



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 14. Dezember 2020

Maximierung der Photovoltaik-Eigenutzung mittels Eisspeicher der Supermarkt Verkaufsstelle Coop Etagnières



Quelle: Coop 2020



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Datum: 14.12.2020

Ort: Basel

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger:

Coop Genossenschaft
Thiersteinerallee 12
4002 Basel
www.coop.ch

Frigo-Consulting AG
Feldstrasse 30
3073 Gümligen, Bern
www.frigoconsulting.ch

Unterstützende Arbeiten:

ZHAW School of Engineering
Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
Technikumstrasse 9
8400 Winterthur
www.zhaw.ch

Autoren:

Aikaterini Boulamanti, David Guthörl, Christine Clapasson, Coop Genossenschaft,
aikaterini.boulamanti@coop.ch
Silvan Steiger, Dorian Zeindler, Frank Tillenkamp, ZHAW School of Engineering, Institut für
Energiesysteme und Fluid-Engineering, frank.tillenkamp@zhaw.ch
Erik Wiedenmann, Jonas Schönenberger, Frigo-Consulting, e.wiedenmann@frigoconsulting.ch

BFE-Ansprechperson: Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/501712-01

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



Zusammenfassung

Im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts wurde ein Eisspeichersystem zur Maximierung der Eigenstromnutzung sowie der Steigerung der Kühleffizienz im Coop Supermarkt Etagnières erstellt. Coop war Initiator und Projektleiter, wobei die Planung sowie Inbetriebnahme der Anlage durch Frigo-Consulting erfolgte, und die ZHAW als wissenschaftlicher Partner die Auswertung sowie Schlussfolgerung der Messdaten durchführte.

Ein Eisspeicher mit Speicherkapazität von 464 kWh_{th} wurde in einer energieeffizienten Coop Verkaufsstelle installiert, über die Kältemaschine mit der Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) gekoppelt und während einem Jahr untersucht. Der solarerzeugte Strom wurde, wenn möglich, für den Eigenbedarf verwendet und der Überschuss in thermische Energie umgewandelt und im Eisspeicher gespeichert. Somit konnte die Einspeisung von PV-Strom in das Stromnetz reduziert werden. Zu Zeiten ohne überschüssige elektrische Energie wurde der Eisspeicher entladen, so dass der Netzstromverbrauch der Kälteanlage verringert werden sollte. Der Eisspeicher wurde so dimensioniert, dass 60% des überschüssigen PV-Stroms gespeichert werden kann.

Die erste Inbetriebnahme des Eisspeichers wurde Anfang 2019 durchgeführt. In der ersten Phase wurde das System optimiert und ab November 2019 bis November 2020 ausgewertet. Zwei Auswertungsmethoden wurden festgelegt:

- Vergleich zwischen der Verkaufsstelle mit Eisspeicher und einer möglichst ähnlichen Filiale ohne Eisspeichersystem, um die Auswirkungen des Eisspeichers gegenüber konventionellen Anlagen zu untersuchen.
- Vergleich zwischen zwei Betriebsmodi, zur genaueren Untersuchung des Einflusses des Eisspeichers. Modus 2 bewirkt eine intensivere Eisspeichernutzung bei gleichen Außenbedingungen als Modus 1.

Es konnte gezeigt werden, dass ein Eisspeicher in eine direktverdampfende CO₂-Kälteanlage eingebunden werden kann. Dieser stellt bei korrekter Funktionsweise eine günstige und umweltfreundliche Alternative zum Batteriespeicher dar. Gemäss Auswertung wurde der Eisspeicher von April bis Oktober effektiv genutzt. Dieser wurde oft nur teilentladen, da die Kälteanlage weniger unterstützende Kühlenergie benötigt als angenommen.

Der Nutzen des Eisspeichers konnte im Projekt nicht bewiesen werden. Es besteht die Vermutung, dass die Kälteanlage effizienter betrieben wird als angenommen, was den Nutzen der Eisspeicherenergie drastisch senkt. Zudem zeigen exergetische Berechnungen zur Ladung und Entladung eine starke Energieentwertung, was schlussendlich zu tiefen elektrischen Einsparungen führt. Außerdem wirkt die überdimensionierte PV-Anlage dem Speicherkonzept entgegen. Deren enorme Stromproduktion senkt den Eigenverbrauchsanteil auf bis zu 50%, eine Erhöhung des Anteils durch den Eisspeicher konnte nicht festgestellt werden. Spalten der Entladung vor den Ladephassen lassen vermuten, dass der Eisspeicher den Stromverbrauch effektiv senkt, jedoch konnte ein tieferer Verbrauch der Kälteanlage nicht durchgängig auf die Eisspeicherentladung zurückgeführt werden. Entgegen des Eigenverbrauchsanteils wurde jedoch der absolute Eigenverbrauch gesteigert, was zu einer Entlastung des Stromnetzes führt. Bei kleineren PV-Anlagen wäre das "Peak-Shifting" stärker beeinflusst worden.

Zusammenfassend besteht die Vermutung, dass der Eisspeicher zur Speicherung von Solarstrom dienen kann, wie es die Theorie des vorgestellten Konzepts zeigt. Der vorgestellte Filialenvergleich und die beschränkte Beobachtbarkeit des Systems lassen keine abschliessenden Aussagen zu. Weitere Untersuchungen innerhalb der Filiale Etagnières mit modifizierten Betriebsparametern können zeigen, ob die hier gemachten Aussagen und Vermutungen stimmen oder unzutreffend sind.



Summary

In this pilot project, an ice storage system has been developed in order to maximise the consumption of own electricity, as well as to increase the cooling efficiency in a supermarket. Coop was the initiator and project manager, while Frigo-Consulting was responsible for the planning and commissioning of the system, and the ZHAW as scientific partner carried out the evaluation and conclusion of the measured data.

An ice storage tank with a storage capacity of 464 kWh_{th} was installed in an energy-efficient Coop sales outlet, was coupled to the photovoltaic (PV) system via the refrigeration machines and studied over a period of one year. Whenever possible, the solar electricity produced was consumed directly, but the excess electrical energy was converted into thermal energy and stored in the ice storage. This reduced the amount of PV electricity fed into the grid. At times when no surplus electrical energy was available, the ice storage was discharged, so that the grid electricity consumption of the refrigeration system should be reduced. The ice storage tank was dimensioned to store 60% of the excess PV electricity.

A first commissioning of the ice storage unit was carried out at the beginning of 2019. In the first phase the system was optimised and in the period November 2019 to November 2020 it was evaluated. Two evaluation methods were defined:

- Comparison between the supermarket with the ice storage system and a sales outlet, as similar as possible, without an ice storage system, in order to investigate the effects of the impact of the ice storage system compared to conventional systems.
- Comparison between two operating modes, in order to examine the influence of the ice storage system in more detail. Mode 2 causes a more intensive use of the ice storage under the same outdoor conditions as mode 1.

This project has shown that an ice storage unit can be integrated into a direct evaporative CO₂ refrigeration system. When functioning correctly, this represents a more economical and more environmentally friendly alternative than battery storage. From the evaluation it was established that the ice storage was used effectively from April to October. Nevertheless, it was often only partially discharged, as the refrigeration system required less supporting cooling energy than originally assumed.

The benefit of the ice storage could not be proven in this project. It was indicated that the refrigeration system is operated more efficiently than assumed, which drastically reduces the benefit of the energy from the ice storage. In addition, exergetic calculations of charging and discharging show a strong energy devaluation, which ultimately leads to low electrical savings. Furthermore, the oversized PV system counteracts the storage concept. Its enormous electricity production reduces the own consumption share to up to 50%; an increase in the share due to the ice storage could not be established. Peaks of the discharge before the charging phase suggest that the ice storage effectively reduces the electricity consumption, but lower consumption by the refrigeration systems could not be entirely attributed to the ice storage discharge. Contrary to the share of own consumption, however, the absolute own consumption was increased, which leads to a relief of the power grid. With smaller systems, the "peak shifting" would have been influenced more intensively.

In summary, there is a presumption that the ice storage can be used to store solar electricity, as shown by the theory of the concept presented. However, the above-mentioned comparison between two sales outlets and the limited observability of the system do not allow any conclusive statements. Further investigations within the Etagnières branch with modified operating parameters could show whether the statements made here are correct or incorrect.



Take-Home messages

- Das Eisspeichersystem kann in eine direktverdampfende CO₂-Kälteanlage eingebunden werden und bietet bei korrekter Funktionsweise eine günstige und umweltfreundliche Alternative zum Batteriespeicher.
- Im untersuchten Fall konnten keine signifikanten Stromeinsparungen der Kälteanlagen bestätigt werden.
- PV-Fassadenmodule haben sich bewährt, um die Solarstromproduktion über den Tag zu verlängern und somit Lastenspitzen zu vermindern.
- Es empfiehlt sich, weitere Analysen mit verschiedenen Szenarien innerhalb der Verkaufsstelle Etagnières durchzuführen, um eine gesamtheitliche Analyse zu ermöglichen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	4
Take-Home messages.....	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
Symbolverzeichnis	9
1 Einleitung	12
1.1 Motivation des Projekts	12
1.2 Projektziele	13
1.3 Literaturstudie und Marktumfeld	14
1.3.1 Marktumfeld im Netz (Literaturstudie)	14
2 Anlagenbeschrieb	16
2.1 Coop-Verkaufsstelle Etagnières (ETAN).....	16
2.1.1 Photovoltaik	17
2.1.2 Kälteanlage.....	18
2.2 Coop-Verkaufsstelle Savièse (SAVI).....	19
3 Überprüfung der Maximierung der Photovoltaik-Eigennutzung mittels Eisspeicher	20
3.1 Projektierung.....	20
3.1.1 Konzeptentwicklung.....	20
3.1.2 Systemauslegung	21
3.1.3 Realisation, Inbetriebnahme und Unterhalt	24
3.1.4 Betriebsoptimierung.....	25
3.2 Technische, energetische und wirtschaftliche Analyse von Batteriespeichern im Vergleich zum Eisspeicher (Ökobilanz).....	25
3.3 Messdatenerfassung	29
3.4 Messdatenauswertung	31
3.4.1 Zielgrössen	31
3.4.2 Rapportierung	33
3.4.3 Erstes Betriebsjahr/Verbesserung der Messdatenerfassung	33
3.4.4 Zweites Betriebsjahr	34
3.4.5 Auswerteverfahren	35
4 Ergebnisse und Diskussion	39
4.1 Eisspeichersystem.....	39
4.2 Photovoltaik-Anlage.....	48
5 Schlussfolgerungen und Fazit	50
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	51



6.1	Verfeinerung Messsystem	51
6.2	Zusätzliche Betriebsweisen	51
6.3	Weiterführende Untersuchungen in ETAN	51
6.4	Einsatz in anderen Ladenkonzepten	52
6.5	Batteriespeicher und direkte Nutzung überschüssiger PV-Energie	52
7	Kommunikation und Publikationen	54
8	Literaturverzeichnis	55
Anhang 1 – Berechnung der Messunsicherheit.....		57
Anhang 2 – Detail Mess- und Zielgrössen		58
Anhang 3 – Monatsrapport.....		61
Anhang 4 – Fahrplan Betriebsmodi.....		63
Anhang 5 – Verbrauchs- und Kennzahlen Filiale Etagnières (ETAN)		64
Anhang 6 – Verbrauchs- und Kennzahlen Filiale Savièse (SAVI)		65
Anhang 7 – Verbrauchs- und Kennzahlen der Vergleichsperioden.....		66



Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Begriff</i>
COP	Coefficient of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
ETAN	Coop-Filiale Etagnières
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventar
LIA	Lithium-Ionen-Akkumulatoren
LiNMC	Lithium Nickel Mangan Cobalt Oxid Batterie
LW-WP	Luft-Wasser Wärmepumpe
PUY	Wetterstation Pully
PV	Photovoltaik
SAVI	Coop-Filiale Savièse
SIO	Wetterstation Sion
UBP	Umweltbelastungspunkte
VST	Verkaufsstelle



Symbolverzeichnis

Symbol	Begriff	Einheit
EVA	Eigenverbrauchsanteil	[·]
E_{ex}	Exergie	[kWh]
\dot{E}_{ex}	Exergiestrom	[kW]
n	Anzahl	[·]
P_{el}	Elektrische Leistung	[kW]
p	Druck	[bar]
Q	Thermische Energie	[kWh]
\dot{Q}	Thermische Leistung	[kW]
SOC	State of Charge (Ladezustand)	[%]
ΔSOC	Ladezustandsdifferenz	[%]
T	Temperatur	[°C]
t	Zeit	[s]
W_{el}	Elektrische Energie	[kWh]
η	Wirkungsgrad	[·]

Index	Begriff
AP	Aussenbeleuchtung inkl. Parking
Aus	Austritt
BWW	Brauchwarmwasser
DGE	Druckgasenthitzer
Ein	Eintritt
el	elektrisch
Ent	Entladen, Entladung
ex	Exergie, exergetisch
ES	Eisspeicher
gk	Gaskühler
GWK	Gewerbekälte
HD	Hochdruck
HD-Stufe	Hochdruckstufe
Heiz	Heizung
Lad	Laden, Ladung
m	Mittel
M	Mitteldruck
ND	Niederdruck
ND-Stufe	Niederdruckstufe
Netz	Stromnetz, Netzbezug
Nutz	Nutzung
PK	Pluskühlung
PV	Photovoltaik
PWW	Pumpenwarmwasser
Prod	Produktion
Ref	Referenz
RL	Rücklauf



RS	Rückspeisung
SG	Sauggasdruck
SOC	State of charge
th	thermisch
TK	Tiefkühlung
U	Umgebung
V	Verbrauch
Verd ES	Eisspeicher-Verdampfer
VL	Vorlauf





1 Einleitung

1.1 Motivation des Projekts

Die Verkaufsstellen (VST) von Coop verbrauchen im Betrieb viel Energie. Eine durchschnittliche Filiale von Coop verbraucht im Jahr ca. 500 MWh Strom und 40 MWh Wärme (ohne Abwärmenutzung). Es liegt somit auf der Hand, dass Energieoptimierungen und -einsparungen für Coop ein wichtiges Thema sind.

Vorgängig zu diesem Projekt wurde eine Machbarkeitsstudie "Energieautarke Verkaufsstellen" erarbeitet. Dabei wurde festgestellt, dass energieautarke VST theoretisch technisch machbar sind, die Umsetzung aber aufgrund des notwendigen Volumens der Speicherlösung, der benötigten Baubewilligung als auch der massiven Mehrkosten unrealistisch ist. Coop wollte aber auf Basis dieser Studie gewisse Projektbestandteile weiterentwickeln.

Erneuerbare Energie kommt in der Regel mit der Begleiterscheinung, dass es Zeiten gibt, an denen mehr Energie als benötigt zur Verfügung steht und, dass es Zeiten gibt an denen weniger oder gar keine Energie zur Verfügung steht, jedoch grosser Bedarf vorhanden wäre.

Coop hat in Etagnières, VD eine neue VST als Musterhaus gebaut. Die Eröffnung der VST war am 31. Oktober 2018. Auf dem Dach und an der Fassade wurde eine grosszügig (über-)dimensionierte Photovoltaikanlage (PV-Anlage) zur Bewirtschaftung des Gebäudes mit Energie gebaut. Bei Neubauprojekten mit ähnlichen Voraussetzungen wie in Etagnières zeigt sich bei der Dimensionierung von PV-Anlagen immer wieder ein solches Bild: Wird die Dachfläche maximal belegt, so produziert die PV-Anlage mehr Strom und daher wird ein beachtlicher Teil des jährlich produzierten Stroms (ca. 25-35%) ins Stromnetz eingespeist. Da dieser Strom jedoch zu deutlich tieferen Einspeiseprämien vergütet wird, beeinflusst dies einerseits die Wirtschaftlichkeit der Anlage und andererseits wird das Stromnetz aufgrund von Leistungsschwankungen übermäßig stark belastet.

Eine Möglichkeit, die Leistungsspitzen der Photovoltaik-Anlage bereits vor Ort abzufangen, ist die Implementierung eines Energiespeichers in welchem die überschüssige Energie zwischengelagert wird, bis Bedarf vorhanden ist. In einer VST kann zur Energiespeicherung ein thermischer Speicher in Form eines Eisspeichers eingesetzt werden, da die gewerbliche Kälte mit ca. 60% des gesamten jährlichen Stromverbrauchs den grössten Verbraucher darstellt. Dabei wird die vorhandene Kälteanlage so ausgelegt, dass bei elektrischem Leistungsüberschuss der PV-Anlage neben der üblichen Kältelast auch ein Eisspeicher gekühlt wird. Wenn die Photovoltaik-Anlage nur wenig oder keine Energie liefert, wird der Eisspeicher genutzt, um die Kälteanlage zu entlasten, effizienter zu betreiben und somit den Leistungsbezug aus dem Netz zu reduzieren. Das Konzept des Eisspeichers ist in Abbildung 1 dargestellt.

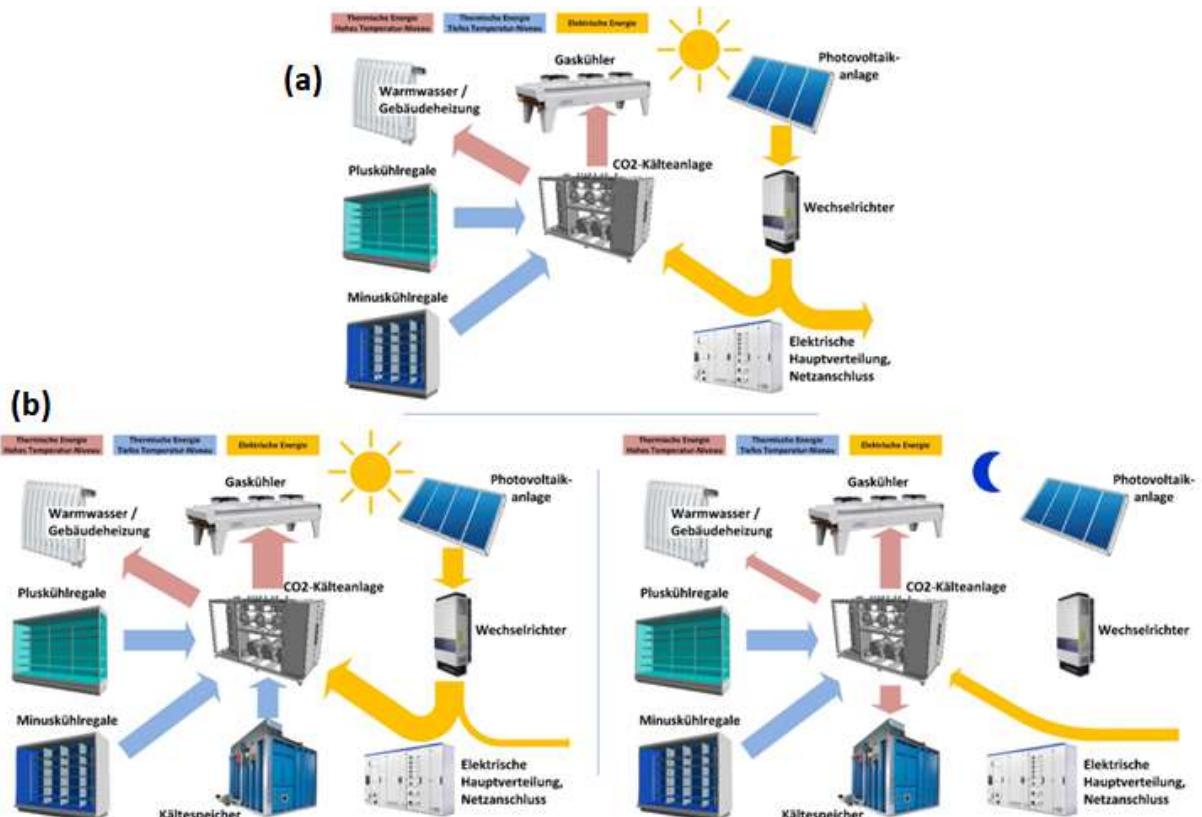


Abbildung 1: Das Zusammenspiel einer Kälteanlage und einer Photovoltaikanlage in einer VST, (a) ohne Eisspeicher und (b) mit Eisspeicher.

Bei einer erfolgreichen Umsetzung eines Eisspeichers kann Coop direkt von einer Mehrnutzung der erneuerbaren Energien, einer Reduktion des Energiebezugs aus dem Netz und indirekt durch ein nachhaltiges Image profitieren.

1.2 Projektziele

Das Projekt will eine Übersicht über die Einsetzbarkeit eines mit der Photovoltaik gekoppelten Eisspeichersystems zur Maximierung des Eigenstrombedarfs sowie der Steigerung der Kühlleffizienz in einem Supermarkt liefern. Bisherige Kälteanlagen mit Eisspeicher nutzen die gespeicherte Energie jeweils, um die Kühlstellen im Laden mittels Ethylen-Glykol-Kreis zu kühlen. Dieses Projekt soll zeigen, wie in einer transkritischen CO₂-Kälteanlage der Vorteil einer direkten Verdampfung in den Kühlstellen beibehalten werden kann, in dem der Speicher zur Optimierung des Betriebs anstelle der direkten Kühlung von Kühlgut genutzt wird.

Die Techniken waren bis heute aufgrund des Pilotcharakters noch nicht rentabel. Aufgrund der schnellen technischen Entwicklungen in den Bereichen Stromproduktion und Speichertechniken, sind die Massnahmen jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit zukünftig wirtschaftlich einsetzbar. Somit könnten diese bei anderen VST multipliziert werden.

Als Eisspeicher wurde ein Latentspeicher der Firma Fafco eingesetzt. Der evaluierte Eisspeicher wurde in einer energieeffizienten VST installiert und über ein Jahr untersucht. Der Speicher soll das ganze Jahr betrieben werden, da in der Coop-Verkaufsstelle durch die Kühlung der Produkte das ganze Jahr über Kälte benötigt wird. Der Strom der Photovoltaikanlage wird, wenn möglich, in der Filiale direkt



verbraucht. Zu Zeiten, in denen die PV-Anlage mehr Energie liefert als die VST an Eigenbedarf hat, soll mit einer transkritischen CO₂-Kälteanlage die überschüssige elektrische Energie in thermische Energie umgewandelt und gespeichert werden. Zu Zeiten, in denen keine überschüssige elektrische Energie von der PV-Anlage zur Verfügung steht, soll der Speicher genutzt werden, um das System in einem effizienteren Punkt zu betreiben und so weniger elektrische Energie aus dem Netz zu beziehen.

Die Charakterisierung des angewandten Eisspeichersystem umfasst:

- Anwendbarkeit auf einen Supermarkt
- Einbindung in die Energieerzeugung und direkt mit der CO₂ Kälteanlage
- Eignung als Ganzjahres- oder Kurzzeitspeicher
- Entlastung des Stromnetzes mittels Peak-Shifting und Peak-Shaving hinsichtlich Einspeiseleistung und Netzstromverbrauch
- Preiswerte und marktfähige Alternative zu elektrischen Energiespeichern
- Erhöhung des Solarstrom-Eigenverbrauchs einer Filiale
- Ermittlung von Betriebs- und Auslegungsparametern für zukünftige Systeme

Die technische Verfügbarkeit und Eignung des Eisspeichers wird durch den Vergleich mit einer VST mit ähnlichen Eigenschaften, aber ohne Eisspeicher, beurteilt. Bei einer erfolgreichen Umsetzung kann die gesamte Schweizer Kälte- und Energiebranche vom Know-How profitieren.

Ausserdem testet Coop bei der VST die max. Stromproduktion von PV-Anlagen, indem nebst dem Dach auch die Fassade mit PV-Modulen belegt wird. Somit wird Energiemanagement, nachhaltiger Betrieb und Smart-Grid innovativ kombiniert. Darüber hinaus wird dieses Projekt wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich Smart-Grid und Energiestrategie 2050 liefern.

1.3 Literaturstudie und Marktumfeld

1.3.1 Marktumfeld im Netz (Literaturstudie)

Die Energiebranche untersteht zurzeit einem grossen Wandel. Die unregelmässige Stromproduktion aus neuen erneuerbaren Energien wirkt sich negativ auf die heute bestehenden Stromnetze aus. Gleichzeitig ist der Ausbau der erneuerbaren Energien durch den Ausstieg aus der Kernkraft unabdingbar. Den Fachexperten ist klar, dass die Netzschwankungen, die dadurch entstehen, grösstmöglich durch den Einsatz von Speichermedien abgefangen werden können. Thermische Speicher werden enorm an Wichtigkeit zunehmen. Sei es, um Lastspitzen eines beliebigen Kältebedarfs abzufangen, Anlagen kleiner zu dimensionieren, Energie einzusparen oder überschüssige elektrische Energie zwischenzuspeichern. Und der Einzelhandel hat mit den Eisspeicher aufgrund des Einsatzes von gewerblicher Kälte eine kostengünstigere und genauso wirksame Möglichkeit Energie zwischenzuspeichern.

