



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 27. März 2024

OblaTherm

Deckung des Kälte- und Wärmebedarfs eines
Minergie-P Bürogebäudes mit thermischer
Aktivierung der Bodenplatte und PVT-Kollektoren



Quelle: Oblamatik AG



Datum: 12.03.2024

Ort: Poschiavo

Subventionsgeber/innen:

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

Subventionsempfänger/innen:

Vassella Energie GmbH
Via di Palazz 2
CH-7742 Poschiavo
www.vassella-energie.ch

SPF Institut für Solartechnik
OST - Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestr. 10, CH-8640 Rapperswil SG
www.spf.ch

Viega Schweiz AG
(vormals Oblamatik AG)
La-Nicca-Strasse 12
7000 Chur
www.viega.ch

Caotec SA
La Pergola 241
7743 Brusio
www.caotec.ch

Fanzun AG
Salvatorenenstrasse 66
7000 Chur
www.fanzun.swiss

Scherler AG
Wiesentalstrasse 101
7000 Chur
www.scherler.swiss



Lauber Iwisa AG
Kehrstrasse 14
3904 Naters
www.lauber-iwisa.ch

Autoren:

Alexander Schmitt, alexander.schmitt@ost.ch
Carlo Vassella, carlo@vassella-energie.ch
Krisztina Kelevitz, krisztina.kelevitz@ost.ch
Florian Ruesch, florian.ruesch@ost.ch
Igor Bosshard, igor.bosshard@ost.ch
Daniel Philippen, daniel.philippen@ost.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, BFE, men.wirz@bfe.admin.ch
Nadège Vetterli, BFE, nadege.vetterli@anex.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501591-01

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



Zusammenfassung

Im Rahmen des Pilot- und Demonstrationsprojekts (P&D) OblaTherm wurde in Chur ein Innovations- und Kompetenzzentrum gebaut, das neben Produktions-, Lager-, Server- und Büroflächen auch einen Fitness- und Erholungsbereich bietet. Die Versorgung mit Strom, Wärme und Kälte wird weitgehend durch das Gebäude selbst bereitgestellt. Das Energieversorgungssystem umfasst eine grosse PVT-Anlage auf dem Dach und zwei Sole-Wasser-Wärmepumpen, welche die thermisch aktivierte Fundamentplatte des Gebäudes als Quelle und Senke (resp. Speicher) nutzen. Mit diesem Projekt soll einerseits gezeigt werden, dass eine effiziente Energieversorgung eines Verwaltungsgebäudes auch ohne Erdsonden möglich ist, andererseits soll ein hoher Wärme- und Kälteautarkiegrad erreicht werden (Unabhängigkeit vom bestehenden Anergienetz). Hierfür spielt die richtige Dimensionierung und Bewirtschaftung (Kälte- resp. Wärmeregeneration) der Bodenplatte eine zentrale Rolle.

Da der jährliche Nutzbedarf für Kühlen gegenüber des Wärmebedarfs (143 MWh gegenüber 130 MWh im Jahr 2022) höher ist, wurde das System auf den Kühlbetrieb optimiert. Im Kühlfall stehen als Wärmesenken die Fundamentplatte (ink. Erdreich), die PVT-Anlage (Konvektion und Strahlung) sowie Puffer- und Brauchwarmwasserspeicher zur Verfügung. Als Wärmequellen stehen die Fundamentplatte (ink. Erdreich), die Serverkühlung, die aktive Kühlung der Räume sowie die PVT-Anlage zu Verfügung. Eine Besonderheit spielt hierbei die PVT-Anlage, welche im Sommer ausschliesslich zur Kälteregeneration der Fundamentplatte dient. Die Wärme der PVT-Anlage kann hingegen kaum genutzt werden. Dies liegt daran, dass das Gebäude viel Abwärme produziert (Server- und aktive Kühlung der Räume, auch im Winter), welche zum Teil als Quelle für die Wärmepumpen genutzt werden kann oder in die Fundamentplatte eingespeichert wird. Dies ist unter anderem der Grund, warum die Bodenplatte auch in den Wintermonaten meist wärmer ist als die Vorlauftemperatur der PVT-Anlage.

Ein wichtiger Punkt für die Autarkie ist ein rechtzeitiges Stoppen der Wärmeregeneration im Winter bzw. Kälteregeneration im Sommer. Als gute Strategie haben sich folgende Einstellungen erwiesen. Zwischen März und Juli wird keine zusätzliche Wärme zugeführt, sobald die Fundamentplatte 7 °C erreicht hat. Von Oktober bis März wird das Fundament nur dann zusätzlich gekühlt, wenn die Temperatur in der Fundamentplatte über 28 °C steigt.

Die Auswertung des Heiz- und Kühlbetriebs haben einerseits aufgezeigt, dass die beiden Wärmepumpen in Kombination mit der aktivierten Fundamentplatte mit einer Jahresarbeitszahlen (JAZ) von 5.8 für Heizen, 3.5 für Brauchwarmwasserproduktion und 4.8 für Kühlen eine hohe Effizienz aufweisen. Die gewünschte Wärme- und Kälteautarkie wurde in dieser Periode zu fast 99 % erreicht und der als Backup vorhanden Anschluss an ein lokales Anergienetz wurde kaum benötigt.

Die Kosten/Nutzen-Analyse hat gezeigt, dass eine Lösung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe günstiger, ein Erdwärmesonden-System jedoch teurer wäre. Daher ist diese Technologie vor allem dann interessant, wenn keine Luft/Wasser-Wärmepumpe gebaut werden darf (Lärmemissionen), oder die Aussentemperaturen zu gering für den effizienten Betrieb eines solchen Systems sind.



Sintesi

Nel contesto del progetto pilota e di dimostrazione OblaTherm, è stato costruito a Coira un centro di innovazione e competenza che comprende spazi per la produzione, il magazzino, i server e gli uffici, nonché un'area fitness e relax. L'edificio è in gran parte autosufficiente per quanto riguarda l'approvvigionamento di energia elettrica, calore e freddo. Il sistema energetico include un ampio impianto fotovoltaico termico (PVT) sul tetto e due pompe di calore salamoia-acqua, che utilizzano la platea delle fondamenta dell'edificio in modo termoattivo come sorgente e accumulatore. Questo progetto mira a dimostrare che è possibile garantire un approvvigionamento energetico efficiente per un edificio amministrativo senza utilizzare sonde geotermiche e contemporaneamente raggiungere un elevato grado di autosufficienza termica e di raffreddamento, riducendo la dipendenza dalla rete di anergia esistente. Il corretto dimensionamento e la gestione della platea delle fondamenta, in termini di rigenerazione termica, giocano un ruolo cruciale a tal fine.

Poiché il fabbisogno annuale di freddo è superiore rispetto a quello di caldo, il sistema è stato ottimizzato per la funzione di raffreddamento. In caso di raffreddamento, la platea delle fondamenta (compreso il terreno adiacente), l'impianto fotovoltaico termico, i serbatoi di accumulo per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria fungono da dissipatori/accumuli di calore. Come fonti di calore, invece, sono disponibili la platea delle fondamenta, il raffreddamento dei server, il raffreddamento attivo dei locali e l'impianto PVT. Quest'ultimo rappresenta una delle particolarità del sistema, infatti durante l'estate è utilizzato esclusivamente per la rigenerazione di freddo della platea. Al contrario, il calore prodotto dall'impianto PVT è difficilmente sfruttabile, ciò è dovuto al fatto che l'edificio genera molto calore residuo come quello proveniente dai server e dal raffreddamento attivo degli ambienti nella parte sud dell'edificio. Una parte di questo calore viene utilizzata come fonte per le pompe di calore o immagazzinata nella platea. Questo è uno dei motivi per cui la platea è spesso più calda della temperatura di mandata dell'impianto PVT, soprattutto nei mesi invernali.

