



Schlussbericht vom 20. Januar 2020

Niedertemperatur Eisspeicher-Heizung mit thermischer Enteisung



Quellen: © SPF 2019



ENERGIE
INSTALLATION
NETZE **EWJR**

 **SPF** INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

Datum: 20. Januar 2020

Ort: Rapperswil-Jona

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfängerinnen:

Elektrizitätswerke Jona-Rapperswil AG
Werkstrasse 30, CH-8640 Rapperswil-Jona
www.ewjr.ch

Hochschule für Technik Rapperswil
SPF Institut für Solartechnik
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil-Jona
www.spf.ch

Autoren:

Daniel Philippen, SPF, daniel.philippen@spf.ch
Daniel Carbonell, SPF, dani.carbonell@spf.ch
Mattia Battaglia, SPF, mattia.battaglia@spf.ch
Michel Haller, SPF, michel.haller@spf.ch
Stefan Brunold, SPF, stefan.brunold@spf.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Elimar Frank, elimar.frank@frank-energy.com

BFE-Vertragsnummer: SI/501368-01

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



Zusammenfassung

Eine Solar-Eis-Heizung wurde im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts erstellt. Die Heizung versorgt seit zwei Jahren ein Wohn- und Gewerbegebäude mit 2050 m² Energiebezugsfläche mit Raumwärme und Warmwasser. Die Hauptkomponenten der Heizung sind 120 m² unverglaste, spektral selektive Solarwärmekollektoren, ein Eisspeicher mit 210 m³ Volumen, und eine zweistufige Sole-Wasser-Wärmepumpe mit 45 kW thermischer Leistung (B0/W35). Die Wärmetauscher im Eisspeicher werden im Winter periodisch enteist und konnten deswegen mit geringer Übertragungsfläche ausgelegt werden.

Die mit dem Monitoring ermittelte Jahresarbeitszahl der Heizung (JAZ+, inkl. Stromverbrauch der Heizkreispumpe) liegt mit 3.5 unter dem gemäss Auslegung erwarteten Wert von 4.3. Die Simulationen zeigen, dass wichtige Ursachen für die geringe JAZ+ zum einen die Anhebung der Heizkurve infolge Probleme bei der Heizverteilung und zum anderen eine im Vergleich zu den Herstellerangaben zu geringe Effizienz der Wärmepumpe sind. Es werden Massnahmen für eine Anhebung der JAZ+ auf 4.0 besprochen.

Die Untersuchungen mit angepassten Kollektoren, welche einen stärkeren Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft haben, zeigen Optimierungspotenziale für Material- und Kosteneinsparungen auf. Das Konzept der Solar-Eis-Heizung mit enteisbaren Wärmetauschern im Eisspeicher wird inzwischen auf dem Schweizer Markt angeboten, wofür eine Kooperation mit einem Systemanbieter eingegangen wurde.

Résumé

Dans le cadre d'un projet pilote de démonstration, un système de chauffage solaire/glace a été construit et approvisionne depuis deux ans en chauffage et en eau chaude un bâtiment mixte industriel et d'habitation ayant une surface de référence énergétique de 2050 m². 120 m² de capteurs sélectifs non vitrés, un stockage de glace de 210 m³ de volume ainsi qu'une pompe à chaleur à eau glycolée bi-étagée de 45 kW de puissance thermique (B0/W35) constituent les composants principaux du chauffage. En hiver, les échangeurs du stockage de glace sont régulièrement dégivrés et ont pu de ce fait être dimensionnés avec une surface d'échange réduite.

Le coefficient de performance annuel (incluant la consommation électrique du circulateur du circuit de chauffage) mesuré est de 3.5, en-dessous de la valeur de 4.3 attendue. D'après les simulations, les causes principales à l'origine de ce faible coefficient de performance sont l'augmentation de la courbe de chauffe en raison de problèmes au niveau de la distribution de chaleur ainsi qu'une efficacité trop faible de la pompe à chaleur. Des mesures permettant d'augmenter le coefficient de performance annuel à une valeur de 4.0 ont été discutées.

Des études complémentaires sur des capteurs adaptés offrant de meilleurs coefficients d'échanges avec l'environnement montrent un potentiel d'optimisation tant du point de vue matériel que des coûts. Entre temps, une coopération avec un fournisseur de systèmes a débuté et le concept de système de chauffage solaire/glace avec des échangeurs dégivrables pour le stockage de glace a été lancé sur le marché suisse.

Summary

The solar-ice heating system was installed as part of a pilot and demonstration project and has been supplying a residential and commercial building of 2050 m² heated floor area with space heating and domestic hot water for two years. The main components of the system are 120 m² unglazed spectrally-selective solar collectors, an ice storage of 210 m³ volume and a two-stage brine-water heat pump with



45 kW thermal output (B0/W35). The heat exchangers in the ice storage are periodically de-iced in winter and could therefore be designed with a small total heat transfer surface.

The measured seasonal performance factor of the heating system (JAZ+, incl. electricity consumption of the pump of the heating loop) is 3.5, which is below the value 4.3 expected according to the design. The simulations show that important causes for the low JAZ+ are an increase in the heating curve due to problems with the heating distribution and an insufficient efficiency of the heat pump compared to its technical specifications. Possible measures for increasing the JAZ+ to 4.0 are discussed.

The investigations with adapted collectors that have an increased heat exchange with the ambient air show optimisation potential for material and cost savings. The presented concept for a solar-ice heating system with heat exchangers in the ice storage that can be de-iced is now being offered on the Swiss market. A related cooperation has been started with a Swiss system provider.



Inhaltsverzeichnis

1	Projektziele	6
2	Beschreibung der Solar-Eis-Heizung.....	7
2.1	Aufbau der Heizung und Planungswerte	7
2.2	Messkonzept	12
3	Ergebnisse des Monitorings	14
3.1	Klimadaten und Wärmebedarf des Gebäudes.....	14
3.2	Energiebilanzen und Systemjahresarbeitszahl der Heizung	15
3.2.1	Wärmeabgabe der Heizung.....	15
3.2.2	Elektrizitätsverbrauch der Heizung	17
3.2.3	Systemeffizienz / Arbeitszahlen	18
3.2.4	Wärmeflüsse	19
3.2.5	Temperaturniveau der Wärmeflüsse	22
3.3	Eisspeicher.....	22
3.4	Kollektorfeld.....	25
3.4.1	Erträge	25
3.4.2	Einfluss der rückseitigen Wärmedämmung	27
4	Simulationen.....	31
4.1	Parameter-Fit des Wärmepumpenmodells	31
4.2	Parameter-Fit des Kollektormodells.....	33
4.2.1	Verwendete Messdaten	33
4.2.2	Rückseitig gedämmter Kollektor	35
4.2.3	Rückseitig ungedämmter Kollektor	37
4.3	Jahressimulation mit angepassten Modellen	39
4.3.1	Jahresarbeitszahlen.....	40
4.3.2	Ergebnisse für Einzelkomponenten	41
4.4	Möglichkeiten zur Optimierung der bestehenden Heizung	45
4.5	Möglichkeiten zur Optimierung des Anlagenkonzepts.....	46
5	Verbreitung und Marktreife	48
6	Bewertung und Ausblick	49
	Anhang	51
A.1	Im Monitoring eingesetzt Messgeräte	51
B.1	Parametrisierung des Kollektormodells.....	52



1 Projektziele

Im Jahr 2017 liess die EWJR AG ein Wohn- und Geschäftshaus mit 2'050 m² Energiebezugsfläche in Rapperswil-Jona bauen, welches zur Demonstration einer energieeffizienten Solarthermie-Eisspeicher-Heizung (Solar-Eis-Heizung) genutzt werden konnte. Die Solar-Eis-Heizung soll mit der Demonstrationsanlage zur Marktreife gebracht werden. Die Heizungsanlage nutzt als einzige Wärmequelle ein 120 m² grosses Feld aus unverglasten, spektral selektiven Kollektoren, dessen Erträge direkt für die Wärmeversorgung verwendet, in den Wärmepumpen-Verdampfer geleitet oder in den Eisspeicher eingebracht werden. Der Eisspeicher hat ein Volumen von 210 m³ und ist mit Wärmetauscher-Platten ausgestattet, welche sich nur über eine geringe Höhe des Eisspeichers erstrecken und regelmässig enteist werden. Dadurch ergeben sich Vorteile bezüglich Material- und Installationsaufwand sowie der Kosten. In das Projekt fliessen Erkenntnisse aus einer Forschungsanlage ein, welche 2012 in Rapperswil erstellt wurde.¹ Darauf aufbauend wurde das System vereinfacht und die Steuerung bezüglich Betriebssicherheit verbessert.

Folgende Ziele sollen mit dem P&D-Projekt erreicht werden:

1. Demonstration der monovalenten solarthermischen Eisspeicher-Heizung mit enteisbaren Wärmetauschern und Erreichung der Marktreife des Solar-Eis Systems.
2. Ermittlung der wichtigsten Kennzahlen der Demonstrationsanlage bezüglich Energieflüsse und Stromeffizienz (System-Jahresarbeitszahl).
3. Überprüfung des im Vergleich zur Forschungsanlage geänderten Hydraulikkonzepts.
4. Weiterentwicklung und Überprüfung der Anlagensteuerung, welche neu eine Anlagenüberwachung enthält.
5. Überprüfen des angepassten Designs der enteisbaren Wärmetauscher des Eisspeichers.
6. Erkenntnisgewinn bezüglich Leistung der unverglasten Kollektoren bei Betrieb unter Gefrierpunkt und bei Schnee- und Eisbelag. Ermittlung sicherheits- und steuerungsrelevanter Betriebszustände der Kollektoren und Anpassung der Anlagensteuerung.

¹ Philippen D., Haller M.Y., Frank E., Brunold S., Entwicklung einer hocheffizienten Solarthermie-Wärmepumpen-Heizung mit Eisspeicher, 17. BRENET Status-Seminar "Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt" - 13./14. September 2012



2 Beschreibung der Solar-Eis-Heizung

2.1 Aufbau der Heizung und Planungswerte

Die Solar-Eis-Heizung kann sowohl in Neubauten als auch in bestehenden Gebäuden eingesetzt werden und kann eine hohe Systemjahresarbeitszahl dadurch erreichen, dass ein hoher Anteil der solaren Gewinne auf hohem Temperaturniveau direkt genutzt wird. Als einzige Wärmequelle der Heizung kommen unverglaste, spektral selektive Kollektoren zum Einsatz, wobei die Solarwärme auch zwischengespeichert aus dem Eisspeicher kommen kann und dann von der Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau gehoben wird. Die Solar-Eis-Heizung wurde mit Fertigstellung des Neubaus Mitte Februar 2017 in Betrieb genommen. Das Gebäude (Abbildung 1) hat eine Energiebezugsfläche von 2'050 m², welche sich über vier Stockwerke verteilt. Neben sieben Wohnungen wird ein Stockwerk als Gewerbefläche zur Lebensmittelproduktion genutzt und ein Stockwerk als Bürofläche.



Abbildung 1: Luftbild des Gebäudes mit Kollektorfeld auf dem höchsten Dach und der Einstiegs Luke zum Eisspeicher (Pfeil links unten im Bild). Rechts: Ausschnitt aus Gebäudeschnitt mit farblich markiertem Kollektorfeld auf dem Dach und Eisspeicher im Erdreich neben der Tiefgarage.

Die Solar-Eis-Heizung wurde mit folgenden Planungswerten für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) ausgelegt:

- Wärmebedarf Raumheizung: 66 MWh/a,
- Wärmebedarf Warmwasser 25 MWh/a.

Als Energiekennzahlen (EKZ) ergeben sich folglich EKZ_{RW+WW} : 44 kWh/(m²a), EKZ_{RW} : 32 kWh/(m²a) und EKZ_{WW} : 12 kWh/(m²a).

Ein vereinfachtes Hydraulikschema der Solar-Eis-Heizung ist in Abbildung 2 dargestellt. Der Heizkreis (rote Linien) und die Warmwassererzeugung (türkise Linien) sind wie üblich aufgebaut. Der Solekreis (blaue Linien) verteilt die Solarwärme an Pufferspeicher, Eisspeicher und Wärmepumpe und hat als Besonderheit, dass bei fehlender Solarstrahlung die Enteisung der Wärmetauscher im Eisspeicher mit Wärme aus dem Pufferspeicher erfolgen kann. Da die Heizung eine Demonstrationsanlage ist, wurden zur Erhöhung der Betriebssicherheit elektrische Heizstäbe als Notheizung installiert, mit denen das Gebäude im Störfall mit Wärme versorgt werden kann. Die Leistung der Solar-Eis-Heizung ist jedoch gross genug ausgelegt, um die Heizstäbe auch in kalten Wintern nicht zu benötigen. Die Temperaturhochhaltung in der Warmwasserverteilung wird mit einem Begleitheizband vorgenommen. Die ursprünglich geplante Zirkulationsleitung wurde nicht realisiert, da ihre Installation wegen weit verteilten Zapfstellen schlussendlich als zu aufwändig erschien.



Kennwerte der Anlageneffizienz

Als wichtige Kennwerte zur Beschreibung der Effizienz der Heizung werden Arbeitszahlen verwendet, die wie folgt definiert werden:

$$\text{Arbeitszahl (AZ)} = \frac{\text{Wärmeabgabe der Heizung an die Verteilungen (in kWh)}}{\text{Strombedarf der Heizung (in kWh)}}$$

Jahresarbeitszahl (JAZ): Bilanz über 12 Monate

Im vorliegenden Bericht wird in der Regel auch der Stromverbrauch der Heizkreispumpe in die Jahresarbeitszahl eingerechnet, was mit dem "+" Symbol ausgedrückt wird: **AZ+** bzw. **JAZ+**.

Die Solar-Eis-Heizung wurde mit Simulationen für den Standort Rapperswil-Jona ausgelegt. Aus den Simulation ergab sich ein **Planungswert von 4.3 für die JAZ+**.

Wird die Wärmepumpe (WP) allein betrachtet, ergibt sich die Arbeitszahl wie folgt:

$$\text{AZ}_{WP} = \frac{\text{Wärmeabgabe des Kondensators der Wärmepumpe (in kWh)}}{\text{Strombedarf der Wärmepumpe (in kWh)}}$$

wobei sich der Strombedarf der Wärmepumpe zusammensetzt aus dem Bedarf beider Kompressoren, der Wärmepumpe-Steuerung und der Umwälzpumpen, die Sole und Wasser durch Verdampfer bzw. Kondensator leiten.

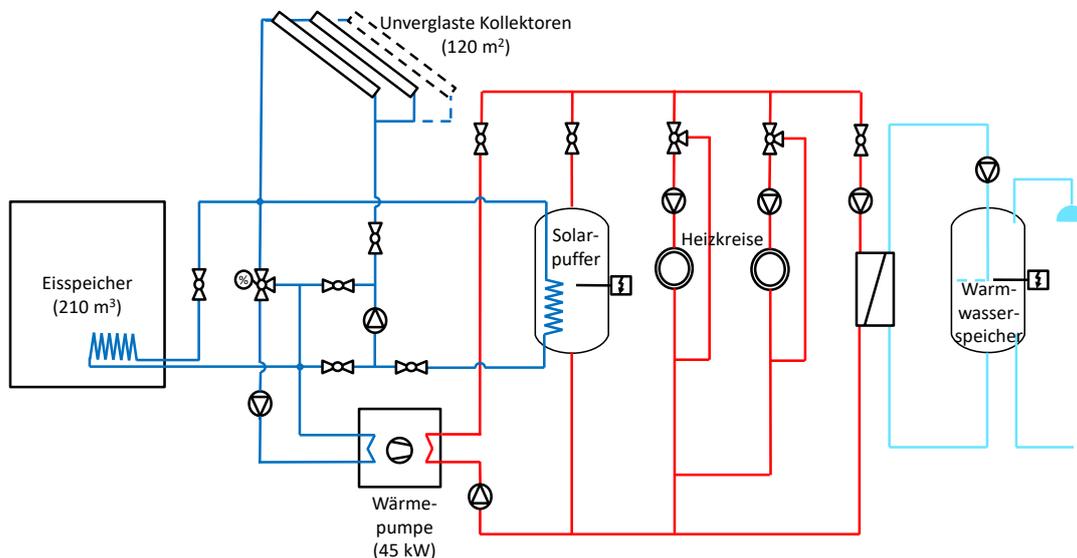


Abbildung 2: Vereinfachtes Hydraulikschema der Solar-Eis-Heizung inkl. elektrisch angetriebener Hydraulikkomponenten (Ventile: , Pumpen: ).

Das Energieflussschema in Abbildung 3 zeigt, wie Sonne und Aussenluft durch die unverglasten Kollektoren als Wärmequellen erschlossen werden. Als Besonderheit kann Wärme vom Pufferspeicher in den Eisspeicher geleitet werden, was eine Enteisung der Wärmetauscher im Eisspeicher auch in Zeiten fehlender solarer Einstrahlung ermöglicht.

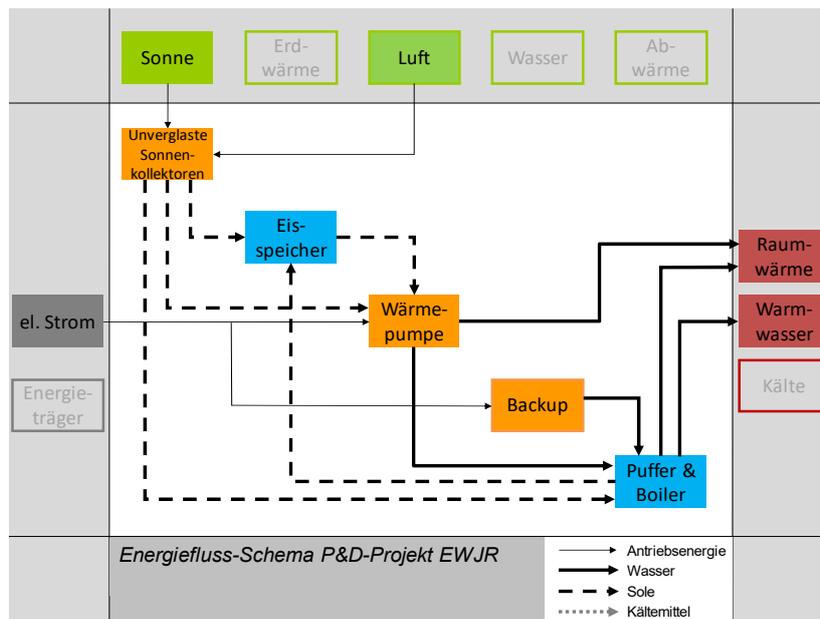


Abbildung 3: Energieflussschema der Solar-Eis-Heizung.

In Tabelle 1 sind die Spezifikationen der wichtigsten Komponenten der Solar-Eis-Heizung aufgeführt.

Tabelle 1: Kenndaten der wichtigsten Komponenten der Solar-Eis-Heizung.

Wärmepumpe: 45 kW thermische Leistung (B0/W35)

- 2 Kompressoren parallel (50 % bzw. 100 % Leistung), Tandem-Scroll
- Kältemittel R134a (ermöglicht auch bei tiefen Quelltemperaturen eine Warmwassererzeugung mittels WP)
- Leistungszahlen gemäss Hersteller-Datenblatt: B0/W35 4.2, B0/W60 2.7
- Einsatzgrenze: B0/W75

Kollektorfeld: 120 m² Absorberfläche

- Unverglaste, spektral selektive Flachkollektoren (Energie Solaire AS)
- 15 parallele Reihen à 4 Kollektoren, Neigung 30°, Ausrichtung Süd + 9° West
- Eine der Reihen (4 Kollektoren) ohne rückseitige Wärmedämmung, zur Prüfung des Nutzens der Dämmung
- Kollektorfeldverrohrung nicht wärmegeklämt

Eisspeicher: 210 m³ Speicherinhalt

- Betonhülle des Eisspeichers als Teil der Gebäudehülle neben der Tiefgarage erstellt
- Innere Abdichtung gegen Wasseraustritt an Wand Richtung Gebäude
- Innere Wärmedämmung an Decke gegen darüber liegenden Raum und darüber liegenden Aussenbereich
- Unbehandeltes Leitungswasser als Speichermedium
- Wärmetauscher: enteisbare Wärmetauscher-Platten, 114 m² aktive Oberfläche
- Nutzbare Latentwärme: ca. 10 MWh (verringertes maximaler Vereisungsgrad aufgrund nicht-reckwinkligem Grundriss des Eisspeichers und wegen Einbau von zwei Wärmetauscherreihen)

Warme Speicher:

- Heizungspuffer (2 m³ Volumen) mit Solar-Wärmetauscher, weitere Funktionen: Umladung auf Brauchwarmwasser-Speicher und Bereitstellung von Wärme für „Not-Enteisung“ der Wärmetauscher des Eisspeichers falls Solarwärme nicht verfügbar.
 - Brauchwarmwasser-Speicher (1.5 m³ Volumen)
-



Untersuchungen zu den eingesetzten Kollektoren

Hohe spezifische Solarerträge sollen in der geplanten Heizung durch den Einsatz unverglaster selektiver Kollektoren erzielt werden (Abbildung 4). Wird diese Art Kollektoren als Quelle der Wärmepumpe und zum Schmelzen von Eis im Eisspeicher eingesetzt, können sie bei Betrieb unter Umgebungstemperatur auch Wärme aus der Luft beziehen, da der Absorber in direktem Kontakt zur Luft steht. Auf diese Weise kann der Flächenertrag der Kollektoren besonders in den Monaten Dezember bis April, wenn die Wärmepumpe betrieben wird und der Eisspeicher zudem kalt ist, stark erhöht werden. Durch die spektral selektiven Eigenschaften des Kollektor-Absorbers wiederum kann im Sommerhalbjahr ein hoher Nutzungsgrad der Solarwärme auch bei hohen Absorber- bzw. Fluidtemperaturen erreicht werden.



Abbildung 4: Kollektorfeld mit unverglasten, spektral selektiven Solarwärmekollektoren.

Der Einfluss von Schnee- und Eisbelag auf den Ertrag der unverglasten selektiven Kollektoren soll im Rahmen des Projekts untersucht und die Computermodelle für die Heizungsauslegung bei Bedarf angepasst werden. Zusätzlich wird durch den Verzicht auf die rückseitige Wärmedämmung bei einer Kollektorreihe ermittelt, ob die Dämmung sinnvoll ist, wenn ein grosser Teil der Kollektorserträge im Winterhalbjahr auf einem Temperaturniveau anfällt, welches nahe oder unter Umgebungstemperatur liegt.

Eisspeicher mit enteisbaren Wärmetauscher

Der Eisspeicher enthält als Innovation enteisbare Wärmeübertrager (siehe Abbildung 5). Die Wärmeübertrager sind am Boden des Speichers installiert und nehmen, anders als bei anderen Eisspeichern auf dem Markt, nur ein kleines Volumen des Speichers ein. Auf den Wärmeübertragern entsteht bei Wärmeentzug unter Gefrierpunkt Eis, das periodisch abgelöst wird, indem warme Sole durch die Wärmeübertrager gepumpt wird, während die Wärmepumpe ausgeschaltet ist. Der Eisspeicher wird durch das periodische Enteisen und dem anschliessenden Auftreiben der Eisplatten sukzessive von den Wärmetauschern mit Eis gefüllt. Das Eis sammelt sich an der Wasseroberfläche an und füllt den Eisspeicher von oben her schrittweise. Durch das Enteisen bleibt die Entzugsleistung der Wärmeübertrager hoch und die benötigte Wärmeübertragerfläche kann gegenüber herkömmlichen Eisspeicher-Wärmeübertragern, auf denen dicke Eisschichten anwachsen können, stark reduziert werden. Zudem muss wegen dem Auftreiben der Eisplatten nicht das gesamte Volumen des Eisspeichers mit dem Eisspeicherwärmetauscher erschlossen werden, um dem Speicherwasser seine Latentwärme entziehen zu können. Als Folge wird der Material- und Installationsaufwand für die Wärmeübertrager reduziert. Durch die Reduktion der maximalen Eisdicke auf wenige Zentimeter können auch während der Eisbildung hohe



Quelltemperaturen nahe 0 °C für die Wärmepumpe bereitgestellt werden. Dies wirkt sich positiv auf den COP der Wärmepumpe aus.