Er wird heute vor allem bei Wohnbauten als Unterstützung der Heizung [1], [2] und als Zusatznutzen der Kühlung eingesetzt [3], [4]. In diesen Fällen hat der Eisspeicher bereits ein grosses Potenzial gezeigt. Das Pilot- und Demonstrationsprojekt Solar-Eis-Heizung [1] hat gezeigt, dass die Nutzung des Eisspeichers stark saisonal geprägt ist, aber er dient auch dem Ausgleich kurzfristiger Differenzen zwischen solarem Energieangebot und der Wärmenachfrage im Gebäude. Im Rahmen des High-Ice Projektes [2] wurde mit Simulationen ein Heizungskonzept, das Solarkollektoren, eine Wärmepumpe und einen Eisspeicher kombiniert, untersucht. Es wurde ersichtlich, dass für kleine Systemgrössen, die



am attraktivsten aus wirtschaftlicher Sicht sind, das studierte Eisspeicherkonzept möglicherweise nicht das Konzept der Wahl ist. Andere Eisspeicherkonzepte können bessere Optionen sein. Das Planungszentrum Linth AG in Uznach ist ausgerüstet mit PV-Anlage auf dem Dach und Eisspeicher im Keller [3]. Mit der Kombination PV-Eisspeicher wird Behaglichkeit im Winter und Sommer erreicht. Das Konzept dieses Projektes erwies sich gut geeignet als Alternative an Standorten, wo weder Erdwärmesonden noch Grundwassernutzung möglich sind. Schliesslich ergab die Kosten-Nutzen-Analyse der Verwendung von Kältespeichersystemen für thermische Energie in Gebäuden in Malaysia, dass die jährlichen Kosten der Klimaanlage um bis zu 35% gesenkt werden können.

Die Studie von Ghoreishi-Madiseh et al. [5] ist die einzige, die die technisch-wirtschaftlichen Machbarkeiten eines Eisspeichers in grösseren Anwendungsfällen (z.B. im Bergbau) untersucht. Sie stellten fest, dass die Eisspeichertechnologie in Verbindung mit der Batteriespeichertechnologie für die Kühlung von Minen finanziell tragfähiger sein kann. Es wurde keine Studie gefunden, die die Anwendbarkeit einer Kombination von PV-Anlage mit Eisspeicher in einem Supermarkt vorführt. Darüber hinaus ist auch die Art und Weise der Einbindung eines Eisspeichers in einer Kälteanlage wie bei dem Konzept der VST Etagnières neu- und einzigartig.



2 Anlagenbeschrieb

Dieses Kapitel enthält die Beschreibung der beiden Verkaufsstellen, die für diese Studie verwendet wurden. Das Eisspeichersystem wird im Kapitel 3 analysiert.

2.1 Coop-Verkaufsstelle Etagnières (ETAN)

Im Oktober 2018 wurde in der Westschweiz (Etagnières, VD) ein neuer Supermarkt eröffnet. Der Supermarkt befindet sich auf einer Meereshöhe von 600 m bei einer jährlichen, mittleren Temperatur von +10.2 °C. Der Supermarkt verfügt über eine Verkaufsfläche von 870 m². Die neue VST in Etagnières, VD wurde, wie alle Neu- und Umbauten, nach dem Konzept der Energie/CO₂-Vision erstellt. Dies bedeutet:

- Das Gebäude wurde nach dem Schweizer Minergie-Standard erbaut, einer der höchsten Zertifizierungen weltweit im Bereich Energieeffizienz.
- Das Gebäude setzt durch die gute Wärmedämmung, eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (LW-WP) zum Heizen sowie einen Holzrahmen-Ständerbau ein Zeichen für eine energiesparende und ökologische Bauweise.
- Die Kühlung der Produkte wird durch eine modernste transkritische CO₂-Kälteanlage gewährleistet, die Abwärme zum Heizen nutzt.
- Die Beleuchtung besteht zu 100% aus LED.
- Der Strom wird zu 100% aus erneuerbaren Quellen bezogen.



Abbildung 2: Die Photovoltaik-Anlage in Etagnières



2.1.1 Photovoltaik

Auf dem Dach und an der Fassade der VST Etagnières sind Photovoltaikelemente mit einer Peak-Leistung von 190 kWp installiert. Auf dem Dach befinden sich 362 Solarmodule mit einer Ausrichtung von 10° Süd und an der Fassade 290 Fassadenmodule mit einer Ausrichtung von 90° nach Süd-Osten (Abbildung 2).

Mehr Informationen über die PV-Anlage sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Eigenschaften der PV-Anlage in ETAN

		Fassade	Dach	Total
Installierte Leistung	kWp	80.4	110.4	190.8
Modulfläche	m ²	504	602	1'106
Produktion (theoretisch)	kWh/a	46'200	126'000	172'200

Die PV-Anlage ist so dimensioniert, dass sie die maximal verfügbare Fläche bedeckt. Bei der Projektierung wurde angenommen, dass die PV-Anlage 172'200 kWh elektrische Energie liefern wird, wovon 114'500 kWh direkt im Gebäude genutzt würden. Bei einem Bedarf von 250'000 kWh im Jahr, würden somit 45 % des elektrischen Energiebedarfs im Gebäude direkt durch Photovoltaik gedeckt. Dies entspricht 66 % der jährlichen Leistung aus der PV-Anlage. Die restlichen 57'500 kWh würden ins Stromnetz eingespeist. Der Anteil, der nicht durch die PV-Anlage gedeckt werden könnte, beispielsweise in der Nacht, würde aus dem Stromnetz bezogen (Abbildung 3).

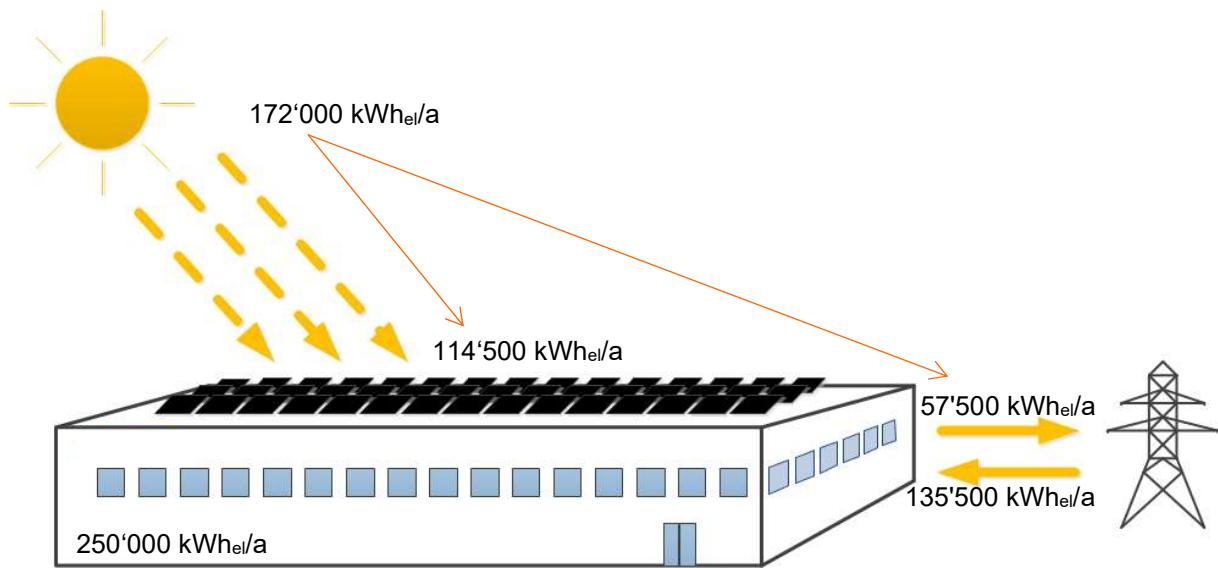


Abbildung 3: Projektierung – Elektrische Energiefüsse der Supermarkt-Verkaufsstelle, ohne Bewirtschaftung eines Speichers. Alle Angaben beziehen sich auf elektrische Energie

Die Verbrauchs- und Kennzahlen der Etagnières Verkaufsstelle für die Periode November 2019 bis Oktober 2020 befinden sich in Anhang 5.



2.1.2 Kälteanlage

Es sind 52 m Pluskühlmöbel¹ und 17 m Minuskühlmöbel² in der VST Etagnières installiert. Von den Kühlmöbeln der Pluskühlung sind 16.25 m mit Glastüren ausgestattet. Weiter sind zwei Pluskühlräume mit einem Gesamtvolumen von 52 m³ und ein Minuskühlraum mit einem Gesamtvolumen von 40 m³ vorhanden. Die Abwärme der Kälteanlage wird zur Warmwasseraufbereitung und Raumbeheizung verwendet.

Technisch basieren die Kälteanlagen auf einem herkömmlichen CO₂-Booster Konzept, wie in Abbildung 4 dargestellt. Das verdichtete CO₂ nach den Plus-Verdichtern wird zu den Wärmeübertragern für Brauchwarmwasser und Pumpenwarmwasser geführt, um anschliessend die Restwärme im Gaskühler an die Umgebung abzugeben. Das CO₂ wird mittels Hochdruckventil von Hochdruck auf Mitteldruck in den Mitteldrucksammler entspannt. Im Mitteldrucksammler wird das zweiphasige CO₂ getrennt und das gasförmige CO₂ über das Mitteldruckventil den Plusverdichtern zugeführt. Das flüssige CO₂ im Mitteldrucksammler wird den Plus- und Minus-Kühlstellen zugeführt. Das verdampfte CO₂ wird nach den Minus-Kühlstellen durch die Minus-Verdichter auf Saugdruckniveau der Pluskühlung verdichtet. Das CO₂ von den Plus-Kühlstellen wird zusammen mit dem CO₂ von den Minus-Verdichtern und dem Mitteldruckventil durch die Plus-Verdichter auf Hochdruck verdichtet.

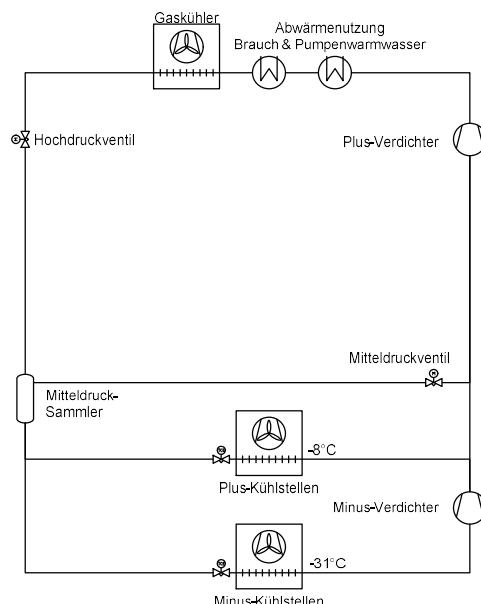


Abbildung 4: Vereinfachtes Prinzipschema CO₂ Booster Kälteanlage

Die Kälteanlage in Etagnières hat ein Laufmeter von 72 lfm und benötigt insgesamt 55 kW_{th} Pluskühlleistung und 16 kW_{th} Minuskühlleistung.

¹ Sämtliche Verdampfer zu Lebensmittelkühlung im Supermarkt über 0°C

² Sämtliche Verdampfer zu Lebensmittelkühlung im Supermarkt unter 0°C



2.2 Coop-Verkaufsstelle Savièse (SAVI)

Idealerweise würden Aussagen zur Wirksamkeit des Eisspeichers im Vergleich mit der Filiale Etagnières ohne Eisspeicher erarbeitet. Da das unmöglich ist, wurde der Supermarkt in Savièse, VS als Vergleichsfiliale gewählt. Diese VST weist identische Kühlmöbel-Laufmeter, eine ähnliche Verkaufsfläche, sowie ein sehr ähnliches Waren sortiment auf. Zudem verwendet Savièse ebenfalls eine CO₂-Booster Kälteanlage und ist mit einer PV-Anlage ausgerüstet. Die VST Savièse befindet sich auf einer Meereshöhe von 800 m bei einer jährlichen, mittleren Temperatur von +8.5 °C. Sie wurde im Juni 2017 eröffnet und nach dem Konzept der Energie/CO₂-Vision erstellt und wird mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe geheizt. Der Supermarkt verfügt über eine Verkaufsfläche von 860 m².

Auf dem Dach der VST Savièse sind 327 Photovoltaikelemente mit einer Peak-Leistung von 90 kWp und einer Ausrichtung 10° Süd installiert. Bei der Planung wurde es angenommen, dass die PV-Anlage liefert jährlich 113'000 kWh elektrische Energie, wovon 83% direkt im Gebäude genutzt und 17% in das Netz eingespeist werden. Die Eigenschaften beider Supermärkte sind in Tabelle 2 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 2: Eigenschaften der Etagnières und Savièse Verkaufsstelle

	Einheit	Etagnières	Savièse
Status		Neubau	Neubau
Verkaufsstelle Fläche	m ²	870	862
Energieträger		LW-WP (COP 2.3)	LW-WP (COP 2.3)
Laufmeter (Kühlung)	lfm	72	72
Photovoltaik Installierte Leistung	kWp	190.8	90
Photovoltaik Modulfläche	m ²	1'106	540
Produktion (theoretisch)	kWh/a	172'200	105'100
Anteil Eigenverbrauch (theoretisch)	%	45	83

Die Verbrauchs- und Kennzahlen der Savièse Verkaufsstelle für die Periode November 2019 bis Oktober 2020 befinden sich in Anhang 6.



3 Überprüfung der Maximierung der Photovoltaik-Eigennutzung mittels Eisspeicher

3.1 Projektierung

Die Bauherrschaft prüfte verschiedene Möglichkeiten die überschüssige elektrische Energie aus der PV-Anlage zu speichern, um diese bei niedriger PV-Leistung zu nutzen. Ziel ist es, über das Jahr 35'000 kWh_{el} an überschüssiger elektrischer Energie aus der PV-Anlage der VST Etagnières für die Entladung des Latentspeichers (Kälteproduktion) zu nutzen und entsprechend der Einspeisung ins Stromnetz zu reduzieren. Wenn die PV-Anlage zu wenig elektrische Energie liefert, beispielsweise in der Nacht, soll die Beladung des Latentspeichers (Kältebezug) genutzt werden, um den Energiebedarf und so den Bezug aus dem Stromnetz um 19'500 kWh_{el} im Jahr zu reduzieren.

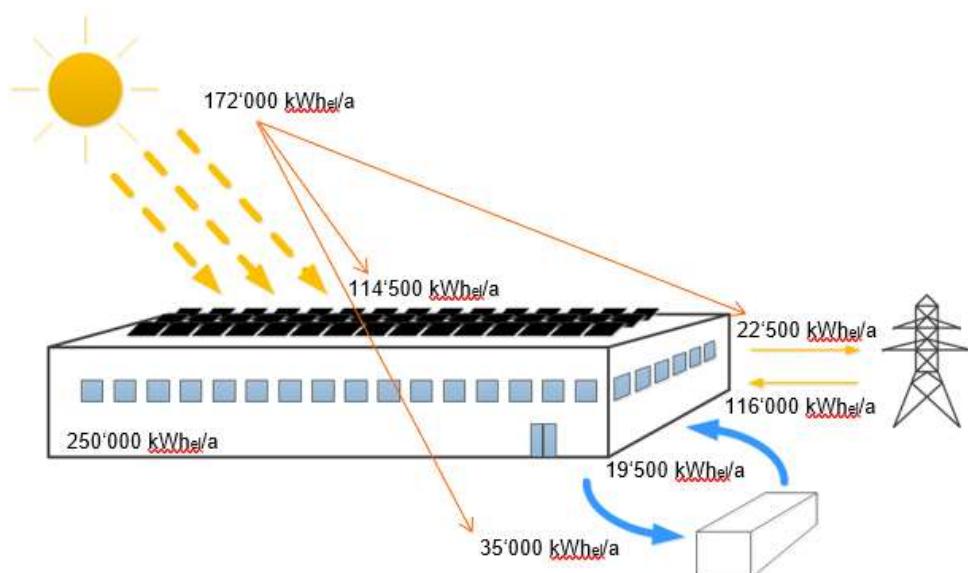


Abbildung 5: Projektierung – Elektrische Energieflüsse der VST ETAN mit Bewirtschaftung eines Latentspeichers. Alle Angaben beziehen sich auf elektrische Energie.

Die relativ grosse Differenz von gespeicherter elektrischer Energie und bezogener elektrischer Energie kommt hauptsächlich daher, dass bei PV-Überschuss die Betriebsbedingungen für die Kälteanlage, aufgrund der höheren Außentemperaturen meist schlechter sind als bei einem PV-Defizit. Der Fokus liegt jedoch in der Maximierung der PV-Eigennutzung, was diesen Betrieb voraussetzt. Bei einem Betrieb nach effizienten Außenbedingungen, beispielsweise in der Nacht bei tieferen Temperaturen Eis erzeugen und bei Tag und höheren Temperaturen CO₂ Unterkühlen, würde die Differenz von gespeicherter elektrischer Energie und durch den Kältebezug aus dem Eisspeicher substituierter elektrischer Energie positiver ausfallen.

3.1.1 Konzeptentwicklung

Während der Konzeptevaluation wurden verschiedene Einbindungsvarianten von thermischen Speichern geprüft. Dabei wurde auf folgende Punkte besonderer Fokus gelegt:

- Die Kälteanlage muss jederzeit ohne den thermischen Speicher betrieben werden können



- Das Konzept soll technisch einfach und ohne grundlegende Änderung am Kältekreis umsetzbar sein. Wenn möglich soll Wasser ohne Zusatz als Medium verwendet werden
- Das Konzept soll unabhängig von der PV-Anlage eingesetzt werden können (beispielsweise für die Verwendung von Niedertarifstrom oder zur Stromnetzstabilisierung)
- Der Energieverbrauch der Kälteerzeugung für die Lebensmittel soll durch das Konzept gleich oder besser werden

Die Kälteerzeugung für den thermischen Speicher wurde bei allen Konzepten gleich angedacht. Lediglich die Anforderung an das Temperaturniveau im Speicher variiert anhand der Einbindungsvariante:

- In Konzept A wird der Latentspeicher auf der Ladeseite so eingebunden, dass dem CO₂ in der Saugleitung der Pluskühlung Wärme entzogen wird, wodurch das CO₂ teilweise kondensiert.
- In Konzept B wird der Latentspeicher so eingebunden, dass dem CO₂ nach der Entspannung vom Hochdruck und vor dem Mitteldrucksammler Wärme entzogen wird.
- In Konzept C wird der Latentspeicher so eingebunden, dass dem CO₂ nach dem Gaskühler Wärme für die Speicher-Beladung entzogen werden kann, wodurch das CO₂ im Hochdruck unter die Außentemperatur abgekühlt werden kann.

Die Vor- und Nachteile dieser drei Varianten wurden bewertet und Konzept C für dieses Projekt gewählt.

3.1.2 Systemauslegung

Der Eisspeicher besteht aus einem Behälter, welcher mit Wasser gefüllt ist. Durch dieses Wasser werden Rohre geführt, in denen ein Gemisch aus Wasser und 40% Propylenglykol fliesst (Abbildung 6).



Abbildung 6: Die Rohre, in denen eine Gemisch aus Wasser und Propylenglykol fliesst (Foto von Fafco)

Nachfolgend vereinfacht dargestellt das Funktionsprinzip des Speichers. Über den Wärmetauscher „Kühlstelle Eisspeicher“ auf der linken Seite wird der Eisspeicher geladen d.h. gekühlt und über den



Wärmetauscher „Unterkühlung durch Eisspeicher“ auf der rechten Seite wird der Eisspeicher entladen d.h. erwärmt (Abbildung 7).

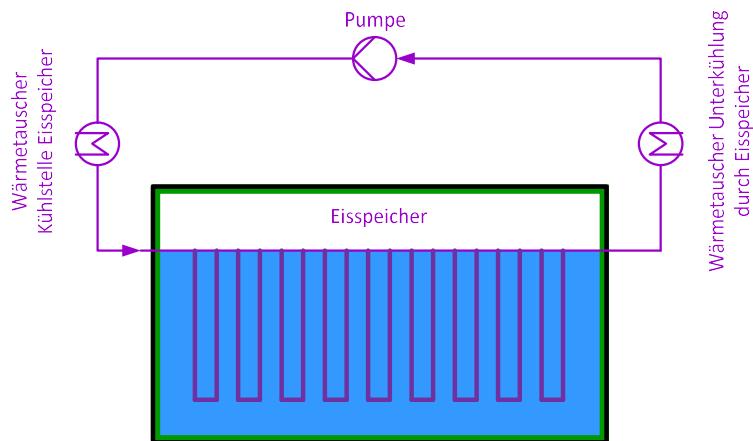


Abbildung 7: Funktionsprinzip Eisspeicher

Bei der Eisspeicherentladung wird dem Speicher Wärme zugeführt, heisst die Kälte im Speicher wird genutzt. Dies ist der Fall, wenn keine überschüssige Energie aus der PV-Anlage bereitsteht.

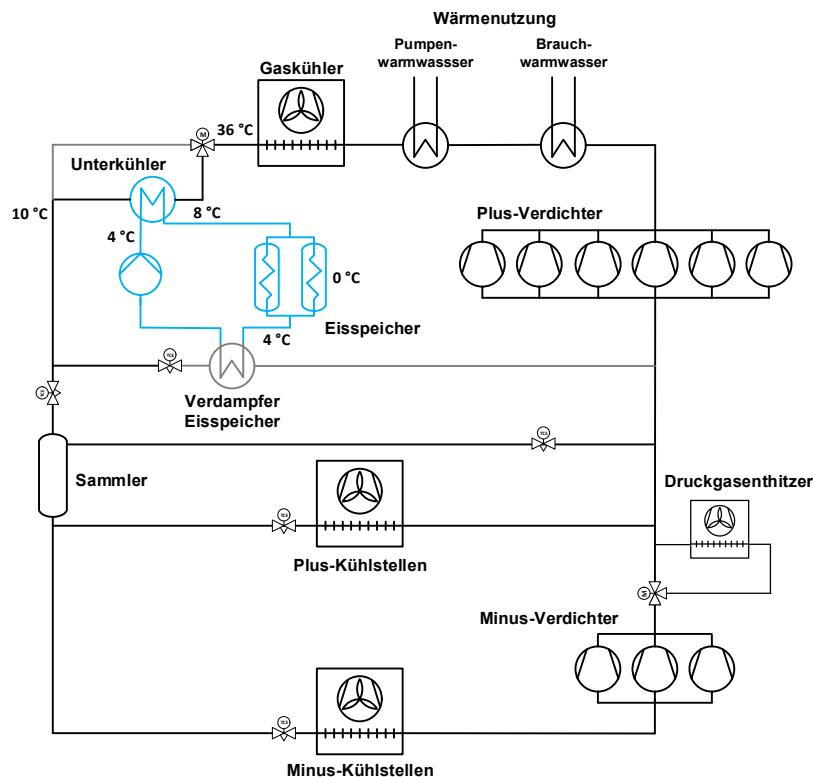


Abbildung 8: Entladebetrieb, dem Eisspeicher wird Kälte entzogen bzw. Wärme zugeführt

Das detaillierte Prozessdiagramm ist in Abbildung 8 dargestellt. Im Wasser-Glykol-Kreis stellt das Dreiegeventil um, sodass der Wärmetauscher für die Unterkühlung durch den Eisspeicher durchströmt wird. Das CO₂ wird nach dem Gaskühler durch den Latentspeicher unterkühlt. Es hat je nach Außentemperatur eine Temperatur zwischen +10°C und +36°C und kann mit maximal 35 kW thermischer Leistung unterkühlt werden. Dank dieser Unterkühlung wird der Anteil an Flashgas im



Mitteldrucksammler nach der Entspannung reduziert. Die Verdichter der Pluskühlung müssen dadurch einen geringeren Anteil an Flashgas verdichten, welches nicht zur Kühlung beiträgt. Da die Unterkühlung nicht unter +10°C geht, reicht eine Temperatur von +4°C im Zwischenkreis aus. Mit einer Temperaturdifferenz von 4 K zum Phasenwechsel im Latentspeicher kann somit ein Speicher mit reinem Wasser eingesetzt werden. Durch die zusätzliche Unterkühlung wird mit dem Eisspeicher das Gas auf +6 bis +20°C gekühlt. Dies ermöglicht einen effizienteren Betrieb der Kälteanlage wodurch weniger Energie aus dem Netz bezogen wird.

