



22. November 2021



Eisspeicher Rorguet, Meilen

Schlussbericht zum Pilotprojekt Werkstatt Rorguet, Meilen:

**Saisonspeicherung von Wärme und Kälte in einem
alten Klärbecken als Energiespeicher / Eisspeicher**



Pilotprojekt: Saisonspeicherung von Wärme und Kälte in altem Klärbecken

Subventionsgeber: Kanton Zürich, Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
Abteilung Energie Tel. 043 259 42 66
Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich energie@bd.zh.ch

Objekt: Neubau Werkstatt Rorguet
Seestrasse 931, 8706 Meilen

Projektbearbeitung: Huber Energietechnik AG Tel. 044 227 79 78
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich
Arthur Huber, dipl. Ing. ETH / SIA arthur.huber@hetag.ch
Stefan Eberle, BSc FH stefan.eberle@hetag.ch
Marco Lang, MSc ETH Masch.-Ing. marco.lang@hetag.ch

Projektbeteiligte: **Bauherrschaft:**
NUR Werkstatt AG
c/o NZ AG, Alte Landstrasse 152, 8706 Meilen

Architektur:
NZ AG,
Alte Landstrasse 152, 8706 Meilen

Planung Wärmeerzeugung und MSR:
Huber Energietechnik AG
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich

Internetbasierte Steuerung (Netlogger):
Huber Energietechnik AG
Jupiterstrasse 26, 8032 Zürich

Installation Wärmeerzeugung:
Lampert + Walker AG
Buechstrasse 32a, 8645 Rapperswil-Jona

Eisspeicherwärmetauscher:
Energie Solaire S.A.
Rue des Sablons 8, 3960 Sierre

Kenndaten:

Gebäudenutzung:	Tankstelle / Verkauf (Lebensmittel) / Velogeschäft / Fitness-Studio / Büros
Energiebezugsfläche:	1'436 m ²
Installierte Heizleistung:	60.5 kW (inkl. Warmwasser)
Nutzbare Speichergrösse:	1'700 m ³
Eisspeicher-Platten:	190 m ² (beidseitig nutzbar)

Zusammenfassung

Ausgangslage

Die NUR Werkstatt AG ist Bauherrin des Gewerbehouses an der Seestrasse 931 in Meilen, das auf einem ehemaligen Klärbecken der ARA Meilen errichtet wurde. Das Klärbecken selbst wurde belassen und dient heute als 1'700 m³ grosser Jahreszeiten-Energiespeicher, der im Winter auch als Eisspeicher genutzt werden kann. Im Erdgeschoss befindet sich eine Tankstelle mit Tankstellen-Shop (COOP Pronto Shop), deren Abwärme aus der gewerblichen Kälte sowohl im Sommer, als auch im Winter in den Energiespeicher abgegeben wird. Im Obergeschoss ist ein Velogeschäft und im Dachgeschoss sind ein Fitness-Studio und Büros zu finden.

Das ehemalige Klärbecken wird als Energiespeicher / Eisspeicher für die saisonale Speicherung von Wärme bzw. Kälte genutzt. Der sehr grosse Speicher wird im Heizbetrieb als Wärmequelle für eine Wärmepumpenanlage und im Kühlbetrieb als Wärmesenke genutzt. Solange die Temperaturen im Speicher tief genug sind, erfolgt die Kühlung direkt über den Speicher, liegen die Temperaturen über dem direkt nutzbaren Temperaturniveau, so werden die Wärmepumpen im Kühlbetrieb eingesetzt, mit Rückkühlung in den Energiespeicher (Abb. 1).

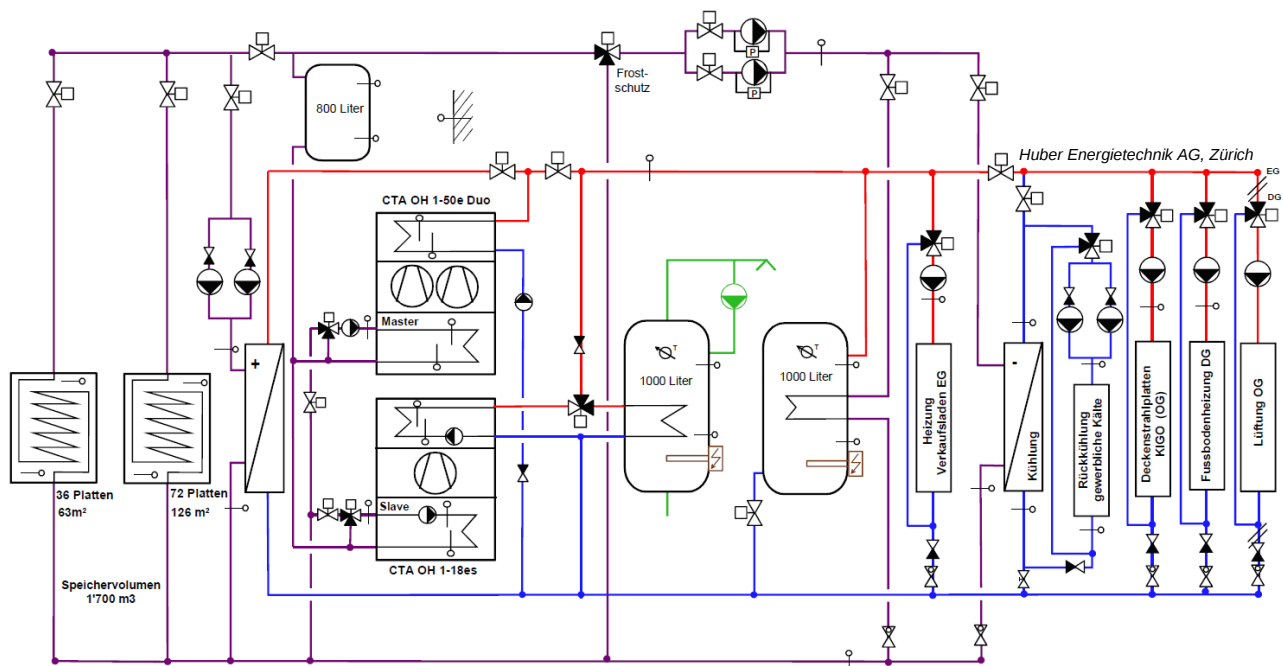


Abb. 1: Schema der Wärme- und Kälteerzeugung und der hydraulischen Einbindung des Energiespeichers.

In der ursprünglichen Planung (mit noch nicht bekannten Gebäudenutzern) wurde von einer beinahe ausgeglichenen Energiebilanz ausgegangen (106 MWh/a Wärme und 86 MWh/a Kälte), womit der Energiespeicher im Winter als Eisspeicher ausgebildet wurde. Als Wärmetauscher wurden vertikale Platten (System ICESOL der Firma Energie Solaire S.A.) installiert. Dieses System zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, durch eine kurze Wärmezufuhr das Eis an den Platten abzulösen zu können, wodurch das Eis dann aufschwimmt und damit die Temperatur im Sole-Kreislauf mit zunehmender Eisbildung nicht ständig absinkt, so wie dies bei den Herkömmlichen Eisspeichern mit Rohrbündel-Wärmeübertrager der Fall ist.

Im Verlauf der Planung wurde das Projekt dann dahingehend geändert, dass im Erdgeschoss eine Tankstelle mit Tankstellen-Shop (COOP Pronto Shop) mit Lebensmittelverkauf eingerichtet werden sollte. Damit fallen nun aus der gewerblichen Kälte grössere Mengen an Abwärme an, so dass die Energiebilanz des Gebäudes einen wesentlich grösseren Kühlbedarf als Wärmebedarf vorsieht. Leider erwies sich die durch die Mieter selbst ausgewählte und eingebaute Kältemaschine der gewerblichen Kälte als recht ineffizient, so dass sich in der ausgewerteten Periode der ersten 15 Betriebsmonate ein Wärmeentzug aus dem Energiespeicher von 36 MWh ein Wärmeeintrag von 175 MWh gegenüberstanden. Der Wärmebezug der Verbraucher betrug 103 MWh und der Kältebezug 193 MWh. Vom Mieter durchgeführte Optimierungen an der gewerblichen Kälte-Anlage haben die Effizienz zwischenzeitlich zwar verbessert, noch immer ist aber der der Wärmeeintrag in den Energiespeicher massiv grösser als der Wärmeentzug (Abb. 2):

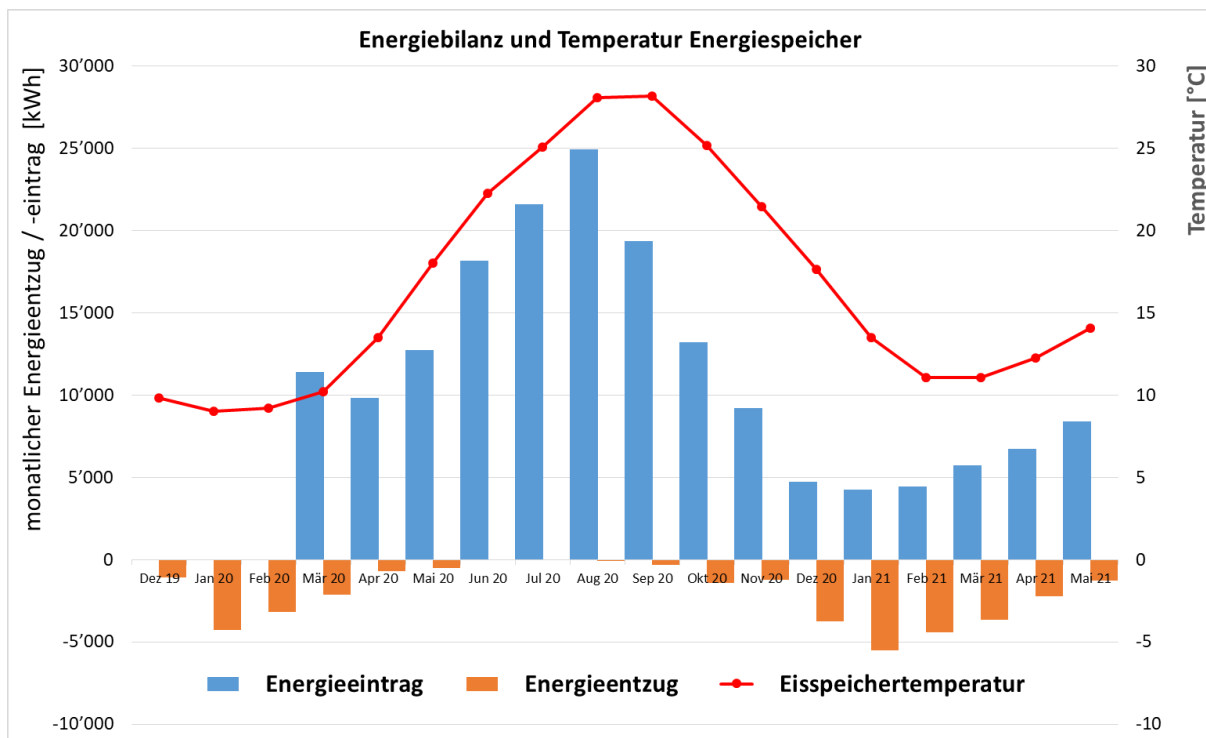


Abb. 2: Gemessene Energiebilanz und Temperaturen im Energiespeicher / Eisspeicher

In der betrachteten Periode lagen die minimale Temperatur im Energiespeicher bei 7.9 °C und die maximale Temperatur bei 30.2°C. Um die Energiebilanz ein wenig auszugleichen, wurde das Dachwasser (Regenwasser) in den Speicher geführt, mit Überlauf in den See (womit auch eine minimaler Wasseraustausch im Speicher gewährleistet ist). Der wichtigste Ausgleich der Wärmebilanz geschieht aber über den Wärmefluss der nicht gedämmten Aussenhülle des Energiespeichers. Der optional vorgesehene Anschluss von unverglasten Sonnenkollektoren auf dem Gebäudedach wurde nicht realisiert.

Die ausgeführte Anlage wird über eine frei programmierbare Steuerung (Typ Netlogger, www.hetag.ch) gesteuert und überwacht. Die Steuerung mit integriertem Webserver ist passwortgeschützt über das Internet fernwartbar und verfügt über ein integriertes Trending und Alarming (kein Cloud-Dienst erforderlich, alle Daten sind lokal gespeichert). Alarmmeldungen werden zeitverzugslos über Email an die definierten Empfänger weitergeleitet. Die Bedienung basiert auf HTML5, womit sie über jeden aktuellen Browser bedienbar ist und keinen Leitrechner vor Ort erfordert.

P&D-Projekt

Das Projekt wurde als Pilot- & Demonstrationsprojekt des Kantons Zürich ausgewählt. Dabei wurden die relevanten Systemtemperaturen, sowie die Energieströme zwischen der Anlage und dem Eisspeichers gemessen und ausgewertet. Die gesammelten Daten sind Grundlage für die Überprüfung der Auslegungsparameter eines Eisspeichers. Zusätzlich sollte mit speziellen Versuchen auf der realen Anlage eine Regelstrategie für einen optimalen Abtauungsprozess der Eisschichten an den Platten-Wärmetauschern erarbeitet werden und eine Korrelation zwischen den internen Wärmepumpendaten und der Eisbildung erstellt werden.

Um eine Eisbildung erzwingen zu können, wurde die Anlage so aufgebaut, dass der ganze Wärmebedarf über nur 1/3 der installierten Wärmetauscher entzogen werden kann. Ende Winter 2021 wurden mehrwöchige Versuche unter diesen Randbedingungen gefahren. Die Energiebilanz verunmöglichte sogar unter diesen Randbedingungen die Eisbildung auf den Wärmetauscher-Platten. Aus diesem Grund musste die Zielsetzung für das P&D-Projekt (in Absprache mit dem AWEL) angepasst werden. Der Fokus der Auswertung soll nun auf der Erarbeitung eines Modells zum Wärmeaustausch an der Aussenwand des Energiespeichers und einer Validierung dieses Modells liegen.