Abbildung 5: Blick in den Eisspeicher vor dem Befüllen mit Leitungswasser. Am Boden sind die enteisbaren Wärmetauscher montiert, welche eine Höhe von 62 cm haben. Im Hintergrund ist das Unterwasserfenster zur Tiefgarage sichtbar (weiss umrahmt).

Abbildung 6 zeigt den Bau des Eisspeichers. Der Eisspeicher wurde am Rande des Gebäudes auf Höhe der Tiefgarage zusammen mit dem Rohbau des Gebäudes erstellt. In der Trennwand zwischen Speicher und Tiefgarage wurde ein Fenster installiert, welches auf Seiten des Eisspeichers unter dem Wasserspiegel liegt und einen Einblick in die Vereisungsvorgänge gibt. Ein Teil seiner Decke liegt innerhalb des Gebäudes. Dieser Teil und die Wand des Eisspeichers hin zur Tiefgarage stehen somit thermisch im Austausch mit dem Gebäude, sie sind zum Gebäude aber mit ca. 20 cm dickem XPS wärmegeklämt (Dämmung ausserhalb des Speichers).



Abbildung 6: Links: Rohbau der Eisspeicherhülle (zwei Wände bereits errichtet) angrenzend an die Tiefgarage. Rechts: schwarz abgedichteter Teil der Eisspeicherdecke, der ausserhalb des Baukörpers liegt, vor dem Abdecken mit Erdreich.



Anlagensteuerung

Die Steuerung der gesamten Heizungsanlage wird mit der frei programmierbaren Steuerung UVR16x2 der Firma Technische Alternative vorgenommen. Die Steuerungslogik wurde, ausgehend von der Programmierung für eine Forschungsanlage, welche vor diesem Demonstrationsobjekt erstellt wurde, umfassend umgeschrieben. Gründe für die vorgenommenen Änderungen waren:

- Die Regelung der zwei Heizkreise und der Warmwassererzeugung werden nicht durch die üblicherweise vom Wärmepumpenhersteller bereitgestellten Steuerungseinheit vorgenommen, sondern durch die UVR16x2. Die Hauptgründe für diesen Umstieg waren, dass eine wärmepumpenunabhängige Steuerung entwickelt werden sollte, und dass wegen der zweistufigen Wärmepumpe die Ventile im Primärkreis je nach Volumenstrom passend gestellt werden müssen, was einen zeitlichen Vorlauf benötigt, der wiederum durch eine WP-externe Steuerung gewährleistet werden kann.
- Die Wärmepumpe wird via KNX-Netzwerk von der UVR16x2-Steuerung als „Slave“ geregelt (0%, 50% oder 100% Leistung). Wegen der Zweistufigkeit der WP musste eine Logik eingerichtet werden, die während des Betriebs mit einem Kompressor eine zu geringe thermische Leistung der WP erkennt und die WP hochregeln kann.
- Durch eine Anpassung der Hydraulik solesseitig kann das Kollektorfeld neu als einzige Wärmequelle für die Wärmepumpe verwendet werden (unter Umgehung des Eisspeichers), wenn die WP mit 50 % Leistung und somit mit geringem Volumenstrom betrieben wird.
- Wegen zwei getrennter warmer Speicher (Puffer mit Solarregister und Boiler) wurde eine Umladefunktion eingerichtet, damit mit den Solarkollektoren Warmwasser erwärmt werden kann.
- Einbau einer Notheizung (Heizstäbe in Heizungspuffer und im Boiler), welche automatisch angesteuert wird.
- Die Fernüberwachungs- und -wartungsfunktionen der UVR16x2-Steuerung mussten programmiert bzw. eingerichtet werden.

2.2 Messkonzept

Das wissenschaftliche Monitoring wurde während zwei Jahren ausgeführt und dient dazu, Aussagen über die energetische Effizienz der Demonstrationsanlage treffen zu können. Neben der strombezogenen Systemeffizienz (System-Jahresarbeitszahl) können die Energieflüsse und die Effizienz der einzelnen Anlagenkomponenten bewertet werden. Mit den Monitoring-Daten kann die Simulationsumgebung, mit der die Anlage ausgelegt wurde, validiert und bei Bedarf angepasst werden.

Mit dem Monitoring werden folgende Messgrößen erfasst:

- Messung der Nutzenergie: Abgabe von Raumwärme und Warmwasser an das Gebäude
- Wärme flüsse der folgenden Komponenten: Eisspeicher, Kollektorfeld, Wärmepumpen-Kondensator, Umladung Solar-Puffer zu Boiler
- Messung des Elektrizitätsbedarfs der Heizungsanlage
- Meteorologische Daten: Globalstrahlung und langwellige Gegenstrahlung in der Kollektorebene, relative Luftfeuchtigkeit, Aussentemperatur
- Messung des Ertrags einer Reihe Kollektoren, welche ohne rückseitige Wärmedämmung installiert werden, und einer Reihe rückseitig gedämmter Kollektoren.



Alle Messgrößen werden in 1-Minuten-Zeitschritten erfasst, um die Steuerungsabläufe analysieren zu können. Die aufgezeichneten Messgrößen und die verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 5 im Anhang aufgeführt.

Der Vereisungsgrad des Eisspeichers wird nicht gemessen. Da das Eis frei schwimmt, ist der Wasserstand im Eisspeicher unabhängig vom Vereisungsgrad. Der Vereisungsgrad im Eisspeicher kann lediglich visuell mit einer Kamera oder indirekt mit den Messdaten (entzogene Wärme) abgeschätzt werden.

Mit dem Monitoring werden nur Daten des Heizsystems erfasst und keine Raumtemperaturen im Gebäude gemessen. Eine Verlegung von Temperaturfühlern in den vermieteten Räumen war nicht erwünscht. Für die Einregelung der Heizung wurden temporär in drei Stockwerken im Treppenhaus und in einigen Wohnungen mobile Temperatur-Logger platziert, damit ein Überblick über die Temperaturen im Gebäude erhalten werden konnte.

Für die Wärmebilanz der Solar-Eis-Heizung ist der Heizungskeller die gedachte Systemgrenze (Abbildung 7). Die folgenden Komponenten und Prozesse gehen in die Bilanz ein:

- Wärmeeintrag der Kollektoren (Q_{Koll}),
- Wärmeaustausch mit dem Eisspeicher (Q_{Eis}),
- Strombezug WP-Kompressor als Wärmeeintrag (Q_{Kompr}),
- Wärmeabgabe an Heizkreise und Warmwasser ab Speicher (Q_{RW} , Q_{WW}),
- Wärmeverluste von Solar- und Warmwasserspeicher und von Rohren und mögliche Differenzen der Messungen der Wärmemengenzähler gehen als Differenzen/Unausgeglichenheit in die Energiebilanz ein. (Q_{Diff})

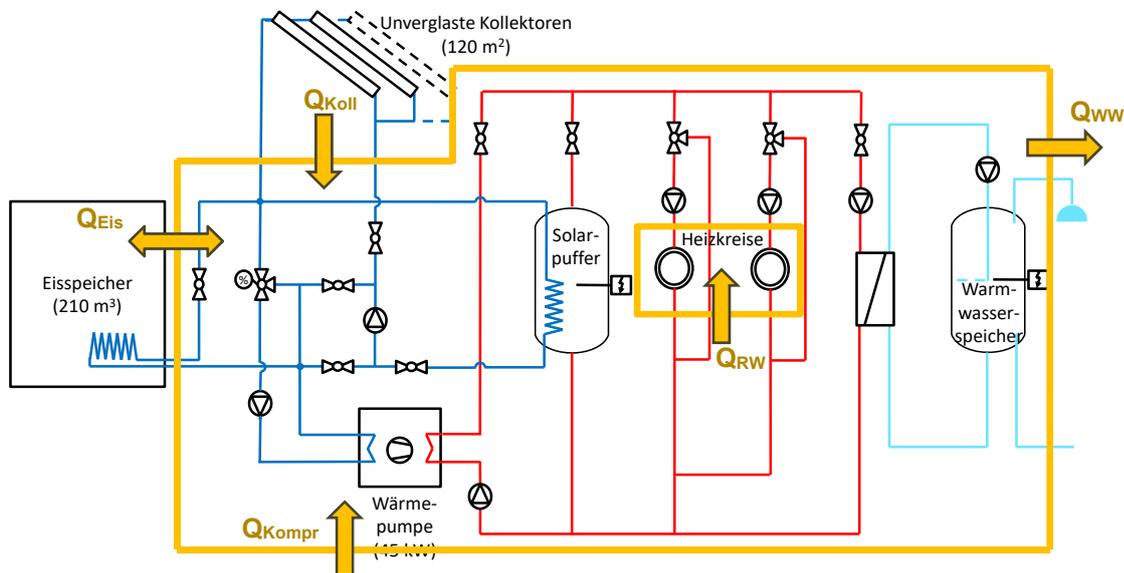


Abbildung 7: Systemgrenze, die für die Wärmebilanz der Solar-Eis-Heizung verwendet wird.



3 Ergebnisse des Monitorings

Zwei aufeinanderfolgende Messjahre, die jeweils im September beginnen, können für die Analyse der Betriebsdaten der Solar-Eis-Heizung verwendet werden. Die Perioden der beiden Messjahre sind:

- Jahr 1: September 2017 bis August 2018,
- Jahr 2: September 2018 bis August 2019

Für die Auswertungen wurden Messdaten in 10-Minuten-Zeitschritten verwendet.

3.1 Klimadaten und Wärmebedarf des Gebäudes

Der Wärmebedarf des Gebäudes und die solare Einstrahlung, die der Solar-Eis-Heizung zur Verfügung steht, haben einen wichtigen Einfluss auf das Gesamtsystem. Nachstehend werden die Einstrahlung und die durchschnittliche Aussentemperatur pro Monat und Jahr für den Wetterdatensatz, der für die Auslegung der Heizung verwendet wurde, und für beide Messjahre dargestellt.²

Wie Abbildung 8 zeigt, bestehen Unterschiede bei der solaren Einstrahlung. Für die Auslegung wurde insgesamt mit geringerer Einstrahlung gerechnet (Jahreswert), wobei sie v.a. im Sommer geringer ist. In den Wintermonaten November bis Januar stimmen die Werte zwischen Auslegung und Messung sehr gut überein. Zwischen den Messjahren zeigen sich deutliche Unterschiede im Frühjahr und im Herbst, wobei die gemessenen Einstrahlungen über zwölf Monate bilanziert sehr ähnlich ist.

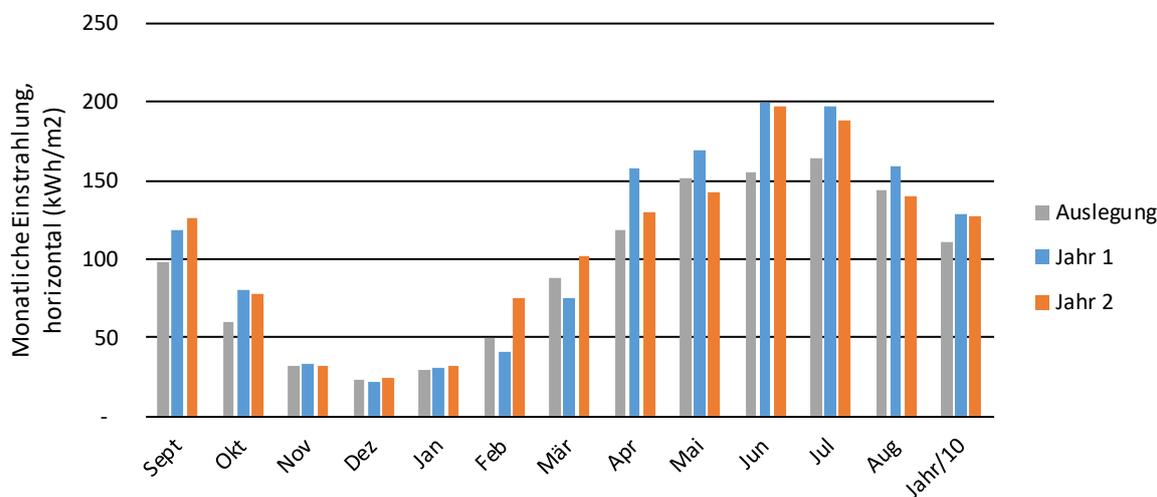


Abbildung 8: Monatliche und jährliche Globalstrahlung (horizontal) in kWh/m² in beiden analysierten Jahren und im Wetterdatensatz, der zur Auslegung der Solar-Eis-Heizung mittels Simulation verwendet wurde.

² Die Messdaten der Solarstrahlung und der Aussentemperatur zeigen jeweils Daten der Wetterstation am SPF, da im Projekt keine Wetterstation zur Messung der Meteo-Daten installiert wurde. Die Entfernung zwischen SPF-Dach zum Lattenhofweg (Standort des Gebäudes) beträgt 1,6 km Luftlinie bei flacher Topologie, weswegen von einer guten Übereinstimmung der Meteo-Daten beider Standorte ausgegangen werden kann. Die am Gebäude installierten Aussentemperaturfühler (Lufttemperatur Dach, Wandfühler für die Heizkurve) sind zu stark vom Strahlungsaustausch mit dem Himmel bzw. von der Solarstrahlung beeinflusst.



Der Vergleich der Aussentemperatur zeigt grössere Unterschiede zwischen der Auslegung und den Messjahren (Abbildung 9) und zwischen den Messjahren im Winter. In der Tendenz ist die Aussentemperatur in der Auslegung von September bis Januar tiefer als in den Messjahren. In den Wintermonaten zeigen sich starke Schwankungen bei den monatlichen Werten aus der Messung. Übers Jahr betrachtet liegt die Aussentemperatur bei der Auslegung bei 10.1 °C, im Messjahr 1 bei 12 °C und im Messjahr 2 bei 12.1 °C.

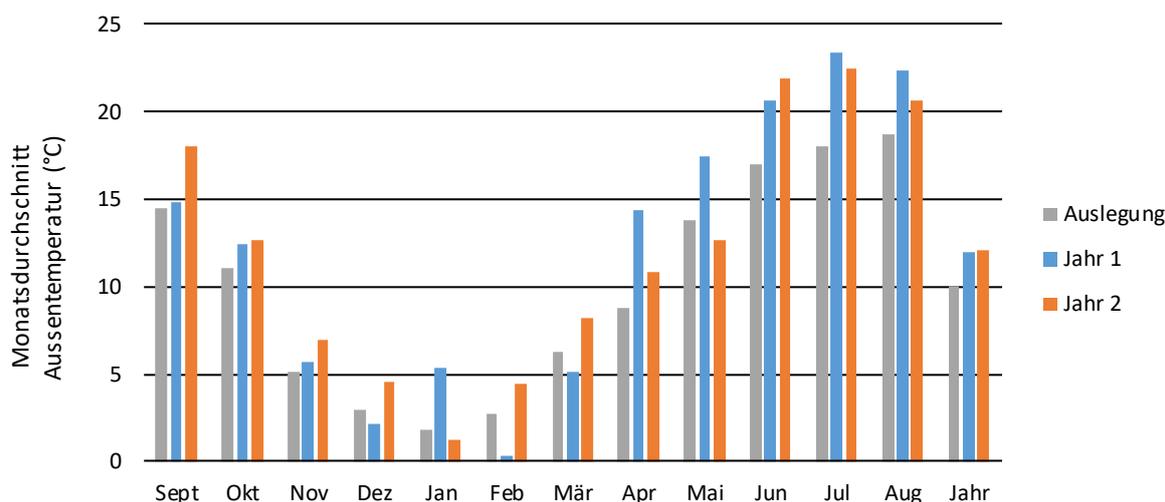


Abbildung 9: Durchschnittliche monatliche und jährliche Aussentemperatur in beiden analysierten Jahren und im Wetterdatensatz, der zur Auslegung der Solar-Eis-Heizung mittels Simulation verwendet wurde.

3.2 Energiebilanzen und Systemjahresarbeitszahl der Heizung

3.2.1 Wärmeabgabe der Heizung

Die monatliche Wärmeabgabe der Solar-Eis-Heizung an die Heizverteilung ist in Abbildung 10 wiedergegeben. Die erwartete Wärmeabgabe gemäss Auslegung lag bei 66 MWh/a. Im Vergleich dazu wurde in den Messjahren lediglich 56 MWh (Jahr 1) bzw. 54 MWh (Jahr 2) gemessen, was einem relativen Unterschied von -15 % bzw. -18 % entspricht.

Auffallend ist der Unterschied bei der Verteilung des Raumwärmebedarfs über die Wintermonate. In der Auslegung ergab sich ein dominanter Bedarf in den Monaten November bis Januar, der für den Wärmeentzug aus dem Eisspeicher besonders relevant ist, und der sich wiederum in den Messungen nicht zeigt. Der Wärmebedarf der Solar-Eis-Heizung aus Eisspeicher und Kollektorfeld ist in Realität also geringer und verteilt sich zudem stärker hin zu Monaten, in denen vermehrt Solarstrahlung vorhanden ist.

Tabelle 2 fasst die Jahreswerte zusammen und gibt die spezifischen Grössen von Eisspeicher und Kollektorfeld pro jährlich gelieferter Wärmemenge wieder.

Der Vergleich der Temperaturen, mit dem die Raumwärme an das Gebäude abgegeben wurde (Abbildung 11), zeigt deutliche Unterschiede zwischen der Auslegung und der Messung (Jahr 2 dargestellt). Neben der geringeren Wärmeabgabe im Messjahr zeigt sich auch, dass die Raumwärme in Realität bei deutlich höheren Temperaturen verteilt wurde. In beiden Wintern der Messjahre klagten einige Mieter



über zu tiefe Raumtemperaturen, weswegen zu Beginn des zweiten Winters die Heizkurve erhöht wurde. Die Ursachen für die zu tiefen Raumtemperaturen waren Luftansammlungen in einigen Heizverteilkreisen, teilweise mangelnder hydraulischer Abgleich in einigen Verteilkreisen und eine zu geringe Leistung der Heizkreispumpe. Nach Behebung der Mängel wurde die Heizkurve jedoch bisher nicht wieder abgesenkt, um Reklamationen der Mieterschaft auszuschliessen.

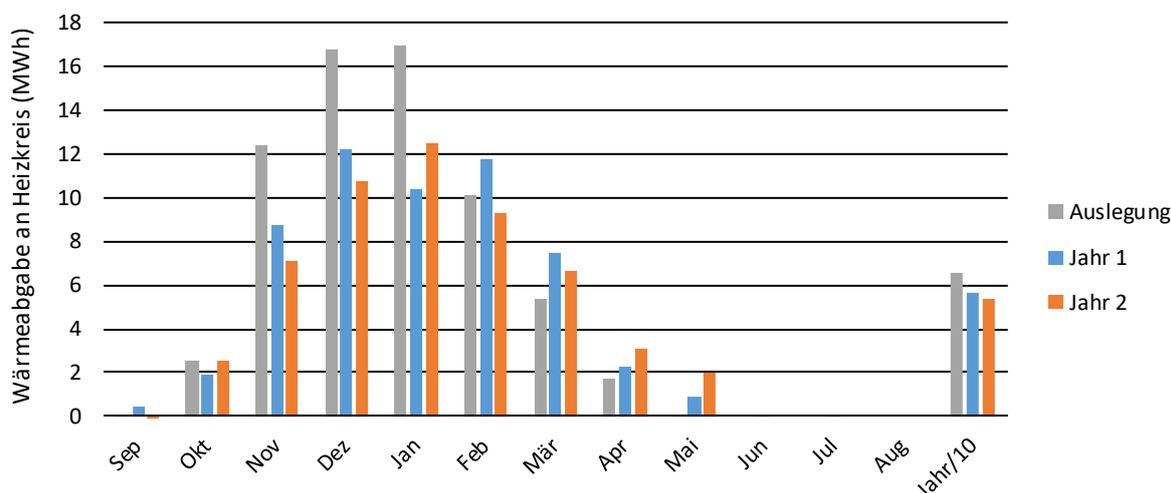


Abbildung 10: Wärmeabgabe an den Heizkreis durch die Solar-Eis-Heizung. Auslegung: simuliert, Jahr 1 & 2: gemessen.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Wärmeabgabe in der Auslegung und in den Messjahren und spezifische Eisspeicher- und Kollektorfeldgrösse pro jährlich ans Gebäude gelieferter Wärme.

	Auslegung	Jahr 1	Jahr 2
Raumwärme	66 MWh	56 MWh	54 MWh
Warmwasser	25 MWh	13 MWh	12 MWh
Begleitheizband	-	10 MWh	10 MWh
Gesamt	91 MWh	79 MWh	76 MWh
spezifische Eisspeichergrösse	2.3 m ³ /MWh	2.7 m ³ /MWh	2.8 m ³ /MWh
spezifische Kollektorfeldgrösse	1.3 m ² /MWh	1.5 m ² /MWh	1.6 m ² /MWh

Die Vorlauftemperaturen der Heizung liegen im zweiten Messjahr zwischen 2 bis 5 Kelvin über der Auslegung, die Rücklauftemperaturen zeigen Unterschiede bis zu 10 Kelvin. Beide Unterschiede sind relevant für die Effizienz der Solar-Eis-Heizung, da sowohl die Wärmepumpe als auch die Kollektoren, die beide die Raumwärme bereitstellen, bei höheren Temperaturen geringere Effizienz aufweisen.

Im Monitoring wurde ein Warmwasserverbrauch von 13 bzw. 12 MWh gemessen. Dieser liegt rund 50 % unter dem prognostizierten Warmwasserverbrauch von 25 MWh/a. Die Differenz ergibt sich in erster Linie daraus, dass die Heizung mit einer Zirkulationsleitung zur Temperaturhaltung in den Warmwasser-Verteilungen ausgelegt wurde, die dann aber nicht realisiert wurde. Während der Bauphase wurde entschieden, statt dessen eine elektrische Begleitheizung einzubauen. Die Wärmeerzeugung der Solar-Eis-Heizung für die Warmwasserbereitstellung ist folglich durch den Einbau der Begleitheizung stark verringert im Vergleich zu Auslegung.

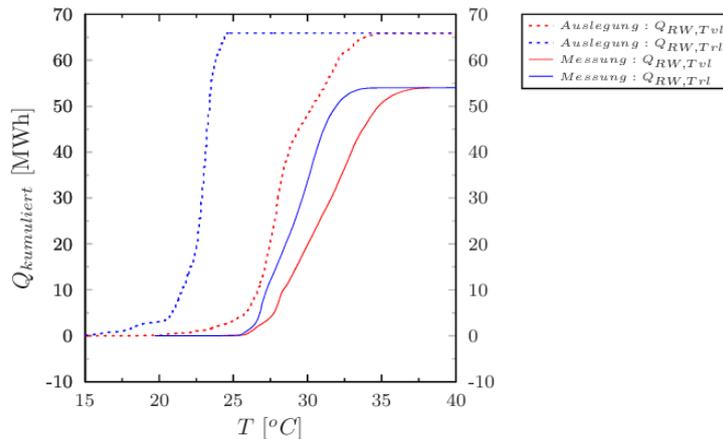


Abbildung 11: Vergleich der kumulierten Raumwärme in Auslegung und Messung (2. Messjahr), aufgetragen über der Vor- und der Rücklauftemperatur, bei der die Raumwärme abgegeben wurde (RW: Raumwärme, Tvl bzw. Trl: Temperatur des Vor- bzw. Rücklaufs der Heizverteilung).