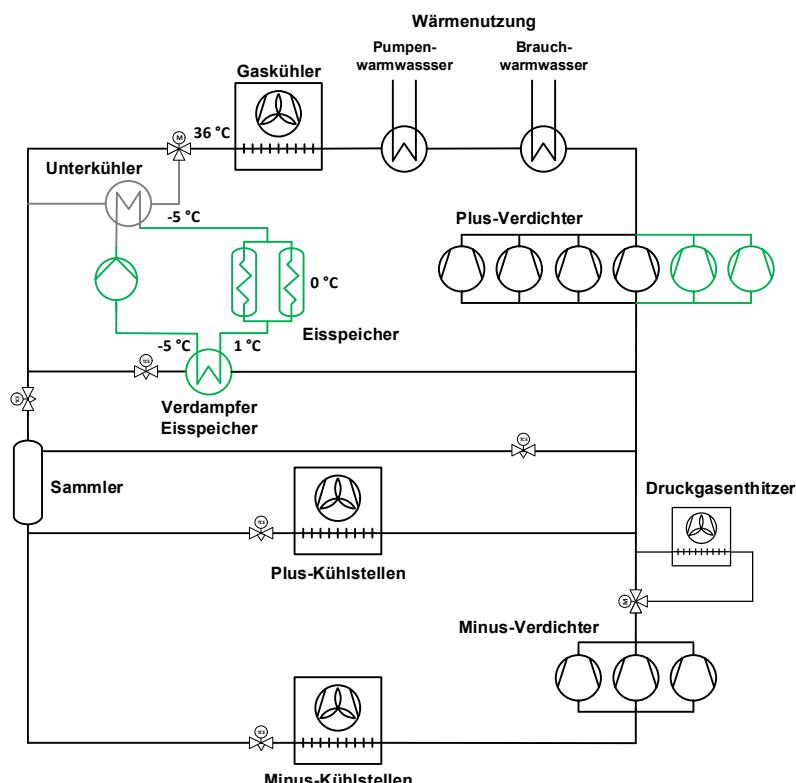


Abbildung 9: Ladebetrieb, dem Eisspeicher wird Kälte zugeführt bzw. Wärme entzogen

Bei der Speicherladung wird Wärme dem Speicher entzogen. Das detaillierte Prozessdiagramm ist in Abbildung 9 dargestellt. Das Wasser-Glykol-Gemisch wird durch die Kälteanlage bei einer Verdampfungstemperatur von 1°C auf -5°C gekühlt. Dazu werden die Eisspeicherverdichter durch die überschüssige Energie aus der Photovoltaik-Anlage angetrieben. Dabei können zusätzlich maximal 65 kW thermische Leistung aus elektrischer Leistung erzeugt werden. Nach dem Wärmetauscher wird das Glykol-Gemisch durch den Speicher gepumpt und nimmt Wärme aus dem Speicher auf. Dadurch wird dieser auf eine Temperatur von ±0°C gekühlt, wodurch das Wasser im Speicher gefriert. Der Unterkühler nach dem Gaskühler ist während dieser Zeit nicht in Betrieb. Das CO₂ wird nach der Verdichtung mittels Gaskühler abgekühlt, in den Mitteldrucksammler entspannt und über ein elektronisches Einspritzventil wieder dem Wärmetauscher „Kühlstelle für Eisspeicher“ zugeführt.

Aufgrund der geforderten 55 kW_{th} Pluskühlleistung und 16 kW_{th} Minuskühlleistung verfügt das System über vier Plusverdichter und drei Minusverdichter. Die Einbindung des oben beschriebenen Konzeptes wurde mit einem Eisspeicher, einem Zwischenkreis mit Pumpe für den Eisspeicher, zwei zusätzlichen Plus-Verdichtern, einem Wärmeübertrager nach dem Gaskühler und einem Verdampfer mit Einspritzung direkt ab Hochdruck umgesetzt. Die Eisspeicherverdichter wurden, entgegen dem



ursprünglichen Konzept während der Evaluation, aufgrund desselben Saugdruckes an die Saugleitung der Plusverdichter gehängt. Dies erlaubt eine bessere Leistungsregelung für den Eisspeicher und mindert das Taktzeit der Verdichter.

3.1.3 Realisation, Inbetriebnahme und Unterhalt

Als Eisspeicher wurde ein Fabrikat von Fafco mit folgenden technischen Daten eingesetzt (Tabelle 3):

Tabelle 3: Eigenschaften des Eisspeichers [6]

Totale thermische Speicherkapazität	kWh	474
Latente Speicherkapazität	kWh	464
Wasserinhalt total	l	7830
Gewicht ungefüllt	kg	1380
Gewicht gefüllt	kg	9590
Bodenfläche	m ²	7

Um den Speicher vor Witterung zu schützen und einen Sichtschutz zu bieten wurde er in eine Betonwanne mit Deckel gestellt. Zusätzlich verfügt die Betonwanne über einen Ablauf für den Fall einer Leckage. Als Kälteträger im Zwischenlauf wurde ein Propylen-Glykol-Wassergemisch verwendet. Aufgrund des hohen Grundwasserspiegels in der Region ist der Einsatz von Ethylen-Glykol nicht erlaubt.



Abbildung 10: Installation des Eisspeichers

Eine erste Inbetriebnahme des Eisspeichers wurde am 5. Dezember 2018 durchgeführt. Dabei wurden sämtliche Funktionen für die Regulierung des Lade- und Entladebetriebs getestet. Grundsätzlich haben die Betriebsfunktionen funktioniert, jedoch hat sich während der Inbetriebnahme herausgestellt, dass das Signal für die Überschussleistung und das Defizit der Photovoltaik, aufgrund eines falsch konfigurierten Energiezählers, nicht korrekt übertragen wird. In einer zweiten Inbetriebnahme vom



4. Februar 2019 wurde der Energiezähler korrekt konfiguriert und der Lade- und Entladebetrieb eingeschaltet.

3.1.4 Betriebsoptimierung

In der ersten Optimierungsphase, von der Inbetriebnahme bis April 2019, wurde in erster Linie das Verhalten des Entladebetriebs beobachtet. Der Entladebetrieb, bei Photovoltaiküberschuss, wurde optimiert sodass dieser bei Sonne den Speicher in ca. 5 h komplett entladen hat. Leider konnte die Optimierung des Ladebetriebs aufgrund der Wetterbedingungen nicht abgeschlossen werden. Bei genügend hohen Außentemperaturen für eine mögliche Unterkühlung war zu viel Sonne bzw. PV-Leistung vorhanden, sodass der Ladebetrieb gesperrt war.

Dennoch wurde festgestellt, dass die Überhitzungsregelung im Eisspeicherverdampfer zu hoch eingestellt war. Das Wasser-Glykol-Gemisch kommt beim Entladebetrieb mit ca. 0°C aus dem Speicher zum Verdampfer. Bei einer Verdampfungstemperatur von -8°C und einer Soll-Überhitzung von 8K versucht das Einspritzventil eine CO₂-Temperatur von 0°C am Verdampferaustritt zu regeln. Die CO₂-Temperatur am Verdampferaustritt muss jedoch zwingend unter der Wasser Eintrittstemperatur liegen, da sonst die Überhitzung zu tief ist und das Einspritzventil auf minimalem Öffnungsgrad bleibt. Nach einer Korrektur wurde der Eisspeicher korrekt entladen und das Eis Niveau stieg während 2.5 h von 30 % auf über 80 %.

Sobald der Ladebetrieb durch die äusseren Bedingungen ermöglicht wurde, wurden in der zweiten Phase nur kleine Optimierungen für den reibungslosen Betrieb durchgeführt. Im Sommer 2019 wurde ein bidirektonaler Wärmerzähler im Wasserkreis des Eisspeichers installiert, damit der Eisspeicher sowohl beim Laden als auch beim Entladen gemessen werden kann. Ab Dezember 2019 wurden keine Änderungen am System mehr vorgenommen, um die Messdaten für die Auswertung nicht zu verfälschen.

3.2 Technische, energetische und wirtschaftliche Analyse von Batteriespeichern im Vergleich zum Eisspeicher (Ökobilanz)

Für das Speichern von Elektrizität steht zurzeit eine Reihe verschiedener Technologien zur Verfügung. Batterien sind eine der bekanntesten Mechanismen und daher wird in dieser Studie eine grobe Ökobilanz zwischen Batterie- und Eisspeichern vorgenommen.

Das Ziel dieser Ökobilanzierung (oder Life Cycle Assessment, LCA) ist die Analyse der Umweltauswirkungen verschiedener durch PV gespeiste Stromspeicher. Die funktionelle Einheit ist 1 kWh gespeicherte elektrische Energie der PV-Anlage. Der Umfang des Ökobilanzinventars enthält zwei Speichersysteme, die in den folgenden zwei Szenarien beschrieben werden:

- Szenario 1: VST mit PV und Eisspeicher
- Szenario 2: VST mit PV und Lithium-Ionen-Akkumulator (LIA)

Da die VST und die PV-Anlage in beiden Szenarien gleich sind, werden diese nicht in das Inventar aufgenommen. Es werden nur die verschiedenen Speicher berücksichtigt. Szenario 1 basiert auf dem in Etagnières installierten Latentspeicher, während in Szenario 2 der Eisspeicher durch eine Batterie mit 100% Ladeeffizienz und 90% Entladeeffizienz ersetzt wird. Wir haben einen Lithium-Ionen-Akkumulator gewählt, weil LIA sich durch eine vergleichsweise hohe Energiedichte, einen relativ hohen Wirkungsgrad und eine lange Lebensdauer auszeichnen [7].



Gemäss den technischen Daten des Eisspeichers [6] in Etagnières hat er ein Volumen von 13.1 m³ mit ungefähr 8000 l Wasserinhalt. Er hat 1380 kg Leergewicht und fast 7-mal mehr, wenn er gefüllt ist. Seine Speicherkapazität³ ist 464 kWh_{th} und 100% Ladeeffizienz und 90% Entladeeffizienz. Die Eigenschaften des Eisspeicher sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Für unsere Studie wird angenommen, dass der Eisspeicher eine typische Lebensdauer von 15 Jahren hat. Obwohl die effektive Lebensdauer des Behälters 50 Jahre sein kann [2], wird die Kälteanlage nach 15 Jahren überarbeitet. Zu diesem Zeitpunkt muss das Eisspeichersystem möglicherweise umfassend gewartet werden. Dies steht im Einklang mit anderen Ökobilanzen für Eisspeicher [8].

Die Sachbilanz der Komponente des Eisspeichers basiert auf der Studie von Tevis et al. [8] und den Eigenschaften des Fafco-Eisspeichers [6]. Die Inventardaten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.



Tabelle 4: Sachbilanz des Eisspeichers

Komponente	Material	% Gewicht [8]	Betrag
Lagerung	Edelstahl	72	994 kg
Isolierung	Polyurethan Schaum	18	248 kg
Rohrleitungen	Polyethylen	10	138 kg
Phasenwechselflüssigkeit	Wasser		7.8 m ³
Zirkulationsflüssigkeit	Wasser, 40% propylenglykol		0.8 m ³

Um die Bestandsaufnahme des Eisspeichers zu vervollständigen, sollten die verkörperte Energie der Herstellung und Montage der Komponenten in kWh sowie die Primärenergie am Ende der Lebensdauer einbezogen werden. Da vom Hersteller des Eisspeichers in Etagnières keine Daten verfügbar sind, werden Daten aus der Literatur verwendet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Energieverbrauch in der Nichtgebrauchsphase des Eisspeichers [8]

Phase	Betrag (kWh)
Herstellung und Montage	52'450
Ende der Lebensdauer	19'287

Die Sachbilanz des Eisspeichers wird mit Hintergrunddaten des KBOB Ökobilanzdatenbestands [9] verknüpft (Tabelle 6). Für die Wirkungsabschätzung werden die Indikatoren Gesamtumweltbelastung (UBP'2013) und Treibhausgasemissionen verwendet. Der Energieverbrauch von Tabelle 5 wird als Strom aus dem CH-Netz angenommen.

Tabelle 6: KBOB Ökobilanzdatenbestand [9]

Komponente	Material	Bezug	Treibhausgasemissionen (kg CO ₂ .eq)		UBP'13
			Herstellung	Entsorgung	
Lagerung	Edelstahl	kg	3.93	0	8'990
Isolierung	Polyurethan Schaum	kg	4.80	2.72	6'630
Rohrleitungen	Polyethylen	kg	2.38	3.03	3'410
Strom CH-Netz		kWh	0.027		229

Die Umweltkennwerte des Eisspeichers pro funktionelle Einheit sind in

Tabelle 7 aufgeführt.



Tabelle 7: Umweltkennwerte des Eisspeichers

Eisspeicher Kapazität	Bezug	UBP'13 (UBP / kWh _{el})	Treibhausgasemissionen (kg CO _{2,eq} / kWh _{el})
Elektrisch (EER 3)	155 kWh _{el}	388'463	79.5

Die Batteriegrösse wird auf die Eisspeicher Kapazität angepasst. Sowohl Batterie- als auch Eisspeicher sollten die gleiche Menge an Elektrizität von der PV-Anlage speichern können. Der Eisspeicher hat mit EER 3 eine Kapazität von 464 kWh_{th}. Die Batterie soll eine Kapazität von 155 kWh_{el} haben. Das bedeutet, dass die Batterie pro Tag maximal 155 kWh_{el} Energie auflädt und bei 90% Effizienz maximal 140 kWh_{el} pro Einsatztag entlädt.

Für stationäre Batteriespeicher werden derzeit hauptsächlich jene mit einer Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄) Kathode eingesetzt, da sie eine hohe Betriebssicherheit aufweisen [7]. Hier wurde für den Ökovergleich eine Batterie mit einer Kathode aus Nickel Mangan Kobalt Oxid (NMC) mit einer Energiedichte von 105 Wh/kg verwendet. Dies liegt daran, dass sie auch für Anwendungen im Gebäude geeignet ist [7] und besser dokumentierte Sachbilanzen vorweist [10]. Ausserdem sind Li-NMC Batterien Umweltverträglicher als LiFePO₄ Batterien [11].

Die Lebensdauer von Batterien wird meist als Anzahl vollständiger Ladezyklen angegeben und eine typische Lebensdauer von Batterien für Gebäude sind 4000 – 6000 Zyklen [7], was kalendarisch bis zu 20 Jahre bedeutet [10]. Li-NMC Batterien haben eine etwas geringere Lebensdauer als LiFePO₄ Batterien. Bei dieser Ökobilanz geht man davon aus, dass sowohl die Batterie als auch der Eisspeicher die gleiche Lebensdauer haben. Daher wird weder ein Ersatz des Eisspeichers noch der Batterie in Betracht gezogen. Der Material- und Energiebedarf für die Li-NMC Batterie wird aus einer früheren Ökobilanz zu PV-Batterie Systemen der Stadt Zürich [10] entnommen. Die Umweltkennwerte der Batterie sind in Tabelle 8 aufgeführt, sie sind auch auf den KBOB Ökobilanzdatenbestand gestützt.

Tabelle 8: Umweltkennwerte von Li-NMC Batterien [10]

Batterie	Energiedichte (Wh / kg)	UBP'13 (UBP / kWh)	Treibhausgasemissionen (kg CO _{2,eq} / kWh)
LiNMC Batterie	105	594'000	185
Second-Life LiNMC Batterie	84	231'000	80.6

Ein weiterer Vorteil der LiNMC Batterien ist die Möglichkeit, sie als Second-Life-Akkumulatoren zu verwenden. Die Nutzung von gebrauchten Akkumulatoren aus Fahrzeugen ist technisch möglich und kann ökologischer als eine neue Batterie sein, jedoch befindet sich die Technologie noch in der Entwicklung [12]. Die Studie zu PV-Batterie Systemen der Stadt Zürich [10] enthält eine Bewertung dieser Möglichkeit für die LiNMC Batterien, so dass wir sie in unseren Vergleich zwischen Eisspeicher und Lithium-Ionen-Batterien einbeziehen (Tabelle 8). Es ist jedoch zu beachten, dass in diesem Fall die Lebensdauer der Batterie in Frage gestellt ist.

Die Umweltbelastungspunkte des Eisspeichers in Etagnières sind etwa 35% tiefer als jene der LiNMC Batterie mit der gleichen Kapazität und die Treibhausgasemissionen fast 60% tiefer. Wenn Second-Life



LiNMC Batterien verwendet werden könnten, wären die Umweltbelastungspunkte der Batterie 40% tiefer als jene des Eisspeichers, aber es würden keine Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen erzielt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Lebensdauer beider Systeme bei dieser Ökobilanz mit 15 Jahren angenommen wurde. Die Lebensdauer eines Eisspeichers kann länger als 15 Jahre sein, diejenige vieler Lithium-Ionen Batterien ist ungefähr 13 Jahre [8]. Dies würde zu einem Austausch der Batterie führen, insbesondere wenn es sich um eine Second-Life-Batterie handelt, für welche die Lebensdauer noch kürzer ist. Auf jeden Fall besteht heute wirtschaftlich noch kaum Anreiz für Second-Life-Batterien [12].

Ein weiterer Punkt, der beachtet werden sollte, ist, dass eine der Annahmen dieser Ökobilanz darin besteht, dass sowohl der Eisspeicher als auch die Batterie 100% Ladeeffizienz und 90% Entladeeffizienz haben. Die Effizienz der Batterien ist inzwischen auf dem Markt bewiesen, die Effizienz des Eisspeichers wird in diesem Pilotprojekt untersucht. Wenn die Effizienz nicht bestätigt werden kann, ändern sich die umwelttechnischen Resultate zugunsten des effizienteren Systems.

Aus wirtschaftlicher Sicht hat der Eisspeicher in Etagnières (Material und Installation) insgesamt 138'000 CHF (in 2018) gekostet. Der Eisspeicher alleine kostete nur 30'000 CHF und die Installation war ein Prototyp. Die Prognose für Wartung und Unterhalt beläuft sich auf 27'600 CHF für die gesamte Lebensdauer des Eisspeichers. Die Technologie ist bereits weiterentwickelt, so dass ein Eisspeicherprojekt wie der in diesem Pilotprojekt heute weniger kosten würde. Batterien sind im Allgemeinen immer noch teuer. Ein Richtwert für die Kosten einer stationären Batterie im Jahr 2018 lag bei 700 CHF/kWh [13]. Eine Batterie von 155 kWh würde 108'500 CHF kosten. Über die Preise von LiNMC Batterien, sowie die Kosten der Installation in der Schweiz gibt es nur begrenzte Literatur, so dass ein gründlicherer Vergleich nicht möglich ist.

3.3 Messdatenerfassung

In ETAN ist ein Messkonzept nach aktuellem Stand der Technik erstellt worden. Einerseits werden Drücke, Temperaturen und Steuersignale des Regelsystems der Kälteanlage aufgezeichnet. Diese sind im Monitoring-System «FrigoData» gespeichert. Andererseits können durch die Messaufnehmer vom Coop-Energiemanagementsystem «MESA» diverse elektrische Leistungen sowie Kennzahlen ermittelt werden. Somit sind in erster Linie die Anlagenregelung und ein grundlegendes Energiemonitoring sichergestellt. Alle Messdaten werden jeweils auf den Messaufnehmern in einem Ringspeicher gespeichert und täglich auf die entsprechenden Server geladen. Abbildung 11 zeigt ein vereinfachtes Schema der Anlage mit projektrelevanten Messstellen. Die detaillierte Auflistung aller Sensoren befindet sich in Anhang 2, die Messunsicherheitsberechnung ist in Anhang 1 beschrieben.

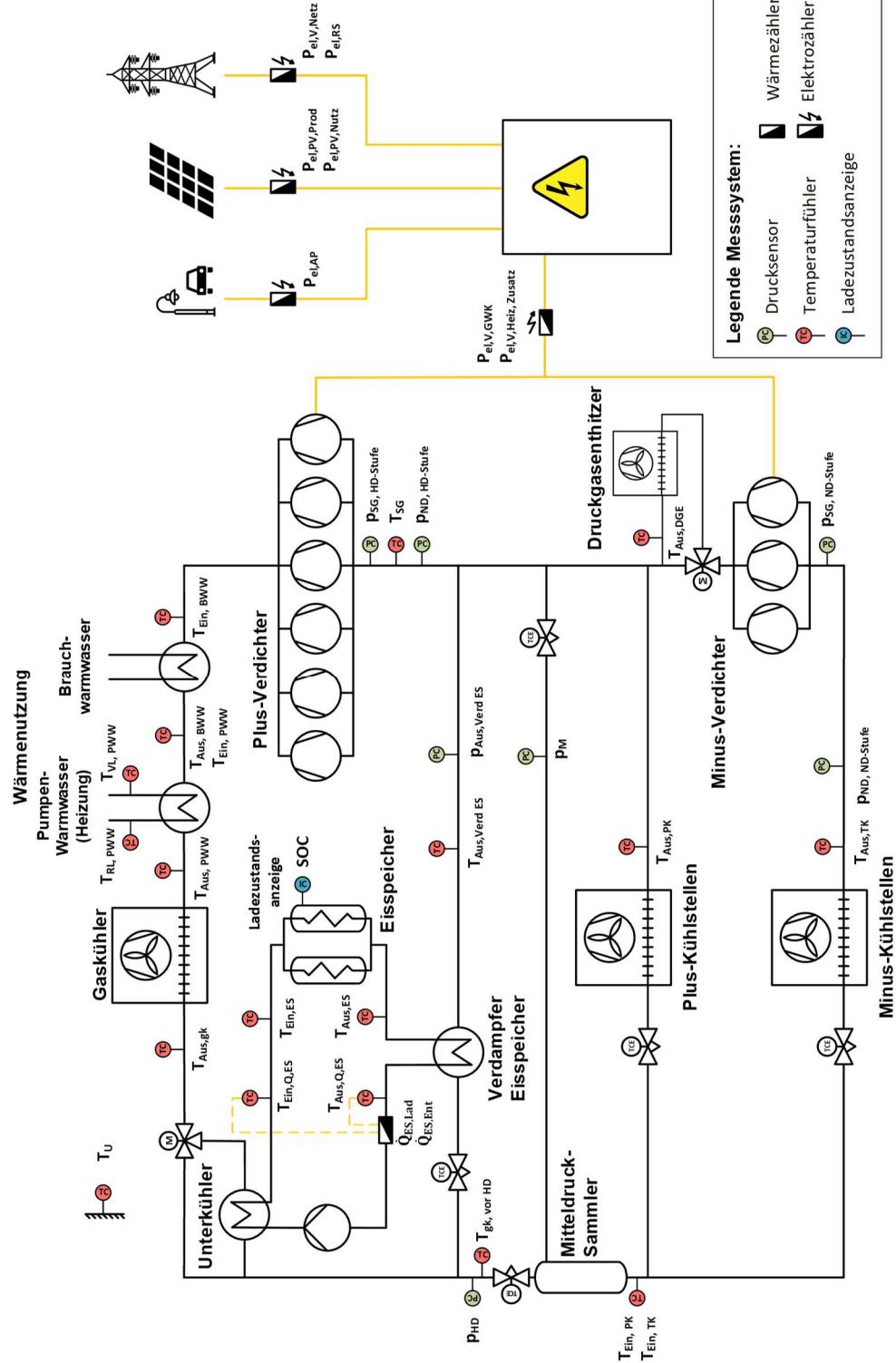


Abbildung 11: Vereinfachtes Schema der Kälteanlage ETAN mit projektrelevanten Messstellen



3.4 Messdatenauswertung

3.4.1 Zielgrößen

Aus den bereits erwähnten Messgrößen wurden diverse Zielgrößen und Kennzahlen gebildet. Mit Leistungsdaten konnten entsprechende Energiemengen berechnet werden, welche in Tabelle 9 aufgelistet sind. Die darin gezeigten Größen werden durch Integration der entsprechenden Messgrößen über den Zeitraum t_1 bis t_2 gebildet oder in Relation zu anderen Zielgrößen direkt berechnet.

Tabelle 9: Zielgrößen der elektrischen und thermischen Energie sowie deren Berechnung

Zielgröße	Bezeichnung	Berechnung
$W_{el,PV,Prod}$	Elektrische Energie PV-Produktion	$W_{el,PV,Prod} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,PV,Prod} dt$
$W_{el,PV,Nutz}$	Elektrische Energie PV direkt genutzt	Formel in MESA. Keine weiteren Angaben zum Berechnungsverfahren.
$W_{el,V,Netz}$	Elektrische Energie Netzbezug	$W_{el,V,Netz} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,V,Netz} dt$
$W_{el,RS}$	Elektrische Energie Rückspeisung ins Netz	$W_{el,RS} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,RS} dt$
$W_{el,V,GWK}$	Elektrische Energie Gewerbekälte	$W_{el,V,GWK} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,V,GWK} dt$
$W_{el,V,Heiz}$	Elektrische Energie Zusatzheizung	$W_{el,V,Heiz} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,V,Heiz} dt$
$W_{el,AP}$	Elektrische Energie Aussenbeleuchtung inkl. Parking	$W_{el,AP} = \int_{t_1}^{t_2} P_{el,AP} dt$
$W_{el,V,anderer}$	Elektrische Energie Andere (Innenbeleuchtung, IT, etc.)	$W_{el,V,anderer} = W_{el,V,Netz} + W_{el,PV,Nutz} - W_{el,V,GWK} - W_{el,AP}$
$Q_{ES,Lad}$	Thermische Energie Eisspeicher Laden	$Q_{ES,Lad} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{ES,Lad} dt$
$Q_{ES,Ent}$	Thermische Energie Eisspeicher Entladen	$Q_{ES,Ent} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{ES,Ent} dt$



Mit dem Wärmestrom in/aus dem Eisspeicher $\dot{Q}_{ES,i}$ sowie einer Referenztemperatur T_{Ref} wird der Exergiestrom zum/vom Eisspeicher ermittelt:

$$\dot{E}_{ex,ES,i} = \left(1 - \frac{T_{Ref}}{T_{m,ES}}\right) \dot{Q}_{ES,i}$$

$$T_{Ref} = 9.97^\circ C \text{ (Regionale Jahresmitteltemperatur)} [14]$$

$$T_{m,ES} = \frac{T_{Aus,ES} - T_{Ein,ES}}{\ln\left(\frac{T_{Aus,ES}}{T_{Ein,ES}}\right)}, \text{Temperaturen in K}$$

Als Referenztemperatur wurde die regionale Jahresmitteltemperatur verwendet, bestehend aus einem Mittelwert der Jahresmitteltemperaturen 2015 - 2018 der Wetterstationen Pully und Villars Tiercelin. Durch Integration des Exergiestroms lassen sich Exergiemengen berechnen, welche in Tabelle 10 dargestellt sind. Darin sind ebenfalls diverse Kennzahlen zu finden, welche zur weiteren Analyse des Systems eingeführt wurden.