Resultate

Der Wärmeaustausch zwischen Eisspeicherwand und umliegendem Erdreich wurde im Betrachtungszeitraum auf -10 kW (Wärmeeintrag) bis +30 kW (Wärmeabgabe) berechnet. Der Wärmeverlust über den Betrachtungszeitraum wurde auf 100 MWh/a berechnet (Abb. 3):

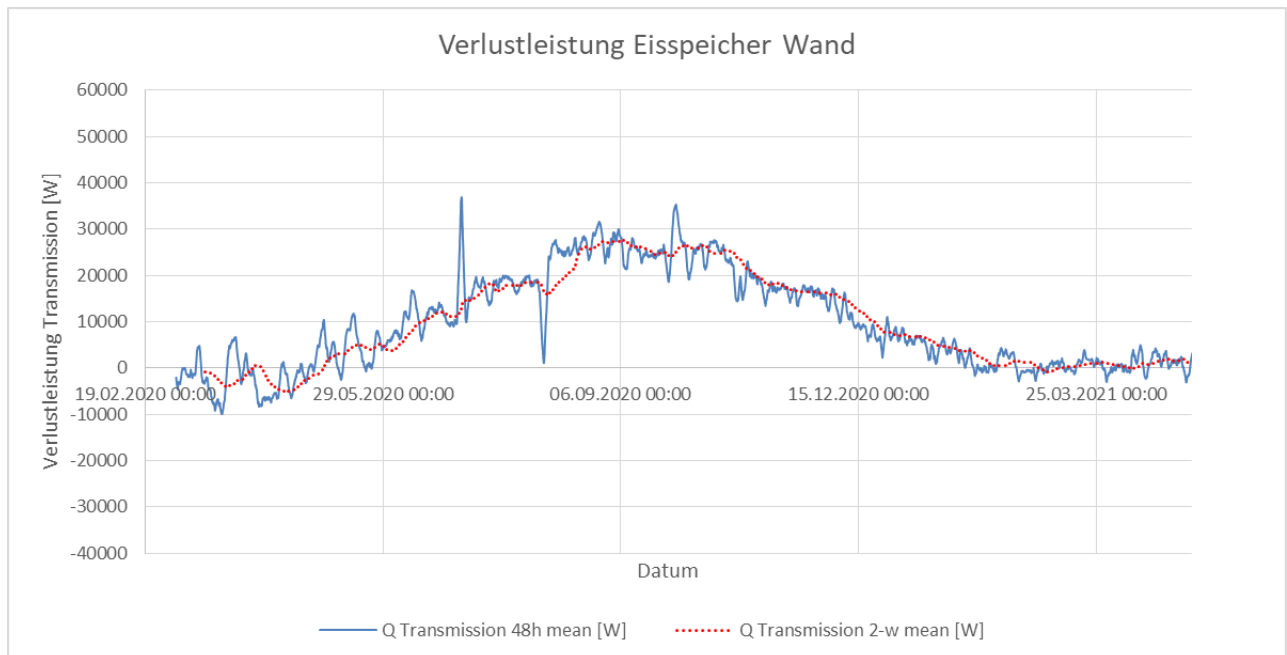


Abb. 3: Wärmeaustausch des Energiespeichers mit dem Umgebenden Erdreich ermittelt mittels Modell aus den Messwerten.

Die Verluste durch das zugeführte Dachwasser wurden auf 17 MWh berechnet und die Verluste durch die Belüftung auf 11 MWh. Total machen die Transmissionsverluste über 75 % der gesamten Verluste des Eisspeichers.

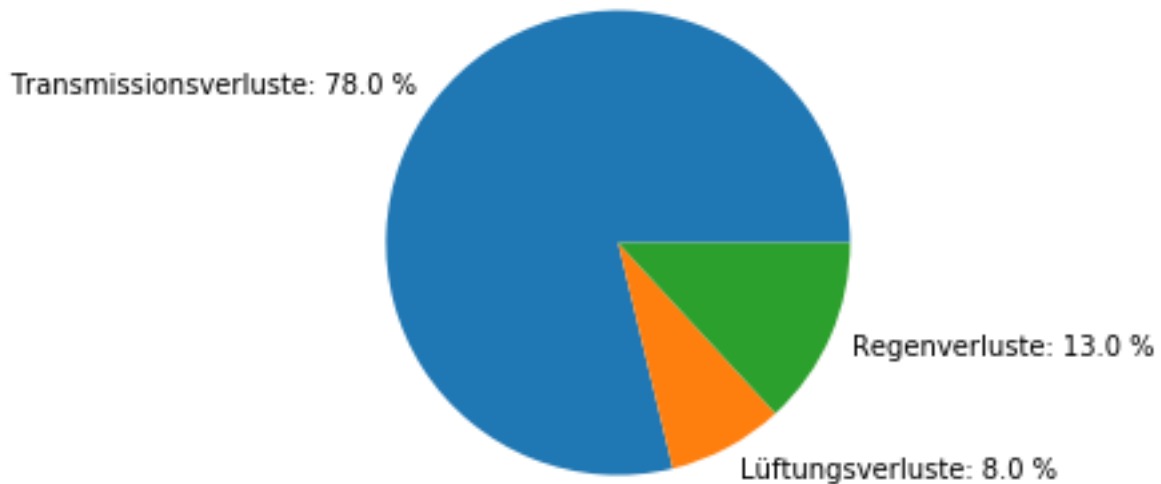


Abb. 4: Wärmeverluste des Energiespeichers Rorguet in der Jahresbilanz

Auf der Grundlage der mit den Messdaten berechneten Wärmeverluste des Eisspeichers wurde ein Modell für die Vorhersage des Temperaturverlaufes im Eisspeicher aufgestellt. Das Modell berücksichtigt dabei vorgegebene Profile für Wärmeeintrag und Wärmeentzug der Anlage, Transmissionsverluste, Lüftungsverluste und Verluste durch zugeführtem Regenwasser. Für jeden Verlust wurde eine Funktion erstellt, welche die Verluste berechnen. Mit dem vorgeschlagenen Modell konnten die Eisspeichertemperaturen für das Projekt Rorguet mit einer Retrodiktion bei einem maximalen Fehler von 2.6 °C und einem mittleren Fehler von 0.1 °C berechnet werden.

Erkenntnisse

Im Folgenden werden die Kernerkenntnisse aus diesem Projekt aufgelistet:

- Mittels Aktivierung des Erdreichs um den Eisspeicher (Eisspeicherwand ohne Isolation) kann die thermische Kapazität signifikant erhöht werden. Ohne die Aktivierung des umliegenden Erdreiches wären die Eisspeichertemperaturen bis auf ca. 60 °C angestiegen.
- Die Transmissionsverluste machen mit Abstand den grössten Teil der Verluste aus. Das Belüftung und Zuführen von Regenwasser kann thermische Kapazität noch leicht vergrössern.
- Mittels einfachem Modell lassen sich die Eisspeichertemperaturen mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Grösste Unsicherheit sind dabei die Wärmeeinträge und Wärmeentzüge der Anlage selbst sowie wieviel gleichzeitiger Kälte- und Wärmebedarf von der Anlage ohne das Zuschalten des Eisspeichers umgesetzt werden kann.
- Das Konzept hat sich für die Anlage des Rorguet bewährt. Das vorhandene Wasservolumen war grösser als nötig und konnte deshalb den grösser als erwarteten Überschuss an Abwärme aus gewerblicher Kälte problemlos abfangen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1 Anlagenbeschrieb	8
1.1 Gebäude.....	8
1.2 Berechneter Energiebedarf	10
1.3 Eisspeicher	11
1.4 Wärme / Kälteabgabe	13
1.5 Hydraulik und Wärmepumpen.....	15
1.6 Messkonzept Eisspeicher	16
2 Energiebilanzen	18
2.1 Projektphase: Konzept und Simulation	18
2.2 Gemessene Energiewerte Jan 2020 bis Mai 2021	20
2.3 Temperaturverlauf im Eisspeicher.....	22
3 Regel- und Messsequenzen	23
3.1 Funktionszustände.....	23
3.2 Details Abtaubetrieb und Detektieren Eisdicke	28
4 Resultate – Modell Auslegung Eisspeicher	29
4.1 Kontrollvolumen	29
4.2 Wärmeströme und Energiebilanz Eisspeicher.....	30
4.3 Modellbeschrieb.....	32
4.4 Vergleich Modell / Messung	33
5 Schlussfolgerung	34

1 Anlagenbeschreibung

1.1 Gebäude

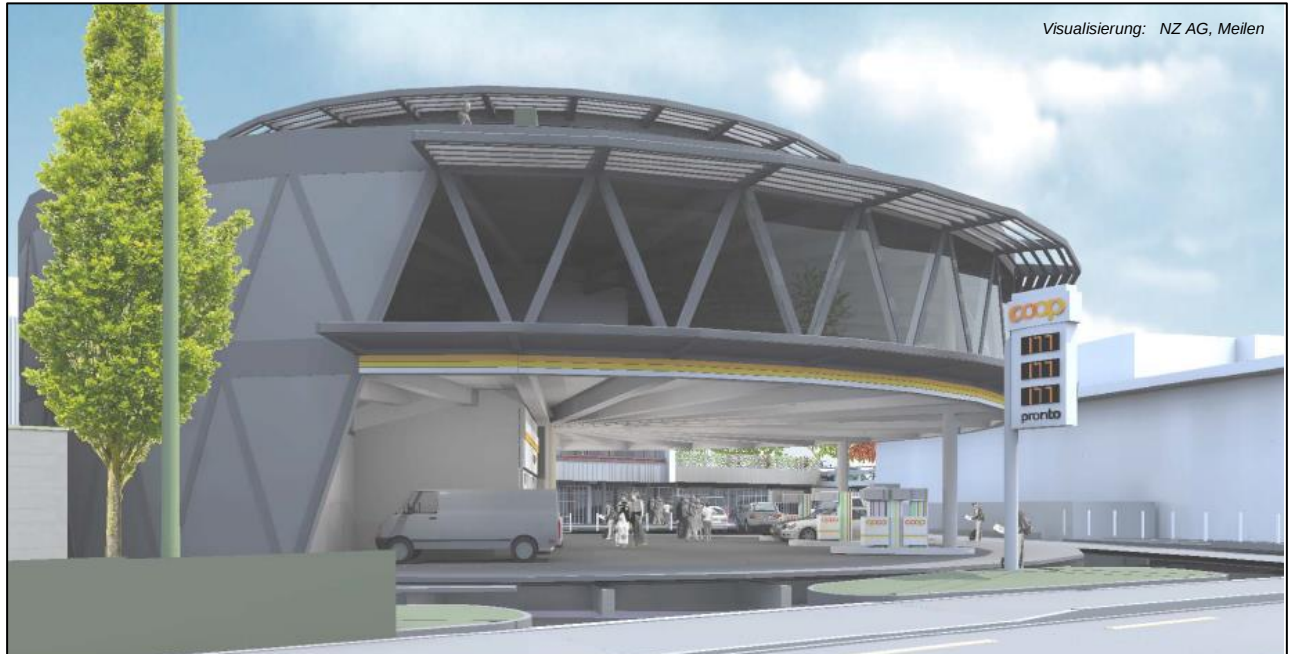


Abbildung 1-1: Gebäudekonzept mit Tankstelle im EG, Verkaufs im 1. OG sowie Fitness und Wohnen im DG.

Der Neubau der Werkstatt Rorguet entstand auf einem ehemaligen Klärbecken der ARA Meilen, direkt an der Seestrasse in Obermeilen. Im Erdgeschoss befindet sich eine Coop-Tankstelle, das 1.OG wird als grosse Gewerbefläche genutzt und im Dachgeschoss befinden sich ein Büro sowie ein Fitnesscenter. Die Südwest-Fassade ist gegen die Seestrasse ausgerichtet und im Erdgeschoss sowie im Obergeschoss vorwiegend als Schaufenster für die Tankstelle ausgebildet.



Abbildung 1-2: Das Gebäude kurz nach der Eröffnung.



Abbildung 1-3: Dachgeschoss mit Eingang Technik und Fassade Büro (mit aussenliegenden Lamellenstoren).

Die Wohnung und das Fitnesscenter im Dachgeschoss verfügen fast komplett über eine 360° Glasfassade. Aufgrund der Ausrichtung der Schaufenster, des hohen Glasanteils und der Nutzung muss das ganze Gebäude im Sommer gekühlt werden. Aufgrund des Tankstellenshops im Erdgeschoss muss zusätzlich während des ganzen Jahres Abwärme der Kältemaschinen (Nicht Teil der Gebäudetechnik, Mieterausbau) abgeführt werden.

Das ehemalige Klärbecken bildet das Untergeschoss des Baus und wird als Eisspeicher (Details Kapitel 2.2) genutzt.

1.2 Berechneter Energiebedarf

Der Heizenergiebedarf des Gebäudes wurde mittels Systemnachweis nach Norm SIA 380/1:2009 berechnet. Die EBF umfasst 1'436 m² und weisen einen Heizwärmebedarf von 199.9 MJ/m² auf.

Die Auslegung der Wärme- und Kälteerzeugungsanlage erfolgten für die die Stockwerke OG und DG nach den Ergebnissen des Systemnachweises (217 MJ/m² für total 1159 m² EBF). Der Wärmebedarf (Heizenergie und Warmwasser) für das EG wurde von Coop Mineralöl vorgegeben (921 MJ/m² für total 277 m² EBF).

Für den Warmwasserbedarf wurde für das DG ein Wert von 25 MJ/m² und für das OG ein Wert von 50 MJ/m² in der Planung angenommen. Für die Auslegung der Anlage wurde das Flächengewichtete Mittel von 32 MJ/m² verwendet. Für das EG ist der Warmwasserbedarf bereits im Wärmebedarf eingerechnet.

Tabelle 1-1: Energiebilanzen aus Projektphase als Grundlage für die Auslegung der Wärme- und Kälteerzeugungsanlage.

Heizwärmebedarf

Transmission + Lüftung	69875 kWh/a
Verluste	3494 kWh/a
Coop	58100 kWh/a
Heizwärmebedarf	131469 kWh/a

Warmwasser

Warmwasserbedarf	10302 kWh/a
Verluste	2575.5 kWh/a
Bedarf total	12877.5 kWh/a

Kühlbedarf

OG und DG	36000 kWh/a
Luftwechsel	8400 kWh/a
Coop	102400 kWh/a
Kühlbedarf Total	146800 kWh/a

Wärmeentzug

COP_h durchschnitt	5.37
Entzug Heizung	106987 kWh
COP_ww durchschnitt	3.7
Entzug Warmwasser	9397 kWh
Entzug total:	116384 kWh
davon Okt-Apr	105198 kWh

Wärmeeintrag

Passivkühlung	71006 kWh/a
EER durchschnitt	6.8
Wärmeeintrag Aktivkühlung	86940 kWh/a
Wärmeeintrag total:	157946 kWh/a

1.3 Eisspeicher

Das gesamte Gebäude wurde über dem ehemaligen Klärbecken errichtet. Das Klärbecken wurde zum Eisspeicher umfunktioniert und dient als Energiespeicher- und Quelle für die beiden Wärmepumpen.