Die elektrische Begleitheizung hat einen Jahresverbrauch von 10.3 MWh/a. Dieser Wärmeeintrag ergibt zusammen mit den gemessenen rund 12.5 MWh Warmwasser ab Boiler eine Nutzenergie von 22.8 MWh, was 91 % der erwarteten 25 MWh/a sind.

3.2.2 Elektrizitätsverbrauch der Heizung

Der Elektrizitätsverbrauch der Solar-Eis-Heizung ist in Abbildung 12 für die Auslegung und die beiden Messjahre dargestellt, wobei bei der Auslegung auch die Wärmeerzeugung der WP für die Warmwasser-Zirkulation enthalten ist. Der Stromverbrauch der Kompressoren in der Auslegung lässt sich also in der Darstellung nicht mit dem gemessenen Verbrauch der Kompressoren vergleichen.

In der Kategorie „Rest“ wird der Verbrauch von Ventilen, Pumpen (ausser Primär- und Sekundärkreis-pumpe der WP) und von der Gesamtsteuerung (ohne WP-interne Steuerung) aufgeführt. Bei der Auslegung sind alle Verbraucher ausser den Kompressoren in der Kategorie "Rest" enthalten.

Der gemessene Strombedarf der Kompressoren war im zweiten Messjahr geringer, was mit dem geringeren Wärmebedarf in diesem Jahr korreliert (siehe Abbildung 10). Der Vergleich zwischen Auslegung und Messung zeigt einen deutlich geringeren Strombedarf in der Simulation für Komponenten wie Pumpen, Ventile und Steuerung.

Im ersten Messjahr wurden wegen eines Ausfalls der Wärmepumpe die Heizstäbe in den Speichern aktiviert. Der Mehrverbrauch im zweiten Messjahr beim Pumpenstrom des Heizkreises entsteht durch eine permanente Erhöhung der Pumpenleistung, da es Probleme in der Heizverteilung bei niedrigeren Pumpenleistungen gab.

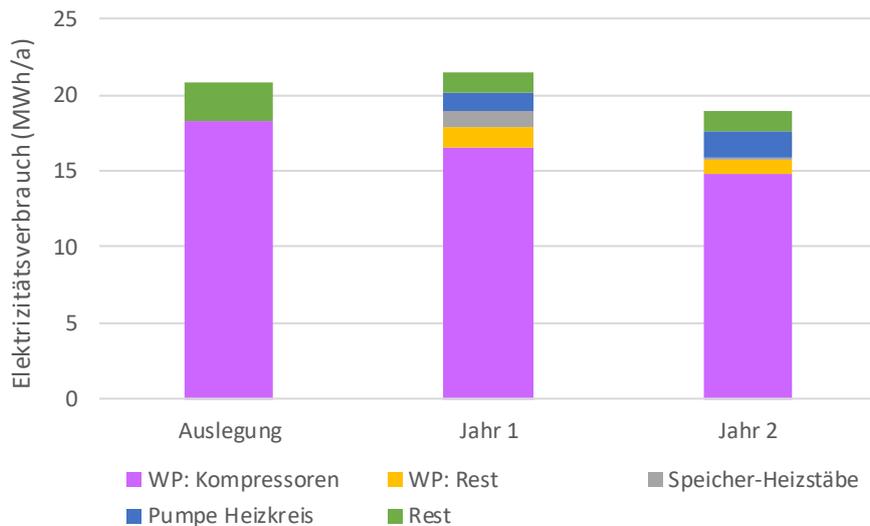


Abbildung 12: Elektrizitätsbedarf der Solar-Eis-Heizung – Vergleich der Auslegung und der Messung. Für die Auslegung sind alle Verbraucher ausser den Kompressoren in der Kategorie "Rest" enthalten.

3.2.3 Systemeffizienz / Arbeitszahlen

Die gemessenen Arbeitszahlen der Wärmepumpe und des Gesamtsystems (Solar-Eis-Heizung, ohne Begleitheizbänder) ist für das zweite Messjahr in Abbildung 13 aufgeführt.

Die Effizienz der Wärmepumpe zeigt in den Wintermonaten, in denen sie um 3.7 liegt, nur geringe Schwankungen³. Die Jahresarbeitszahl ohne Einbezug des Stromverbrauchs der Heizkreispumpe (JAZ) liegt mit 3.8 leicht über der JAZ_{WP} . Hier tragen die Monate mit grossen Arbeitszahlen nur zu einer geringen Erhöhung bei, da die Wärmemengen in diesen Monaten gering sind und ihr Einfluss auf die JAZ deswegen ebenfalls. Die JAZ+ liegt wegen dem deutlichen Einfluss des Stromverbrauchs der Heizkreispumpe auf den Kennwert mit 3.5 wieder tiefer.

Die Systemeffizienz JAZ+ liegt mit 3.5 somit deutlich unter dem Planungswert von 4.3. Die Gründe hierfür werden mit der Analyse der Messdaten und mit Anpassungen am Simulationsmodell in Kapitel 0 besprochen. Dort werden auch Möglichkeiten zur Optimierung der Effizienz aufgezeigt.

Zu beachten ist, dass in der Wärmepumpen-Branche oft Arbeitszahlen angegeben werden, welche ohne Speicherverluste berechnet werden (Wärmeabgabe ab Kondensator) und welche dann merklich höher und nicht vergleichbar mit den hier verwendeten Kennzahlen sind.

Wird in die Bilanz der JAZ+ auch der Stromverbrauch der Warmwasser-Begleitheizbänder eingerechnet (10.2 MWh im Jahr 2), beträgt die JAZ+ lediglich 2.2, was deutlich macht, dass für eine effiziente Wärmeversorgung für (Wohn-)Gebäude dringend auf Begleitheizbänder verzichtet werden sollte. Besonders bei einer Solar-Eis-Heizung, welche wie hier mit selektiven Kollektoren erstellt wurde, kann im Sommerhalbjahr ein grosser Teil des Wärmebedarfs der Zirkulationsleitungen mit Solarwärme gedeckt werden.

³ Wegen geringen Laufzeiten der Wärmepumpe ergeben sich in den Monaten Mai bis September grössere Schwankungen bzw. fehlende Werte für die AZ, da die Wärmemengenzähler nur stark kumulierte Werte ausgeben.

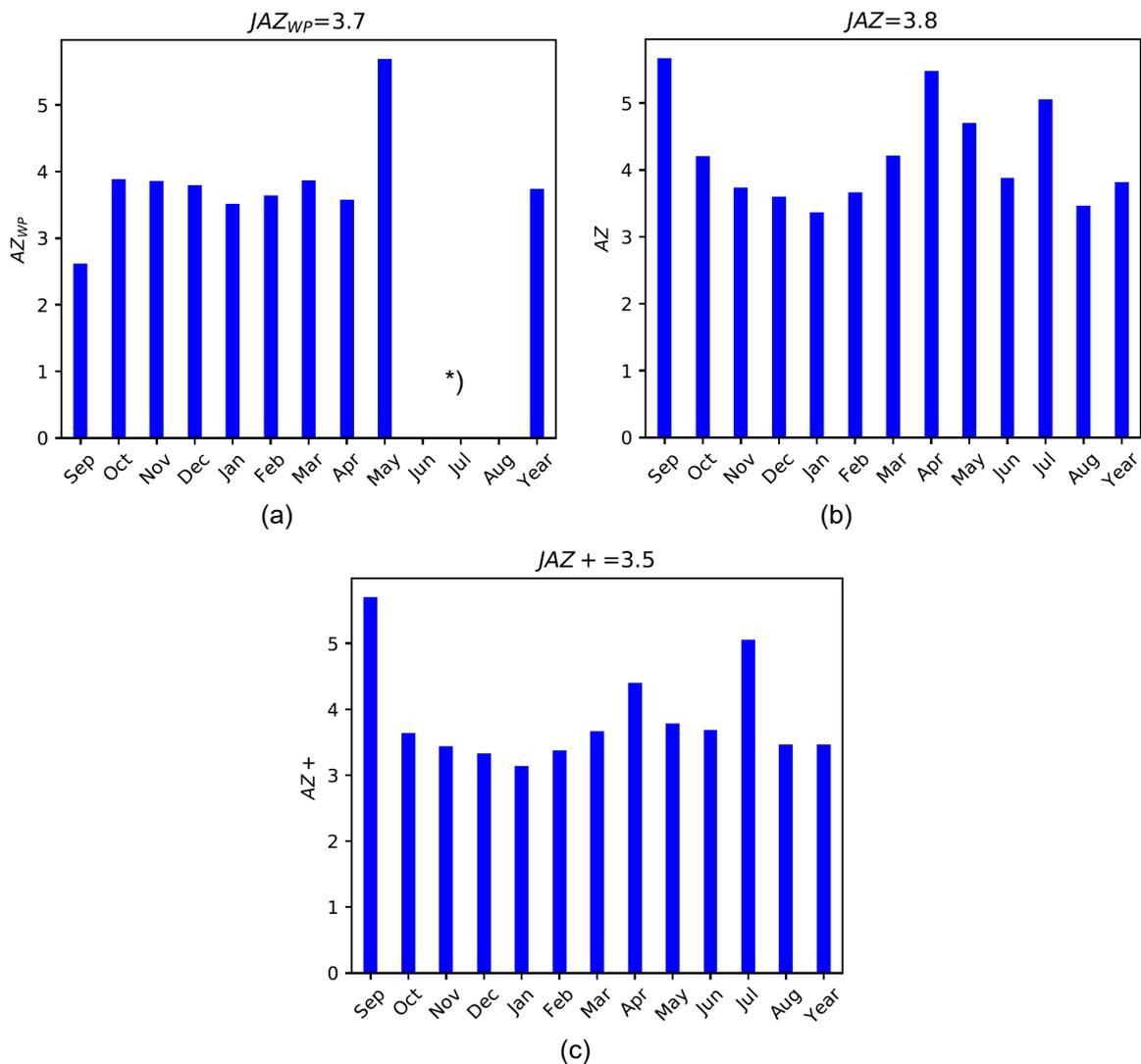


Abbildung 13: Monatliche und jährliche Arbeitszahlen im zweiten Messjahr (a) der Wärmepumpe und des Gesamtsystems (b) ohne und (c) mit Stromverbrauch der Heizverteilung. JAZ siehe Titel der Grafiken. Definition Kennwerte siehe Kapitel 2.1. *) in drei Sommermonaten war die Laufzeit der WP gering, weswegen der Wärmemengenzähler kein Messwert ausgegeben hat.

3.2.4 Wärmeflüsse

Die Wärmeflüsse, welche im Heizungssystem zwischen den Hauptkomponenten ausgetauscht oder als Nutzwärme abgegeben werden, sind in Abbildung 14 für das zweite Messjahr dargestellt. Der Heizungskeller mit den dort installierten Wärmemengenzählern wird als Bilanzgrenze genommen. Raumwärme und Warmwasserbezug sind zusammen mit der Beladung des Eisspeichers auf der negativen Y-Achse als Energieaustrag dargestellt. Bei den positiven Energieflüssen ist auch die von den Kompressoren der WP verbrauchte elektrische Energie aufgeführt, da sie von den Kompressoren via Druckerhöhung des Kältemittels grösstenteils in Wärme umgewandelt wird und somit einen Wärmeeintrag in das System bewirkt. Ansonsten sind die Wärmequellen der WP aufgeführt, da es diese sind, die mit der gewählten Bilanzgrenze einen Wärmeeintrag ins System bewirken, und nicht die WP selber.



Der Wärmeeintrag der Kollektoren ins System ist den gesamten Winter über hoch. Ein für konventionelle Solarwärmanlagen üblicher jahreszeitlicher Gang mit höheren Erträgen im Sommer ist nicht zu erkennen. Der Eisspeicher wird durch die Kollektoren schon ab Februar wieder stark beladen. Im Herbst ist die Beladung gering, da die Temperaturen im Eisspeicher noch hoch sind und die anfallende Solarstrahlung eher direkt für die Wärmepumpe oder im Pufferspeicher genutzt wird.

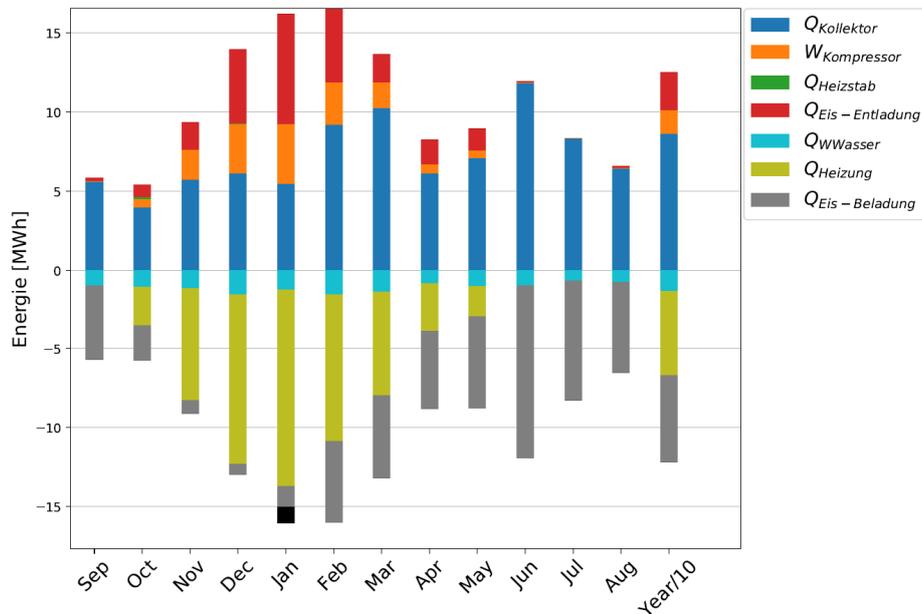


Abbildung 14: Monatliche Wärmebilanz der Solar-Eis-Heizung. Positive Werte durch Energieeintrag aus Kollektorfeld, elektrische Energie des Kompressors, Heizstäbe und Eisspeicher-Entladung. Negative Werte sind Raumwärme, Warmwasser und Eisspeicher-Beladung.

Die Wärmeflüsse zwischen den Systemkomponenten illustriert das Sankey-Diagramm in Abbildung 15. Der Darstellung kann entnommen werden, dass der Grossteil der Nutzwärme (Raumwärme und Warmwasser) von der Wärmepumpe bereitgestellt wird. Der Anteil der Solarwärme an der Nutzwärme (via Puffer und Boiler geliefert) ist jeweils klein.

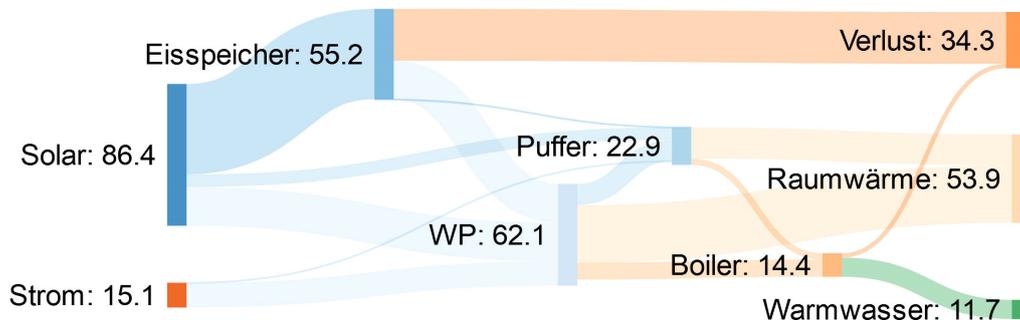


Abbildung 15: Sankey-Diagramm der Wärmeflüsse der Solar-Eis-Heizung im zweiten Messjahr (in MWh/a). Verlauf der Wärmeflüsse von links nach rechts, bis auf Eintrag Puffer in Eisspeicher (0.1 MWh/a), welcher eine Form der Enteisung der Eisspeicher-Wärmetauscher ist. (Betreffend Behandlung des Stroms der WP-Kompressoren als Wärme siehe Text; zur Berechnung der JAZ werden weitere Stromverbraucher eingerechnet, siehe JAZ-Definition.)



Der Eisspeicher weist hohe Wärmeverluste auf, da seine Hülle nicht wärmegeämmt ist und das Speicherwasser im Sommer hohe Temperaturen erreicht (siehe Kapitel 3.3). Seine Verluste wärmen das ihn umgebende Erdreich auf. Ein Teil dieser Wärme gelangt im Winterhalbjahr wieder in den dann kalten Eisspeicher. Dieser Wärmerückfluss ins System wird nicht gemessen und ist im Sankey-Diagramm nicht dargestellt. Der Hauptteil der Solarwärme (64 %) gelangt in den Eisspeicher. Ein relevanter Anteil der Solarwärme von 27 % wird Richtung WP-Verdampfer geleitet. Die Solarwärme wird nur zu einem geringen Teil direkt genutzt (9 %, Weg via Pufferspeicher), was daran liegt, dass im Winter die Nutzung der Solarwärme durch WP und Eisspeicher gemäss Steuerungslogik prioritär und im Sommer der Wärmebedarf gering ist. Durch den Wegfall der Warmwasser-Zirkulation ist der sommerliche Wärmebedarf, der durch die Solar-Eis-Heizung gedeckt wird, zudem geringer als ursprünglich geplant.

Die Wärmebilanz ist im Sankey-Diagramm für die WP und den Pufferspeicher nicht ausgeglichen bzw. sind keine Verluste angegeben, da die Verluste einerseits nicht gemessen werden können und ihre Ableitung aus den Wärmeflüssen wegen leicht widersprüchlicher Messwerte nicht möglich war.⁴

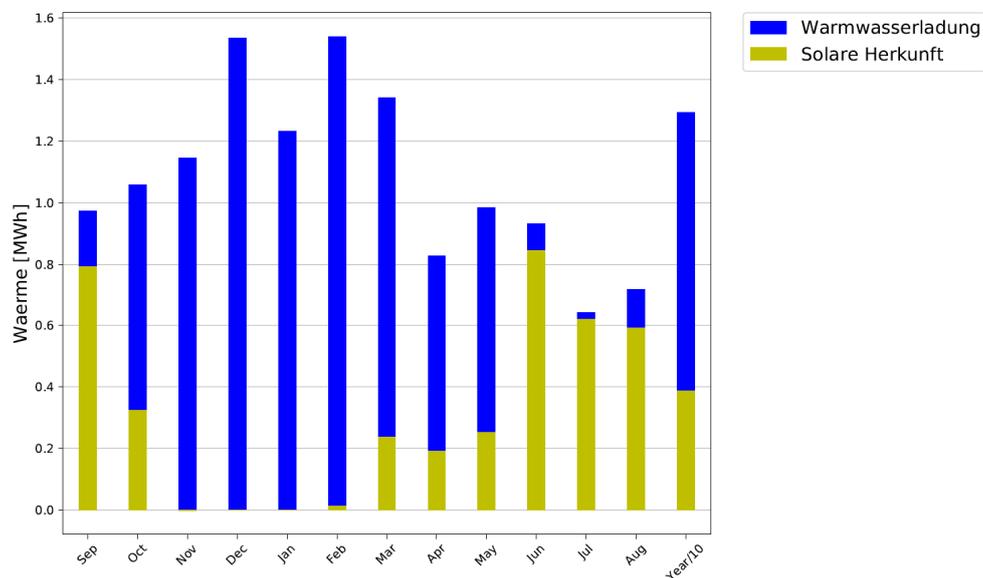


Abbildung 16: Beladung des Warmwasserspeichers im zweiten Messjahr mit Anteil direkter solarer Beladung durch die Kollektoren (via Umladung von Pufferspeicher).

Das Warmwasser kann direkt mit Solarwärme aufgeheizt werden, indem die Wärme aus dem Pufferspeicher in den Warmwasser-Boiler umgeladen wird. Dies geschieht in erster Linie in den Sommermonaten, wenn die Heizung dem Pufferspeicher keine Wärme entzieht und die Solarerträge hoch sind. Abbildung 16 zeigt den Anteil der direkten solarer Beladung des Boilers (im Jahr 30 %: solar 3.9 MWh von insgesamt 12.9 MWh). Diese solarer Wärmeeinträge sind wichtig für eine hohe JAZ, da der COP der solarer Warmwasserbereitstellung (Solare Wärme geteilt durch den Stromverbrauch der Solarkreis-pumpe) sehr hoch ist im Vergleich zum COP der Wärmepumpe. Die Abbildung zeigt, dass der Anteil der solarer Warmwassererzeugung wegen der eingesetzten unverglasten, spektral selektiven Kollektoren hoch ist. Durch den insgesamt geringen Warmwasserbedarf im Gebäude (u.a. durch Wegfall der Zirkulationsleitung) ist der Einfluss dieser effizienten Wärmebereitstellung auf die JAZ aber gering.

⁴ In die Wärmebilanz des Pufferspeichers gehen Messungen von 4 Wärmemengenzählern ein, deren Messwerte für die Erstellung der Energiebilanz des Pufferspeichers bei zahlreichen Betriebsmodi ausgewertet werden müssen, was zu Ungenauigkeiten führt.



3.2.5 Temperaturniveau der Wärme flüsse

Eine wichtige Kenngrösse von Solar-Eis-Heizungen sind die Temperaturniveaus, bei denen die unterschiedlichen Wärme flüsse zwischen den Anlagenkomponenten ausgetauscht werden. So beeinflusst zum Beispiel die Temperatur, mit der die Wärmepumpe oder die Kollektoren betrieben werden, direkt ihre jeweilige Effizienz. Abbildung 17 zeigt die gemessenen kumulierten Energie flüsse der Heizung in Abhängigkeit der jeweiligen Vor- bzw. Rücklauf temperaturen.

Dem Eisspeicher wurden durch die WP 6 MWh bei 0 °C bzw. darunter, also durch Eisbildung, entzogen (siehe Kurvenverlauf bei $T \leq 0$ °C von $Q_{Eis \rightarrow WP}$). Die 6 MWh entsprechen einem Vereisungsgrad im Eisspeicher von rund 60 % der zur Verfügung stehenden Vereisungskapazität.

Die Abbildung zeigt, dass rund 8 MWh solare Wärme (gelb, $Q_{Kol \rightarrow WP}$) unter 0 °C direkt zum Verdampfer der Wärmepumpe geführt werden, ohne dass gleichzeitig der Eisspeicher als Quelle verwendet wird. Um diesen Betrag wird also die Entladung des Eisspeichers durch diesen Betriebsmodus verringert, was unter Inkaufnahme eines geringeren COP (wegen Betrieb unter 0 °C) eine Entlastung des Eisspeichers im Winter ermöglicht.