Un punto cruciale per l'autosufficienza è l'arresto tempestivo della rigenerazione di calore in inverno e della rigenerazione di freddo in estate. Le seguenti impostazioni si sono dimostrate essere una buona strategia: tra marzo e luglio, nessun calore aggiuntivo viene fornito una volta che la platea ha raggiunto i 7 °C. Mentre da ottobre a marzo, la platea viene raffreddata solo quando la temperatura supera i 28 °C.

L'analisi del funzionamento di riscaldamento e raffreddamento ha mostrato, da un lato, che le due pompe di calore in combinazione con la platea hanno un fattore di prestazione annuo di 5.8 per il riscaldamento, 3.5 per la produzione di acqua calda e 4.8 per il raffreddamento, dimostrando un'alta efficienza. L'autosufficienza desiderata in termini di calore e freddo è stata raggiunta quasi al 99% in questo periodo e la connessione di backup alla rete anergica locale è stata raramente utilizzata.

L'analisi costi/benefici ha dimostrato che una soluzione con una pompa di calore aria/acqua sarebbe più conveniente, mentre un sistema di sonde geotermiche risulterebbe più costoso. Pertanto, questa tecnologia risulta particolarmente interessante quando non è possibile installare una pompa di calore aria/acqua (a causa delle emissioni sonore) o quando le temperature esterne sono troppo basse per un funzionamento efficiente di un tale sistema.



Summary

As part of the OblaTherm pilot and demonstration project (P&D), an innovation and competence centre was built in Chur, which offers production, storage, server and office space as well as a fitness and recreation area. The supply of electricity, heating and cooling is largely provided by the building itself. The energy supply system includes a large PVT system on the roof and two brine-to-water heat pumps that utilise the building's thermally activated foundation plate as a source and storage. The aim of this project is to demonstrate that an efficient energy supply for an administration building is also possible without geothermal probes and to achieve a high degree of heating and cooling self-sufficiency (independence from the existing energy grid). The correct dimensioning and management (cold and heat regeneration) of the foundation plate plays a central role in this.

As the annual usage requirement for cooling is higher than the heating requirement (143 MWh compared to 130 MWh in 2022), the system was optimised for cooling operation. In cooling mode, the foundation slab (incl. ground), the PVT system (convection and radiation) and the buffer and domestic hot water storage tanks are available as heat sinks. The foundation slab (incl. the ground), server cooling, active cooling of the rooms and the PVT system are available as heat sources. A special feature here is the PVT system, which is used exclusively for cooling the foundation slab in summer. An air reclaimer was avoided. The heat from the PVT system, on the other hand, can hardly be utilised. This is because the building produces a lot of waste heat (server and active cooling of the rooms, even in winter), some of which can be used as a source for the heat pumps or is stored in the foundation plate. This is one of the reasons why the plate is warmer than the flow temperature of the PVT system most of the time, even in the winter months.

An important point for self-sufficiency is the timely stopping of heat regeneration in winter and cold regeneration in summer. The following settings have proven to be a good strategy. Between March and July, no additional heat is added as soon as the foundation slab has reached 7 °C. From October to March, the foundation is only cooled additionally if the temperature in the foundation slab rises above 28 °C.

The evaluation of the heating and cooling operation showed on the one hand that the two heat pumps in combination with the activated foundation plate are highly efficient with an annual performance factor (APF) of 5.8 for heating, 3.5 for domestic hot water production and 4.8 for cooling. The desired heating and cooling self-sufficiency were achieved almost 99 % through this period and the backup connection to a local energy grid was hardly needed.

The cost/benefit analysis showed that a solution with an air/water heat pump would be cheaper, while a geothermal probe system would be more expensive. This technology is therefore particularly interesting if an air/water heat pump cannot be built (noise emissions) or the outside temperatures are too low for the efficient operation of such a system.



Take-home Messages

- Die Nutzung einer aktivierten Fundamentplatte als Quelle/Speicher für eine Sole-Wasser Wärmepumpe funktioniert sehr gut für Verwaltungsgebäude mit hohem Energiebedarf. Mit einem Systemnutzungsgrad (SNG) von 5.0 für Heizen und Kühlen weist die Anlage eine hohe Effizienz auf.
- Der spezifische Wärmeertrag der Fundamentplatte liegt bei 60 kWh/m² und Jahr, der Kälteertrag bei 100 kWh/m² und Jahr. Anzumerken ist, dass durch die grosse Abwärme bedingt, Regenerationsgrade von deutlich über 100 % erreicht wurden. Das sollte beim Übertragen eines solchen Systems auf andere Gebäude berücksichtigt werden.
- Die Fundamentplatte weist im Winter eine leicht höhere Temperatur als die Aussenluft auf. Dieses System liefert daher eine bessere Effizienz als eine Luft/Wasser Wärmepumpe. Die mit der Energieproduktion gewichtete Quellentemperatur der Wärmepumpe liegt für die Fundamentplattenlösung bei 8.2 °C. Bei gleicher Nutzung mit Aussenluft als Quelle anstatt der Sole aus dem aktivierten Fundament läge der Wert bei 3.1 °C (Heizsaison 22/23).
- Die Steuerung der Temperatur der Fundamentplatte ist essenziell für eine gute und effiziente Systemleistung. Unter welchen Bedingungen kälte- oder wärmerегeneriert wird, erwies sich als empirischer Prozess
- Speziell angefertigte PVT-Module ohne Wärmedämmung lieferten genügend Kühlleistung, um ein überhitzen der Fundamentplatte zu verhindern. Die Wärmeleistung ist vergleichsweise gering und kann – auch aufgrund der hohen Abwärme des Gebäudes – kaum genutzt werden.
- Die Verwendung von einer thermoaktiven Fundamentplatte mit PVT-Anlage war für dieses P&D-Projekt etwas günstiger als eine vergleichbare Lösung mit einem Erdsondenfeld und PV-Anlage, jedoch teurer als ein System mit Luft/Wasser-WP und PV-Anlage. Der Einsatz ist daher dann sinnvoll, wenn eine Luft/Wasser-WP nicht gebaut werden darf oder aus anderen Gründen darauf verzichtet werden soll.
- Die Steuerung und Regelung einer thermoaktiven Fundamentplatte ist komplex, da überhitzen und unterkühlen vermieden werden muss. Ein Betrieb einer solchen Anlage ist daher nur zu empfehlen, wenn ein gutes Monitoring gewährleistet werden kann.
- Betriebsoptimierung und Monitoring sind von hoher Wichtigkeit. Die Anlage des Gebäudes wurde über drei Jahre optimiert und wird auch weiterhin auf Optimierungsmöglichkeiten untersucht. Sowohl Anlagenkomponenten wie auch Regelparameter wurden Schritt für Schritt verbessert beziehungsweise Fehler behoben.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	4
Sintesi	5
Summary	6
Take-home Messages.....	7
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung.....	11
1.1 Motivation des Projektes	11
1.2 Projektziele.....	13
2 Anlagenbeschrieb.....	14
2.1 Neubau Hauptsitz Oblamatik AG (neu Viega Schweiz AG).....	14
2.2 Energiekonzept	16
2.3 PVT-Anlage.....	19
2.4 Wärme- und Kälteverteilung.....	20
2.5 Anlagenregelung	20
3 Messkonzept.....	22
3.1 Messmittel und Messunsicherheiten	25
3.2 KPI – Key Performance Indicators	25
4 Ergebnisse und Diskussion.....	27
4.1 Anlagenänderungen, Optimierungen und Monitoring	27
4.2 Energieflüsse und Energiebilanzen.....	28
4.3 Fundamentplatte	33
4.4 Anergienetz	39
4.5 Modellierung Fundamentplatte.....	40
4.6 PVT-Anlage.....	42
4.7 Heizwärme- und Kälteverbrauch.....	49
4.8 Kosten/Nutzen Vergleich.....	54
5 Schlussfolgerungen und Fazit.....	57
6 Ausblick und zukünftige Umsetzungen.....	61
7 Literaturverzeichnis.....	62
8 Anhang.....	63
8.1 Verbaute Zähler	63
8.2 Betriebsmodi	65