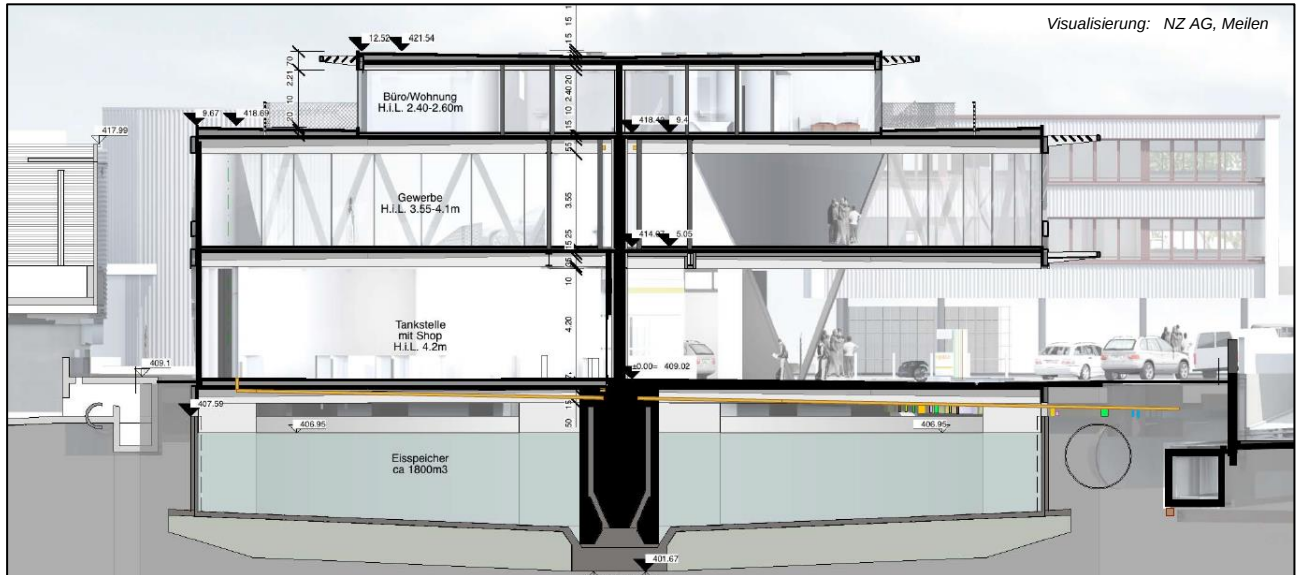


Abbildung 1-4: Ausschnitt aus der Konzeptphase. Schnitt durch das Gebäude. Das ehemalige Klärbecken im Untergeschoss wird als Eisspeicher genutzt.

Das Becken wurde mit unbehandeltem Leitungswasser und Regenwasser gefüllt und fasst nun ca. 1'700 m³ Wasser. Es handelt sich um ein offenes Becken mit Regenwasser Zufluss und Überlauf. Zur Wärmeübertragung wurden Wärmetauscherplatten von Energie Solaire SA eingesetzt.



Abbildung 1-5: Einbau der Wärmetauscherplatten von Energie Solaire SA.

Die Wärmetauscherplatten wurden in Paketen à 6 Platten verbaut. Total werden 18 Pakete mit total 108 Platten verbaut. Die Pakete wurden am Rand des Beckens verteilt.

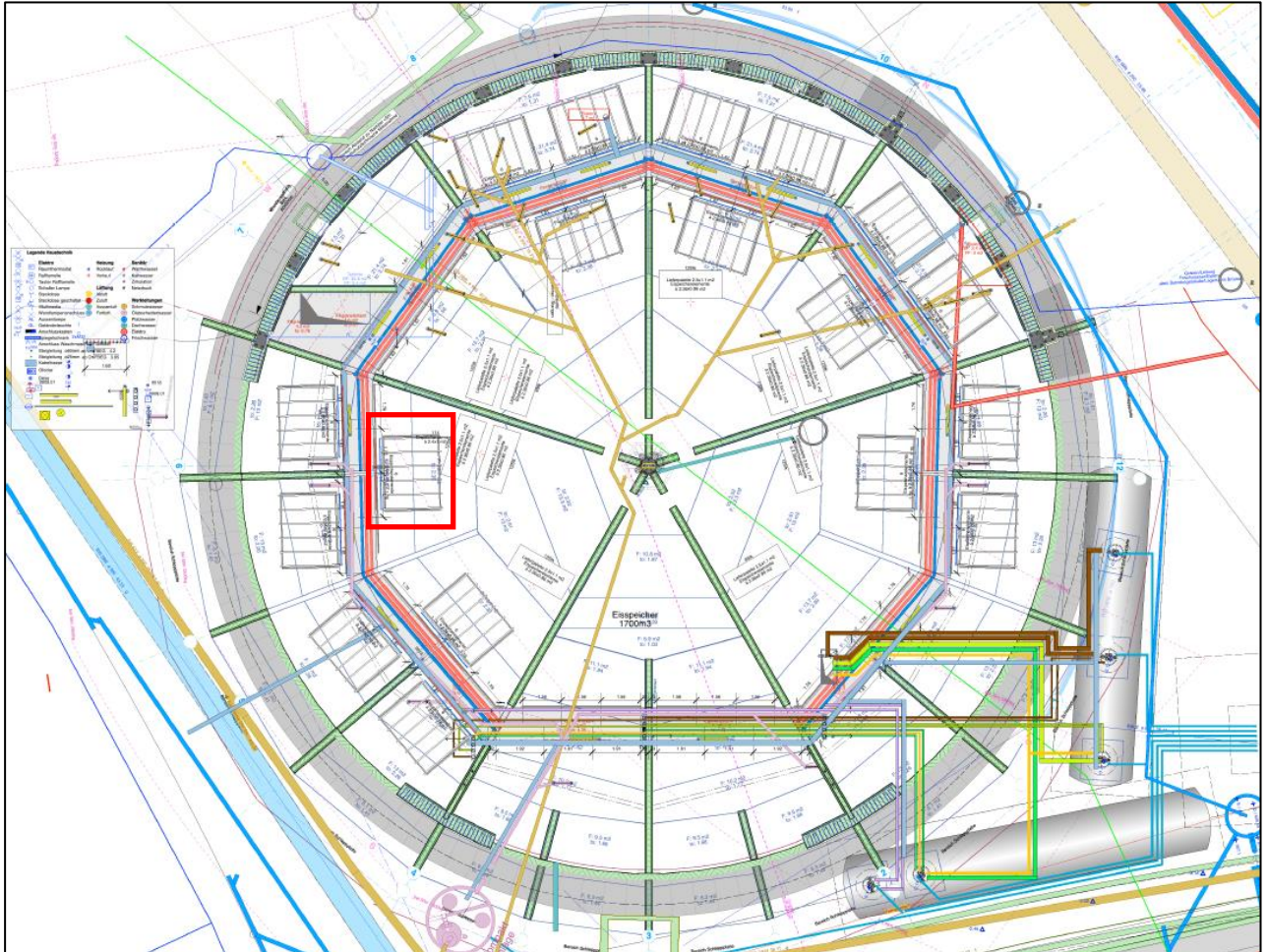


Abbildung 1-6: Sicht auf den Eisspeicher mit den verbauten Wärmetauschern (Paket rot markiert).

Der Eisspeicher wird zur Verhinderung von Geruchsbildung und Entfernung von möglichen entstandenen Gasen aus organischen Prozessen mechanisch belüftet. Es wird eine konstante Luftmenge von 500 m³/h gefahren. Die Abluft entweicht natürlich über Schächte am Rande des Beckens.

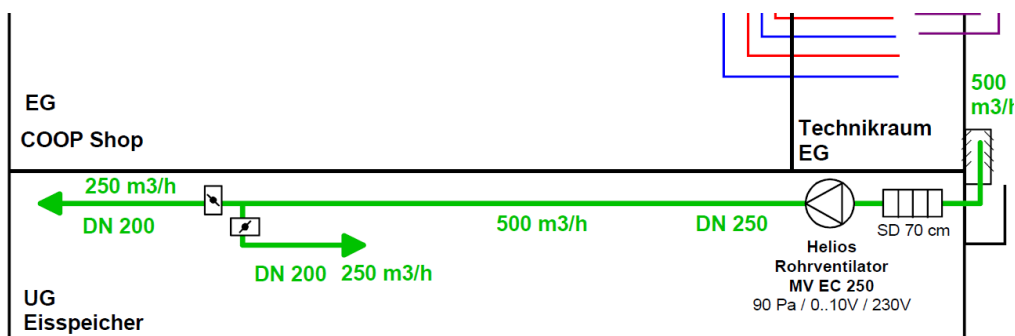


Abbildung 1-7: Lüftungsschema Zuluft Eisspeicher: Verhinderung von Gerüchen und Gewährleistung Frischluft.

1.4 Wärme / Kälteabgabe

1.4.1 EG / Lebensmittelladen

Im EG befindet sich der Lebensmittelladen. Die Wärme/Kälte wird mittels Umluft-Deckenkassetten abgegeben. Die Abwärme wird direkt mittels Einbindung des Verdampferkreises der Kältemaschine abgenommen. Die Kältegruppe „Abwärme“ der Eisspeicher Anlage ersetzt sozusagen den Rückkühler der Kältemaschine.



Abbildung 1-8: Deckenkassetten Lebensmittelladen



Abbildung 1-9: Kältemaschine Lebensmittelladen

1.4.2 1. OG / Gewerbe

Im 1. OG erfolgt die Wärme/Kälte Abgabe hauptsächlich mittels Deckenstrahlplatten. Zusätzlich ist in der Lüftungsanlage ein Change-Over Register installiert.



Abbildung 1-10: Deckenstrahlplatten im 1. OG



Abbildung 1-11: Deckenstrahlplatten im Heizbetrieb

1.4.3 DG Büro & Fitness

Das Dachgeschoss wird über eine Fussbodenheizung im Change-Over Betrieb beheizt und gekühlt. Zusätzlich verfügt der Bereich Fitness und der Bürobereich jeweils über eine eigene Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung.



Abbildung 1-12: FBH im Dachgeschoss



Abbildung 1-13: Lüftungsgerät für Bürobereich

1.5 Hydraulik und Wärmepumpen

1.5.1 Anforderungen und Grundkonzept

Das Gebäude selbst wie auch die Nutzung bringen gewisse Anforderungen an die Haustechnik mit. Aufgrund des hohen Glasanteils des Gebäudes müssen alle Bereiche im Sommer gekühlt werden um eine Überhitzung zu verhindern.

Im Lebensmittelgeschäft im Erdgeschoss fällt das ganze Jahr über Abwärme an, welche abgeführt werden soll. Ebenfalls muss, falls nötig, das ganze Jahr hindurch Wärmebereitgestellt werden können. Da der Lebensmittelladen nicht über eine interne Abwärmenutzung verfügt muss sämtliche Abwärme während des ganzen Jahres abgeführt werden können.

Die Kombination von reinen Heiz- und Kühlgruppen für das Erdgeschoss und die Change-Over Gruppen des restlichen Gebäudes stellen erhöhte Anforderungen an die Hydraulik.

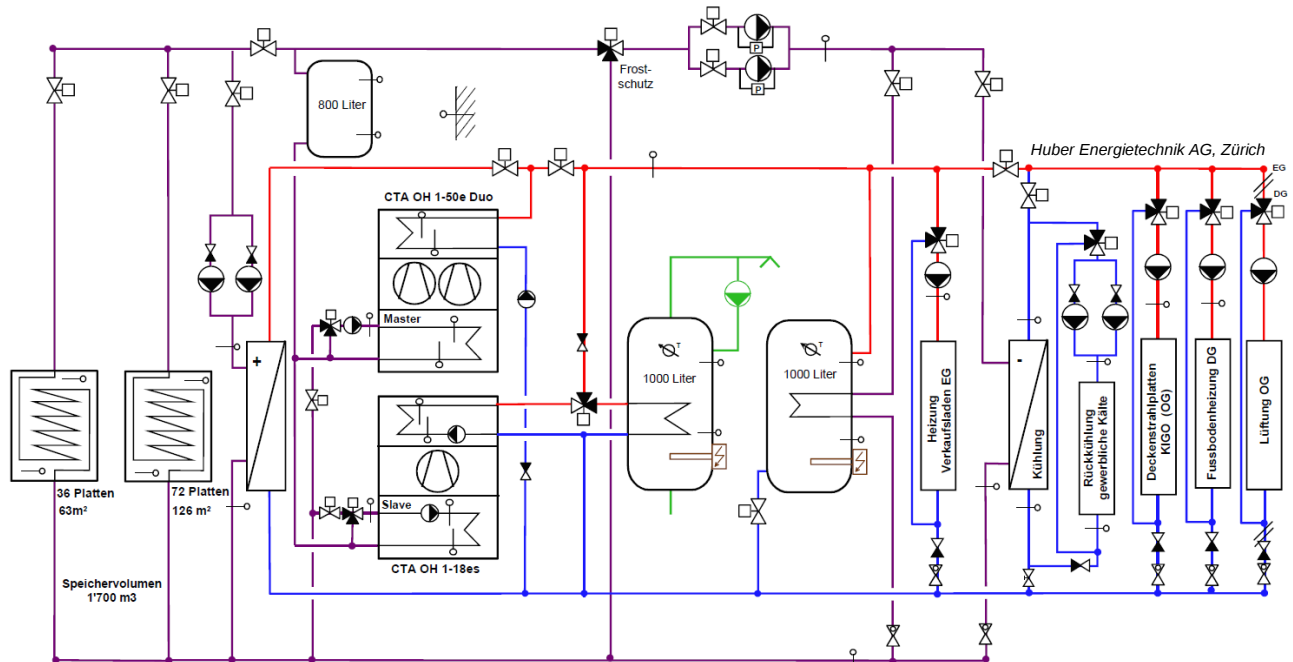


Abbildung 1-14: Hydraulisches Schema der Wärme- und Kälteerzeugung mit Energiespeicher / Eisspeicher

Das Grundkonzept sieht vor, dass dem Eisspeicher im Winter mittels den beiden Wärmepumpen Wärme entzogen und im Sommer durch die Kühlung des Gebäudes wieder Wärme eingebracht wird. Sollte die Temperatur im Eisspeicher zu stark ansteigen und ein passiver Kühlbetrieb nicht mehr möglich sein, sollen die Wärmepumpen zur aktiven Kühlung eingesetzt werden können. Wenn möglich soll aber direkt über den Eisspeicher gekühlt werden.

Es wird ein seriell eingebundener Kältespeicher verwendet. Ebenfalls wird die Heizgruppe und die Kühlgruppe, welche ganzjährig in Betrieb sind, vor den Change-Over Gruppen installiert. Die Wärme für das Abschmelzen der Eisplatten soll aus dem Pufferspeicher entnommen werden.

Die detaillierten Funktionsbeschreibungen sind im Kapitel „Funktionsbeschreibung“ aufgeführt.

1.5.2 Master-Slave Schaltung

Bei einer Master-Slave-Schaltung, wie bei dieser Anlage realisiert, dient die Master-Wärmepumpe ausschliesslich der Bereitstellung der Heizwärme und der aktiven Kühlung im Sommer. Die Slave-Wärmepumpe erwärmt in erster Linie das Trinkwasser im Speicher und kann bei Bedarf die Master-Wärmepumpe bei der Raumheizung unterstützen.

Mit dieser Schaltung wird vermieden, dass eine leistungstärkere Spezialwärmepumpe eingebaut werden muss. Diese hätte den Nachteil, dass ihre für den Auslegungsfall dimensionierte Leistung im Normalfall zu gross ist. Das würde dazu führen, dass die Wärmepumpe während der längsten Zeit ihres Betriebes nicht unter optimalen Bedingungen liefe, da Leistungsbedarf und Potenzial der Wärmepumpe weit auseinanderlügen.

Die eingebauten Wärmepumpen werden in grosser Stückzahl hergestellt. Zwei Wärmepumpen sind deshalb nur unwesentlich teurer als eine grosse Wärmepumpe, passen aber besser auf die notwendige Heizlast. Dank der Master – Slave - Schaltung können innenliegende Wärmetauscher für die Brauchwassererwärmung verwendet werden, was einen Tauscher und eine Pumpe einspart.

