

Abschlussbericht

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Mehraufwand für innovative Ansätze zum Klima- und ressourcenschonendem Bauen bei der Umweltstation der Stadt Würzburg (KlimResBau) – Nachbewilligung

gefördert unter dem AZ: 33520/03-34/2 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller

Stadt Würzburg, „DIE STADTREINIGER“
Äußere Aumühlstraße 5
97076 Würzburg
Wolfgang Kleiner, Jürgen Schmitt



Kooperationspartner

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.
(ZAE Bayern)
Magdalene-Schoch-Str. 3
97074 Würzburg
Ronny Kastner, Dr. Werner Körner, Sven Hippeli
Stephan Weismann, Dr. Hans-Peter Ebert



Datum: 17.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1	Beschreibung des Bauvorhabens	4
2	Eisspeichersystem	9
2.1	Allgemeines	9
2.2	Systembeschreibung	9
2.3	Inbetriebnahme	12
2.4	Eisspeicherbehälter und Steuerung	12
2.5	Betriebszustände	16
3	Installation und Durchführung des Eisspeicher-Monitoring	17
3.1	Grundlagen des Monitorings	17
4	Durchführung des Monitorings	21
4.1	Winterperiode	21
4.1.1	Winter 2020/2021	21
4.1.2	Winter 2021/2022	26
4.1.3	Kontrollierter Eis Aufbau und Regeneration	27
4.1.4	Heizen im Sommer	28
4.2	Kühlung	32
4.2.1	Sommer 2020	32
4.2.2	Sommer 2021	35
5	LCA Monitoring	37
6	Monitoring PV Anlage	38
7	Öffentlichkeitsarbeit	38
7.1	Präsentation Webseite und Umweltstation	39
7.2	Preise, Anerkennungen und Veröffentlichungen	42
8	Zusammenfassung	44

1 Beschreibung des Bauvorhabens

Der Freistaat Bayern unterhält insgesamt 55 Umweltstationen. Die Umweltstationen dienen als Umweltbildungseinrichtungen für interessierte Bürger aller Altersgruppen. Am Standort in Würzburg wurde die Umweltstation anlässlich der Landesgartenschau 1990 errichtet. Folgende Angebote stehen zur Verfügung (Auswahl)¹.

- Abfall-, Umwelt- und Energieberatung,
- Umweltbildung für Kinder, Jugendliche und Erwachsene,
- Vorträge und Führungen und
- Öffentlichkeitsarbeit in den Bereichen Abfallwirtschaft, Umwelt- und Naturschutz.

Nach rund 30 Betriebsjahren hat sich der Eigenbetrieb der Stadt Würzburg „Die Stadtreiniger“ aus u.a. Kapazitätsgründen für einen Neubau in unmittelbarer Nähe des alten Gebäudes entschlossen. Das alte Gebäude der Umweltstation wurde nach Bezug des Neubaus rückgebaut. Bereits in der Planung wurde festgelegt, das Gebäude unter Nachhaltigkeitsprämissen zu bauen und zu bewirtschaften. Das klima- und ressourcenschonende Leuchtturmprojekt zeichnet sich aus durch:

- den Einsatz von Recycling-Beton mit einem ökologischen Zement (CEM III),
- eine verbesserte Dämmung der Gebäudehülle,
- dem konsequenten Einsatz von PV zur Realisierung eines bilanziellen Nullenergiehaus-Konzepts sowie
- dem Einsatz eines Eisspeichers für Heiz- und Kühlzwecke.

Damit erhält dieses Projekt Modellcharakter. Abbildung 1 bis Abbildung 4 zeigen das fertiggestellte Gebäude. Der Neubau der Umweltstation in Würzburg wird als zweigeschossiger Massivbau in Ort betonbauweise mit elliptischem Grundriss ausgeführt.

¹ vgl. https://www.umweltbildung.bayern.de/akteure/qualitaetsiegeltraeger/ust_stadt_wuerzburg/index.htm?include_matomo=true (Stand 04.2022)



Abbildung 1: Außenansicht in den Eingangsbereich der Umweltstation der Stadt Würzburg.
Umweltstation © Michael Lauricella



Abbildung 2: Ansicht der Umweltstation von außen. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau



Abbildung 3: Innenansicht der Umweltstation mit Begrünung und Baum. © ZAE Bayern



Abbildung 4: Dachansicht der Umweltstation mit der zentralen Dachbelichtungsverglasung, Solarabsorber für das Eisspeichersystem und PV-Anlage. Umweltstation © Michael Lauricella

Die wichtigsten Eckdaten des Projektes sind der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Eckdaten zum Neubau der Umweltstation.

Bauherr	Stadt Würzburg Die Stadtreiniger
Bauzeit (Rohbau)	11/2016 – 09/2017
Fertigstellung	3/2019
Bauweise	zweigeschossiger Massivbau in Ortbetonbauweise
Fördermittelgeber	Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)
Beteiligte Forschungseinrichtungen	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) Magdalene-Schoch-Straße 3 97074 Würzburg BTU Cottbus – Senftenberg Arbeitsgebiet Bauliches Recycling Siemens-Halske-Ring 8 03046 Cottbus
Baurechtliche Einordnung	<ul style="list-style-type: none"> - gem. Art. 2 Abs. 3 der BayBO als Gebäude der Gebäude- klasse 3 klassifiziert - Gebäudehöhe + 3,84 m (OKF Obergeschoss) - Attikahöhe + 8,05 m - Gesamthöhe + 9,12 m (OK Dachoberlicht)
Nutzung	Einzel- und Doppelbüros sowie Seminarräume für den Verwal- tungs- und Lehrbereich
Gründung	Tiefengründung mit Stahlbetonbohrpfählen Ø 35 cm aus Normal- beton
Ausführung Bauteile mit RC-Beton	Bodenplatte EG und alle aufgehenden Wände und Decke und Dach aus RC-Beton
Heizungssystem	Wärmepumpe mit Eisspeicher und Solarabsorber

2 Eisspeichersystem

2.1 Allgemeines

Für die Planung des Eisspeichersystems und die Ausschreibung war die Ingenieurgesellschaft Hofer & Hölzl GmbH aus Fürstenfeldbruck verantwortlich. Diese fungieren als Unterauftragnehmer der Gesamtverantwortlichen balda architekten gmbh in Fürstenfeldbruck.

Die Firma Viessmann als Lieferant des Eisspeichersystems hatte im Vorfeld dazu Simulationen durchgeführt. Der Bauherr ist somit davon ausgegangen, dass die Kühlung der Umweltstation im Sommer für Raumtemperaturspitzen zumindest unter 26 °C immer ausreichend ist.

Das ZAE Bayern war verantwortlich für das Monitoring des Eisspeichersystems. Aus Gewährleistungsgründen konnten vorgeschlagene Änderungen der Einstellungen am Eisspeichersystem nur durch den Bauherrn an die Fachfirmen beauftragt werden. Das ZAE Bayern wurde bei der Auswahl des Steuerungssystems nicht involviert, war jedoch, wie im Projektantrag formuliert, von einem Einbau einer MSR Steuerung ausgegangen. Die ausgeschriebene Lösung eines kleineren Systems hatte im weiteren Projektverlauf einen deutlichen zeitlichen Mehraufwand für die Datenerhebung und der Betrachtung des Gebäudegesamtsystems im Monitoring zur Folge.

2.2 Systembeschreibung

Die Heiz-/Kühlkomponente besteht aus der Sole/Wasser-Wärmepumpe, wobei die Sole das Wasser aus dem unterirdisch verbauten Eisspeicher darstellt. Das Wasser bzw. Eis des Eisspeichers dient je nach Betriebstemperatur zum Heizen und in begrenztem Umfang zum Kühlen der Büro- und Seminarräume und des Erdgeschossfoyers. Weiterhin können die Solar-Luftabsorber auf dem Flachdach zur Wärmeerzeugung und zur Regeneration des Eisspeichers eingesetzt werden (s. Abbildung 6). Als Heiz- und Kühlfläche wurde eine Fußbodenheizung /-kühlung mit auf die Rohrschlangen aufgesetzte Aluminiumlamellen verbaut. In die Fußbodenheizung eingebaute Bleche dienen der Heizflächenvergrößerung und der gleichmäßigeren Wärmeverteilung. Hierdurch werden niedrigere Systemtemperaturen für die Heizung bzw. höheren Systemtemperaturen bei der Kühlung im Vergleich mit herkömmlicher Flächenheizung benötigt. Weiterhin kann mit der Lüftungsanlage begrenzt gekühlt werden. Dies ist jedoch nur im Zulufttemperaturbereich oberhalb des Taupunkts möglich.

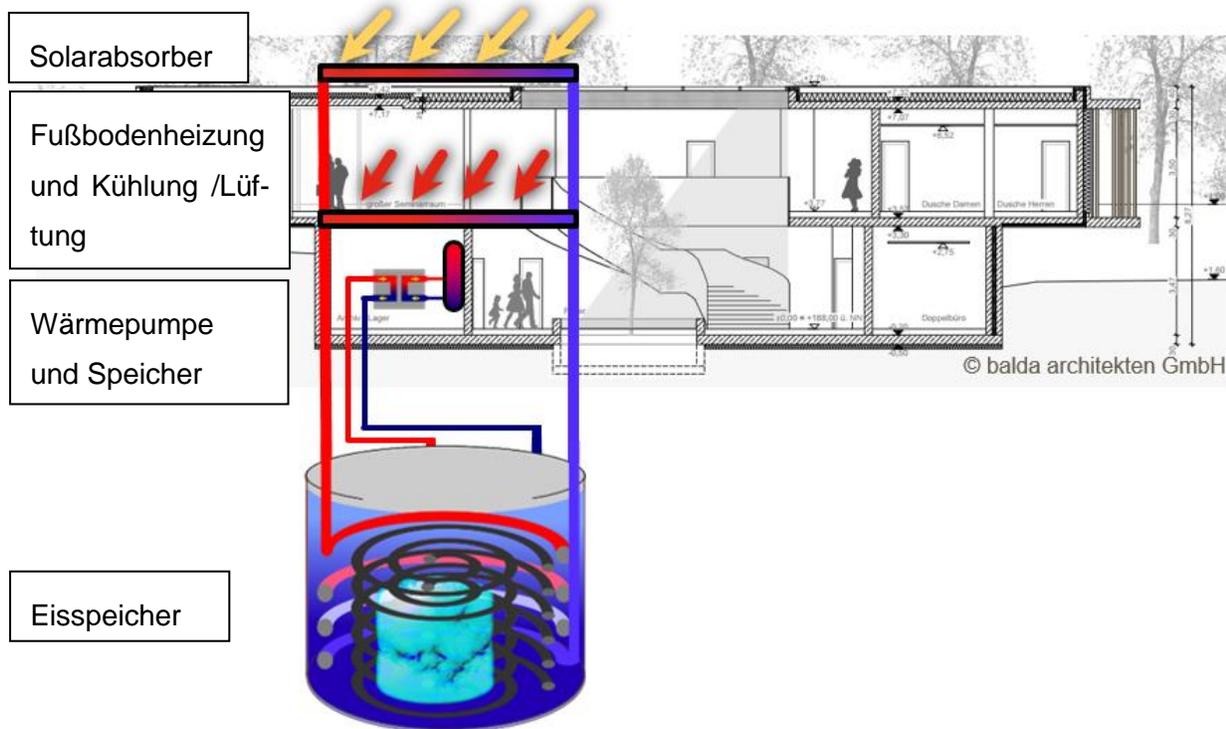


Abbildung 5: Vereinfachte Systemdarstellung des Eisspeichersystems in der Umweltstation.

Abbildung 5 zeigt die vereinfachte Darstellung Heiz-/Kühlsystems mit den jeweiligen Hauptkomponenten. Die Abbildung 6 zeigt die Darstellung in einem technischen Schaltplan des Eisspeichersystems.

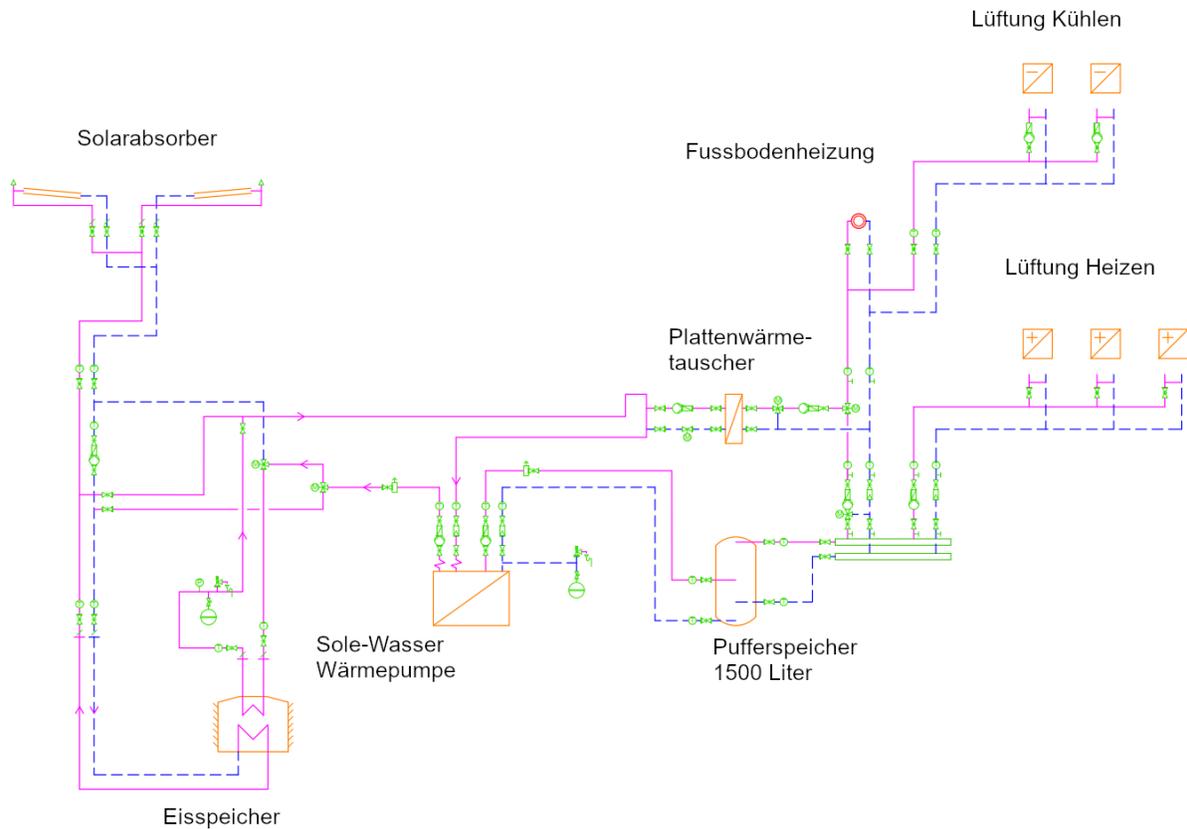


Abbildung 6: Systemschaltplan der Wärme- und Kälteversorgungssysteme der Eisspeicherheizung.

Das Eisspeichersystem (siehe Abbildung 6) besitzt zwei große Vorteile gegenüber einer Luftwärmepumpe. Durch den Solarabsorber und den Eisspeichertank kann im Winter eine sehr hohe Leistungszahl (coefficient of power, COP) erreicht werden. Der große Vorteil, neben den höheren Wärmepumpenvorlauftemperaturen durch den Solarabsorber bei Sonneneinstrahlung, ist der Eisspeicher mit niedrigen Temperaturen unter ca. 0 °C. In diesem Schaltzustand wird die Energie des Phasenübergangs von Wasser zu Eis genutzt. Dieser Phasenübergang enthält etwa die gleiche Menge Energie, die nötig wäre, die gleiche Menge Wasser von 0 °C auf 80 °C zu erwärmen. Im Idealfall sollte zum Ende der Heizperiode das Wasser im Eisspeicher zu einem möglichst hohen Anteil in Eis umgewandelt werden.

Der zweite große Vorteil ist der Kühlenergieinhalt des vorhandenen Eises im Sommer. Diese kann im Fall der Umweltstation nur über einen Plattenwärmetauscher unter Einsatz von zusätzlicher Energie für Pumpen genutzt werden. Durch den umgekehrten Phasenübergang Eis zu Wasser kann eine deutlich höhere Kühlenergie als nur durch die Verwendung von kaltem Wasser bereitgestellt werden. Das Eis wäre somit eine fast kostenlose und ökologisch hervorragende Möglichkeit des Gebäudes im Sommer zu temperieren.

2.3 Inbetriebnahme

Beim Bauablauf kam es zu erheblichen Verzögerungen in der Bauausführung. Ursprünglich war die Eröffnung der Umweltstation im Frühjahr 2018 geplant; zeitgleich mit dem Beginn der Landesgartenschau in Würzburg. Eine wesentliche Ursache für die Verzögerung waren das Insolvenzverfahren der beteiligten Lüftungsfirma und die dadurch notwendige Neuausschreibung. Ein weiterer Verzögerungspunkt war die Nichteinhaltung der vorgegebenen Planmasse für die Aussparung des Oberlichts über dem Treppenhaus der Umweltstation. Dieses Oberlicht wurde zu groß betoniert und konnte nachträglich nicht mehr korrigiert werden. Dies führte wiederum zu Änderungen der statischen Ansprüche an die Oberlichtkonstruktion. Durch das deutlich größere Oberlicht war auch mit einer größeren Kühllast im Sommer zu rechnen.

