

Förderprogramm des Klima- und Energiefonds „Solarthermie – Solare Großanlagen“

Endbericht

Logistikzentrum IKEA, W.

Autor

DI Walter Becke

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

Gleisdorf, im März 2023

1. Allgemeine Anlagenbeschreibung

<u>Projektname:</u>	Logistikzentrum IKEA
<u>Adresse:</u>	1210 Wien
<u>Art der Anwendung:</u>	Solaranlagen in Kombination mit Wärmepumpen
<u>Jahr der Förderzusage:</u>	9. Ausschreibung - Solare Großanlagen 2018
<u>Wärmeverbraucher:</u>	Raumheizung und -kühlung
<u>Bruttokollektorfläche:</u>	1.342 m ² (unabgedeckte Absorbermatten, Viessmann SLK-600)
<u>Aperturfläche:</u>	1.203 m ²
<u>Neigung:</u>	0°
<u>Azimet-Ausrichtung:</u>	135° (Süd-Ost)
<u>Energiespeichervolumen:</u>	1.440 m ³ Eisspeicher, 10 m ³ Kältespeicher, 5 m ³ Pufferspeicher
<u>Nachheizungssystem:</u>	2 Sole/Wasser-Wärmepumpen (je 500 kW Heizen / 337 kW Kühlen) 1 Wasser/Wasser-Wärmepumpe (414 kW Heizen/ 300 kW Kühlen) Gaskessel (1,6 MW)
<u>Spezifischer Solarertrag:</u>	320 kWh/m ² a (Messung, bezogen auf die Aperturfläche)
<u>Projektstatus:</u>	Monitoringperiode beendet mit März 2022
<u>Zuständigkeit Begleitforschung:</u>	AEE INTEC

Im Laufe des Jahres 2019 wurde in Wien ein neues IKEA Logistikzentrum errichtet. In dem Gebäude sind sowohl umfangreiche Lager- und Logistikbereiche wie auch Büros und ein Gastrobereich untergebracht. Insgesamt werden 42.634 m² Gebäudefläche mit einer Heizlast von 1,68 MW bzw. einer Kühllast von 446 kW versorgt. Für die Wärmeversorgung kommen 2 Sole-Wasser-Wärmepumpen, eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe und ein Gaskessel zum Einsatz. Kernstück der Anlage ist ein 1.440 m³ großer Eisspeicher, welcher als Quelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpen dient. Eine 1.342 m² große Solaranlage aus unabgedeckten Absorbermatten, welche am Dach des neuen Gebäudes montiert ist, dient für die Regeneration des Eisspeichers oder als direkte Quelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpen. Das Wärmeversorgungssystem kann auch für die Kühlung des Gebäudes genutzt werden. Dies kann über natürliche Kühlung direkt aus dem Eisspeicher oder der Brunnenanlage wie auch in Form aktiver Kühlung mit Hilfe der Wärmepumpen passieren. Als Rückkühler stehen der Eisspeicher wie auch die Solaranlage zur Verfügung. Abbildung 1 zeigt ein Luftbild von der Errichtung des Eisspeichers, welcher bei dieser Anlage eine zylindrische Form aufweist.

Abgerundet wird das Gesamtkonzept durch eine 1 MWp Photovoltaik-Anlage, welche rund 20.000 m² Dachfläche belegt.



Abbildung 1: Bau des Eisspeichers (links, Quelle: IKEA), ungedeckte Absorbermatten sowie Photovoltaik-Anlage am Dach der Anlage Logistikzentrum IKEA (rechts) (Quelle: AEE INTEC)



Abbildung 2: Neu errichtetes IKEA Logistik-Zentrum in Wien (Quelle: IKEA)

2. Hydraulik- und Messkonzept

Das gesamte Wärmeversorgungssystem der Anlage „Logistikzentrum IKEA“ ist als Blockschaltbild in Abbildung 3 dargestellt. Die Versorgungsanlage kann 8 verschiedene Betriebsmodi einnehmen, welche im Folgenden detailliert beschrieben werden.

Als zentrales Wärme- und Kälteversorgungssystem dienen die Sole-Wasser-Wärmepumpen für die die Solaranlage bzw. der Eisspeicher als Quellen zur Verfügung stehen. Natürliche Kühlung kann direkt aus dem Eisspeicher gefahren werden (reine Umwälzung, kein Wärmepumpenbetrieb). Sowohl Eisspeicher als auch Solaranlage können im Fall aktiver Kühlung als Abwärmesenke verwendet werden. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe dient als Ausfallsicherheit. Der Brunnen (Quelle der Wasser-Wasserwärmepumpe) kann auch für natürliche Kühlung verwendet werden, wenn der Eisspeicher bereits zu warm ist. Der Gaskessel dient einerseits als weitere Ausfallsreserve

und andererseits ist er wie ein Durchlauferhitzer (zur Anhebung des Heizungsvorlaufs) in die Wärmeversorgung des Gebäudes eingebunden. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe und der Gaskessel sind keinen eigenen Betriebsmodi zugeordnet, da sie primär der Ausfallsicherheit dienen.

Der Eisspeicher ist über einen internen und einen externen Wärmetauscher in das System eingebunden. Der interne Wärmetauscher dient dem Energieentzug, über den externen Wärmetauscher wird Wärme zur Regeneration in den Eisspeicher eingebracht.

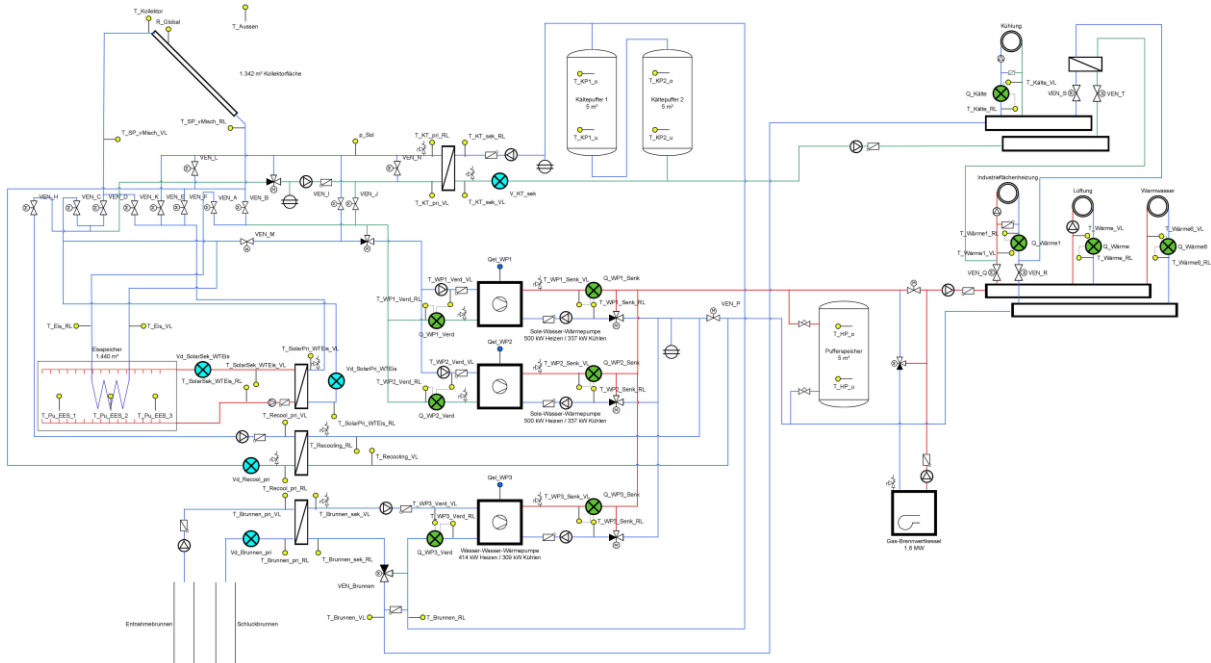


Abbildung 3: Hydraulik- und Messkonzept zum Projekt „Logistikzentrum IKEA“ (grün: Volumenstromzähler; gelb: Temperatur-, Druck- und Einstrahlungssensoren; blau: Stromzähler)

Betriebsmodus 1.1: Heizen (ohne solare Regeneration)

Wie Modus 1.2 jedoch ohne solare Regeneration des Eisspeichers.

Betriebsmodus 1.2: Heizen (mit solarer Regeneration)

In diesem Szenario wird das Gebäude mit Wärme versorgt, welche von den Sole-Wasser-Wärmepumpen bereitgestellt wird. Als Quelle dient der Eisspeicher, welcher zeitgleich von der Solaranlage regeneriert wird. Dieser Modus soll aktiv sein, wenn die Außentemperatur unter 12 °C liegt.

Offene Ventile

- Solaranlage: N, L, C, K
- Wärmepumpe: M, A, P

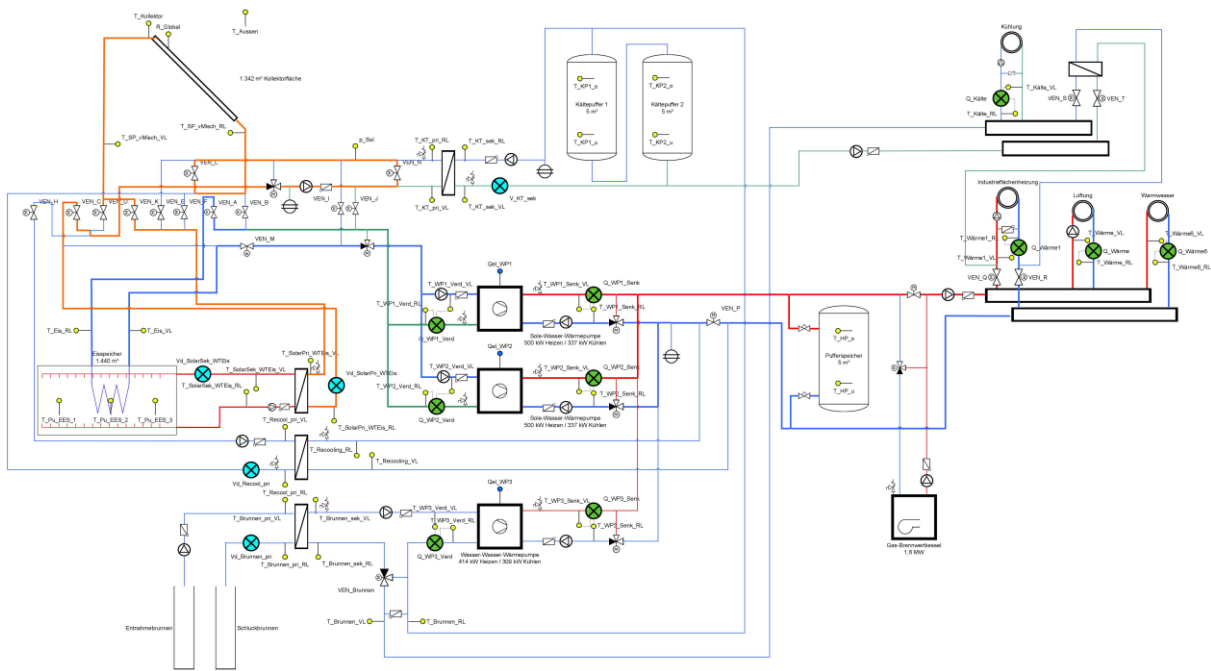


Abbildung 4: Betriebsmodus 1 - Heizen: Eisspeicher dient den Wärmepumpen als Quelle, Regeneration des Eisspeichers via Kollektoren in Modus 1.2

Betriebsmodus 2: Heizen

Bei diesem Modus dient die Solaranlage als direkte Quelle für die Sole-Wasser-Wärmepumpen.

Offene Ventile: D, C, M, B, P

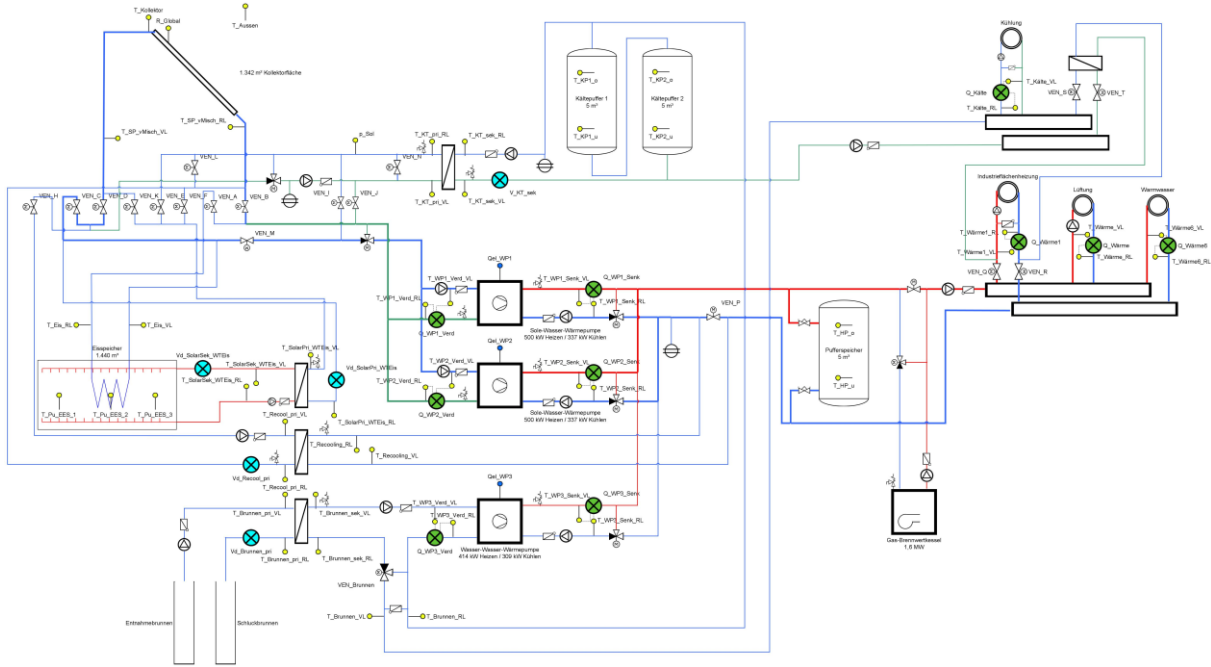


Abbildung 5: Betriebsmodus 2 - Heizen: Kollektoren dienen den Wärmepumpen als Quelle

Betriebsmodus 3: Abtauen der Kollektoren

Betriebsmodus 3 muss manuell aktiviert werden und dient dem gegebenenfalls notwendigen Abtauen der Solaranlage. Dies wird erreicht, indem vorhandene Wärme aus den Heizkreisen durch die Solaranlage gepumpt wird ohne, dass andere Wärmeerzeuger (Wärmepumpen oder Gaskessel) aktiv sind.