Tabelle 10: Zielgrößen der Exergie und Kennzahlen mit deren Berechnung

Zielgröße	Bezeichnung	Berechnung
$E_{ex,ES,Lad}$	Exergie Eisspeicher Laden	$E_{ex,ES,Lad} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{ex,ES,Lad} dt$
$E_{ex,ES,Ent}$	Exergie Eisspeicher entladen	$E_{ex,ES,Ent} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{ex,ES,Ent} dt$
EVA	Eigenverbrauchsanteil der Solarstromproduktion	$EVA = \frac{W_{el,PV,Nutz}}{W_{el,PV,Prod}}$
n_{ES}	Anzahl vollständiger Ladungen des Eisspeichers	$n_{ES} = \sum_{t_1}^{t_2} \Delta SOC \mid \Delta SOC < 10\% \text{ bis } > 99\%$
$n_{ES,Summe}$	Monatssumme aller Teilladungen des Eisspeichers	$n_{ES,Summe} = \sum_{t_1}^{t_2} \Delta SOC$
$\eta_{th,ES}$	Thermischer Ladewirkungsgrad des Eisspeichers	$\eta_{th,ES} = \frac{Q_{ES,Ent}}{Q_{ES,Lad}}$
$\eta_{ex,ES}$	Exergetischer Ladewirkungsgrad des Eisspeichers	$\eta_{ex,ES} = \frac{E_{ex,ES,Ent}}{E_{ex,ES,Lad}}$

Die Anzahl vollständiger Ladungen n_{ES} wird um eins erhöht, wenn der Ladezustand (State of Charge, SOC) von unter 10% konstant bis auf über 99% steigt. Zur Berechnung der Ladewirkungsgrade muss beachtet werden, dass diese nur über Zeitabschnitte mit gleichem Start- und Endladezustand des Eisspeichers gebildet werden können. Abbildung 12 zeigt, wie diese Grenzsetzung für den Juni 2020 gemacht wurde. Dabei konnten die Zeitgrenzen annähernd auf die Monatsdauer gelegt werden. In Monaten mit geringer Eisspeichernutzung können diese bis zu 3 Tage vom Monatsbeginn/-ende abweichen, was aufgrund langer Stillstandszeiten des Eisspeichers jedoch nur geringen Einfluss auf das Resultat hat.

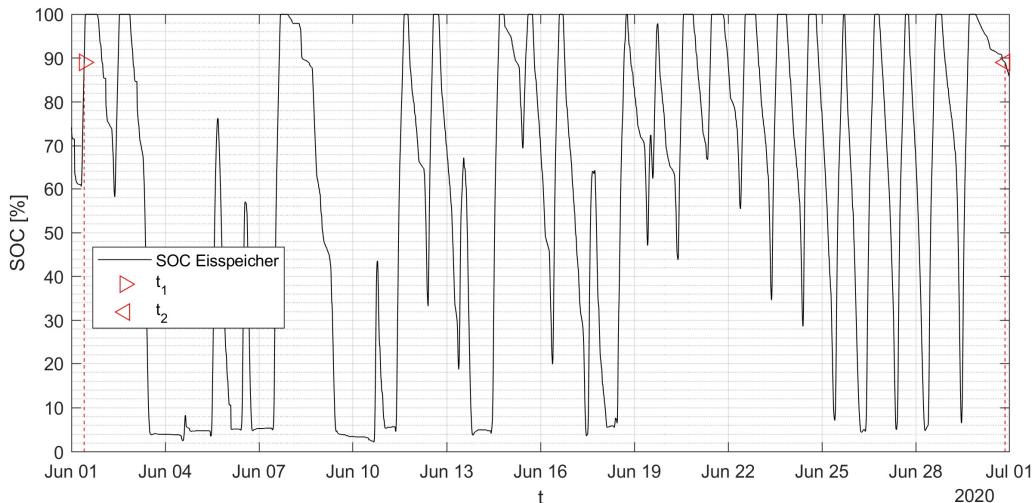


Abbildung 12: Gesetzte Zeitgrenzen zur Berechnung der Ladewirkungsgrade im Juni 2019

Fällt die Außentemperatur unter 10°C , kann der Gaskühler das Kältemittel tiefer unterkühlen als der Eisspeicher. Um diesen Sachverhalt genauer zu studieren wurde die Außentemperatur ohne Rückspeisung $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$ eingeführt. Dabei wird ein Mittelwert über alle Außentemperaturen in Perioden ohne Rückspeisung gebildet. Dieser Wert gibt eine Abschätzung, wie intensiv der Eisspeicher in einem Zeitabschnitt genutzt werden kann.

3.4.2 Rapportierung

Zur laufenden Überwachung und Analyse des Anlagenbetriebs wurden Monatsrapporte erstellt, welche allen Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt wurden. In Anhang 3 ist der Rapport vom August 2020 als Beispiel gezeigt.

3.4.3 Erstes Betriebsjahr/Verbesserung der Messdatenerfassung

Die Messdatenerfassung in ETAN wurde im November 2018 in Betrieb genommen. Von Beginn an erfasste MESA alle elektrischen Leistungen. Drücke und Temperaturen der Kälteanlage sind in FrigoData erfasst. Der nachträglich eingebaute Eisspeicher-Wärmezähler lieferte ab Februar 2019 Messdaten. Dieser wurde im Standardverfahren eingebaut, was zur Folge hatte, dass zu Beginn nur die Ladeleistung erfasst wurde. Fehlende Daten zur Entladung verhinderten das Berechnen von Ladewirkungsgraden und somit Aussagen zur Speichernutzung. Zudem wurde die Messauflösung des Wärmezähler-Rechenwerks auf 1 kWh eingestellt. Beim angewandten Messintervall von 15 Minuten führte dies zu einer Leistungsauflösung von 4 kW. Dies belastete das Messergebnis mit einer zusätzlichen Unsicherheit von mindestens $\pm 2\text{kW}$. Um diese Probleme zu beheben, wurde der Eisspeicher-Wärmezähler neu programmiert. Ab August 2019 konnte die Lade- und Entladeleistung erfasst sowie ab November 2019 mit einer zufriedenstellenden Messauflösung von 40 W gearbeitet werden.

Weiter wurde im ersten Betriebsjahr entdeckt, dass jeden Tag am Abend über einen Zeitraum von ca. 2 Stunden Messdaten fehlen. Da der Datenupload mit einer zu geringen Abfragerate programmiert war, wurde der Ringspeicher in den Messaufnehmern täglich überschrieben. Mit häufigerem Datenupload konnte dies eliminiert werden.



3.4.4 Zweites Betriebsjahr

Im zweiten Betriebsjahr funktionierte die Messdatenerfassung ordnungsgemäss. Einzig vom 1. bis zum 12. Juli 2020 sind in FrigoData keine Messdaten vorhanden.

Zur genaueren Untersuchung vom Einfluss des Eisspeichers wurden zwei Betriebsmodi eingeführt:

- Modus 1: Regelung des Hochdrucks nach der Temperatur im Gaskühleraustritt ($T_{Aus, gk}$)
- Modus 2: Regelung des Hochdrucks nach der Temperatur vor dem Hochdruckventil ($T_{gk, vor HD}$)

Das folgende Beispiel soll die Modi erklären. Bei einer Aussentemperatur von 20 °C kann das Kältemittel vom Gaskühler idealisiert bis auf 20 °C gekühlt werden (siehe roter Punkt in Abbildung 13). Wenn nun mittels Entladung die Kältemaschine unterstützt wird, kann der Eisspeicher das Kältemittel weiter bis auf ca. 8 °C kühlen. Dadurch wird dem Kältemittel etwa 30 kJ/kg spezifische Enthalpie entzogen.

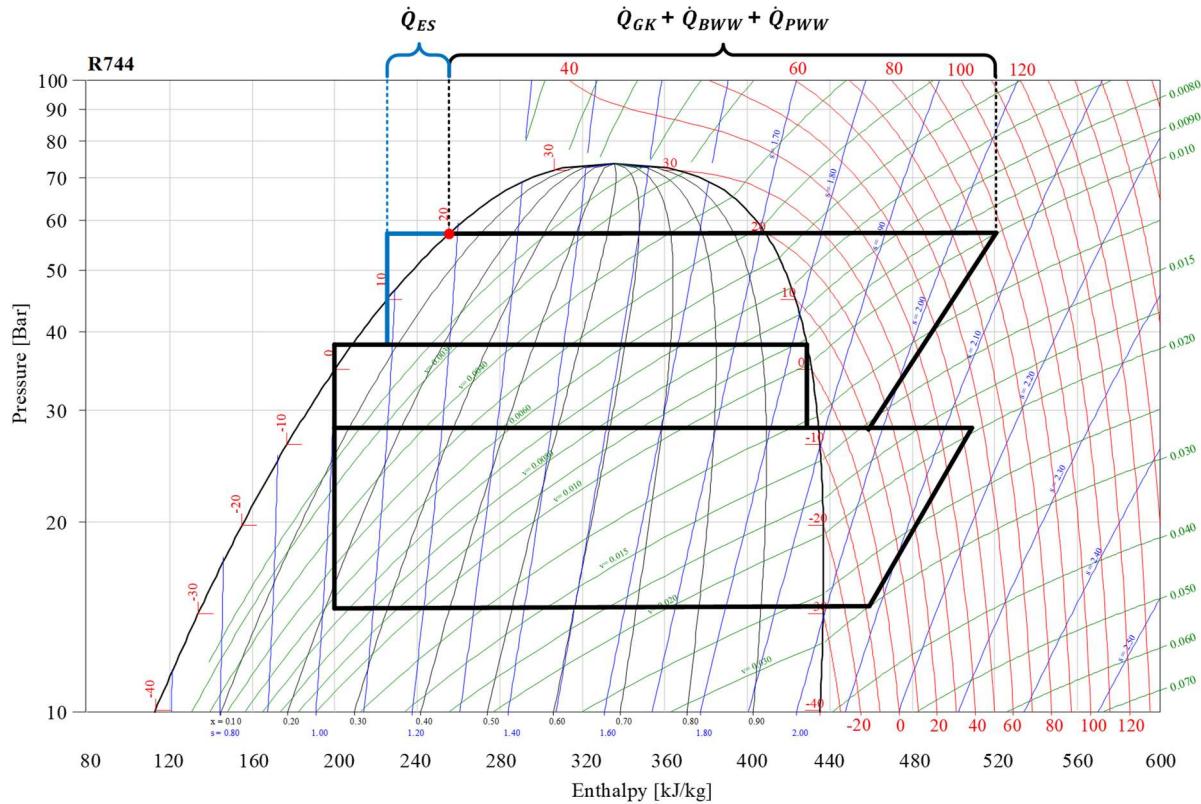


Abbildung 13: Kältekreislauf der Anlage im Entladebetrieb mit Betriebsmodus 1

Da in Betriebsmodus 2 der Hochdruck anhand $T_{gk, vor HD}$ geregelt wird, fällt dieser tiefer aus. Der markierte Prozesspunkt verschiebt sich somit entlang der Isothermen im log(p)-h Diagramm (siehe roter Pfeil in Abbildung 14). Die Wärmeabgabe vom Gaskühler wird auf den Eisspeicher verlagert, nun kann der Eisspeicher rund 210 kJ/kg spezifische Enthalpie aus dem Kältemittel aufnehmen.

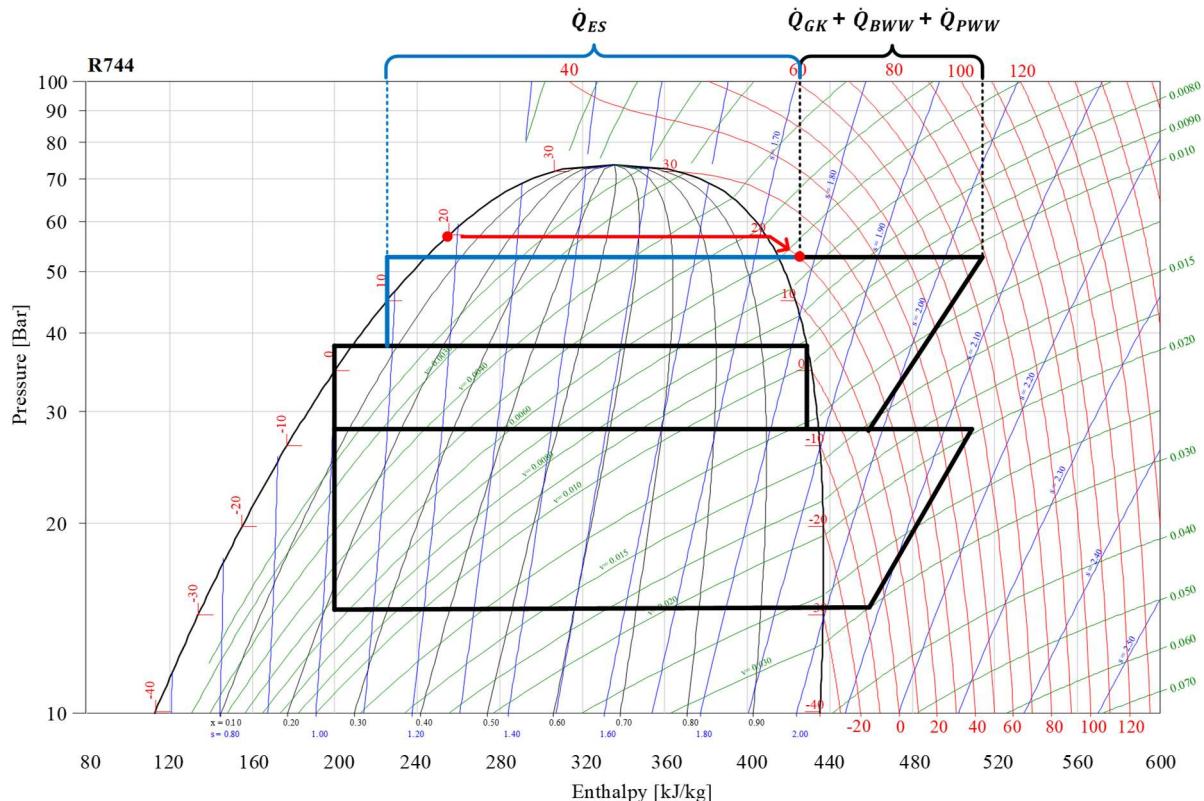


Abbildung 14: Kältekreislauf der Anlage im Entladebetrieb mit Betriebsmodus 2

Betriebsmodus 2 soll also eine intensivere Eisspeichernutzung bei gleichen Außenbedingungen bewirken. Das gezeigte Beispiel ist jedoch ein Extremfall. Die Mehrnutzung ist stark von der Außentemperatur sowie der damit verbundenen Hochdruckeinstellung abhängig und kann variieren. Das Ziel der verstärkten Nutzung ist eine Erhöhung des Eigenverbrauchs und somit ein wirtschaftlicherer Betrieb in Modus 2.

Um diese Unterschiede zu messen und vergleichen zu können, wurde ein Fahrplan der beiden Betriebsmodi festgelegt. Da für Vergleiche untereinander möglichst gleiche Umweltbedingungen herrschen müssen, wurde der Fahrplan dem Sonnenstand und Temperaturverlauf in ETAN über das Jahr angepasst. Ebenfalls sind Einflüsse wie Arbeitszeiten, betriebliche Umsetzbarkeit und das Kundenaufkommen mit einbezogen worden. Somit wurde entschieden, jeweils acht Wochen lang einen Betriebsmodus zu fahren und danach umzuschalten. Der gesamte Fahrplan ist in Anhang 4 zu finden.

3.4.5 Auswerteverfahren

Zu Projektbeginn sollten die Auswirkungen des Eisspeichers gegenüber konventionellen Anlagen untersucht werden. Im Projektverlauf sind zudem Fragen zum Betriebsmodus hinzugekommen. Um diese zu beantworten wurden zwei Auswertungsmethoden festgelegt:

- Vergleich zwischen ETAN und SAVI. Da man während der angesetzten Projektzeit beide Betriebsmodi gefahren hat, wurde der Betrieb ohne Eisspeicher in ETAN nicht durchgeführt. Es wurde somit entschieden, ETAN mit einer möglichst ähnlichen Filiale ohne Eisspeichersystem zu vergleichen. Einerseits können Direktvergleiche zwischen den Filialen Aufschluss über die Auswirkungen des Eisspeichers geben, andererseits kann SAVI als «Benchmark» zu



Auswertungen in ETAN dienen. Perioden mit möglichst ähnlichen Umweltbedingungen fungieren als Vergleichsgrundlage.

- Vergleich der Betriebsmodi innerhalb der Filiale ETAN. Es werden Perioden für beide Modi gesucht, welche ähnliche Aussentemperaturen und Solareinstrahlung aufweisen. Durch den Vergleich soll man Aussagen zum Betriebsverhalten gewinnen.

Für das Klima in ETAN wurden stellvertretend Messdaten der Wetterstation Pully (PUY) verwendet, für SAVI wandte man Daten der Wetterstation Sion (SIO) an.

Der obere Teil von Abbildung 15 zeigt anhand der Aussentemperatur, wo Perioden für den Filialenvergleich gefunden wurden. Dies erarbeitete man analog mit der globalen Einstrahlung und den täglichen Sonnenstunden. Im unteren Teil ist jeweils die Differenz der Standorte, normiert auf das Maximum, aufgezeichnet.

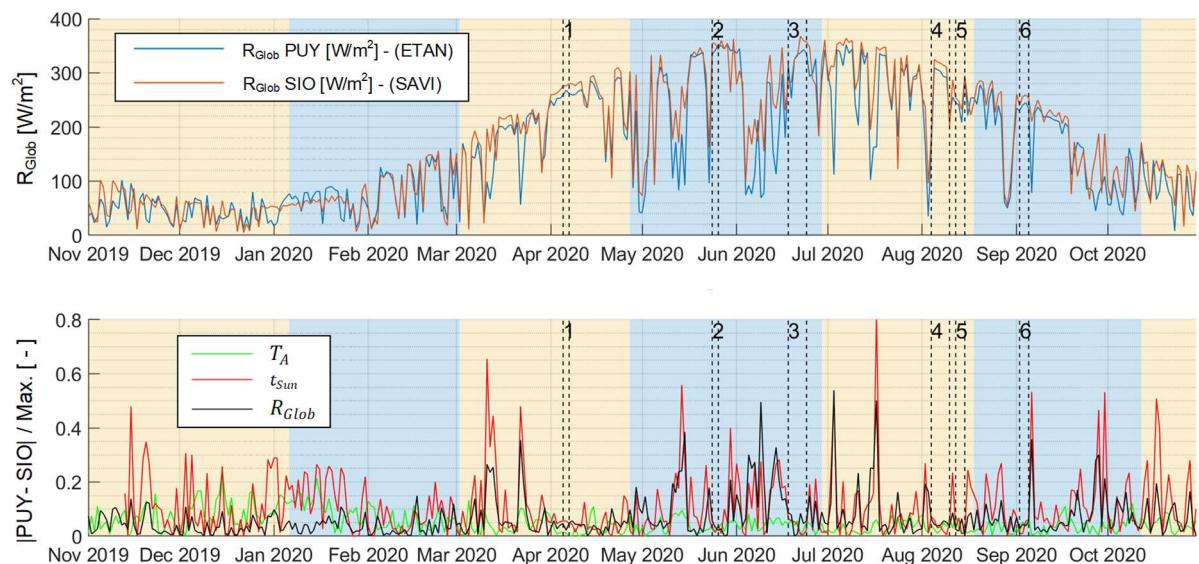


Abbildung 15: Vergleich der Aussentemperaturen (oben) sowie normierte Abweichung der Klimamesswerte zwischen den Filialen (unten)

In Zeitabschnitten, bei denen die normierte Abweichung unter 10% liegt, wurde ein Vergleich zugelassen. Diese hat man entsprechend dem Kundenverhalten weiter eingegrenzt, sodass z.B. eine dreitägige Periode über das Wochenende nicht mit drei Wochentagen verglichen wird. Wie die Abbildung zeigt, konnten fünf Abschnitte ermittelt werden:

- Periode 1: So, 5. April – Di, 07. April 2020
- Periode 2: So, 24. Mai – Di, 26. Mai 2020
- Periode 3: Do, 18. Juni – Mi, 24. Juni 2020
- Periode 4: Di, 04. August – Mo, 10. August 2020
- Periode 5: Mi, 12. August – Sa, 15. August 2020
- Periode 6: Mi, 02. September – Sa, 05. September 2020

Damit zwischen den Betriebsmodi innerhalb ETAN Parallelen gezogen werden konnten, musste man ebenfalls Perioden mit ähnlichen Klimabedingungen finden. Im Unterschied zum Filialenvergleich wurden hier jedoch gleiche Umweltbedingungen zu verschiedenen Zeiten in ETAN benötigt (siehe Abbildung 16).

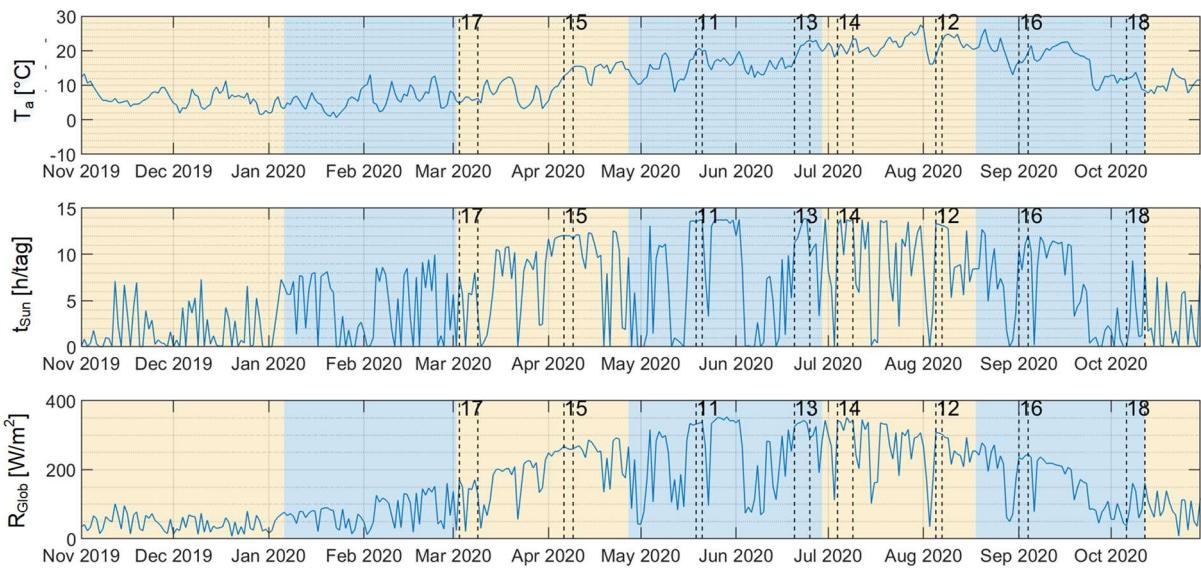


Abbildung 16: Gefundene Vergleichsperioden zur Analyse der Betriebsmodi

Auch bei diesem Vergleich begrenzte man die Abschnitte so, dass das Kundenverhalten übereinstimmend abgebildet wird. Insgesamt acht Perioden wurden gefunden:

- Periode 11: Mo, 18. Mai – Mi, 20. Mai 2020
- Periode 12: Mi, 05. August – Fr, 07. August 2020
- Periode 13: Sa, 20. Juni – Do, 25. Juni 2020
- Periode 14: Sa, 04. Juli – Do, 09. Juli 2020
- Periode 15 Mo, 06. April – Do, 09. April 2020:
- Periode 16 Di, 01. September – Fr, 04. September 2020:
- Periode 17: Di, 03. März – Mo, 09. März 2020
- Periode 18 Di, 06. Oktober – Mo, 12. Oktober 2020:

Dabei können die Abschnitte 11/12, 13/14, 15/16 und 17/18 einander gegenübergestellt werden.