Wegen der Verzögerungen im Bauablauf und der Inbetriebnahme der Eisspeicherheizung konnte der Regelbetrieb der Gebäudetechnik erst Anfang Dezember 2019 sichergestellt werden.

2.4 Eisspeicherbehälter und Steuerung

Der Eisspeicher (s. Abbildung 7) ist mit einem Volumen von 107 m³ vor der Umweltstation vollständig ca. 50 cm unter dem Erdboden des Parkplatzes installiert. Der Zugang für Wartungszwecke ist über einen Einstiegsdom möglich.



Abbildung 7: Eisspeichertank mit 132,5 m³ Gesamttinnenvolumen und 107 m³ Wasserfüllung.

Grundsätzlich gilt für den Eisaufbau immer, dass dieser aufgrund der geometrischen Anordnung und Beschickung der Wärmetauscherrohre im Eisspeicher vom der Mitte nach außen und oben/ unten stattfindet. Der Regenerationsprozess in den Wintermonaten oder der Kühlenergieentzug in den Sommermonaten taut das Eis aufgrund der außenliegenden Wärmetauscherrohre zur Regeneration von außen nach innen zum Kern hin ab (s. Abbildung 8).

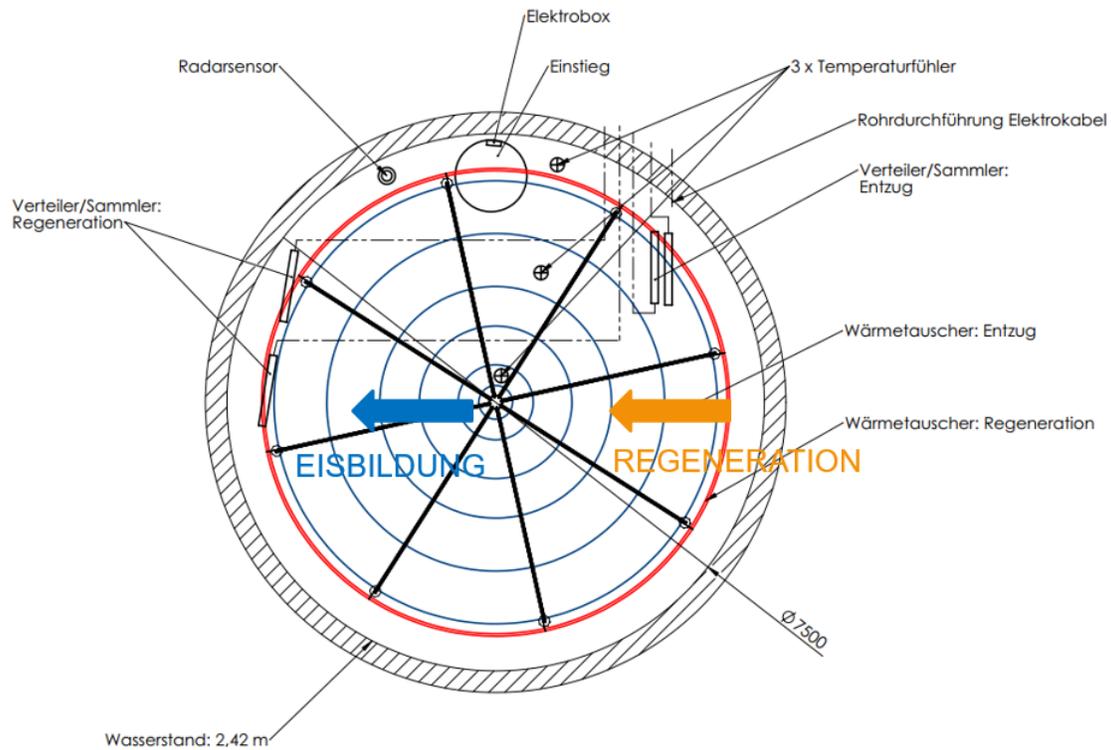


Abbildung 8: Ursprüngliche Planung des Eisspeichers mit 3 Temperatursensoren und Radarsensor zur Füllstandsmessung.

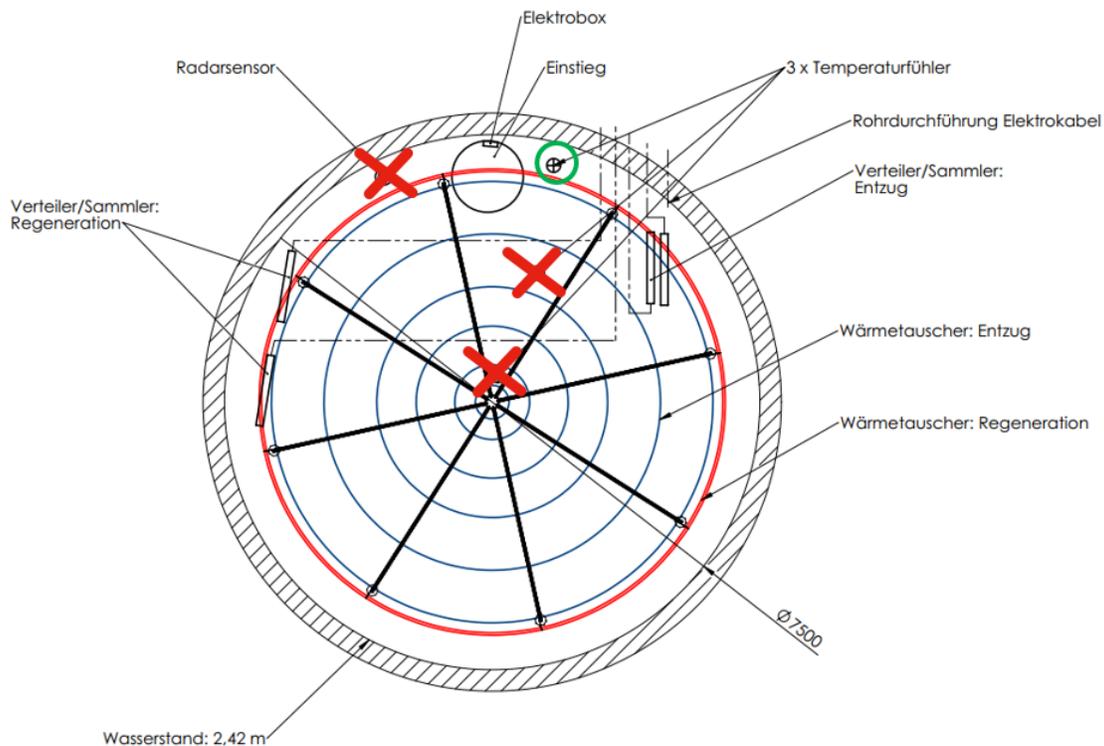


Abbildung 9: Ausgeschriebenes System mit einem Temperatursensor (grün) und ohne Radarsensor.

Durch eine notwendige Kostenreduzierung wurde im weiteren Bauablauf (nach Rücksprache mit Planern und Lieferant des Eisspeichersystems) nur noch ein kleines Steuerungssystem Vitosolic 200 (s. Abbildung 11 auf Seite 17) anstatt der Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR) eingesetzt. Der Bauherr ging dabei jedoch, nachdem keinerlei Einwände seitens Planern und Lieferant geäußert wurden, von der gleichen Grundfunktionalität (hohe Jahresarbeitszahl (JAZ) im Heizbetrieb und ausreichend Kühlenergie im Sommer) wie bei einer großen Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik aus.

Durch das kleine Steuerungssystem wurde die Ausstattung im Eisspeichertank von Abbildung 8 auf Abbildung 9 um zwei Temperatursensoren reduziert und der Radarsensor ist entfallen.

Eine Abstimmung mit dem ZAE Bayern dazu erfolgte vor der Ausschreibung nicht. Auf Nachfrage bei der Fa. Viessmann wurde ein Radarsensor und zwei zusätzliche PT1000 für das Monitoring kostenfrei zur Verfügung gestellt. Zudem wurde von der Fa. Viessmann nochmals bestätigt, dass die kleine Steuerung den Eisspeichertank zuverlässig steuern kann.

Der zusätzliche PT1000 Temperatursensor in Tankmitte und ein PT1000 Temperatursensor zwischen den beiden anderen Temperatursensoren wurden unabhängig vom Hersteller des Eisspeichers vom ZAE Bayern ausgelesen. Hierzu wurde ein DL3 Datenlogger der Firma RESOL

GmbH verwendet. Ein Anschließen der beiden zusätzlichen Temperatursensoren an die Steuereinheit war nicht möglich. Der Radarsensor konnte zudem bis zum Zeitpunkt dieses Berichts aus technischen Gründen nicht in einen funktionsfähigen Zustand versetzt werden.



Abbildung 10: Rohrschlangen Eisspeichertank mit 132,5 m³ Gesamttinnenvolumen und 107 m³ Wasserfüllvolumen im leeren Zustand.

Abbildung 10 zeigt einen Teilausschnitt des Eisspeichertanks mit seinen PE Rohrwindungen als Wärmetauscher. Der Großteil der PE-Schläuche im Kernbereich (Bereich grüner Pfeil) ist für die Entnahme der Wärmeenergie im Winterfall und damit für die Vereisung von innen nach außen verantwortlich. Über die außenliegenden PE-Schläuche (blauer Pfeil) wird die Regeneration im Winter durchgeführt. Zudem erfolgt über diese Schläuche auch die Entnahme der Kühlenergie im Sommer. Der rote Pfeil zeigt die Position der Tauchhülse mit dem Steuertemperatursensor am Eisspeichertankrand.

2.5 Betriebszustände

Das Eisspeichersystem verfügt über 5 Betriebszustände.

- Heizbetrieb über den Solarabsorber
Bei Rücklauftemperaturen des Solarabsorbers auf dem Dach der Umweltstation von über -4 °C und unter 19 °C wird der Solarabsorber für die Wärmepumpe verwendet. Steigt die Rücklauftemperatur am Solarabsorber über 19 °C wird der Eisspeicher aus technischen Gründen als Wärmequelle für die Wärmepumpe genutzt. Das verwendete Frostschutzmittel ist für Anwendungen mit höheren Primärkreistemperaturen nicht geeignet.
- Heizbetrieb über den Eisspeicher
Bei Temperaturen unterhalb der Schalttemperatur von -4 °C am Rücklauf des Solarabsorbers schaltet das System auf den Eisspeicher um. Dabei entzieht die Wärmepumpe dem Eisspeicher latente Wärme. Wird im Eisspeicher der Gefrierpunkt erreicht, wird die Enthalpie des Phasenübergangs von flüssig nach fest genutzt. Eine Änderung der Schalttemperatur des Solarabsorbers ist durch den Betreiber nicht möglich, sondern es muss direkt Vorort von der Fa. Viessmann auf die Software zugegriffen werden.
- Heizstabbetrieb der Wärmepumpe (Notfallbetrieb)
Ist die Rücklauftemperatur des Solarabsorbers unter -4 °C , der Eisspeicher bei längeren Kälteperioden vollständig vereist und fällt die Wärmepumpenvorlauftemperatur aus dem Eisspeicher auf unter -8 °C , kann nur noch der elektrische Heizstab in der Wärmepumpe verwendet werden. Dies entspricht einer Abschaltung des Systems. Die Bauteile des Eisspeichers bzw. der Wärmepumpe besitzen nur eine Zulassung für Temperaturen bis minimal -10 °C . Folglich wird dann über den Heizstab 1:1 elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Dieser Notbetrieb tritt nur im Extremfall auf, wenn mehrere Wochen dauerhafte Außentemperaturen im zweistelligen Minusbereich vorliegen würden.
- Kühlbetrieb über den Eisspeicher
Im Kühlbetrieb wird über einen Plattenwärmetauscher die Kühlenergie an die Niedertemperatursysteme wie Fußbodenkühlung oder an die Lüftungskühlung abgegeben.
- Regenerationsbetrieb des Eisspeichers
Mit dem Regenerationsbetrieb kann über die Solarabsorber dem Eisspeicher Wärme zugeführt werden um vorhandenes Eis aufzuschmelzen bzw. die Temperatur im Tank zu erhöhen. Hierbei muss die Kollektortemperatur über -9 °C , die Eisspeichertemperatur unter 14 °C und der Solarabsorber mind. 5 °C wärmer als der Eisspeicher sein.

3 Installation und Durchführung des Eisspeicher-Monitoring

3.1 Grundlagen des Monitorings

Die Abstimmung der benötigten technischen Monitoring-Komponenten und Schnittstellen für den Eisspeicher erfolgte mit der Fa. Viessmann, den Planern IB Hofer & Hölzl GmbH für Heizung, Lüftung und Klima und der elektrische Gebäudeausrüstung VS planen & beraten GbR.

Das Monitoring wurde von Anfang März 2020 bis Mitte März 2022 durchgeführt. Ursprünglich war geplant, die Daten über eine MSR (Mess-Steuer-Regel-Einheit) des Eisspeichersystems zu exportieren. Jedoch wurde diese zentrale Steuereinheit (MSR) im Projektverlauf aus Kostengründen nicht ausgeschrieben. Folglich war die Datenerfassung deutlich aufwendiger.

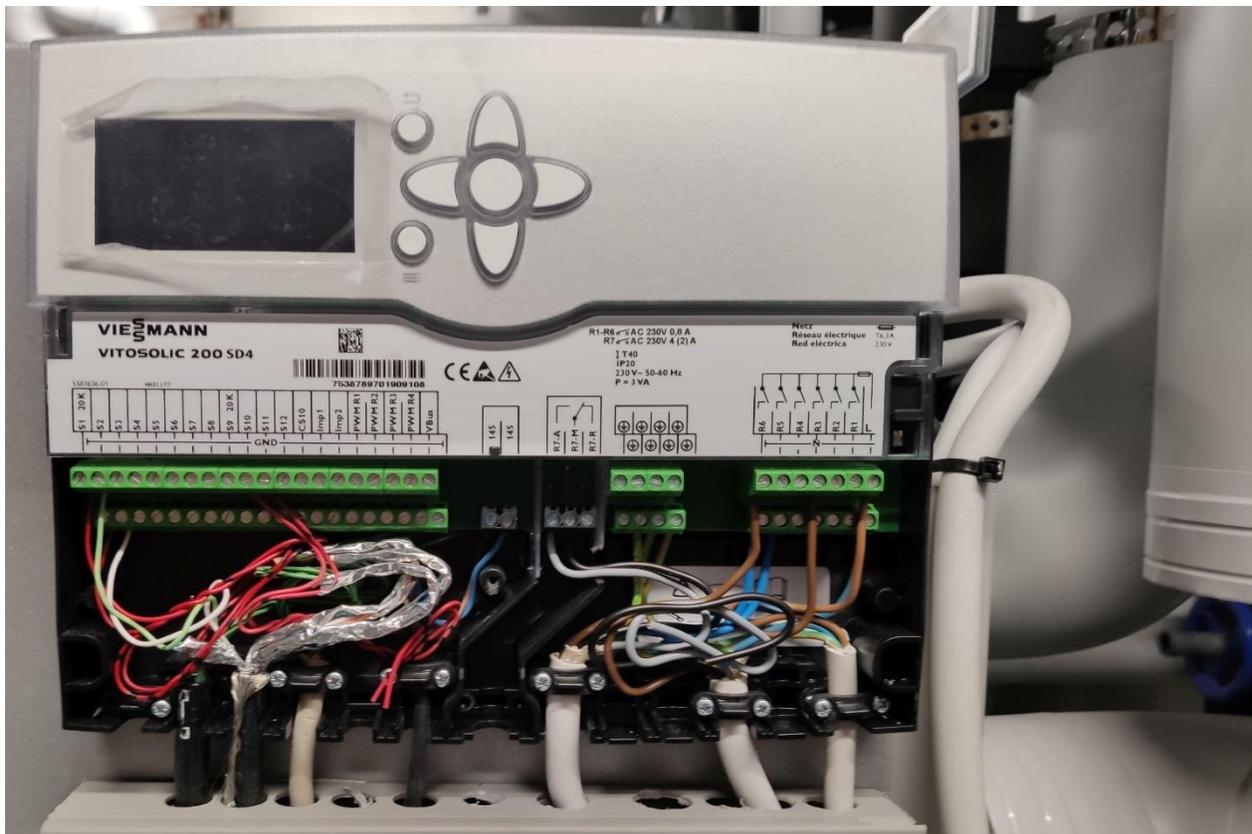


Abbildung 11: Vitosolic 200 für die Eisspeichersteuerung.

Die zur Ausführung gekommene Steuerung Vitosolic 200 der Firma Viessmann konnte nur über einen Datenlogger DL3 der Firma RESOL GmbH ausgelesen werden. Grundsätzlich wird für die Steuerung des Eisspeichers laut Fa. Viessmann nur ein Temperatursensor im Eisspeichertank benötigt. Zur genaueren Datenaufnahme und zur Absicherung ggü. möglicher Kalibrierfehler des werksseitigen Sensors hat das ZAE Bayern hier zwei zusätzliche Temperatursensoren eingesetzt. Ein Radarsensor sollte für das Monitoring die Füllstandshöhe erfassen und darüber den Eisanteil

im Tank bestimmen. Ebenso kann über die Steuerung die Solarabsorbertemperatur auf dem Dach ausgelesen werden.