Offene Ventile:

- Solaranlage: D, H
- Heizkreis: Q, R

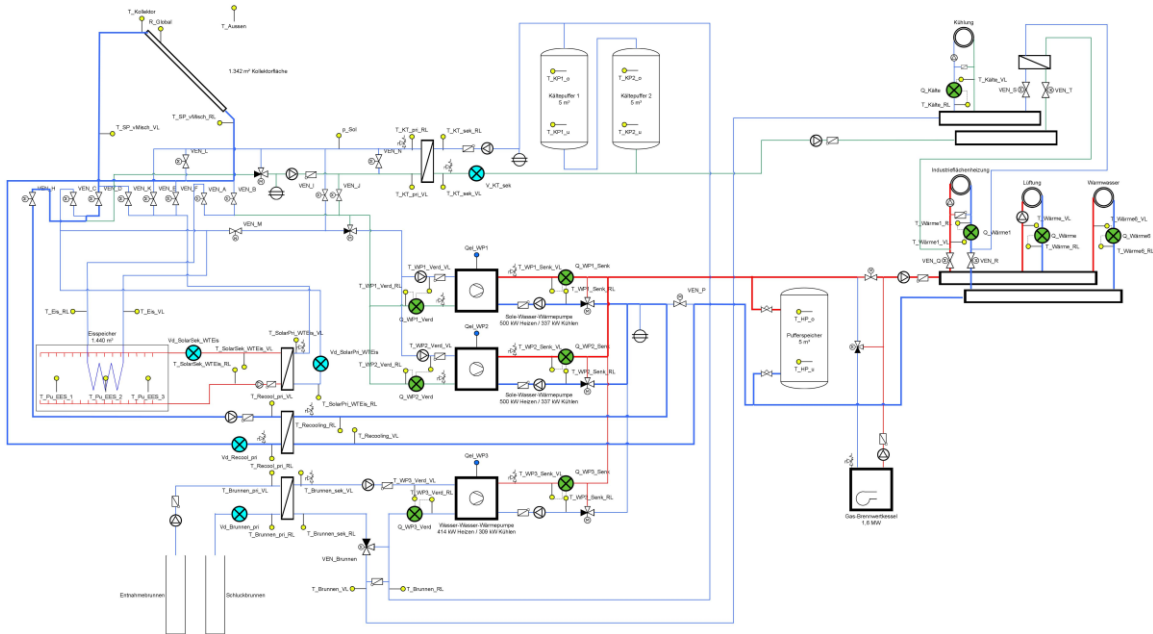


Abbildung 6: Betriebsmodus 3: manuelles Abtauen der Kollektoren

Betriebsmodus 4: Natürliche Kühlung

Natürliche Kühlung ist ab einer Außentemperatur von 20 °C vorgesehen. Kälteenergie wird aus dem Eisspeicher entnommen und über einen externen Wärmetauscher in die Räume eingebracht. Auf diese Weise wird der Eisspeicher regeneriert.

Offene Ventile: E, C

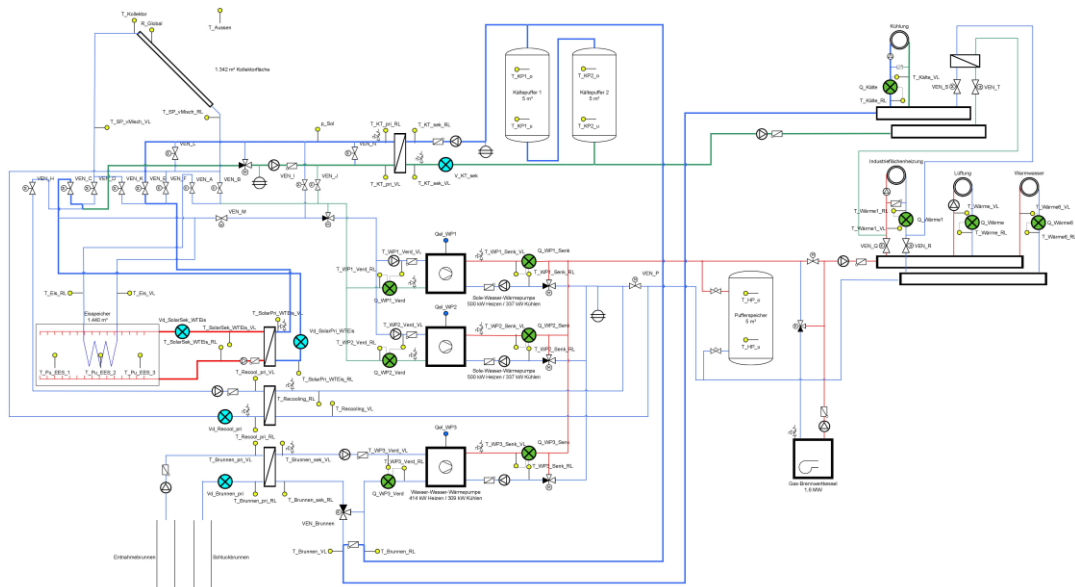


Abbildung 7: Betriebsmodus 4 - Kühlen: Eisspeicher dient als Wärmesenke (Natural Cooling)

Betriebsmodus 5.1: Aktive Kühlung – Abwärme in Eisspeicher

Wenn die Eisspeicher-Temperaturen zu hoch für natürliche Kühlung geworden sind und die Außentemperaturen weiterhin über 20 °C liegen, wird weitere Kühlung über die Wärmepumpen generiert. Die Wärmepumpen entziehen den Räumen Wärme und bringen diese zunächst in den Heizungspufferspeicher ein. Ist dieser voll, wird der Eisspeicher auf bis maximal 25 °C erwärmt.

Offene Ventile:

- Wärmepumpen senkenseitig: I, J
- Eisspeicher: C, F, H

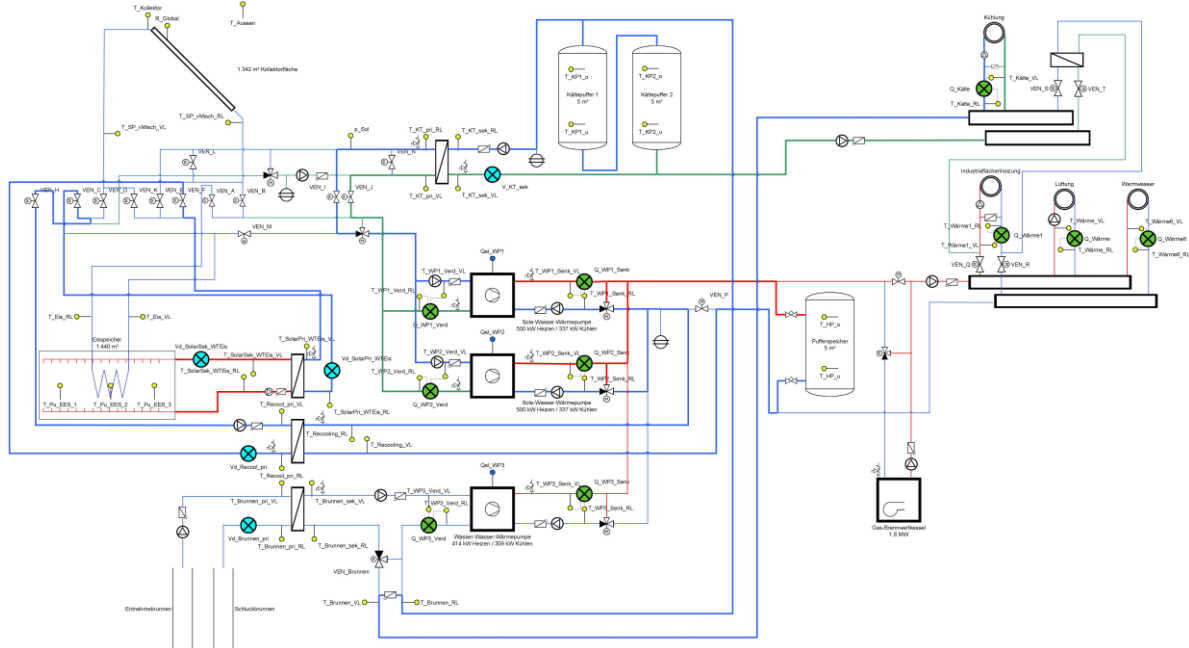


Abbildung 8: Betriebsmodus 5 - Kühlen: Aktive Kühlung über Wärmepumpen, Rückkühlung in den Eisspeicher

Betriebsmodus 5.2: Sommerregeneration

Von Juni bis September soll die Solaranlage vornehmlich in den Nachtstunden (22 bis 6 Uhr) den Eisspeicher regenerieren.

Offene Ventile: N, L, C, K

Betriebsmodus 6: Aktive Kühlung – Abwärme über Solaranlage

In Szenario 6 wird die Abwärme aus aktiver Kühlung über die Solaranlage rückgekühlt. Dies ist nur möglich, wenn zu diesem Zeitpunkt keine Sonne scheint und die Außentemperatur nicht über 25 °C liegt.

Offene Ventile:

- Wärmepumpen senkenseitig: I, J
- Solaranlage: D, H

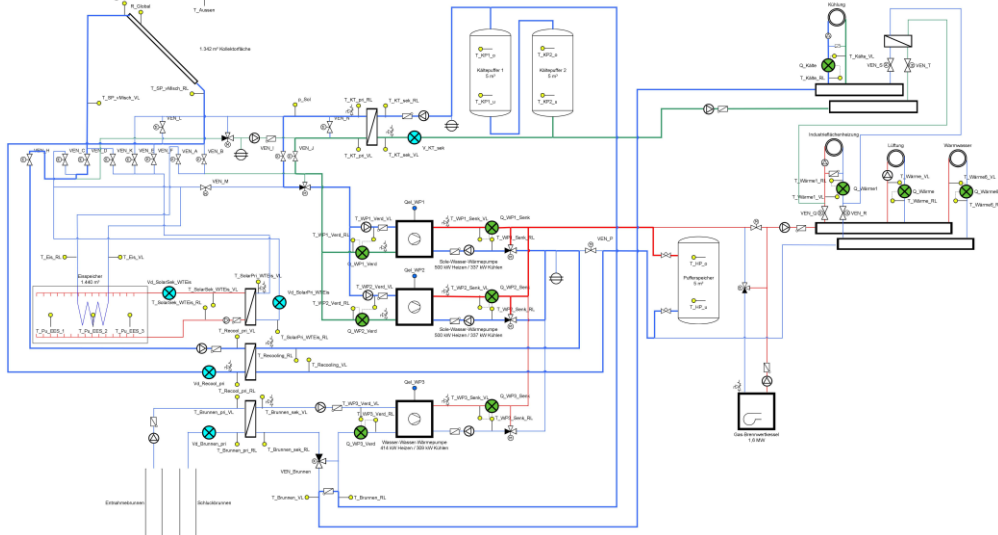


Abbildung 9: Betriebsmodus 6 - Kühlen: Aktive Kühlung über Wärmepumpen, Rückkühlung über den Kollektor

Betriebsmodus 7.0: Brunnenwasserkühlung

Betriebsmodus 7.0 nutzt den Brunnen der Wasser-Wasser-Wärmepumpe für natürliche Kühlung. Dieser Modus kann in Kombination mit aktiver Kühlung genutzt werden, sofern die Rücklauftemperatur der Gebäudekälte über ca. 15 °C liegt.

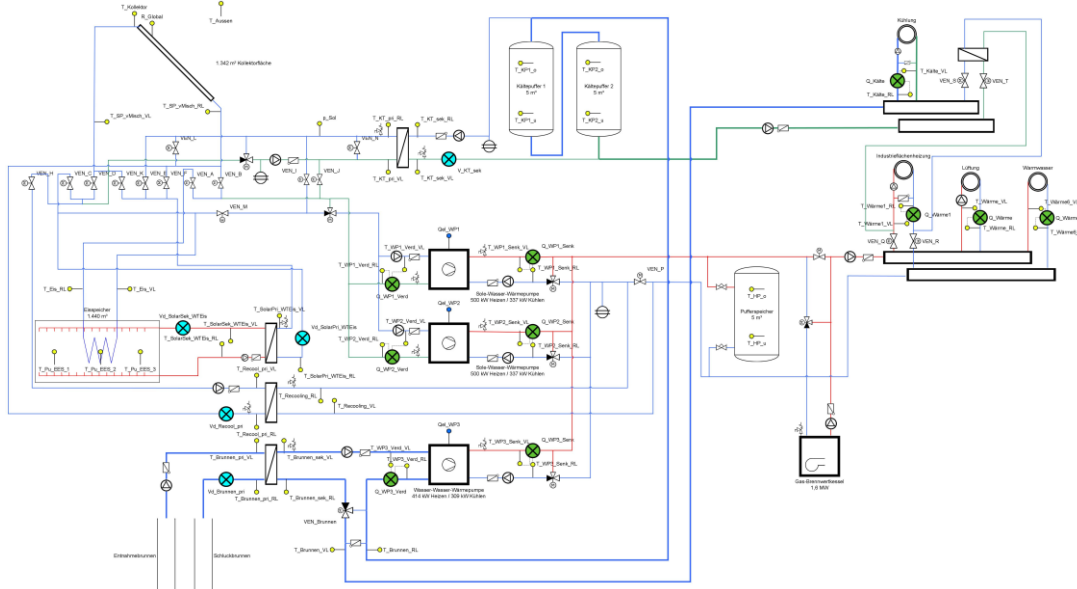


Abbildung 10: Betriebsmodus 7.0 - Kühlen: Kühlung über Brunnenwasser

Betriebsmodus 7.1: Heizen mit Brunnenwasser

Betriebsmodus 7.1 nutzt den Brunnen der Wasser-Wasser-Wärmepumpe als Wärmequelle und versorgt das Gesamtsystem (zusätzlich) mit Wärme.

Betriebsmodus 8: Zwangserwärmung des Eisspeichers

Das Gesamtsystem ist so ausgelegt, dass die Kühllast gemeinsam mit den Solarerträgen den Eisspeicher vor der Heizperiode vollständig regenerieren kann. Sollte jedoch zu wenig Kühllast auftreten, kann eine Zwangserwärmung des Eisspeichers notwendig werden. Dies wird erreicht, in dem das Heizwärme- und Kälteverteilsystem über einen externen Wärmetauscher direkt miteinander verbunden werden. Betriebsmodus 8 ist als Ausfallszenario vorgesehen.

Offene Ventile:

- Eisspeicher: E, C
- Kälteverteilung: S, T

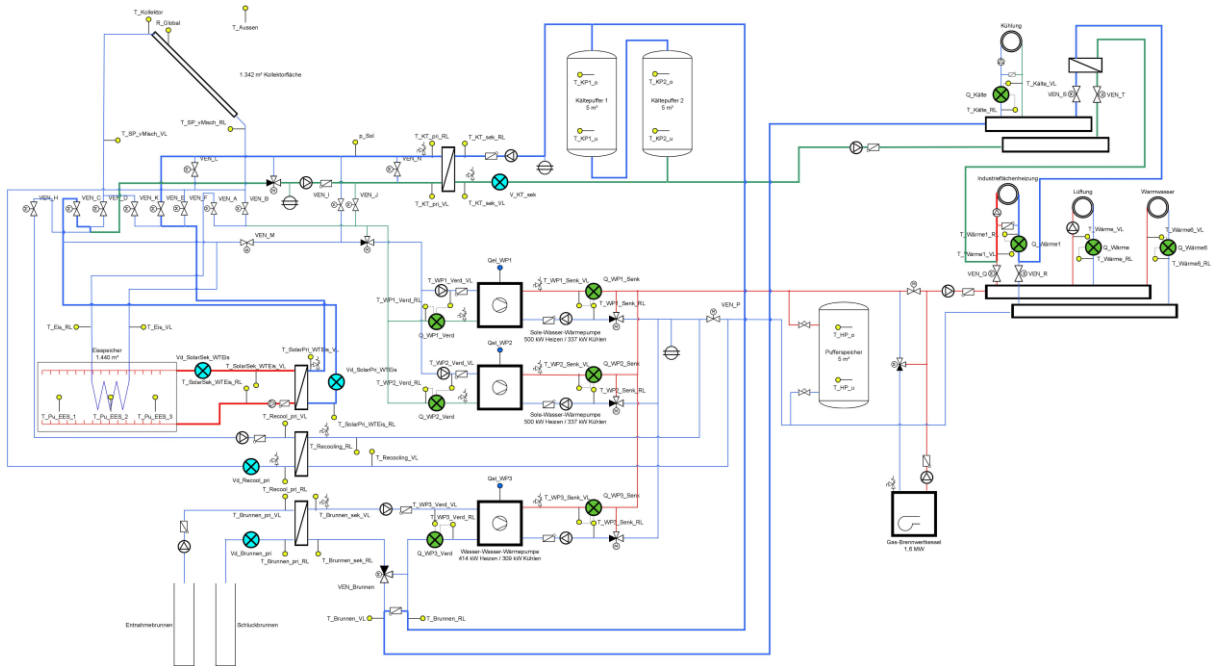


Abbildung 11: Betriebsmodus 8 – Zwangserwärmung des Eisspeichers

Neun Wärmemengenzähler, 7 Kältezähler, 5 Durchflusszähler, 3 Stromzähler, 37 Temperatursensoren, 19 Ventilstellungen, ein Drucksensor im solaren Primärkreis und ein Globalstrahlungssensor bilden in diesem Projekt die gesamte messtechnische Bestückung.