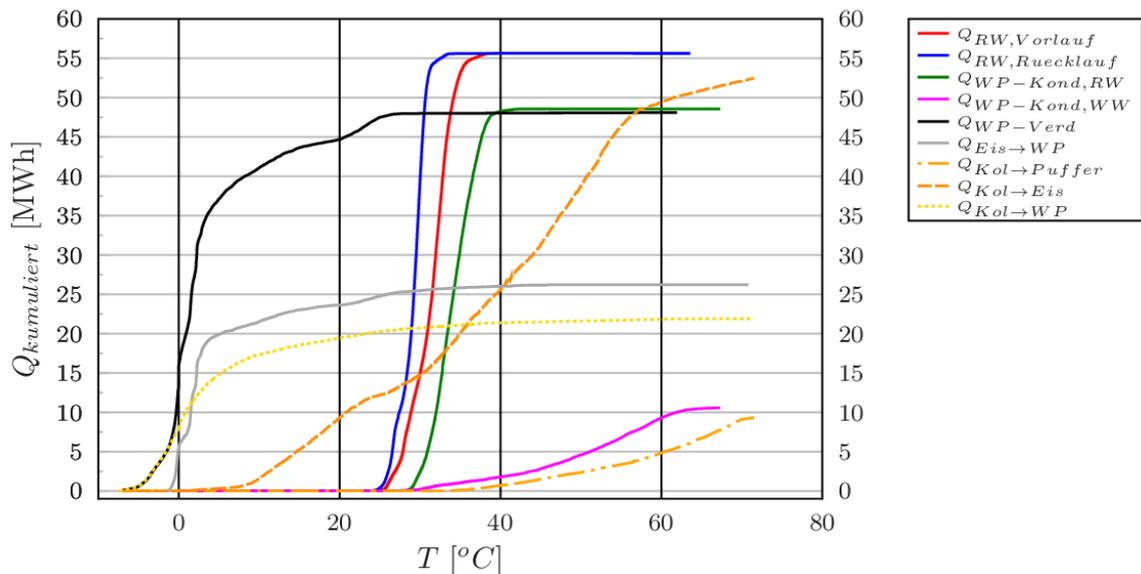


Abbildung 17: Kumulierte Energien im ersten Messjahr aufgetragen über der Temperatur, bei der die Energie übertragen wurde (RW: Raumwärme, WP: Wärmepumpe, Kond.: Kondensator WP, WW: Warmwasser, Verd.: Verdampfer WP, Eis: Eisspeicher, Kol.: Kollektorfeld).

3.3 Eisspeicher

Die Nutzung des Eisspeichers ist stark saisonal geprägt, wie sich Abbildung 18 entnehmen lässt (Messjahr 2). Im Winter fand vor allem ein Wärmeentzug aus dem Speicher statt. Schon im Februar erfolgte aber ein grosser Eintrag von Solarenergie, mit dem das Eis im Speicher wieder vollständig geschmolzen wurde. Der grosse Eintrag von Solarenergie ist eine Folge von einer geringen Heizlast im Februar (Abbildung 10), die wiederum eine Folge der hohen solaren Einstrahlung (Abbildung 8) und der hohen Aussentemperaturen (Abbildung 9) im Februar 2019 sind. In allen Monaten wurde sowohl Wärme ein-



als auch ausgetragen. Der Eisspeicher dient also auch dem Ausgleich kurzfristiger Differenzen zwischen solarem Energieangebot und der Wärmenachfrage im Gebäude.

Da der Eisspeicher nur an der Decke und an der Seite zur Tiefgarage wärmedämmend ist und zudem im Sommer auf hohe Temperaturen erwärmt wird, entstehen hohe Wärmeverluste im Sommer. Der Wärmeverlust beträgt mit einem Wärmeeintrag von 55 MWh/a und einem Bezug von 24 MWh/a rund 57 %. Ein Teil dieser Verluste sorgt dafür, dass das Erdreich um den Eisspeicher zu Beginn des Winterhalbjahrs eine höhere Temperatur aufweist. Diese Wärme fließt teilweise in den Eisspeicher zurück und hat somit einen positiven Effekt im Winter.

Im Vergleich liegen die Speicherverluste in der Simulation bei 55 %, was zeigt, dass mit dem Simulationsmodell der Wärmeaustausch des Eisspeichers mit dem Erdreich sehr gut berechnet werden kann.

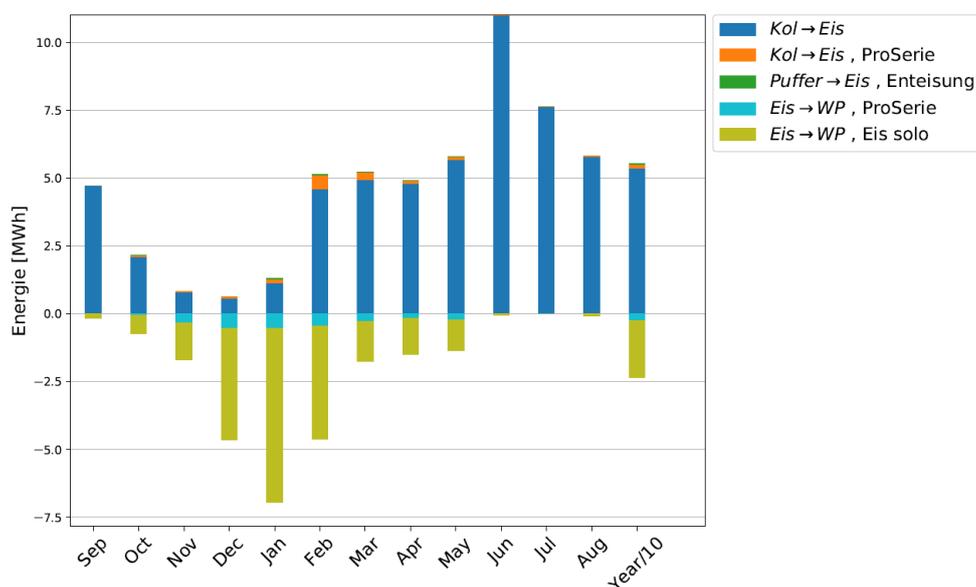


Abbildung 18: Monatliche Energieflüsse in und aus den Eisspeicher (Kol = Kollektorfeld, Eis = Eisspeicher, ProSerie ist ein Programmmodus bei dem Kollektoren und Eisspeicher zeitgleich Wärmequellen der WP sind).

Der zeitliche Verlauf der durchschnittlichen Wassertemperatur im Eisspeicher (Abbildung 19) zeigt deutliche Unterschiede zwischen den beiden Messjahren einerseits und der Messjahre zur Auslegung andererseits. Die sommerlichen Speichertemperaturen liegen in der Auslegung deutlich tiefer, was v.a. mit unterschiedlichen Einstellungen der Anlagensteuerung zusammenhängt. In der Auslegung ist der Eisspeicher zudem deutlich länger auf 0 °C, was auch einem höheren Vereisungsgrad entspricht. In der Simulation wird ein maximaler Vereisungsgrad des gesamten Eisspeicherwassers von 45 % erreicht (Abbildung 20). Dies entspricht dem maximal möglichen Vereisungsgrad, der wegen der Bauform des Eisspeichers im Projekt mit nicht-rechtwinkliger Grundfläche und zwei Wärmetauscherreihen etwas reduziert ist. Der maximal erreichte Vereisungsgrad im ersten Messjahr kann anhand Abbildung 17 auf 27 % abgeschätzt werden.

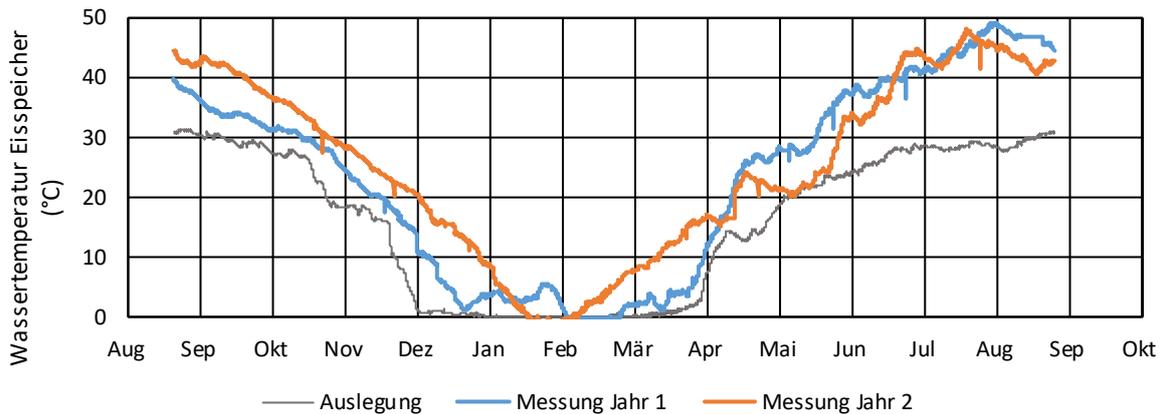


Abbildung 19: Durchschnittliche Wassertemperatur im Eisspeicher gemäss Auslegung und gemessen.

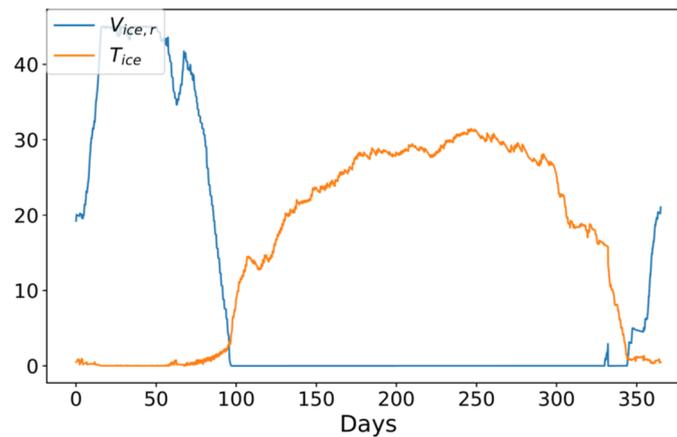


Abbildung 20: Simulierter Vereisungsgrad des Eisspeichers in % und Speichertemperatur in °C gemäss Auslegung.

Der zeitliche Verlauf der Wassertemperatur im Eisspeicher auf vier gleichverteilten Höhen ist in Abbildung 21 für einen Ausschnitt aus dem ersten Messjahr wiedergegeben. Da die Wärmetauscher am Boden installiert sind, entsteht im Herbst durch den Wärmeentzug der Wärmepumpe eine Temperaturschichtung. Die Wärme der Wasserschichten mit höheren Temperaturen (oberhalb der Wärmetauscher) wird wegen der Dichteumkehr von Wasser erst durch Vermischung mit darunterliegenden kalten Schichten bei 4 °C in Richtung Wärmetauscher gebracht. Eisplatten wurden erst am 15. Februar im Eisspeicher abgelagert, was rund einen Monat später als erwartet war und der warmen Witterung im Januar geschuldet ist. Der grösste Vereisungsgrad wurde ca. am 5. März festgestellt. Abbildung 22 zeigt Fotos der Webcam, die diese im Winter in 15-Minuten-Abständen durch das Unterwasserfenster des Eisspeichers macht. Im Speicherwasser ist zwischen Fenster und Eis ein Gitter installiert, um die Scheibe vor Eis zu schützen. Auf dem linken Foto sieht man unten einige der enteisbaren Wärmetauscher am Speicherboden und oben Eisplatten, welche an der Wasseroberfläche treiben.

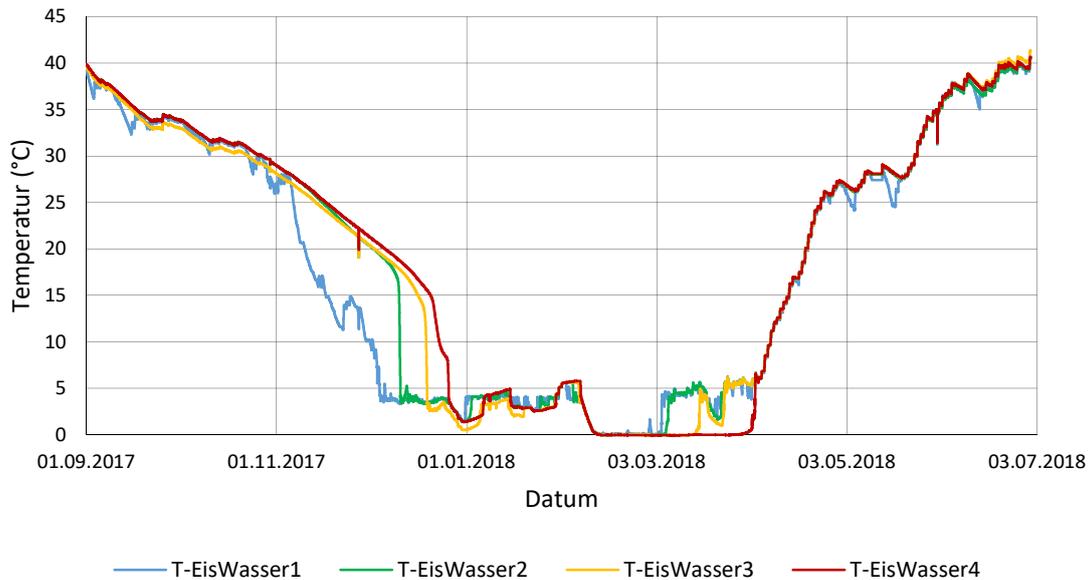


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Wassertemperatur im Eisspeicher auf vier Höhen (Sensoren vertikal gleichmässig verteilt, Sensor 1 zuunterst).

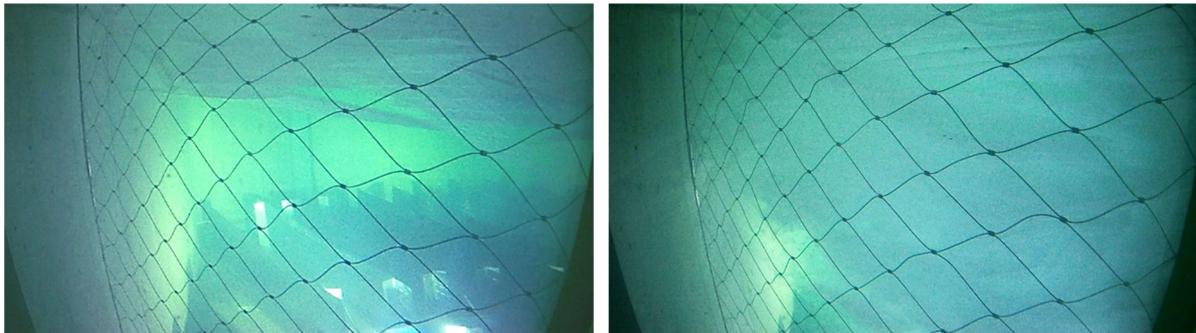


Abbildung 22: Blick in den Eisspeicher. Links: Ende Februar 2018 mit treibenden Eisplatten (oberer Bildbereich). Rechts: Anfang März mit stärkerer Vereisung.

3.4 Kollektorfeld

3.4.1 Erträge

Die Verwendung der Erträge des Kollektorfeldes, welches aus 120 m² unverglasten, spektral selektiven Kollektoren besteht, zeigt Abbildung 23 für das zweite Messjahr. Gesamthaft wurden 715 kWh Wärme pro Quadratmeter Kollektorfläche erzeugt, was einer sehr hohen Flächeneffizienz entspricht. Der Hauptteil der Kollektorfelderträge von 86 MWh/a (100 %) wird an den Eisspeicher geliefert (55 MWh/a, 64 %). Dominant in den Wintermonaten ist wiederum die direkte Nutzung der Erträge des Kollektorfeldes im Verdampfer der Wärmepumpe (beide Balken von $Q_{Kol \rightarrow WP}$, 19 + 5 MWh/a, 27 %). Der Pufferspeicher wird im Messjahr mit 8 MWh (9 %) Wärme beladen, wobei in zwei Wintermonaten kein Wärmeeintrag in den Puffer durch die Kollektoren erfolgte.

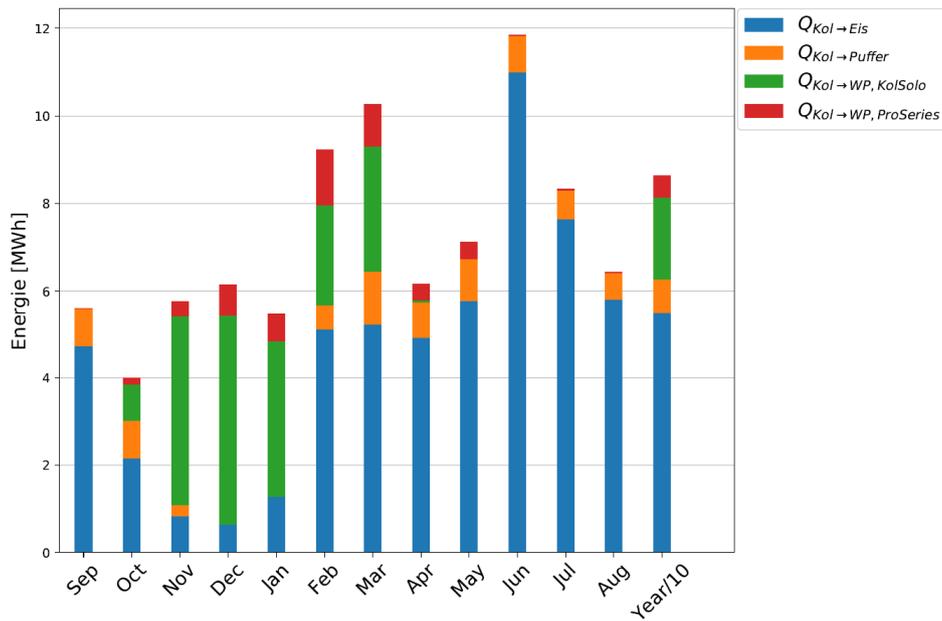


Abbildung 23: Monatlicher Kollektorfeldertrag nach Verwendung (2. Messjahr).

Abbildung 24 zeigt eine Gegenüberstellung der monatlichen Solarstrahlung in der Kollektorebene und der von den unverglasten selektiven Kollektoren generierten Erträge in kWh pro m² Absorberfläche. Da der Eisspeicher im Herbst auf hohe Temperaturen beladen war, und mit den unverglasten Kollektoren im Herbst in der Regel keine hohen Temperaturen für die Warmwassererzeugung erreicht werden können, sind die Erträge im Verhältnis zur eingestrahlten Energie relativ gering. Im Winter zeigt sich ein anderes Bild. Hier sind die Erträge teils höher als die Einstrahlung, was möglich ist, weil die unverglasten Kollektoren auch Wärme von der Umgebungsluft aufnehmen, wenn sie kälter als diese sind. Dies ist im Winter oft der Fall, sobald das Kollektorfeld als Wärmequelle für die WP eingesetzt wird, oder der Eisspeicher beladen wird wenn die Umgebungsluft höher ca. 4 °C ist. Relativ zur Solarstrahlung betrug die im betrachteten Jahr von den Kollektoren gelieferte Wärme 57 % (inkl. Wärmegewinne aus der Luft im Winter).

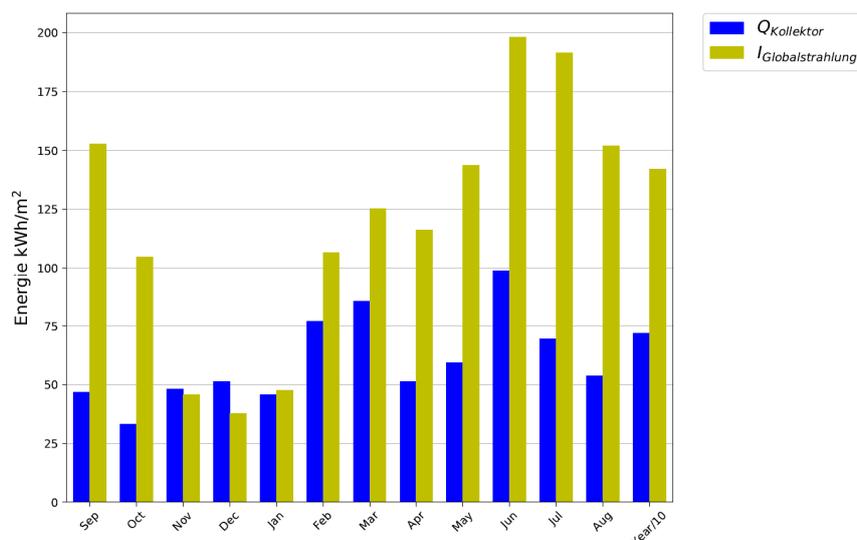


Abbildung 24: Monatliche spezifische Solarstrahlung in der Kollektorebene und vom Kollektorfeld generierte Wärmeerträge pro m².



3.4.2 Einfluss der rückseitigen Wärmedämmung

Zwei der 15 Reihen des Kollektorfeldes wurden messtechnisch gesondert ausgerüstet (Abbildung 25). Eine der Reihen hat wie die restlichen 13 eine rückseitige Wärmedämmung wie vom Hersteller vorgesehen. Bei der anderen Reihe wurde bei allen vier Kollektoren die Dämmung weggelassen, wodurch die Absorber an der Rückseite mit der Umgebungsluft in Kontakt stehen und durch den konvektiven Wärmeaustausch Wärmeverlust oder -gewinne entstehen können. Da die Absorber aus poliertem Edelstahl bestehen, ist die Rückseite spektral selektiv, d.h. sie verhält sich als Spiegel für langwellige Strahlung, was den Strahlungsaustausch mit der Umgebung begrenzt. In beiden Reihen wurde jeweils der Volumenstrom und die Austrittstemperatur des Fluides gemessen; in einer Reihe zudem die Eintrittstemperatur (Messgeräte siehe Anhang A.1).



Abbildung 25: Ansicht (a) einer der rückseitig gedämmten Kollektorreihen und (b) der einzelnen Kollektorreihe, die rückseitig nicht wärmegeklämt ist.

Die Auswertung der Wärmegewinne der beiden Kollektorreihen für ein Jahr und für ausgewählte Sommer- und Wintermonate (Tabelle 3, Abbildung 26) zeigt, dass wie erwartet einerseits die Erträge der ungedämmten Reihe im gesamten Messjahr und im Sommer leicht tiefer sind als diejenigen der gedämmten und andererseits die Wintererträge leicht höher sind. Im Sommerhalbjahr ist die Temperatur der Kollektoren im Betrieb in der Regel höher als die Temperatur der Umgebungsluft, weswegen der ungedämmte Kollektor mehr Wärme an die Umgebung verliert. Umgekehrt gewinnt der ungedämmte Kollektor im Winter mehr Wärme aus der Umgebungsluft als der gedämmte zu Zeiten, in denen der Absorber im Betrieb kälter als die Umgebungsluft ist. Die Messunsicherheiten sind aufgrund der oft kleinen Temperaturunterschiede zwischen Kollektorvor- und -rücklauf hoch, weswegen die Ergebnisse für diese Gegenüberstellung mit erhöhter Unsicherheit behaftet sind.

Grössere Unterschiede in den Erträgen der Kollektoren zeigen sich beim Betrieb der Kollektoren als Quelle für die Wärmepumpe während der Nächte, was in Kapitel 4.2 im Rahmen der Validierung des Kollektormodells analysiert wird.

Weitere, nachstehend qualitativ betrachtete Unterschiede zwischen den Kollektortypen zeigen sich bei Schneebedeckung. Die spezifischen Kollektorleistungen (pro m^2) und die Vorlauftemperaturen an einem Tag mit morgendlicher Schneebedeckung, die dann im Tagesverlauf teilweise schmilzt, zeigt Abbildung 27. Die Fotos in Abbildung 28 geben einen visuellen Überblick über die Schneebedeckung der Reihen für interessante Uhrzeiten im Tagesverlauf. Während des Betriebs des Kollektorfeldes um 12 Uhr sind die Leistungen beider Kollektortypen sehr ähnlich (bei geringer Einstrahlung von rund 150 W/m^2). Alle Kollektoren sind zu dieser Zeit mit Schnee bedeckt. Im weiteren Tagesverlauf schmilzt nur der



Schnee auf den rückseitig gedämmten Kollektoren, was zu einem deutlichen Anstieg ihrer Erträge zwischen 13 und 15 Uhr führt. Mit den herrschenden kalten Aussentemperaturen um -5°C sind die Wärmeverluste des ungedämmten Kollektortyps so gross, dass die Oberflächentemperatur des Absorbers nahe bei 0°C bleibt und der Schnee nicht abschmelzen kann. Die Erträge des ungedämmten Kollektors bleiben entsprechend unter 50 % der Erträge des gedämmten Kollektors.