Zu Beginn analysierte man den Eigenverbrauchsanteil (EVA) der Filialen direkt. Da SAVI rund 100 kW weniger PV-Leistung als ETAN aufweist und keine Fassadenmodule besitzt, verhält sich dessen EVA im Sommer wesentlich anders. In SAVI fällt der EVA im Sommer bis auf 76%, in ETAN weiter auf 50%. Man konnte somit aus dem Vergleich keine aussagekräftigen Resultate gewinnen. Die Energiemesswerte erlaubten mehr Einsicht und unterstützten die erwähnten Auswerteverfahren. SAVI wurde primär als «Benchmark» eingesetzt, um die Werte von ETAN auf einen Bezugspunkt festzusetzen. Diese «normierten» Messwerte zeigen Anzeichen, dass das Eisspeichersystem wie erwartet funktioniert. Jedoch zeigten sich anhand der Kennzahlen keine kausalen Zusammenhänge zwischen dem Eisspeicher und den erwarteten Auswirkungen. Im Vergleich der Perioden 3, 4 und 5 in Tabelle 11 wird dies veranschaulicht.



Tabelle 11: Vergleich von Zielgrößen und Kennzahlen zwischen ETAN und SAVI in den Perioden 3,4 und 5

	Periode 3 18. Jun - 24. Jun (Do.-Mi.)	Periode 4 04. Aug -10. Aug (Di.-Mo.)	Periode 5 12. Aug - 15. Aug (Mi.-Sa.)
$W_{el,V,Netz} \rightarrow ETAN/SAVI$	0.61	0.56	0.66
$W_{el,PV,Prod} \rightarrow ETAN/SAVI$	1.66	1.69	1.67
$W_{el,PV,Nutz} \rightarrow ETAN/SAVI$	1.23	1.20	1.58
$W_{el,RS} \rightarrow ETAN/SAVI$	4.02	5.40	2.09
$W_{el,V,GWK} \rightarrow ETAN/SAVI$	1.10	0.93	1.10
$W_{el,V,anderer} \rightarrow ETAN/SAVI$	0.82	0.82	1.00
$Q_{ES,Laden} [kWh]$	1431	609	457
$Q_{ES,Entladen} [kWh]$	1216	470	392
Betriebsmodus	2	1	1
$n_{ES,Summe}$	4.27	1.46	1.06
n_{ES}	1	0	0
$\eta_{th,ES}$	0.954	0.819	0.895
$\eta_{ex,ES}$	0.643	0.580	0.635
EVA_{ETAN}/EVA_{SAVI}	0.738	0.709	0.944
$\bar{T}_{A,ohneRS} [^{\circ}C]$	15.6	18.1	20.4

Vergleicht man lediglich die Perioden 3 und 4, bestätigt sich die Funktionsweise des Eisspeichers. In Abschnitt 3 herrschte Betriebsmodus 2, wodurch der Eisspeicher deutlich mehr genutzt wurde. Dies führte zu höherem Energieverbrauch der Kälteanlage, leicht erhöhter PV-Direktnutzung und schlussendlich auch zu geringerer Rückspeisung. Dabei blieben die PV-Produktion und der Energieverbrauch anderer Aggregate konstant. Wird Periode 5 mit einbezogen, können diese Zusammenhänge nicht verifiziert werden. Versucht man Abweichungen zu ergründen, zeigt sich eine beschränkte Beobachtbarkeit beider Systeme.

Analysen anhand reiner Zielgrößenvergleiche beantworten folglich nicht alle Hypothesen. Die Auswertung wurde in einem Mittelweg aus Zusammenhängen in Diagrammen und Messwertvergleichen umgesetzt.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Eisspeichersystem

Folgende Ergebnisse sind aus der Auswertung hervorgegangen:

- Die Eisspeichergrösse ist hinsichtlich der Kälteanlage limitiert
- Der Eisspeicher ist in der vorliegenden Systemkonfiguration von April bis Oktober effektiv nutzbar
- Betriebsmodus 2 bewirkt eine intensivere Eisspeichernutzung als Betriebsmodus 1, führt aber dennoch nicht zu höherem Systemnutzen
- Der Eisspeicher erbringt im untersuchten Fall nicht die gewünschten Stromeinsparungen im Entladebetrieb
- Mittels Eisspeichereinsatz steigt der absolute Eigenverbrauch, bringt jedoch wirtschaftliche Nachteile
- Hinsichtlich der Einspeiseleistung kann das Stromnetz entlastet werden. Aufgrund der Einseitigkeit ist dies jedoch unwirtschaftlich
- Die PV-Anlage bewirkt hauptsächlich eine Verminderung der Lastspitzen im Netzbezug (Peak-Shaving)
- Eine Verschiebung des maximalen Netzbezugs (Load-Shifting) konnte nicht nachgewiesen werden. Die maximale Netzeinspeisung ist steuerbar

Die Ergebnisse werden nachfolgend mittels spezifischer Analysen belegt.

Die Eisspeichergrösse ist hinsichtlich der Kälteanlage limitiert

Als Ansatz zur Eisspeicherdimensionierung wurden in der Anfangsphase Einspeisedaten der Coop-Filiale Fully verwendet. Es wurde das Ziel gesetzt, 70% des überschüssigen PV-Stroms zu speichern. Aus der jährlichen Stromeinspeisung konnte man somit die mittlere elektrische Lade- und Entladeleistung der Eisspeicher-Verdichter ermitteln. Der Eisspeicher soll sich im Schnitt innerhalb von 10 Stunden laden und binnen 14 Stunden entladen. Mit diesen Daten sowie Annahmen zur Anlageneffizienz konnte man die benötigte Wärmeleistung zum und aus dem Eisspeicher berechnen. Die Filiale Fully besitzt eine PV-Anlage mit 108 kWp ohne Fassadenmodule, was einer geringeren Einspeiseleistung als in ETAN entspricht. Der vom Hersteller offerierte Eisspeicher war grösser als ursprünglich berechnet, deckte sich aber in etwa mit der angepassten PV-Anlagengrösse. Nach den Auslegungsdaten sollte der Eisspeicher somit noch 60% des überschüssigen PV-Stroms in ETAN aufnehmen können und damit den Eigenstromverbrauch der PV-Anlage von 67% (ohne Eisspeicher) auf 87% (mit Eisspeicher) anheben bzw. den Netzstrombezug von 54% pro Jahr auf 46% pro Jahr senken. Bezogen auf diesen Ansatz liegt die Eisspeicherkapazität im Rahmen der Auslegung. In Betriebsmodus 1 benötigt eine komplette Ladung unter Vollast 6-8 Stunden.

Tabelle 12: Zähler der Eisspeicherladungen während dem zweiten Betriebsjahr

	2019		2020									
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
$n_{ES,Summe}$	1.4	0.6	0.4	2.8	1.1	3.0	12.6	17.2	-	13.2	19.1	5.5
n_{ES}	0	0	0	0	0	1	4	9	-	4	8	1



Durchschnittlich lädt sich der Speicher für die Perioden 1, 4, 5, 12, 14, 15 und 17 (Betriebsmodus 1) innerst 3 Stunden. Verursacht wird dies durch oft auftretende Teilentladungen. Das gleiche Bild zeigt sich in Betriebsmodus 2: Während den Perioden 2, 3, 6, 11, 13, 16 und 18 beträgt die mittlere Ladedauer 5.5 Stunden. Somit limitiert die Kälteanlage die Speicherkapazität, sie benötigt durchschnittlich weniger Entladeenergie als angenommen. Betriebsmodus 1 bestätigt dies, da maximale Wärmeströme von 20 kW zur Entladung beobachtbar sind. In Modus 2 werden die angestrebten 35 kW durchaus erreicht, dieser entspricht auch einem höheren Entladebedarf als nach Auslegeparametern. Die tiefere Entladeleistung kann auch darauf hindeuten, dass die Kältemaschine beim Entladen effizienter läuft als angenommen. Schlussendlich bestimmt also der Kältebedarf der Filiale, die Anlageneffizienz im Entladebetrieb sowie die Aussentemperaturen am Standort die Eisspeichergrösse.

Der Eisspeicher ist in der vorliegenden Systemkonfiguration von April bis Oktober effektiv nutzbar

In Abbildung 17 sind $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$ sowie die Anzahl Ladungen und Teilladungen über das zweite Betriebsjahr aufgezeichnet. Es ist ersichtlich, dass $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$ während April bis September über der Einsatzgrenze von 10 °C liegt und der Eisspeicher in diesen Monaten effektiv genutzt wird. Im Oktober liegt dieser Wert knapp unter 10 °C, jedoch ist auch dort noch Eisspeicherbetrieb erkennbar. Je näher $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$ an der Einsatzgrenze liegt, desto weniger kann der Eisspeicher grundsätzlich genutzt werden.

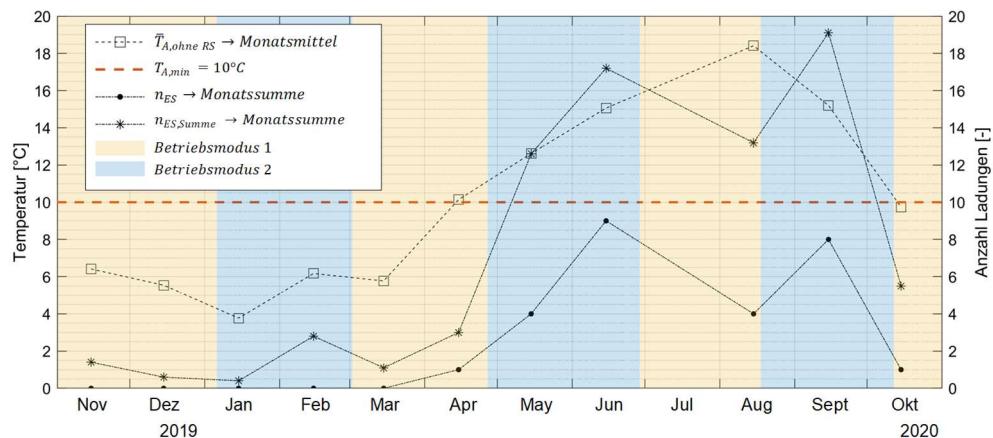


Abbildung 17: $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$, Anzahl Ladungen und Summe der Teilladungen während dem zweiten Betriebsjahr

Betrachtet man die Ladezyklen (Tabelle 13), ist der Einfluss der Betriebsmodi auf die Nutzungsdauer zu erkennen. Wenn ein Jahr nur im Modus 2 gefahren wird, kann der Eisspeicher länger verwendet werden.

Tabelle 13: Zielgrössen zur Untersuchung des Eisspeicherbetriebs über das zweite Betriebsjahr

	2019		2020									
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	414	235	167	884	443	1077	3935	5326	2267	4313	5647	1793
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	70	120	107	839	222	801	3733	5029	1885	3992	5586	1312
Betriebsmodus	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$n_{ES,Summe}$	1.4	0.6	0.4	2.8	1.1	3.0	12.6	17.2	-	13.2	19.1	5.5
n_{ES}	0	0	0	0	0	1	4	9	-	4	8	1
$\eta_{th,ES}$	0.30	0.52	0.52	0.87	0.60	0.73	0.94	0.95	-	0.92	0.96	0.86
$\eta_{ex,ES}$	0.22	0.37	0.36	0.58	0.43	0.49	0.63	0.62	-	0.61	0.62	0.58
$\bar{T}_{A,Ohne\ RS}$ [°C]	6.4	5.5	3.8	6.2	5.8	10.1	12.6	15.1	-	18.4	15.2	9.7



Betriebsmodus 2 bewirkt eine intensivere Eisspeichernutzung als Betriebsmodus 1, führt aber dennoch nicht zu höherem Systemnutzen

In Tabelle 14 sind ermittelte Zielgrößen aus ETAN für die Perioden 3 & 4 aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass der Eisspeicher in Betriebsmodus 2 deutlich mehr genutzt wird. Dies wirkt sich positiv auf Ladewirkungsgrade aus, Verluste durch Selbstentladung werden mit intensiverer Nutzung stark reduziert. $\bar{T}_{A,ohne\ RS}$ verstärkt die Aussage: Unter Betriebsmodus 2 herrschten schlechtere Bedingungen zur Eisspeichernutzung und trotzdem wurde dieser mehr eingesetzt. Dieses Bild zeigt sich durchgehend, auch Periode 5 bestätigt eine intensivere Eisspeichernutzung mit Betriebsmodus 2.

Tabelle 14: Vergleich von Zielgrößen der Filiale ETAN zwischen April und Mai 2020

Zielgröße	Periode 3	Periode 4	$\frac{Wert\ Periode\ 3}{Wert\ Periode\ 4}$	$\frac{Wert\ Periode\ 3}{Wert\ Periode\ 4} \cdot 100\%$
$W_{el,V,tot} [kWh]$	5316	5106	1.041	+4.1 %
$W_{el,V,Netz} [kWh]$	1649	1830	0.901	- 9.9 %
$W_{el,PV,Prod} [kWh]$	5888	5235	1.125	+12.5 %
$W_{el,PV,Nutz} [kWh]$	3667	3276	1.119	+11.9 %
$W_{el,RS} [kWh]$	2222	1959	1.134	+13.4 %
$W_{el,V,GWK} [kWh]$	2680	2495	1.074	+7.4 %
$W_{el,V,Andere} [kWh]$	2624	2610	1.005	+0.5 %
$Q_{ES,Laden} [kWh]$ (thermisch)	1431	609	2.350	+135.0 %
$Q_{ES,Entladen} [kWh]$ (thermisch)	1216	470	2.587	+158.7 %
Betriebsmodus	2	1	-	-
$n_{ES,Summe} [-]$	4.27	1.46	2.925	+192.5%
$n_{ES} [-]$	0	0	-	-
$\eta_{th,ES} [-]$	0.954	0.819	-	-
$\eta_{ex,ES} [-]$	0.643	0.580	-	-
$\bar{T}_{A,Ohne\ RS} [^{\circ}C]$	15.6	18.1	-	-

Das Verhalten ist in allen Perioden auffindbar und im Vergleich zwischen Abbildung 18 und Abbildung 19 ebenfalls grafisch zu beobachten.

Der Eisspeicher erbringt im untersuchten Fall nicht die gewünschten Stromeinsparungen im Entladebetrieb

Grundsätzlich wurde erwartet, dass durch den Eisspeichereinsatz der Eigenverbrauchsanteil steigt, indem tagsüber überschüssiger PV-Strom gespeichert und dieser in der Nacht wiederverwendet wird. Dies sollte sich im geringeren Netzstromverbrauch der Kälteanlagewährend der Nacht zeigen. Vergleicht man zwischen den Filialen ETAN und SAVI, kann dieser Sachverhalt für beide Betriebsmodi nicht bestätigt werden. In Abbildung 18 sowie Abbildung 19 ist im oberen Teil jeweils die Differenz $P_{el,V,GWK,ETAN} - P_{el,V,GWK,SAVI}$ aufgezeigt. Im unteren Bereich ist die thermische Leistung der Eisspeicherladung und -entladung zu sehen. Abbildung 18 zeigt den Vergleich mit Betriebsmodus 1 für ETAN. Darin ist zu erkennen, dass sich die Mehrbelastung im Ladebetrieb (rote Flächen) beim Entladen nicht widerspiegelt. Peaks der Entladung wie am 10. August vor der Ladephase lassen vermuten, dass der Eisspeicher den Stromverbrauch in ETAN effektiv senkt. Jedoch sind Zeiten mit tieferem Verbrauch der Kälteanlage ETAN (blaue Flächen) nicht durchgängig auf die Eisspeicherentladung zurückzuführen.



Ein markantes Beispiel dafür ist der 7. August. Während keine Entladung stattfand, war trotzdem ein tieferer Stromverbrauch der Kälteanlage in ETAN zu verzeichnen. Das varierende Verhalten kann auf diverse Einflussgrößen wie Aussentemperatur, Kundenverhalten, etc. rückführbar sein.

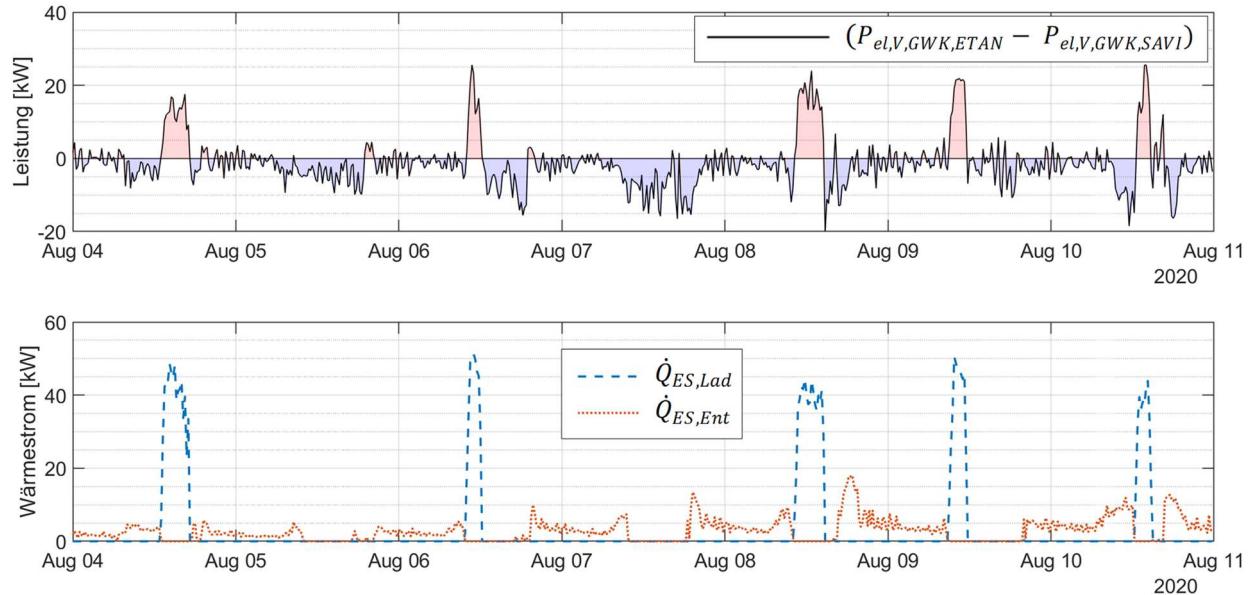


Abbildung 18: Verlauf der Stromverbrauchs-Differenz der Kälteanlagen ETAN und SAVI (oben) und Lade-/Entladezyklen (unten) in Periode 4 (Betriebsmodus 1 in ETAN)

Abbildung 19 zeigt denselben Vergleich mit Betriebsmodus 2 für ETAN. Auch darin zeigt sich die Mehrbelastung der Kälteanlage beim Laden nicht in einem geringeren Stromverbrauch während des späteren Entladens. In Betriebsmodus 2 wird der Eisspeicher zwar intensiver genutzt, jedoch korrelieren auch darin die Zeiten mit geringerem Stromverbrauch nicht mit der Eisspeicherentladung.

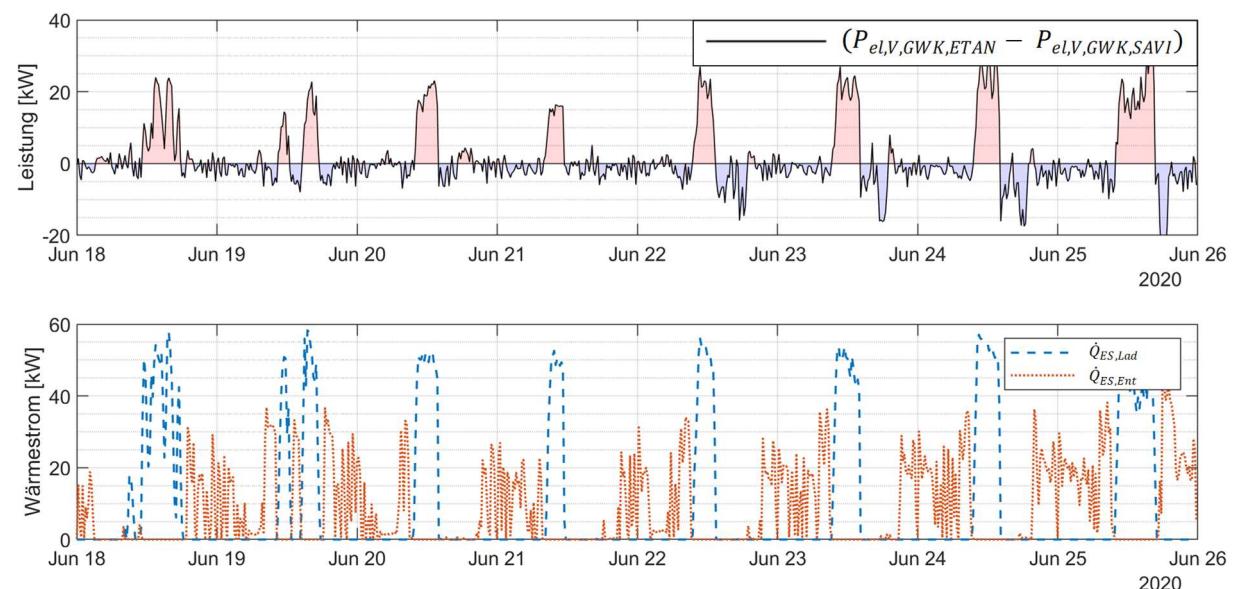


Abbildung 19: Verlauf der Stromverbrauchs differenz der Kälteanlagen ETAN und SAVI (oben) und Lade-/Entladezyklen (unten) in Periode 3 (Betriebsmodus 2 in ETAN)



Anhand einer exergetischen Systembetrachtung kann dieses Verhalten erklärt werden. Beim Laden wird elektrische Energie in thermische umgewandelt, was diese entwertet. Nach Auslegungsbedingungen wird bei einer Ladeleistung von 65 kW thermisch rund 9 kW Exergie geladen ($T_{Ref} = 35^\circ\text{C}$). Nähme man an, dass diese Exergie rein elektrisch ist, wird nur ein Teil der benötigten PV-Energie im Eisspeicher gelagert. Der Grossteil wird für Energieumwandlung und -transport aufgewendet. Die Ladung findet bei einer logarithmischen Mitteltemperatur von -2°C statt, die Entladung bei 6°C . Dies reduziert den Exergieanteil weiter. Nach Auslegungsbedingungen beträgt dieser beim Laden 13.6 % und beim Entladen 10.4% der thermischen Leistung. Da schlussendlich der Stromverbrauch der Kälteanlage, also reine Exergie, eingespart werden soll spielt dies einen entscheidenden Faktor.

Ein zusätzliches Problem sind Stillstandszeiten. Der Eisspeicher kann unter 10°C Aussentemperatur nicht genutzt werden, was in der Übergangszeit zu längeren Stillstandszeiten und somit zu vermehrter Selbstentladung führt. Dadurch geht gespeicherte Energie verloren.

Neben der Energieentwertung verringern Effizienzunterschiede der Kältemaschine zwischen Lade- und Entladebetrieb den Nutzen. Die Eisspeicherladung erfolgt bei vergleichsweise hohen Aussentemperaturen, unter welchen die Kältemaschine nur mit tiefer Effizienz betrieben werden kann. Überschüssige PV-Energie wird somit unter hohem Aufwand gespeichert. Entladen wird normalerweise in der Nacht, in der die Kältemaschine aufgrund tieferer Aussentemperaturen ohnehin effizienter läuft. Da sie durch den Eisspeicher thermisch unterstützt wird, minimiert ein hoher EER elektrische Energieeinsparungen. Je tiefer die Aussentemperatur, desto effizienter die Kältemaschine und desto kleiner die elektrische Energieeinsparung durch Eisspeicherentladung. Betriebsmodus 2 verstärkt diesen Effekt. Da während Modus 2 generell ein tieferer Hochdruck herrscht, steigt der EER der Kälteanlage.

Zusammengefasst konnte im untersuchten System noch kein Nutzen aufgrund des Eisspeichers ermittelt werden. Einerseits besteht aufgrund der Theorie die Annahme, dass das Konzept funktioniert, andererseits kann aufgrund der Messdaten kein Beweis dafür gefunden werden. Zudem spricht die exergetische Begründung gegen einen effektiven Nutzen. Es sind noch zu viele unbekannte Parameter vorhanden, um den Nutzen des Eisspeichers allgemein zu beweisen oder zu widerlegen.