Am Tag der Inbetriebnahme wurde von der Firma Viessmann in Zusammenarbeit mit der Fa. Bechert Haustechnik GmbH festgestellt, dass durch die Steuerungseinheit Vitosolic 200 nur ein Temperatursensor NTC 10 k Ω kompatibel ist. Anstelle alle drei PT 1000 Sensoren auszutauschen, wurde dies nur für den einen benötigten Steuersensor im Eisspeichertank durchgeführt. Die beiden PT1000 Temperatursensoren wurden mit dem Datenlogger DL3 der Firma RESOL GmbH über BACnet ausgelesen. Ebenso wurde im weiteren Projektverlauf festgestellt, dass trotz des vorhandenen Radarsensors im Tank, dieser nicht in das vorhandene Steuerungssystem eingebunden werden konnte.

Daten der Wärmepumpe wurden über ein KNX-Gateway Vitogate 200 ausgelesen. Jedoch war es nicht möglich die elektrischen Energiemengen über das KNX-Gateway der Wärmepumpe zu bestimmen. Diese Daten wurden von der Wärmepumpe nicht erfasst, wurden jedoch benötigt, um einen Wirkungsgrad der Gesamtanlage zu bestimmen. Deshalb wurden zwei zusätzliche Stromzähler (s. Abbildung 12) für die Wärmepumpe und die notwendigen Pumpen im Eisspeichersystem installiert und über M-Bus ausgelesen.

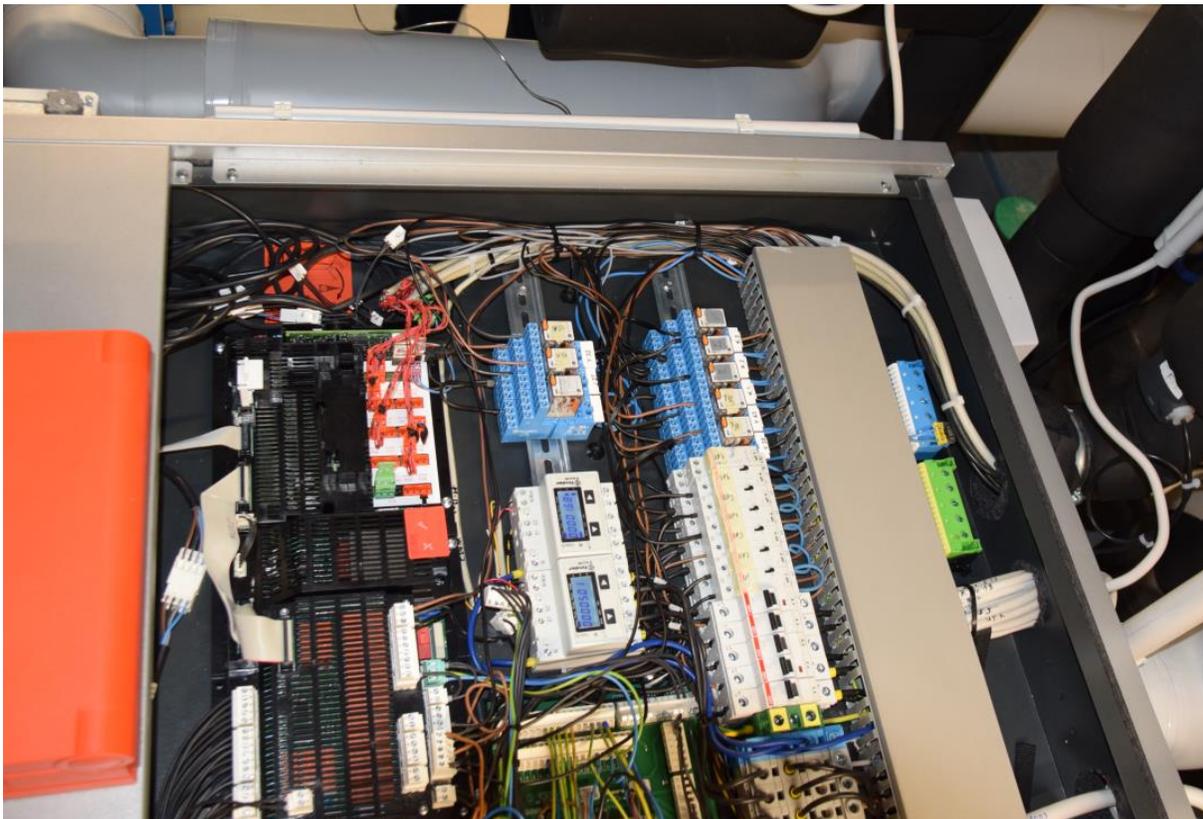


Abbildung 12: Verkabelung mit zwei zusätzlichen Elektrozählern (Hutschienenmodule mit Display) für die Wärmepumpe und die erforderlichen Pumpen im Eisspeichersystem.

Die benötigten Daten aus Ist- und Solltemperaturen der Räume und die Daten der Wetterstation wurden auch als KNX Datenpunkte aus der Gebäudeautomation bezogen.

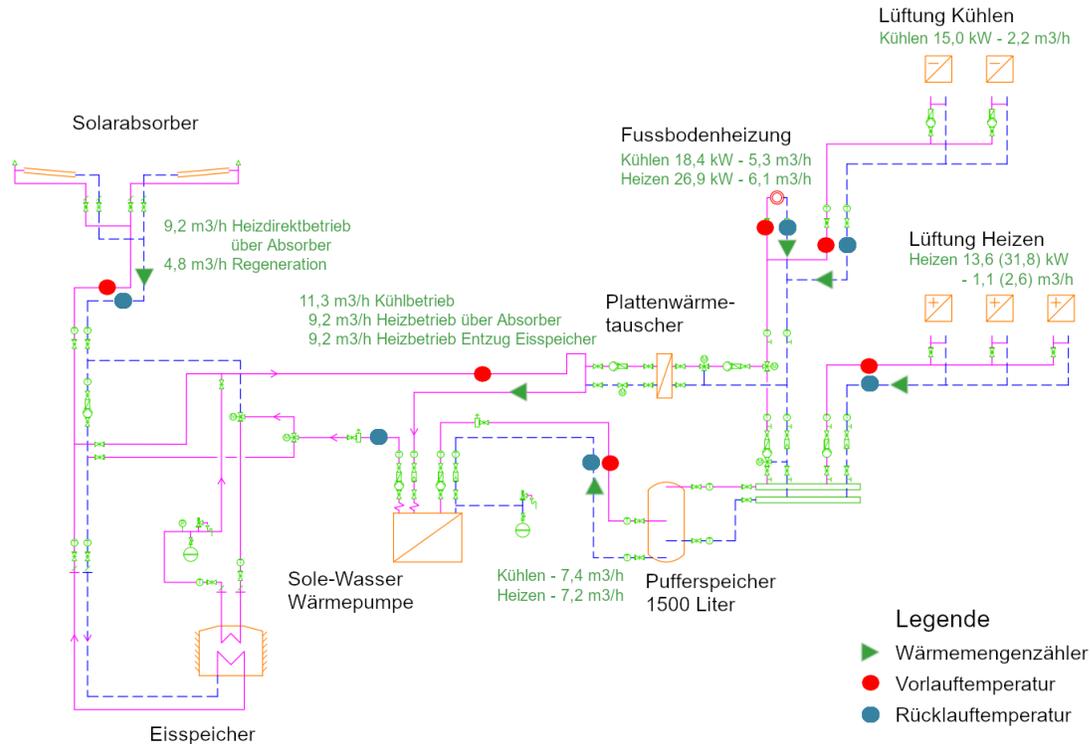


Abbildung 13: Monitoringübersicht des Wärme- und Kälteversorgungssystems der Eisspeicherheizung mit Positionierung der eingebauten Vor- und Rücklauftemperaturen und Wärmemengenzähler.

Die genaue Positionierung der Wärme-/Kältemengenzähler der Fa. Itron mit Vor- und Rücklauftemperatursensor wurde im Bauprozess vom ZAE Bayern ermittelt. Die ausführende Firma Bechert hat bei der Montage Passtücke der Wärmemengenzähler in die Leitungsführung einsetzt. Die Positionen werden in Abbildung 13 gezeigt. Ein Einbau der direkten Volumenflussmessung im Eisspeicher war durch den unterirdischen Einbau nicht möglich.



Abbildung 14: Wärmemengenzähler in der großen Ausführungsvariante (links) und der kleinen Ausführungsvariante (rechts).

Die Datenübertragung der Wärmemengenzähler mit den Temperatursensoren wurde mit M-Bus an einen Messrechner übertragen.

Die Messdatenübertragung aller Daten von der Umweltstation ans ZAE Bayern erfolgte aus Sicherheitsgründen des Städtetzes per GSM/LTE.

Trotz vieler Versuche den eingebauten Radarsensor auch ohne das System von Viessmann in Betrieb zu nehmen, ist dies den Fachfirmen bis zum Projektende nicht gelungen. Es konnte von den Fachfirmen trotz mehrfacher Aufforderung seitens des ZAE Bayern und dem Bauherrn nicht geklärt werden, warum im Technikraum kein Ausgangssignal vom Radarsensor ankommt. Dies könnte an einem Leitungsschaden, Anschlussproblem oder einem Defekt des Radarsensors liegen.

Für die BACnet Daten der PV-Anlage wurde keine kostengünstige Möglichkeit des Datenabrufes gefunden. Folglich wurden die Zählerstände am Anfang jeden Monats abgelesen, an das ZAE Bayern übertragen und als Monatswerte für das Life Cycle Assessment verwendet.

4 Durchführung des Monitorings

Aufgrund der nicht vorhandenen Wetter und KNX-Daten (Raumtemperaturen, Wärmepumpendaten usw.) konnte das Monitoring erst ab Anfang März 2020 mit vollständigen Daten durchgeführt werden. Trotz des Projektendes Dezember 2021 war vorrangiges Ziel die Erkenntnisse der Heizperiode 2021/2022 vollständig abzubilden. Folglich wurde das Monitoring bis zum 17.03.2022 durchgeführt und damit das Monitoring des Eisspeichersystems in zwei vollständigen Heizperioden und zwei Kühlperioden untersucht werden. Zusätzlich konnten noch einige Daten des Endes der Heizperiode 2020 ausgewertet werden.

4.1 Winterperiode

4.1.1 Winter 2020/2021

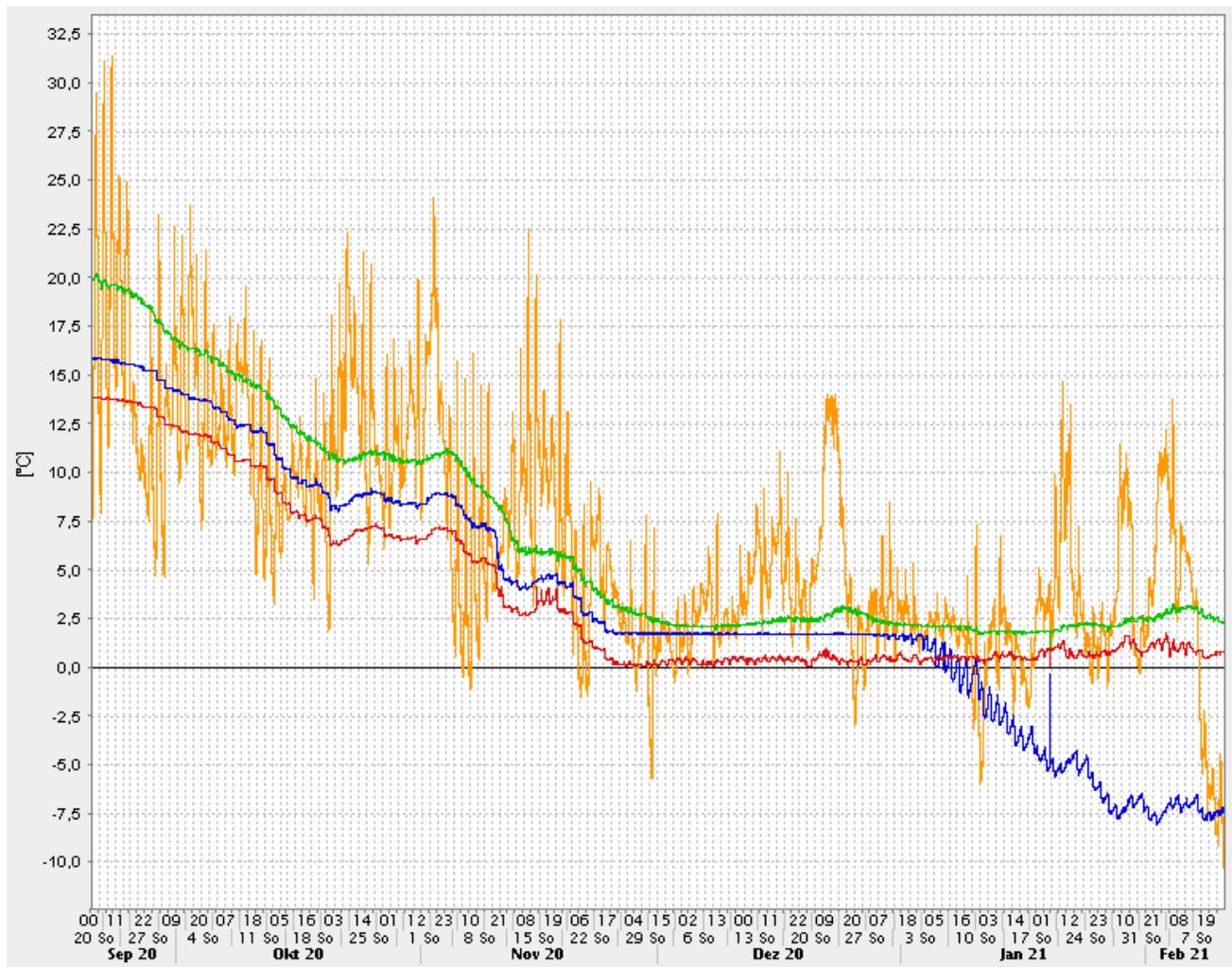


Abbildung 15: Datenauswertung der verschiedenen Temperatursensoren im Eisspeichertank; Eisspeicher Steuertemperatur nahe Tankwand (rot), Temperatur Tankmitte (blau), Temperatur zwischen beiden Sensoren (grün) und Außentemperatur (gelb) im Zeitraum vom 20.9.2020 – 10.02.2020.

Die deutlich unterschiedlichen Werte der drei Temperatursensoren im Eisspeichertank (s. Abbildung 15) über den Herbst das Jahr 2020 zeigten bereits, dass hier ein Offsetfehler der Temperatursensoren vorhanden war. Die zusätzlichen PT1000 Temperatursensoren wurden von der Fachfirma in 2 Pol-Technik und nicht in 4 Pol-Technik angeschlossen. Dies erklärt den Offset-Fehler von ca. 1,8 °C bzw. 2,1 °C, verursacht durch den elektrischen Widerstand der Temperaturfühleranschlüsse.

Anhand des Erreichens des Gefrierpunktes des Temperatursensors (PT1000) in Tankmitte (blau) konnte der Fehler der beiden PT1000 Sensoren (Blau und Grün) Anfang Dezember qualitativ bestimmt werden. Hier befand sich das Wasser im Phasenübergang zum Eis. Folglich konnte auch festgestellt werden, dass der NTC 10 k Ω Steuersensor in der Nähe des Tankrandes die richtige Temperatur von ca. 0 °C anzeigt. Durch die Positionierung befindet sich dieser Temperatursensor immer im Wasser und nicht im Eis. Folglich wird der Steuertemperatursensor NTC 10 k Ω keine geringeren Temperaturen als 0 °C anzeigen.



Abbildung 16: Visuelle Überprüfung des Eisspeichertanks.

Mitte Dezember 2020 wurde der Eisspeichertank visuell auf Eis überprüft, nachdem die aufgezeichneten Daten des Temperatursensor in Tankmitte (blauer Pfeil in Abbildung 15) die Anzeichen einer Eisbildung zeigten. In der Tankmitte wurde eine leichte Vereisung festgestellt (s. blauer

Pfeil). Jedoch waren die Wärmeentzugszeiten des Eisspeichers bei nur einer Stunde im Dezember gelegen. Folglich kann diese Vereisung nur durch hydraulische Probleme entstanden sein.

Die extrem abfallenden Temperaturen im Januar und Anfang Februar 2021 im Eisspeichertank führten Mitte Februar 2021 zum Totalausfall der Wärmepumpe. Die niedrigen Vorlauftemperaturen des Eisspeichers von unter $- 8,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ führten in den Tagen zuvor oftmals zum Abschalten der Wärmepumpe über den Eisspeichertank. Der Wiedereinschaltzeitpunkt der Wärmepumpe liegt danach bei einer Vorlauftemperatur von über $- 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ist der Betrieb über den Eisspeichertank durch Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe kleiner $- 8,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Kollektortemperatur kleiner $- 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ kann zwangsläufig nur noch direkt über den Elektroheizstab der Wärmepumpe geheizt werden. Dieser wurde jedoch bei der Inbetriebnahme in den Einstellungen der Wärmepumpe nicht aktiviert. Folglich wurde keine Heizenergie mehr erzeugt und die Umweltstation kühlte aus. Hierdurch ist vermutlich ein Kühlregister in einer der beiden Lüftungsanlagen aufgefroren. Dies verursachte einen Druckabfall im Gesamtsystem, was zu einem Totalausfall des Gesamtsystems führte.