1.6 Messkonzept Eisspeicher

Um den Betrieb der Anlage, speziell des Eisspeichers zu überwachen, wurden zahlreiche Energiezähler (M-1 bis M-8) installiert:

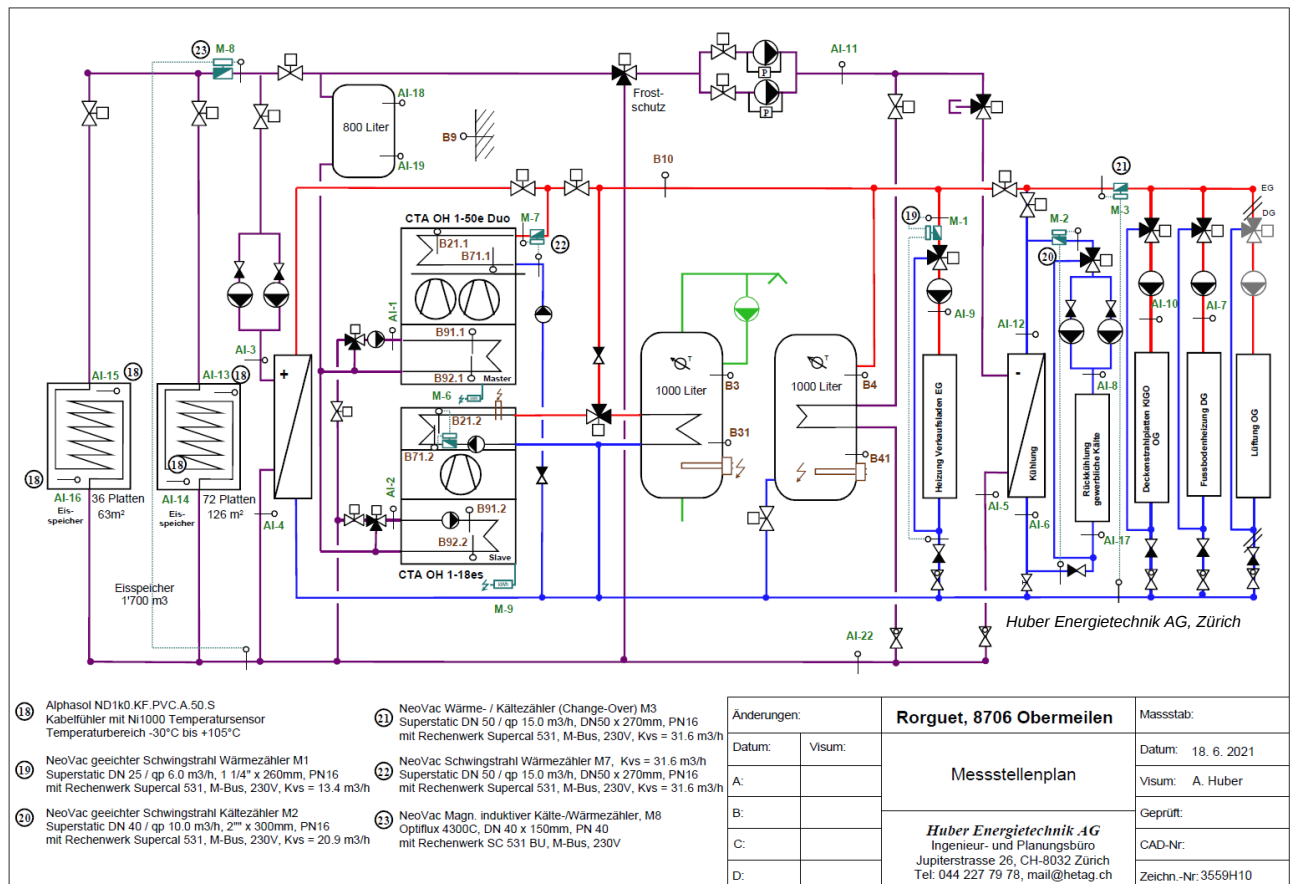


Abbildung 1-15: MSR-Schema und Messstellenplan

Nebst den Energiezählern wurden im Eisspeicher spezielle 4-Leiter PT1000 Temperatursensoren der Firma Alphasol installiert (AI-13 – AI-15) um die Temperaturen im Eisspeicher trotz der Leitungslängen exakt aufnehmen zu können.

1.6.1 Energiezähler Eisspeicher

Der Eisspeicher wird je nach Betriebsart in beide Richtungen durchflossen. Ebenfalls kann je nach Betriebsart in beide Richtungen Energie entzogen und eingetragen werden. Dies erfordert einen speziellen Energiezähler mit einem Rechenwerk welches in beide Richtungen sowohl Entzug wie auch Eintrag messen konnte. Dies wurde mit einem Optiflux 4300 Durchflussgeber der Firma Krohne und zwei Rechenwerke Typ SC531 BU der Firma Neovac gelöst. Ein spezielles Relais schaltet den Durchflussgeber je nach Durchflussrichtung auf das entsprechende Rechenwerk um.

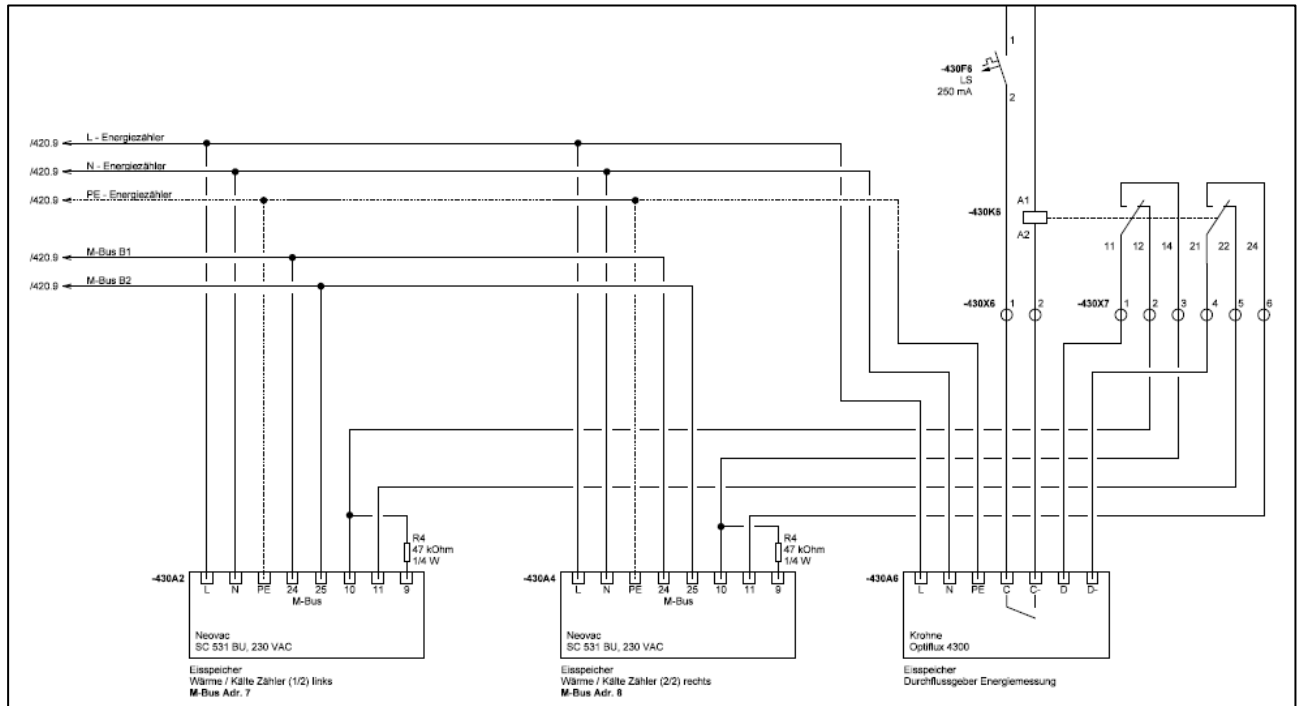


Abbildung 1-16: Ausschnitt aus dem MSR-Anschlussschema. Anschluss der beiden Rechenwerke und des Durchflussgebers zur Energiemessung des Eisspeichers

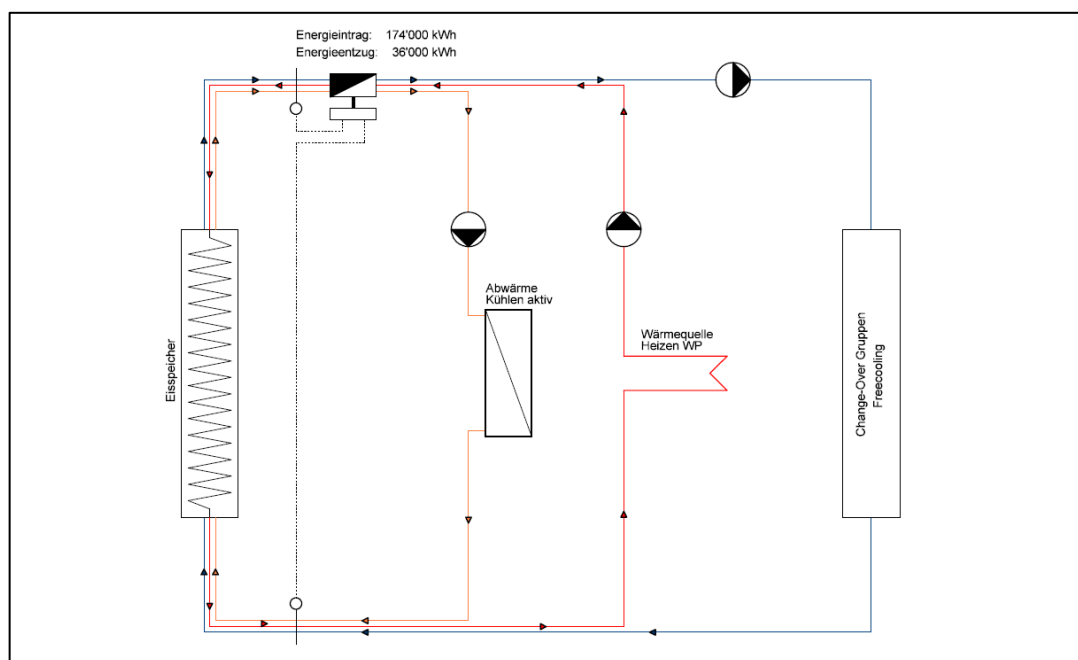


Abbildung 1-17: Durchfluss und Messprinzip des Eisspeichers.

2 Energiebilanzen

2.1 Projektphase: Konzept und Simulation

Der Temperaturverlauf im Eisspeicher wurde mit den in Kapitel 1.2 gezeigten Werten für die Energiebilanz mittels einfachem Modell vorhergesagt. Im Modell wurden die monatlichen Wärmeeintrags- und Wärmeentzugsenergien der Anlage sowie ein Wärmeaustausch zwischen Eisspeicher und Umgebung berücksichtigt.

Die Entzugsenergie der Anlage wurde, in Abhängigkeit der Eisspeichertemperatur mit einem COP zwischen 4.5 und 6 berechnet. Die Eintragsenergie der Anlage wurde mit einem EER von 5.8 berechnet. Bei gleichzeitigem Heiz- und Kühlbedarf wurde mit Direktkühlung gerechnet, sofern die Eisspeichertemperatur unter der von der Kühlung geforderten 17 ° lag.

Bei Eisspeichertemperaturen unter 0 °C wurde die Kristallisationsenthalpie des Wassers berücksichtigt und ein Eisanteil im Eisspeicher berechnet.

Der Wärmeaustausch zwischen Eisspeicher und Umgebung wurde für die benetzte Fläche (ca. 1000 m²) berücksichtigt. Der Wärmeaustausch zwischen Wasser und Luft wurde in der Projektphase vernachlässigt. Der Wärmeaustausch wurde quasi-stationär mittels Temperaturdifferenz zwischen Eisspeichertemperatur und Jahresmitteltemperatur der Luft und einem U-Wert für die Eisspeicherwand (inkl. der aktivierten Erde im Bereich von 1 m um den Eisspeicher) berücksichtigt. Die Berechnung des U-Wertes wird in Abbildung 2-1 gezeigt.

No	Bezeichnung:	⇒	U-Wert total:	ϑ_{oi}
1	Eisspeicherwand		0.80 W/m²K	
		d [cm]	α / λ	R
1	Wärmeübergang Wasser		250	0.00
2	Beton (Stahlbeton, 1% Stahl)	30	2.3	0.13
3	Erde	100	0.9	1.11

Abbildung 2-1: Berechnung U-Wert Eisspeicherwand; Es wurde ein vom Eisspeicher beeinflusster Bereich von 1 m um den Eisspeicher angenommen.

Die Auswertung der durchgeführten Messungen (cf. Kapitel 4.2.2) hat ergeben, dass diese Annahme zu konservativ war und dass im vorliegenden Fall eher mit einem U-Wert von ca. 1.6 W/mK an der Aussenwand des Energiespeichers gerechnet werden kann. Mitbegünstigt wird dieser höhere Wert vermutlich auch durch das vorhandene Grundwasser im Lockergestein mit einer leichten Strömung gegen den See hin (cf. Abbildung 2-2):

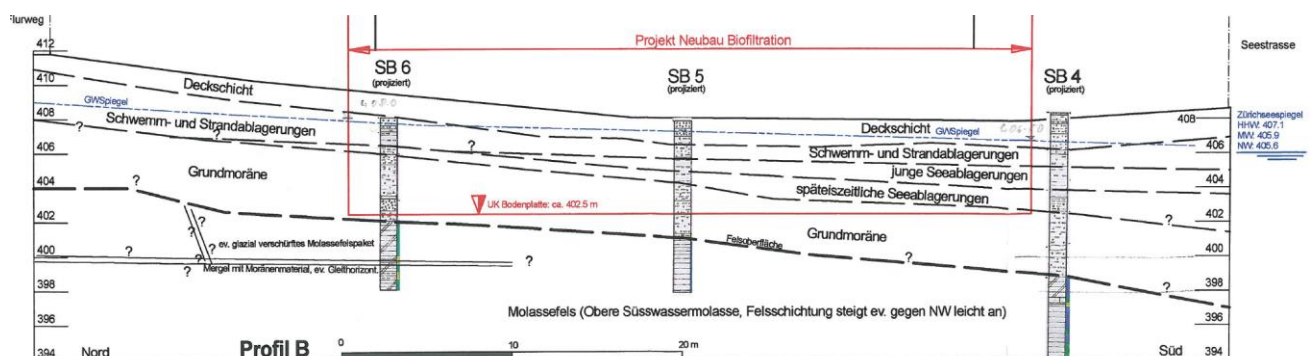


Abbildung 2-2: Auszug aus der Baugrunduntersuchung der ARA Meilen (Dr. Vollenweider AG, Juni 2008)

Abbildung 2-3 zeigt den in der Projektphase berechneten Temperaturverlauf der mittleren Eisspeichertemperatur für die ersten zwei Betriebsjahre. Es wurde eine minimale Temperatur von ca. 3 °C und eine maximale Temperatur von 38 °C. Der Eisspeicher lag damit in einem Temperaturbereich der für den Betrieb mit Wärmepumpen zulässig war.