Tabelle 3: Vergleich der Erträge der rückseitig ungedämmten und der rückseitig gedämmten Kollektorreihe (spezifischer Kollektorbeitrag inkl. Angabe des doppelten Vertrauensintervalls).

	Spezifischer Kollektorbeitrag ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$)		Differenz ungedämmt zu gedämmt
	rückseitig ungedämmt	rückseitig gedämmt	
Jahr (2018)	681 ± 42	722 ± 42	-6 % (-41 kWh/m^2)
3 Sommermonate (Juni, Juli, Aug)	189 ± 20	228 ± 20	-17 % (-39 kWh/m^2)
3 Wintermonate (Jan, Feb, März)	172 ± 16	158 ± 16	+8 % (14 kWh/m^2)

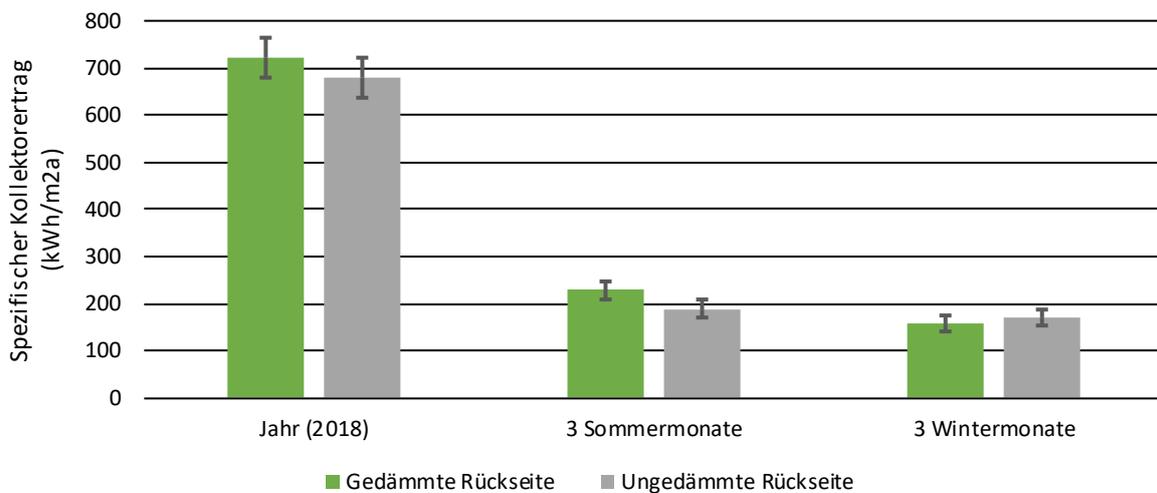


Abbildung 26: Vergleich der Erträge der rückseitig ungedämmten und der rückseitig gedämmten Kollektorreihe aus Tabelle 3 (inkl. Angabe des doppelten Vertrauensintervalls).

Dass auch gegenteilige Effekte entstehen können und somit vielfältige Bedingungen für die Kollektoren auftreten können, zeigt Abbildung 29. Hier konnte der Schnee von einigen der rückseitig ungedämmten Kollektoren abrutschen, während der Schnee auf sämtlichen gedämmten Kollektoren bis zum Zeitpunkt der Aufnahme liegen geblieben ist. Die Temperatur der Umgebungsluft der Kollektoren lag zum Zeitpunkt der Aufnahme bei ca. $+0.5^{\circ}\text{C}$ und die Globalstrahlung während mehrerer Stunden um $50 \text{ W}/\text{m}^2$, der Himmel war also strak bedeckt und die Einstrahlung sehr gering (beim in Abbildung 28 gezeigten Fall lag die Lufttemperatur um -5°C).

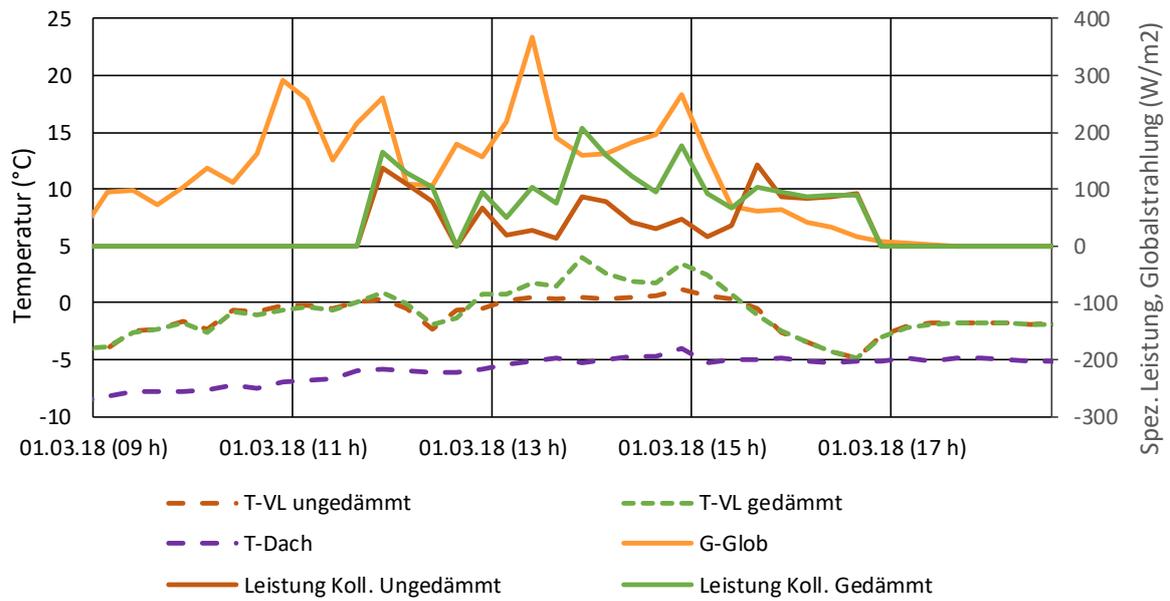


Abbildung 27: Vergleich der gedämmten und ungedämmten Kollektorreihen an einem Tag mit zeitweiser Schneebedeckung.

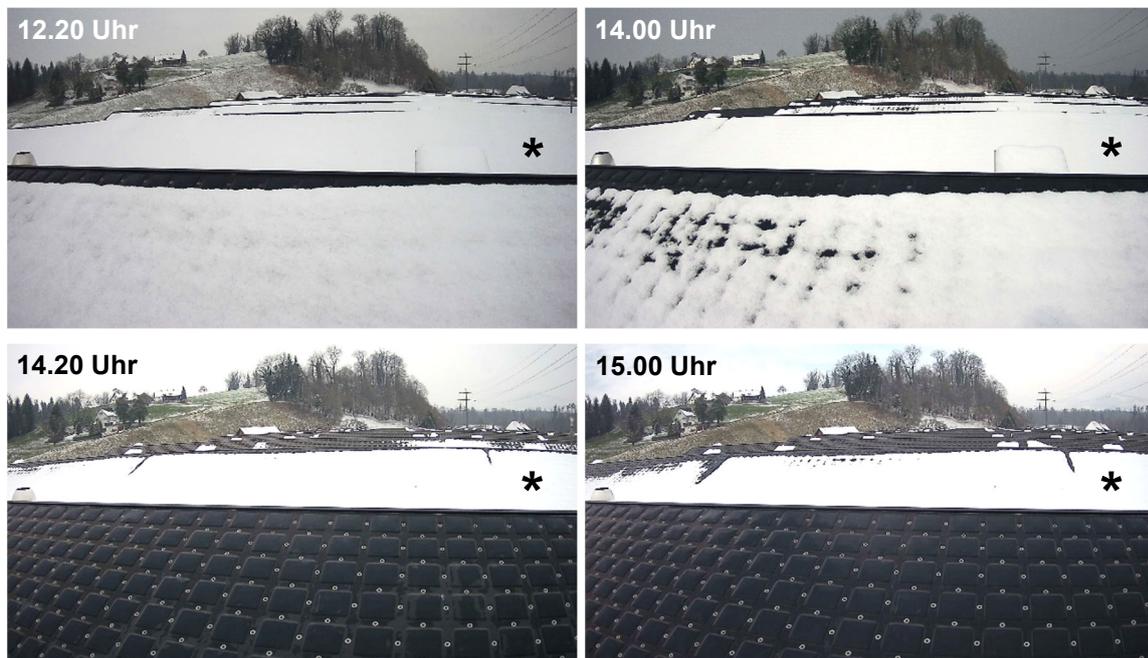


Abbildung 28: Schneebedeckung der Kollektorreihen am 1.3.2018. Die rückseitig ungedämmte Kollektorreihe ist mit einem Stern (*) markiert.



Abbildung 29: Schneebedeckung der Kollektorreihen am 8.1.2019 (15 Uhr). Nur der Schnee auf einem Teil der rückseitig ungedämmten Kollektoren () konnte abrutschen.*

Die Betrachtungen für die beiden Kollektortypen zeigen, dass bei Schneebedeckung sehr unterschiedliche Bedingungen für die Kollektoren entstehen können. Diese Dynamik mit Simulationen abbilden zu können, würde sehr detaillierte und genaue Modelle voraussetzen. Die Relevanz der Schneebedeckung für den Anlagenbetrieb kann wiederum für Standorte im Schweizer Mittelland, wie im vorliegenden Projekt der Fall, als eher gering eingeschätzt werden. Wichtig wiederum ist eine hinreichend genaue Simulation der Kollektorerträge in häufig auftretenden Situationen im Winter, tagsüber sowie nachts, was in Kapitel 4.2 im Rahmen der Modellvalidierung untersucht wird.



4 Simulationen

Die Simulation der Solar-Eis-Heizung, die mit dem Computerprogramm TRNSYS⁵ durchgeführt wurde, wird in den folgenden Kapiteln – basierend auf dem Simulationsstand für die Auslegung – anhand der Messdaten aus dem Monitoring angepasst. Ziel der Anpassungen ist:

- der Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messergebnissen: hierfür wird eine Validierung der Simulation mit den Messungen durchgeführt,
- das Nachvollziehen, weshalb die gemessene JAZ+ deutlich niedriger ist als die gemäss Simulationsergebnissen der Auslegung erwartete JAZ+,
- die Beantwortung der Forschungsfragen zu den Kollektoren: Einfluss der rückseitigen Wärmedämmung der Kollektoren auf die Systemeffizienz (siehe Kapitel 1).

Bei den Jahressimulationen werden jeweils zwei Jahre mit gleichen Input-Daten (Wetterdaten etc.) simuliert und nur die Ergebnisse des zweiten Jahrs für die Auswertung verwendet. Auf diese Weise werden Einschwingeffekte der Temperatur des Erdreichs eliminiert, welches den Eisspeicher umgibt.

4.1 Parameter-Fit des Wärmepumpenmodells

Mit den Messdaten aus dem Monitoring konnte die Effizienz der Wärmepumpe analysiert und mit den Herstellerangaben verglichen werden. Es zeigt sich dabei, dass die Effizienz der installierten Wärmepumpe deutlich geringer ist, als dies gemäss Datenblatt des Herstellers zu erwarten war.

Die Effizienz (COP) der Wärmepumpe wurde im Betrieb mit den Messdaten des Monitorings für einige Betriebszustände ermittelt. Hierfür konnten die Messung der elektrischen Leistung der Kompressoren verwendet werden und des Wärmemengenzählers, welcher die Wärmeabgabe des Kondensators misst. Beide Messgrößen werden mit hoher Genauigkeit⁶ vom installierten Monitoring erfasst. Es wurden Messdaten in 1-Minuten-Zeitschritten verwendet.

Die Kriterien für die Auswahl der Messpunkte, welche in die Analyse eingingen, sind wie folgt, wobei die Kriterien alle gleichzeitig eingehalten werden müssen:

- WP läuft 100 % (beide Kompressoren in Betrieb)
- Eisspeicher ist einzige Wärmequelle
- Senktemperatur liegt bei 35, 45 bzw. 55 °C, jeweils innerhalb eines Bereichs von +/- 0.5 Kelvin
- WP lief vor Verwendung des Messpunkts bereits 7 Minuten (damit circa Gleichgewichtszustand der WP erreicht ist) und auch im darauffolgenden Zeitschritt (um Abschalteneffekte herauszufiltern).

In die Berechnung des COP geht hier nur der Stromverbrauch der Kompressoren ein. In der Norm EN 14511 wird zusätzlich auch der benötigte Pumpenstrom zur Überwindung des Druckverlusts der Wärmetauscher der WP berücksichtigt. Der hier vorgenommen Parameter-Fit ist also konservativ im Sinne, dass der Fit eher eine zu hohe Effizienz ergibt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die COP aus dem Datenblatt des Wärmepumpenherstellers wiedergegeben, die Datenpunkte aus dem Monitoring für die Analyse der Effizienz und der Parameter-

⁵ <http://www.trnsys.com/>, Es wurde TRNSYS 17 verwendet.

⁶ Angaben zur Messgenauigkeit siehe Anhang



Fit für die Simulation. Bei beiden Senktemperaturen (35 °C, 55 °C) ist die gemessene Effizienz deutlich geringer als die im Datenblatt angegebene. Die COP-Differenz beträgt minimal rund 0.5 und maximal 1. Die grossen Abweichungen des COP schlagen sich auch in der JAZ, also dem COP über 12 Monate, nieder und können somit einer der Gründe sein für die niedrige JAZ der Solar-Eis-Heizung, die deutlich unter den Erwartungen liegt.

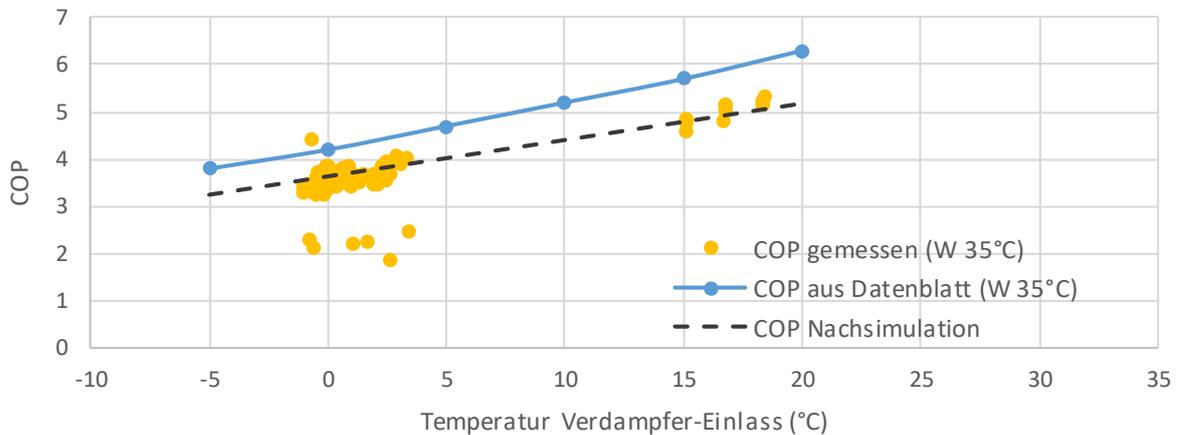


Abbildung 30: COP für eine Senktemperatur von 35 °C mit COP-Angaben des WP-Herstellers und COP-Fit ("COP Nachsimulation"), der in der Folge in den Simulationen verwendet wird.

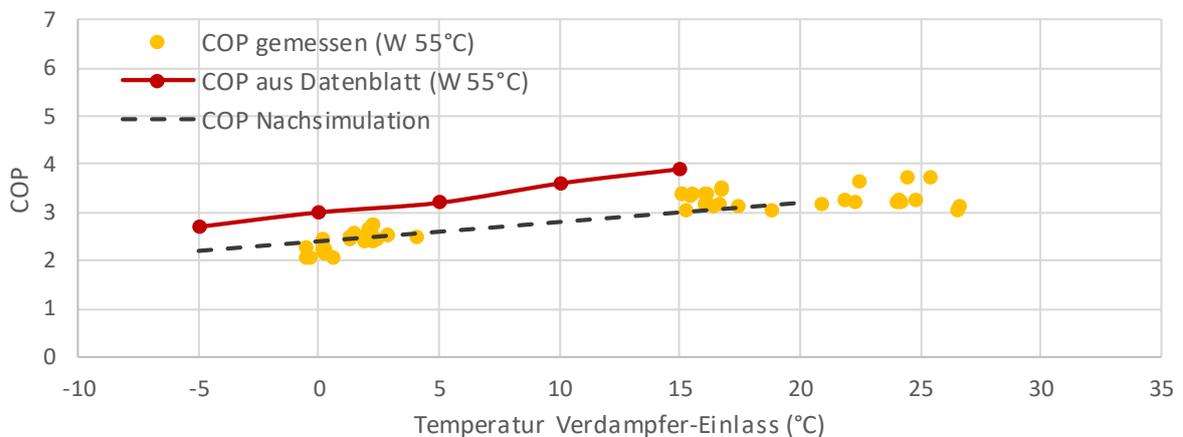


Abbildung 31: COP für eine Senktemperatur von 55 °C mit COP-Angaben des WP-Herstellers und COP-Fit ("COP Nachsimulation"), der in der Folge in den Simulationen verwendet wird.

Mögliche Gründe für die verringerte Effizienz werden aktuell vom WP-Hersteller noch analysiert. Einer der Kompressoren ist wiederholt ausgefallen (wenn auch selten) wobei die Ursache hierfür noch nicht geklärt werden konnte. Die Messdaten deuten darauf hin, dass der Motor des Kompressors Unregelmässigkeiten zeigt. Dies kann möglicherweise auch die verringerte Effizienz der WP erklären.



4.2 Parameter-Fit des Kollektormodells

Mit den Monitoring-Daten der gesondert vermessenen Kollektorreihen wurde das Kollektormodell der Simulation validiert.⁷ Von den beiden gesondert vermessenen Kollektorreihen ist eine Reihe rückseitig wärmegeämmt und die andere nicht (siehe Kapitel 3.4.2). Beide Reihen sind mit 30° Neigung auf dem Flachdach montiert. Wegen der Aufständigung der Reihen befindet sich zwischen den Kollektorunterkanten und dem Flachdach ein 30 cm hoher Luftspalt. Ziel der Validierung war:

- die Erträge des Kollektorfelds in der Simulation genauer abbilden zu können, wofür die Parameter des Modells des rückseitig gedämmten Kollektors angepasst wurden (14 der 15 Kollektorreihen sind gedämmt),
- den Kollektor ohne rückseitiger Wärmedämmung in der Simulation abbilden zu können, wofür ein zweiter Parameter-Fit durchgeführt wurde.

Das validierte Kollektormodell mit Dämmung dient in der Folge für die nachträglichen Systemsimulationen der Feldanlage. Mit dem validierten Modell ohne Dämmung kann abgeschätzt werden, welche Auswirkung die Verwendung solcher Kollektoren auf die Auslegung der Solar-Eis-Heizung haben kann.

4.2.1 Verwendete Messdaten

Für die Validierung des Kollektormodells werden vier verschiedene Messperioden verwendet, deren Messdaten zusammenhängend in die Simulation als Eingangswerte eingelesen wurden (Abbildung 32):

- ein Sommertag, an dem morgens der Eisspeicher geladen wird, über den Mittag der Pufferspeicher mit hohen Temperaturen und am Nachmittag wieder der Eisspeicher (Periode: 16.7.2019, 8 - 19:50 Uhr),
- eine warme Nacht (Kollektoren als Quelle für WP), in der die Absorbtemperaturen über 0 °C bleiben (Periode: 3.12.2018, ab 17:30 Uhr),
- eine kalte Nacht (Kollektoren als Quelle für WP), in der sich auf den Absorbern Reif bildet (Periode: 6.12.2017, ab 20 Uhr),
- eine Nacht mit Schnee auf den Absorbern (Kollektoren als Quelle für WP) (Periode: 2.1.2019, ab 20 Uhr).

Abbildung 33 zeigt für die beiden Zeiten mit Eis bzw. Schnee auf den Absorbern Fotos, welche mit der installierten Webcam aufgenommen wurden.

Gemessen wurden die Volumenströme in den Kollektorreihen (MID-Messgeräte, siehe Anhang A.1), eine Einlass- und beide Auslasstemperaturen (4-Leiter Pt100, Klasse 1/3B), die Globalstrahlung, die langwellige Gegenstrahlung in der Kollektorebene und die Lufttemperatur des Dachs (hinter einer Kollektorreihe). Wetterdaten (Windgeschwindigkeiten, Luftdruck, Luftfeuchte) und der Anteil Diffusstrahlung an der Globalstrahlung wurden vom SPF-Testing-Dach (1.6 km Entfernung) genommen.

⁷ Verwendet wird Trnsys-Type 833 (Version 5.10), welcher eine Weiterentwicklung des SPF basierend auf Type 832 "Dynamic collector model" (v5.10, entwickelt von Bengt Perers et al.). Der Type wurde vom SPF dahingehend ergänzt, dass ein zweites Set von Absorber-Parametern angegeben werden kann, sodass z.B. Änderungen in der Energiebilanz des Absorbers näherungsweise abgebildet werden können, wenn die Absorbtemperaturen den Taupunkt unterschreitet (Verlust der Selektivität des Absorbers).

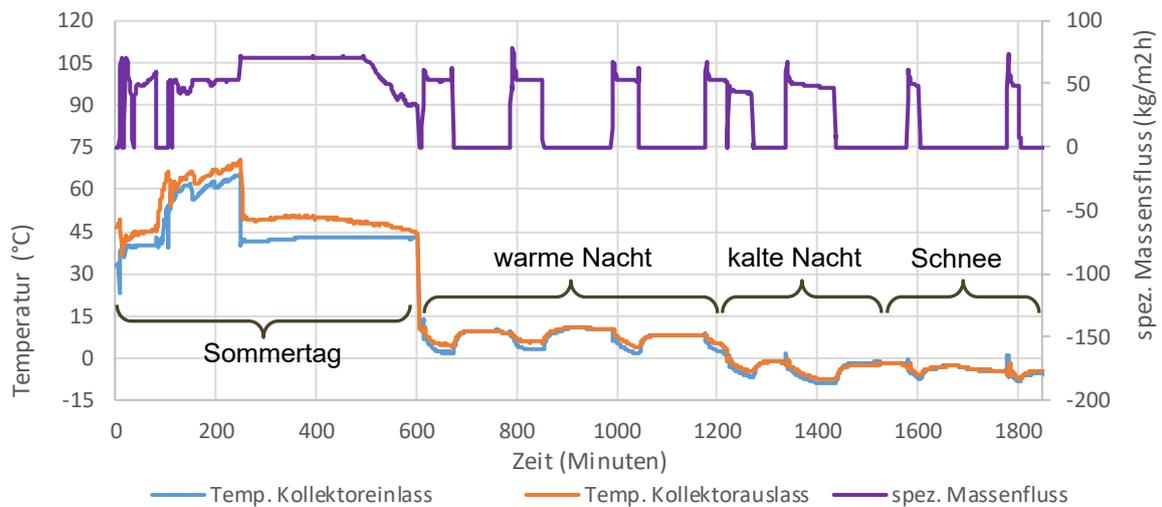


Abbildung 32: Kollektortemperaturen und spezifischer Massenfluss (in der rückseitig gedämmten Kollektorreihe) für die Betriebsmodi, welche für die Validierung des Kollektormodells verwendet wurden.