Abbildung 17: Blick durch den Revisionsschacht auf den vollständig vereisten Eisspeichertank (blauer Pfeil) in der Umweltstation. Nur im Randbereich zwischen dem Regenerations-Wärmetauscher und dem Entzugs-Wärmetauscher zur Betonwand ist eine Wassersäule (roter Pfeil) vorhanden.

Bei der Überprüfung des Eisspeichertanks am 15.02.2021 und dem Vergleich mit den Monitoringdaten wurde festgestellt, dass nach einer Betriebszeit von nur ca. 15 Stunden der Eisspeichertank vollständig vereist war (s. Abbildung 17). Laut Leistungsverzeichnis ist das System auf 18 Tage a 12 Stunden ohne Regeneration ausgelegt. Die Vermutung des ZAE Bayern von ungewolltem Wärmeentzug aus dem Eisspeichertank beim Betrieb der Wärmepumpe wurden somit bestätigt.

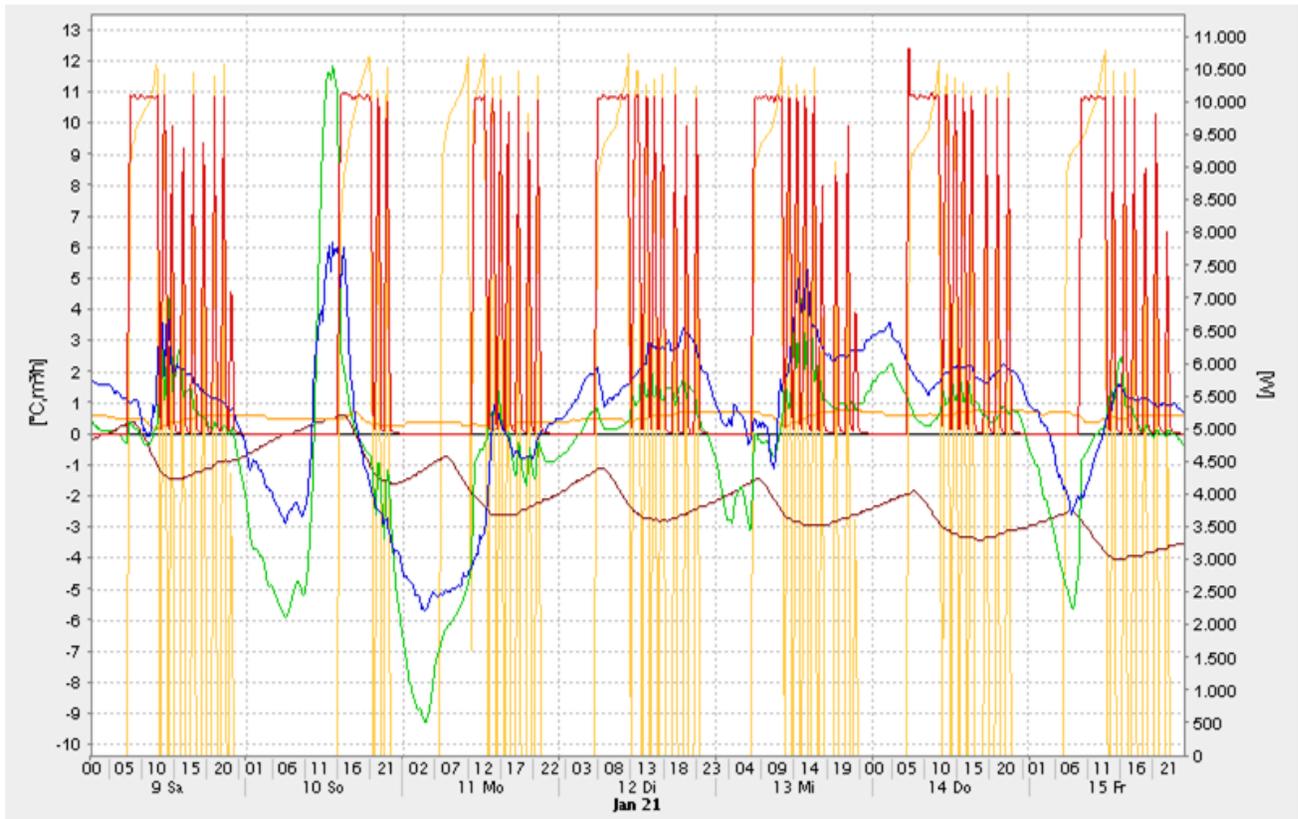


Abbildung 18: Datenauswertung des Eisspeicherverhaltens im Zeitraum vom 09.01.2021 bis 15.01.2021.

y-Achse links: Volumenfluss Solarabsorber in m^3/h (rot), Außentemperatur (blau), Absorbertemperatur (grün), Eisspeicher Steuertempersensor nahe Tankwand in (orange), Temperatursensor PT1000 Tankmitte in (braun),

y-Achse rechts: Wirkleistung Wärmepumpe in Watt (gelb).

Wenn eine Wirkleistung der Wärmepumpe (gelb) und ein Volumenfluss am Solarabsorber (rot) vorhanden ist, sollte der Eisspeicher nicht in Betrieb sein und das System über den Solarabsorber betrieben werden. Folglich sollte die Temperaturen im Eisspeicher konstant bleiben. Abbildung 18 zeigt jedoch sehr große Temperaturschwankungen mit immer niedrigeren Temperaturen im Eisspeicher (braun), so z.B. am 9., 10., 12., 13. und 14. Januar 2021. Folglich wird bei Betriebszeiten der Wärmepumpe am frühen Morgen dem Eisspeicher weiter Wärme entzogen, obwohl das System eigentlich über den Solarabsorber (bei Solarabsorbertemperaturen größer als $-4\text{ }^\circ\text{C}$) betrieben werden sollte.

Ein ähnlicher nur umgekehrter Effekt wurde bereits im April 2020 beobachtet. Hier wurde der Eisspeichertank plötzlich deutlich wärmer und das wenige Eis im Tank wurde dabei aufgeschmolzen. Diese hydraulischen Probleme produzieren zwar im Winter Eis im Tank, jedoch verhindert der umgekehrte Effekt die dauerhafte Eisbildung im Frühjahr.

Nur selten, wie am 11.01.2021 zwischen ca. 5 und 10 Uhr (bzw. 15.01.2021 zwischen 5 und 7 Uhr), wurde die Wärmepumpe direkt über den Eisspeicher betrieben, erkennbar am Volumenstrom Solarabsorber = 0 (rot)). Hier befindet sich, wie erwartet, die Absorbtemperatur (grün) unter -4 °C.

Ursache dafür war die fehlerhafte Ansteuerung der Regenerationspumpe. Beim Betrieb der Sole-Primärpumpe wurde die Regenerationspumpe mit angesteuert und hat durch die niedrigen Außentemperaturen über den Solarkollektorkreislauf zusätzlich Wärme aus dem Eisspeicher entzogen. Eine Restwassersäule im Eisspeichertank zwischen dem Regenerationswärmetauscher und dem Entzugswärmetauscher zur Betonwand war jedoch gegeben (s. Abbildung 17). Dieser Effekt ist aber notwendig, damit eine Sprengung des Eisspeichertanks aufgrund der Volumenzunahme bei der Vereisung durch die Regelung unterbunden wird (Abschaltung der Wärmepumpe aufgrund der zu niedrigen Vorlauftemperatur aus dem Eisspeichertank).

Bereits im Mai 2020 war bei längeren Taktungen der Wärmepumpe ein Temperaturanstieg im Eisspeichertank zu erkennen. Die Messdaten haben vermuten lassen, dass auch hier ein ungewollter Rückfluss von Wärme über die Regenerationsschleife in den Eisspeichertank stattfand. Folglich sind sehr wahrscheinlich durch die Pumpensteuerung weitere ungewollte Wärme-/Kältetransporte vorhanden. Ebenso stieg oftmals die Temperatur des Solarabsorbers an, wenn die Wärmepumpe in Betrieb ging.

Die Fa. Viessmann hat noch am 15.02.2021 angefangen die Wärmepumpe zu überprüfen und das System neu zu verkabeln. In der Folgezeit zeigten die Monitoringdaten für die Heizung keine Auffälligkeiten mehr.

Die unkontrollierten Wärmeflüsse haben jedoch die Konsequenz, dass alle Monitoringdaten vor dem 20.02.2021 nicht sinnvoll ausgewertet werden können.

4.1.2 Winter 2021/2022

In dem Winter 2021/2022 konnte schließlich von einem funktionierenden Eisspeichersystem für den Heizfall ausgegangen werden.

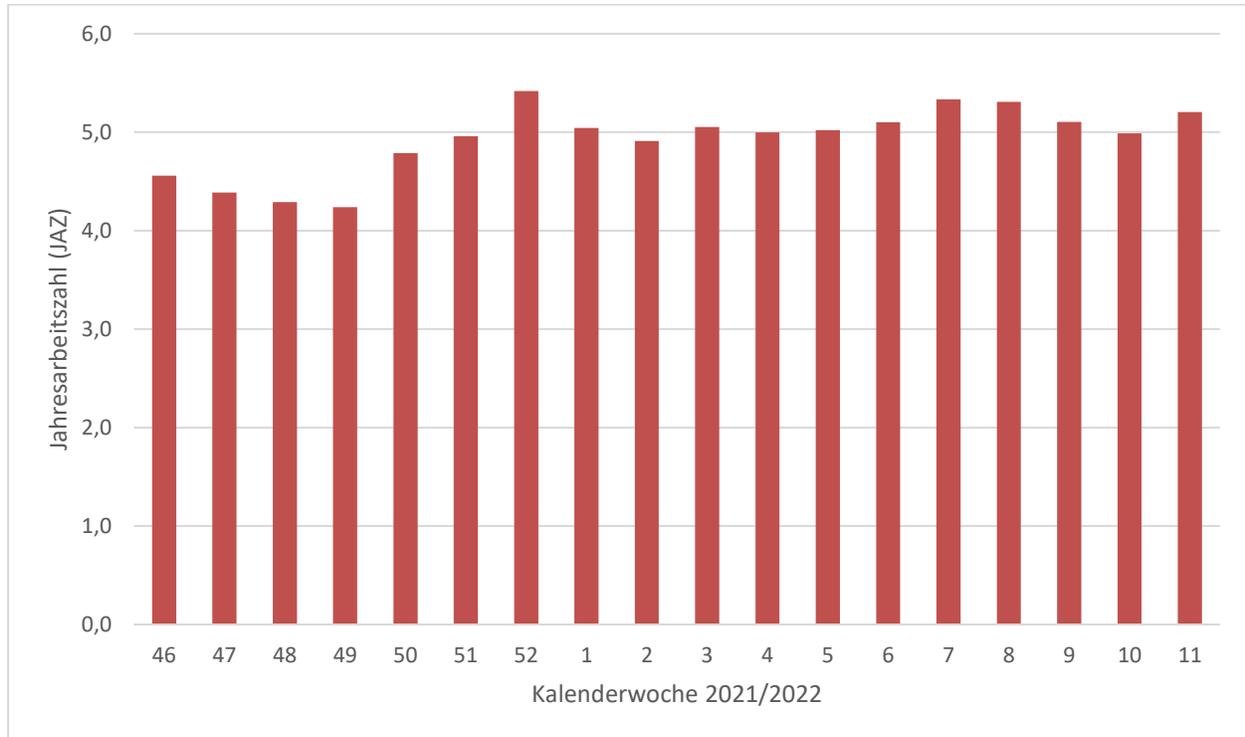


Abbildung 19: Jahresarbeitszahl (JAZ) nach Anpassung der Heizkurve und der Lüftungseinstellungen (Anfang KW 50/ 2021).

Abbildung 19 zeigt die Veränderung der als Wochenmittelwert ausgewerteten Jahresarbeitszahl (JAZ = kWh/a Wärme : kWh/a Strom) nach der Anpassung der Heizkurve und der Lüftungsanlageneinstellung ab der KW 50. Die JAZ ist im Vergleich zum COP ein individueller Wert. Sie ist abhängig vom Gebäude, der klimatischen Lage, der Bauweise und der Wärmedämmung des Gebäudes, der Wärmequelle, der Raumheizung mit Warmwasser, dem Nutzerverhalten und dem Wetter. Sie kann nicht zum Vergleich verwendet werden, sondern liefert nur einen relativen Wert, der zur Einschätzung des Heizsystems in einem bestimmten Haus unter Berücksichtigung der Heizgewohnheiten der Bewohner dient.

Am Anfang der Kalenderwoche 50 wurde die Fa. Viessmann Standardeinstellung der Heizkurve von der Fußbodenheizung von 0,4 + 6 auf 0,3 + 3 Kelvin² angepasst. Die beiden Lüftungsgeräte waren zudem immer auf Ablufttemperaturregelung eingestellt. Folglich hatten die Lüftungsanlagen einen deutlichen höheren Anteil der Heizlast gedeckt. Eigentlich sollte dies (effizienter) über

² <http://www.bosy-online.de/Heizkurve.htm> vom 10.05.2022;

die Fußbodenheizung erfolgen. Die Lüftungsanlage wurde auf Zulufttemperaturregelung umgestellt. d.h. die Zulufttemperatur für alle Räume betrug ab dann 21 °C.

In Kalenderwoche 46 – 49 im Jahr 2021 bewegte sich die JAZ zwischen 4,2 und 4,6. Nach der Umstellung ist eine JAZ von 4,9 – 5,3 zu beobachten.

4.1.3 Kontrollierter Eisaufbau und Regeneration

Über die Wintermonate sollte ein kontrollierter Eisaufbau im Eisspeichertank stattfinden und möglichst viel Eis nach der Heizperiode für die sommerliche Kühlperiode zur Verfügung stehen. Sind jedoch die Außentemperaturen bzw. Solarabsorberrtemperatures sehr niedrig, kann bereits zu Winterbeginn sehr viel Eis im Tank vorhanden sein. Um das Potenzial des Eisspeichertanks wieder nutzen zu können, kann durch den Regenerationsbetrieb über die Solarabsorber Wärme in den Eisspeichertank geliefert werden und dadurch das vorhandene Eis teilweise oder ganz aufschmelzen. In der Steuerung ist dafür folgende Bedingung hinterlegt: Kollektortemperatur über - 9 °C, Eisspeichertemperatur unter 14 °C und der Solarabsorber mindestens 5 °C wärmer als der Eisspeicher.



Abbildung 20: Messdaten der Wirkleistung der Wärmepumpe (gelb, rechte y-Achse), Eisspeichertemperatur Steuersensor (blau, linke y-Achse), Solarabsorberrtemperatur (grün, linke y-Achse) und Volumenfluss Solarabsorber (rot, linke y-Achse) im zeitlichen Verlauf vom 16.02.2022 bis 18.02.2022.

Abbildung 20 zeigt den Temperaturanstieg im Eisspeichertank (blau) durch den Volumenfluss von ca. 11 m³/h der Regeneration am Solarabsorber (rot) auf dem Dach der Umweltstation. Wenn ein Volumenfluss von ca. 8 m³/h am Solarabsorber (rot) vorhanden ist und eine Wirkleistung der Wärmepumpe (gelb) anliegt, wird die Energie des Solarabsorbers (anstatt des Eisspeichers) direkt von der Wärmepumpe verwendet. Zu diesem Zeitpunkt findet auch keine Regeneration statt und die Eisspeichertemperatur (blau) bleibt konstant. Folglich kann ab einer Außentemperatur von ca. 5-6 °C die Regeneration im Eisspeichertank angestoßen werden.

Die Regeneration wurde im Frühjahr 2020 im April und Mai durchgeführt und zerstörten das wenige vorhandene Eis im Eisspeichertank, das eigentlich für die Kühlung im Sommer vorgesehen war. Ein Kühlbetrieb der Anlage zu diesem Zeitpunkt konnte ausgeschlossen werden. Nach der Installation der Zeitschaltuhr für die Regeneration im Herbst 2020 wurde die vollständige Unterbindung der Regeneration bis 1. März jedes Jahr eingestellt.

Aufgrund des nicht vorhandenen Radarsensor für die Pegelmessung im Eisspeichertank kann jedoch bis Stand Berichtserstellung der geschätzte Vereisungsgrad nur durch visuelle Überprüfung festgestellt werden. Jedoch läuft die Regeneration nach fest in der Steuerung vorgegebenen Parametern. Laut der Dokumentation der Fa. Viessmann gibt es in der vereinfachten Steuerung kein vorgegebenen Schaltzeiten für die Unterbrechung der Regeneration. Folglich sollte die Regeneration zumindest über eine einfache Zeitschaltuhr in der Elektroverteilung gesteuert werden können. Diese Schaltung einer geregelten Regeneration über eine Zeitschaltuhr konnte bis zum Sommer 2020 nicht nachvollzogen werden. Durch eine Vorortüberprüfung wurde festgestellt, dass die dafür vorgesehene Zeitschaltuhr nicht vorhanden war.

Da nur ein Steuertemperatursensor im Eisspeicher verbaut war, war ein kontrollierter gesteuerter Eisaufbau nicht möglich. Daher war es letztendlich Zufall, wieviel Eis sich im Eisspeicher bildet. Im Frühjahr 2022 war leider kein Eis im Tank vorhanden.