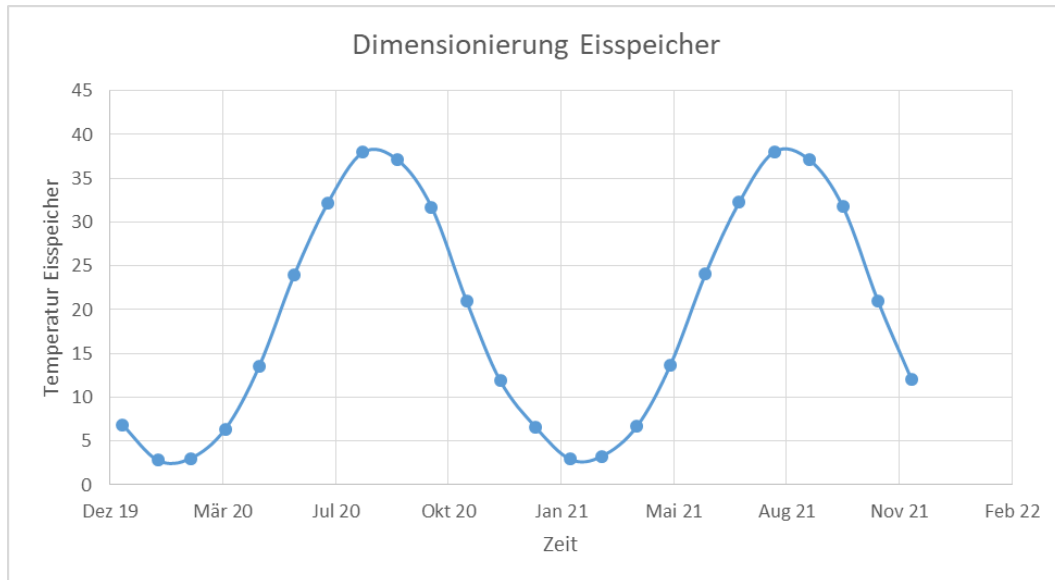


Abbildung 2-3: Berechneter Temperaturverlauf der mittleren Eisspeichertemperaturen mit Energiebilanz aus der Projektphase mit Kältebedarf gemäss Angabe Lebensmittelladen

Aufgrund von Unsicherheiten betreffend dem Umfang der anfallenden Abwärme aus der gewerblichen Kälte des Lebensmittelladens im Erdgeschoss wurde eine Worst-Case Berechnung mit nur 50 % des Kältebedarfs durchgeführt. Mit dem reduzierten Abwärmeeinfall wurde eine minimale Eisspeichertemperatur von 0 °C mit ca. 4 % Eisanteil und eine Maximale Temperatur von 31 °C berechnet.

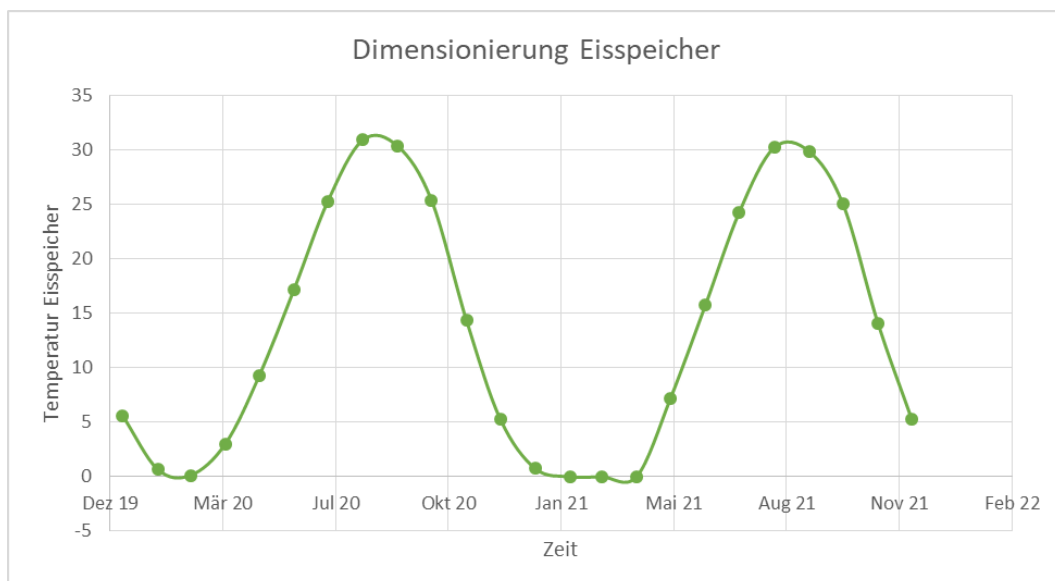


Abbildung 2-4: Berechneter Temperaturverlauf der mittleren Eisspeichertemperaturen mit einer Worst-Case Energiebilanz für den Heizbetrieb (fehlende Abwärme aus Gewerbekälte).

2.2 Gemessene Energiewerte Jan 2020 bis Mai 2021

Anders als in der Konzeptphase angegeben fiel die Abwärme des Lebensmittelgeschäftes um ein Vielfaches höher aus. Dadurch stiegen die Temperaturen des Eisspeichers zeitweise auf über 30 °C in den Sommermonaten.

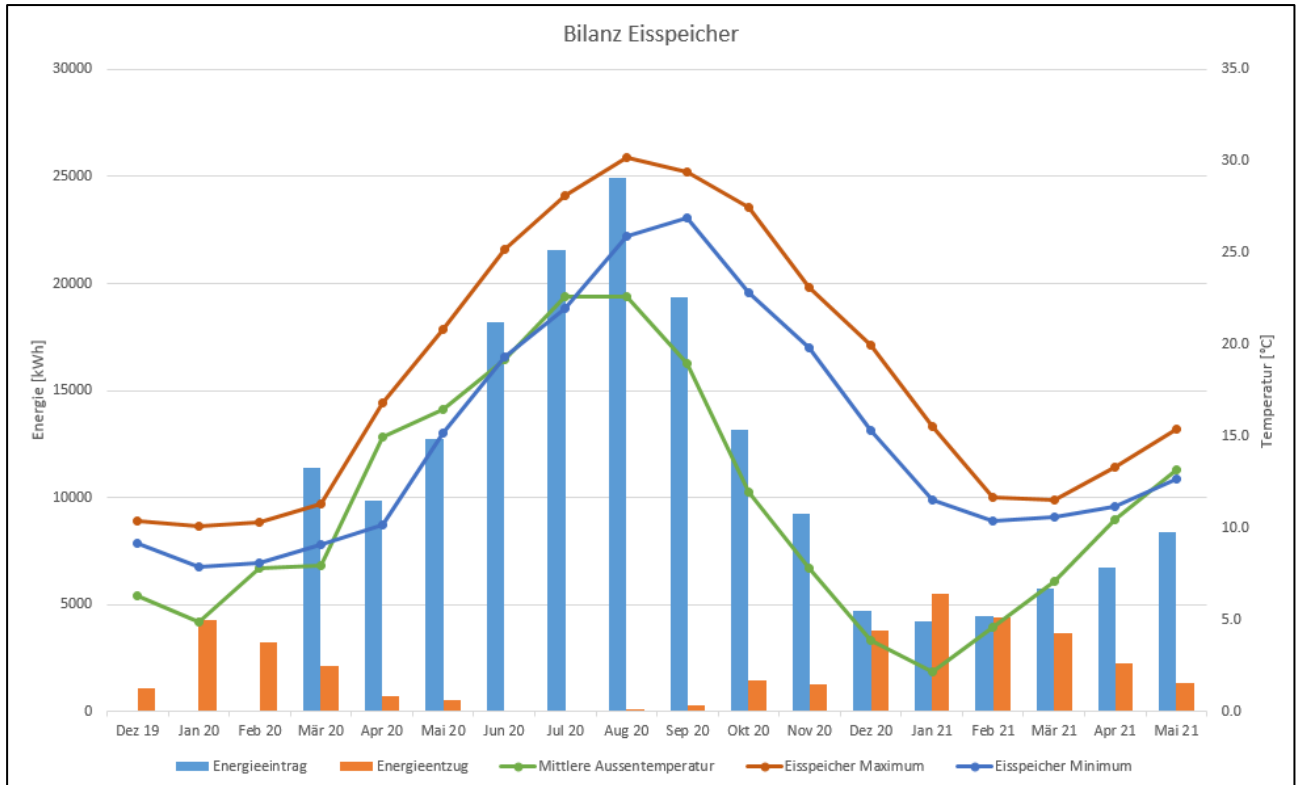


Abbildung 2-5: Bilanz Eisspeicher. Min/Max Temperaturen, Energieeintrag- und Entzug sowie mittlere Aussentemperatur.

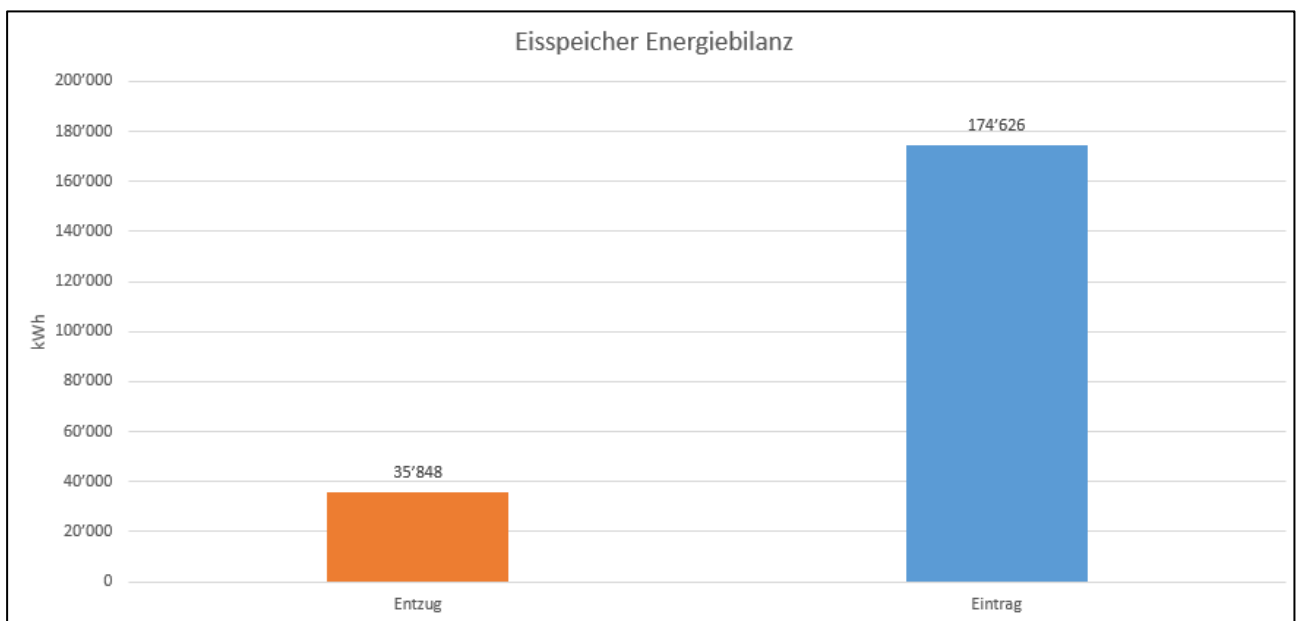


Abbildung 2-6: Bilanz Eisspeicher. Verhältnis zwischen Energieentzug und Energieeintrag.

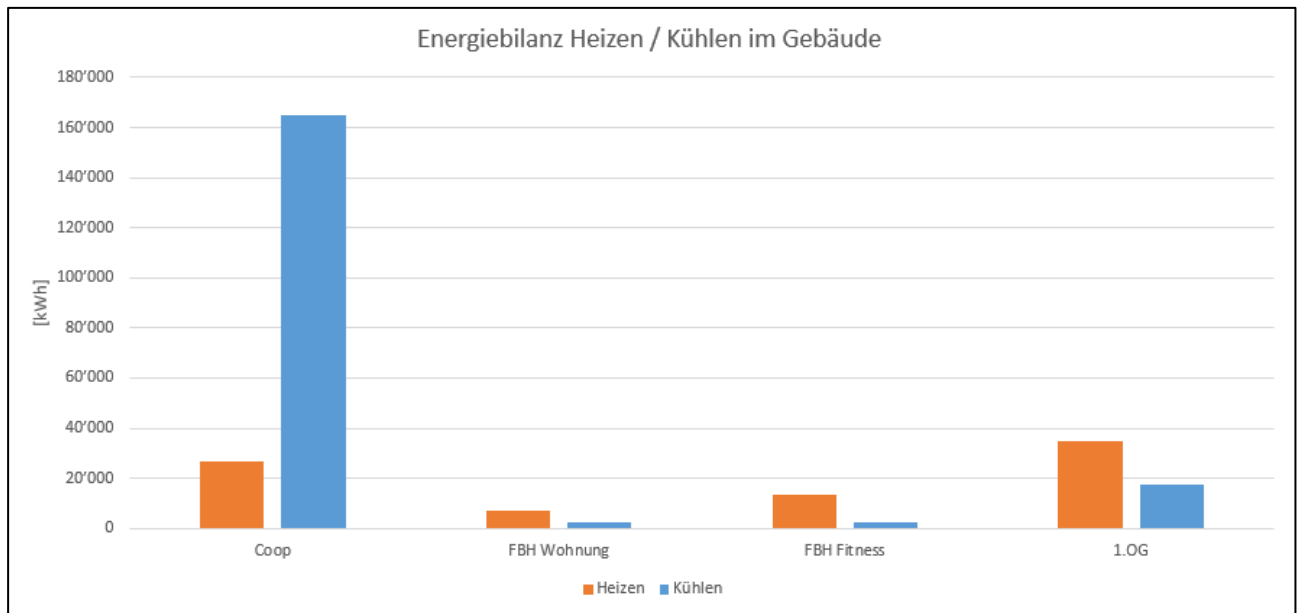


Abbildung 2-7: Bilanz Energiebedarf des Gebäudes.

Der Energiebezug, vor allem der Kältebezug, des Coop im EG dominierte den Betrieb im ersten Jahr. Trotz der massiv höheren Abwärmen konnte die Anlage aber die geforderten Kältetemperaturen stets einhalten. Die Kälteanlage benötigte einen Kältevorlauf von maximal 19 °C. Sobald die Temperatur im Eisspeicher diesen Wert übertraf wurde von passiver Kühlung auf aktive Kühlung umgeschaltet.

2.3 Temperaturverlauf im Eisspeicher

Zu Beginn benötigte das Gebäude noch nicht die volle Heizleistung, nur zum Austrocknen wurde die Heizung einige Wochen benötigt. Im Sommer wurde die Kühlung bereits voll genutzt. Die Maximalwerte wurden im August/September erreicht.