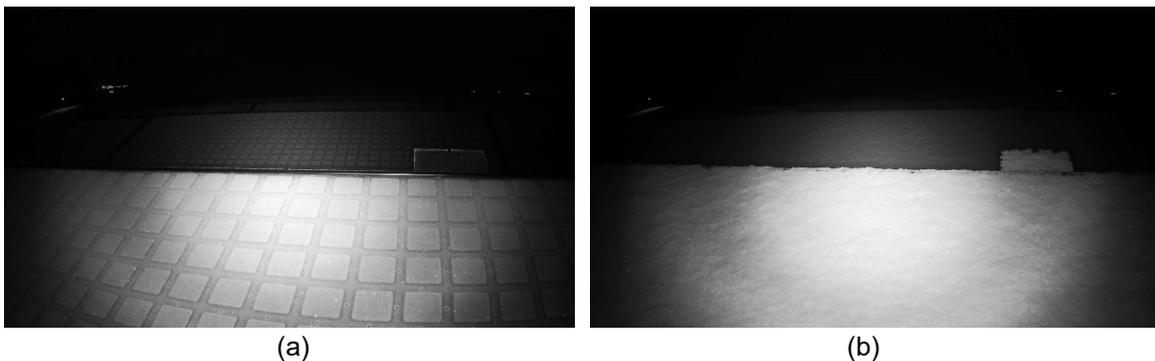


Abbildung 33: Fotos der Kollektoren mit (a) Reifbelag und (b) Schneebeleg. Die Bilder zeigen die Kollektoren während der für die Validierung verwendeten Zeiten "kalte Nacht" und "Schnee" aus Abbildung 32.

Die Messdaten und die berechneten spezifischen Leistungen der beiden Kollektoren-Typen in den vier analysierten Zeiten sind in Abbildung 34 wiedergegeben. Wie zu erwarten ist die Leistung des rückseitig ungedämmten Kollektors deutlich geringer während des Sommertags und wiederum höher in den drei Winterzeiten. Ab der dargestellten Minute 600 gibt es keine Solarstrahlung und die Kollektoren generieren nur Leistung aufgrund des konvektiven Wärmeaustauschs mit der Umgebung und teilweise aufgrund latenter Wärmegewinne (Eisbildung auf Absorber). Sie erfahren zudem einen langwelligen Strahlungsaustausch mit der Umgebung, was in der Regel Wärmeverluste für den Kollektor mit sich bringt.

Einen Ausschnitt für die warme Nacht zeigt Abbildung 35 mit rund 25 % höherer Leistung beim rückseitig ungedämmten Kollektor. In der Abbildung sind auch die Vertrauensintervalle der Leistungen der beiden Kollektoren dargestellt (dünne Linien: jeweils unteres und oberes doppeltes Vertrauensintervall). Die Vertrauensintervalle liegen (fast immer) auseinander, was bedeutet, dass die Unterschiede der Kollektorleistungen eine hohe Verlässlichkeit haben und sich die Daten zur Validierung des Kollektormodells eignen.

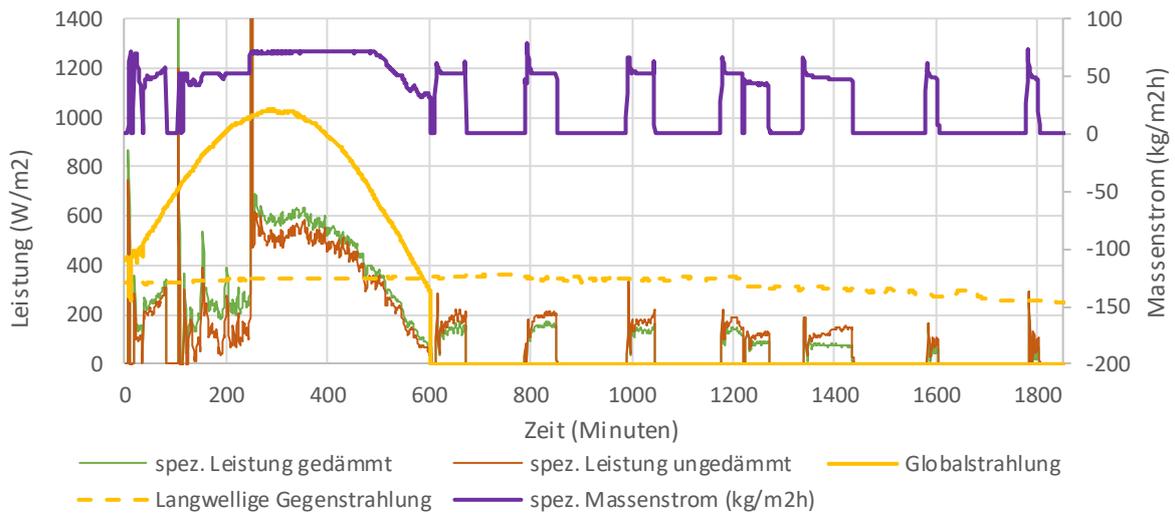


Abbildung 34: Strahlungsdaten, spezifische Kollektorleistungen und spezifischer Massenfluss für die Betriebsmodi, welche für die Validierung des Kollektormodells verwendet wurden.

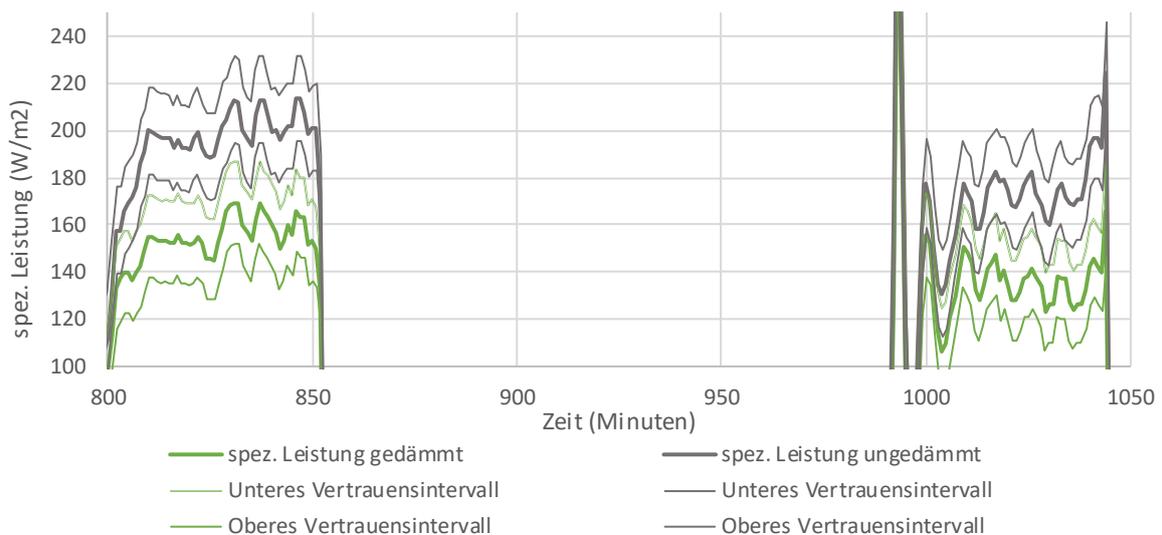


Abbildung 35: Ausschnitt ("warme Nacht") mit berechneten spezifischen Kollektorleistungen inklusive oberen und unteren Vertrauensintervallen.

4.2.2 Rückseitig gedämmter Kollektor

Der Vergleich der gemessenen Leistung mit der Simulation gemäss Auslegung zeigt, dass in der Simulation die Leistung im Winter fast durchgehend unterschätzt wurde (Abbildung 36). Im Sommer wurde die Leistung für mittlere Absorbertemperaturen eher überschätzt (Minute: bis 100 und ab 250), für hohe Absorbertemperaturen ist die Leistung mehrheitlich überschätzt.

Die Simulation mit dem angepassten Kollektormodell (Abbildung 37) ergibt eine Kollektorleistung, die mehrheitlich innerhalb der Vertrauensintervalle liegt. Schlechte Übereinstimmung zeigt sich bei sehr hohen Fluidtemperaturen (um Minute 200) und bei Reifbildung (vor und nach Minute 1300). In beiden Laufzeiten mit Schneebedeckung (Abbildung 38) wird die Leistung phasenweise gut getroffen.



Die geänderten Parameter und ihr Vergleich zur ursprünglichen Parametrierung kann dem Anhang B.1 entnommen werden.

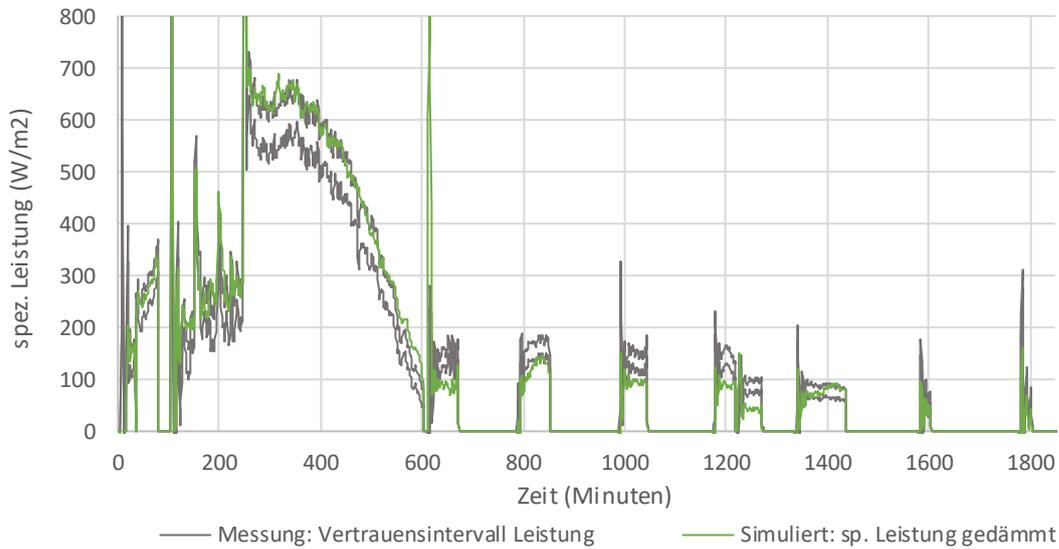


Abbildung 36: Vergleich zwischen Messung und simulierter spezifischer Leistung des gedämmten Kollektors mit Parametrisierung gemäss Auslegung. Die grauen Linien geben das obere und untere Vertrauensintervall der Messung wieder.

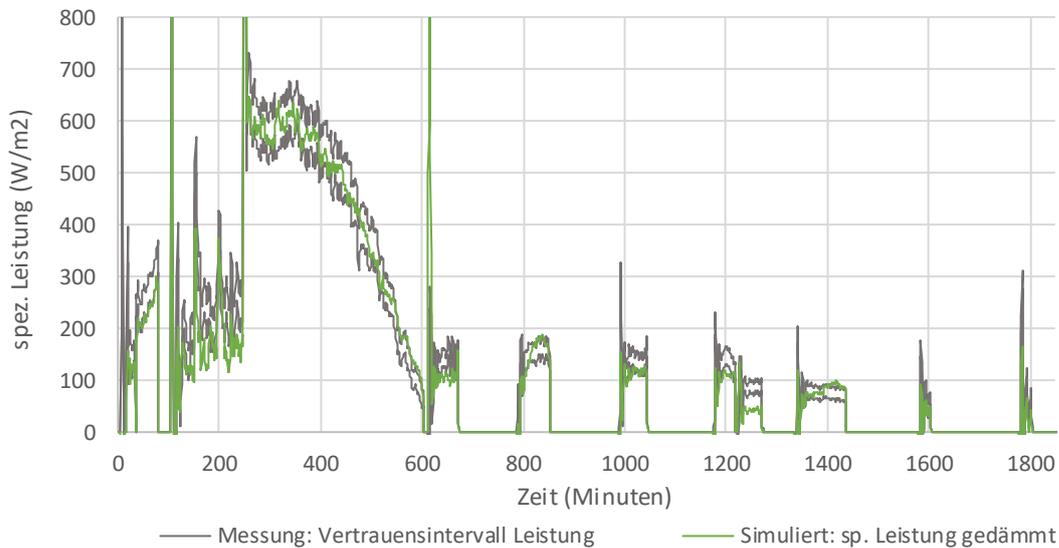


Abbildung 37: Vergleich zwischen Messung und simulierter spezifischer Leistung des gedämmten Kollektors mit angepassten Parametern. Die grauen Linien geben das obere und untere Vertrauensintervall der Messung wieder.

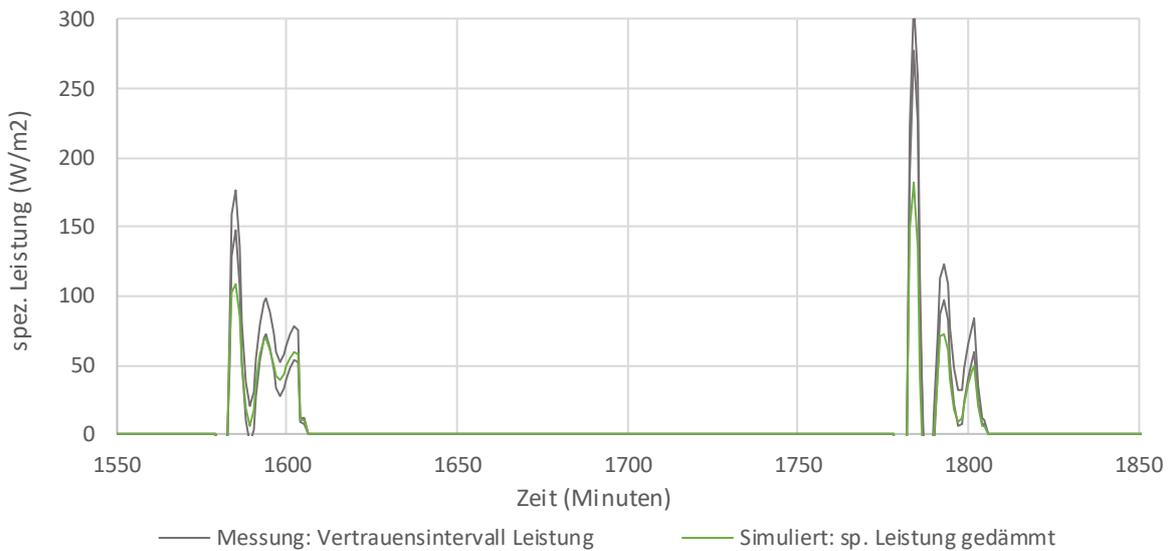


Abbildung 38: Detaildarstellung der Kollektornutzung mit Schneebeleg auf dem Absorber des rückseitig gedämmten Kollektors.

4.2.3 Rückseitig ungedämmter Kollektor

Der Vergleich der gemessenen Leistung des ungedämmten Kollektors mit der Simulation gemäss Auslegung zeigt, dass in der Simulation die Leistung im Winter durchgehend und deutlich unterschätzt wird (Abbildung 39). Im Sommer wurde die Leistung für mittlere Fluidtemperaturen und geringe Einstrahlung (bis Minute 100) und für hohe Absorberrtemperaturen (Minute 100 bis 250) mehrheitlich passend berechnet. Für hohe Einstrahlung und mittlere Fluidtemperaturen (Minute 250 bis 600) ist die Leistung in der Simulation eher überschätzt.

Die Simulation mit dem angepassten Kollektormodell (Abbildung 40) ergibt eine Kollektorleistung, die mehrheitlich innerhalb der Vertrauensintervalle liegt. Eine geringere Übereinstimmung zeigt sich bei sehr hohen Fluidtemperaturen (um Minute 200) und bei einigen der anderen Zeiten (nach Minute 800 und um 1350). In beiden Zeiten mit Schneebedeckung (Abbildung 41) wird die Leistung gut getroffen.

Die geänderten Parameter sind im Anhang B.1 aufgeführt. Für den Fit des ungedämmten Kollektors wurden die Parameter angepasst, mit denen der Energieaustausch mit der Umgebung definiert wird. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass der Absorber mit Wegfall der rückseitigen Wärmedämmung mehr konvektiven Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft erfährt und ausserdem der Einfluss des Winds grösser wird, wurden der lineare Verlustkoeffizient und der Einflussfaktor der Windgeschwindigkeit erhöht.

Zusätzlich wurde die langwellige Gegenstrahlung, die als Input in die Simulation eingeht, um den Faktor 1.25 erhöht. Dadurch konnten die Simulationswerte stark an die Messwerte angenähert werden. Die Erhöhung der Strahlungsleistung ist dem hier begrenzten Kollektormodell geschuldet und lässt sich physikalisch dadurch begründen, dass die Oberfläche des Absorbers, die im Strahlungsaustausch mit der Umgebung steht, durch das Weglassen der rückseitigen Wärmedämmung verdoppelt wurde. Allerdings steht diese Erweiterung der Absorberoberfläche aufgrund der Kollektorneigung in erster Linie im Austausch mit der Oberfläche des Flachdachs des Gebäudes. Aufgrund der Oberflächentemperatur des Dachs emittiert dieses eine deutlich höhere langwellige Strahlungsleistung als die Hemisphäre auf



der anderen Absorberseite. Um die Leistung des Absorbers besser zu berechnen, könnte das Simulationsmodell mit dem zusätzlichen Strahlungsaustausch erweitert werden. Eine Modellanpassung konnte im Rahmen des Projekts aufgrund des begrenzten Budgets nicht vorgenommen werden.

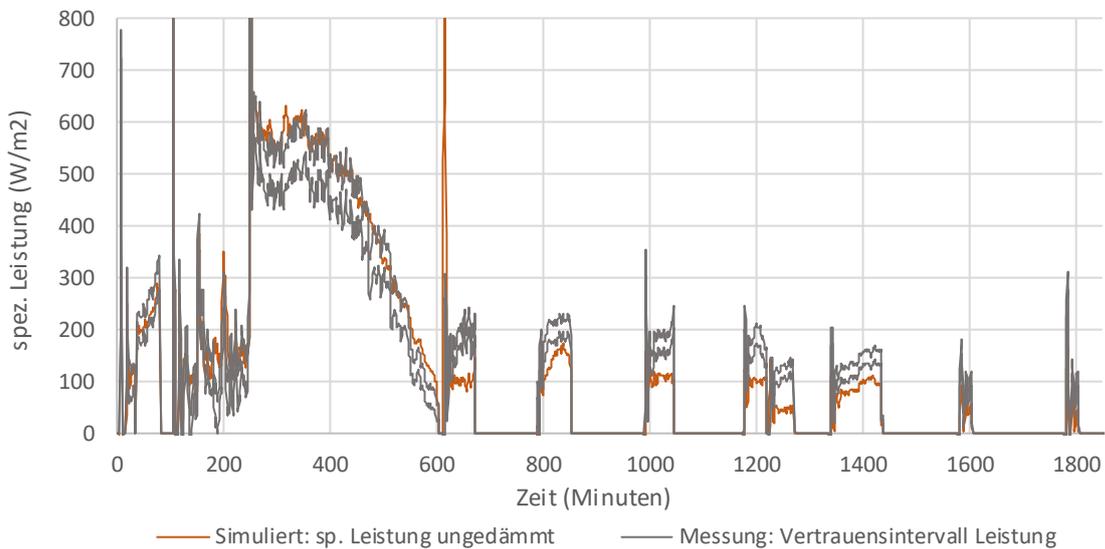


Abbildung 39: Vergleich zwischen Messung und simulierter spezifischer Leistung des ungedämmten Kollektors mit Parametrisierung gemäss Auslegung. Die grauen Linien geben das obere und untere Vertrauensintervall der Messung wieder.

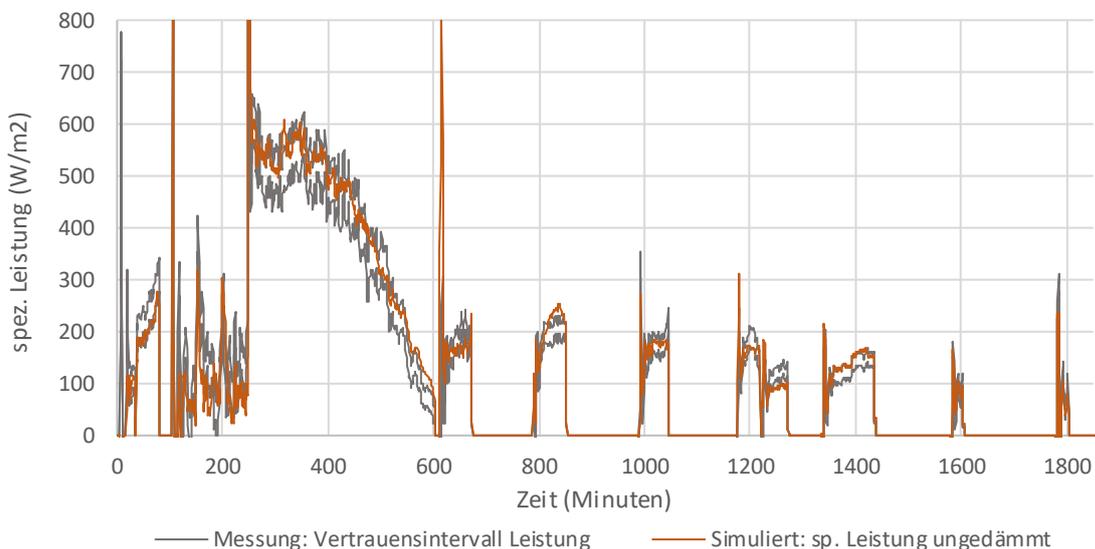


Abbildung 40: Vergleich zwischen Messung und simulierter spezifischer Leistung des ungedämmten Kollektors mit angepassten Parametern. Die grauen Linien geben das obere und untere Vertrauensintervall der Messung wieder.

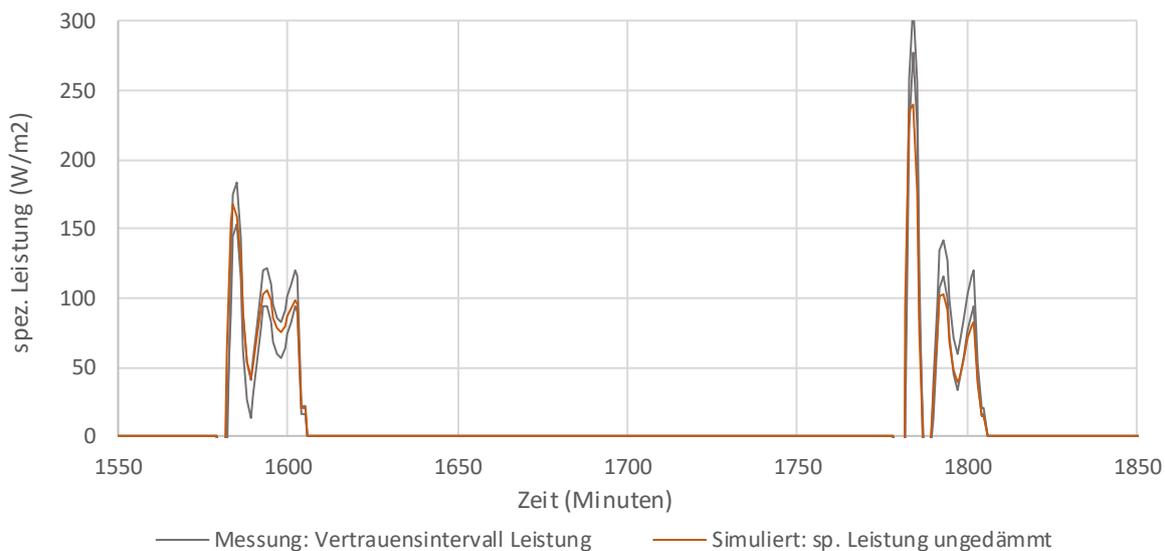


Abbildung 41: Detaildarstellung der Kollektornutzung mit Schneebelag auf dem Absorber des rückseitig ungedämmten Kollektors.