8.3	Impressionen Inbetriebnahme und Installation	73
8.4	Regelbeschrieb	80
8.5	Datenblätter.....	93



Abkürzungsverzeichnis

aHKV	Aktive Heizkreisverteilung
BFE	Bundesamt für Energie
BWW	Brauchwarmwasser
COP	Coefficient of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
EWS	Erdwärmesonde
EBF	Energiebezugsfläche
JAZ	Jahresarbeitszahl
K-EWS	Koaxiale Erdwärmesonde
KPI	Key performance indicators
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWP	Kilowatt-Peak
MWh	Megawattstunde
MFH	Mehrfamilienhaus
PVT	Photovoltaisch-thermischer Sonnenkollektor
P&D	Pilot und Demonstrationsprojekt
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SNG	Systemnutzungsgrad
TABS	Thermoaktive Bauteilsysteme
T _{amb}	Aussenluft Temperatur
TES	Thermischer Energiespeicher
WP	Wärmepumpe



1 Einleitung

1.1 Motivation des Projektes

Im Rahmen des Pilot- und Demonstrationsprojekts (P&D) OplaTherm wurde in Chur ein Innovations- und Kompetenzzentrum mit über 6'000 m² Nutzfläche errichtet, welches neben Produktions-, Lager-, Server- und Büroflächen auch eine Fitness- und Erholungszone bietet. Strom, Wärme und Kälte wird dabei zu grossen Teilen vom Gebäude bereitgestellt und nicht von aussen bezogen. Zum Energieversorgungssystem gehören eine grosse PVT-Anlage auf dem Dach, zwei Wärmepumpen, die thermische Aktivierung der Fundamentplatte des Gebäudes sowie diverse sensible Wärmespeicher. Der Vorteil einer thermo-aktiven Bodenplatte ist, dass durch eine Gebäudestruktur, welche sowieso benötigt wird, eine zweite Funktion erfüllt werden kann. Dadurch entfallen Kosten und Energieaufwand für das Erstellen von Erdwärmeabsorbern wie Erdreichkollektoren oder Erdwärmesonden, welche nur aus Gründen der Energienutzung erstellt werden müssten. Dadurch können die Kosten der Wärmepumpenquelle reduziert werden, und dennoch gegenüber Luft als Wärmequelle besser Arbeitszahlen erreicht werden. Der Vorteil der thermisch aktivierten Bodenplatte ist, dass eine ohnehin benötigte Gebäudestruktur eine zweite Funktion erfüllen kann. Dadurch entfallen die Kosten und der Energieaufwand für die Erstellung von Erdwärmeabsorbern wie Erdkollektoren oder Erdwärmesonden, die nur für die energetische Nutzung erstellt werden müssten. Dadurch können die Kosten für die Wärmequelle der Wärmepumpe gesenkt und dennoch bessere Arbeitszahlen als mit Luft als Wärmequelle erreicht werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das erschlossene Speichervolumen im Gegensatz zu Erdsondenbohrungen durch die Grundfläche und das darunter liegende passiv nutzbare Erdreich begrenzt ist, so dass der Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes nicht zu hoch sein darf (Niedrigenergiehaus).

Die Regelstrategien der Haustechnik sollen deshalb eine sehr hohe Effizienz des Gesamtsystems ermöglichen. Die PVT-Anlage wird neben der Stromproduktion doppelt genutzt: sowohl zur Wärmeproduktion als auch zur Wärmeabgabe. Für letzteres wurde die Anlage optimiert und auf eine konventionelle Wärmedämmung der PVT-Module verzichtet. Dadurch wird eine Kühlleistung erreicht, welche den Einsatz eines Rückkühlers überflüssig macht. Auch kann mit der PVT-Anlage und oder der Fundamentplatte Free-Cooling betrieben werden, wenn deren Vorlauftemperaturen niedriger sind als die Temperatur im Kältespeicher. Hohe solare Gewinne in den Räumen sollen im Winter nicht durch Verschattung limitiert werden, sondern es soll durch aktives Kühlen der überhitzten Räume Wärme in kältere Räume umverteilt werden. Durch die hohe Bandbreite von Anforderungen wird eine ausgeklügelte Steuerung benötigt, welche über einen längeren Zeitraum optimiert wurde. Somit soll ein Büro- und Produktionsgebäude entstehen, welches sich zu einem Grossteil selbst mit der benötigten Energie versorgt und einen hohen Autarkiegrad aufweist.

Thermo-aktive, erdberührende Bauteile wie zum Beispiel Schlitzwände, Tunnelwände oder Bodenplatten werden schon seit den 1980er Jahren in der Praxis eingesetzt. Eine eher neuere Anwendung ist die Verwendung von thermo-aktiven Abdichtungselementen (Schutz von Kellerwänden gegen strömendes Grundwasser). Für das vorliegende P&D Projekt ist nur die thermo-aktive Bodenplatte von Interesse, jedoch können Berechnungsgrundlagen und Erfahrungen aus der Anwendung anderer Elemente von Nutzen sein. Den Autoren ist kein Projekt in der Schweiz bekannt, bei welchem die Bodenplatte aktiv zu Kühl- und Heizzwecken für ein Büro/Industriegebäude genutzt wurde. Auch Beispiele aus dem Ausland sind keine bekannt, bei welchem nur die Bodenplatte zum Einsatz kommt, meistens werden Erdpfähle



als Hauptwärmequelle eingesetzt und die Bodenplatte ist nur ein Zusatz. Die bisherigen Erfahrungen beschränken sich auf einzelne Forschungs- und Bauprojekte:

- „WKSP – Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Forschungsbericht von Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch et al., TU Braunschweig 2010. [1]
- „Erdwärmennutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschosskonstruktionen im Grundwasser“, Forschungsbericht von Martin Ziegler und Sylvia Kürten, Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart, 2011. [2]
- Objekte mit thermo-aktiver Bodenplatte: Strabag Office Tower (Wien 2002), U-Bahnlinie U2 (Wien 2004), Wuxi Guolian Financial Tower (China 2009), Uniqua Tower (Wien 2002), aus der Dissertation von Sylvia Kürten, RWTH Aachen. [3]

Im Gegensatz zu diesen Vorhaben verfolgt das vorliegende Projekt ein neues Konzept das u.a. die folgenden Charakteristiken aufweist:

- Aktive Nutzung der Thermo-aktiven Bodenplatte ohne weitere erdbezogene Energiequellen
- PVT-Kollektoren regenerieren die Bodenplatte im Winter (heizen) wie auch im Sommer (kühlen)
- Integrales Heiz- und Kühlkonzept für ein Nicht-Wohngebäude mit hohem Anteil WRG und erneuerbare Energien ohne Erdsonden, Grundwasser, oder Lüftermodule.