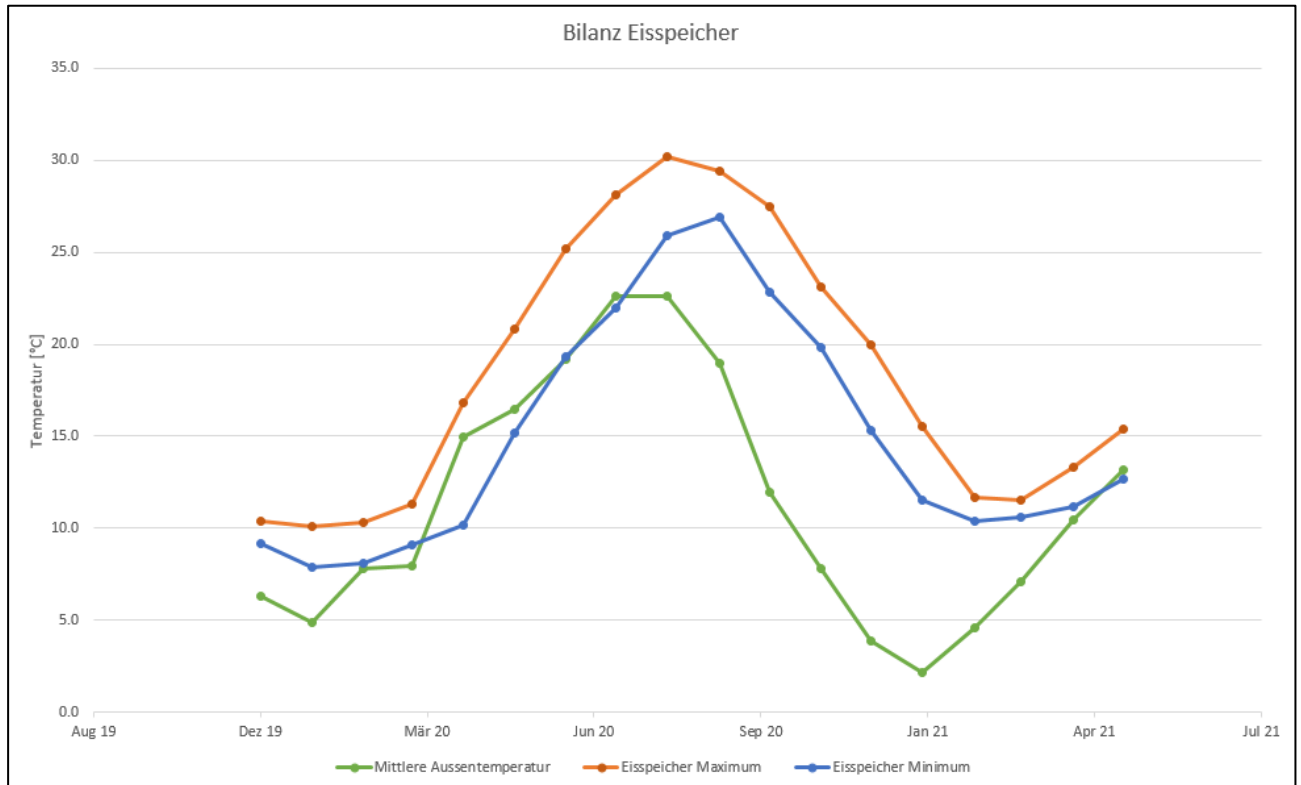


Abbildung 2-8: Temperaturverlauf im Eisspeicher und Aussentemperatur August 2019 bis Juli 2020

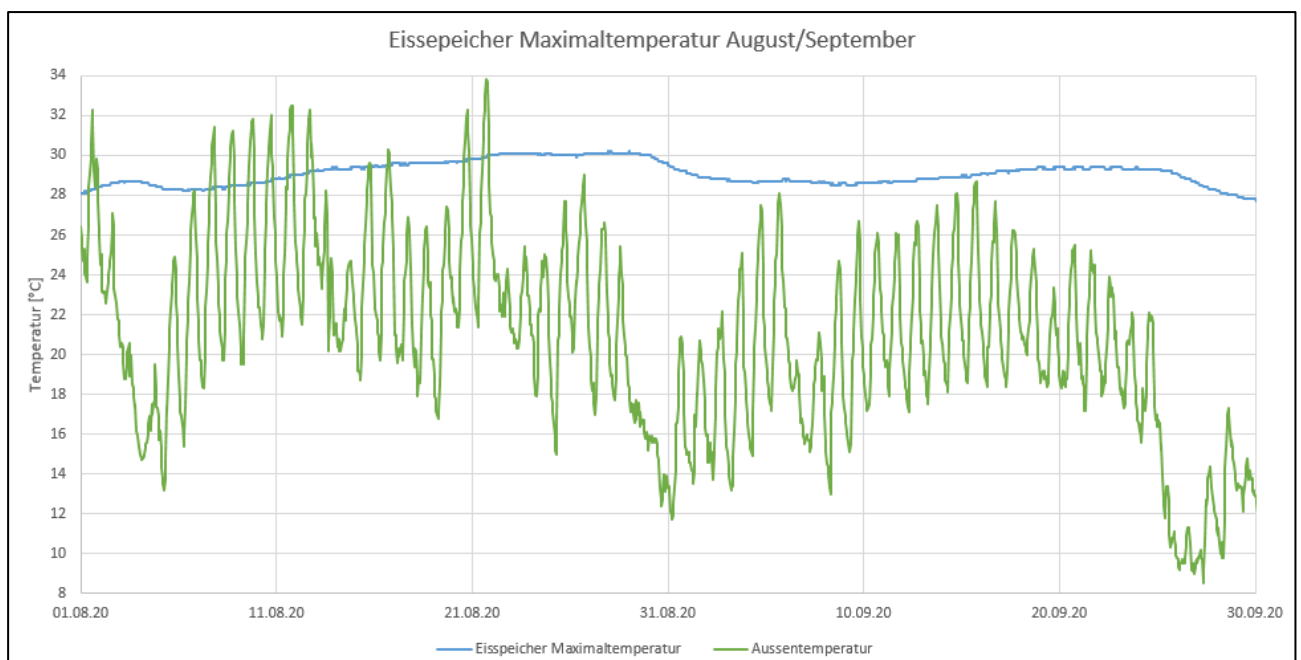


Abbildung 2-9: Temperaturverlauf im Eisspeicher und Aussentemperatur August/September 2020

3 Regel- und Messsequenzen

3.1 Funktionszustände

Der Regelbetrieb wird über 10 Funktionszustände der Anlage definiert. Je nach Funktionszustand werden unterschiedlich Feldgeräte angesteuert.

Tabelle 3-1 zeigt die Kombinationen aus Funktionen, die im Betrieb gleichzeitig möglich sein sollen. Die Feldgeräte sind so zu regeln, dass keine Widersprüche bei Gleichzeitigkeit von entsprechenden Funktionen entstehen.

Tabelle 3-1: Mögliche Funktionskombinationen; die möglichen Kombinationen ergeben die Betriebsfälle der Anlage

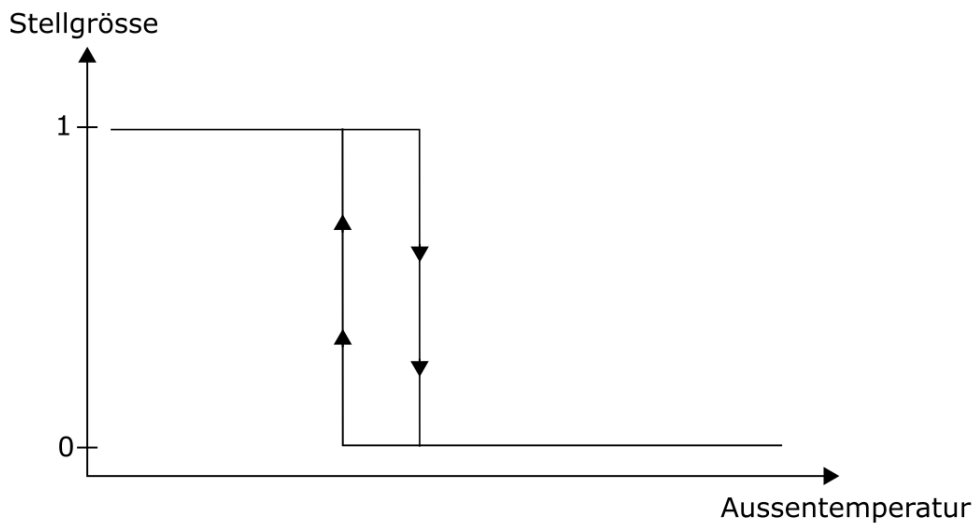
Funktionsnummer:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Funktionsnummer	Funktionskombinationen Wärme/Kälte Rorguet	Heizen Change-Over WP	Heizen Coop WP	BWW WP	Kühlen Change-Over WP	Kühlen Coop WP	Kühlen Change-Over passiv	Kühlen Coop passiv	Abtauen aktiv	Abtauen passiv	Aktiv Heizen & Kühlen
	1 Heizen Change-Over WP	X	X	X		X		X			
	2 Heizen Coop WP		X	X	X	X	X	X			
	3 BWW WP			X	X	X	X	X			
	4 Kühlen Change-Over WP				X	X					
	5 Kühlen Coop WP					X					
	6 Kühlen Change-Over passiv						X	X	X	X	
	7 Kühlen Coop passiv							X	X	X	
	8 Abtauen aktiv								X		
	9 Abtauen passiv									X	
	10 Aktiv Heizen & Kühlen										X

3.1.1 Funktionszustand 1 - Heizen Change-Over WP

Die Change-Over Gruppen werden über die Wärmepumpe mit Wärme versorgt.

Für jede Gruppe der Change-Over Gruppen soll die Aussentemperatur gemittelt werden (gemittelte Aussentemperatur Heizen, Zeit-Mittelung einzeln einstellbar). Für jede Gruppe soll ein Heizgrenzwert eingestellt werden können. Die Funktion tritt ein, wenn eine der gemittelten Aussentemperaturen unter den entsprechenden Heizgrenzwert fällt.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn die jeweilige gemittelte Aussentemperatur über eine einstellbare Differenz zum Heizgrenzwert steigt.



Funktionszustand 1 - Heizen Change-Over WP	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
Mittlere Aussentemperatur < Wert	mittlere Aussentemperatur > Wert + Const.

3.1.2 Funktionszustand 2 - Heizen Coop WP

Die Heizgruppe Coop wird über die Wärmepumpe mit Wärme versorgt. Die Funktion ist so lange aktiv, wie eine externe Anforderung besteht.

Funktionszustand 2 - Heizen Coop WP	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
Anforderung extern	Keine Anforderung extern

3.1.3 Funktionszustand 3 - BWW WP

Die Brauchwarmwassererzeugung wird vom CTA-internen Regler geregelt.

3.1.4 Funktionszustand 4 - Kühlen Change-Over WP

Die Change-Over Gruppen werden durch Aktivkühlung über die Wärmepumpe CTA OH 1-50 mit Kälte versorgt.

Für jede Gruppe der Change-Over Gruppen soll die Aussentemperatur gemittelt werden (gemittelte Aussentemperatur Kühlen, Zeit-Mittelung einzeln einstellbar). Für die Gruppen DG und Lüftung OG soll ein (Aussentemperatur-) Kühlgrenzwert eingestellt werden können. Für die Gruppe KIGO OG soll ein (Raumtemperatur-) Kühlgrenzwert eingestellt werden können.

Die Funktion tritt ein, wenn eine der Change-Over Gruppen eine Aktiv-Kühlanforderung stellt.

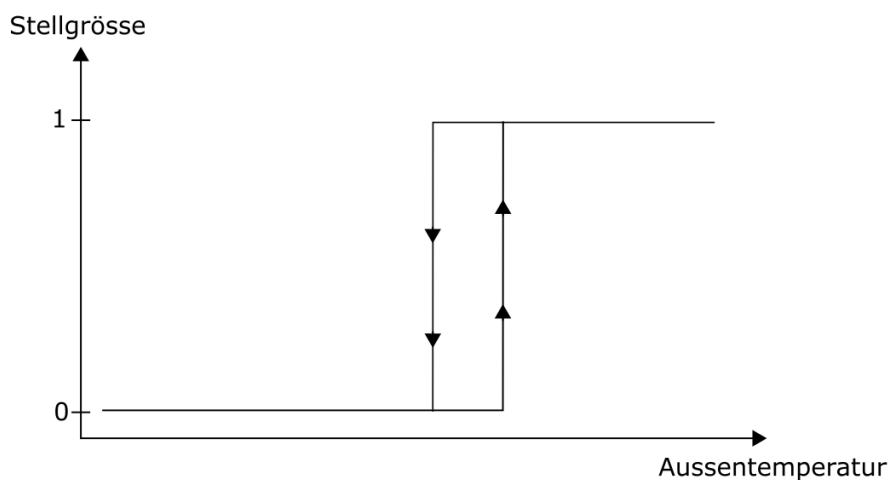
Für die Gruppe DG und Lüftung OG tritt Aktiv-Kühlanforderung ein, wenn die entsprechende gemittelte Aussentemperatur über den Kühlgrenzwert steigt und die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) über einer einstellbaren Grösse (16°C) ist.

Für die Gruppe OG tritt die Aktiv-Kühlanforderung ein, wenn der zweithöchste Wert der Raumtemperaturfühler (Fühler aus Schema 3559MSR02: 500B1, 500B2, 500B3, 500B4, 500B5, 500B6) über den Kühlgrenzwert steigt und die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) über einer einstellbaren Grösse (16°C) ist.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn keine der Change-Over Gruppen eine Kühlanforderung stellt (Hysterese 2 K), oder die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) unter einer einstellbaren Grösse (16°C) ist.

Funktionszustand 4 - Kühlen Change-Over WP*	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
• mittlere Aussentemperatur > Wert • Temperatur Eisspeicher > Wert	→ mittlere Aussentemperatur < Wert + Const. → Temperatur Eisspeicher < Wert + Const.

* Bedingungen mit • gelten als und Bedingung, Bedingungen mit → als oder Bedingung



3.1.5 Funktionszustand 5 - Kühlen Coop WP

Die Kühlgruppe Coop wird durch Aktivkühlung über die Wärmepumpe CTA OH 1-50 mit Kälte versorgt. Die Funktion ist aktiv, solange die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) über eine einstellbare Grösse (16°C) steigt oder der Temperaturfühler AI-12 über während 5 Minuten (einstellbar) über 19°C (einstellbar) steigt.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn die externe Anforderung Kälte Coop nicht ansteht, oder die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) unter eine einstellbare Grösse (16°C) fällt.

Funktionszustand 5 - Kühlen Coop WP*	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
Temperatur Eisspeicher > Wert	→ Kein Kompressor-Betrieb Coop → Temperatur Eisspeicher < Wert + Const.