4.1.4 Heizen im Sommer

Die Wärmepumpe des Eisspeichersystems wurde ausschließlich für den Heizbetrieb ausgelegt. Eine Gebäudekühlung durch umgekehrten Betrieb der Wärmepumpe war nicht möglich. Das sehr wenige benötigte Brauchwarmwasser im Gebäude wird elektrisch dezentral erzeugt.

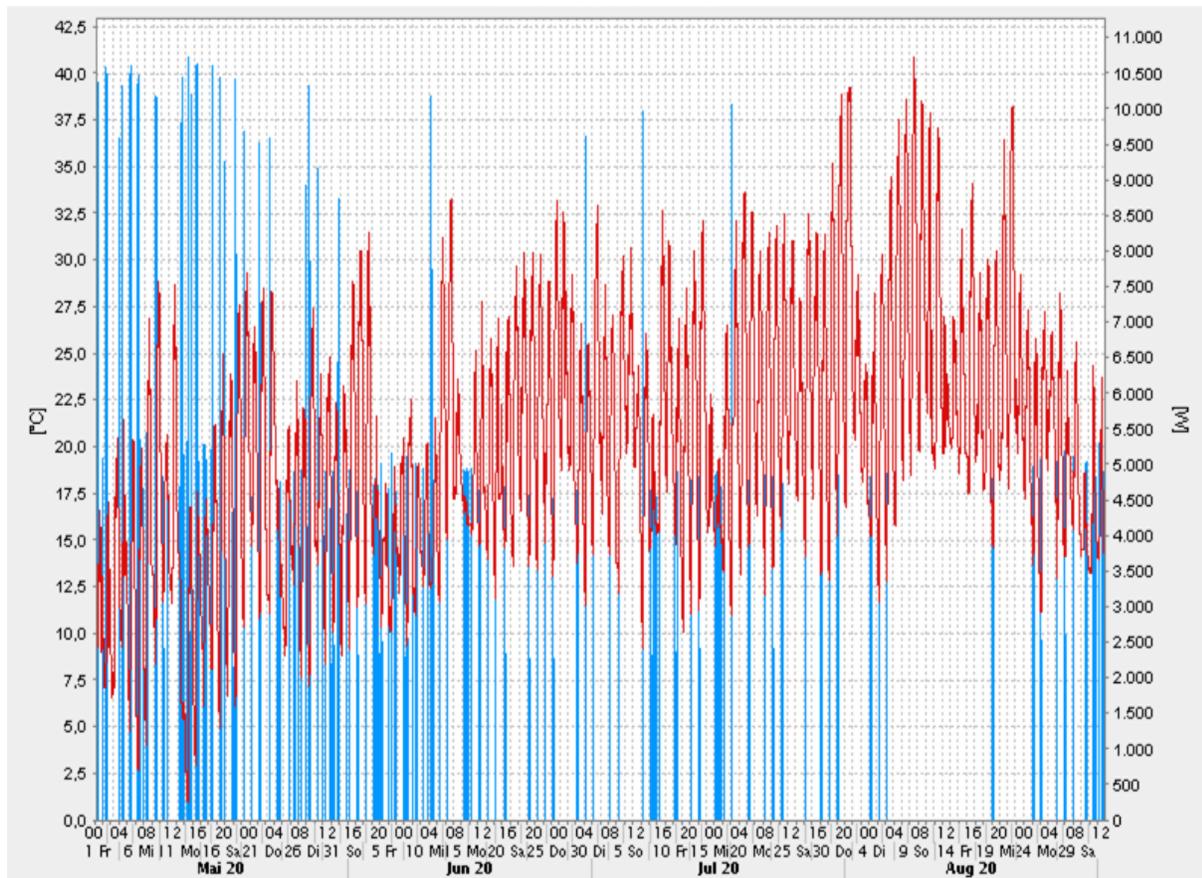


Abbildung 21: Die Wirkleistung der Wärmepumpe (blau, rechte y-Achse) und Außentemperatur (rot, linke y-Achse) im zeitlichen Verlauf vom 01.05.2020 bis 01.09.2020.

Die in Abbildung 21 dargestellte Wirkleistung der Wärmepumpe (blau) zeigt einen Heizbetrieb in der Übergangszeit Mai und sogar in den Sommermonaten Juni, Juli und August. Teilweise waren sogar Wärmeanforderung in den Morgenstunden von Hochsommertagen vorhanden, bei denen die Außenlufttemperatur im Laufe des Tages auf über 30 °C anstieg.

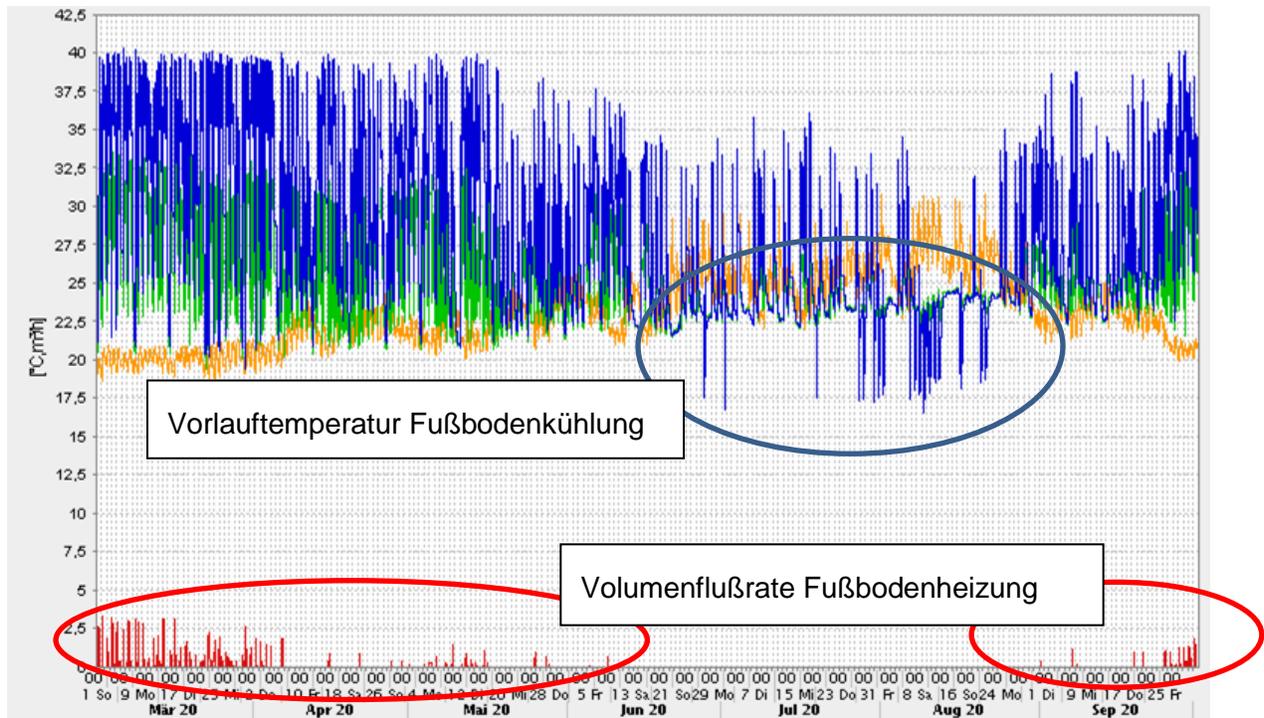


Abbildung 22: Messdaten der Fußbodenheizung mit Durchfluss in m^3/h (rot), Vorlauftemperatur (blau), Rücklauftemperatur (grün) und IST-Temperatur der Galerie (orange) im Zeitraum von Anfang März bis Anfang Oktober 2020.

Abbildung 22 zeigt den sehr geringen Volumenfluss der Fußbodenheiz-/kühlung (rot) ab Anfang April bis Ende September 2020. Zwar war die Vorlauftemperatur der Fußbodenkühlung (blau) in der blauen Markierung bei Temperaturen um $17,5\text{ }^\circ\text{C}$ gelegen, aber der Volumenstrom war in diesem Zeitraum bei $0\text{ m}^3/\text{h}$. Folglich wurde keine Kühlung durch die Fußbodenheiz-/kühlung durchgeführt und die Fußbodenheiz-/kühlung war somit nicht der Verursacher des Wärmebedarfs in den Übergangs- und Sommermonaten.

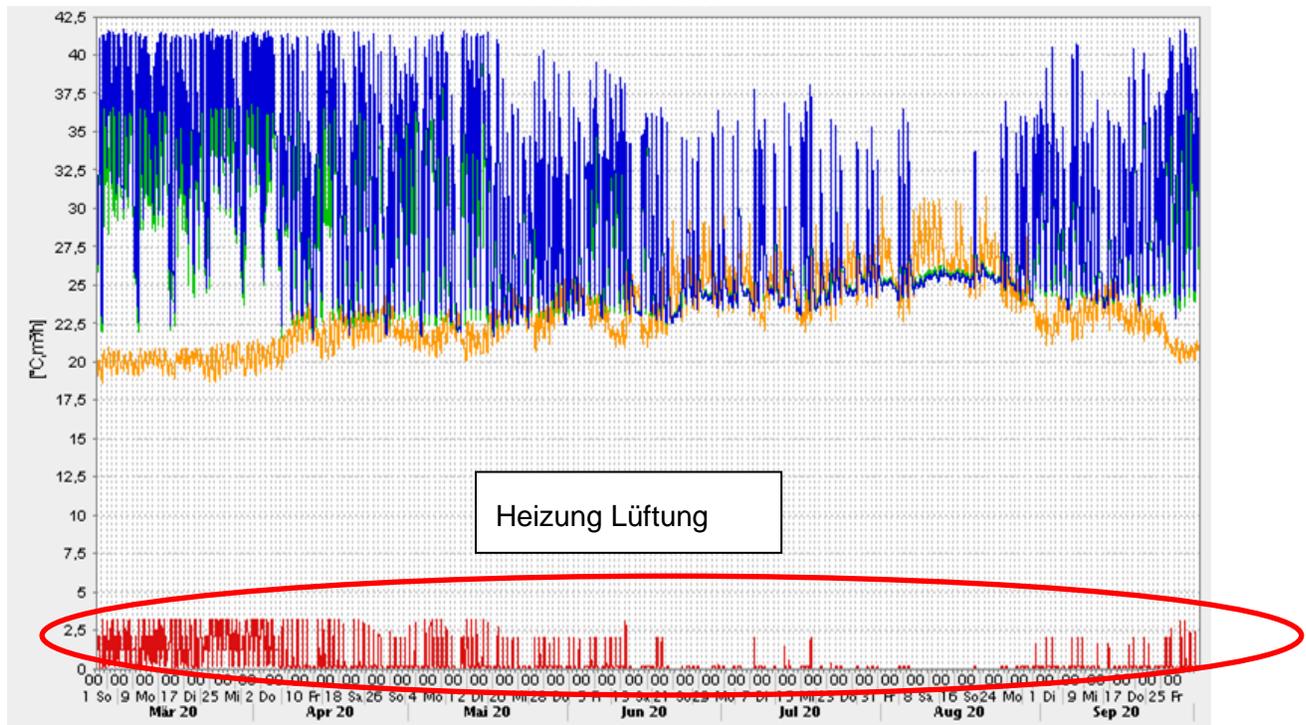


Abbildung 23: Messdaten des Heizwasser-Volumenstroms im Heizregistern in der Lüftungsanlage (rot), Vorlauftemperatur (blau), Rücklauftemperatur (grün) und IST-Temperatur der Galerie in (orange) im Zeitraum von Anfang März bis Anfang Oktober 2020.

Die fehlerhafte und nicht notwendige Beheizung der Umweltstation wurde hauptsächlich über das Lüftungsregister Heizen (s. Abbildung 23) durchgeführt. Teilweise war im März 2020 der Volumenfluss des Heizregisters der Lüftungsheizung (rot) noch auf Maximum. Sogar im Mai bis Juli 2020 wurde noch regelmäßig Wärme für die Lüftung bereitgestellt. Dies erklärt auch teilweise die Wirkleistung der Wärmepumpe im Frühsommer (s. Abbildung 21).

Aufgrund der Monitoringergebnisse wurde durch eine Änderung der Regelung durch die Fachfirma dieser Wärmeeintrag über die Lüftung im Herbst 2020 reduziert um das energetisch effektivere System der Fußbodenheiz-/kühlung zu nutzen. Der Wärmeeintrag in den Sommermonaten über die Lüftung wurde regelungstechnisch unterbunden, da er für den Wärmehaushalt des Gebäudes kontraproduktiv ist. Besonders an heißen Sommertagen muss dann folglich evtl. noch im Tagesverlauf vermehrt gegengekühlt werden.

Dieser unnötige Energiebedarf durch die Lüftungsanlage wird zukünftig unterbunden, indem die Heizungsanlage direkt nach der Heizperiode abgeschaltet wird und nur noch der Kühlbetrieb möglich ist. Eine Umschaltung für Heizwärme ist dann nur noch manuell möglich.

Zudem wurde Ende 2020 der Anteil der Lüftungsanlage an der Wärmezufuhr zu Gebäude deutlich reduziert, so dass zukünftig die effizientere Fußbodenheizung einen größeren Anteil an der Beheizung des Gebäudes im Winter trägt.

4.2 Kühlung

4.2.1 Sommer 2020

Die Kühlung des Gebäudes sollte planmäßig ab einer Innenraumlufttemperatur von 26 °C erfolgen. Dabei sollte fast ausschließlich die effizientere Fußbodenkühlung anstatt der Lüftung verwendet werden. Diese Kühlenergie aus dem Eis bzw. Wasser sollte über einen Wärmetauscher an die Fußboden- und Lüftungskühlung der Umweltstation übertragen werden. Da hierzu nur Pumpenstrom benötigt wird, macht es planmäßig die Kühlung des Gebäudes sehr effizient.

Durch das nicht vorhandene Eis im Eisspeicher konnte im Sommer 2020 nur die deutlich energieärmere latente Wärme des Wassers genutzt werden. Im gesamten Sommer 2020 wurde keine Kühlung über die eigentlich dafür vorgesehene Fußbodenkühlung gemessen (s. Abbildung 22). Der Volumenstrom der Fußbodenkühlung war hier über den gesamten Sommer gleich Null.

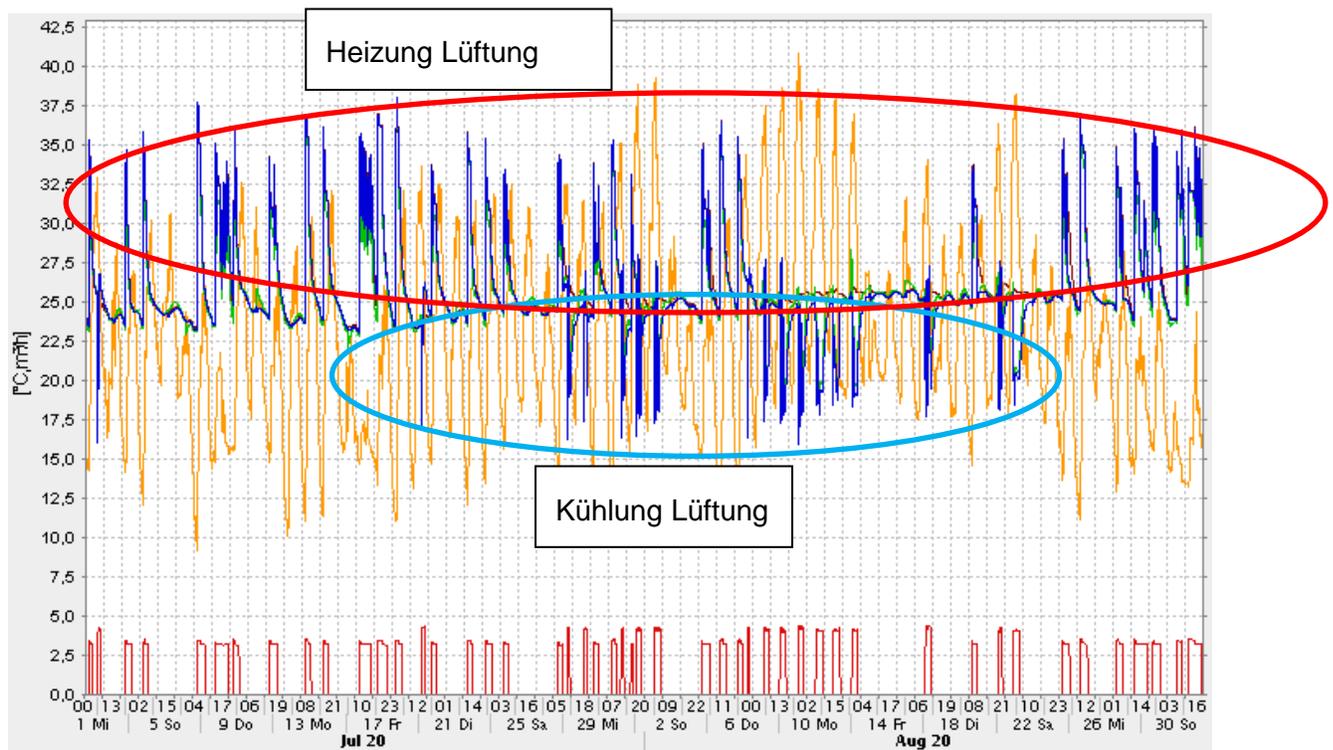


Abbildung 24: Messdaten des Lüftungsregisters für Kühlung mit Durchfluss in (rot), Vorlauftemperatur in (blau), Rücklauftemperatur in (grün) und die Außentemperatur in (orange) im Zeitraum von Anfang Juli bis Ende August 2020.