Die Beschreibung der einzelnen Messpunkte ist nachfolgend zusammengefasst:

Solaranlage

R_Global	Globalstrahlung in Kollektorebene
T_Koll_1	Kollektorfühler 1
T_SolarPri_VL	Solar Vorlauf Primär
T_SolarPri_RL	Solar Rücklauf Primär
p_Solar	Anlagendruck Solar

Eisspeicher

Vd_SolarPri_WTEis	Durchfluss Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Glykol
T_SolarPri_WTEis_VL	Vorlauf Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Glykol
T_SolarPri_WTEis_RL	Rücklauf Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Glykol
Vd_SolarSek_WTEis	Durchfluss Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Wasser
T_SolarSek_WTEis_VL	Vorlauf Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Wasser
T_SolarSek_WTEis_RL	Rücklauf Wärmetauscher Solar zu Eisspeicher Wasser
T_Pu_Eis_1	Eisspeicherfühler 1
T_Pu_Eis_2	Eisspeicherfühler 2

T_Pu_Eis_3	Eisspeicherfühler 3
T_Eis_VL	Eisspeicher Austritt
T_Eis_RL	Eisspeicher Eintritt

Kühlsystem

T_KaelteWT_pri_VL	Kältetauscher Primär VL
T_KaelteWT_pri_RL	Kältetauscher Primär RL
Vd_KaelteWT_sek	Kältetauscher Sekundär
T_KaelteWT_sek_VL	Kältetauscher Sekundär VL
T_KaelteWT_sek_RL	Kältetauscher Sekundär RL
T_Kaelte_Pu1_o	Kältepuffer 1 oben
T_Kaelte_Pu1_u	Kältepuffer 1 unten
T_Kaelte_Pu2_o	Kältepuffer 2 oben
T_Kaelte_Pu2_u	Kältepuffer 2 unten
T_Kaelte_VL	Kältebalken Vorlauf
T_Kaelte_RL	Kältebalken Rücklauf
Q_Kaelte1-4	Energie Kaelte 1-4
V_Kaelte1-4	Volumen Kaelte 1-4
T_Kaelte1-4_VL	T-Vorlauf Kaelte 1-4
T_Kaelte1-4_RL	T-Rücklauf Kaelte 1-4

Heizungssystem

T_Waerme_Pu_o	Heizungspuffertemperatur oben
T_Waerme_Pu_u	Heizungspuffertemperatur unten
T_Waerme_VL	Wärmevorlauf
T_Waerme_RL	Wärmerücklauf
Q_Wärme 1-6	Energie Wärme 1-6
V_Wärme 1-6	Volumen Wärme 1-6
T_Wärme 1-6_VL	T-Vorlauf Wärme 1-6
T_Wärme 1-6_RL	T-Rücklauf Wärme 1-6

Wärmepumpen 1-3

Q_WP 1-3_Verd	Energie WP 1-3
V_WP 1-3_Verd	Volumen WP 1-3
T_WP 1-3_Verd_VL	T-Vorlauf WP 1-3
T_WP 1-3_Verd_RL	T-Rücklauf WP 1-3
Qel_WP 1-3	Elektrische Energie WP 1-3
Q_WP 1-3_Senk	Energie WP 1-3
V_WP 1-3_Senk	Volumen WP 1-3
T_WP 1-3_Senk_VL	T-Vorlauf WP 1-3
T_WP 1-3_Senk_RL	T-Rücklauf WP 1-3

Recooling

Vd_Recool_pri	Recool-WT primär Vd
T_Recool_pri_VL	Vorlauftemperatur Recool-WT primär
T_Recool_pri_RL	Rücklauftemperatur Recool-WT primär
T_Recool_sek_VL	Vorlauftemperatur Recool-WT primär
T_Recool_sek_RL	Rücklauftemperatur Recool-WT primär

Brunnen

Vd_Brunnen_pri	Brunnen primär Vd
T_Brunnen_pri_VL	Vorlauftemperatur Brunnen primär
T_Brunnen_pri_RL	Rücklauftemperatur Brunnen primär
T_Brunnen_sek_VL	Vorlauftemperatur Brunnen primär
T_Brunnen_sek_RL	Rücklauftemperatur Brunnen primär
T_Brunnen_VL	Vorlauf Brunnen + WP3 direkt
T_Brunnen_RL	Rücklauf Brunnen + WP3 direkt

Sonstiges

VEN_A	Ventilstellung A
VEN_B	Ventilstellung B
VEN_C	Ventilstellung C
VEN_D	Ventilstellung D
VEN_E	Ventilstellung E
VEN_F	Ventilstellung F
VEN_H	Ventilstellung H
VEN_I	Ventilstellung I
VEN_J	Ventilstellung J
VEN_K	Ventilstellung K
VEN_L	Ventilstellung L
VEN_M	Ventilstellung M
VEN_N	Ventilstellung N
VEN_P	Ventilstellung P
VEN_Q	Ventilstellung Q
VEN_R	Ventilstellung R
VEN_S	Ventilstellung S
VEN_T	Ventilstellung T
VEN_Brunnen	Ventil Brunnenkühlung

3. Energiebilanz

Aufgrund der Komplexität und der unterschiedlichen Anwendungsfälle Heizen und Kühlen wurden mehrere unterschiedliche Energiebilanzen erstellt, um einen guten Überblick über das Gesamtsystem zu vermitteln.

Abbildung 12 zeigt die Energiebilanz für Heizen der Anlage „Logistikzentrum IKEA“ während der Monitoringperiode. Die Heizwärme wird ausschließlich von den Wärmepumpen erzeugt, welche nach Quellen farblich unterschieden werden. Den größten Anteil an der Wärmeerzeugung liefern die Sole-Wasser-Wärmepumpen mit der Solaranlage als direkte Quelle. An zweiter Stelle steht die Wasser-Wasser-Wärmepumpe, knapp gefolgt von den Sole-Wasser-Wärmepumpen mit dem Eisspeicher als Quelle. Über das Jahr gesehen mit einem sehr geringen Anteil, jedoch in den Monaten September und Oktober mit einem durchaus beachtlichen Anteil, werden die einen Räume aktiv mit den Sole-Wasser-Wärmepumpen gekühlt und andere Räume gleichzeitig mit der (veredelten) Abwärme geheizt („Wärmepumpen (Quelle Raum)“, dunkelrot). Der als Notheizung installierte Gaskessel war im Betrachtungszeitraum nie aktiv.

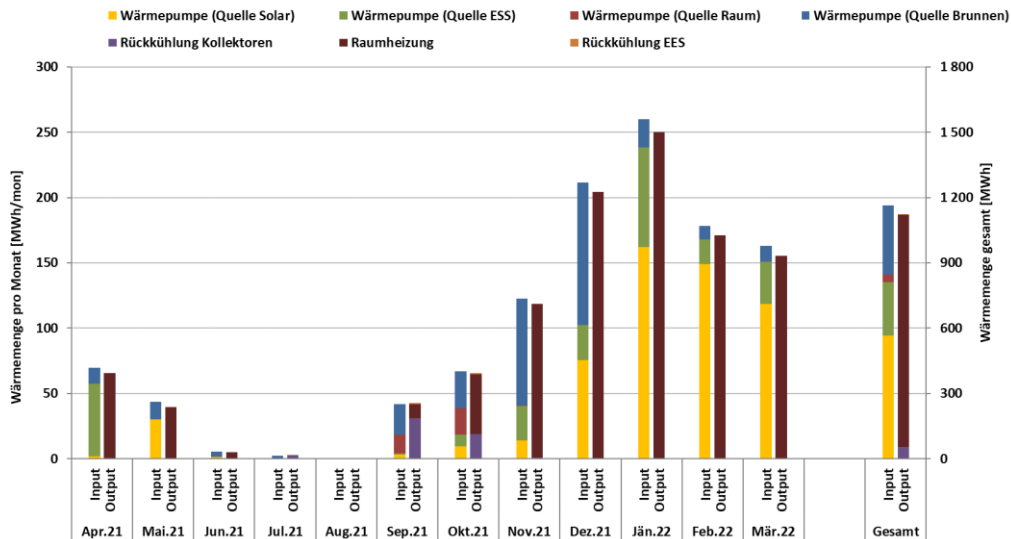


Abbildung 12: Energiebilanz der Anlage "Logistikzentrum IKEA" für den Heizbetrieb

Abbildung 13 zeigt die Energiebilanz für den Kühlbetrieb der Anlage „Logistikzentrum IKEA“ während der Monitoringperiode. Das Zurverfügungstellen von Kälte kann grundsätzlich passiv (frei) und aktiv erfolgen. Als Wärmesenken für das passive (oder freie) Kühlen stehen einerseits der Eisspeicher (hellblau schraffiert) und andererseits der Brunnen (hellblau) zur Verfügung. Der Eisspeicher als Senke für freie Kühlung wurde primär in den Monaten April bis Juni genutzt. Im Hochsommer (Juli und August) wurde praktisch ausschließlich mit Hilfe des Brunnens passiv gekühlt.

Mit beiden Wärmepumpentypen ist aktive Kühlung möglich. Für die Sole-Wasser-Wärmepumpen konnte messtechnisch zwischen den unterschiedlichen Senken für die Abwärme unterschieden werden. Hier geht der größte Anteil über die Solaranlage (=Luft-Wasser-Wärmetauscher) an die Umgebung und nur ein verschwindend kleiner Anteil in den Eisspeicher. Bei der aktiven Kühlung ist aber hauptsächlich die Wasser-Wasser-Wärmepumpe der bestimmende Faktor (dunkelrot). Da diese Wärmepumpen vollkommen unabhängig vom Restsystem agiert, von den in der Regelung hinterlegten Betriebsmodi völlig unbeeinflusst ist und auch aufgrund der sehr komplexen Systemhydraulik ist eine Zuordnung der Abwärmeströme aus dieser Wärmepumpe extrem schwierig. Sicher ist, dass der Eisspeicher hier keine Abwärmesenke darstellt. Qualitativ kann man sagen, dass ein Großteil der Abwärme vermutlich über die Solaranlage rückgekühlt wird.

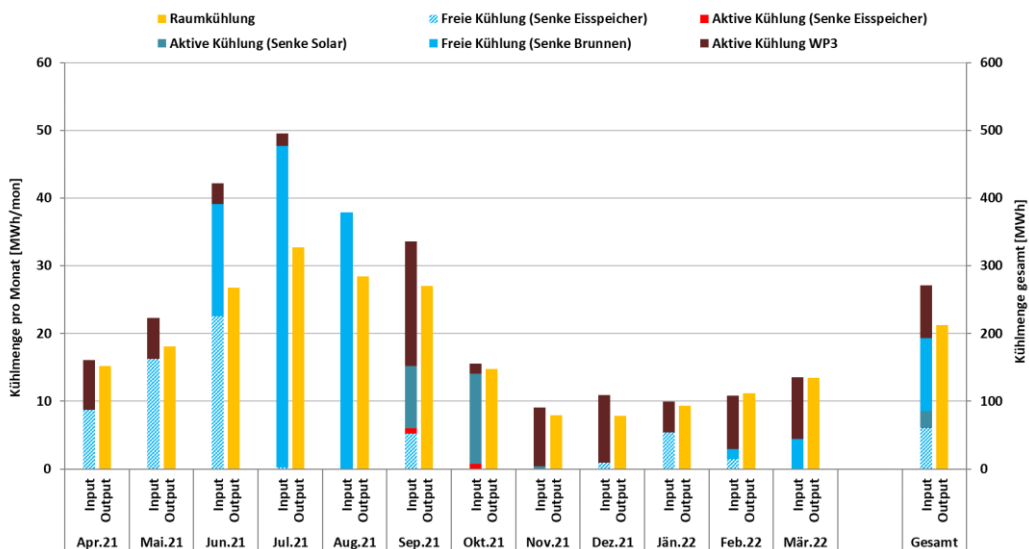


Abbildung 13: Energiebilanz der Anlage "Logistikzentrum IKEA" für den Kühlbetrieb

In Abbildung 14 ist ein prozentueller Vergleich der Abwärmesenken über den Monitoringzeitraum dargestellt. Über das Jahr gesehen wird etwa gleich viel Wärme an die Umgebung (über die Solaranlage; 37%) und an den Brunnen (40%) abgegeben. 23% der Abwärme wird für die Regeneration des Eisspeichers genutzt.

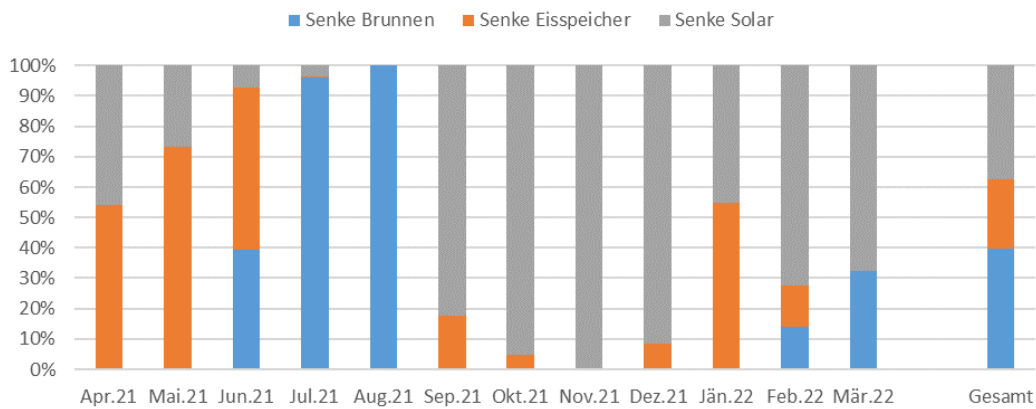


Abbildung 14: Vergleich der Abwärmesenken für den Kühlbetrieb

Abbildung 15 zeigt die Wärmebilanz des Eisspeichers sowie die monatlichen Mittelwerte der Temperaturen im Eisspeicher auf 3 unterschiedlichen Höhen über die Monitoringperiode. Auf der Input-Seite ist praktisch ausschließlich die freie Kühlung zu verzeichnen. Nur 3 % der hydraulisch in den Eisspeicher eingebrachten Wärme kommen aus einem aktiven Kühlbetrieb. Dieser Modus trat ausschließlich im September und Oktober der Monitoringperiode auf. Die Wärmeentnahme aus dem Eisspeicher erfolgt nur im Heizbetrieb ist in Hellorange auf der Output-Seite dargestellt. Auffallend ist die scheinbar nicht ausgeglichene Energiebilanz des Speichers, denn es wurde deutlich mehr Wärme entnommen als eingebracht wurde. Die Antwort auf diese Frage liegt in den monatlichen Mittelwerten der Eisspeichertemperaturen. Diese liegen – mit Ausnahme der Monate September bis November – immer bei rund 3 °C und damit unter der mittleren Temperatur des umgebenden Erdreichs. Zwar wurde die Erdreichtemperatur nicht explizit gemessen, doch liegt diese erfahrungsgemäß bei 10 bis 12 °C mit leichten Schwankungen über das Jahr. Somit findet praktisch ganzjährig ein Wärmestrom vom Erdreich in den Eisspeicher statt.