* Bedingungen mit • gelten als und Bedingung, Bedingungen mit → als oder Bedingung

3.1.6 Funktionszustand 6 - Kühlen Change-Over passiv

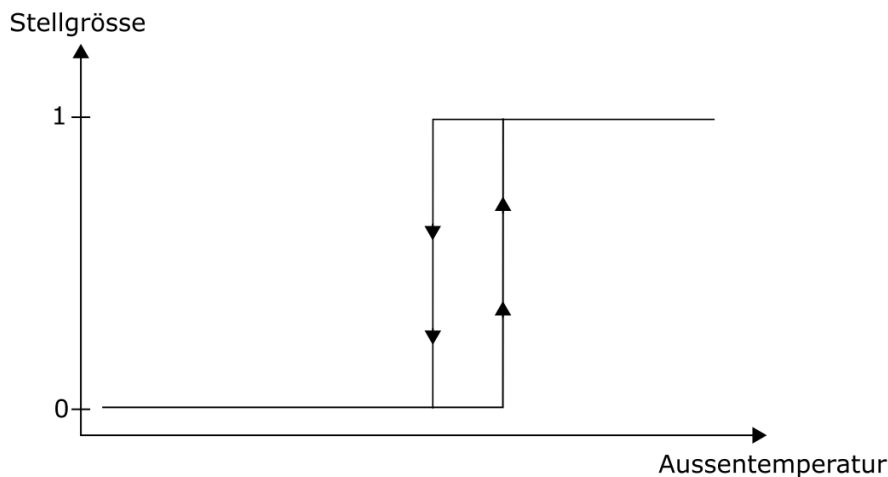
Die Change-Over Gruppen werden vom Eisspeicher mit Kälte versorgt.

Für jede Gruppe der Change-Over Gruppen soll die Aussentemperatur gemittelt werden (gemittelte Aussentemperatur Kühlen, Zeit-Mittelung einzeln einstellbar). Für die Gruppen DG und Lüftung OG soll ein (Aussentemperatur-) Kühlgrenzwert eingestellt werden können. Für die Gruppe KIGO OG soll ein (Raumtemperatur-) Kühlgrenzwert eingestellt werden können.

Die Funktion tritt ein, wenn eine der Change-Over Gruppen eine Kühlanforderung stellt.

Für die Gruppe DG und Lüftung OG tritt Kühlanforderung ein, wenn die entsprechende gemittelte Aussentemperatur über den Kühlgrenzwert steigt und die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) unter einer einstellbaren Grösse ist. Für die Gruppe OG tritt die Kühlanforderung ein, wenn der zweithöchste Wert der Raumtemperaturfühler (Fühler aus Schma 3559MSR02: 500B1, 500B2, 500B3, 500B4, 500B5, 500B6) über den Kühlgrenzwert steigt und die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) unter einer einstellbaren Grösse ist.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn keine der Change-Over Gruppen eine Kühlanforderung stellt (Hysterese 2 K), oder die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) über einer einstellbaren Grösse (16°C) ist.



Funktionszustand 6 - Kühlen Change-Over Passiv*	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
• mittlere Aussentemperatur > Wert • Temperatur Eisspeicher < Wert+Const.	→ mittlere Aussentemperatur < Wert + Const. → Temperatur Eisspeicher > Wert

* Bedingungen mit • gelten als und Bedingung, Bedingungen mit → als oder Bedingung

3.1.7 Funktionszustand 7 - Kühlen Coop Passiv

Die Kühlgruppe Coop wird direkt vom Eisspeicher mit Kälte versorgt. Die Funktion ist aktiv, solange eine externe Anforderung Kälte Coop ansteht und die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) unter einer einstellbaren Grösse ist und der Temperaturfühler AI-12 unter 19°C (einstellbar) bleibt.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn die externe Anforderung Kälte Coop nicht mehr ansteht, oder die Temperatur im Eisspeicher (Maximum der Fühler AI-13, AI-14, AI-15, AI-16) über einer einstellbaren Grösse ist oder der Temperaturfühler AI-12 über 19°C (einstellbar) steigt.

Funktionszustand 7 - Kühlen Coop Passiv*	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
Temperatur Eisspeicher < Wert + Const.	→ Kein Kompressor-Betrieb Coop → Temperatur Eisspeicher > Wert

* Bedingungen mit • gelten als und Bedingung, Bedingungen mit → als oder Bedingung

3.1.8 Funktionszustand 8 - Abtauen aktiv

Im aktiven Abtaubetrieb wird dem Eisspeicher über die Wärmepumpe Wärme zugeführt, um Eisplatten von den Wärmetauschern zu lösen.

Der aktive Abtaubetrieb soll manuell ein- und ausgeschaltet werden können. Fällt eine Temperatur des Pufferspeichers (B4 oder B41) unter einen Wert von 4°C (einstellbar) wird die Abtaufunktion automatisch aufgehoben.

3.1.9 Funktionszustand 9 - Abtauen passiv

Im passiven Abtaubetrieb wird dem Eisspeicher vom Pufferspeicher Wärme zugeführt, um Eisplatten von den Wärmetauschern zu lösen. Beide Wärmepumpen müssen während dem passivem Abtaubetrieb gesperrt werden.

Die Funktion wird aktiv, wenn die Quelltemperatur (Minimum aus Fühler AI-1 und AI-2 gemäss Schema in *Abbildung 1-15*) unter einen einstellbaren Wert (-3°C) fällt.

Die Funktion wird ausgeschaltet, wenn der Fühler AI-11 unter eine einstellbare Differenz (1K) zum Mittelwert der Eisspeicherfühler (AI-13, AI-14, AI-15 und AI-16) steigt. Fällt eine Temperatur des Pufferspeichers (B4 oder B41) unter einen Wert von 4°C (einstellbar) wird die Abtaufunktion automatisch aufgehoben.

3.1.10 Funktionszustand 10 – Kühlen Aktiv und Heizen Aktiv

In der Übergangszeit (v.a. Herbst) kann der Zustand eintreten, dass aktiv gekühlt und gleichzeitig geheizt werden muss und der Eisspeicher über der Freecooling Temperaturgrenze liegt. Diese Funktionskombination benötigt einen eigenen Funktionszustand.

Es gelten die folgenden Kriterien für die Aktivierung bzw. die Deaktivierung des Funktionszustands 10:

Funktionszustand 10 – Kühlen WP und Heizen WP	
Bedingungen Ein	Bedingungen Aus
• Funktionszustand 1 oder 2 • Funktionszustand 4 oder 5 • Temperatur AI-19 < 5 °C (einstellbar) • Mitteltemperatur Eisspeicher AI-13 bis AI-16 > 16 °C (einstellbar)	→ Kein Funktionszustand 1 oder 2 → Kein Funktionszustand 4 oder 5 → Temperatur AI-19 > 12 °C (einstellbar) → Mitteltemperatur Eisspeicher AI-13 bis AI-16 < 15 °C (einstellbar)

* Bedingungen mit • gelten als und Bedingung, Bedingungen mit → als oder Bedingung

Für Feldgeräte mit Betriebsbedingungen des Zustandes 10, genießt der Zustand 10 Priorität über die übrigen Zustände. Die Kriterien der übrigen Zustände dürfen bei einem aktiven Zustand 10 nicht berücksichtigt werden.

3.2 Details Abtaubetrieb und Detektieren Eisdicke

Ob sich Eis bildet und wie dick diese Eisschicht ist soll mittels Quelltemperatur aus dem Eisspeicher eruiert werden. Liegt die Quelltemperatur über einen bestimmten Zeitraum unter einer einstellbaren Grenztemperatur soll der Abtaubetrieb ausgelöst werden. Der oben genannte Zeitraum und der Grenzwert der Quelltemperatur sollen mittels Versuchen bestimmt werden.

Wurde eine Eisbildung erkannt wird nacheiner „Wachstumszeit“ der Abtaubetrieb ausgelöst. Um die Eisplatten von den Wärmetauscherplatten zu lösen soll für einen kurzen Zeitraum Wärme in die Wärmetauscherplatten geführt werden. Diese Wärme kommt aus dem davor geladenen Pufferspeicher. Während des Abtaubetriebs müssen die Wärmepumpen gesperrt werden.

4 Resultate – Modell Auslegung Eisspeicher

4.1 Kontrollvolumen

Das Kontrollvolumen für das thermische Modell des Eisspeichers umfasst das Wasservolumen im Eisspeicher zwischen Eisspeicher Aussenwänden / Boden und der Wasseroberfläche. Die Betonmauern im Wasser, die zur Abstützung des Gebäudes dienen wurden, wurden als Vereinfachung als Wasservolumen im Eisspeicher angenommen. Die Höhe des Wasserstandes im Eisspeicher wurde als konstant angenommen. Das Kontrollvolumen beträgt für das Modell zum Projekt Rorguet 1715 m³, die Oberfläche gegen Erdbreich 995 m² und die Wasseroberfläche 804 m².

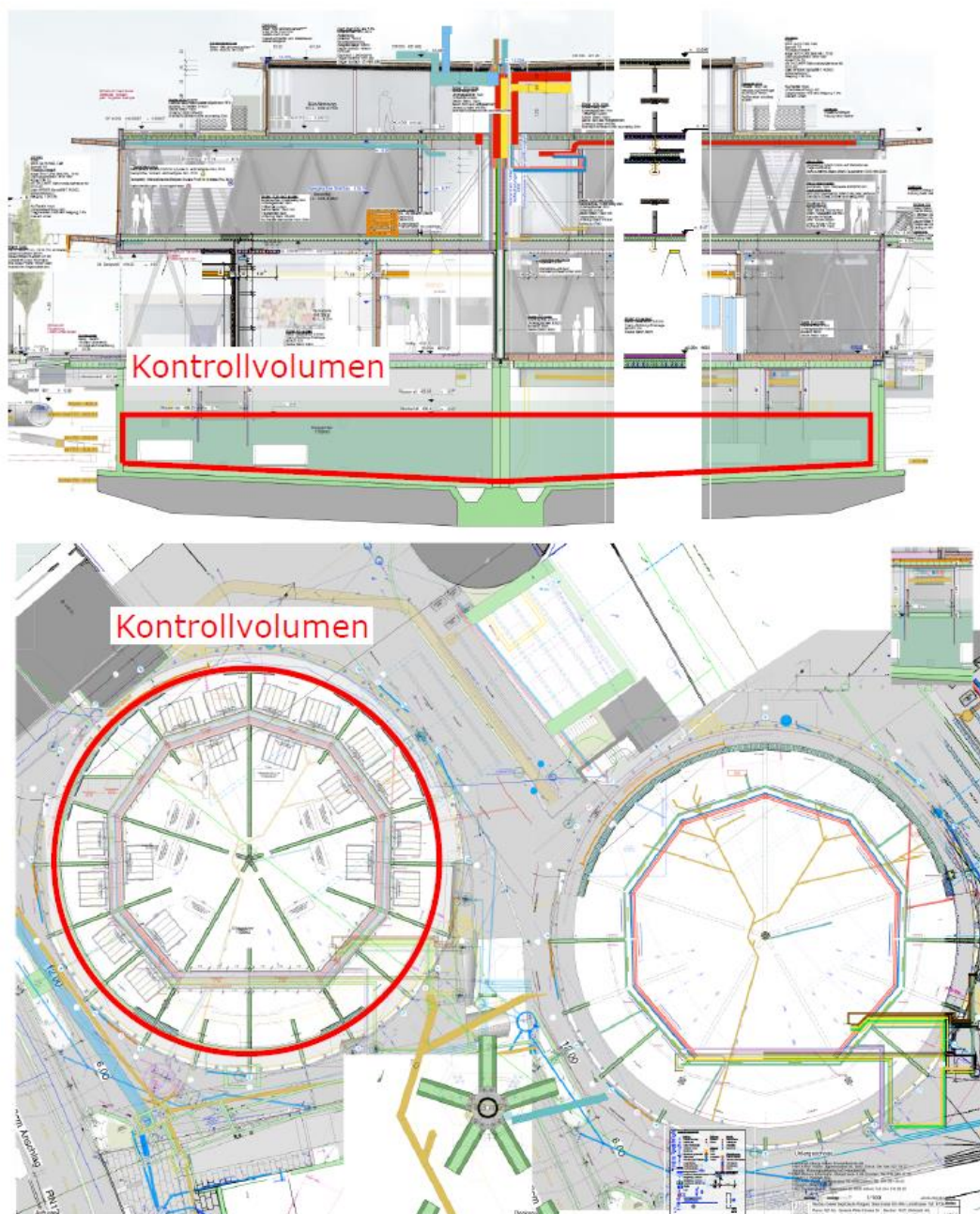


Abbildung 4-1: Kontrollvolumen des Eisspeichers für das thermische Eisspeichermmodell im Querschnitt und Grundriss

4.2 Wärmeströme und Energiebilanz Eisspeicher

Für das Modell wurden die folgenden Wärmeströme berücksichtigt:

- **Wärmeeintrag:** Wärmeeintrag der Wärmeerzeugungsanlage als Messwerte oder als Vorgabe aus einer Energiebilanz der Gebäudedaten.
- **Wärmeentzug:** Wärmeentzug der Wärmeerzeugungsanlage als Messwerte oder als Vorgabe aus einer Energiebilanz der Gebäudedaten.
- **Lüftungsverluste:** Wärmeeintrag / Wärmeverlust durch Konvektion an der Wasseroberfläche des Eisspeichers.
- **Regenwasserverluste:** Wärmeeintrag / Wärmeverluste durch Zufluss von Dachregenwasser und Abfluss von Eisspeicherwasser in die Kanalisation.
- **Transmissionsverluste:** Wärmeeintrag / Wärmeverluste durch Wärmeleitung über die Eisspeicherwände ins Erdreich.

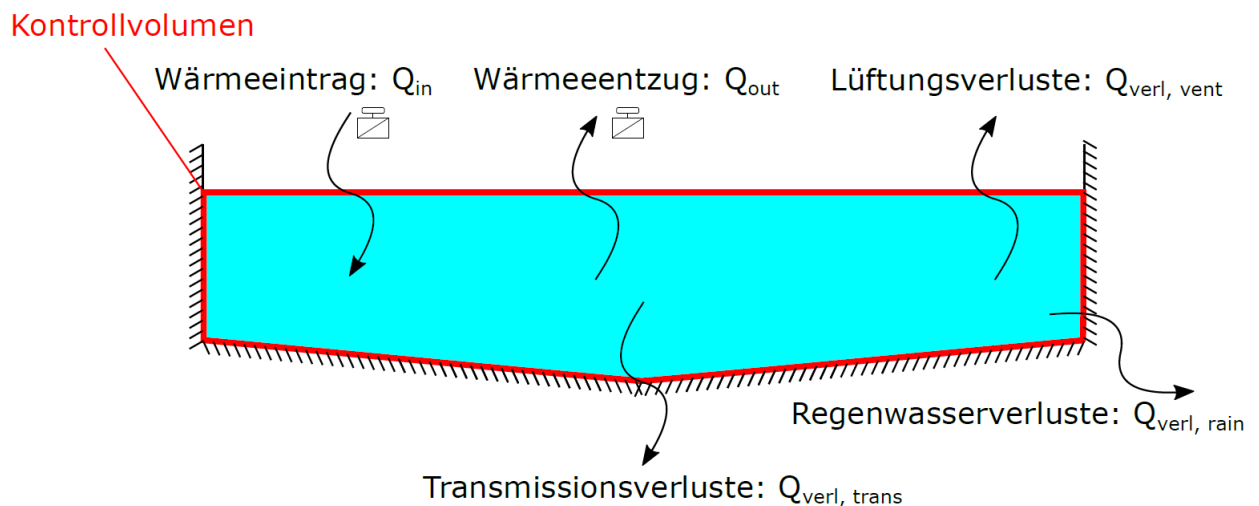


Abbildung 4-2: Kontrollvolumen des Eisspeichers mit Wärmeströme und Richtung der Wärmeströme gemäss Konvention im Modell

Die Energiebilanz des Eisspeichers ergibt sich für Wassertemperaturen über 0 °C aus:

$$V \rho_{H_2O} \Delta T_{Eisspeicher} c_{p,H_2O} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - \dot{q}_{verl,vent} - \dot{q}_{verl,rain} - \dot{q}_{verl,trans}$$

Und für Wassertemperaturen bei 0 °C mit x als Eisanteil und Δh_{H_2O} als Erstarrungswärme

$$-V \rho_{H_2O} x \Delta h_{H_2O} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} - \dot{q}_{verl,vent} - \dot{q}_{verl,rain} - \dot{q}_{verl,trans}$$

4.2.1 Eintrag / Entzug Anlage

Der Wärmeeintrag und –entzug wurde für das Modell als Input-Wert vorausgesetzt, um das thermische Verhalten des Eisspeichers anhand der vorgegebenen Werte vorherzusagen.