Von beiden vorhandenen Kühlsystemen (Lüftungsanlage und Fußbodenkühlung) ist lediglich die ineffizientere Variante der Lüftungsanlage aktiviert worden und dies erst bei Außenlufttemperaturen von über 32 °C (s. Abbildung 24 - Vorlauftemperatur mit Ausschlag nach unten). Folglich wurden stellenweise auch Innenraumtemperaturen in der Galerie der Umweltstation von bis zu 30 °C (s. Abbildung 25) bei Außentemperaturen von fast 40 °C erreicht. Dies wird neben der ineffizienten

Kühlung auch durch den hohen solaren Eintrag über die große waaggerechte und unverschattbare Verglasungsfläche bei der Galerie bedingt, deren eigentlicher Zweck die Belichtung des darunterliegenden Baumes im Treppenhaus ist.

Auch bei einer Fußbodenkühlung ist es nicht sinnvoll erst ab einer Innenraumtemperatur von 27 °C aktiv zu kühlen. Durch die hohe thermische Masse des (RC-)Beton steigt die Temperatur bei weiterer Sonneneinstrahlung über die Nachmittagsstunden weiter an. Es vergehen Stunden bis die Kühlung über die Fußbodenheizung tatsächlich spürbar ist. Folglich sollte eine niedrigere Innenraumtemperatur als Grenztemperatur zum aktiven Kühlen gewählt werden.

Auch im Sommer ist oftmals ein warmer Volumenstrom (s. Abbildung 24 Vor- (blau) und Rücklauftemperatur (grün) (beim Bereich im roten Kreis) bei vorhandenem Volumenfluss (rot)) im Kühlregister der Lüftung zu erkennen der für den Gebäudebetrieb energetisch kontraproduktiv ist.

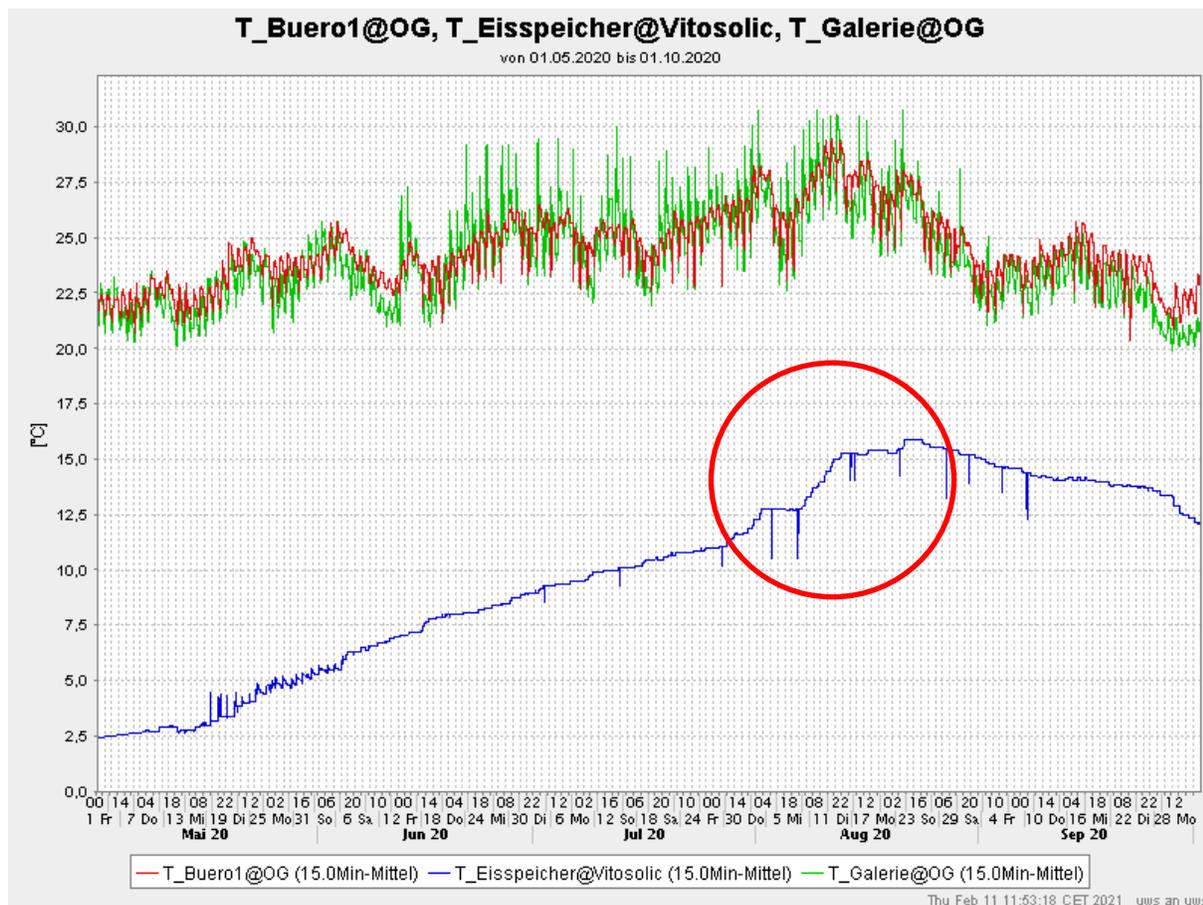


Abbildung 25: Temperaturverlauf für den Eisspeicher (blau), eines Büros (rot) und der Galerie (grün) von Mai bis Oktober 2020.

Abbildung 25 zeigt, dass trotz der sehr kurzen Betriebszeiten des Kühlregisters der Lüftungsanlage (s. Abbildung 24), sich der mit Wasser gefüllte Eisspeichertank sehr schnell erwärmt hat

(Markierung roter Kreis). Die Raumtemperaturen in Büros lagen in den Sommermonaten fast ausschließlich über 25 °C und erreichte Spitzenwerte bis zu 29,5 °C. Die Situation im Foyer ist über das Glasdach der Galerie noch etwas extremer. Jedoch könnte man den Eisspeichertank noch bis auf ca. 19-20 °C weiter aufheizen. Folglich wäre auch noch Kühlenenergie im Eisspeichertank vorhanden gewesen. Diese Kühlenenergie wurde aber durch die sehr hohe Einstellung der Einschaltsschwelle der Kühlung des Lüftungsregister Kühlen ab ca. 32 °C Außentemperatur nicht genutzt. Es war daher wichtig, die Regelung so anzupassen, dass der Eisspeicher am Frühlingsende mit der maximalen Beladung an Eis zur Verfügung steht. Im Sommer 2021 war hier nur Wasser zur Verfügung gestanden.

Durch das vom ZAE durchgeführte Monitoring konnte ein programmiertechnisches Problem eines nicht vorhandenen Signales der Wärmepumpe für die Kühlung über die Fußbodenheizung festgestellt werden. Dieser Fehler wurde durch die Fachfirmen erst im Herbst 2021 beseitigt. Als neue Regelanforderung für die Kühlung dient seitdem die Durchschnittstemperatur dreier Räume im Obergeschoss. Durch die sehr massive Bauweise des Gebäudes wurde testweise eine Grenztemperatur von 25 °C gewählt. Ein Funktionstest konnte im Monitoringzeitraum nicht mehr durchgeführt werden. Die Grenztemperatur zum Einschalten der Kühlung soll dann durch die Nutzererfahrungen im Sommer 2022 für die nächste Kühlperiode angepasst werden.

4.2.2 Sommer 2021

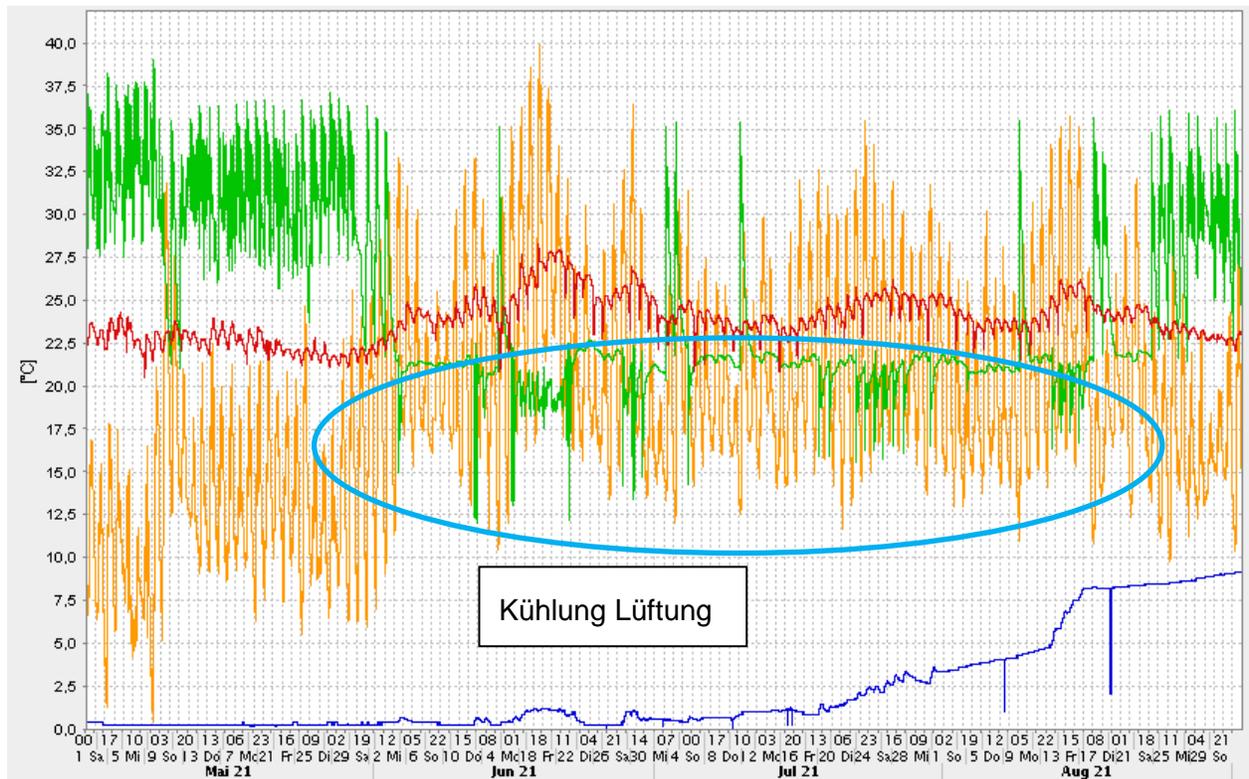


Abbildung 26: Messdaten für den Steuertempersensor des Eisspeichers (blau), des Büros1 (rot), Vorlauftemperatur der Lüftung (grün) und Außentemperatur (orange) von 01.05.2021 bis 31.08.2021.

Durch die Fehlfunktion im Winter 2020/ 2021 war der Eisspeicher zum 15.02.2021 maximal vereist. Folglich sollte bei der Abschaltung der Regeneration am 01.03.2021 ein sehr hoher Eisanteil im Eisspeicher vorhanden gewesen sein. Der mit blauer Ellipse markierte Bereich in Abbildung 26 der Vorlauftemperatur des Lüftungsregister Kühlen zeigt die Kühlphasen im Sommer 2021.

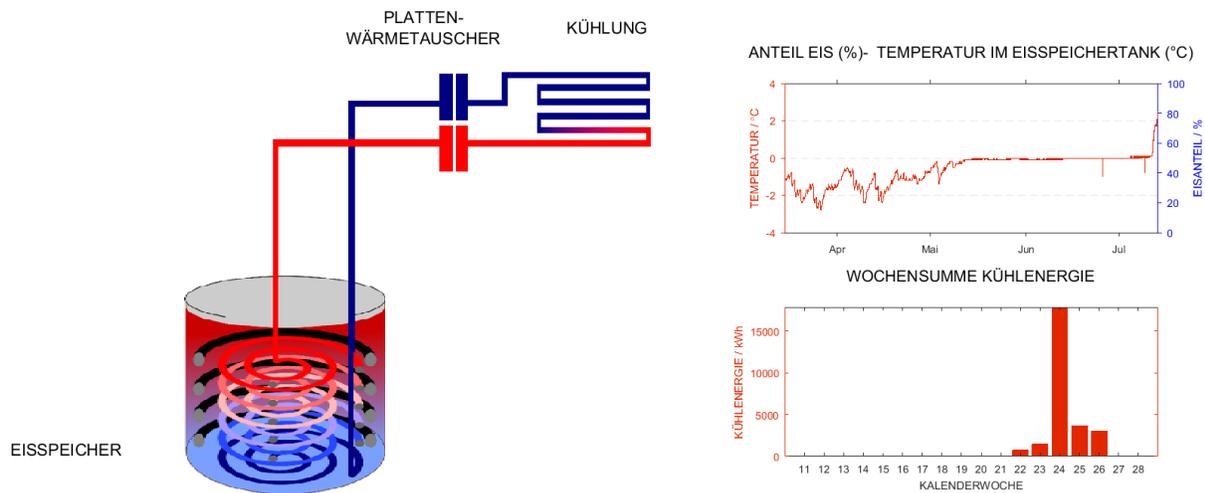


Abbildung 27: Screenshot des im Internet verfügbaren Monitorings der Kühlung der Umweltstation in Würzburg mit der Kerntemperatur des Eisspeichers und der Wochensummen der Kühlenergie für März bis Mitte Juli 2021.

Erst ab Mitte Juli 2021 ist davon auszugehen, dass sich kein Eis mehr im Eisspeichertank befunden hat. Ab diesem Zeitpunkt steigt die Kerntemperatur im Eisspeichertank (s. Abbildung 27 rechts oben) stark an. Der Eisanteil, der eigentlich im gleichen Plot öffentlich dargestellt werden sollte (rechte y-Achse), konnte durch den fehlenden Radarsensor im gesamten Projekt nicht abgebildet werden. Abbildung 27 (rechts unten) zeigt einen sehr hohen Kühlenergiebedarf von fast 18.000 kWh in Kalenderwoche 24 bei Außentemperaturen von fast 40°C. Diese Kühlung erfolgte vollständig über den Eisspeichertank. Jedoch wurde hierzu die ineffizientere Lüftungsanlage verwendet.

Die Einstellung der Kühlung nach Außentemperatur wurden zuvor durch die Fachfirma reduziert. Somit war die Maximaltemperatur im Büro 1 (rot) im Vergleich zum Sommer 2020 nur noch 27,5 °C anstatt bei 29,5 °C gelegen. Jedoch muss auch erwähnt werden, dass die Hitzewellen 2021 nicht so extrem wie im Jahr 2020 waren. In diesem Sommer wäre noch mehr Kühlleistung zur Verfügung gestanden, die durch die Einstellungen nicht abgerufen werden konnten. Die Tanktemperaturen war nach Abschluss der Kühlphase Ende August nur bei ca. 9 °C (s. Abbildung 26) gelegen.

5 LCA Monitoring

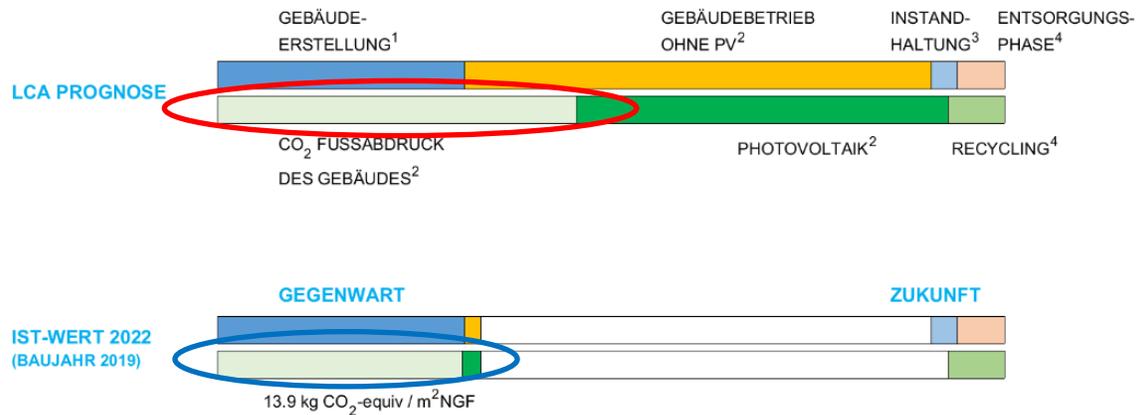
Lebenszyklusanalyse - LCA -

Die LCA Prognose oben zeigt die in der Gebäudeerrstellungsphase berechneten Anteile am Treibhauspotenzial über die gesamte Standardgebäudelebensdauer der Umweltstation von 50 Jahren.

Unten wird der aktuelle Fußabdruck im Ist-Zustand berechnet. Die Realdaten werden monatlich angepasst. Folglich liegt der Fußabdruck des Gebäudes aktuell bei 13,8 kgCO₂-äquivalent pro m² Nettogeschossfläche.