Mittels Eisspeichereinsatz steigt der absolute Eigenverbrauch, bringt jedoch wirtschaftliche Nachteile

Tabelle 15 zeigt, dass aus dem Eigenverbrauchsanteil allein keine aussagekräftigen Schlüsse gezogen werden können. Aufgrund der grosszügig dimensionierten PV-Anlage der Filiale ETAN wird im Sommer reichlich Strom produziert, was den Eigenverbrauchsanteil senkt. In SAVI ist das gleiche zu beobachten, der Effekt ist jedoch aufgrund geringerer PV-Leistung schwächer ausgeprägt.

Tabelle 15: Eigenverbrauchsanteile der Filialen ETAN und SAVI über das zweite Betriebsjahr

	2019		2020									
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
EVA_{ETAN}	0.81	0.81	0.71	0.63	0.54	0.50	0.54	0.66	0.61	0.71	0.80	0.78
EVA_{SAVI}	0.94	0.96	0.95	0.92	0.78	0.79	0.76	0.85	0.88	0.86	0.90	0.91

Entgegen des Eigenverbrauchsanteils wird jedoch der absolute Eigenverbrauch gesteigert, was aufgrund der Regelparameter gegeben ist. Abbildung 20 zeigt diesen Sachverhalt. Es ist klar zu sehen, dass die Eisspeicherladung den Stromverbrauch der Kälteanlage und somit auch die Direktnutzung von PV-Strom erhöht. Im Vergleich zwischen dem 5. und 6. August zeigt sich dies deutlich.

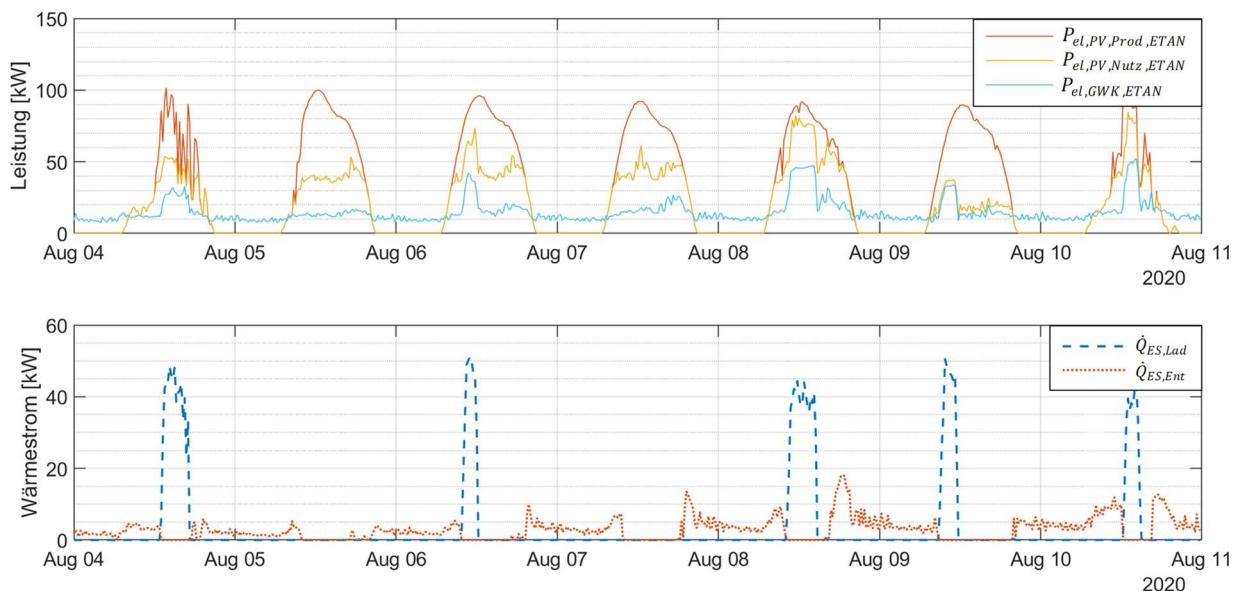


Abbildung 20: Elektrische Leistungen der PV-Nutzung, PV-Produktion sowie Stromverbrauch der Kälteanlage (oben), verglichen mit den Lade- und Entladezyklen des Eisspeichers in Periode 4 (Betriebsmodus 1 in ETAN)

Mit Betriebsmodus 2 wird der Eisspeicher intensiver genutzt, was den absoluten Eigenverbrauch zusätzlich steigert. Da Modus 2 jedoch einer künstlichen Erhöhung des Stromverbrauchs während PV-Produktion entspricht, ergeben sich dadurch finanzielle Nachteile. Die Einspeisung oder Direktnutzung in anderen Anwendungen ist aus ökonomischer und energietechnischer Sicht vorzuziehen.



Hinsichtlich der Einspeiseleistung kann das Stromnetz entlastet werden. Aufgrund der Einseitigkeit ist dies jedoch unwirtschaftlich

Ein Ziel des gezeigten Eisspeichersystems ist die Entlastung des Stromnetzes. Hinsichtlich geringerer Einspeiseleistung ist dies durch den gesteigerten Eigenverbrauch gegeben. Aufgrund der Regelparameter werden automatisch Teile des überschüssigen PV-Stroms zur Eisspeicherladung verwendet, anstatt diese in das Netz einzuspeisen. Während der Entladung sollte das Netz wiederum durch einen tieferen Strombedarf der Kälteanlage entlastet werden. Wie bereits erwähnt, konnte dies nicht bewiesen werden. Eine Netzentlastung findet somit in Bezug auf die gesenkten Einspeiseleistung statt, wobei Betriebsmodus 2 gewinnbringender als Modus 1 ist.

Wichtig ist zu wissen, was Betriebsmodus 2 genau bedeutet: in diesem wird Wärme, welche in Modus 1 durch den Gaskühler weggeführt wird, zum Eisspeicher geleitet. Diese Wärme entnimmt man später wieder mit Antriebsenergie aus der PV-Anlage. Im Grunde wird also der Stromverbrauch der Kälteanlage zu Zeiten von PV-Überschuss künstlich erhöht, was energetisch und wirtschaftlich gesehen Nachteile schafft. Einerseits könnte die verbrauchte Zusatzenergie durch Netzeinspeisung Einnahmen generieren, andererseits könnten weitere Anwendungen damit beliefert werden.

Es wird angenommen, dass Netzbetreiber zur Stabilisierung künftig Steuermassnahmen einführen könnten. Beispielsweise würden Einspeisesperren, Straftarife oder dynamische Strompreise dabei helfen, starke Frequenzschwankungen durch PV-Anlagen zu dämpfen. Schon heute können Netzbetreiber über Rundsteuersignale grosse Lasten oder PV-Anlagen zugunsten der Netzstabilität runterfahren. Wenn der Zuwachs an Photovoltaik weiter zunimmt, kann dies immer öfter vorkommen. Das vorgestellte Konzept sollte eine Lösung bieten, um solchen Massnahmen auszuweichen. Da nach aktuellem Wissensstand nur die Einspeiseleistung verringert wird, liegen günstigere Lösungen nahe. Etwa können moderne Solarwechselrichter durch korrekte Programmierung die Stromproduktion zu bestimmten Zeiten senken. Notfalls kann überschüssige Energie über Widerstände verbraucht werden. Um dennoch einen möglichst hohen Eigenverbrauch zu erzielen, bietet sich intelligentes Lastmanagement in der Filiale an.

Die PV-Anlage bewirkt hauptsächlich eine Verminderung der Lastspitzen im Netzbezug (Peak-Shaving)

Wie bereits erwähnt, senkt der Eisspeicher im Allgemeinen die Einspeiseleistung der Filiale ETAN, was zu einer Entlastung des Stromnetzes führt. Ebenfalls sollen Spitzenlasten im Netzbezug verringert werden (Peak-Shaving). Bei ETAN und SAVI wird in den Morgenstunden am meisten Netzstrom bezogen, was in Abbildung 21 sowie Abbildung 22 erkennbar ist. Der Netzbezug von ETAN liegt im Allgemeinen tiefer als bei SAVI, auch dessen Lastpeaks sind geringer.

Der gesenkte Netzbezug und das Peak-Shaving sind jedoch nicht eindeutig auf die Eisspeicherentladung rückführbar. Einerseits besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Peak-Shaving und der schneller ansteigenden PV-Produktion in ETAN. Dies macht Sinn, da ETAN im Vergleich zu SAVI Fassadenmodule besitzt, welche auch flach einfallende Solarstrahlung nutzen können. Andererseits ist die maximale Netzentlastung durch den Eisspeicher thermodynamisch limitiert. Wird der Netzverbrauchspeak am 6. August beachtet, ist dies zu erkennen. Er ist in ETAN rund 20 kW tiefer als in SAVI, während der Eisspeicher mit ca. 2 kW thermisch entladen wird.

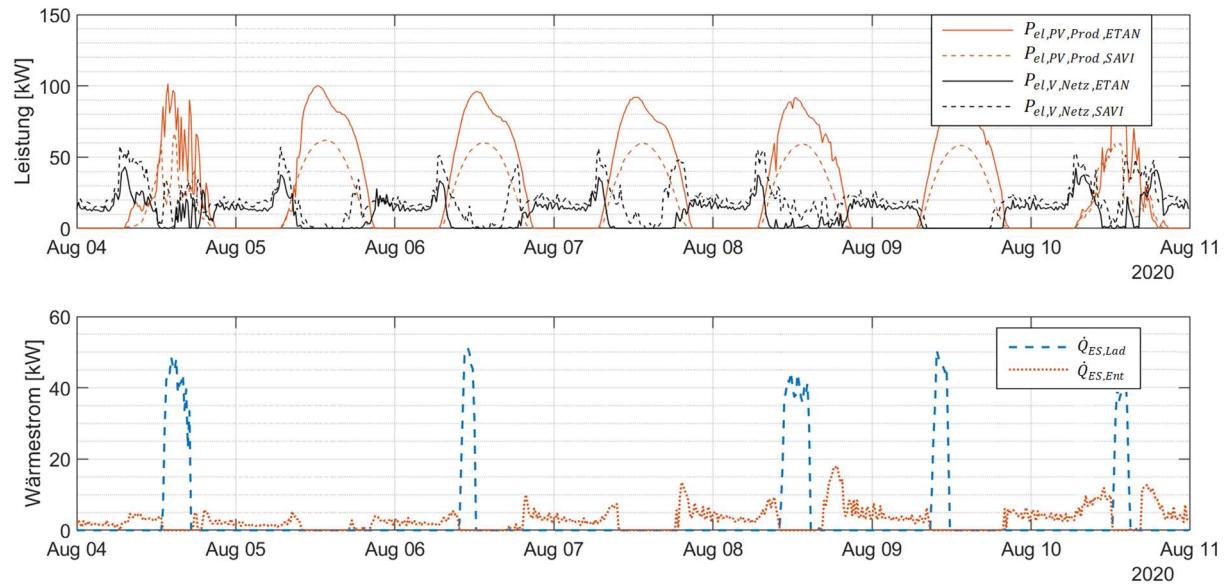


Abbildung 21: Vergleich von PV-Produktion und Netzbezug zwischen ETAN und SAVI (oben) sowie Lade- und Entladezyklen des Eisspeichers (unten) in Periode 4, Betriebsmodus 1 in ETAN

Zusätzlich sind im Vergleich zu Abbildung 22 unterschiedliche Entladeleistungen bei gleichen Netzstromeinsparungen beobachtbar. Auch zu Zeiten ohne Eisspeicherentladung (18. Juni) ist der elektrische Verbrauchspeak in ETAN geringer als in SAVI. Diese Aussagen decken sich mit dem Ergebnis, dass der Eisspeicher keine signifikanten Stromeinsparungen der Kälteanlage erzielt.

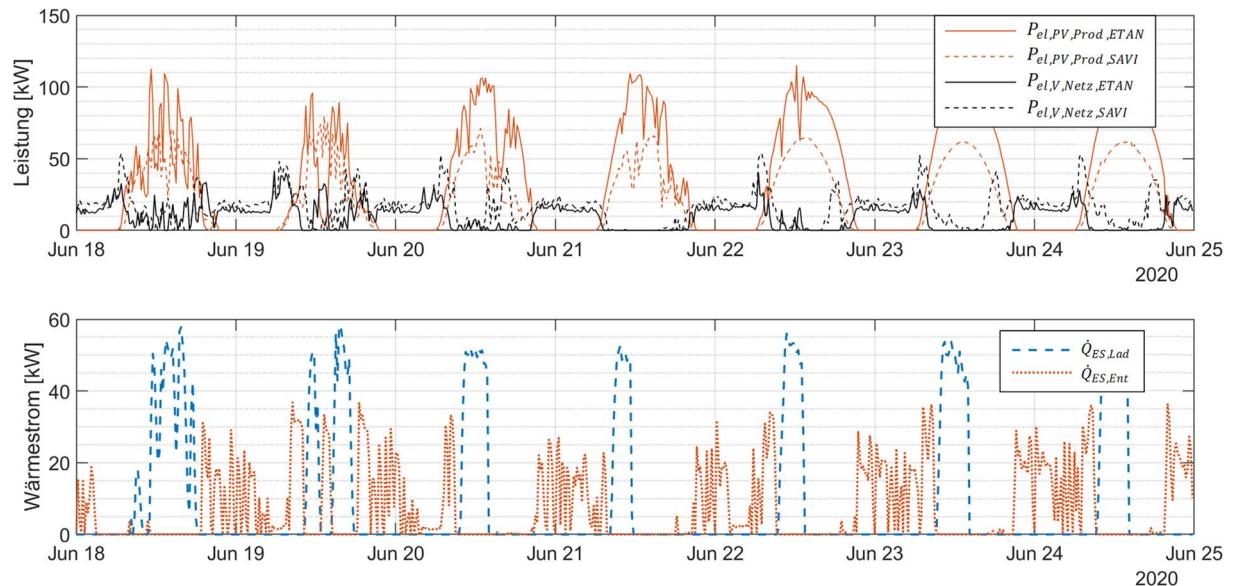


Abbildung 22: Vergleich von PV-Produktion und Netzbezug zwischen ETAN und SAVI (oben) sowie Lade- und Entladezyklen des Eisspeichers in (unten) in Periode 3 (Betriebsmodus 2 in ETAN)

Abbildung 23 sowie Abbildung 24 zeigen Ausschnitte, um den Sachverhalt genauer zu studieren. Am 5. August um 07:00 Uhr steigt die PV-Produktion beider Filialen gleich an, wobei ETAN nach wie vor weniger Netzstrom als SAVI benötigt. Dies deutet auf ein allgemein verbrauchsärmeres Regime der Filiale ETAN, zumal auch in diesem Zeitabschnitt 10 kW elektrische Einsparung nicht durch 1 kW thermische Entladung gewährleistet werden können.

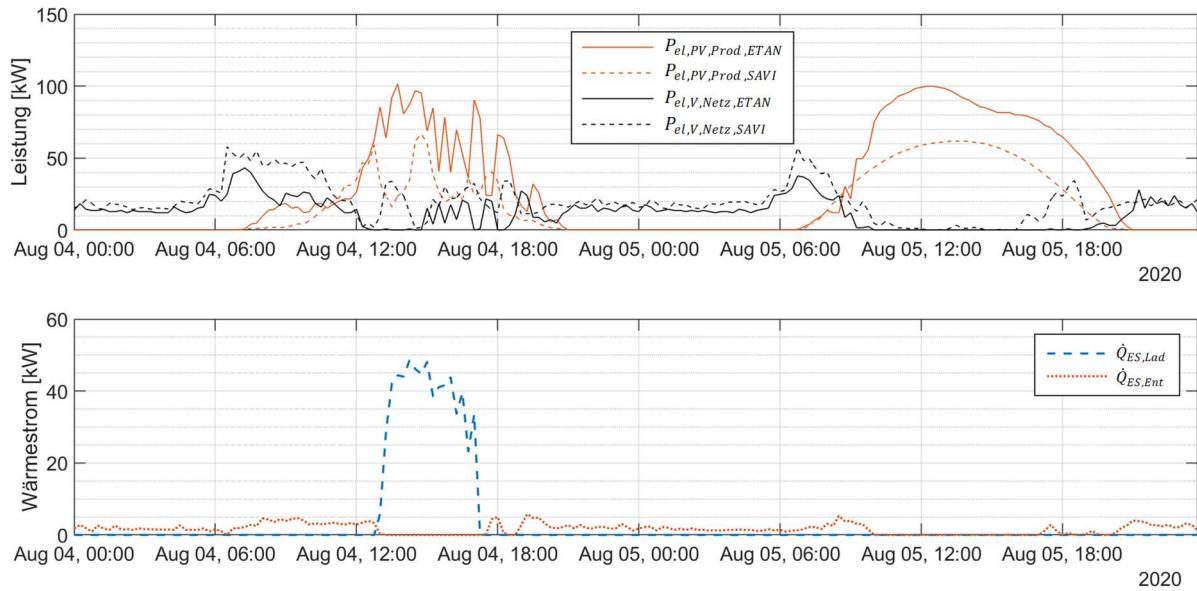


Abbildung 23: Vergleich von PV-Produktion und Netzbezug zwischen ETAN und SAVI (oben) sowie Lade- und Entladezyklen des Eisspeichers in (unten) vom 4. und 5. August 2020 (Betriebsmodus 1 in ETAN)

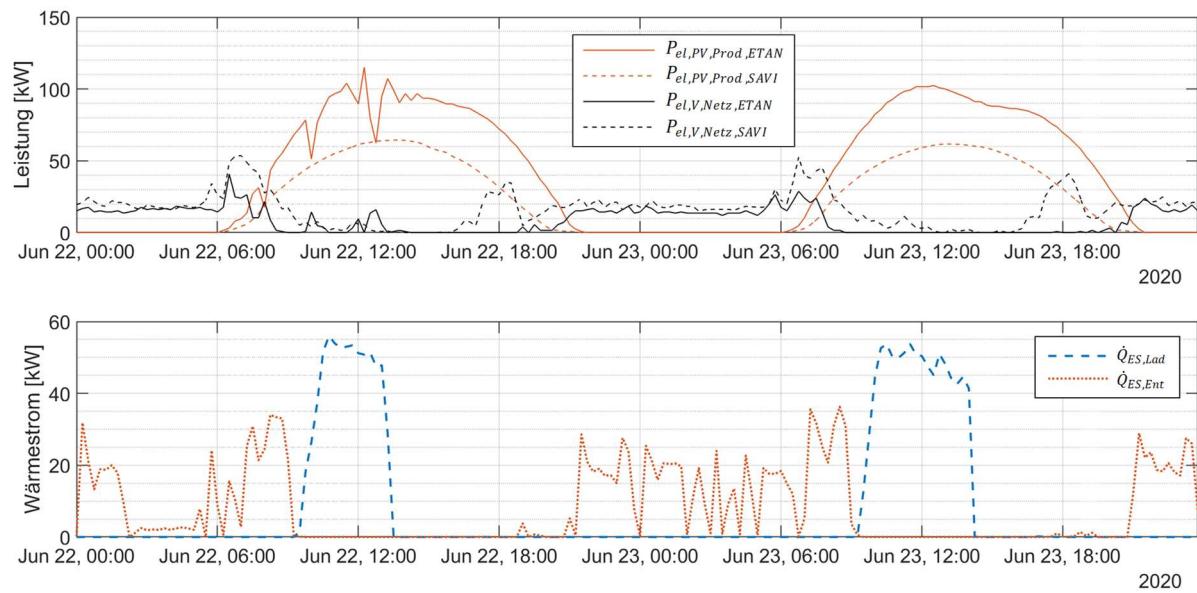


Abbildung 24: Vergleich von PV-Produktion und Netzbezug zwischen ETAN und SAVI (oben) sowie Lade- und Entladezyklen des Eisspeichers in (unten) am 22. und 23. Juni 2020 (Betriebsmodus 2 in ETAN)



Eine Verschiebung des maximalen Netzbezugs (Load-Shifting) konnte nicht nachgewiesen werden. Die maximale Netzeinspeisung ist steuerbar

Das allgemein bekannte «Peak-Shifting» kann in die Verschiebung vom maximalen Netzbezug (Load-Shifting) und Verlagerung der maximalen PV-Einspeisung eingeteilt werden. Mittels Load-Shifting wird der Netzbezug idealerweise verteilt, sodass zu Spitzenzeiten der allgemeinen Netznutzung keine Lastspitzen von den Filialen auftreten. An sonnenreichen Tagen ist das Potential für Load-Shifting fast ausgeschöpft, die PV-Produktion von ETAN und SAVI eliminiert deren Netzbezug. Der bereits erwähnte Verbrauchspeak während den Morgenstunden besteht, es wurden jedoch keine signifikanten Veränderungen mittels Eisspeicher festgestellt. Um die noch vorhandenen Netzverbrauchsspitzen weiter zu verringern, könnten andere Grossverbraucher (v.a. Backöfen) gezielt eingesetzt werden. Dies ist jedoch den Kundenbedürfnissen anzupassen.

Mit dem Eisspeichersystem können Spitzen der PV-Einspeisung gesteuert werden. Aufgrund des erhöhten Stromverbrauchs im Ladebetrieb werden diese auch leicht verschoben (siehe Abbildung 25). Da die leistungsstarke PV-Anlage massiv Strom produziert, sind keine grossen Änderungen zu erkennen. Bei kleineren Anlagen wäre der Peak intensiver beeinflusst. Die maximale Einspeiseleistung befindet sich nach wie vor in Zeiten allgemein starker Solarstromproduktion. Es bietet sich deshalb die Möglichkeit, den Eisspeicher erst ab einer gewissen Uhrzeit (z.B. ab 12:00 Uhr) zu laden.

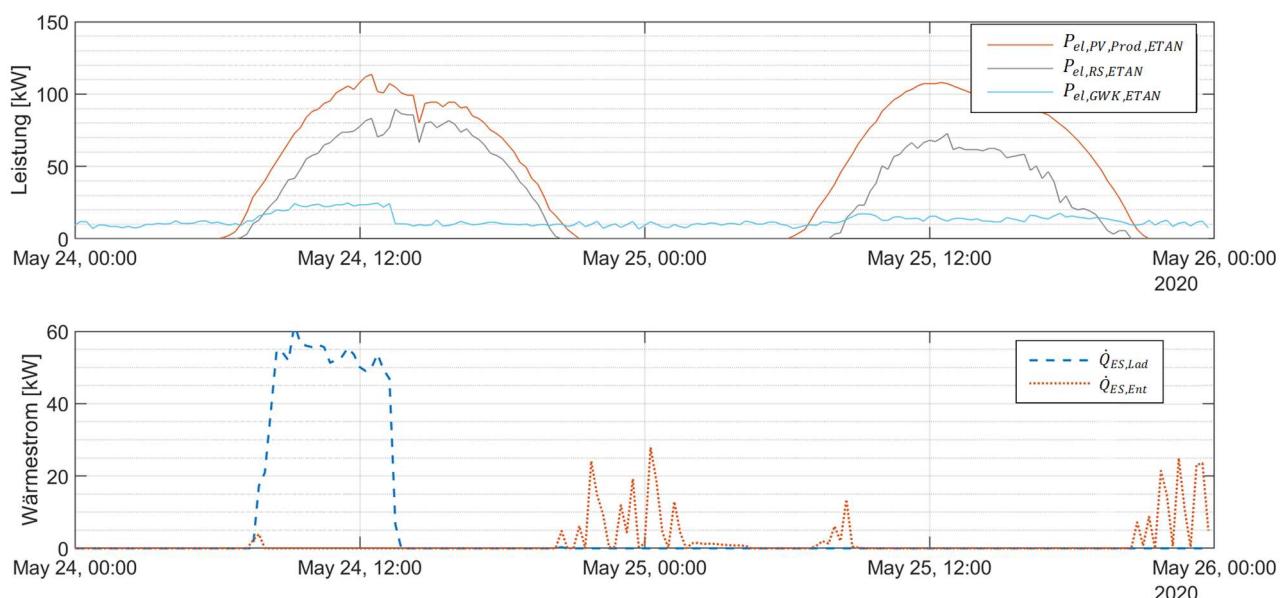


Abbildung 25: Analyse von Peak-Shifting hinsichtlich der Einspeiseleistung im Vergleich der Messdaten vom 24. und 25. Mai 2020

4.2 Photovoltaik-Anlage

Die grosszügig dimensionierte PV-Anlage in ETAN beeinträchtigt die Untersuchungen zum Eisspeichersystem. An sich ist sie jedoch ein erfolgreiches Konzept. Die Kombination aus Dach- und Fassadenmodulen bietet mehrere Vorteile: erstens wird durch die Nutzung aller zur Verfügung stehenden Flächen viel Strom produziert. Wird dieses Konzept weiterverfolgt, könnten Filialen als Mikrokraftwerke in regionale Netze oder Eigenverbrauchsgemeinschaften eingebunden werden. Zweitens wird ganzjährig eine hohe Stromausbeute erzielt, was in Tabelle 16 ersichtlich ist. Auch im Winter bei flachen Einstrahlungswinkeln können die Fassadenmodule noch ergiebig Strom produzieren.