Die Eintrags- und Entzugswärmeströme wurden bei der Anlage des Projekts Rorguet gemäss Messkonzept in Kapitel 1.6 gemessen. Diese Werte wurden für das Modell vorgegeben.

4.2.2 Transmission

Die Transmissionswärmeströme werden im Modell als stationärer Wärmefluss proportional zur Differenz der Erdreichjahresmitteltemperatur und der aktuellen Eisspeichertemperatur mit der Proportionalitätskonstante U und der Fläche gegen Erdreich A modelliert:

$$Q_{verl,trans} = U A \Delta T = U A (T_{Eisspeicher} - T_{Erde,\infty})$$

Die Proportionalitätskonstante U wurden für das Modell mittels der gemessenen Werte für die Eintrags und Entzugswärmeströme sowie die restlichen Wärmeströme abgeschätzt und mittels Parameteridentifikation festgelegt.

Im vorliegenden Fall wurde eine Proportionalitätskonstante von ca. $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ermittelt, was etwa einer 30 cm dicken Betonwand (2.3 W/mK) und 80 cm Erdreich (1.6 W/mK) und einem konvektivem Wärmeübergang von $250 \text{ W/m}^2\text{K}$ entspricht.

4.2.3 Lüftung

Zur Berechnung der Lüftungswärmeverluste wurde angenommen, dass die Lufttemperatur im Eisspeicher die gleiche Temperatur annimmt, wie die Eisspeichertemperatur im Kontrollvolumen. Die Lüftungswärmeverluste beinhalten die Wärmeverluste an der Wasseroberfläche des Eisspeichers. Die Verluste berechnen sich anhand der Temperaturdifferenz der zugeführten Luft (Aussenlufttemperatur) und der Eisspeichertemperatur sowie der zugeführten Luftmenge $\dot{V}$ der mechanischen Belüftung:

$$Q_{verl,vent} = \dot{V} \rho_{Luft} c_{p,Luft} (T_{Eisspeicher} - T_{Aussenluft})$$

4.2.4 Regen

Die Regenwasserverluste berechnen sich aus den gemessenen Regenmengen H_{Regen} , der fassenden Dachfläche A_{Dach} der Regenwassertemperatur und der Eisspeichertemperatur:

$$Q_{verl,rain} = A_{Dach} H_{Regen} \rho_{H2O} c_{H2O} (T_{Eisspeicher} - T_{Regen})$$

Es wurde angenommen, dass die Regenwassertemperatur 30 % tiefer liegt, als die aktuelle Aussentemperatur, sofern die Aussentemperatur über $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt.

4.3 Modellbeschreibung

Das Rechenmodell des Eisspeichers startet mit einer vorgegebenen Starttemperatur des Eisspeichers. Mit der vorgegebenen Starttemperatur werden die Verlustleistungen berechnet. Im vorliegenden Modell wurde mit für die Energien mit einem Zeitintervall von 7200 s gerechnet. Während dem Zeitintervall wurden die Temperaturen im Eisspeicher und die Verlustleistungen als konstant angenommen.

Aus den Verlustleistungen, dem Wärmeentzug und Wärmeeintrag der Anlage und der Starttemperatur bzw. der Temperatur des vergangenen Zeitschrittes wurde die Eisspeichertemperatur des aktuellen Zeitschrittes berechnet. Die aktuelle Eisspeichertemperatur wurde rekursiv als Starttemperatur für die Berechnung des nächsten Zeitschrittes als Anfangskriterium verwendet.

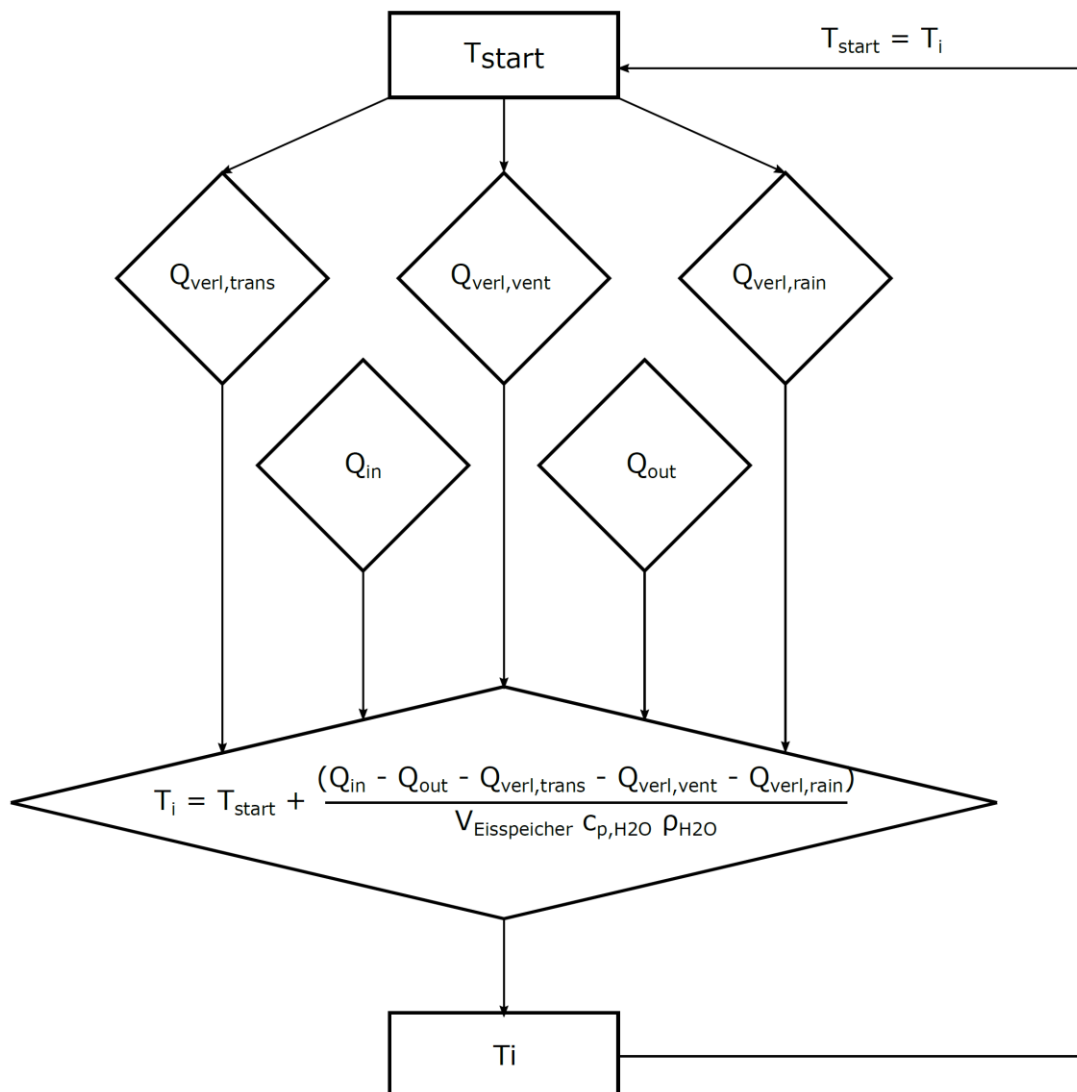


Abbildung 4-3: Beschreibung der Berechnung der Temperatur zum Zeitpunkt i im thermischen Modell des Eisspeichers.

Es wurde im Modell Rorguet eine maximale Temperaturänderung im Zeitintervall von 7200 s von 0.12 °C erreicht.

4.4 Vergleich Modell / Messung

Im Modell wurden die gemessenen Wärmeeinträge und –Entzüge der Anlage verwendet. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen dem Modell und den Messwerten beträgt 2.6 K, die mittlere Differenz beträgt 0.1 K.

Die Korrelation zwischen den beiden Kurven beträgt 0.99 mit einem Signifikanzwert von 0.0. Der Vergleich der gemessenen Eisspeichertemperaturen und den Eisspeichertemperaturen des Modelles zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

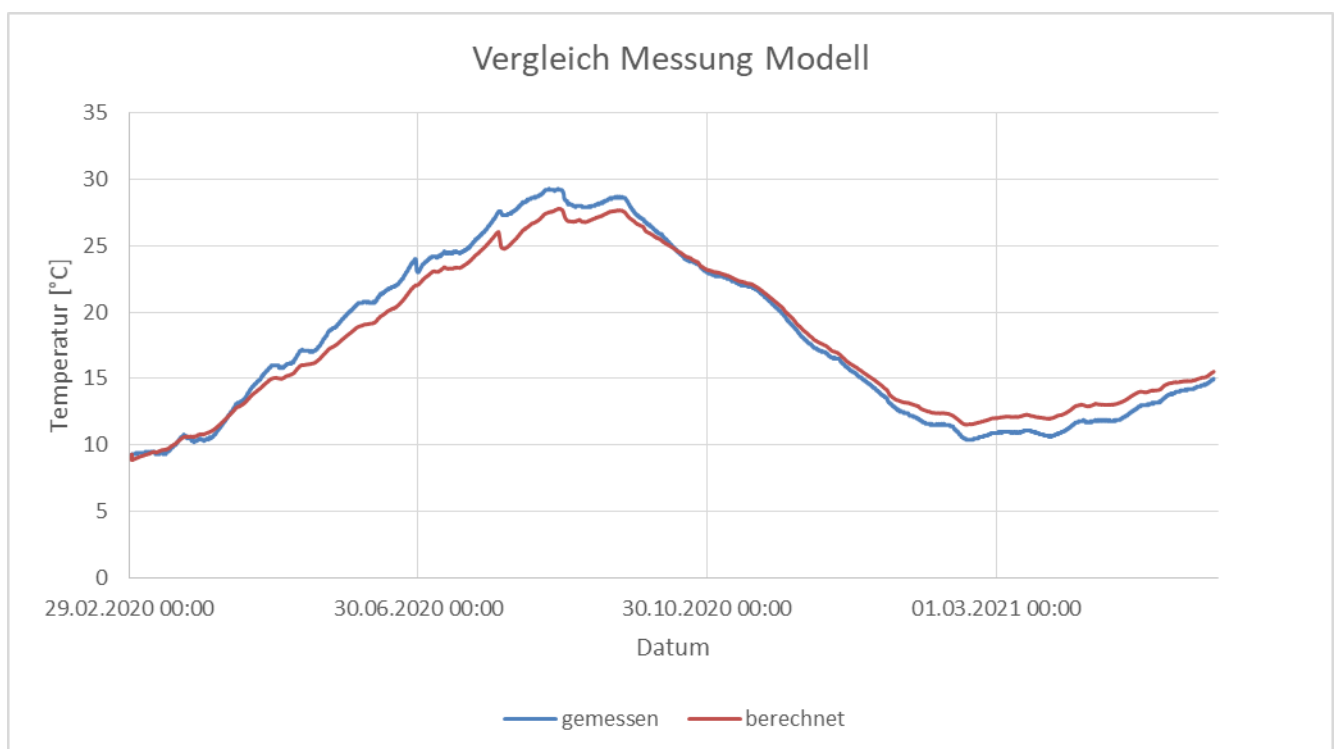


Abbildung 4-4: Vergleich gemessenen Eisspeichertemperatur und der modellierten Temperatur im Eisspeicher mit Vorgabe der gemessenen Eintrags- und Entzugsenergien.

5 Schlussfolgerung

Das vorgeschlagene Modell erweist sich für die Auslegung von Eisspeicher mit im Wasservolumen örtlicher annähernd gleicher Temperatur als zuverlässige Vorhersage der zu erwartenden Eisspeichertemperaturen. Sowohl der Verlauf der Temperaturen wie auch signifikante Änderungen können mit dem Modell ausreichend genau vorhergesagt werden.

Die grösste Unsicherheit betreffend vorhersage der Eisspeichertemperaturen betreffen die Wärmeentzugs- und Eintragsenergien der Wärmeerzeugungsanlage.

Das Modell zeigt, dass die grössten Wärmeverluste auf Transmission (78%) zurückzuführen sind. Die Lüftungsverluste betragen 8% und die Regenverluste 13%. Der grosse Anteil der Transmissionsverluste zeigt, dass das umliegende Erdreich zusätzlich als thermische Kapazität für den Betrieb des Eisspeichers genutzt werden kann. Die Wärmeströme aus der Transmission helfen dem Eisspeicher im Betrieb näher an der Jahresmitteltemperatur zu operieren, was grundsätzlich zu begrüssen ist.

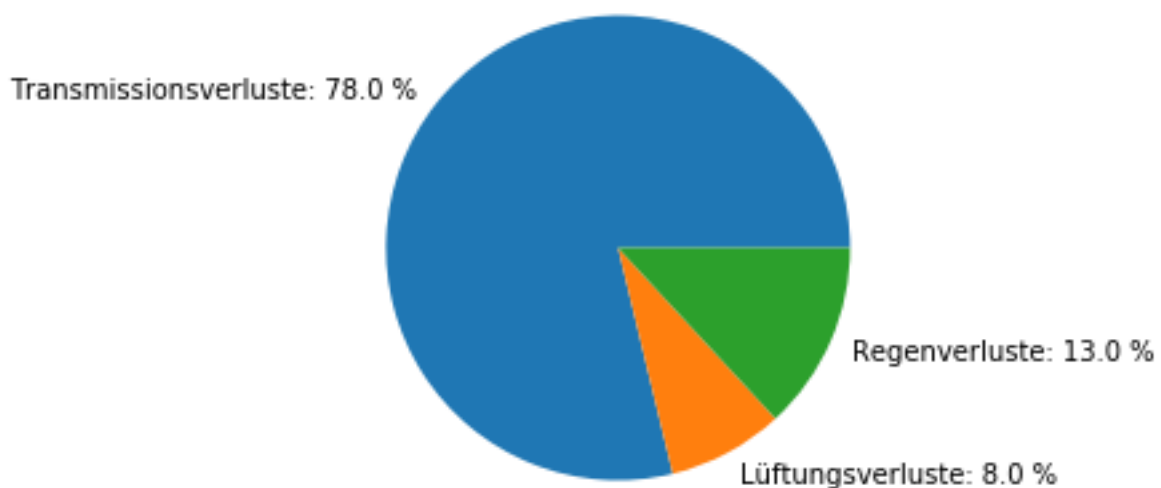


Abbildung 5-1: Aufteilung der Verlustenergien in Prozent der totalen Verluste