser Basis den direkten Einfluss des PCM auf die Speicherbewirtschaftung zu vergleichen.

Gemäss den Projektzielen ergeben sich folgende Referenzdaten für die Referenzperiode:

- a. Eigenverbrauch des Gebäudes: 1873 kWh (siehe Tabelle 6). Ziel: Erhöhung um 10%
- b. Heizautarkie: 24.4% (siehe Tabelle 6). Ziel: Erhöhung um 50%
- c. Netzbezug des Gebäudes: 6349 kWh (siehe Tabelle 6). Ziel: Verringerung um 10%
- d. JAZ_H (ohne Elektroheizeinsatz): 2.63 (siehe Tabelle 7). Ziel: Erhöhung um 2-4%



Aufgrund der längeren Abwesenheit der Eigentümer von Februar bis Mai 2022 sind die Verbrauchswerte (Haushaltsstrom, Warmwasserbedarf, Heizwärmebedarf) speziell niedrig. Für die künftige Bewertung werden daher die Änderungen im Lastprofil und deren Einfluss auf die Zielgrössen untersucht. Es werden je nach Notwendigkeit verschiedene Ansätze zur Korrektur der Vergleichsparameter geprüft. Genauere Aussagen können nach der Auswertung der Randbedingungen und der Vergleichswerte der zweiten Heizperiode gemacht werden.