1.2 Projektziele

Das vorliegende P&D-Projekt will den Beweis erbringen, dass energetisch effiziente Gebäude ausschliesslich über PVT-Kollektoren und eine thermisch aktivierte Bodenplatte beheizt und gekühlt werden können. Bei einem Gebäude dieser Grösse ist es üblich, Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (EWS) einzusetzen. Diese waren aber für den Standort nicht erlaubt. Daher möchte man mit einer aktivierten Fundamentplatte als Quelle für ein Wärmepumpensystem aufzuzeigen, dass auch in Gebieten, wo keine EWS installiert werden können, effiziente Heiz- und Kühllösungen umgesetzt werden können.

Konkret sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Kann ein Bürogebäude dieser Art den eigenen Wärme- und Kältebedarf ohne Erdsondenbohrungen oder einen Anschluss an ein Anergienetz ausschliesslich über eine PVT-Anlage in Kombination mit einer thermisch aktivierten Bodenplatte decken?
- Ab welchem Zeitpunkt muss die Bodenplatte abgekühlt werden, wann sollte im Frühjahr aufgehört werden die Fundamentplatte zu mit Wärme zu regenerieren, um im Sommer nicht den oberen Temperaturgrenzwert zu erreichen, wann im Herbst aufgehört werden die Fundamentplatte zu Kühlen um viel Wärme in den Winter mitnehmen zu können?
 - Kann ein Modell mit Wärmeleitung/Wärmekapazität des umliegenden Erdreiches das Verhalten der Fundamentplatte abbilden, oder müssen weitere Parameter berücksichtigt werden?
- Kann mit einer PVT-Anlage die nötige Kühlleistung für die Abkühlung der Bodenplatte erbracht werden?
 - Muss eine mögliche Schneebedeckung der PVT-Absorber in die Berechnung mit einbezogen werden? Müssen die PVT-Absorber von Schnee freigeräumt werden?
 - Welche Kühlleistungen können mit PVT-Kollektoren an diesem Standort erreicht werden?



2 Anlagenbeschreibung

2.1 Neubau Hauptsitz Oblamatik AG (neu Viega Schweiz AG)

Die Firma Viega (ehemalig Oblamatik AG) aus Chur GR arbeitet seit 17 Jahren als Entwickler und Hersteller von Sensortechnik im Sanitärbereich. Oblamatik zählte zu den erfolgreichsten Bündner Start-Ups der letzten Jahrzehnte. Ihre innovativen Produkte sind mehrfach ausgezeichnet worden. Mit dem Produkt Cleanlevel (Urinalsteuerung) zum Beispiel war Oblamatik Marktführer in Europa.

Parallel zum wirtschaftlichen Wachstum stieg für Oblamatik auch der Bedarf an Räumlichkeiten für heutige und künftige Mitarbeiter, vor allem im Bereich von Forschung und Entwicklung.



Abbildung 1: Situationsplan neues Oblamatik (Viega) Innovations- und Kompetenzzentrum

In Zusammenarbeit mit dem Churer Architekturbüro Fanzun AG wurde ein Konzept für den Neubau erarbeitet, welches die offene, auf Kommunikation und Innovation basierende Unternehmenskultur von Oblamatik widerspiegelt. In den Büros, in der Produktion und im Lager des neuen Gebäudes finden etwa 100 Mitarbeiter Platz. Ausserdem wurden am neuen Standort auch ein Restaurant, eine Fitness- und Erholungszone und ein Think-Tank-Raum integriert. Das Gebäude wurde im Niederenergie-Standard (Minergie-P) gebaut und gewährleistet gleichzeitig in den Arbeitsräumen grösstmögliche Behaglichkeit. Die wichtigsten energetischen Gebäudeparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Tabelle 1: Auswahl einiger Gebäudeparameter

Gebäudeparameter	
Energiebezugsfläche	6'064 m ²
Fläche Fundamentplatte	1'000 m ²
Heizleistung Wärmepumpen (B10/W35)	2 x 80 kW
Heizbedarf*	130 MWh/a
Kühlbedarf*	143 MWh/a
Strombedarf*	137 MWh/a
Fläche PVT-Anlage	384 m ²
Stromproduktion PVT-Anlage	77 MWh/a

* Gemessene Werte aus dem Jahr 2022



Abbildung 2: Verlegung der Leitungen für die Bodenplattenaktivierung.



Abbildung 3: Atrium auf der linken Seite und rechts Mensa



2.2 Energiekonzept

Das Energiekonzept des Neubaus beruht auf einer thermischen Nutzung des Gebäude-Fundamentes, das mit einer photovoltaisch-thermischen Anlage (PVT) und einem System für die Rückgewinnung von Server-Abwärme kombiniert wird. Die Fundamentplatte des vierstöckigen Bürogebäudes bildet das Kernstück des Systems. Sie befindet sich 7 m unter der Erdoberfläche im zweiten Geschoss und erstreckt sich über eine Fläche von 1000 m² bei einer Dicke von 30 cm. Die Wärmekapazität des Betons beträgt 0,9 [kJ/kgK], was etwa 4,5-mal geringer ist als die von Wasser bei 20 °C. Die Aktivierung der 300 m³ Betonmasse erfolgt über 4'870 m Rohrleitungen, die auf einer Ebene die gesamte Fläche abdecken. Die Bodenplatte fungiert sowohl als Wärme- als auch als Kältespeicher, abhängig vom saisonalen Betriebszustand. Das Temperaturintervall des Betonspeichers erstreckt sich über das gesamte Jahr zwischen 1 °C und 31 °C. Das darunterliegende Erdreich wird passiv mitgenutzt. Um eine ausgeglichene Jahresbilanz zu gewährleisten, erfolgt die Regeneration der thermoaktiven Bodenplatte sowie des Erdreichs durch PVT-Kollektoren. Im Sommer wird über die PVT-Kollektoren gekühlt, im Winter beheizt. Als Wärme- und Kälteerzeuger kommen zwei reversible Wasser/Wasser-Wärmepumpen mit jeweils 80 kW (Heizleistung B10/W35) und 45 kW (Kühlleistung B10/W7) zum Einsatz. Eine der Wärmepumpen ist für die Produktion von Brauchwarmwasser vorgesehen, während die zweite Wärmepumpe gleichzeitig Wärme und Kälte produzieren und je nach Bedarf die Energie in einem Kälte- oder Wärmespeicher zwischenlagern kann. Die hochgedämmte Gebäudehülle mit optimalem Verschattungskonzept ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung des neuartigen Heizungskonzeptes. In Abbildung 4 ist das Heizungs- und Kühlkonzept mittels eines vereinfachten Prinzip-Schemas dargestellt.