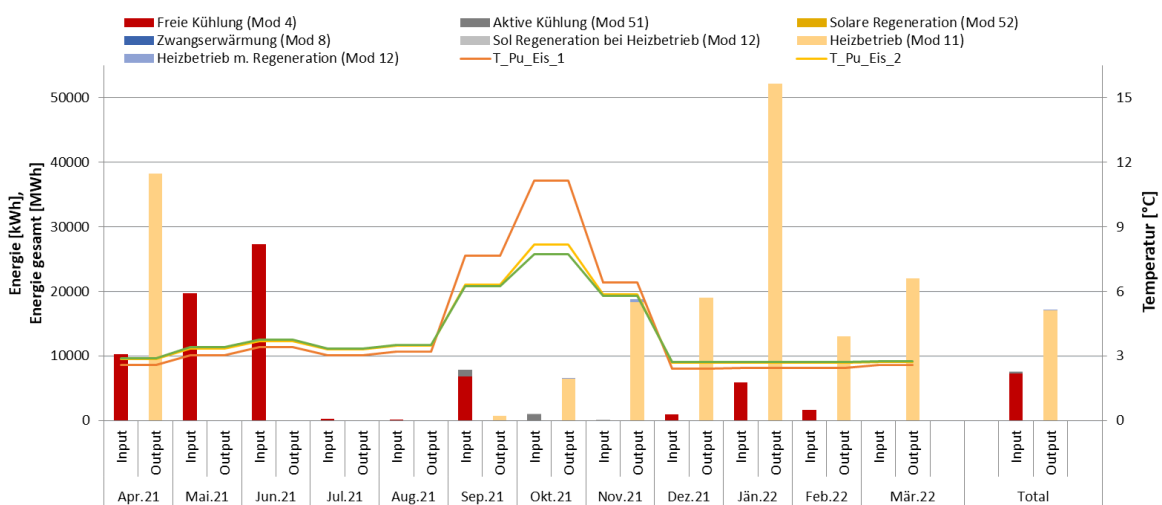


Abbildung 15: Wärmebilanz über den Eisspeicher sowie die monatlichen Mittelwerte der Temperaturen im Eisspeicher auf 3 unterschiedlichen Höhen

4. Vergleich Simulation - Messwerte

Abbildung 16 bis Abbildung 19 geben einen Überblick über die bei der Einreichung angegebenen Simulationsergebnisse. Verglichen werden im Rahmen des einjährigen Anlagenmonitorings die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen der relevanten Kennzahlen (spezifischer Solarertrag, solarer Deckungsgrad sowie der Wärmeverbrauch) betreffend die Anlage „Logistikzentrum IKEA“.

Laut der Anlagensimulation des Betreibers zum Zeitpunkt der Fördereinreichung werden ein Jahressolarertrag von 1.066 kWh/m²a und eine Globalstrahlung von 1.085 kWh/m²a prognostiziert. Im Betrachtungszeitraum lag die Globalstrahlung in Kollektorebene mit 1.237 kWh/m²a etwas über der Prognose. Der spezifische Solarertrag lag hingegen mit 320 kWh/m²a deutlich (-70%) unter der Prognose. Dies liegt wesentlich in dem reduzierten Verbrauch gegenüber der Prognose begründet. Es ist davon auszugehen, dass dadurch auch keine solare Regeneration des Eisspeichers notwendig wurde. Der gesamte Solarertrag wurde als Quelle für die Wärmepumpen genutzt.

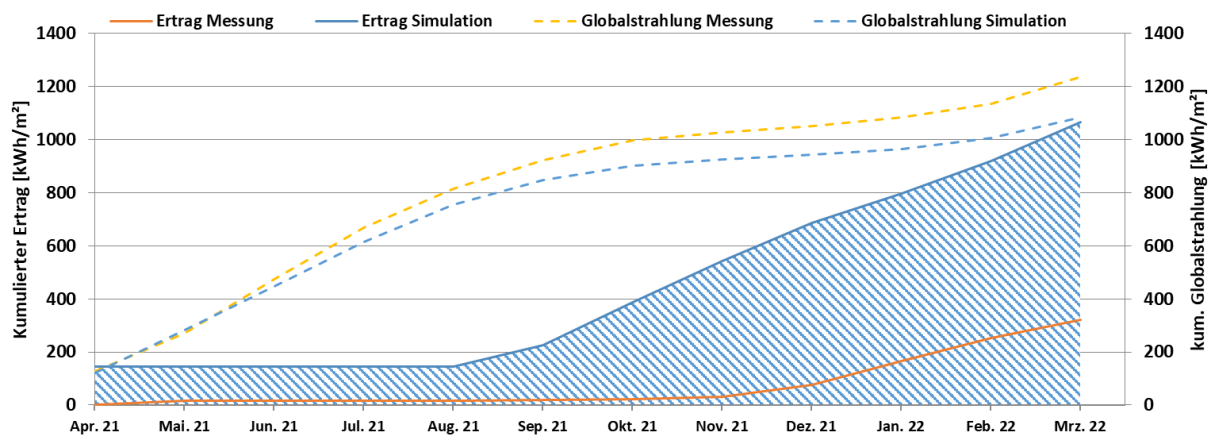


Abbildung 16: Prognostizierter und gemessener Verlauf des spezifischen Solarertrags und der Globalstrahlung in Kollektorebene für die Anlage „Logistikzentrum IKEA“

Aufgrund der ausschließlich quellseitigen Einbindung der Solaranlage in das Gesamtsystem, kann ein solarer Deckungsgrad nicht sinnvoll definiert werden. Alternativ kann aber eine Quellverteilung für die Sole-Wasser-Wärmepumpen bestimmt werden, welche in Abbildung 17 dargestellt ist. Aus dieser geht hervor, dass ca. 69 % der Quellenergie für die Sole-Wasser-Wärmepumpen durch die Solaranlage bereitgestellt werden konnte.

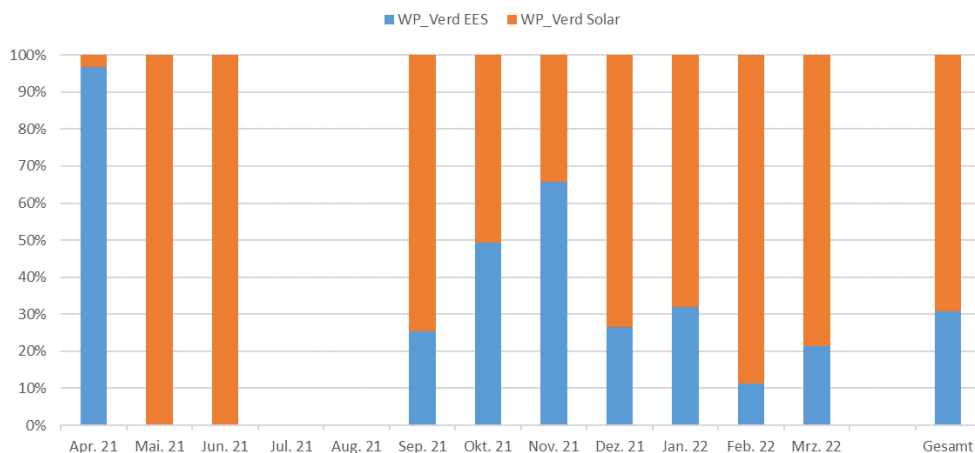


Abbildung 17: Prozentuelle Quellverteilung der Sole-Wasser-Wärmepumpen für das Projekt „Logistikzentrum IKEA“

Abbildung 18 zeigt ebenso die Quellverteilung jedoch in Kilowattstunden.

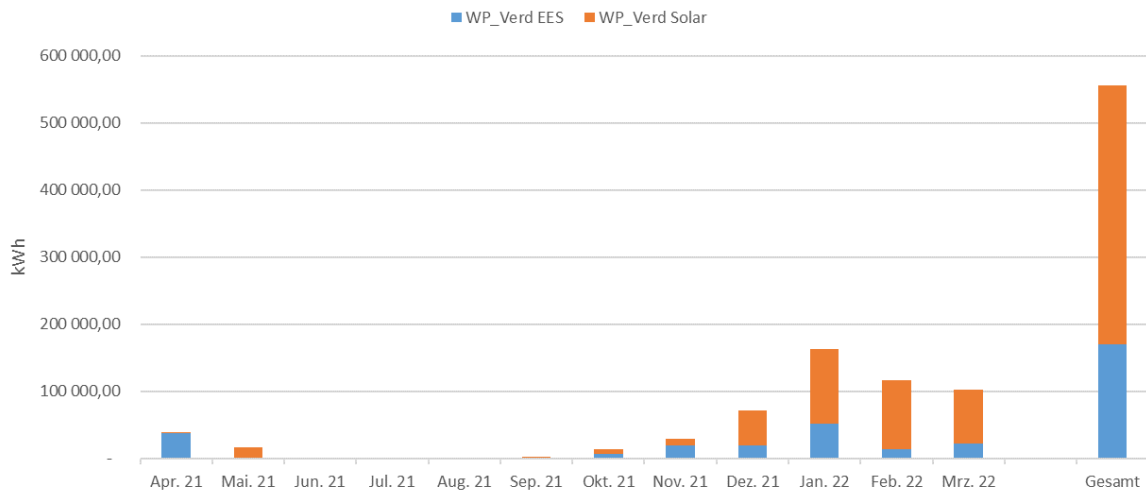


Abbildung 18: Quellverteilung in Kilowattstunden der Sole-Wasser-Wärmepumpen für das Projekt „Logistikzentrum IKEA“

Der jährliche Gesamtwärmebedarf wurde zum Zeitpunkt der Fördereinreichung mit 3.833 MWh abgeschätzt. Der kumulierte Verlauf der prognostizierten und gemessenen Wärmeabnahme durch die Verbraucher ist Abbildung 19 zu entnehmen. In der gesamten Monitoringperiode lag der gemessene Verbrauch relativ konstant rund 72 % unter der Prognose. Gespräche mit dem Förderwerber ergaben, dass das Bauvorhaben wie ursprünglich geplant umgesetzt und auch entsprechend genutzt wurde. Die Ursache für die doch sehr deutliche Abweichung wird in großen Sicherheitsreserven bei der Planung vermutet, konnte aber nicht zweifelsfrei festgestellt werden.

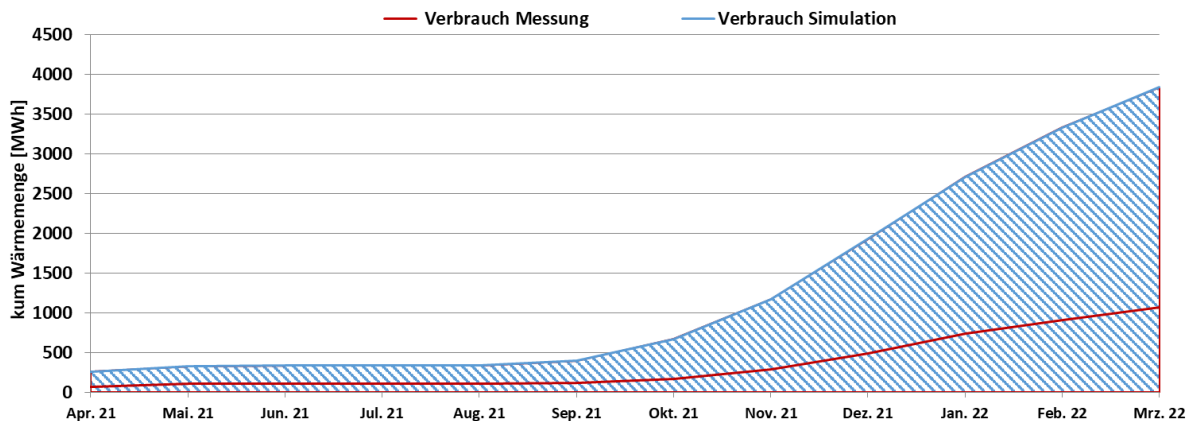


Abbildung 19: Prognostizierter und gemessener kumulierter Verbrauch des Projekts „Logistikzentrum IKEA“

5. Detailanalyse und Optimierungspotential

Basierend auf den installierten und erfassten Sensoren wurden im Betrachtungszeitraum Analysen und Plausibilitätsprüfungen der Betriebsweise der einzelnen hydraulischen Kreise sowie das Zusammenspiel des Gesamtsystems durchgeführt.

In Abbildung 20 ist die Laufzeit der in Kapitel 2 beschriebenen Betriebsmodi in Prozent pro Monat dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Modi 3 (Abtauen der Solarkollektoren) und 5.2 (Solare Eisspeicherregeneration) nie auftraten. Mit Abstand die größte Laufzeit von hatte der Modus 2 (Heizen mit Quelle Solaranlage, violett; rund 2.780 Stunden). Die anderen beiden Heizmodi 1.1 (Quelle Eisspeicher, hellrot; rund 1.285 Stunden) und 7.1

(Quelle Brunnen, grün; rund 1.000 Stunden) unterstützen die Wärmeversorgung mit deutlich geringeren Laufzeiten. Hinsichtlich Gebäudekühlung verzeichnet Modus 7.0 (freie Kühlung über Brunnen, dunkelrot; ca. 1.900 Stunden) die höchste Laufzeit. An zweiter Stelle steht die freie Kühlung mit dem Eisspeicher als Senke (Mode 4, hellblau) mit rund 820 Stunden, knapp gefolgt von Modus 6 (aktives Kühlen mit Abwärme über Kollektoren, dunkelblau; ca. 640 Stunden). Aktive Kühlung mit Eisspeicherregeneration durch Abwärme trat praktisch nicht auf (Modus 5.1, orange; ca. 20 Stunden).