4.3 Jahressimulation mit angepassten Modellen

Die Simulation, die für die Auslegung der Anlage verwendet wurde, wurde angepasst, um die Ergebnisse des Monitorings nachvollziehen zu können. Folgende Anpassungen wurden an der Simulation vorgenommen:

- Verwendung der gemessenen Wetterdaten als Input für die Simulation:
 - o In das Kollektormodell werden folgende am Gebäude gemessenen Wetterdaten eingelesen: Globalstrahlung und langwellige Gegenstrahlung in der Kollektorebene, Aussentemperatur zwischen den Kollektorreihen. Zur Ermittlung der Diffusstrahlung wird der Anteil der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung im gleichen Zeitintervall auf dem SPF-Dach genommen und mit der Globalstrahlung der Solar-Eis-Heizung verrechnet. Diese Daten werden in 2-Minuten-Zeitschritten eingelesen.
 - o Mit gemessenen Wetterdaten vom SPF-Dach aus dem gleichen Zeitraum wurden im Programm Meeonorm TMY2-Wetterdaten-Dateien für die Simulation generiert. Verwendet wurden Globalstrahlung horizontal, Aussentemperatur und Windgeschwindigkeit. Diese Wetterdaten werden u.a. für die Gebäudesimulation und das Modell des den Eisspeicher umgebenden Erdreichs verwendet. Da für das Monitoring der Solar-Eis-Heizung kein Wetterhäuschen installiert wurde, lagen keine verwendbaren Daten vor.
- Das Gebäudemodell und der Warmwasserverbrauch wurden so angepasst, dass sie möglichst mit dem gemessenen Wärmeverbrauch für Heizung und Warmwasser übereinstimmen.
- Die Parameter-Fits der Wärmepumpe (Kapitel 4.1) und des Kollektorfelds (Kapitel 4.2.2) wurden in die Systemsimulation eingebunden.

Für die Systemvalidierung wurden sämtliche Kollektorreihen mit rückseitiger Dämmung simuliert. 14 von 15 Reihen des Kollektorfelds sind gedämmt, sodass diese Vereinfachung zu keinem grossen Fehler führt.



Ein Unterschied zwischen Simulation und realer Anlage, der wichtig ist aber nur bedingt behoben werden kann, ist die Anlagensteuerung. Die in der Anlage eingesetzte Steuerung benutzt eine proprietäre Sprache/Logik, die, ohne sehr hohen Aufwand zu betreiben, nicht identisch in der Simulation abgebildet werden kann.

Zur vereinfachten Darstellung werden in der Folge meist nur die Ergebnisse für das zweite Messjahr wiedergegeben.

4.3.1 Jahresarbeitszahlen

In Abbildung 42 sind die Jahresarbeitszahlen JAZ+, also der JAZ inkl. Stromverbrauch der Heizkreispumpe, aufgeführt. Die Balken rechts vom orangenen Balken (mit der gemessenen JAZ+ aus dem zweiten Messjahr) zeigen die Effekte der Änderungen an der Simulation, wenn schrittweise das reale Wetter und die übrigen Anpassungen am Simulationsmodell vorgenommen werden.

Die JAZ+ steigt mit Umstellung auf die Wetterdaten aus dem Messjahr und der Reduktion des Warmwasserbedarfs auf 4.7 an. Die grösste Abnahme der JAZ+ in der Grafik erfolgt mit der Anpassung des Gebäudemodells (JAZ-Reduktion: -0.57). Hier wurden die Heizkurve, die passiven solaren Gewinne und die U-Werte der Gebäudehülle angepasst. Die Anpassung der Kollektoreffizienz gemäss Parameter-Fit verursacht nur eine geringe Reduktion der JAZ+ von -0.06, die Anpassung der Wärmepumpen-Effizienz bewirkt eine relevante Abnahme der JAZ+ um -0.37.

Die JAZ+ des validierten Modells (gelber Balken) liegt mit 3.7 noch leicht über dem gemessenen Wert von 3.5 (+11 %). Die Gründe hierfür sind leichte Unterschiede im Stromverbrauch des WP-Kompressors (Unterschiede von 745 kWh/a) und im Stromverbrauch von Ventilen, welche in der Simulation nicht abgebildet sind (405 kWh/a). Das Vertrauensintervall der JAZ+ aus dem Monitoring liegt bei ± 0.24 , womit die JAZ+ der Validierung innerhalb des Intervalls liegt.

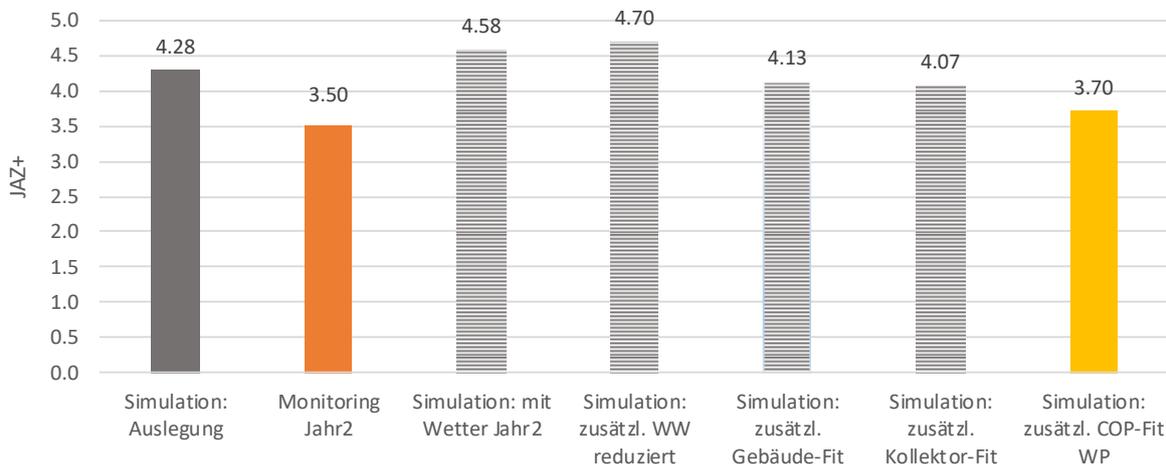


Abbildung 42: Vergleich der System-Jahresarbeitszahlen. Bei den Simulationen rechts vom Balken "Simulation: mit Wetter Jahr 2" (JAZ+ 4.6) ist jeweils angegeben, was zusätzlich am Modell geändert wurde.



4.3.2 Ergebnisse für Einzelkomponenten

Nachstehend ist für das Gebäude und wichtige Komponenten der Solar-Eis-Heizung dargestellt, in wie weit die Werte der angepassten Simulation mit den Werten des Monitorings übereinstimmen.

Gebäude: Raumwärme und Warmwasser

Der Vergleich des Energiebedarfs im zweiten Messjahr für Heizwärme und Warmwasser (Abbildung 43) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Monitoring. Allerdings zeigen sich noch relevante Differenzen bei der Rücklauftemperatur des simulierten Radiators und dem gemessenen Rücklauf (Abbildung 44). Die niedrige Rücklauftemperatur führt dazu, dass Wärmepumpe und Kollektoren effizienter in der Simulation genutzt werden können und dürfte mit ein Grund sein, weshalb sich in der angepassten Simulation ein geringerer Stromverbrauch des WP-Kompressors ergibt als in Monitoring. Eine weitere Anpassung der Modelleinstellungen konnte im Projekt nicht mehr vorgenommen werden.

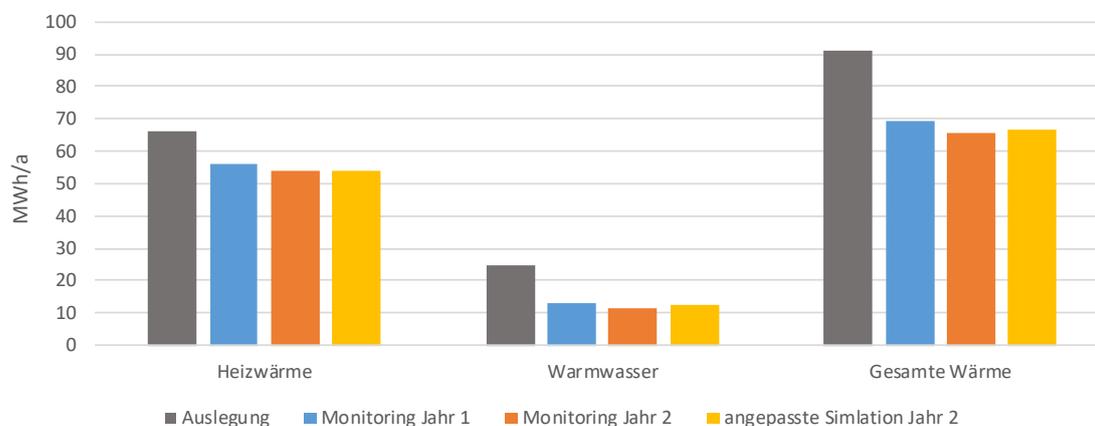


Abbildung 43: Gegenüberstellung der von der Solar-Eis-Heizung gelieferten Wärme für Heizen und Warmwasser in der Auslegung, in den Messjahren und in der angepassten Simulation.

Die Differenz bei der Senktemperatur der WP zeigt sich auch bei Betrachtung der kumulierten Energie, die von der WP abgegeben wird (Abbildung 45, grüne Linie). Die Wärme wird in der Simulation von der WP durchgehend bei niedrigeren Temperaturen abgegeben, was zu einem geringeren Stromverbrauch des Kompressors führt. Auf der Quellseite (gelbe Linie) zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Monitoring. Der leicht höhere Wärmeumsatz unter 0 °C bei der Simulation entsteht durch eine höhere der Nutzung der Kollektoren als Quelle der WP (siehe auch Abbildung 49).

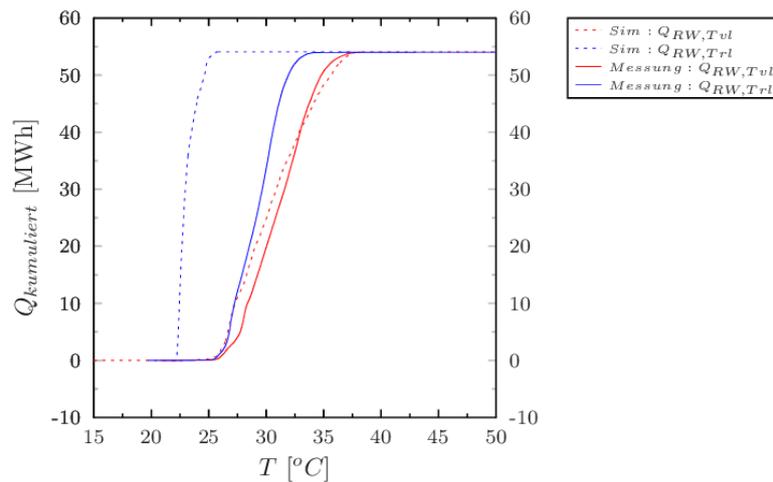


Abbildung 44: Vergleich der kumulierten Raumwärme in Messung (2. Messjahr) und in der angepassten Simulation, aufgetragen über der Vor- und der Rücklauftemperatur, bei der die Raumwärme abgegeben wurde (RW: Raumwärme, Tvl bzw. Trl: Temperatur des Vor- bzw. Rücklaufs der Heizverteilung).

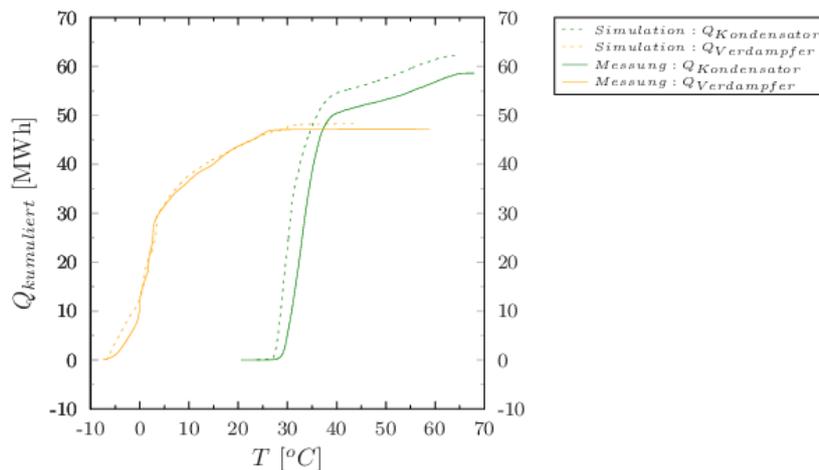


Abbildung 45: Vergleich der kumulierten Wärmeaufnahme und -abgabe der Wärmepumpe in der Messung (2. Messjahr) und in der angepassten Simulation.

Eisspeicher

Bei der Parametrierung der Eisspeicherhülle wurden für die angepasste Simulation die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hülle zum Erdreich geändert (die Effekte auf JAZ+ werden weiter oben nicht gesondert gezeigt). In der Auslegung wurde mit einer grossflächigeren Dämmung gerechnet, die so nicht realisiert wurde.

Wie der Temperaturverlauf des Speicherwassers für beide Jahre zeigt (Abbildung 46 und Abbildung 47) kann die angepasste Simulation die gemessenen Werte meist gut nachbilden. So ist beispielsweise die Dauer, während der das Wasser des Eisspeichers um 0 °C liegt, sehr ähnlich in Simulation und Monitoring. Zu beachten ist, dass die Temperatur stark von der Bewirtschaftung des Eisspeichers abhängt und somit von der Anlagensteuerung, die diese Bewirtschaftung regelt.

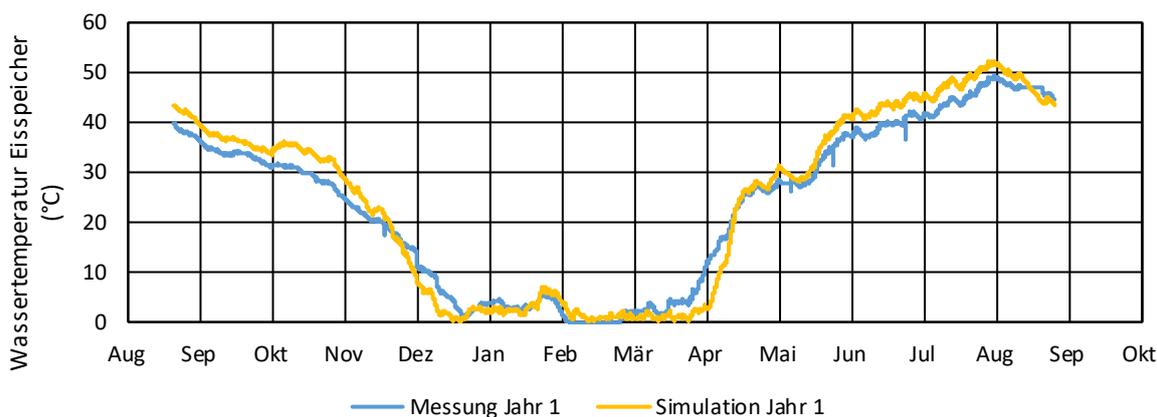


Abbildung 46: Durchschnittliche Wassertemperatur im Eisspeicher im ersten Messjahr und in der angepassten Simulation.

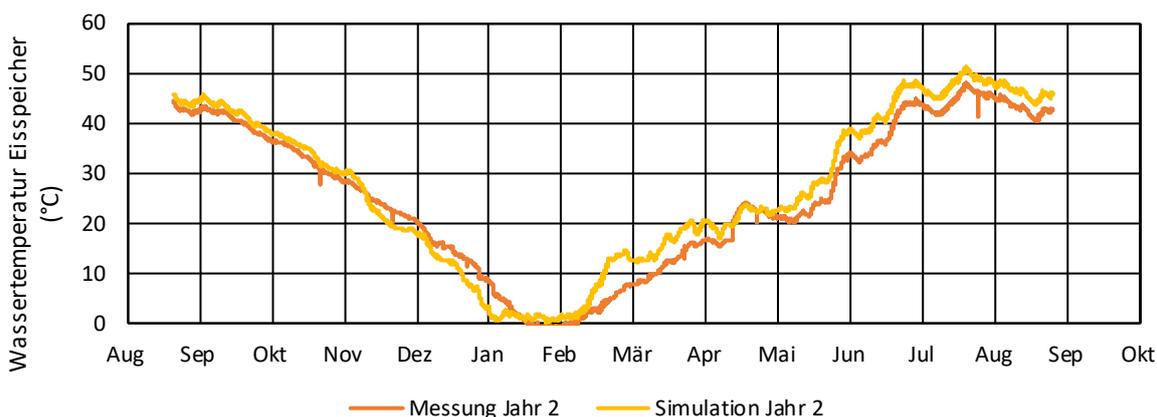


Abbildung 47: Durchschnittliche Wassertemperatur im Eisspeicher im zweiten Messjahr und in der angepassten Simulation.

Der Vereisungsgrad des Eisspeichers kann mit den eingesetzten Messgeräten nicht ermittelt werden (da die abgelösten Eisplatten schwimmen, ist die Höhe des Wasserspiegels unabhängig vom Vereisungsgrad). Der simulierte Vereisungsgrad in den beiden Messjahren ist in Abbildung 48 dargestellt. Die Skala bezieht sich dabei auf das gesamte Speicherwasser. Der maximale Vereisungsgrad liegt aufgrund der nicht rechteckigen Grundfläche des Eisspeichers und weiteren Einflussfaktoren bei maximal ca. 45 % des gesamten Speicherwassers. Im ersten simulierten Jahr betrug die stärkste Vereisung 23 %, was 51 % des maximal möglichen Wertes von 45 % sind. Diese 51 % decken sich in etwa mit dem Vereisungsgrad, der in Kapitel 3.2.5 mit der entzogenen kumulierten Energie auf rund 60 % abgeschätzt wurde. Der simulierte Vereisungsgrad im zweiten Messjahr liegt unter 10 %.

Wichtige Gründe für die geringe Vereisung des Eisspeichers sind der im Vergleich zur Auslegung geringere Wärmebedarf des Gebäudes und zudem die stärkere Verteilung der Heizlast auf Monate mit hoher Einstrahlung, was dort die Nutzungsdauer des Eisspeichers als Wärmequelle verringert und die der Kollektoren erhöht (Wärmebedarf und Heizlast siehe Abbildung 10). Das Schmelzen des Eis im



2. Jahr ca. ab dem 45. Tag ist auf die hohe Einstrahlung und die hohe Aussentemperatur im Februar 2019 zurückzuführen (siehe Kapitel 3.1).

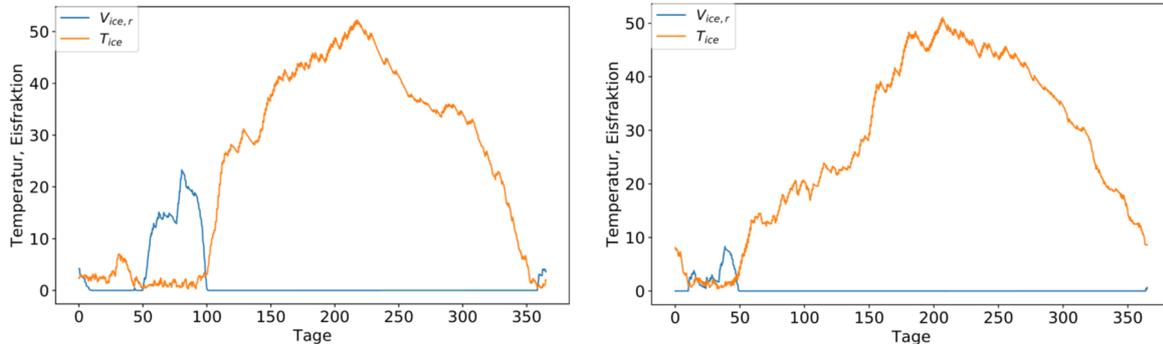


Abbildung 48: Simulierter Vereisungsgrad des Eisspeichers in % (blau) und Speichertemperatur in °C (orange) in der angepassten Simulation für Jahr 1 (links) und Jahr 2 (rechts). Die maximal erreichbare Eisfraktion liegt beim Eisspeicher aufgrund seiner im Projekt realisierten Form bei ca. 45 %.

Kollektorfeld

Abbildung 49 gibt eine Übersicht über die vom Kollektorfeld gelieferte Wärme zu den drei Senken Pufferspeicher, WP-Kompressor und Eisspeicher samt Temperaturniveaus für das zweite Messjahr. Der Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung, wobei es leichte Unterschiede sowohl bei den gesamten Wärmemengen als auch bei den Temperaturen gibt. In der Simulation wird die Wärmemenge leicht unterschätzt, die an die WP und den Eisspeicher geliefert wird. Die Wärmelieferung an den Puffer wird leicht unterschätzt. Der Grund für die Differenzen ist in den Einstellungen der jeweiligen Steuerlogik der Systeme zu suchen.

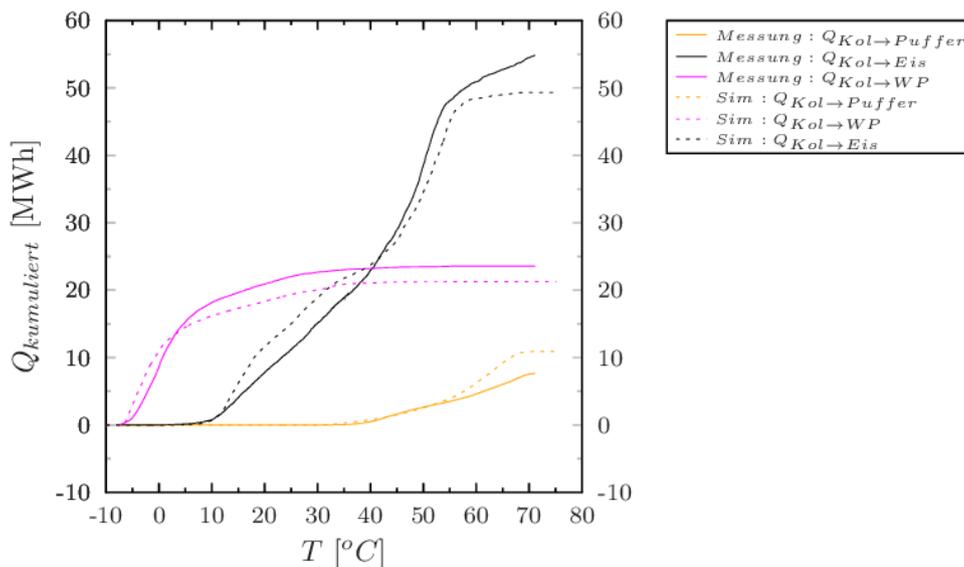


Abbildung 49: Vergleich der kumulierten Wärmeabgabe des Kollektorfelds in Messung (2. Messjahr) und angepasster Simulation, aufgetragen über der Vorlauftemperatur, bei der die Wärme abgegeben wurde.