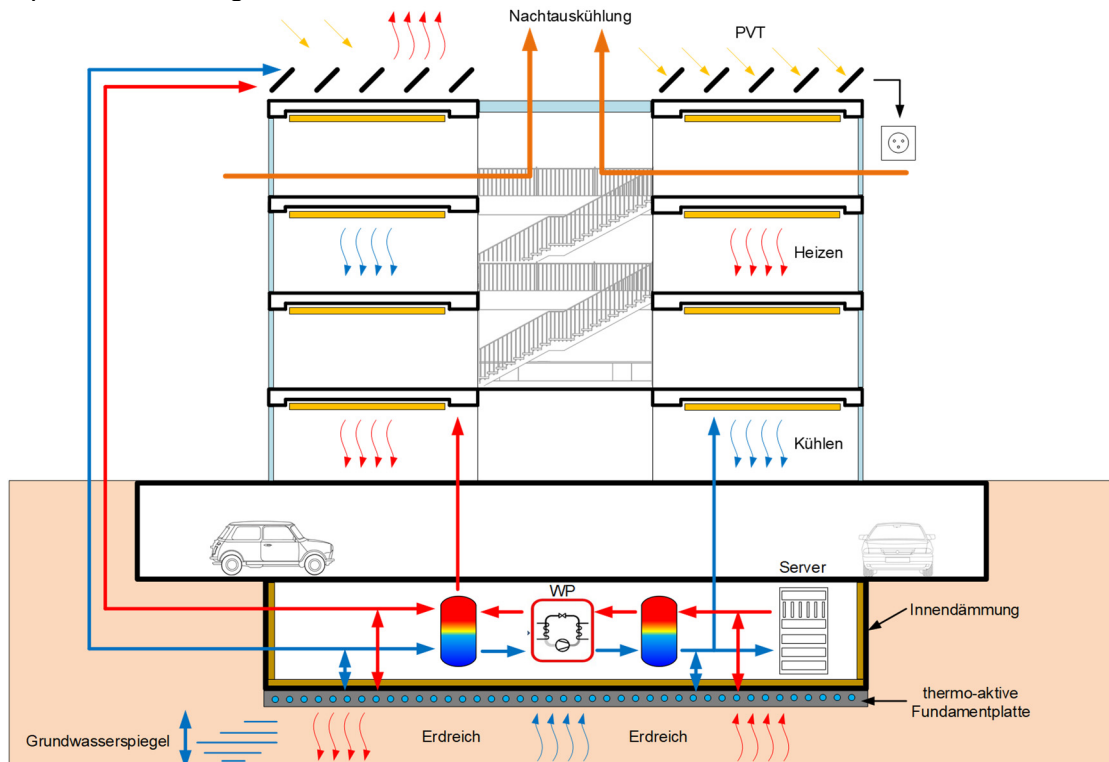


Abbildung 4: Prinzip-Schema des Heiz- und Kühlkonzeptes.

Als Wärmequellen werden die PVT-Anlage auf dem Dach, die Erdwärme aus der Fundament-Bodenplatte im zweiten Untergeschoss und die Abwärme aus dem Serverraum (welche, wie



in Abbildung 4 gezeigt, gespeichert wird) verwendet. Als Wärmesenken im Kühlfall werden vor allem die thermo-aktive Fundamentplatte sowie der Pufferspeicher, respektive der BWW-Speicher verwendet. Um das Überhitzen der Fundamentplatte zu verhindern und den COP der Wärmepumpen im Kühlfall hochzuhalten, wird die Fundamentplatte nachts über die PVT-Kollektoren ausgekühlt. Die Räume werden durch ein intelligentes Belüftungskonzept nachts ausgekühlt, um den Bedarf an aktivem Kühlen zu verringern.

Die aus der PVT-Anlage gewonnene Solarwärme wurde in der Anfangsphase in den BWW-Speicher eingebracht. Während der Optimierungsphase stellte man jedoch fest, dass bei dieser Nutzung der PVT-Kollektoren nur sehr wenig Wärme genutzt werden kann. Deshalb wurde die Hydraulik so geändert, dass nicht mehr der BWW-Speicher bedient wird, sondern die Wärmepumpen im Heizfall den PVT-Ertrag als Quelle nutzen können. Die thermische Nutzung der Bodenplatte kann über die Wärmepumpe direkt erfolgen. Des Weiteren ist ein Kältespeicher mit 6 m³ Wasserinhalt installiert, welcher ebenfalls der Wärmepumpe als Wärmequelle dienen kann.

Im Kühlbetrieb absorbieren die Fundamentplatte und das umliegende Erdreich die Abwärme, welche aus dem Kühlbetrieb der Wärmepumpe entsteht. Das Potential der Wärmeabsorption ist limitiert durch die Wärmekapazität der Bodenplatte und des erschliessbaren Erdreichs. Um genügend Potential zur Wärmeaufnahme für den Kühlbetrieb zu erhalten, muss die thermische Masse während der Nacht regeneriert werden. Diese Abkühlung erfolgt durch Konvektions- und Strahlungsaustausch der 384 m² grossen Absorberfläche der PVT-Anlage gegenüber der Luft und dem kalten Himmel. Wie in Abbildung 4 zu erkennen, findet auch eine natürliche Nachtauskühlung statt.

Da dieses Energiekonzept noch nicht erprobt ist, kann als Backup-Massnahme Wärme und Kälte aus einem Anergienetz entzogen bzw. abgegeben werden. Ziel ist jedoch, dass die Anschlussleistung möglichst geringgehalten wird und Wärme oder Kälte aus dem Brunnen nur im Notfall bezogen werden.

Abbildung 5 zeigt ein vereinfachtes Prinzipschema der Anlage. Da sich die verschiedenen Operationsmodi nicht in ein einziges Schema einzeichnen lassen, sind diese im Anhang, Kapitel 8.2 Betriebsmodi dargestellt. Erklärt sind die neun Betriebszustände, benannt gemäss Leitstellenindikation (Status 0, 1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14), in Kapitel 2.5 und 8.4.