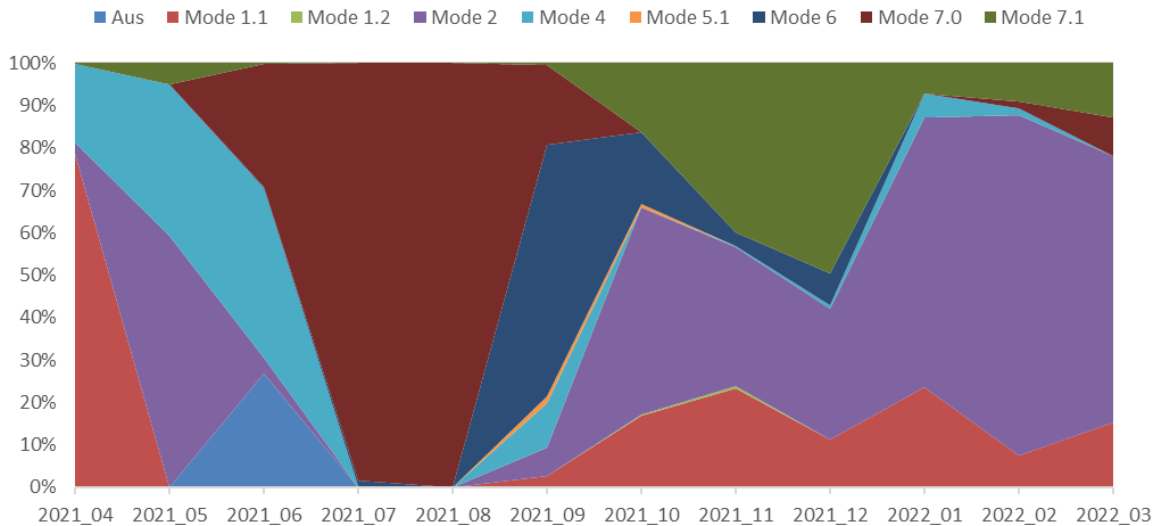


Abbildung 20: Prozentuelle Darstellung der auftretenden Systemmodi über die Monitoringperiode

In weiterer Folge werden nun die häufig aufgetretenen Modi detaillierter betrachtet.

Modus 1.1 – Heizen: Wärmepumpenbetrieb mit Eisspeicher als Quelle

In Abbildung 21 sind die Temperaturen im Kreis der Wärmepumpen 1 und 2 sowie im Eisspeicher zuzüglich des Verlaufs der Globalstrahlung, der Außentemperatur und elektrischen Leistungsaufnahme aller Wärmepumpen dargestellt. Trotz guter Einstrahlung in der Größenordnung von 800 W/m^2 nutzt die Wärmepumpe 1 den Eisspeicher als Energiequelle. Wärmepumpe 2 ist an diesem Tag nicht in Betrieb. Als Quelltemperaturen stehen im Schnitt $-2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ aus dem Eisspeicher zur Verfügung. Allein anhand der Messdaten lässt sich nicht feststellen, warum der Quelle Eisspeicher gegenüber der Quelle Solaranlage der Vorrang eingeräumt wurde. Hinsichtlich Arbeitszahl wäre der Wärmepumpenbetrieb mit der Solaranlage als Quelle (Modus 2) jedenfalls effizienter. Außerdem ist der Betrieb der Wärmepumpen 3 (Quelle Brunnen) interessant. Diese Wärmepumpe ist einmal um 6 Uhr morgens und einmal gegen 16.00 Uhr in Betrieb (gelb strichliert), ohne dass das System jemals in den Betriebsmodus 7.1 wechselt. Trotz eigenem Betriebsmodus für Wärmepumpe 3, scheint diese – wie bereits weiter oben erwähnt – weitgehend unabhängig vom Restsystem zu agieren.

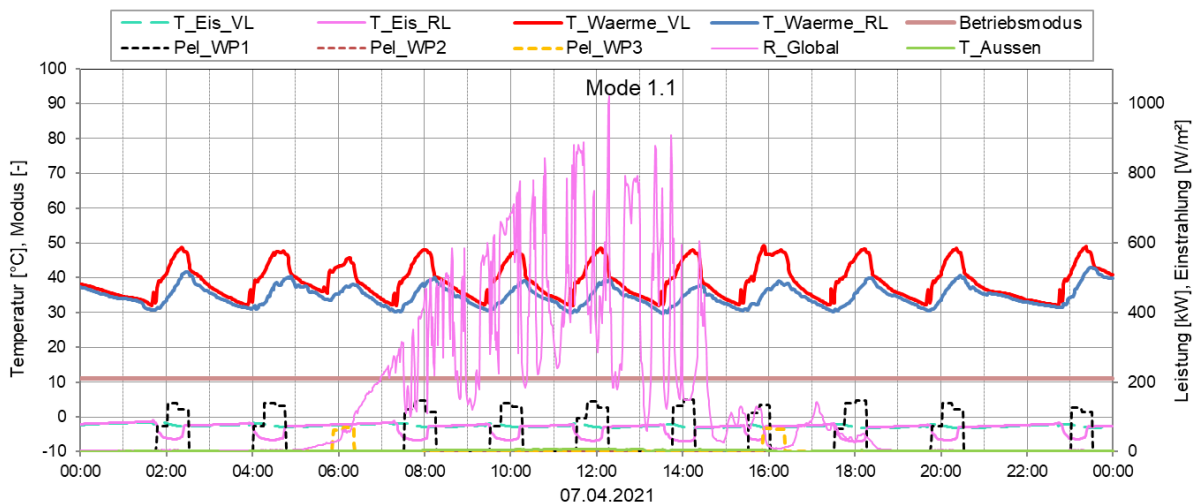


Abbildung 21: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen im Kreis der Wärmepumpen 1 und 2 sowie im Eisspeicher zuzüglich des Verlaufs der Globalstrahlung, der Außentemperatur und elektrischen Leistungsaufnahme aller Wärmepumpen für Modus 1.1 (7.4.2021)

Modus 2 – Heizen: Wärmepumpenbetrieb mit Solaranlage als Quelle

In Abbildung 22 sind die Temperaturen im Kreis der Wärmepumpen 1 und 2 sowie im solaren Primärkreis zuzüglich des Verlaufs der Globalstrahlung, der Außentemperatur und die elektrischen Leistungsaufnahmen aller Wärmepumpen dargestellt. Es handelt sich um einen leicht wechselhaften Tag mit einer maximalen Einstrahlung von rund 430 W/m² Einstrahlung. Die Kollektortemperatur erreicht einen Tageshöchstwert von max. 14,5 °C. In etwa alle 2 Stunden ist Wärmepumpe 2 in Betrieb (an diesem Tag ruht Wärmepumpe 1). Dies ist einerseits an der elektrischen Energieaufnahme und andererseits am Einbrechen der solaren Rücklauftemperatur erkennbar. Der Betrieb ist sehr stabil. Auch an diesem Tag ist der unabhängige Betrieb von Wärmepumpe 3 erkennbar, welcher in den Betrieb von Wärmepumpe 2 eingeflochten ist. Auf der Wärmeabgabeseite (T_Waerme_VL/RL) ist kein Unterschied zwischen den Wärmeerzeugern feststellbar. Des Weiteren ist an diesem Tag eine weitere Besonderheit des Systems zu erkennen: Die Solaranlage als Quelle für die Wärmepumpe ist auch in der Nacht – also in Zeiten ohne nennenswerte Einstrahlung – aktiv und arbeitet dann als Luft-Wasser-Wärmetauscher.

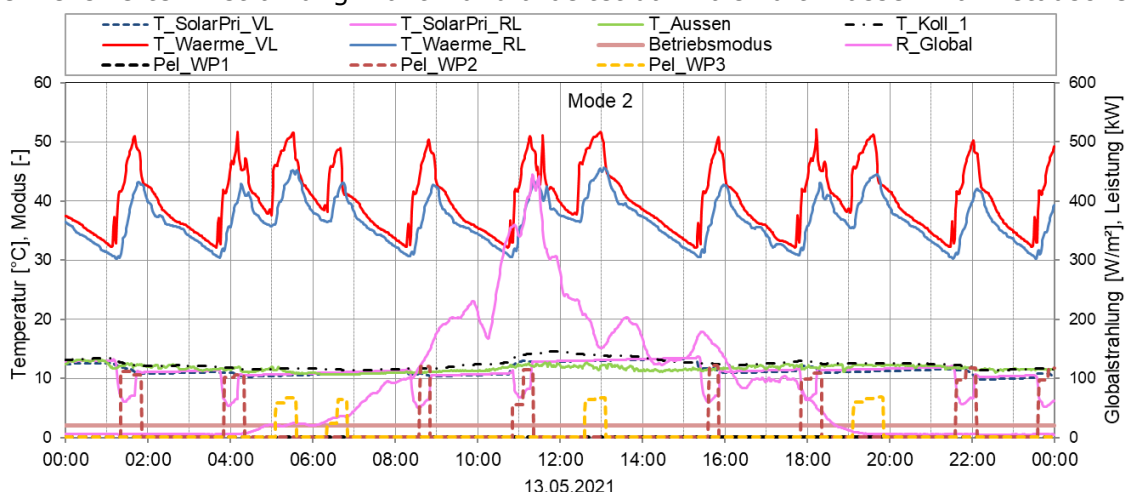


Abbildung 22: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen im Kreis der Wärmepumpen 1 und 2 sowie im solaren Primärkreis zuzüglich des Verlaufs der Globalstrahlung, der Außentemperatur und elektrischen Leistungsaufnahme aller Wärmepumpen für Modus 2 (13.5.2021)

Modus 7.1 – Heizen: Wärmepumpenbetrieb mit Brunnen als Quelle

In Abbildung 23 sind die Temperaturen rund um Wärmepumpe 3, der Betriebsmodus, eine Ventilstellung und die elektrischen Leistungsaufnahmen aller Wärmepumpen dargestellt. Zunächst lässt sich exemplarisch dargestellt an diesem Tag feststellen, dass im Betriebsmodus 7.1 die Wärmepumpen 1 und 2 nicht in Betrieb sind. Der gegenständliche Betriebsmodus ist praktisch den ganzen Tag über aktiv und die Wasser-Wasser-Wärmepumpe schickt Wärme auf einem relativ konstanten Vorlauftemperaturniveau von rund 38 °C ins System. Dementsprechend ebenso relativ konstant sind die Temperaturen auf der Quellseite. Der Brunnen stellt rund 18 °C ($T_{\text{Brunnen_pri_VL}}$, pink) zur Verfügung, über den Wärmetauscher auf der Quellseite gehen rund 5 K verloren, sodass die Verdampferseite der Wärmepumpe ($T_{\text{Brunnen_sek_VL}}$, orange strichliert) mit rund 13 °C beaufschlagt wird. Die Dimensionierung des Wärmetauschers ist also grundsätzlich gut gewählt. Auffallend ist jedoch die Stellung des Umschaltventils, welches die Quellseite der Wärmepumpe vom Restsystem trennen kann. Zur Erläuterung sind für den Zeitpunkt 13:13 Uhr am gleichen Tag alle Temperaturen auf der Quellseite der Wärmepumpe 3 in Abbildung 24 direkt in einen Ausschnitt des Hydraulikschemas eingezeichnet. Das Ventil VEN_Brunnen steht mit Ausnahme von 1,5 Stunden in der gesamten Monitoringperiode immer auf 100 %. Das bedeutet, dass Wärmepumpe 3 *immer* gleichzeitig heizt und kühlt (auch in Laufzeiten außerhalb von Modus 7.1) und nie ausschließlich den Brunnen als Quelle nutzt. Es ist schwierig, die Auswirkungen des fehlerhaft geschalteten Ventils auf die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe zu bewerten. Dieser Zustand wurde an den Anlagenbetreiber gemeldet.

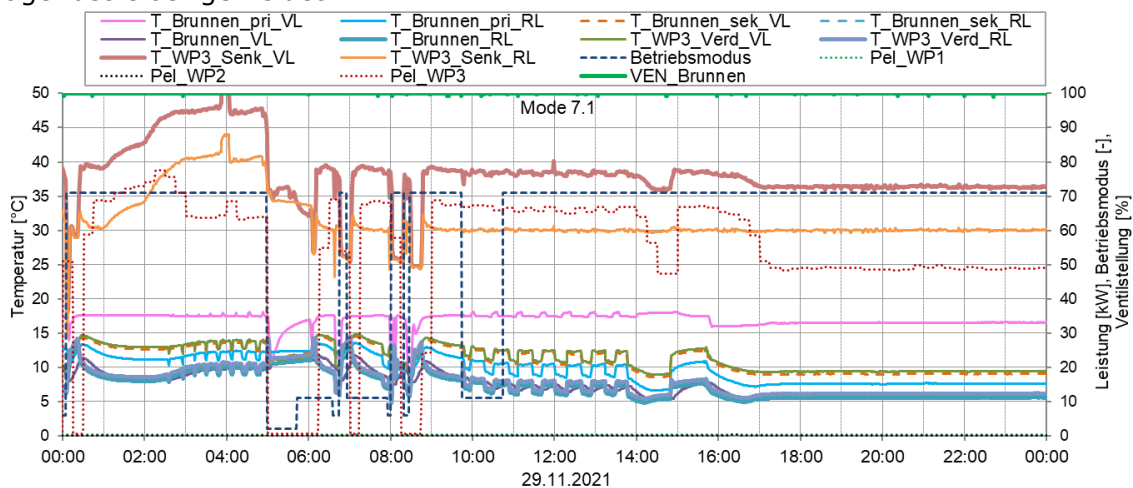


Abbildung 23: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen im Kreis der Wärmepumpe 3 sowie im Primärkreis des Brunnen zuzüglich der elektrischen Leistungsaufnahme aller Wärmepumpen für Modus 7.1 (29.11.2021)

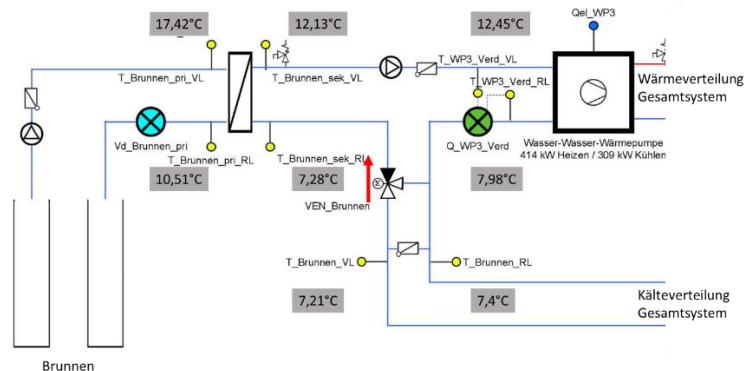


Abbildung 24: Exemplarische Temperaturen bei Betrieb der Wärmepumpe 3 auf der Quellseite (29.11.2021 13:13 Uhr)

Modus 4 – Kühlen: Freie Kühlung aus dem Eisspeicher

In Abbildung 25 sind die Temperaturen am Wärmetauscher beim Eisspeicher sowie im Kühlkreis zuzüglich der relevanten Durchflüsse und der Betriebsmodus dargestellt. Zur Verdeutlichung der Messpunkte ist ein Ausschnitt des Hydraulikschemas in Abbildung 26 dargestellt. Auffallend in diesem Modus ist zunächst, dass der Durchfluss zwischen dem externen Eisspeicher-Wärmetauscher und dem Kältetauscher (rot) sowie nach dem Kältetauscher (gelb) sehr konstant sind. Die Temperaturen im Kühlkreis ($T_{\text{Kaelte_VL}}$ – hellblau, $T_{\text{Kaelte_RL}}$ – orange) hingegen fluktuieren sehr stark. Diese Schwankungen werden durch den stark schwankenden Pumpenbetrieb zwischen dem Eisspeicher und dem externen Wärmetauscher verursacht (violett). Aus den Messdaten heraus lässt sich dieser Betrieb nicht erklären. Das Pumpenverhalten wurde an den Anlagenbetreiber kommuniziert.