4.4 Möglichkeiten zur Optimierung der bestehenden Heizung

Bei der Auswertung der Messdaten des Monitorings hat sich gezeigt, dass die Effizienz der Wärmepumpe deutlich unter den Angaben aus dem Datenblatt des Herstellers liegt. Aktuell werden zusammen mit dem Hersteller noch die möglichen Ursachen analysiert, um abschätzen zu können, ob eine Erhöhung der Effizienz möglich ist.

Weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der JAZ+ liegen in erster Linie in den Bereichen:

- Absenkung der Vorlauftemperatur der Heizung (Absenkung der Heizkurve). Die Heizkurve wurde im zweiten Winter höhergestellt, da die Raumtemperaturen in einigen Wohnungen zu tief waren. Eine Erhöhung der Raumtemperaturen konnte aber erst mit einer Leistungserhöhung der Heizkreispumpe erreicht werden. Im Anschluss wurde die Heizkurve nicht mehr abgesenkt, um weiteren Reklamationen vorzubeugen.
- Anhebung der WP-Quelltemperatur und somit des COP zu diesen Laufzeiten. Der Einsatz der Kollektoren als Quelle bei Temperaturen unter 0°C kann durch Anpassung der Steuerung reduziert werden. Alternativ wird dann der Eisspeicher stärker als Quelle der WP genutzt.
- Die Laufzeiten und die Leistungen der Umwälzpumpen des Solarkreises und des Heizkreises können ggf. verringert werden, was zur Erhöhung der JAZ beitragen kann. Simuliert wird die Reduktion der Laufzeit der Solarkreispumpe durch Änderung der maximalen Temperatur des Eisspeichers im Sommer. Mit der verwendeten Simulation nicht nachvollzogen werden kann die Leistungsverminderung der Heizkreispumpe. Die Pumpe ist aktuell auf permanent hohe Leistung eingestellt und könnte ggf. auf dynamischen Betrieb umgestellt werden (Herunterregeln bei schliessenden Thermostatventilen).

In Abbildung 50 sind die simulierten JAZ+ der Solar-Eis-Heizung nach Umsetzung der einzelnen Optimierungsmassnahmen und nach Umsetzung der Kombination der drei Massnahmen aufgeführt. Die Absenkung der Heizkurve hat demnach die grösste Wirkung von knapp +5% auf die JAZ+. Die Kombination der Massnahmen kann die JAZ+ um 9% erhöhen. Wie oben bereits erwähnt, gibt es möglicherweise noch Optimierungspotenzial beim Wärmepumpe-COP, was aktuell noch mit dem Hersteller abgeklärt wird. Weiter bietet die Umstellung der Heizkreispumpe auf dynamischen Betrieb ein zusätzliches Optimierungspotenzial, welches in den Simulationen nicht analysiert wurde.

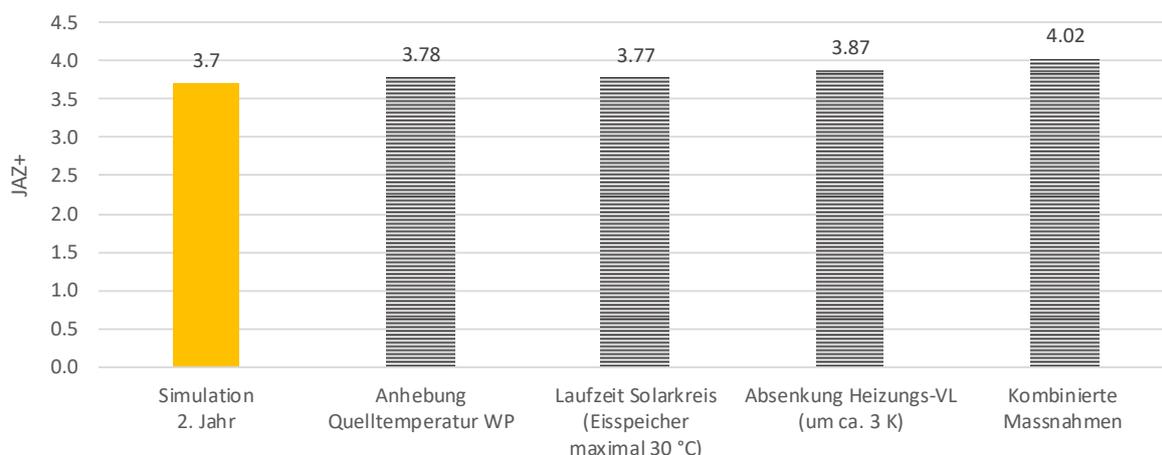


Abbildung 50: Vergleich der simulierten JAZ+ gemäss aktueller Anlagensteuerung im zweiten Messjahr (gelber Balken) mit den Massnahmen für die Optimierung und der Wirkung der kombinierten Massnahmen.



4.5 Möglichkeiten zur Optimierung des Anlagenkonzepts

Mit Simulationen kann abgeschätzt werden, welches Optimierungspotenzial für die Solar-Eis-Heizung besteht, wenn die Grösse der Komponenten (Eisspeicher, Kollektorfeld) oder der Kollektortyp (Kollektor ohne rückseitige Dämmung) geändert werden. Die Simulation werden mit dem Wetterdatensatz des zweiten Messjahrs durchgeführt und geben somit lediglich Hinweise auf die Effekte der Systemänderungen. Für fundierte Aussagen müssten weitere Wetterdaten des Standorts verwendet werden, was im Rahmen dieses Projekts aber nicht vorgenommen werden konnte.

Folgenden Systemanpassungen werden untersucht:

- 1) Reduktion des Eisspeichervolumens und Erreichen eines maximalen Vereisungsgrads von 65 % statt objektspezifisch 45 % (Annahme: Optimierung der Verteilung der Wärmetauscher im Eisspeicher). Die Ergebnisse des Monitorings und auch die Simulationen der Anlage haben gezeigt, dass ein zu grosses Eisspeichervolumen realisiert wurde.
- 2) Verwendung rückseitig ungedämmter Kollektoren, die zudem unverglast, spektral selektiv und auf einem Flachdach mit 30° Neigung nach Süden ausgerichtet installiert sind. Für die Simulation wird die Kollektoreffizienz gemäss dem Parameter-Fit aus Kapitel 4.2.3 verwendet.
- 3) Zusätzlich zu den rückseitig ungedämmten Kollektoren wird auch mit einer Wärmepumpeneffizienz gemäss den Herstellerangaben aus dem Datenblatt der Wärmepumpe simuliert.

In der Tabelle werden auch die spezifischen Grössen von Eisspeicher und Kollektorfeld pro MWh Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser im Jahr angegeben. Diese Werte können als unabhängig von der Anlagengrösse gesehen werden.

Tabelle 4: Anlagenoptimierungen (Wetterdaten des zweiten Messjahrs verwendet).

	JAZ+	Eisspeicher- volumen	Eisspeichervolu- men pro MWh Wärmebedarf *)	Kollektor- fläche	Kollektorfläche pro MWh Wärme- bedarf *)
Optimierte Simulation der Heizung im 2. Messjahr	3.70	210	3.15	120	1.80
1) zusätzlich Eisspeicher-Vo- lumen reduziert und höherer max. Vereisungsgrad (65 %)	3.69	85	1.25	120	1.77
2) zusätzlich ungedämmte Kollektoren	3.65	85	1.29	95	1.45
3) zusätzlich WP-Effizienz ge- mäss Hersteller-Datenblatt	4.00	85	1.30	95	1.45

*) Wärmebedarf in MWh pro Jahr für Heizung und Warmwasser (Nutzwärme abgegeben an Verteilungen). Der Wärmebedarf variiert zwischen den Simulationen leicht, was zu kleinen zusätzlichen Unterschieden in den Kennwerten führt.

Tabelle 4 zeigt Kennwerte der optimierten Simulation (aus Abbildung 42) und der vorgenommenen Optimierungen des Anlagenkonzepts. Die Kennwerte haben wegen des grossen Einflusses von Wetterdaten auf die Simulationsergebnisse für das zweite Messjahr Gültigkeit. Die Reduktion des Eisspeichervolumens und die Erhöhung der maximalen Vereisungsrate auf 65 % (Optimierung 1 in der Tabelle) zeigt, dass im zweiten Messjahr ein um 60 % reduziertes Eisspeichervolumen ausreichend gewesen



wäre. Werden zudem ungedämmte Kollektoren eingesetzt (Optimierung 2), kann ohne relevante Abnahme der JAZ+ zusätzlich zum reduzierten Eisspeichervolumen das Kollektorfeld um 20 % verkleinert werden. Legt man eine hohe Wärmepumpeneffizienz gemäss Hersteller zugrunde (Optimierung 3), resultiert eine JAZ+ von 4 mit den reduzierten Komponentengrössen.

Die Optimierungen zeigen beispielhaft für das betrachtete Jahr die Grössenordnungen auf, um die beim Einsatz ungedämmter Kollektoren die Fläche des Kollektorfelds reduziert werden kann. Zusätzlich lässt sich das Eisspeichervolumen verringern. Beide Komponenten haben einen grossen Anteil an den Systemkosten, weswegen hier ein interessanter Hebel für Kostenreduktionen liegt.



5 Verbreitung und Marktreife

Das P&D-Projekt ist seit Bekanntmachung auf Interesse bei Fachpersonen gestossen und auch bei Privaten, die Neubauten planen. Folgende Aktivitäten zur Verbreitung der Technologie wurden im Rahmen des Projekts durchgeführt resp. begonnen:

- Patenteinreichung: die enteisbaren Wärmetauscher wurden im Jahr 2018 von der EWJR AG zum Patent angemeldet (Patent-Nr. CH 713 882 B1).
- Markteinführung: Es wurde eine Kooperation der EWJR AG mit einem Schweizer Kollektor- und Eisspeicherhersteller zur Markteinführung des Systems und der enteisbaren Wärmetauscher begonnen. Mit Stand November 2019 wurden bisher rund fünf Eisspeicher mit enteisbaren Wärmetauschern in der Schweiz installiert.
- Führungen: Es wurde ca. zehn Besichtigungen der Solar-Eis-Heizung mit Erläuterung der Heizung durchgeführt. Zum Beispiel im Rahmen des SPF-Industrietags 2017 mit rund 50 teilnehmenden Fachpersonen.
- Konferenzen: Das Projekt wurde am SPF-Industrietag 2017 und beim BRENET Statusseminar 2018 mit Vorträgen vorgestellt.
- Erhalt eines "Diploms" beim Schweizer Solarpreis 2017.
- Ausstellungsbeitrag in der Umwelt Arena Spreitenbach zum Thema Eisspeicher und zum P&D-Projekt Lattenhofweg während 3 Jahren (Exponat siehe Abbildung 51). Das Exponat wurde von der HSR und der EWJR AG aus zusätzlichen Mitteln finanziert.
- Zeitungsartikel zum P&D-Projekt in Schweiz am Sonntag am 23.10.2016



Abbildung 51: Foto des Eisspeicher-Exponats in der Umwelt Arena Spreitenbach. Auf der rechten Hälfte der Stellwand wird das P&D-Projekt vorgestellt.



6 Bewertung und Ausblick

Die Solar-Eis-Heizung wurde Anfang 2017 in Betrieb genommen und versorgt das Gebäude seither erfolgreich mit Raumwärme und Warmwasser. Das im Vergleich zu einem Vorgängerprojekt geänderte und reduzierte Hydraulikkonzept für den Solekreis, das angepasste Design der enteisbaren Wärmetauscher des Eisspeichers und die Weiterentwicklung der Anlagensteuerung haben sich im Betrieb bewährt.

Jahresarbeitszahl und Optimierungspotenzial der bestehenden Heizung

Die im Projekt ermittelte Jahresarbeitszahl JAZ+, in der auch der Stromverbrauch der Heizkreispumpe eingerechnet ist, liegt mit 3.5 deutlich tiefer als die gemäss Auslegung erwartete JAZ+ von 4.3. Ohne Berücksichtigung der Heizkreispumpe liegt die gemessene JAZ bei 3.8. Die reduzierte Systemeffizienz lässt sich in erster Linie auf zwei Ursachen zurückführen: einerseits wurde die Heizkurve in Folge von Problemen in der Heizwärmeverteilung erhöht und andererseits ist die gemessene Effizienz der Wärmepumpe geringer als gemäss Herstellerangaben erwartet. Die Effizienz der Wärmepumpe wird aktuell noch mit dem Hersteller analysiert.

Es besteht noch Potenzial, die bestehende Anlage energetisch zu optimieren. Die Simulationen zeigen, dass mit einer Anhebung der durchschnittlichen Quelltemperatur der Wärmepumpe (Reduktion der Kollektornutzung unterhalb 0 °C), mit einer geringeren Beladung des Eisspeichers im Sommer (verringerte Laufzeit der Solarkreispumpe) und einer Absenkung der Heizkurve um 3 Kelvin gesamthaft eine Anhebung der JAZ+ auf 4.0 möglich ist.

Wärmebedarf und Begleitheizband

Die von der Heizung an das Gebäude gelieferte Wärme für Heizung und Warmwasser ist mit 68 MWh/a rund 25 % niedriger als in der Auslegung angenommen. Die Ursachen liegen hier bei Differenzen zwischen Auslegung und realer Gebäudehülle bzw. dem Wetter in den beiden Messjahren und im nicht ausgeführten Einbau einer Zirkulationsleitung zur Temperaturhaltung in der Warmwasserverteilung.

Die Begleitheizbänder der Warmwasserverteilungen senken die Jahresarbeitszahl der Heizung drastisch (-37 %) und sollten aus energetischen Gründen in zukünftigen Heizungen nicht realisiert werden. Dies gilt umso mehr für Heizungskonzepte wie die Solar-Eis-Heizung, in welchen die Verteilverluste im Sommerhalbjahr grösstenteils mit Solarwärme gedeckt werden können.

Eisspeicher

Der Eisspeicher erreicht in beiden Messjahren nur einen relativ geringen Vereisungsgrad von 60 % des maximal möglichen. Der Vereisungsgrad wird stark beeinflusst von demjenigen Anteil des Wärmebedarfs der Raumheizung, welcher von der Wärmepumpe gedeckt wird, und zudem von der zeitlichen Verteilung dieses Bedarfs in den Wintermonaten. Beides führte zu einer geringen Nutzung des Eisspeichers. Der Wärmebedarf für die Heizung war in den Messjahren 15 bzw. 18 % geringer als in der Auslegung. Zudem war die Verteilung des Wärmebedarfs über die Wintermonate in Realität gleichmässiger verteilt als dies für die Heizungsauslegung angenommen wurde. Wegen der höheren solaren Einstrahlung im Herbst und im Frühjahr wurden die Kollektoren häufiger als Wärmequelle für die Wärmepumpe eingesetzt, weswegen die Nutzung des Eisspeichers geringer war.

Das Konzept der Enteisung der Wärmetauscher funktionierte in beiden Wintern problemlos. Aufgrund der geringen Vereisungsraten konnte die Dynamik im Eisspeicher während maximaler Vereisung, bei der das Ablösen des Eises von den Wärmetauschern behindert wird und die Steuerung entsprechend reagieren muss, nicht analysiert werden. Der Wärmeaustausch des Eisspeichers mit dem Erdreich



konnte in den Simulationen gut abgebildet werden, wie der Vergleich der Verluste und der Temperatur des Speicherwassers in Simulation und Monitoring zeigt.

Solarkollektoren

Die Solarwärme-Kollektoren liefern die gesamte von der Wärmepumpe umgesetzte Wärme – direkt oder via Eisspeicher – und beladen zudem den Pufferspeicher, dessen Wärme für Heizung und Warmwasser verwendet wird. Die spektral selektiven Kollektoren sind unverglast, weswegen sie im Winter bei Betrieb unter Umgebungstemperatur auch Wärme von der Aussenluft aufnehmen. Der flächenspezifische Ertrag der Kollektoren lag in den beiden Messjahren bei hohen 680 bzw. 715 kWh pro Quadratmeter Kollektorfläche und Jahr. Die begrenzte Dachfläche des Gebäudes wird also sehr effizient für die erneuerbare Energieversorgung genutzt. In den Wintermonaten ergeben sich unter Einbezug der Wärme-gewinne aus der Umgebungsluft Kollektorwirkungsgrade um 1.

Marktreife der Solar-Eis-Heizung

Während der Projektlaufzeit wurde das Konzept der enteisbaren Wärmetauscher patentiert und das Systemkonzept wurde zusammen mit dem Kooperationspartner Energie Solaire SA auf den Markt gebracht. Mit Stand November 2019 wurden bereits weitere Solar-Eis-Heizung in der Schweiz mit dem Konzept der enteisbaren Wärmetauscher realisiert.

Optimierungspotenzial des Anlagenkonzepts

Der energetische Vergleich der Kollektoren mit und ohne rückseitiger Wärmedämmung zeigt, dass der Verzicht auf die Wärmedämmung für die Solar-Eis-Heizung vorteilhaft ist. Mit Wegfall der Wärmedämmung wird die JAZ+ kaum verringert, aber das Kollektorfeld kann verkleinert werden. Die Simulationen zur Optimierung des Anlagenkonzepts zeigen, dass sowohl beim Eisspeichervolumen als auch bei der Kollektorfeldgrösse bei Verwendung rückseitig ungedämmter Kollektoren ein grosses Einsparpotenzial besteht und die spezifischen Investitionskosten zukünftiger Solar-Eis-Heizung gesenkt werden können.



Anhang

A.1 Im Monitoring eingesetzt Messgeräte

Tabelle 5: Übersicht der erfassten Messgrößen samt verwendeten Messgeräten und deren Messunsicherheiten..

Messgröße	Ort der Messung, Messprinzip und Gerätetyp	Messgenauigkeit
Wärmemenge	Eisspeicherbe- und -entladung: Wärmemengenzähler mit bidirektionalem Durchflussmessgerät: MID, magnetisch-induktiv (Krohne Optiflux 4300C)	Messgenauigkeit EN 1434 Klasse 2 oder besser. Fehler ca. $\pm 5\%$ vom Messwert
	Restliche Komponenten unidirektional: Schwingstrahl (Neovac, Supercal 531)	Messgenauigkeit EN 1434 Klasse 2 oder besser. Fehler ca. $\pm 7\%$ vom Messwert
Volumenstrom	In zwei Kollektorreihen: MID, magnetisch-induktiv (Endress und Hauser Promag 50P)	$\pm 0.5\%$ max. vom Messwert
Temperatur	Eintauchfühler in Kollektorreihen: Pt100, 4-Leiter	Klasse 1/3B, $\pm (0.10 + 0.00167 * t)$, [t] = °C
	Eisspeicher und Puffer, Anlegefühler an Boiler: Pt100, 4-Leiter	Klasse A, $\pm (0.15 + 0.002 * t)$, [t] = °C
Elektrische Energie	Messumformer: Sineax M563	$\pm 0.5\%$ vom Leistungsmesswert
	Stromwandler: Kompressoren - WP Gavazzi CTD-1x 5:50, Heizstab - Gavazzi CTD-1x 5:80, Rest - WSK30 20:1	$\pm 0.5\%$ vom Strommesswert
Wetterdaten	Globalstrahlung in Kollektorebene: KippZonen CM-10	$\pm 1.3\%$ vom Messwert
	Langwellige Strahlung in Kollektorebene: Pyrgeometer KippZonen CGR4	$\pm 4.7\%$ vom Messwert
	Relative Feuchte und Aussentemperatur hinter einer der mittigen Kollektorreihe: Titec ARFT/R-X/S	Feuchte: $\pm 2\%$ (25...90% r. F.) Temperatur: ± 0.5 K
Bilddaten	<ul style="list-style-type: none">Webcam auf Dach: Fotos von Kollektorreihen zum Festhalten der Witterungseinflüsse (Reif, Eis, Schnee, Regen)Webcam vor Eisspeicher-Fenster: Fotos vom Eisspeicher wenn vereist (Eisspeicher wird dazu beleuchtet)	-

Die Wärmemengenzähler werden per M-Bus ausgelesen, die Temperatur- und Volumenstrommessungen mit einem Yokogawa DA100-1 Datenlogger erfasst.



B.1 Parametrisierung des Kollektormodells

In der Tabelle sind die Parameterwerte aufgeführt, die beim Kollektormodell "Type 833" (Version 5.10) in den TRNSYS-Simulationen verwendet wurden. Zudem ist der Faktor aufgeführt, mit dem der Input der langwelligen Strahlung in der Validierung des Kollektormodells multipliziert wurde, wenn mit dem Modell der rückseitig ungedämmte Kollektor simuliert wurde.

Parameter-Nr. und Beschreibung gemäss Type 833	Gedämmte Rückseite, Auslegung	Änderung für gedämmte Rückseite, Fit	Änderung für ungedämmte Rückseite, Fit
2 Eta0 - optical efficiency or effective tau-alpha	0.95		
4 U0 - c1 Linear heat loss coeff	9.5	11	12.1
5 U1 - c2 Quadr. heat loss coeff	0		
6 Uw - c3 Wind speed dependency of a1	3	4	5
7 Ur - c4 IR dependency (inserted here: epsilon/alpha)	0.1163		
8 Ceff - c5 Effective heat capacity including collector fluid [J/m2K]	15000	14000	14000
9 cw - c6 Wind speed dependency of Eta0	0.01		
12 CMode - Collector mode	1		
13 wf - Wind speed factor	1		
14 rf - Sky radiation factor (C_tilt: tilt angle of collector absorber)	$(1+\cos(C_tilt))/2$		
15 OMode - Optical mode	1		
16 Cfl - For Cmode 2 or 4 only	0		
17 UAbsfl - For Cmode 2 or 4 only	0		
18 b0 - For Cmode 1-3 only	0.018		
19 b1 - For Cmode 1-3 only	0		
20 Nseg - nr of segments	50		
21 MoSeg - Mode for segmented heat loss calculation.	1		
24 MoCond - Mode for condensation gain calculation: 0 = no cond. gains, 1 = method of Perers, 2 = method of Bertram	1		
25 cCond - additional coefficient for condensation gains - method of Perers, idally = 0.916	0.25	0.5	0.5
26 u-value of the absorber or material between fluid and surface of the absorber to ambient boundary for condensation gain calculation according to Bertram	280		
27 MoFrost - mode for calculation of frost gains. 0 = no calculation of condensation or frost gains below Tamb = 0°C, 1 = calculation of frost gains	1		
31 Eta0_fc - optical efficiency or effective tau-alpha for free convection collector properties	0.95		
32 U0_fc - c1 Linear heat loss coeff for free convection collector properties	9.5	11	12.1
33 U1_fc - c2 Quadr. heat loss coeff for free convection collector properties	0		
34 Uw_fc - Wind speed dependency of a1_fc	3	4	5
35 cw_fc - Wind speed dependency of the zero heat loss efficiency for free convection collector properties	0.01		
36 MoCond_fc - Mode for condensation gain calculation for free convection collector properties	1		
37 cCond_fc - additional coefficient for condensation gains for free convection collector	0.25	0.5	0.5



38 u-value with free convection collector properties instead of Parameter 26	280		
39 MoFrost_fc = mode for calculation of frost gains; 0 = no gains, 1 = calculation of frost gains with free convection collector properties	1		
40 infrared radiation dependency, cIR, [-inf;inf]	0.731		
Input-Nr. und Beschreibung gemäss Type 833	Gedämmte Rückseite, Auslegung	Gedämmte Rückseite, Fit	Ungedämmte Rückseite, Fit
8 Longwave Radiation downwards from sky [kJ/hm ²] Der Input-Wert für den rückseitig ungedämmten Kollektor wurde für den Parameter-Fit mit dem rechts angegebenen Faktor multipliziert. Erläuterung siehe Kapitel 4.2.3			*1.2