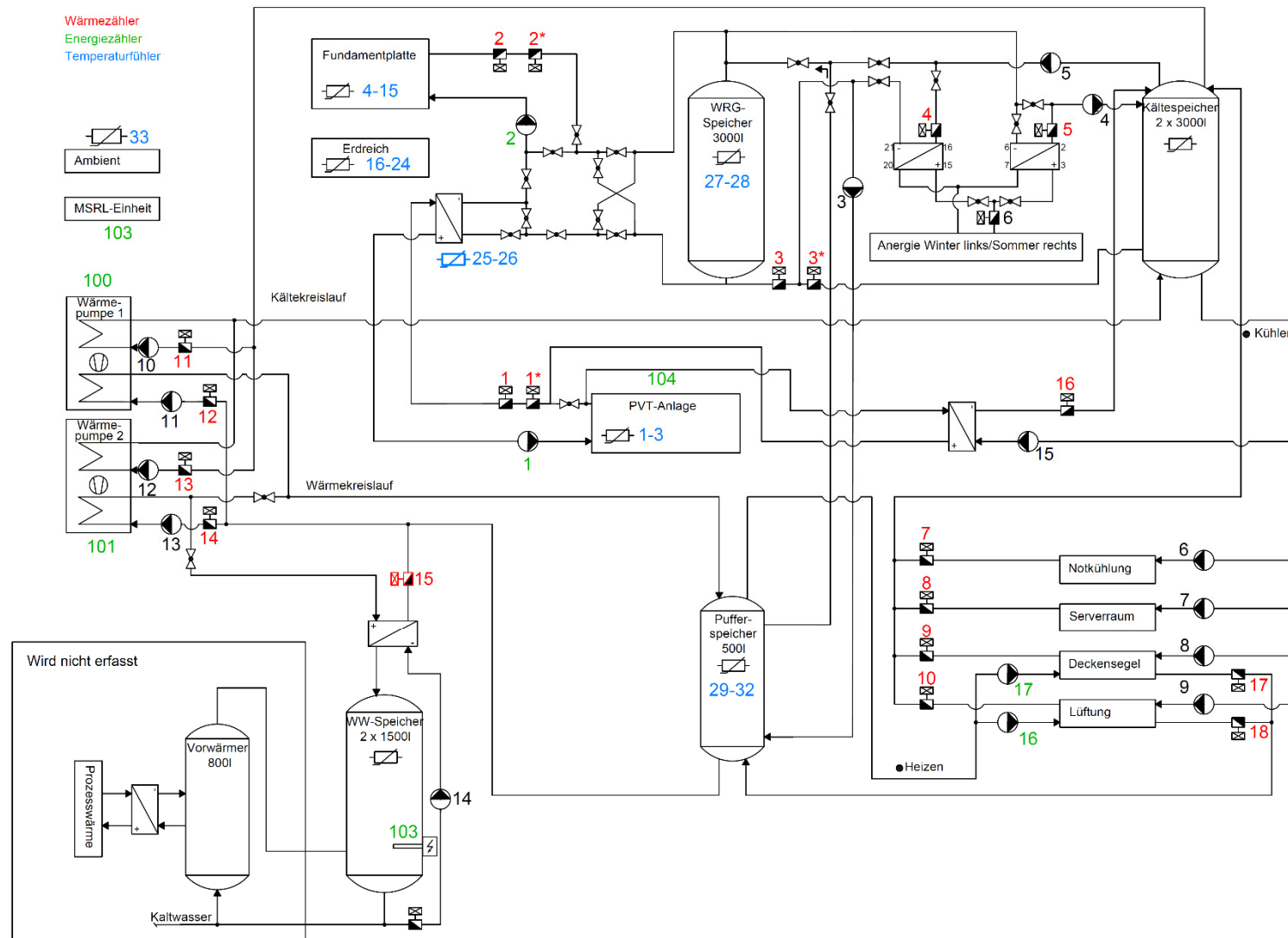


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema der Anlage mit Messstellen für Wärmemengen, elektrische Energie und Temperaturen



2.3 PVT-Anlage

Die 384 m² grosse PVT-Anlage auf dem Dach erfüllt gleich mehrere Aufgaben. Zum einen produziert sie tagsüber einen Teil des Strombedarfs für das Unternehmens. Gleichzeitig kann Wärme über die Wärmetauscherfläche der PVT-Module als Quelle für die Wärmepumpen genutzt, oder im Winter die Fundamentplatte mit Wärme beladen (Wärmeregeneration) werden. Am wichtigsten für das Gesamtkonzept ist jedoch die Kühlfunktion. Im Sommer produziert das Gebäude viel Abwärme, welche nur zum Teil im Fundament gespeichert werden kann. Durch die hydraulische Kopplung der Fundamentplatte mit der PVT-Anlage kann diese jedoch nicht nur geheizt, sondern auch gekühlt werden. Durch Wärmestrahlung und Konvektion kann die PVT-Anlage Energie an die Umgebung abgeben. Dies geschieht vor allem nachts und an bewölkten Tagen, wenn die Module kalt genug sind. Dank dieser Kühlfunktion wird eine Überhitzung der Fundamentplatte vermieden, welche 31 °C nicht überschreiten darf, da sich sonst auch die darüberliegenden Lagerräume zu stark aufheizen.

Ein herkömmliches PVT-Modul ist wärmegeklämt, um möglichst viel Wärme aufzunehmen und dabei die Verluste gering zu halten. Daher ist es zum Kühlen ungeeignet. Aus diesem Grund mussten für diese Anlage die PVT-Module selbst konzipiert und zusammengebaut werden. Die Eigenproduktion der Firma Caotec SA besteht aus 236 SAM60/6 LAM GG BLK Doppelglas-Modulen der Firma Sunage mit einer Leistung von 300 Wp pro Modul. Der thermische Teil der PVT-Module, welcher als Wärmetauscher einen unisolierten Roll-Bond Absorber aus Aluminium nutzt, wurde nachträglich installiert. Die elektrische Gesamtleistung des PVT-Feldes beträgt 70.8 kWp. Aufgrund der Eigenproduktion gibt es keine ausgewiesene Wärme- oder Kälteleistung. Anhand der Messdaten aus der Monitoringperiode ergibt sich eine max. Heizleistung von etwa 60 kW und eine max. Kälteleistung von etwa 80 kW.



Abbildung 6: Fertig installierte PVT-Module.



2.4 Wärme- und Kälteverteilung

Das Wärmemanagement des Gebäudes sieht bewusst davon ab, die Wärme in den Arbeitsräumen mittels rein thermoaktivierten Betonelementen (TABS) zu verteilen. Dies deshalb, weil auf Grund der Gestaltung, Ausrichtung und benutzerdefinierten Anforderungen des Gebäudes eine differenzierte Zonenkonditionierung jedes Gebäudestockes und sogar -bereiches erforderlich ist. TABS würden bei diesem Bürogebäude hinsichtlich der hohen dynamischen Anforderung an die Konditionierung zu träge reagieren. Daher wird in diesem Konzept die Wärme- und Kälteabgabe in den Räumen mittels Hybriddeckensegel sichergestellt, welche schneller auf die klimatischen Anforderungen reagieren können. Als Deckenelemente wurde das Produkt Plafotherm DS 320 von Lindner ausgewählt. Das Metaldeckensegel ist hydraulisch an einem 4-Leiter-System angeschlossen und kann sowohl als Kühl- als auch als Heizelement fungieren. Diese Elemente übernehmen in diesem Kontext auch die schallabsorbierende Funktion. Die Nenn-Kühlleistung beträgt 135 W/m^2 und die Nenn-Heizleistung liegt bei 163 W/m^2 . Ein Datenblatt kann dem Anhang entnommen werden.



Abbildung 7: Hybriddeckenmodule für die Wärme- und Kälteverteilung (Quelle: Lindner).

2.5 Anlagenregelung

Die Wärmepumpen weisen grundsätzlich drei Betriebsmodi auf: Heizmodus, Kühlmodus und Brauchwarmwassermodus. Die höchste Priorität weist der Brauchwarmwassermodus auf. Die Bereitstellung von Brauchwarmwasser erfolgt nur durch eine Wärmepumpe (im folgendem als Wärmepumpe 1 bezeichnet). Kühlen und Heizen können beide Wärmepumpen. Je nach benötigter Leistung läuft nur eine der beiden Wärmepumpen. Zwischen 25 % und 60 % Speicherbeladung im Kälte- oder Heizspeicher ist nur eine der beiden Wärmepumpen im Betrieb, unter 25 % wird die zweite Wärmepumpe angefordert. Um gleichmässige Laufzeiten zu erreichen, wechseln die Wärmepumpen in der Reihenfolge. Der Ladezustand wird anhand des höchsten Sollwerts der aktiven Heizgruppe respektive niedrigsten Sollwerts der aktiven Kühlgruppe berechnet.

Durch die grosse Anzahl an Kombinationen, mit denen Wärme bzw. Kälte bereitgestellt werden kann, sind verschiedene Betriebsmodi möglich. Folgende neun Betriebszustände werden momentan genutzt:



Regeneration:

1. Kein Bedarf an Kälte oder Wärme: Die Wärmepumpen sind aus, das Anergienetz wird nicht genutzt. Die Wärme-/Kältereeneration der Fundamentplatte über die PVT-Anlage ist möglich. Dabei gilt T-PVT muss mind. 3 K tiefer als T-Fundamentplatte (T_{vl}) für die Kältereeneration sein. Die Wärmeregeneration ist bei einer Fundamentplattentemperatur von kleiner 29 °C möglich, die Temperatur der PVT-Anlage muss dabei min. 3 K höher sein als die der Fundamentplatte (T_{vl}).