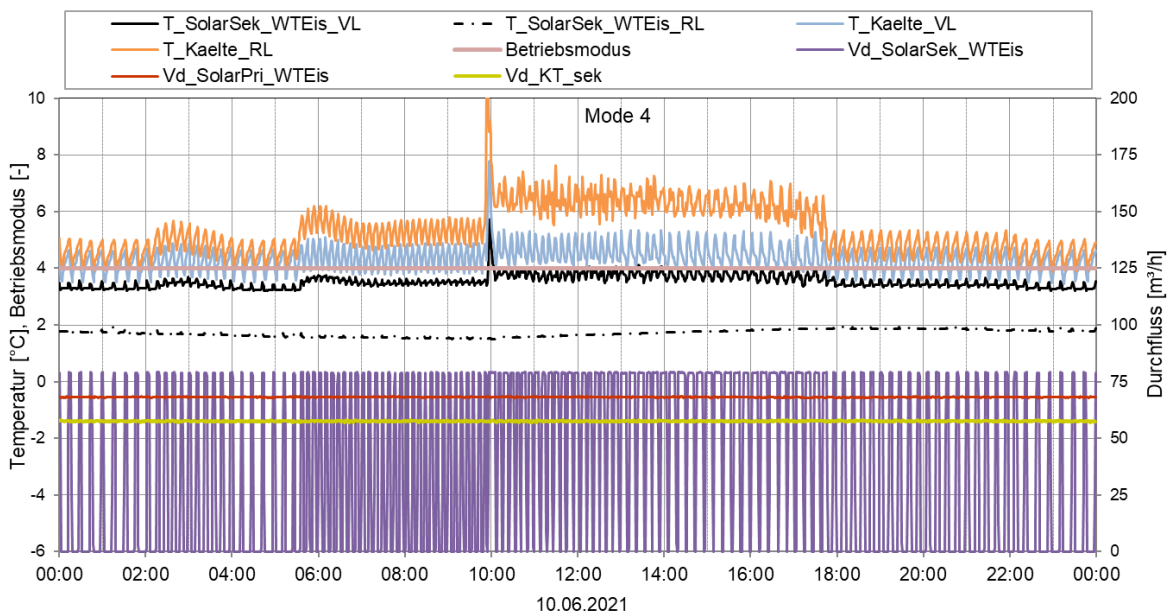


Abbildung 25: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen am Wärmetauscher beim Eisspeicher sowie im Kühlkreis zuzüglich der relevanten Durchflüsse und der Betriebsmodus für Modus 4 (10.06.2021)

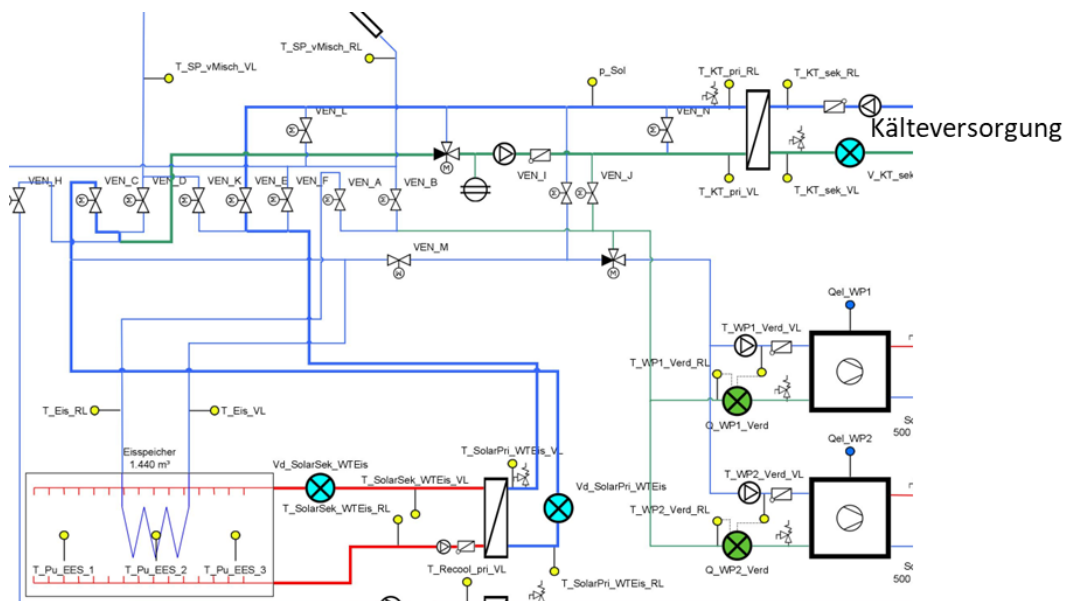


Abbildung 26: Ausschnitt aus dem Hydraulikschema. Die aktiven Leitungen in Modus 4 sind fett hervorgehoben.

Modus 6 – Kühlen: Aktive Kühlung durch Wärmepumpen 1 und 2, Abwärmesenke Kollektor

In Abbildung 27 sind die Temperaturen im Kollektor- sowie im Kühlkreis zuzüglich der relevanten Durchflüsse, der Betriebsmodus, die Außentemperatur und die Globalstrahlung dargestellt. Die Kühlung erfolgt an diesem Tag durchgängig in Modus 6 ausschließlich durch Wärmepumpe 1 (schwarz strichliert), Wärmepumpe 2 ist nicht in Betrieb. Auf der Kälteversorgungsseite sind Temperaturen zwischen 5 und ca. 12 °C festzustellen, wobei die Temperaturminima immer die Laufzeiten von Wärmepumpe 1 markieren. Die produzierte Wärme aus der Wärmepumpe wird über den Heizungspufferspeicher an die Solaranlage geschickt. Zwar produziert die Wärmepumpe rund 40 °C Vorlauftemperatur, die am Kollektor ankommende Temperatur entspricht jedoch der untersten Heizungspufferspeichertemperatur, welche bei rund 26 °C liegt. Die Außentemperatur (hellgrün) liegt bei aktiver Wärmepumpe im Mittel ca. 2,7 K unterhalb der solaren Rücklauftemperatur (=Abwärme Wärmepumpe). Die maximale Temperaturdifferenz liegt bei ca. 4,7 K. Die Kälteabnahme (Vd_KT_sek, hellrot) ist ziemlich konstant, die Laufzeiten der Wärmepumpe jedoch eher kurz und sporadisch. Für die Kälteversorgung ist trotzdem – vermutlich aufgrund der zwischengeschalteten Kälte-Pufferspeicher – immer eine ausreichend geringe Temperatur vorhanden. Die Wärmepumpeneffizienz könnte evtl. im Kühlbetrieb durch eine Vergrößerung des Kälte-Puffervolumens verbessert werden.

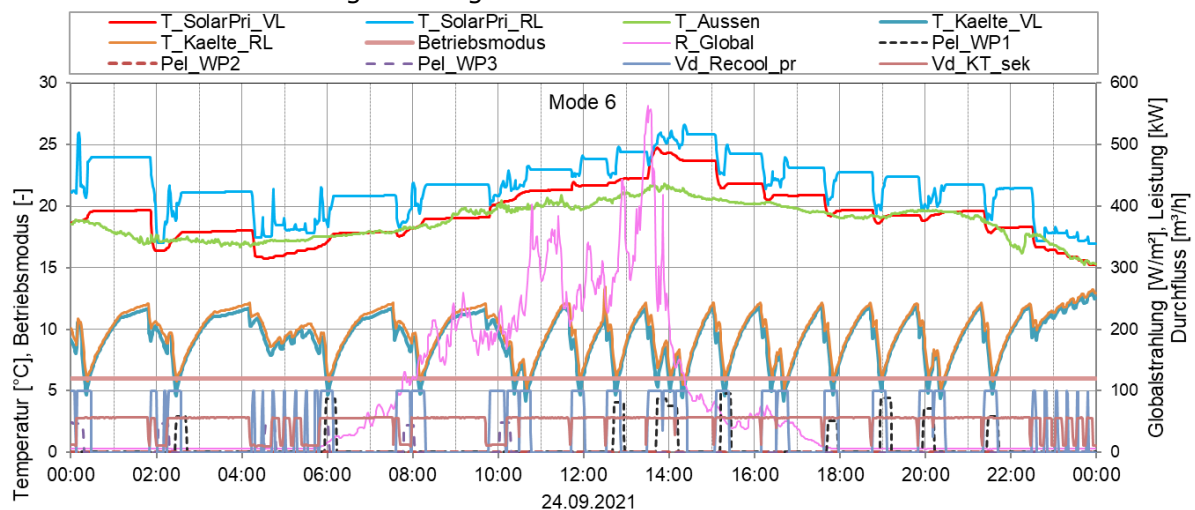


Abbildung 27: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen im Kollektor- sowie im Kühlkreis zuzüglich der relevanten Durchflüsse, der Betriebsmodus, die Außentemperatur und die Globalstrahlung für Modus 6 (24.09.2021)

In Abbildung 28 sind die Temperaturen und der Durchfluss im Kühlkreis 2 zuzüglich der Durchflüsse in den anderen Kühlkreisen dargestellt. Auffallend ist der im Vergleich zu den anderen 3 Kühlkreisen sehr hohe Durchfluss von rund 50 m³/h. Dies führt zu einer extrem kleinen Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur in Kühlkreis 2. Im Schnitt liegt die Temperaturdifferenz an diesem Tag bei ca. 0,23 K. Dies tritt ganzjährig mit Ausnahme der Monate Juli und August auf. Aber auch dort liegt die Temperaturdifferenz bei maximal 1,5 K bei praktisch gleichem Durchfluss. In diesem Kreis ist der Durchfluss zu überprüfen und gegebenenfalls nach unten zu korrigieren. Dieses Problem wurde dem Anlagenbetreiber kommuniziert.

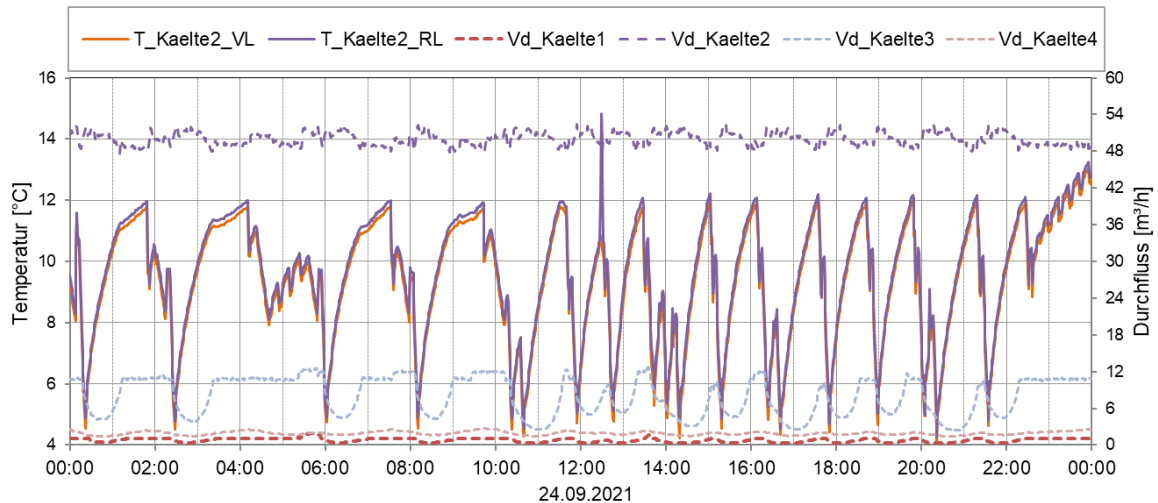


Abbildung 28: Beispielhafter Verlauf von Temperaturen und des Durchflusses im Kühlkreis 2 zuzüglich der Durchflüsse in den anderen Kühlkreisen (24.09.2021)

Modus 7.0 – Kühlen: Freie Kühlung aus dem Brunnen

In Abbildung 29 sind die Temperaturen rund um den Brunnenwärmetauscher und bei der Kälteversorgung zuzüglich der relevanten Durchflüsse und des Betriebsmodus für Modus 7.0 dargestellt. Der Durchfluss auf der Sekundärseite des Brunnens (Vd_WP3_Verd, grün) – dargestellt durch den Durchfluss auf der Quellseite der (inaktiven) Wärmepumpe 3 – ist wieder durch den hohen Durchfluss von Kältekreis 2 (Vd_Kaelte2, hellviolett strichliert) bestimmt und liegt durchgehend bei rund 53 m³/h. Der Brunnenwärmetauscher weist eine Temperaturdifferenz zwischen Primär- und Sekundärseite von ca. 1 K auf. Dieses Verhalten wurde dem Anlagenbetreiber gemeldet.

Es lässt sich anhand der Messdaten nicht beurteilen, ob bzw. wie weit eine Reduktion des Durchflusses in Kältekreis 2 eine Effizienzverbesserung der freien Brunnenkühlung mit sich bringen würde. Bei Umsetzung der angesprochenen Durchflussreduktion ist jedenfalls auch der Durchfluss auf der Primärseite des Brunnenwärmetauschers (Vd_Brunnen_pri, dunkelblau strichliert), welcher aktuell bei rund 35 m³/h liegt, zu evaluieren und ggf. ebenfalls zu korrigieren.

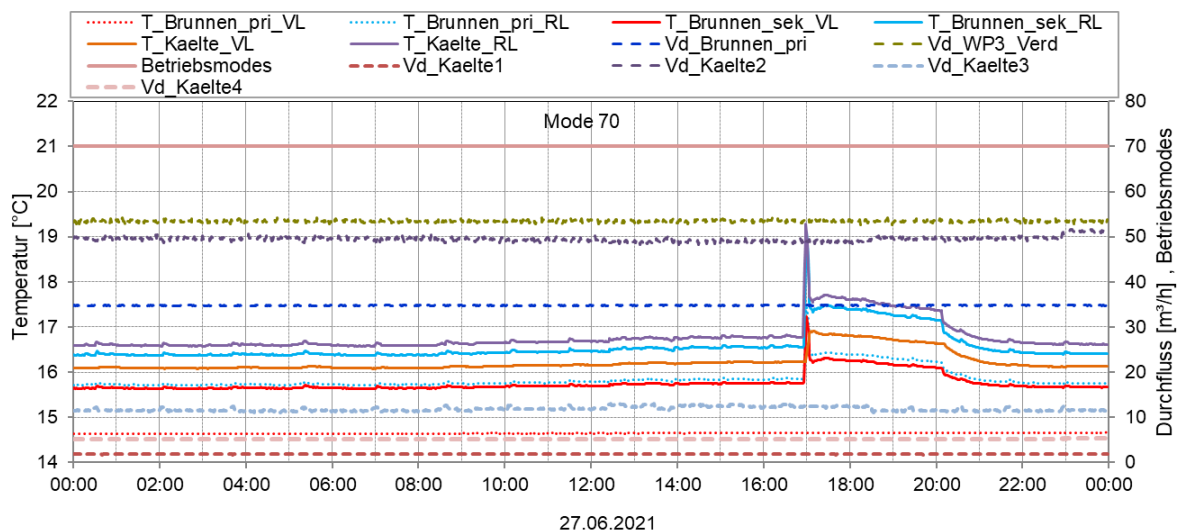


Abbildung 29: Beispielhafter Temperaturverlauf rund um den Brunnenwärmetauscher und der Kälteversorgung zuzüglich der relevanten Durchflüsse und des Betriebsmodus für Modus 7.0 (27.06.2021)

Für die Darstellung der Arbeitszahlen aller Wärmepumpen wurde jeweils nach Maschine und Quellenergie unterschieden. Die Arbeitszahlen der Sole-Wasser-Wärmepumpen (Quelle: Solar), die Wärmemengen und Stromverbräuche als auch die durchschnittlichen Quell- und Abgabtemperaturen der Wärmepumpen sind in Abbildung 30 dargestellt; Wärmepumpe 1 oben, Wärmepumpe 2 unten. Der Quotient aus Stromverbrauch (Input, dunkelrot) und Wärmeabgabe (Output, grau) ergibt die Monats- bzw. Jahresarbeitszahlen, welche im gesamten Monitoringzeitraum bei rund 4 lagen. Über den ganzen Betrachtungszeitraum hinweg betragen die Arbeitszahlen im Mittel 3,89 (WP1) und 4,02 (WP2). Dies kann als durchaus gutes Ergebnis gewertet werden.