LEBENSZYKLUSANALYSE DER UMWELTSTATION DER STADT WÜRZBURG TREIBHAUSPOTENTIAL (GWP) IN kgCO₂-equiv / m²NGF

LETZTE AKTUALISIERUNG: 19.03.2022 23:30



¹ CO₂ Gebäudeerstellung nach DGNB inkl. PV-Anlage und Eisspeicher bei einer Gebäudelebensdauer von 50 Jahren, ² nach der angenommenen Gebäudelebensdauer von 50 Jahren, ³ Austausch von Bauteilen in der angenommenen Lebensdauer von 50 Jahren, ⁴ Bonus durch Wiederverwertung der Baumaterialien

Abbildung 28: Screenshot des in diesem Projekt erstmalig entwickeltem live-LCA Monitorings der Umweltstation Würzburg.

Das Monitoring war auf der Projektwebsite des ZAE Bayern und auf Info-Monitoren in der Umweltstation dargestellt.

In Abbildung 28 ist das für dieses Projekt entwickelte live dargestellte LCA Monitoring dargestellt. Das obere Balkenpaar zeigt den nach Baufertigstellung prognostizierten Verlauf inklusive Instandhaltung und Entsorgung. Der daraus berechnete CO₂ Fußabdruck von 20,3 kg CO₂-equiv./m² ist im hellgrünen Balken (roter Kreis) dargestellt.

Das untere Balkenpaar zeigt die IST-Werte, die aus dem durchgeführten Monitoring abgeleitet werden. Der live dargestellte Fußabdruck (hellgrüner Balken der IST-WERTE 2022 (blauer Kreis) in Abbildung 28) zeigte während der Projektlaufzeit nur sehr geringfügige Veränderungen von 0,1 kg CO₂-equiv./m².

Der Wert ist jeweils auf die Nettogrundfläche (NGF) der Umweltstation bezogen. Zum Projektende war der Wert von 13,8 auf 13,9 kg CO₂-equiv./m² NGF angestiegen. In der LCA-Prognose oben wurde nur der Betriebsstrom (Wärmestrom, Beleuchtung, Kühlung usw.) berücksichtigt. In den

IST-Werten war dies durch die Zählerstruktur nicht möglich. Folglich musste hier auch der Betriebsstrom durch den Nutzer des Gebäudes für Infrastruktur (Rechner, Server usw.) berücksichtigt worden. Dies erklärt den leichten Anstieg in der LCA Fußabdrucks.

6 Monitoring PV Anlage

Seit Mai 2019 bis Anfang März 2022 hat die auf dem Dach der Umweltstation installierte PV-Anlage ca. 69.800 kWh Strom erzeugt. Da kein Stromspeicher vorhanden ist, wird der Überschussstrom in das Netz eingespeist.

Der direkt genutzte PV-Eigenanteil liegt bis März 2022 bei 29,0 %. Der Gesamtverbrauch des Gebäudes lag im genannten Zeitraum bei ca. 85.200 kWh (Gebäudebetriebsstrom + Nutzerstrom)

Geht man hier von einem sehr niedrigen Nutzerstromverbrauch (z.B. Computer, Kopierer usw.) von nur 10 kWh/m² Nettogeschossfläche aus, werden hier ca. 7000 kWh/a verbraucht. Folglich sind dies 21000 kWh in den drei Betriebsjahren.

Wurde der Nutzerstrom nicht berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Umweltstation bilanziell mehr Energie für das Gebäude selbst erzeugt als verbraucht. Folglich ist es bilanziell ein Plusenergiehaus.

7 Öffentlichkeitsarbeit

Die Umweltstation der Stadt Würzburg wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Vorträgen als Projektbeispiel erwähnt um die Bekanntheit dieses Projektes mit RC-Beton und Eisspeichersystem zu steigern.

Seit der Eröffnung der Umweltstation der Stadt Würzburg im Mai 2019 wurden tausende von Besucher mit den Bildungsangeboten zur nachhaltige Entwicklung erreicht. Darüber hinaus fanden in der Umweltstation zahlreiche öffentliche Vorträge, Vereinssitzungen und Gruppengespräche statt, die sich für eine nachhaltige Entwicklung der Stadtgesellschaft einsetzen.

Zudem wurden zahlreiche terminierte und spontane Hausführungen für interessierte Laien sowie Fachleute und sogar internationale Delegationen durchgeführt. Dabei war das Interesse an den innovativen Technologien „Recyclingbeton“ sowie „Eisspeicherheizung“ sehr groß.

7.1 Präsentation Webseite und Umweltstation

Anfangs wurde vom ZAE Bayern Poster für die Umweltstation zum Eisspeichersystem gestaltet. 2020 wurden die Poster durch eine digitale Visualisierung des Eisspeichersystems ersetzt.

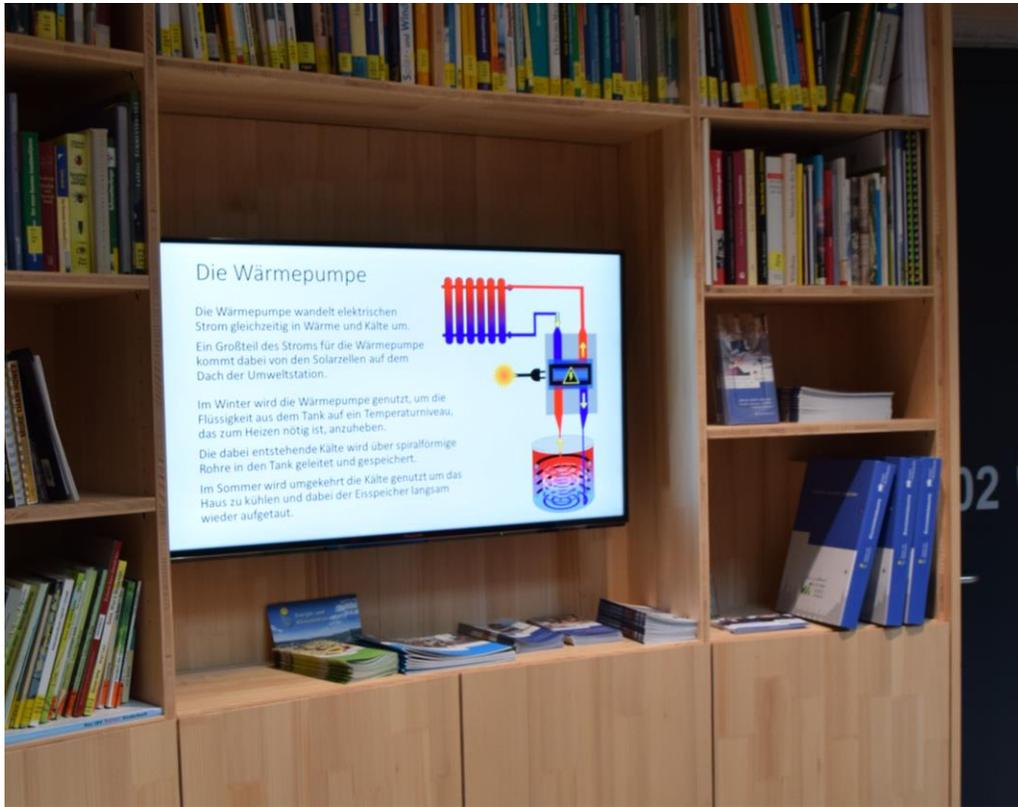


Abbildung 29: Präsentation des Eisspeichersystems mit Wärmepumpe als animierte Bildschirmpräsentation in der Umweltstation.

Die Präsentation wird im Foyer der Umweltstation in einer Endlosschleife auf einem Monitor gezeigt (s. [Abbildung 29](#)).

Das Energie- und LCA-Monitoring wurde technisch und inhaltlich fertiggestellt und der Umweltstation für die Präsentation auf einem Monitor im Eingangsbereich oder der Galerie zur Verfügung gestellt. Die Präsentation konnte auch auf der ZAE Bayern Webseite³ betrachtet werden. Zum Projektende wurde in Abstimmung mit der Stadt Würzburg die Aktualisierung der Daten eingestellt.

³ <https://www.zae-bayern.de/forschung/eob-uws-plots> (Stand 3/2022)

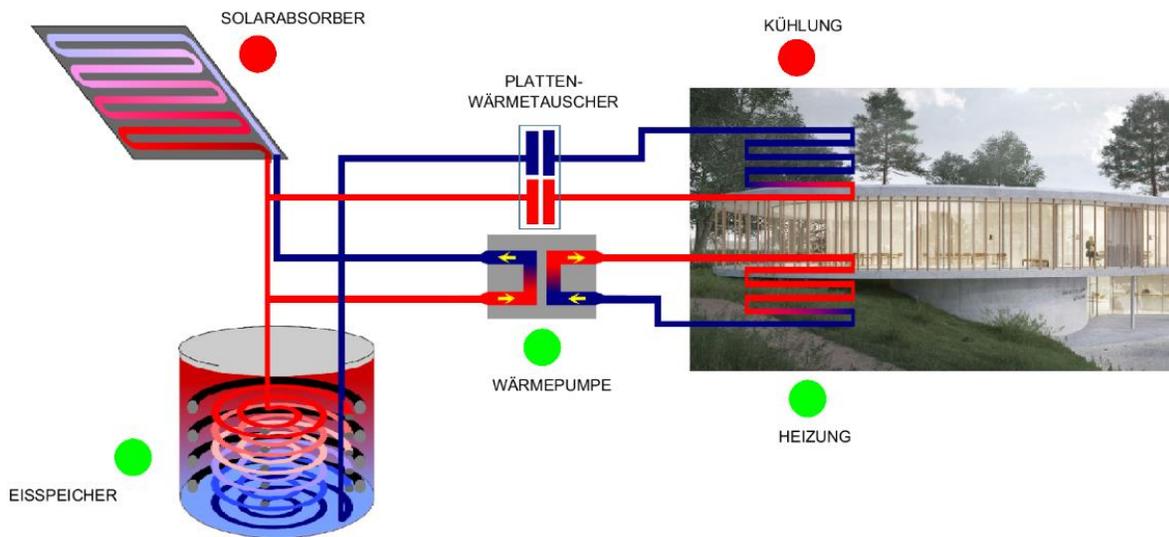


Abbildung 30: Systemschema der Umweltstation aus dem Monitoring. Die roten bzw. grünen Punkte stellen den Betriebszustand (aus/ein) der jeweiligen Komponenten zeitnahe dar.

Durch die Datenübertragung und die Datenverarbeitung wurden die Zustände (s. Abbildung 30) jede Stunde im Systemschema der Umweltstation aktualisiert.

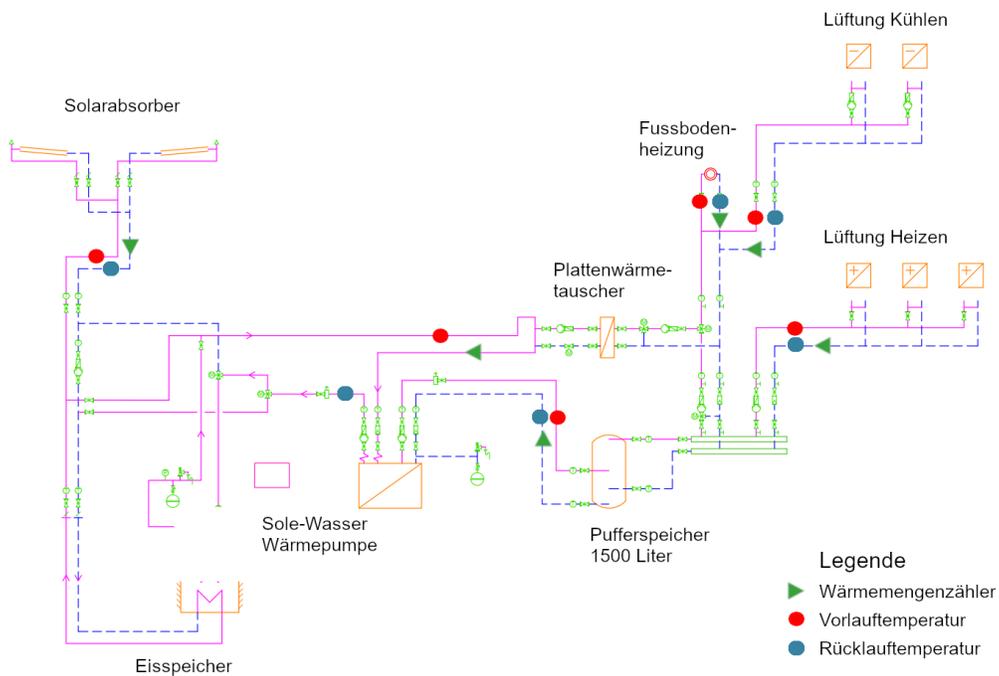


Abbildung 31: Monitoring-Schema der Umweltstation mit Vorlauftemperaturen (roter Punkt), Rücklauftemperaturen (blauer Punkt) und Wärmemengenzähler (grünes Dreieck).

Diverse Sensoren zeichnen die Daten vom Wärmemengenzähler mit Vor- und Rücklauftemperaturen (s. Abbildung 31), Eisspeicherdaten, Wärmepumpendaten, Wetterdaten und die Soll- und Ist-Temperaturen in der Umweltstation auf. Diese Daten wurden per LTE an das ZAE Bayern übertragen.

Dort wurden die Daten aufbereitet und automatisierte Plots erstellt. Diese werden auf einen Webserver abgelegt und konnten von dort für die Info-Monitore der Umweltstation oder für Webseiten abgerufen werden.

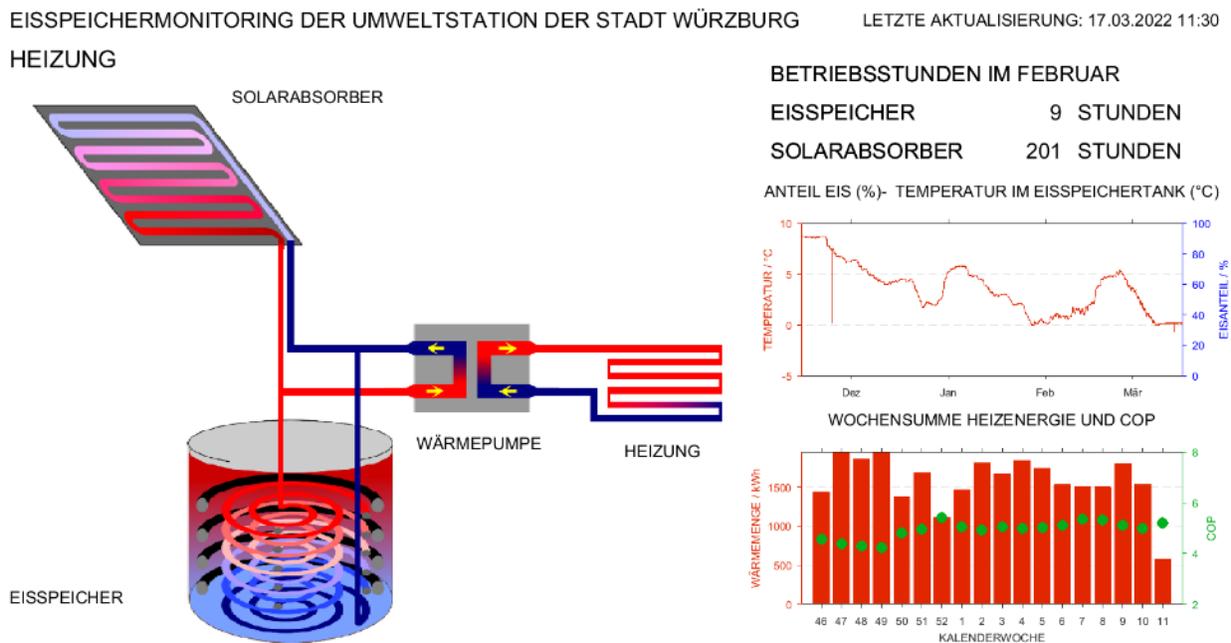


Abbildung 32: Beispiel: Ausschnitt aus der Monitoring-Seite der Heizung mit der Temperatur im Eisspeicher und dem Eisanteil (Darstellung geplant, konnte nicht realisiert werden) im oberen Plot und der erzeugten Wärmemenge und dem errechneten COP im unteren Plot als Wochenmittelwert von Kalenderwoche 46/2021 bis 11/2022.

Die Abbildung 32 zeigt als Beispiel für die automatisch generierten Monitoringseiten die relevanten Kennwerte für die Heizfunktion des Eisspeichersystems (erzeugte Wärmemenge und COP) sowie die Kennwerte des Eisspeichers im Monitoring. Weiterhin werden oben die Betriebsstunden des Eisspeichers und des Solarabsorbers für den Wärmepumpenbetrieb im jeweils letzten Monat angezeigt. Die Steuersensortemperatur im Eisspeichertank wird in der oberen Grafik angezeigt. Die Eisanteilanzeige in % kann durch den bis zum Projektende nicht funktionierenden Radarsensor im Tank nicht erfolgen.