Kältebedarf:

2. Free-Cooling: Im Frühjahr, nachdem im Winter das Erdreich und die Fundamentplatte abgekühlt wurde, besteht die Möglichkeit, das Gebäude ohne WP zu kühlen. Kältere Nächte können ebenfalls zur Kühlung des Kältespeichers über die PVT genutzt werden. (Status 1)
3. Kälteranforderung ein: Die Wärmepumpen laufen und geben die produzierte Abwärme an den Heizspeicher oder an den BWW-Speicher ab. Der Rücklauf des Verdampfers lädt den Kältespeicher resp. Versorgt die Verbraucher. (Status 2)
4. Kälteanforderung ein: Die Wärmepumpen laufen und geben die produzierte Abwärme über den Heizspeicher weiter an die Fundamentplatte (bis diese max. 31 °C erreicht) und oder die PVT-Anlage, sofern die PVT-Vorlauftemperatur geringer ist als Vorlauftemperatur der Wärmepumpe. Der Rücklauf des Verdampfers lädt den Kältespeicher resp. Versorgt die Verbraucher. (Status 3)
5. Kälteanforderung ein, Anergie: Ist die Fundamentplatte zu stark aufgeheizt (August, September), wird Kälte vom Anergienetz der IBC Chur bezogen. Die Wärmepumpen werden ausgeschaltet. Dieser Fall tritt ein, wenn die Fundamentplatte 31 °C überschreitet. (Status 4)

Wärmebedarf:

6. Wärmeanforderung ein: Die Wärmepumpen laufen, als Quelle dient der Kältespeicher bis dieser auf 4 °C abgekühlt ist. (Status 11)
7. Wärmeanforderung ein: Die Wärmepumpen laufen, als Quelle dient der Fundamentplatte, bis diese auf 1.5 °C abgekühlt ist. (Status 12)
8. Wärmeanforderung ein: Die Wärmepumpen laufen, als Quelle dient die Fundamentplatte und das Anergienetz, dieser Modus ist aktiv bei einer Fundamentplattentemperatur zwischen 1 und 1.5 °C. (Status 13)
9. Wärmeanforderung ein: die Wärmepumpen laufen, als Quelle dient das Grundwasser (Anergienetz), wenn die Fundamentplattentemperatur unter 1 °C beträgt. (Status 14)

Ein ausführlicher Regelbeschrieb kann dem Anhang Kapitel 8.4 entnommen werden.



3 Messkonzept

Mit dem Messprojekt wird die Datenerhebung, -auswertung und die Erfolgskontrolle des Gesamtsystems gemacht. Die gewonnenen Daten dienen als Grundlage für den Wissenstransfer und den Knowhow-Aufbau. Das Ziel des Messprojektes ist es, mit den erfassten Daten das gesamte Wärme- und Kälteerzeugungssystem des Gebäudes abbilden zu können. Dadurch kann das Verhalten des Systems untersucht und Optimierungspotential erkannt werden.

Das Messkonzept erfasst bei allen relevanten Anlagenbereichen (aktivierte Fundamentplatte, PVT-Anlage, Wärmepumpen, Quellen und Senken) die Energieströme. Dazu werden sowohl die Temperaturen im Vor- und Rücklauf als auch die Durchflüsse erfasst. Mit den ermittelten Energieströmen kann die gesamte Energiebilanz des Heiz- und Kühlsystems abgebildet werden.

Zusätzlich werden bei den speziell zu untersuchenden Anlagenkomponenten, wie z.B. der Fundamentplatte, spezifischere Messungen gemacht. Hier werden an verschiedenen Stellen die Erdoberflächentemperaturen in den darunterliegenden Schichten erfasst, sowohl im Randbereich wie auch im mittleren Bereich unter der Bodenplatte. Referenzmessungen ausserhalb der Betonplatte ermöglichen einen Vergleich mit dem natürlichen Temperaturprofil des Erdbereiches. Bei der Fundamentplatte werden Kerntemperaturen an verschiedenen Positionen im Beton erfasst.

Bei der PVT-Anlage sind im Kühlbetrieb die nächtlichen Modultemperaturen im Vergleich mit der Umgebung von Relevanz. Deshalb werden diese an mehreren Stellen verteilt über die gesamte Anlage erfasst. Die im System eingesetzten Wärmepumpen werden anhand einer Leistungsmessung und Effizienzbestimmung ausgewertet. Dafür wird die Jahresarbeitszahl und der Systemnutzungsgrad bestimmt.

Dabei soll auch überprüft werden, inwiefern der PV-Strom im Gebäude genutzt wird und wieviel davon ins Netz eingespeist wird. Eine Optimierung des Eigenverbrauchs wird angestrebt. Die Meteorologischen Daten wie Aussentemperatur, Wind und die solare Globalstrahlung werden erfasst.

Abbildung 8 zeigt die Temperaturmessstellen im Boden und der Fundamentplatte. Die roten Kreise zeigen die Sensoren, die einen, drei und fünf Meter unterhalb der Fundamentplatte die Temperatur messen. Die Reihe ist diagonal von links oben nach rechts unten angeordnet und misst in Flussrichtung des Grundwassers. Die genaue Position ist in Abbildung 9 zu sehen. Leider kam es zu Beginn bereits zu einem Ausfall der Messreihe vor dem Gebäude (Kreis links oben). Die schwarzen Kreise zeigen die Position der Temperaturfühler innerhalb der Fundamentplatte an, diese sind eindimensional, also alle auf einer Ebene angeordnet.