Tabelle 16: Vergleich der elektrischen Leistungsdaten beider Filialen im zweiten Betriebsjahr

		2019			2020								
		Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
ETAN	$W_{el,V,tot}$ [kWh]	19306	20219	19605	18886	20319	19316	20880	21829	23022	23042	22233	21025
	$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	15333	17087	14580	13083	11098	7903	7862	8505	7911	9728	10507	14648
	$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	4912	3847	7101	9260	17123	22738	24023	20181	24677	18829	14694	8152
	$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	3973	3132	5025	5803	9221	11413	13018	13324	15111	13314	11726	6377
	$W_{el,RS}$ [kWh]	939	716	2076	3457	7901	11325	11005	6857	9567	5515	2967	1775
	EVA	0.81	0.81	0.71	0.63	0.54	0.50	0.54	0.66	0.61	0.71	0.80	0.78
SAVI	$W_{el,V,tot}$ [kWh]	24342	25800	26046	24572	23630	23283	24109	24185	26746	25253	24552	24506
	$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	20465	23103	21178	19748	15410	12162	12434	13045	13855	15119	15726	18849
	$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	4140	2807	5142	5228	10513	14021	15435	13153	14711	11854	9760	6194
	$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	3877	2697	4868	4824	8220	11121	11675	11140	12891	10134	8826	5657
	$W_{el,RS}$ [kWh]	4140	2807	5142	5228	10513	14021	15435	13153	14711	11854	9760	6194
	EVA	0.94	0.96	0.95	0.92	0.78	0.79	0.76	0.85	0.88	0.86	0.90	0.91

Im November 2019 besteht die geringste Differenz der PV-Produktion zwischen den Filialen, wo ETAN dennoch 772 kWh mehr Solarstrom produzierte. Im Maximum (Juli 2020) produzierte ETAN das 1.7-fache von SAVI. Drittens tragen die Fassadenmodule stark zum Peak-Shaving in den Morgenstunden bei. Da der Hochtarif üblicherweise um 6 Uhr morgens beginnt, können somit Stromkosten eingespart werden. Auch falls zukünftig Steuermassnahmen wie dynamische Strompreise gelten, bieten Fassadenmodule morgens und abends eine Lösung, Kosten zu senken.

Ein Nachteil bleibt die gesteigerte Einspeiseleistung, welche mit Speichersystemen wie dem gezeigten Eisspeicher verringert werden soll.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass ein Eisspeicher in eine direktverdampfende CO₂-Kälteanlage eingebunden werden kann. Dieser stellt eine günstige und umweltfreundliche Alternative zum Batteriespeicher dar. Mit dem vorgestellten System ist es möglich, den Stromverbrauch zu Zeiten von PV-Überschuss zu erhöhen, was eine Entlastung des Stromnetzes hinsichtlich der Einspeiseleistung erzielt. Da der gespeicherte Strom keinen Nutzen erzielt, liefert das Eisspeichersystem keine nennenswerten Vorteile gegenüber anderen Systemen wie beispielsweise Batteriespeichern. Das Potential für Load-Shifting ist aufgrund von fehlenden Stromeinsparungen beim Entladen sowie der leistungsfähigen PV-Anlage fast ausgeschöpft. Gezielte Anpassungen im Lastmanagement können den morgendlichen Netzverbrauchspeak auf Zeiten mit PV-Produktion verschieben. Durch Umprogrammieren der Laderegelung kann die Reduktion der Einspeiseleistung auf Spitzenzeiten des Netzes versetzt werden.

Das Speicherkonzept konnte nicht abschliessend bestätigt werden, im untersuchten Fall zeigt der Entladebetrieb keine signifikanten Stromeinsparungen der Kälteanlage. Es hat sich erwiesen, dass der Kältebedarf und die Effizienz der Kältemaschine während dem Entladen massgeblich die Speicherkapazität bestimmen. Dadurch ist der maximal aufzunehmenden PV-Leistung ebenfalls Grenzen gesetzt, wenn das Speicherkonzept effektiv umgesetzt werden will.

Eine überdimensionierte PV-Anlage wirkt dem Speicherkonzept entgegen. Dennoch wurden wichtige Vorteile, speziell der Nutzen von Fassadenmodulen, erkannt. ETAN und SAVI haben denselben Grundriss, jedoch PV-Anlagen unterschiedlicher Leistung. Dies zeigt, dass mit gleichen Bedingungen ein grosser Bereich an Solarstromproduktion abgedeckt werden kann. Mit dem Einbau von Fassadenmodulen sind verhältnismässig grosse Leistungen erzielbar. Diese haben sich erwiesen, um die Solarstromproduktion über den Tag zu verlängern und somit Lastenpeaks zu vermindern. Der einzige Nachteil solcher leistungsfähigen Anlagen bleibt die erhöhte Stromeinspeisung.

Vergleiche mit SAVI haben wichtige Erkenntnisse geliefert. Jedoch bestehen nach wie vor Abweichungen, welche einen abschliessenden Vergleich verhindern. Aufgrund der Theorie des hier vorgestellten Konzepts besteht die Vermutung, dass der Eisspeicher zur Speicherung von Solarstrom dienen kann. Weitere Untersuchungen innerhalb ETAN mit modifizierten Betriebsparametern werden zeigen, ob die hier gemachten Aussagen stimmen oder unzutreffend sind.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

6.1 Verfeinerung Messsystem

Die eingesetzten Messmittel lassen nur eine begrenzte Beobachtung des Systems zu. Um direkte Auswirkungen vom Eisspeicher auf die Kälteanlage aufzuschlüsseln, könnte man den Stromverbrauch der Verdichter einzeln messen. Schon die messtechnische Trennung der Eisspeicher-Verdichter von den restlichen führt zu erweiterten Informationen des Betriebs. Weitere Grossverbraucher, wie z.B. Backöfen sollten ebenfalls separat gemessen werden, sodass deren Einfluss als Störgrösse in weiteren Analysen bekannt ist. Durch den Einbau von vier Massenstromzählern im Kältemittelkreis liessen sich alle Wärmeströme und vor allem die Effizienz der Kältemaschine berechnen. Es wird vermutet, dass Effizienzunterschiede die Unterkühlerleistung des Eisspeichers im Stromverbrauch unbemerkt machen. Dies kann mit der Messung des Massenstroms bestätigt oder widerlegt werden. Eine genaue Messung des Kundenaufkommens bringt weiteres Wissen über zeitliche Schwankungen im Stromverbrauch der Kälteanlage.

6.2 Zusätzliche Betriebsweisen

Hinsichtlich maximierter Energieeffizienz macht es Sinn, den Eisspeicher nachts zu laden und tagsüber zu entladen. Die Kälteanlage wird somit bei hoher Effizienz mehrbelastet und bei tiefer unterstützt. PV-Energie kann dadurch nicht gespeichert werden, was auch keine Netzentlastung angesichts der Einspeiseleistung zulässt. Bei Filialen ohne PV-Anlage ist diese Variante jedoch ökonomisch prüfbar. Neben der Effizienzsteigerung steigt der Stromverbrauch im Niedertarif und wird während Hochtarifezeiten eingespart. Dies kann Stromkosten senken, vorausgesetzt die Eisspeicherentladung bewirkt ausreichende Stromeinsparungen. Der Betrieb von ETAN ohne Eisspeicher wird weitere Erkenntnisse zum Vergleich mit den jetzigen Betriebsmodi liefern. Dabei kann ein direkter Vergleich stattfinden, welcher unabhängig von filialspezifischen und geografischen Unterschieden ist.

Aufgrund des Kältebedarfs der Filiale ist der Eisspeicher in seiner Kapazität und Nutzungsdauer limitiert. Wenn man gezielt Teile der PV-Anlage abschaltet, kann das optimale Verhältnis zwischen Eisspeicherkapazität, Kältebedarf der Filiale und PV-Anlagenleistung ermittelt werden. Will man die aktuelle PV-Leistung beibehalten, können Regeloptimierungen zur Eisspeicherladung die Einspeisepeaks dämpfen. Es hat sich gezeigt, dass die Eisspeicherladung später erfolgen kann. Somit wird die Einspeiseleistung von ETAN zu Zeiten grosser Netzbelaistung (typischerweise 11:00 Uhr – 13:00 Uhr) verringert.

6.3 Weiterführende Untersuchungen in ETAN

Obwohl die Filiale SAVI ähnlich zu ETAN ist, bestehen dennoch gewisse Unterschiede, welche als Störgrössen bemerkbar sind. Der Netzverbrauch ist in SAVI durchgehend höher als in ETAN, zudem sind deren PV-Anlagen unterschiedlich, was enormen Einfluss auf den Vergleich hat. Des weiteren sind lokale Gegebenheiten für Differenzen in Aussentemperatur, Sonnenstunden, Modulverschaltung oder Kundenaufkommen verantwortlich. Mit den ermittelten Vergleichsperioden konnten Umweltbedingungen auf eine Stufe gestellt werden, jedoch bleiben filialspezifische Abweichungen, welche eine abschliessende Analyse verhindern. Es empfiehlt sich deshalb, weitere Analysen mit verschiedenen Szenarien innerhalb der Filiale ETAN durchzuführen. Da schwankende Umweltbedingungen besonderen Einfluss auf Vergleiche haben, sind zukünftige Messungen über ein



gesamtes Jahr mit einem Betriebsmodus vorteilhaft. Somit glätten sich saisonale Fluktuationen und eine gesamttheitliche Analyse wird ermöglicht.

Folgender Ablauf wäre in ETAN denkbar:

1. Die PV-Anlage wird in der Leistung soweit begrenzt, dass sie die Einspeiseleistung nach Auslegung erfüllt. Im Prinzip muss die PV-Anlage der Filiale Fully nachgebildet werden, was ein Abschalten der Fassademodule mit sich bringt.
2. Das Messsystem wird aufgerüstet. Mindestens die separate Messung der Eisspeicherverdichter sollte in Betracht gezogen werden, diese gewährt tiefere Einblicke zum Anlagenverhalten. Alle weiter genannten Massnahmen erlauben noch detailliertere Analysen. Vor allem das Wissen über die Anlageneffizienz ist ein wertvolles Instrument.
3. Ein Jahr Betrieb ohne Eisspeicher, was als neuer «Benchmark» für weitere Untersuchungen dient. Erste Vergleiche zwischen dieser Messung und den bereits durchgeföhrten können die vorliegenden Analysen bestätigen oder widerlegen.
4. Betrieb mit Modus 2 über ein Jahr. Somit sollten sich die Effekte des Eisspeichers deutlich zeigen.
5. Betrieb mit Modus 1 über ein Jahr. Daraus zeigt sich, ob das Eisspeichersystem in der dafür vorgesehenen Anwendungsweise funktioniert.
6. Weitere Betriebsfälle können nach Bedarf und Wissensstand angefügt werden.

6.4 Einsatz in anderen Ladenkonzepten

Eine direkte Nutzung vom Eisspeicher in Sole-/Wasser-Kreisläufen ist prüfenswert. In der Supermarktkälte sind direktverdampfende Anlagen aufgrund ihrer hohen Effizienz etabliert. Um dieses Konzept nicht zu verlassen, könnten beispielsweise Klimatisierungssysteme durch einen Eisspeicher unterstützt werden. Der Einsatz in Einkaufszentren wäre denkbar. Dort können Eisspeicher zu Randzeiten die Klimakälte ablösen. Speziell der Einsatz während der Abenddämmerung im Sommer oder an warmen, bewölkten Tagen kann den Strombedarf der Klimakälte senken. Gewerbekälteanlagen mit Wasser/Glykol-Kreislauf können durch einen Eisspeicher ebenfalls direkt unterstützt werden.

6.5 Batteriespeicher und direkte Nutzung überschüssiger PV-Energie

Um Umwandlungsverluste zu vermeiden, bieten die elektrische Speicherung oder die direkte Nutzung von Überschüssiger PV-Energie Lösungen. Ein Batteriespeicher kann alle Systeme einer Filiale beeinflussen, thermische Speicher haben nur Auswirkungen auf die Kälteanlage. Peak-Shaving kann also mit allen Stromverbrauchern einer Filiale umgesetzt werden. Die durchgeföhrte Lebenszyklusanalyse zeigte, dass neu hergestellte Batteriespeicher dem Eisspeicher umwelttechnisch unterlegen sind, Second-Life Batterien weisen höhere Treibhausgasemissionen auf, jedoch tiefere Umweltbelastungspunkte. Es liegt der Untersuchung jedoch die Annahme von korrekt funktionierenden Speichersystemen zugrunde. Im Projekt konnte der Nutzen vom Eisspeicher noch nicht bestätigt werden, weshalb dieser folglich in der LCA schlechter ausfallen würde. Somit können Batteriespeicher im Vergleich zum hier untersuchten System die umwelttechnisch bessere Lösung sein. Sie werden zunehmend günstiger, deren Preisentwicklung sollte fortlaufend beobachtet werden. Sobald diese preislich in den Bereich der Eisspeicher kommen, ist der Einsatz von Batterien aus wirtschaftlicher und energietechnischer Sicht vorzuziehen.



Weitere Nutzungen der überschüssigen PV-Energie sind zu evaluieren. Beispielsweise könnte mit Elektroauto-Ladesäulen überschüssiger Strom zu einem besseren Preis als mit Einspeisevergütung verkauft werden. Im weiteren Sinne bieten elektrische Carsharing-Fahrzeuge die Möglichkeit, diese als dynamische Batteriespeicher zu verwenden. Da über Reservationssysteme Informationen zur Nutzungszeit und -dauer bekannt sind, kann eine intelligente Regelung diese als Speicher nutzen und zugleich der Kundschaft ein vollgeladenes Auto zum gewünschten Zeitpunkt bereitstellen. Auch kann die Einbindung in Eigenverbrauchsgemeinschaften in Betracht gezogen werden. Da überschüssiger Strom lokal verbraucht wird, erfährt das Netz einerseits weniger Belastung, andererseits kann der Strom wieder teurer verkauft werden als mit der Einspeisevergütung. Diese Alternativen sind alle ebenfalls mit Kosten verbunden und müssen Anlagenspezifisch abgeklärt werden.



7 Kommunikation und Publikationen

Das Projekt ist seit Bekanntmachung auf Interesse bei Fachpersonen gestossen.

Folgende Publikationen zur Verbreitung der Technologie wurden im Rahmen des Projekts durchgeföhrt:

- Frommann Achim, mit Eisspeicher und Ökostrom, Kälte + Klimatechnik 7/2020, S. 18 – 21.⁴
- Frommann Achim, Eisspeicher und Ökostrom, Planer + Installateur, 4/2020, S. 60 – 63⁵
- Erik Wiedenmann und Jonas Schönenberger, Die Energie der Sonne eingefroren: CO2-Kälteanlage mit Eisspeicher und Photovoltaik, Kälte Klima Aktuell, 3/2020, S. 42 – 45⁶
- Die Energie der Sonne eingefroren, Alimenta 18/2019, S. 31 – 32⁷
- Wiedenmann et al. 2019, CO₂-Kälteanlage mit Eisspeicher und Photovoltaik, DKV-Tagung 2019, Ulm
- Thomas Compagno, Die Energie, die aus der Kälte kommt, Coopzeitung, Nr. 1 vom 31. Dezember 2018⁸
- Taten statt Worte, Durch Sonnenenergie Kälte erzeugen – Meilenstein für CO₂ Neutralität, 13.11.2018⁹
- Wiedenmann et al. 2018, Zusammenspiel einer CO₂-Kälteanlage mit Eisspeicher und Photovoltaik, DKV-Tagung 2018, Aachen, AA.III 19

Dieses Projekt hat zwei Awards gewonnen:

- EHI Energiemanagement Award 2019 in der Kategorie " Innovative Energieeffizienztechnologien"¹⁰
- Energy Globe Award 2020 – Switzerland¹¹

⁴ Das Dokument steht auf der Webseite [kk_07_2020_Beleg-020720.pdf](#) (gentnerverlag.de) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

⁵ Das Dokument steht auf der Webseite [planerinstallateur-magazin.pdf](#) (gebaeudetechnik.ch) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

⁶ Das Dokument steht auf der Webseite [Die Energie der Sonne eingefroren - Kälte Klima Aktuell \(kka-online.info\)](#) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

⁷ Das Dokument steht auf der Webseite [M_Ernaehrungswissenschaft_4596905.icml](#) (frigoconsulting.ch) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

⁸ Das Dokument steht auf der Webseite [Die Energie, die aus der Kälte kommt | Coopzeitung](#) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

⁹ Das Text steht auf der Webseite [Kälte durch Sonne Dank Eisspeicher – Taten statt Worte \(taten-statt-worte.ch\)](#) zur Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

¹⁰ Mehr Informationen: [Intelligente Kooperation, monetäre Anreize und selbstlernende Anlagen - EHI Retail Institute - EHI Retail Institute](#) Verfügung (Letzter Zugriff im Dezember 2020)

¹¹ Mehr Informationen: [National winner \(energyglobe.info\)](#) (Letzter Zugriff im Dezember 2020)



8 Literaturverzeichnis

- [1] D. Philippen, D. Carbonell, M. Battaglia, Haller M. und S. Brunold, «Niedertemperatur Eisspeicher-Heizung mit thermischer Enteisung,» Bundesamt für Energie BFE, Rapperswil-Jona, 2020.
- [2] D. Philippen, D. Carbonell , D. Zenhäusern , M. Granzotto, M. Haller und S. Brunold, «High-Ice: System development for high solar thermal gains with ice storage and heat pump,» Bundesamt für Energie BFE, 2015.
- [3] H. R., «Planungszentrum Linth AG, Uznach: Heizen und Kühlen mit saisonalen Energiespeichern, Solar-Luft-Absorbern und Sole-Wasser-Wärepumpen, Efrolgskontrolle,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2015.
- [4] B. Rismanchi , R. Saidur, H. Masjuki und T. Mahlia , «Cost-benefit analysis of using cold thermal energy storage systems in building applications,» *Energy Procedia*, Nr. 14, pp. 493-498, 2012.
- [5] S. A. Ghoreishi-Madiseh, A. F. Kuyuk, H. Kalantari und A. P. Sasmito , «Ice versus battery storage; a case for integration of renewable energy in refrigeration systems of remote sites,» *Energy Procedia*, Nr. 159, pp. 60-65, 2019.
- [6] FAFCO, *Technische Daten für ein ICEBAT Type UW 155/2/9 A*, 2017.
- [7] EnergieSchweiz, «Stationäre Batteriespeicher in Gebäuden,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [8] R. Tevis, N. Schuster, F. Evans, R. Himmeler und S. H. Gheewala, «A multi-scenario life cycle impact comparison of operational energy supply techniques for an office building in Thailand,» *Energy & Buildings*, Nr. 190, pp. 172-182, 2019.
- [9] KBOB, «Ökobilanzdaten im Baubereich,» 2009/1:2016.
- [10] P. Stoltz und R. Frischknecht, «Ökobilanz PV-Anlage und Batterie für das Garderoben- und Clubgebäude in Zürich Höngg - Schlussbericht,» Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Zürich, 2019.
- [11] L. Ellingsen Ager-Wick, C. R. Hung und A. Stromman Hammer, «Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Nr. 55, pp. 82-90, 2017.
- [12] M. Sattler, B. Hausammann, M. Held, M. Chopard, A. Jungo, M. Kyburz und R. Gerhard, «Stromspeichersystem mit Second-Life Akkumulatoren (SL-Speicher),» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2018.
- [13] R. Stephan, «Mehr Eigenverbrauch mit Batteriespeichern?,» *Bulletin.ch*, pp. 22 - 27, October 2018.
- [14] M. Pons, *On the Reference State for Exergy when Ambient Temperature Fluctuates*, International Journal of Thermodynamics, 2009.
- [15] R. Waldi, Statistische Datenanalyse. Grundlagen und Methoden für Physiker, 2. Hrsg., Berlin: Springer Spektrum, 2015, p. 75.
- [16] C. Gaegauf, M. Sattler , V. Dorer, K. Orehoungi, G. Zweifel, C. Bless , T. Bergmann, Del Duce und A., «SPEQUA - Thermische und elektrische Speicher in Gebäuden und Quartieren,» Bundesamt für Energie BFE, Langenbruck, 2016.
- [17] L. Ellingsen , C. R. Hung und A. Stromann Hammer, «Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on



greenhous gas emissions,» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Nr. 55, pp. 82-90, August 2017.



Anhang 1 – Berechnung der Messunsicherheit

Die Messunsicherheiten der Temperaturfühler, Drucksensoren und elektrischen Leistungsmessung konnten anhand der Angaben von Sensordatenblättern sowie den Auslegungsdaten berechnet werden. Zusätzliche Fehlerquellen wie Verkabelung, Signalumwandlung sowie -umrechnung sind nicht berücksichtigt. Allfällige weitere Bedingungen sind in den entsprechenden Tabellen im Anhang 2 direkt angegeben. Die erwartete Messunsicherheit der Wärme- und Exergieströme wurde mit Hilfe einer Linearisierung der Berechnungsfunktionen gemäss [15] berechnet. Dabei gilt für eine allgemeine Funktion mit nicht korrelierenden Messwerten:

$$2 u(\phi(x, y, \dots)) \approx 2 \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 u(x)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 u(y)^2 + \dots}$$

$u(\phi(x, y, \dots)) = \text{kombinierte Unsicherheit der Zielgröße}$

$\phi(x, y, \dots) = \text{Zielfunktion der Zielgröße}$

$x, y, \dots = \text{Messgrößen}$

$u = \text{Messmittelunsicherheit gemäss Datenblatt}$

Für den Wärmestrom in und aus dem Eisspeicher lautet die Zielfunktion:

$$\dot{Q}_{ES,i} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{Aus,Q,ES} - T_{Ein,Q,ES}) = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (T_{Aus,Q,ES} - T_{Ein,Q,ES})$$

Die Messgrößen sind der Volumenstrom \dot{V} , die Eintrittstemperatur $T_{Ein,Q,ES}$ sowie die Austrittstemperatur $T_{Aus,Q,ES}$ des Eisspeicher-Wärmeübertragers. Die Dichte ρ und Wärmekapazität c_p wurden als konstant angenommen und bei der logarithmischen Mitteltemperatur der Wärmeübertragung bestimmt.

Für den Exergiestrom in und aus dem Eisspeicher lautet die Zielfunktion:

$$\dot{E}_{ex,ES,i} = \left(1 - \frac{T_{Ref}}{T_{m,ES}}\right) \dot{Q}_{ES,i} = \left(1 - \frac{T_{Ref}}{\frac{(T_{Aus,Q,ES} - T_{Ein,Q,ES})}{\ln\left(\frac{T_{Aus,Q,ES}}{T_{Ein,Q,ES}}\right)}}\right) \cdot \rho \cdot \dot{V} \cdot c_p \cdot (T_{Aus,Q,ES} - T_{Ein,Q,ES})$$

$$T_{Ref} = 9.97^\circ C \text{ (Regionale Jahresmitteltemperatur)} [14]$$

Hier sind die Messgrößen der Volumenstrom \dot{V} , die Eintrittstemperatur $T_{Ein,Q,ES}$, die Austrittstemperatur $T_{Aus,Q,ES}$ und die Referenz-Temperatur T_{Ref} . Die Dichte ρ und Wärmekapazität c_p wurden ebenfalls als konstant angenommen und bei der logarithmischen Mitteltemperatur der Wärmeübertragung bestimmt.



Anhang 2 – Detail Mess- und Zielgrößen

Gemessene Größen für die elektrische Leistung, Druck und Temperatur sind in Tabelle 17 bis Tabelle 19 aufgelistet. Zur Darstellung der Messunsicherheit wurden die Auslegungsdaten verwendet, allfällige Zusatzbedingungen der Unsicherheitsberechnung sind in den entsprechenden Tabellen direkt angegeben.