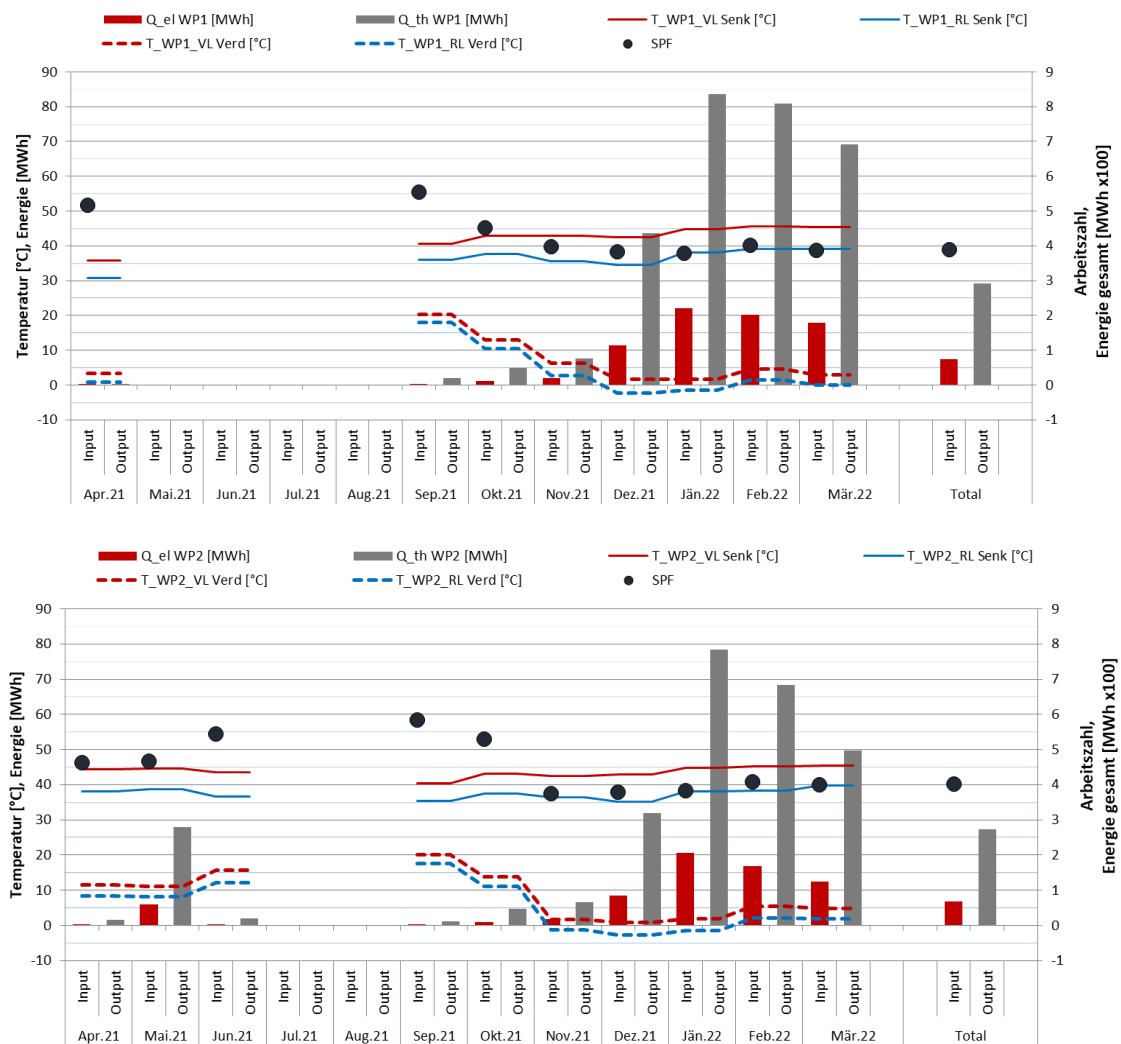


Abbildung 30: Detailanalyse der Sole-Wasser-Wärmepumpe 1 (oben) und der Sole-Wasser-Wärmepumpe 2 (unten) jeweils mit der Solaranlage als Wärmequelle hinsichtlich Temperaturniveaus der Quell- und Senkenseite sowie Berechnung der Arbeitszahl

Die Arbeitszahlen der Sole-Wasser-Wärmepumpen (Quelle: Eisspeicher), die Wärmemengen und Stromverbräuche als auch die durchschnittlichen Quell- und Abgabtemperaturen der Wärmepumpen sind in Abbildung 31 dargestellt; Wärmepumpe 1 oben, Wärmepumpe 2 unten. Der Quotient aus Stromverbrauch (Input, dunkelrot) und Wärmeabgabe (Output, grau) ergibt die Monats- bzw. Jahresarbeitszahlen, welche im gesamten Monitoringzeitraum zwischen ca. 3,5 und 4 lagen. Über den ganzen Betrachtungszeitraum hinweg betragen die Arbeitszahlen im Mittel 3,56 (WP1) und 3,63 (WP2). Dies kann als akzeptables Ergebnis gewertet werden. Der Unterschied in den Arbeitszahlen im Vergleich zur Quelle Solaranlage ist auf die niedrigeren Quelltemperaturen (Verdampfer) zurückzuführen. Der Vergleich der strichlierten Linien in

den beiden Modi zeigt, dass die Quelltemperaturen aus dem Eisspeicher um bis zu 15 K unter jenen aus der Solaranlage liegen.

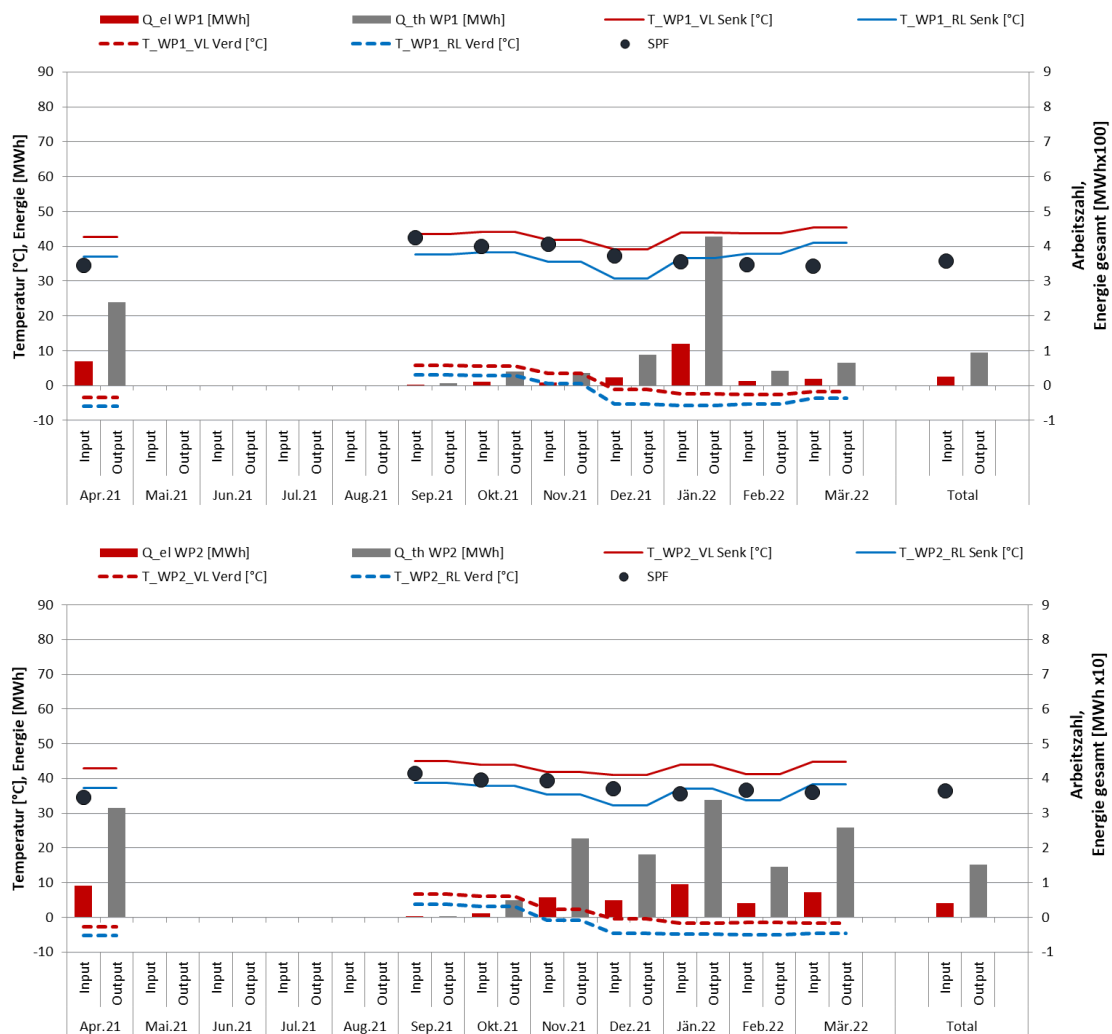


Abbildung 31: Detailanalyse der Sole-Wasser-Wärmepumpe 1 (oben) und der Sole-Wasser-Wärmepumpe 2 (unten) jeweils mit dem Eisspeicher als Wärmequelle hinsichtlich Temperaturniveaus der Quell- und Senkenseite sowie Berechnung der Arbeitszahl

Die Arbeitszahlen der Sole-Wasser-Wärmepumpen mit den Räumen als Wärmequelle (=aktives Kühlen), die Wärmemengen und Stromverbräuche als auch die durchschnittlichen Quell- und Abgabtemperatures der Wärmepumpen sind in Abbildung 32 dargestellt; Wärmepumpe 1 oben, Wärmepumpe 2 unten. Der Quotient aus Stromverbrauch (Input, dunkelrot) und Wärmeabgabe (Output, grau) ergibt die Monats- bzw. Jahresarbeitszahlen. Dieser Modus trat ausschließlich in den Monaten September und Oktober, in geringen Teilen im November auf. In diesem Zeitraum lagen die Arbeitszahlen zwischen rund 3 und ca. 3,7. Über den ganzen Betrachtungszeitraum hinweg betragen die Arbeitszahlen im Mittel 3,46 (WP1) und 3,79 (WP2). Im Hinblick auf die Quelltemperaturen zwischen 9 und 11 °C kann das als eher bescheidenes Ergebnis gewertet werden. Grund dafür sind vermutlich die eher geringen Laufzeiten sowie die Interaktion mit der unabhängig betriebenen Wasser-Wasser-Wärmepumpe 3, welche durch die oben beschriebene hydraulische Fehlschaltung nicht nur die Quelltemperaturen für die Wärmepumpen 1 und 2 im aktiven Kühlmodus wesentlich reduzierte, sondern auch den Löwenanteil der Kühlung – teilweise ungewollt – übernahm.

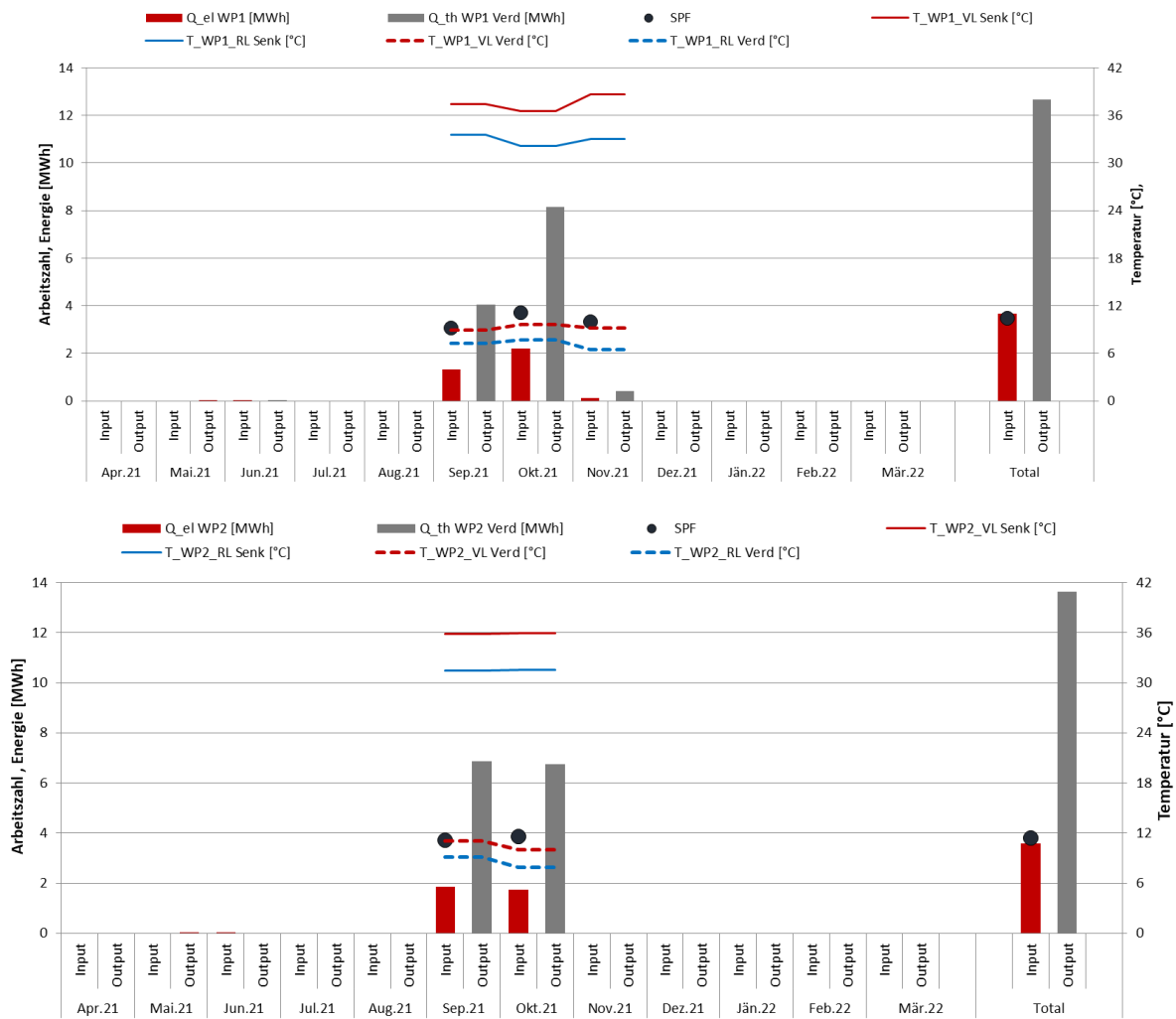


Abbildung 32: Detailanalyse der Sole-Wasser-Wärmepumpe 1 (oben) und der Sole-Wasser-Wärmepumpe 2 (unten) jeweils mit der Raumwärme als Wärmequelle (=aktives Kühlen) hinsichtlich Temperaturniveaus der Quell- und Senkenseite sowie Berechnung der Arbeitszahl

Die Arbeitszahlen der Wasser-Wasser-Wärmepumpe, die Wärmemengen und Stromverbräuche als auch die durchschnittlichen Quell- und Abgabtemperatures der Wärmepumpe sind in Abbildung 33 dargestellt. Der Quotient aus Stromverbrauch (Input, dunkelrot) und Wärmeabgabe (Output, grau) ergibt die Monats- bzw. Jahresarbeitszahlen, welche im gesamten Monitoringzeitraum zwischen ca. 3,6 und 5 lagen. Über den ganzen Betrachtungszeitraum hinweg betrug die Arbeitszahl im Mittel 4,31. Dies kann als gutes Ergebnis gewertet werden und ist wesentlich auf die relativ stabilen Quelltemperaturen $>10\text{ °C}$ zurückzuführen.