In Abbildung 32 ist die erzeugte Wärmemenge des Gebäudes als Wochensumme in kWh und der Wochendurchschnitt des COP des Heizsystems dargestellt. Der COP gibt an, wie effizient die

Anlage derzeit läuft. Ein COP von 5 z.B. bedeutet, dass aus 1 kWh elektrischer Energie 4 kWh Wärme erzeugt werden. Abbildung 33 zeigt das monatlich aktualisierte, im Projekt entwickelte LCA-Monitoring über die gesamte Lebensdauer der Umweltstation (vgl. Absatz 5 auf Seite 37).

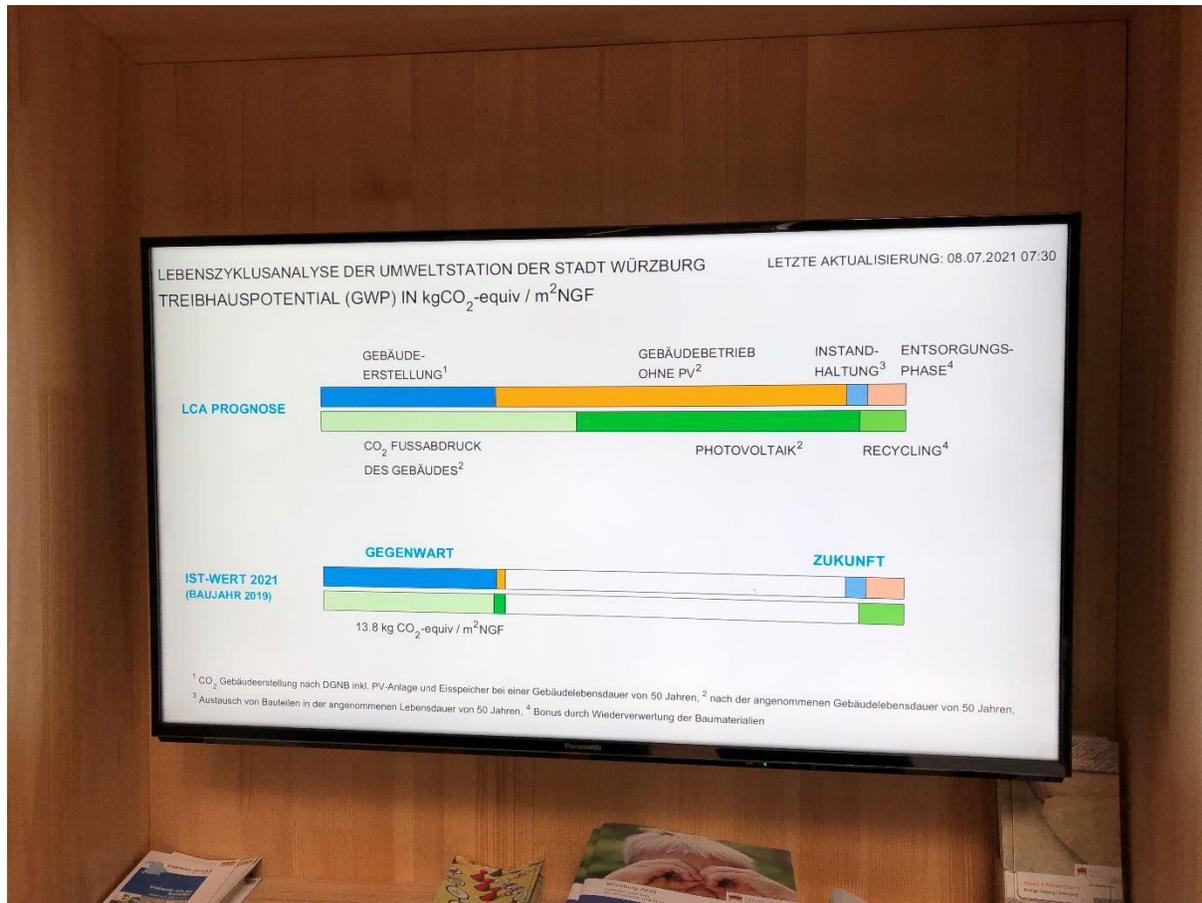


Abbildung 33: LCA Monitoring auf einem Bildschirm in der Umweltstation.

7.2 Preise, Anerkennungen und Veröffentlichungen

Folgende Preise und Anerkennungen wurden mit der Umweltstation erreicht:

- Anerkennung, Bundespreis Umwelt und Bauen 2020
<https://www.umweltbundesamt.de/bundespreis-umwelt-bauen-preistraeger#--3>
- 2. Preis, Bayerischer Ingenieurpreis der BAYIKA
<https://www.bayika.de/de/ingenieurpreis/>

Veröffentlichungen:

Artikel: „Neuer Bundespreis von BMU und UBA – Leuchtturmprojekte für nachhaltiges Bauen“, S. 7, Deutsches Ingenieurblatt, 11/2020

Artikel: „Vom Bauschutt zum Baustoff – Recycling-Beton im Einsatz“ von Leonhard Fromm, S. 36-39, Deutsches Architektenblatt, 01/2021

Artikel: „Umweltstation der Stadt Würzburg“ unter „Wettbewerbe weiterverfolgt“, S. 55-57, wettbewerbe aktuell, 01/2021

Online Veröffentlichungen:

Bayerisches Betonrecycling Umweltstation von balda in Würzburg, baunetz.de, 10/2020⁴

Tagungsbeitrag:

Vorstellung auf dem 3. KlimaSchutzKongress in Würzburg des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

⁴ https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Umweltstation_von_balda_in_Wuerzburg_7447393.html?action=suche&s_text=umweltstation+w%FCrzburg&epp=10&backurl=https%3A%2F%2Fwww.baunetz.de%2Fmeldungen%2Fsuche.html%3Faction%3Dsuche%26s_text%3Dumweltstation%2Bw%25FCrzburg%26showall%3D0%26epp%3D10 (Stand 04/2022)

8 Zusammenfassung

Für die Planung des Eisspeichersystems und die Ausschreibung war die Ingenieurgemeinschaft Hofer & Hölzl GmbH aus Fürstenfeldbruck verantwortlich. Diese fungieren als Unterauftragnehmer der Gesamtverantwortlichen balda architekten gmbh in Fürstenfeldbruck. Die Firma Viessmann als Lieferant des Eisspeichersystems hatte im Vorfeld Simulationen zur Funktionsweise des Eisspeichers durchgeführt. Der Bauherr ist somit davon ausgegangen, dass die Kühlung der Umweltstation im Sommer für Raumtemperaturspitzen über 26 °C immer ausreichend ist. Das ZAE Bayern war verantwortlich für das nachgelagerte Monitoring des Eisspeichersystems.

Im Frühjahr 2021 war der Eisspeicher durch eine Fehlfunktion vollständig zugefroren, da in der Vergangenheit beim Betrieb der Wärmepumpe die Regenerationspumpe immer mitgelaufen ist. Erst nach Neuverkabelung des Systems konnten sinnvolle Monitoringdaten gewonnen werden. Zuvor musste davon ausgegangen werden, dass ungeplante Wärme-/Kälteströme den sehr trägen Eisspeicher negativ beeinflusst haben.

Im Winter 2021/2022 nach der Optimierung der Heiz- und Lüftungseinstellungen sind sehr gute COP-Werte der Wärmepumpe von ca. 5 erreicht worden. Die umweltfreundliche und fast kostenlose Kühlenergie für die Sommerphase ist mit der vorhandenen vereinfachten Steuerung nur sehr begrenzt nutzbar. Der Phasenübergang des Eisspeichers wird daher in der derzeitigen Konfiguration leider nur selten genutzt und damit eigentlich nutzbare Wärme bzw. Kälte verschenkt. Durch den nicht im System eingebundenen Radarsensor kann ein kontrollierter Eisaufbau nicht stattfinden.

Die Erfahrungen aus dem Monitoring zeigen, dass viele Probleme eines relativ komplexen und innovativen Systems nur durch ein nachgelagertes Monitoring überhaupt erkannt werden und damit eine Ursachenforschung möglich ist. Als Lösung eines solchen Problems wurde beispielsweise eine zusätzliche Zeitschaltuhr eingebaut, welche für die Regeneration des Eisspeichers zum 01.03. eines jeden Jahres beendet. Zukünftige Aufgabe wird sein, den optimalen Zeitpunkt zur Regenerationsabschaltung herauszufinden, um im Sommer eine maximale Eismenge für Kühlzwecke nutzen zu können.

Da die Fußbodenkühlung technisch erst im Herbst 2021 in Betrieb genommen wurde, konnte keine belastbare Aussage zur Kühlleistung für die Sommerperiode getroffen werden. Im Projektzeitraum selbst, kam nur die ineffizientere Lüftungskühlung ab ca. 30 °C Außentemperatur zum Tragen.

Standardmäßig kann das hier eingesetzte Steuerungssystem des Eisspeichersystems keine Messwerte abspeichern, abrufen oder prüfen. Somit war eine Fehleranalyse, Betriebsoptimierung

nur mit großem Aufwand möglich. Veränderungen von Parametern oder Grenztemperaturen am Eisspeichersystems konnte nur die Fa. Viessmann direkt Vorort durchführen.

Die Lösungsversuche mit dem Hersteller des Eisspeichersystems (Fa. Viessmann in Zusammenarbeit mit der Fa. Bechert) für einen kontrollierten Eisaufbau scheiterten bis jetzt an den hohen Kosten. Der Radarsensor lässt sich nur sinnvoll in eine große speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) integrieren. Mittlerweile wird versucht, für die Anzeige des Eisstandes eine kostengünstiger Alternative zu finden. Für einen kontrollierten Eisaufbau muss der Nutzer je nach Eisstand die Umschaltung der Regeneration manuell vornehmen. Die momentan verwendete Zeitschaltuhr muss dann wieder außer Betrieb gesetzt werden.

Der Hersteller Fa. Viessmann hat die Steuerung des Eisspeichersystems in dieser Form vom Markt genommen, weswegen nur eine eingeschränkte Unterstützung durch die Fa. Viessmann bei der Problemlösung erfolgte. Empfohlen wird hier aktuell von der Fa. Viessmann ein Eisspeichersystem mit MSR (Mess-, Steuer- und Regelungstechnik) Anlage. Seit ca. 2 Jahren ist deshalb bis heute, trotz ausführlicher Fehleranalyse seitens des ZAE, kein zufriedenstellender Betriebszustand der Gebäudekühlung hergestellt worden.

Grundsätzlich sollte bei Eisspeichersystemen in Nichtwohnbereich eine übergeordnete Steuerung- und Regelungstechnik vorausgesetzt werden. Jedoch ist ein solches System, für ein Gebäude dieser Größenordnung kostenintensiv bzgl. der notwendigen Investition. Diese Aussage relativiert sich aber, da durch die Möglichkeit des Monitorings und der Betriebsoptimierung Fehlfunktionen zu erkennen und damit auch Betriebskosten zu minimieren.

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:	Außenansicht in den Eingangsbereich der Umweltstation der Stadt Würzburg. Umweltstation © Michael Lauricella.....	5
Abbildung 2:	Ansicht der Umweltstation von außen. © Stadt Würzburg - Baureferat/FA Tiefbau	5
Abbildung 3:	Innenansicht der Umweltstation mit Begrünung und Baum. © ZAE Bayern	6
Abbildung 4:	Dachansicht der Umweltstation mit der zentralen Dachbelichtungsverglasung, Solarabsorber für das Eisspeichersystem und PV-Anlage. Umweltstation © Michael Lauricella.....	7
Abbildung 5:	Vereinfachte Systemdarstellung des Eisspeichersystems in der Umweltstation.	10
Abbildung 6:	Systemschaltplan der Wärme- und Kälteversorgungssysteme der Eisspeicherheizung.	11
Abbildung 7:	Eisspeichertank mit 132,5 m ³ Gesamtinnenvolumen und 107 m ³ Wasserfüllung.	12
Abbildung 8:	Ursprüngliche Planung des Eisspeichers mit 3 Temperatursensoren und Radarsensor zur Füllstandsmessung.	13
Abbildung 9:	Ausgeschriebenes System mit einem Temperatursensor (grün) und ohne Radarsensor.....	14
Abbildung 10:	Rohrschlangen Eisspeichertank mit 132,5 m ³ Gesamtinnenvolumen und 107 m ³ Wasserfüllvolumen im leeren Zustand.....	15
Abbildung 11:	Vitosolic 200 für die Eisspeichersteuerung.	17
Abbildung 12:	Verkabelung mit zwei zusätzlichen Elektrozählern (Hutschienenmodule mit Display) für die Wärmepumpe und die erforderlichen Pumpen im Eisspeichersystem.	18
Abbildung 13:	Monitoringübersicht des Wärme- und Kälteversorgungssysteme der Eisspeicherheizung mit Positionierung der eingebauten Vor- und Rücklauftemperaturen und Wärmemengenzähler.....	19
Abbildung 14:	Wärmemengenzähler in der großen Ausführungsvariante (links) und der kleinen Ausführungsvariante (rechts).....	20

Abbildung 15:	Datenauswertung der verschiedenen Temperatursensoren im Eisspeichertank; Eisspeicher Steuertemperatur nahe Tankwand (rot), Temperatur Tankmitte (blau), Temperatur zwischen beiden Sensoren (grün) und Außentemperatur (gelb) im Zeitraum vom 20.9.2020 – 10.02.2020.	21
Abbildung 16:	Visuelle Überprüfung des Eisspeichertanks.....	22
Abbildung 17:	Blick durch den Revisionsschacht auf den vollständig vereisten Eisspeichertank (blauer Pfeil) in der Umweltstation. Nur im Randbereich zwischen dem Regenerations-Wärmetauscher und dem Entzugs-Wärmetauscher zur Betonwand ist eine Wassersäule (roter Pfeil) vorhanden.....	23
Abbildung 18:	Datenauswertung des Eisspeicherverhaltens im Zeitraum vom 09.01.2021 bis 15.01.2021.	24
Abbildung 19:	Jahresarbeitszahl (JAZ) nach Anpassung der Heizkurve und der Lüftungseinstellungen (Anfang KW 50/ 2021).....	26
Abbildung 20:	Messdaten der Wirkleistung der Wärmepumpe (gelb, rechte y-Achse), Eisspeichertemperatur Steuersensor (blau, linke y-Achse), Solarabsorbtemperatur (grün, linke y-Achse) und Volumenfluss Solarabsorber (rot, linke y-Achse) im zeitlichen Verlauf vom 16.02.2022 bis 18.02.2022.	27
Abbildung 21:	Die Wirkleistung der Wärmepumpe (blau, rechte y-Achse) und Außentemperatur (rot, linke y-Achse) im zeitlichen Verlauf vom 01.05.2020 bis 01.09.2020.	29
Abbildung 22:	Messdaten der Fußbodenheizung mit Durchfluss in m ³ /h (rot), Vorlauftemperatur (blau), Rücklauftemperatur (grün) und IST-Temperatur der Galerie (orange) im Zeitraum von Anfang März bis Anfang Oktober 2020.	30
Abbildung 23:	Messdaten des Heizwasser-Volumenstroms im Heizregistern in der Lüftungsanlage (rot), Vorlauftemperatur (blau), Rücklauftemperatur (grün) und IST-Temperatur der Galerie in (orange) im Zeitraum von Anfang März bis Anfang Oktober 2020.	31
Abbildung 24:	Messdaten des Lüftungsregisters für Kühlung mit Durchfluss in (rot), Vorlauftemperatur in (blau), Rücklauftemperatur in (grün) und die Außentemperatur in (orange) im Zeitraum von Anfang Juli bis Ende August 2020.	
	32	
Abbildung 25:	Temperaturverlauf für den Eisspeicher (blau), eines Büros (rot) und der Galerie (grün) von Mai bis Oktober 2020.	33

Abbildung 26:	Messdaten für den Steuertempersensor des Eisspeichers (blau), des Büros1 (rot), Vorlauftemperatur der Lüftung (grün) und Außentemperatur (orange) von 01.05.2021 bis 31.08.2021.	35
Abbildung 27:	Screenshot des im Internet verfügbaren Monitorings der Kühlung der Umweltstation in Würzburg mit der Kerntemperatur des Eisspeichers und der Wochensummen der Kühlenergie für März bis Mitte Juli 2021.	36
Abbildung 28:	Screenshot des in diesem Projekt erstmalig entwickeltem live-LCA Monitorings der Umweltstation Würzburg.	37
Abbildung 29:	Präsentation des Eisspeichersystems mit Wärmepumpe als animierte Bildschirmpräsentation in der Umweltstation.	39
Abbildung 30:	Systemschema der Umweltstation aus dem Monitoring. Die roten bzw. grünen Punkte stellen den Betriebszustand (aus/ein) der jeweiligen Komponenten zeitnahe dar.	40
Abbildung 31:	Monitoring-Schema der Umweltstation mit Vorlauftemperaturen (roter Punkt), Rücklauftemperaturen (blauer Punkt) und Wärmemengenzähler (grünes Dreieck).....	40
Abbildung 32:	Beispiel: Ausschnitt aus der Monitoring-Seite der Heizung mit der Temperatur im Eisspeicher und dem Eisanteil (Darstellung geplant, konnte nicht realisiert werden) im oberen Plot und der erzeugten Wärmemenge und dem errechneten COP im unteren Plot als Wochenmittelwert von Kalenderwoche 46/2021 bis 11/2022.	41
Abbildung 33:	LCA Monitoring auf einem Bildschirm in der Umweltstation.	42

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:	Eckdaten zum Neubau der Umweltstation.	8
------------	---	---