Tabelle 17: Messgrößen für die elektrische Leistung und deren Unsicherheit

Symbol	Bezeichnung	Wert Auslegung \pm Messunsicherheit [abs]	Mess-unsicherheit [rel]
$P_{el,PV,Prod}$	Elektrische Leistung PV-Produktion	190 \pm 1.90 kW	1.0 %
$P_{el,PV,Nutz}$	Elektrische Leistung PV-Direktnutzung	61 \pm 0.86 kW	1.4 %
$P_{el,V,Netz}$	Elektrische Leistung Verbrauch Filiale aus Netz	75 \pm 0.75 kW	1.0 %
$P_{el,RS}$	Elektrische Leistung PV-Einspeisung ins Netz	105 \pm 1.05 kW	1.0 %
$P_{el,V,GWK}$	Elektrische Leistung Gewerbekälte	44 \pm 0.44 kW	1.0 %
$P_{el,V,Heiz}$	Elektrische Leistung Zusatzheizung	29 \pm 0.29 kW	1.0 %
$P_{el,AP}$	Elektrische Leistung Aussenbeleuchtung inkl. Parking	2 \pm 0.02 kW	1.0 %

Tabelle 18: Messgrößen für den Druck und deren Unsicherheit

Symbol	Bezeichnung	Wert Auslegung \pm Messunsicherheit [abs]	Mess-unsicherheit [rel]	Zusatzbedingung Messunsicherheit
p_{HD}	Hochdruck	92.0 \pm 0.67 bar	0.7 %	bei 36 °C
$p_{ND,ND-Stufe}$	Niederdruck ND-Stufe	14.0 \pm 0.26 bar	1.8 %	bei $T_{Aus, TK}$ -21 °C
$p_{SG,ND-Stufe}$	Sauggasdruck ND-Stufe	14.0 \pm 0.26 bar	1.8 %	bei $T_{Aus, TK}$ -21 °C
$p_{ND,HD-Stufe}$	Niederdruck HD-Stufe	28.0 \pm 0.28 bar	1.0 %	bei $T_{Aus, TK}$ 2 °C
$p_{SG,HD-Stufe}$	Sauggasdruck HD-Stufe	28.0 \pm 0.28 bar	1.0 %	bei $T_{Aus, PK}$ 2 °C
$p_{Aus,Verd\ ES}$	Druck Austritt Verdampfer Eisspeicherladung	28.0 \pm 0.28 bar	1.0 %	bei $T_{Aus, Verd\ ES}$ -1 °C
p_M	Mitteldruck	38.0 \pm 0.38 bar	1.0 %	bei 3 °C (Siedetemperatur R744 bei p_M)

Tabelle 19: Messgrößen für die Temperatur und deren Unsicherheit

Symbol	Bezeichnung	Wert Auslegung \pm Messunsicherheit [abs]
$T_{Ein,ES}$	Temperatur Eisspeicher Eintritt	-5 \pm 0.28 °C
$T_{Aus,ES}$	Temperatur Eisspeicher Austritt	1 \pm 0.22 °C
$T_{Ein,Q,ES}$	Temperatur Eisspeicher Eintritt Wärmezähler	-5 \pm 0.33 °C



$T_{Aus,Q,ES}$	Temperatur Eisspeicher Austritt Wärmezähler	1	\pm	0.31	°C
T_U	Temperatur Umgebung	34	\pm	0.88	°C
$T_{Ein,BWW}$	Temperatur Kältemittel Brauchwarmwasser Eintritt	110	\pm	1.50	°C
$T_{Aus,BWW}$	Temperatur Kältemittel Brauchwarmwasser Austritt	60	\pm	1.50	°C
$T_{Ein,PWW}$	Temperatur Kältemittel Pumpenwarmwasser Eintritt	110	\pm	1.50	°C
$T_{Aus,PWW}$	Temperatur Kältemittel Pumpenwarmwasser Austritt	30	\pm	1.50	°C
$T_{VL,PWW}$	Temperatur Wärmeträger Vorlauf Pumpenwarmwasser	27	\pm	1.50	°C
$T_{RL,PWW}$	Temperatur Wärmeträger Rücklauf Pumpenwarmwasser	27	\pm	1.50	°C
$T_{Ein,PK}$	Temperatur Kältemittel Pluskühlung Eintritt	-2	\pm	0.23	°C
$T_{Aus,PK}$	Temperatur Kältemittel Pluskühlung Austritt	2	\pm	0.24	°C
$T_{Ein,TK}$	Temperatur Kältemittel Tiefkühlung Eintritt	-2	\pm	0.23	°C
$T_{Aus,TK}$	Temperatur Kältemittel Tiefkühlung Austritt	-21	\pm	0.52	°C
$T_{Aus,gk}$	Temperatur Kältemittel Austritt Gaskühler	36	\pm	0.92	°C
$T_{gk,vor HD}$	Temperatur Kältemittel Austritt Gaskühler vor HD-Ventil	10	\pm	0.40	°C
$T_{Aus,DGE}$	Temperatur Kältemittel Austritt Druckgasentzucker	40	\pm	1.50	°C
$T_{Aus,Verd ES}$	Temperatur Kältemittel Austritt Verdampfer Eisspeicherladung	-1	\pm	0.22	°C

Um ein detaillierteres Bild des Eisspeicher-Verhaltens zu gewinnen, wurde zusätzlich ein Wärmezähler installiert. In Tabelle 20 ist die gemessene Grösse jeweils beim Laden und Entladen des Eisspeichers aufgelistet. Alle Messunsicherheiten wurden anhand von Sensordatenblättern, Auslegungsdaten und der in Anhang 1 gezeigten Berechnung ermittelt. Zusätzliche Fehlerquellen wie Verkabelung, Signalumwandlung sowie -umrechnung sind nicht berücksichtigt, zusätzliche Bedingungen der Messunsicherheit sind in der Tabelle direkt angegeben.

Tabelle 20: Messgrössen für die thermische Leistung des Eisspeichers und deren Unsicherheit

Symbol	Bezeichnung	Wert Auslegung \pm Messunsicherheit [abs]	Mess-unsicherheit [rel]	Zusatzbedingung Messunsicherheit
$\dot{Q}_{ES,Lad}$	Wärmestrom Eisspeicher Laden	65.0 \pm 4.84 kW	7.45 %	- Durchflussgeschwindigkeit > 0.5 m/s - $T_{Ein,Q,ES} = -5$ °C - $T_{Aus,Q,ES} = 1$ °C - Definition vom Durchfluss aus gegebenen Werten für Leistung und Temperaturen - Stoffwerte für Antifrogen L 40% bei $T_{m,ES} = -2$ °C verwendet
$\dot{Q}_{ES,Ent}$	Wärmestrom Eisspeicher Entladen (Unterkühlen)	35.0 \pm 4.09 kW	11.7 %	- Durchflussgeschwindigkeit > 0.5 m/s - $T_{Ein,ES} = 8$ °C - $T_{Aus,ES} = 4$ °C - Definition vom Durchfluss aus gegebenen Werten für Leistung und Temperaturen - Stoffwerte für Antifrogen L 40% bei $T_{m,ES} = 6$ °C verwendet



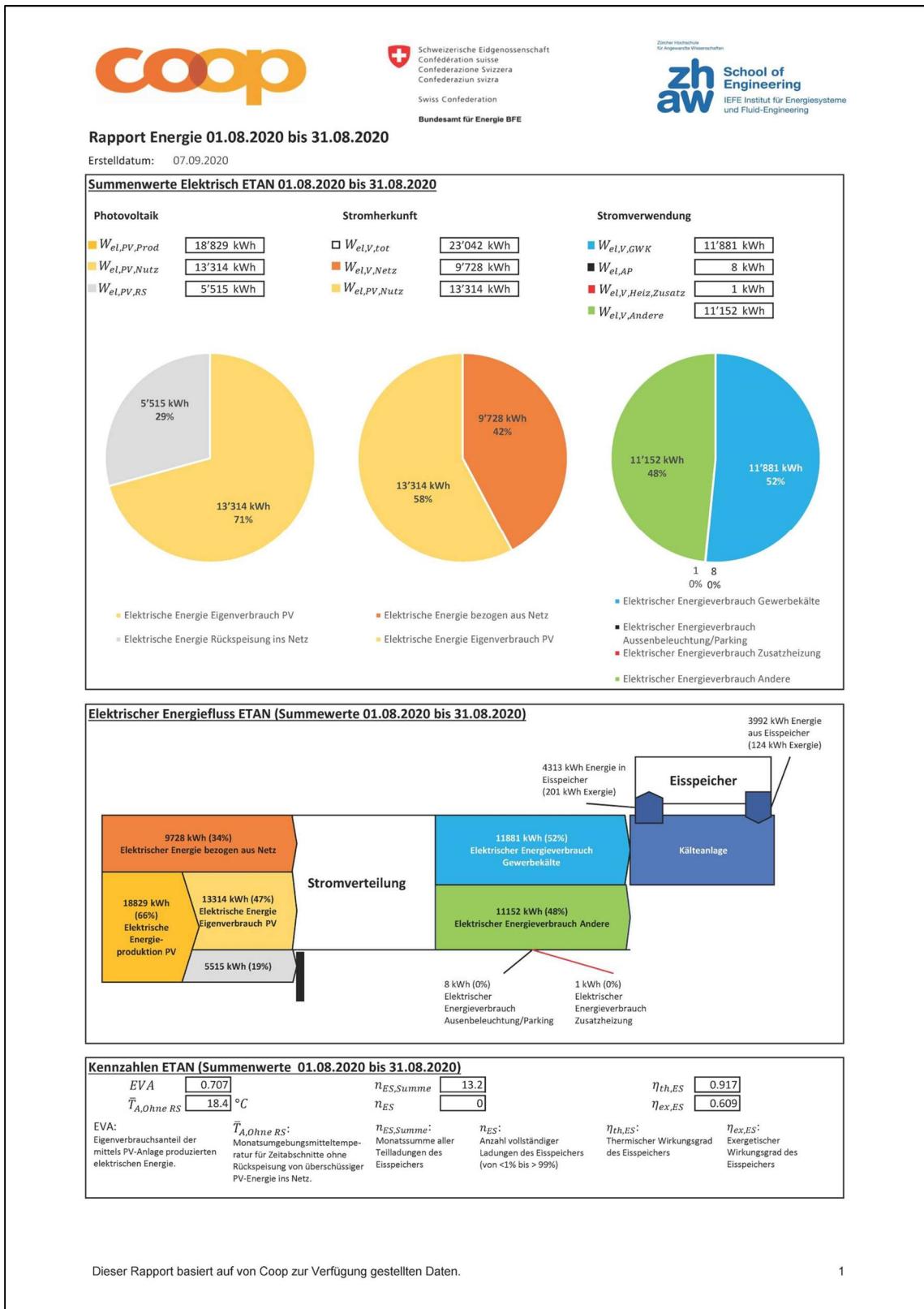
Mit dem gleichen Verfahren wie bei den thermischen Leistungen konnte auch die Unsicherheit der Exergieflüsse berechnet werden, was in Tabelle 21 ersichtlich ist.

Tabelle 21: Zielgrößen für den Exergiestrom und deren Unsicherheit

Symbol	Bezeichnung	Wert Auslegung \pm Messunsicherheit [abs]	Mess- unsicherheit [rel]	Bedingung
$\dot{E}_{ex,ES,Lad}$	Exergiestrom Eisspeicher Laden	-8.87 \pm 0.62 kW	6.95 %	<ul style="list-style-type: none">- Durchflussgeschwindigkeit > 0.5 m/s- $T_{Ein,Q,ES} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$- $T_{Aus,Q,ES} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$- $T_U = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$- Definition vom Durchfluss aus gegebenen Werten für Leistung und Temperaturen- Stoffwerte für Antifrogen L 40% bei $T_{m,ES} = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet
$\dot{E}_{ex,ES,Ent}$	Exergiestrom Eisspeicher Entladen	3.64 \pm 0.43 kW	11.8 %	<ul style="list-style-type: none">- Durchflussgeschwindigkeit > 0.5 m/s- $T_{Ein,Q,ES} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$- $T_{Aus,Q,ES} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$- $T_U = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$- Definition vom Durchfluss aus gegebenen Werten für Leistung und Temperaturen- Stoffwerte für Antifrogen L 40% bei $T_{m,ES} = -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet



Anhang 3 – Monatsrapport





Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Swiss Confederation
Bundesamt für Energie BFE

Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften
zhaw School of
Engineering
IEFE Institut für Energiesysteme
und Fluid-Engineering

Summenwerte Elektrisch SAVI 01.08.2020 bis 31.08.2020

Photovoltaik		Stromherkunft		Stromverwendung	
■ $W_{el,PV,Prod}$	11'854 kWh	□ $W_{el,V,tot}$	25'253 kWh	■ $W_{el,V,GWK}$	11'356 kWh
■ $W_{el,PV,Nutz}$	10'134 kWh	■ $W_{el,V,Netz}$	15'119 kWh	■ $W_{el,AP}$	262 kWh
■ $W_{el,PV,RS}$	1'720 kWh	■ $W_{el,PV,Nutz}$	10'134 kWh	■ $W_{el,V,Heiz,Zusatz}$	149 kWh
				■ $W_{el,V,Andere}$	13'486 kWh

Kennzahlen SAVI (Summenwerte 01.08.2020 bis 31.08.2020)

EVA 0.855

EVA:
Eigenverbrauchsanteil der mittels PV-Anlage produzierten elektrischen Energie.

Dieser Rapport basiert auf von Coop zur Verfügung gestellten Daten.

2



Anhang 4 – Fahrplan Betriebsmodi

Betriebsmodus 1:
Eisspeicher bei PV-Überschuss laden und bei Netzbezug entladen.
Regelung des Hochdruckes nach der Gaskühler-Austrittstemperatur (vor Gasunterkühler Eisspeicher)

Betriebsmodus 2:
Eisspeicher bei PV-Überschuss laden und bei Netzbezug entladen.
Regelung des Hochdruckes nach Temperatur vor HD-Ventil (nach Gasunterkühler Eisspeicher)

Umschaltung zwischen Betriebsmodi jeweils Montags zwischen 08:00 und 10:00

2019

	Nov.	Nov. / Dez.	Dez.	Dez.	Dez.	Dez
KW	47	48	49	50	51	52
Betrieb	1	1	1	1	1	1

2020

	Jan.	Jan.	Jan.	Jan.	Jan. /Feb.	Feb.
KW	1	2	3	4	5	6
Betrieb	1	2	2	2	2	2
	Feb.	Feb.	Feb./Mrz.	Mrz.	Mrz.	Mrz.
KW	7	8	9	10	11	12
Betrieb	2	2	2	1	1	1
	Mrz.	Mrz./Apr.	Apr.	Apr.	Apr.	Apr./Mai
KW	13	14	15	16	17	18
Betrieb	1	1	1	1	1	2
	Mai	Mai	Mai	Mai	Jun.	Jun.
KW	19	20	21	22	23	24
Betrieb	2	2	2	2	2	2
	Jun.	Jun.	Jun./Jul.	Jul.	Jul.	Jul.
KW	25	26	27	28	29	30
Betrieb	2	1	1	1	1	1
	Jul./Aug.	Aug.	Aug.	Aug.	Aug.	Aug./Sep.
KW	31	32	33	34	35	36
Betrieb	1	1	1	2	2	2
	Sep.	Sep.	Sep.	Sep./Okt.	Okt.	Okt.
KW	37	38	39	40	41	42
Betrieb	2	2	2	2	2	1
	Okt.	Okt./Nov.	Nov.	Nov.	Nov.	Nov.
KW	43	44	45	46	47	48
Betrieb	1	1	1	1	1	1

Umschaltungen:

- Montag 06.01.2020 (von Modus 1 auf Modus 2)
- Montag 02.03.2020 (von Modus 2 auf Modus 1)
- Montag 27.04.2020 (von Modus 1 auf Modus 2)
- Montag 22.06.2020 (von Modus 2 auf Modus 1)
- Montag 17.08.2020 (von Modus 1 auf Modus 2)
- Montag 12.10.2020 (von Modus 2 auf Modus 1)



Anhang 5 – Verbrauchs- und Kennzahlen Filiale Etagnières (ETAN)

	2019						2020					
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
$W_{el,V,tot} \text{ [kWh]}$	19306	20219	19605	18886	20319	19316	20880	21829	23022	23042	22233	21025
$W_{el,V,Netz} \text{ [kWh]}$	15333	17087	14580	13083	11098	7903	7862	8505	7911	9728	10507	14648
$W_{el,PV,Prod} \text{ [kWh]}$	4912	3847	7101	9260	17123	22738	24023	20181	24677	18829	14694	8152
$W_{el,PV,Nutz} \text{ [kWh]}$	3973	3132	5025	5803	9221	11413	13018	13324	15111	13314	11726	6377
$W_{el,RS} \text{ [kWh]}$	939	716	2076	3457	7901	11325	11005	6857	9567	5515	2967	1775
$W_{el,V,GWK} \text{ [kWh]}$	8069	8746	8347	7916	8417	8351	9915	10854	11016	11881	11119	8651
$W_{el,V,anderer} \text{ [kWh]}$	10971	11130	10914	10743	11685	10877	10932	10948	12004	11152	11076	12207
$Q_{ES,Laden} \text{ [kWh]}$	414	235	167	884	443	1077	3935	5326	2267	4313	5647	1793
$Q_{ES,Entladen} \text{ [kWh]}$	70	120	107	839	222	801	3733	5029	1885	3992	5586	1312
Betriebsmodus	1	2	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1
$n_{ES,\text{Summe}}$	1.4	0.6	0.4	2.8	1.1	3.0	12.6	17.2	-	13.2	19.1	5.5
n_{ES}	0	0	0	0	0	1	4	9	-	4	8	1
$\eta_{th,ES}$	0.30	0.52	0.52	0.87	0.60	0.73	0.94	0.95	-	0.92	0.96	0.86
$\eta_{ex,ES}$	0.22	0.37	0.36	0.58	0.43	0.49	0.63	0.62	-	0.61	0.62	0.58
EVA	0.81	0.81	0.71	0.63	0.54	0.50	0.54	0.66	0.61	0.71	0.80	0.78
$\bar{T}_{A,\text{Ohne RS}} \text{ [°C]}$	6.4	5.5	3.8	6.2	5.8	10.1	12.6	15.1	-	18.4	15.2	9.7



Anhang 6 – Verbrauchs- und Kennzahlen Filiale Savièse (SAVI)

	2019					2020						
	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
$W_{el,V,tot} [kWh]$	24342	25800	26046	24572	23630	23283	24109	24185	26746	25253	24552	24506
$W_{el,V,Netz} [kWh]$	20465	23103	21178	19748	15410	12162	12434	13045	13855	15119	15726	18849
$W_{el,PV,Prod} [kWh]$	4140	2807	5142	5228	10513	14021	15435	13153	14711	11854	9760	6194
$W_{el,PV,Nutz} [kWh]$	3877	2697	4868	4824	8220	11121	11675	11140	12891	10134	8826	5657
$W_{el,RS} [kWh]$	263	111	274	404	2293	2899	3760	2013	1820	1720	933	537
$W_{el,V,GWK} [kWh]$	9293	10403	10330	9653	8020	8794	9722	10071	11930	11356	9998	9202
$W_{el,V,Andere} [kWh]$	14682	14993	15355	14626	15199	14070	13982	13731	14414	13486	14138	14845
EVA	0.94	0.96	0.95	0.92	0.78	0.79	0.76	0.85	0.88	0.86	0.90	0.91



Anhang 7 – Verbrauchs- und Kennzahlen der Vergleichsperioden

	Periode 1 05.04. -26.05.2020		Periode 2 24.05. -26.05.2020		Periode 3 18.06. - 24.06.2020	
	ETAN	SAVI	ETAN	SAVI	ETAN	SAVI
$W_{el,V,tot}$ [kWh]	1771	2087	1853	2231	5316	5708
$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	700	1015	496	939	1649	2716
$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	2637	1580	3116	1904	5888	3545
$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	1071	1072	1357	1292	3667	2992
$W_{el,RS}$ [kWh]	1565	507	1760	612	2222	553
$W_{el,V,GWK}$ [kWh]	800	808	943	932	2680	2429
$W_{el,V,anderer}$ [kWh]	957	1234	908	1261	2624	3189
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	0	-	442	-	1431	-
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	24	-	170	-	1216	-
$E_{ex,ES,Lad}$ [kWh]	0	-	21.1	-	67.6	-
$E_{ex,ES,Ent}$ [kWh]	0.814	-	12.9	-	38.8	-
Betriebsmodus	1	-	2	-	2	-
$n_{ES,Summe}$	0	-	1.34	-	4.27	-
n_{ES}	0	-	1	-	1	-
$\eta_{th,ES}$	-	-	0.842	-	0.954	-
$\eta_{ex,ES}$	-	-	0.611	-	0.643	-
EVA	0.406	0.679	0.435	0.679	0.623	0.844

	Periode 4 04.08. - 10.08.2020		Periode 5 12.08. - 15.08.2020		Periode 6 02.09. - 05.09.2020	
	ETAN	SAVI	ETAN	SAVI	ETAN	SAVI
$W_{el,V,tot}$ [kWh]	5106	5977	3342	3247	3309	3543
$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	1830	3241	1285	1941	1278	1946
$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	5235	3099	2658	1593	2495	1681
$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	3276	2736	2057	1306	2031	1597
$W_{el,RS}$ [kWh]	1959	363	601	287	464	85
$W_{el,V,GWK}$ [kWh]	2495	2695	1638	1491	1666	1398
$W_{el,V,anderer}$ [kWh]	2610	3190	1703	1703	1641	2090
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	609	-	457	-	991	-
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	470	-	392	-	1059	-
$E_{ex,ES,Lad}$ [kWh]	28.9	-	21.7	-	46.9	-
$E_{ex,ES,Ent}$ [kWh]	15.7	-	13.1	-	32.3	-
Betriebsmodus	1	-	1	-	2	-
$n_{ES,Summe}$	1.46	-	1.06	-	3.40	-
n_{ES}	0	-	0	-	1	-
$\eta_{th,ES}$	0.819	-	0.895	-	0.968	-
$\eta_{ex,ES}$	0.580	-	0.635	-	0.620	-
EVA	0.626	0.883	0.774	0.820	0.814	0.950



	Periode 11 19.05. - 21.05.2020		Periode 12 05.08. - 07.08.2020		Periode 13 20.06. - 25.06.2020	
	ETAN	SAVI	ETAN	ETAN	SAVI	ETAN
$W_{el,V,tot}$ [kWh]	1999	2231	2203	1999	2231	2203
$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	512	965	667	512	965	667
$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	3013	1778	2590	3013	1778	2590
$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	1487	1266	1536	1487	1266	1536
$W_{el,RS}$ [kWh]	1527	512	1054	1527	512	1054
$W_{el,V,GWK}$ [kWh]	1064	985	967	1064	985	967
$W_{el,V,anderer}$ [kWh]	934	1206	1237	934	1206	1237
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	514	-	94.5	514	-	94.5
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	493	-	144	493	-	144
$E_{ex,ES,Lad}$ [kWh]	24.4	-	4.61	24.4	-	4.61
$E_{ex,ES,Ent}$ [kWh]	16.0	-	4.88	16.0	-	4.88
Betriebsmodus	2	-	1	2	-	1
$n_{ES,Summe}$	1.42	-	0.21	1.42	-	0.21
n_{ES}	0	-	0	0	-	0
$\eta_{th,ES}$	0.938	-	0.729	0.938	-	0.729
$\eta_{ex,ES}$	0.638	-	0.508	0.638	-	0.508
EVA	0.493	0.712	0.593	0.493	0.712	0.593

	Periode 14 04.07. - 09.07.2020		Periode 15 06.04. - 09.04.2020		Periode 16 01.09. - 04.09.2020	
	ETAN	SAVI	ETAN	ETAN	SAVI	ETAN
$W_{el,V,tot}$ [kWh]	4278	5032	2906	4278	5032	2906
$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	1132	2229	1050	1132	2229	1050
$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	5670	3263	3463	5670	3263	3463
$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	3146	2803	1856	3146	2803	1856
$W_{el,RS}$ [kWh]	2524	460	1607	2524	460	1607
$W_{el,V,GWK}$ [kWh]	2034	2268	1161	2034	2268	1161
$W_{el,V,anderer}$ [kWh]	2244	2687	1735	2244	2687	1735
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	395	-	100	395	-	100
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	229	-	51.8	229	-	51.8
$E_{ex,ES,Lad}$ [kWh]	-	-	4.91	-	-	4.91
$E_{ex,ES,Ent}$ [kWh]	-	-	1.76	-	-	1.76
Betriebsmodus	1	-	1	1	-	1
$n_{ES,Summe}$	-	-	0.229	-	-	0.229
n_{ES}	-	-	0	-	-	0
$\eta_{th,ES}$	-	-	0.569	-	-	0.569
$\eta_{ex,ES}$	-	-	0.393	-	-	0.393
EVA	0.555	0.859	0.536	0.555	0.859	0.536



	Periode 17 03.03. - 09.03.2020		Periode 18 06.10. - 12.10.2020	
	ETAN	SAVI	ETAN	SAVI
$W_{el,V,tot}$ [kWh]	4480	5371	4828	5502
$W_{el,V,Netz}$ [kWh]	2809	4014	3126	4209
$W_{el,PV,Prod}$ [kWh]	3238	1777	2247	1414
$W_{el,PV,Nutz}$ [kWh]	1671	1357	1702	1293
$W_{el,RS}$ [kWh]	1567	419	545	121
$W_{el,V,GWK}$ [kWh]	1840	1776	2067	2055
$W_{el,V,anderer}$ [kWh]	2591	3529	2728	3345
$Q_{ES,Laden}$ [kWh]	0	-	767	-
$Q_{ES,Entladen}$ [kWh]	0	-	611	-
$E_{ex,ES,Lad}$ [kWh]	0	-	35.9	-
$E_{ex,ES,Ent}$ [kWh]	0	-	18.4	-
Betriebsmodus	1	-	2	-
$n_{ES,Summe}$	0	-	2.36	-
n_{ES}	0	-	1	-
$\eta_{th,ES}$	0	-	0.966	-
$\eta_{ex,ES}$	0	-	0.618	-
EVA	0.516	0.764	0.758	0.915