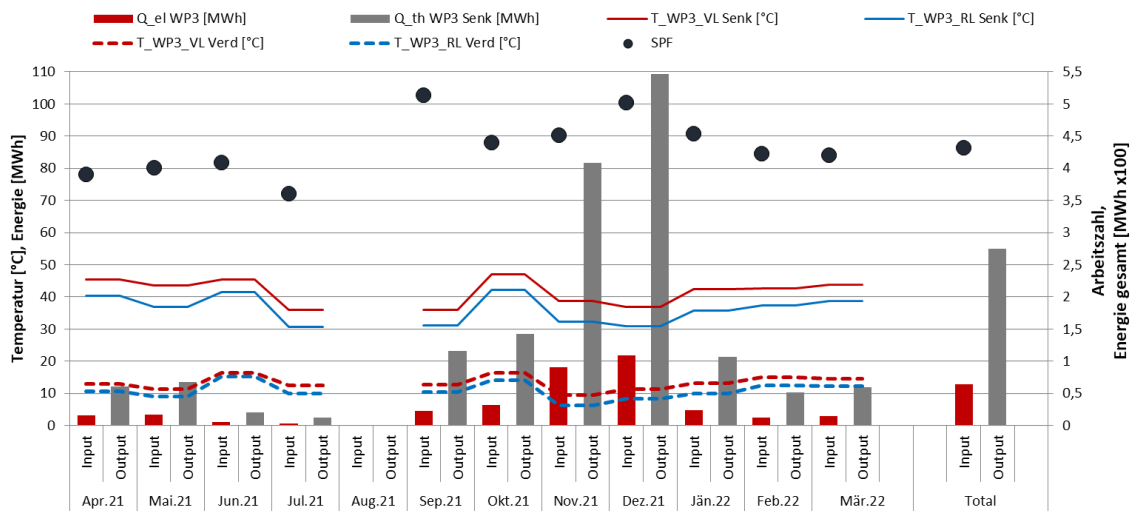


Abbildung 33: Detailanalyse der Wasser-Wasser-Wärmepumpe hinsichtlich Temperaturniveaus der Quell- und Senkenseite sowie Berechnung der Arbeitszahl

Als weiterführende Analyse ist in Abbildung 34 eine Darstellung der einzelnen Wärmemengen zum Temperaturniveau (Vorlauf- als auch Rücklauf temperaturniveau – jeweils in Rot- bzw. Blautönen) der beiden Sole-Wasser-Wärmepumpen angeführt. In der Betrachtungsperiode brachten die beiden Wärmepumpen 1 und 2 ungefähr gleich viel Energie auf weitgehend gleichem Temperaturniveau ins System ein. Im gewichteten Mittelwert lagen die Quelltemperaturen bei ca. 2 °C.

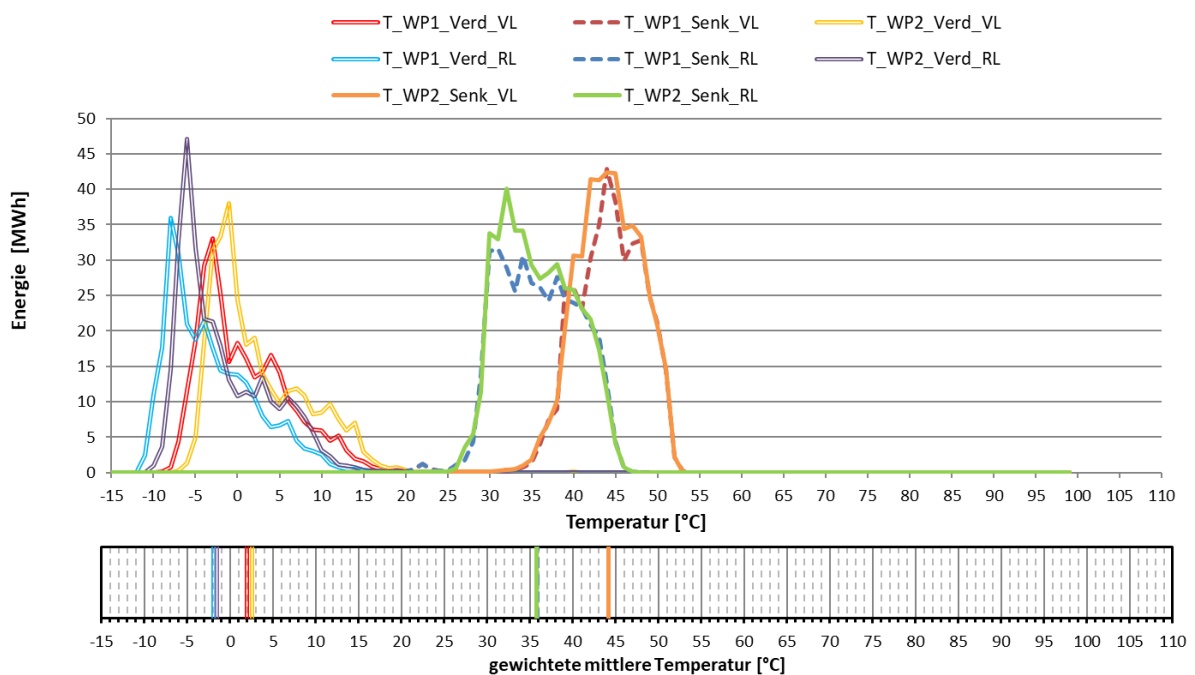


Abbildung 34: Darstellung der Wärmemengen zum Temperaturniveau (oben) sowie gewichtetes mittleres Temperaturniveau (unten) für die Sole-Wasser-Wärmepumpen in der Monitoringperiode

In Abbildung 35 ist eine Darstellung der einzelnen Wärmemengen zum Temperaturniveau (Vorlauf- als auch Rücklauf temperaturniveau – jeweils in Rot- bzw. Blautönen) der beiden Sole-Wasser-Wärmepumpen (WP1 und WP2) und zusätzlich der Wasser-Wasser-Wärmepumpen (WP3) angeführt. Die Zieltemperaturen von WP3 sind im Heizbetrieb durchaus vergleichbar, die Quelltemperaturen jedoch mit ca. 13 °C im gewichteten Mittelwert deutlich höher. Auch gut erkennbar ist der energetische Anteil an der Gesamtwärmeproduktion von rund 30 % (vgl. Abbildung 12).

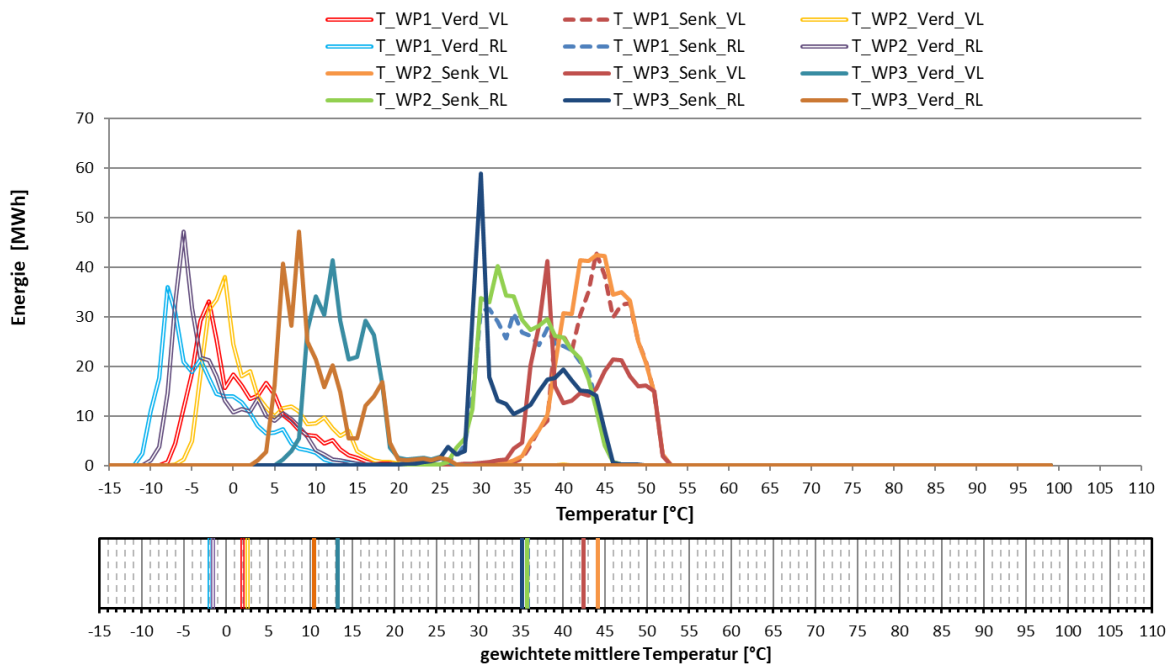


Abbildung 35: Darstellung der Wärmemengen zum Temperaturniveau (oben) sowie gewichtetes mittleres Temperaturniveau (unten) für die Sole-Wasser-Wärmepumpen (WP1 und WP2) und die Wasser-Wasser-Wärmepumpe (WP3) in der Monitoringperiode

6. Anlagen Status Quo

Der Betrieb der Anlage „IKEA Logistikzentrum“ kann als stabil beschrieben werden. Im Vergleich zu den prognostizierten Werten liegen sowohl Verbrauch mit -72 %, als auch Ertrag mit -70% wesentlich hinter den Prognosen zurück, wobei bei der Globalstrahlung ein Plus von 12 % gemessen wurde. Klar ist, dass der deutlich geringere Verbrauch, die Ergebnisse für den solaren Ertrag bedingt. Die Ursache für die Abweichung konnte weder aus den Messdaten, noch aus Gesprächen mit dem Anlagenbetreiber geklärt werden.

Der solare Deckungsgrad lässt sich für das gegenständliche System mit den klassischen Definitionen nicht bestimmen, weil die Solarenergie ausschließlich auf der Quellseite der Sole-Wasser-Wärmepumpe ins System eingebunden ist. Betrachtet man jedoch die Quellennutzung der Sole-Wasser-Wärmepumpen so stellt die Solaranlage 69 % der notwendigen Quellenergie. Ein weiterer Anwendungsbereich der Solaranlage ist die Rückkühlung von Abwärme aus aktiver Kühlung: 37 % der Abwärme wird über die Solaranlage, 40 % in den Brunnen und 23 % für die Regeneration des Eisspeichers genutzt. Die Arbeitszahlen der Wärmepumpen unterscheiden sich deutlich in Abhängigkeit der Wärmequelle. So haben die Sole-Wasser-Wärmepumpen bei Quelle Solar eine Jahresarbeitszahl von ca. 4, bei Quelle Eisspeicher liegt die Jahresarbeitszahl bei ca. 3,6. In den verhältnismäßig wenigen Betriebsstunden der aktiven Kühlung durch die Sole-Wasser-Wärmepumpen liegt die Jahresarbeitszahl bei ca. 3,5. Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Quelle: Brunnen) erreichte eine Jahresarbeitszahl von ca. 4,3.

Im Betrachtungszeitraum konnten folgende Optimierungspotentiale festgestellt werden:

- Das Umschaltventil, welches beim Heizbetrieb der Wasser-Wasser-Wärmepumpe das Restsystem vom Brunnen entkoppeln soll, ist immer offen. Sprich, wenn WP3 im Heizmodus ist, wird immer gleichzeitig gekühlt und die Quelltemperaturen für die Wärmepumpe sind eine Mischung aus Kältekreisen und dem Brunnen.
- Die Pumpe im hydraulischen Kreis zwischen dem Eisspeicher und dem externen Wärmetauscher am Eisspeicher (Regenerationswärmetauscher) weist einen extrem schwankenden Betrieb auf. Aus den Messdaten heraus ist dieser Betrieb nicht erklärbar. Er führt jedoch zu stark schwankenden Temperaturen in den anderen Kreisen.

- Im Vergleich zu den anderen Kühlkreisen ($<15 \text{ m}^3/\text{h}$) wird Kühlkreis 2 mit einem sehr hohen Durchfluss von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ betrieben. Dies führt zu mittleren Temperaturdifferenzen zwischen Vorlauf und Rücklauf von ca. $0,23 \text{ K}$. Dies tritt ganzjährig mit Ausnahme der Monate Juli und August auf, aber auch dort liegt die mittlere Temperaturdifferenz bei nur ca. $1,5 \text{ K}$ bei praktisch gleichem Durchfluss. Eine Optimierung bzw. Reduktion des Durchflusses könnte zu wesentlichen Einsparungen hinsichtlich Pumpenstrom führen.
- Eventuell durch die hohen Durchflüsse in Kühlkreis 2 bedingt, lassen sich auf der Primärseite des Brunnens ebenfalls sehr hohe Durchflüsse in der Größenordnung von $35 \text{ m}^3/\text{h}$ feststellen. In Folge einer Reduktion des Durchflusses in Kühlkreis 2, sollte auch hier der Durchfluss neu evaluiert werden.
- Der Betrieb der Wasser-Wasser-Wärmepumpe (WP3) ist weitgehend unabhängig von den in Kapitel 2 beschriebenen Betriebsmodi. Eine klare Regelungsstrategie bzw. Laufzeitenpriorität ist aus den Messdaten nicht erkennbar.

Zusammenfassend sei noch erwähnt, dass das Hydraulikkonzept der Anlage „Logistikzentrum IKEA“ einen hohen Komplexitätsgrad aufweist. Daher ist eine genaue und regelmäßige Analyse des Anlagenbetriebs einerseits sehr aufwendig, aber andererseits dringend zu empfehlen, um einen möglichst effizienten Betrieb langfristig sicherzustellen.

Nach Beendigung der einjährigen Monitoringphase seitens AEE INTEC wären eine weiterführende Anlagenüberwachung sowie eine kontinuierliche Überprüfung der WMZ-Zählerstände durch den Betreiber sinnvoll und zu empfehlen. Ein fortlaufendes Mindestmonitoring würde zur Sicherstellung eines stabilen Betriebs bzw. zur schnellstmöglichen Erkennung von Anlageproblemen beitragen.