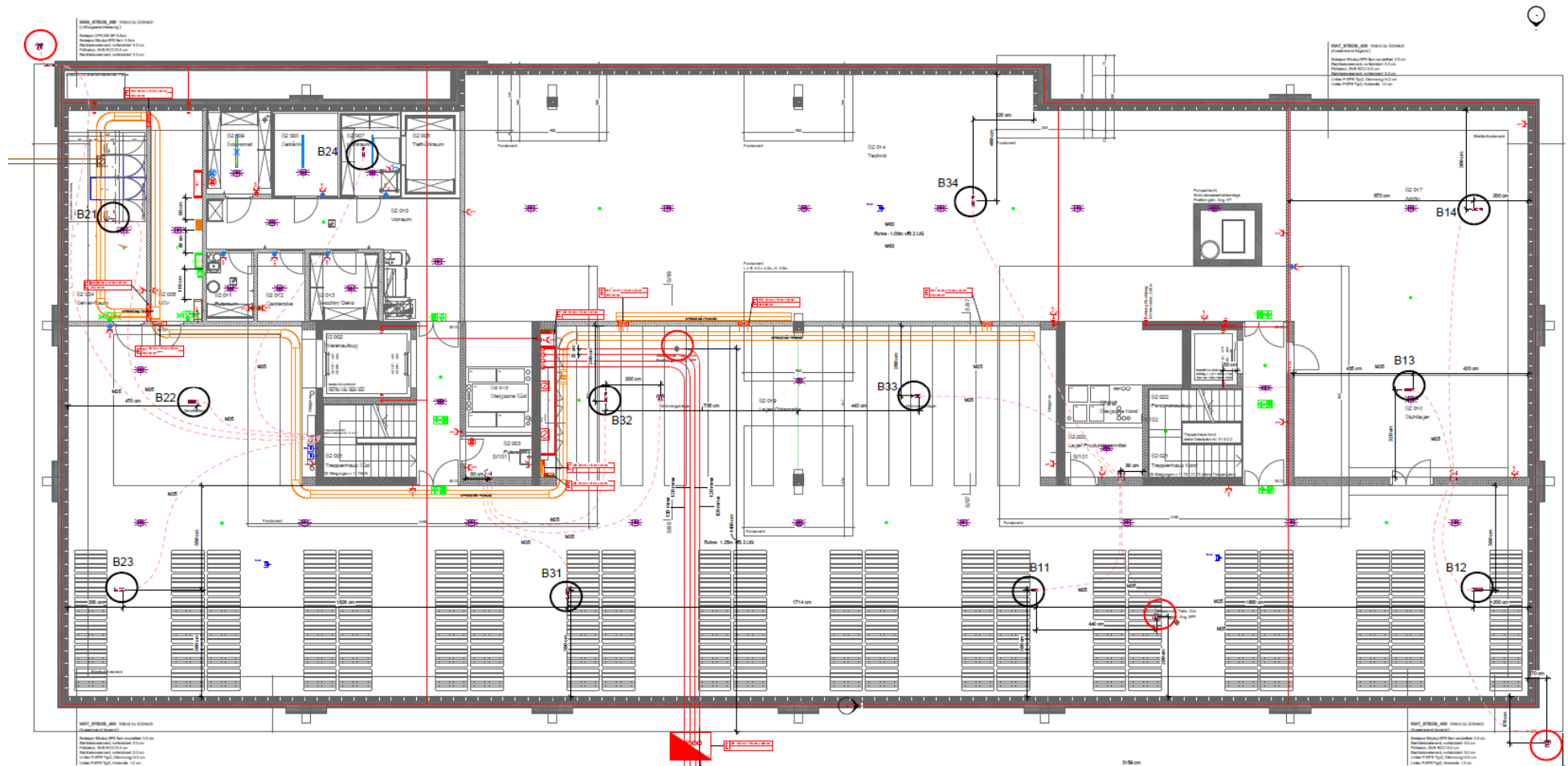
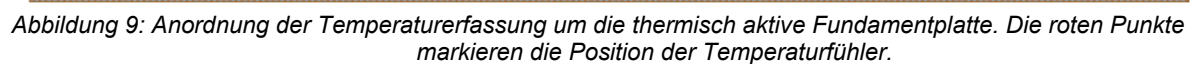
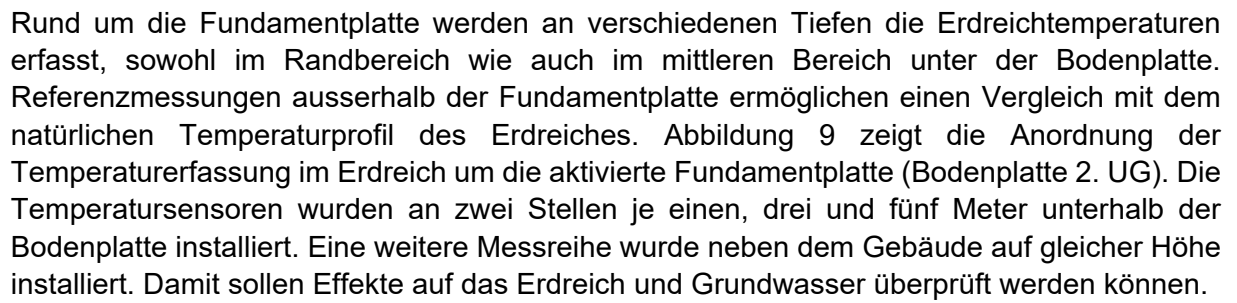


Abbildung 8: Temperaturerfassung in der Bodenplatte und im Erdreich (siehe schwarze und rote Kreise).





3.1 Messmittel und Messunsicherheiten

Die Wärmeströme wurden mittels Wärmemengenzählern des Typs NeoVac Supercal 531 gemessen, welche eine Fehlergrenze von $< \pm 5\%$ aufweisen. Für Messungen des elektrischen Energieverbrauchs wurden Messgeräte vom Typ Janitza UMG 96 RM mit einer Fehlergrenze von $\pm 0.2\%$ verwendet. Die Temperaturmessungen wurden mit Widerstandstemperturfühlern (in Vierleitermessung für Eliminierung der Leitungswiderstände) der Genauigkeitsklasse B und mit Hilfe von Analogeingangsmodule von Advantech ADAM-4015 erfasst. Für die Temperaturdaten ergibt sich dadurch eine Fehlergrenze von ca. $\pm (0.5 + 0.005 \cdot |\vartheta|)$ °C, wo ϑ für die gemessene Temperatur in °C steht.

Für Quotienten, beispielweise Jahresarbeitszahlen oder Systemnutzungsgrade, berechnet sich die Messunsicherheit aus der Wurzel der Summe der Quadrate der Standardabweichung des Zählers und des Nenners. Die einfache Standardabweichung berechnet sich nach Gleichung 1. So beträgt die Fehlergrenze bei den genannten Beispielen $\pm 3.0\%$ (JAZ-Berechnung mittels Wärmemengenzähler & Stromverbrauchsmessung).

In der Auswertung wurde die zweifache Standardabweichung (2σ , Vertrauensintervall $\pm 95\%$) verwendet, was zu grösseren Messunsicherheiten bei der Ermittlung der JAZ führt ($\pm 6\%$).

$$\sigma = \sqrt{\varepsilon^2 / 3} \quad \text{Gl. 1}$$

3.2 KPI – Key Performance Indicators

In diesem Kapitel werden alle Kennwerte beschrieben, die für die Auswertung verwendet werden, und ihre Berechnungsmethode.

Wärmemengen werden im Bericht jeweils mit dem Buchstaben Q und die elektrische Energie mit E angegeben. Die PVT-Kollektoren werden mit dem Index PVT gekennzeichnet.

3.2.1 Arbeitszahlen der Wärmepumpen und Systemnutzungsgrade

Eine zentrale Grösse für den Vergleich von Wärmepumpensystemen ist das Verhältnis zwischen der gelieferten Wärme und dem dafür aufgewendeten Strom, hier jeweils über einen Jahreszeitraum bilanziert. Werden dabei nur die Wärmepumpe und die Umwälzpumpe betrachtet, so spricht man von der Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe.

$$JAZ_{WP} = \frac{Q_{WP}}{E_{Kompressor} + E_{Pumpe,Prim}} \quad \text{Gl. 2}$$

wo Q_{WP} die von der WP ans System abgegebene Wärme bezeichnet, die Terme im Nenner die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors ($E_{Kompressor}$), und der primären Umwälzpumpe ($E_{Pumpe,Prim}$) berücksichtigen.

Möchte man gezielt nur die Effizienz der Wärmepumpe zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmen wird dies mit dem Coefficient of Performance (COP) ausgewiesen.

Spricht man nur vom Kühlen, wird anstelle vom COP der Begriff Energy Efficiency Ratio (EER) verwendet.

Beim Systemnutzungsgrad (SNG+) werden die Systemgrenzen weiter gefasst, es werden also auch zusätzliche Komponenten miteinbezogen. Zudem wird hierbei nicht die produzierte



Wärme berücksichtigt, sondern die Nutzenergie nach den Speichern. Speicherverluste werden also berücksichtigt. Die abgegebene Wärmemenge (Nutzenergie) besteht beim SNG aus der nach dem Puffer und Kältespeicher gemessenen Wärme (Kälte). Auf der Verbrauchsseite wird beim SNG+ der Stromverbrauch aller Komponenten des Heizsystems miteinbezogen, also zusätzlich zum Stromverbrauch der WP auch derjenige der Umwälzpumpen. Da der Verbrauch an Brauchwarmwasser nicht gemessen wurde, bezieht sich der SNG nur auf das Heizen und Kühlen. Die hier gewählten Systemgrenzen entsprechen denjenigen, welche im Rahmen der «Feldmessungen Wärmepumpen-Anlagen 2015-2018» [1] in Absprache mit EnergieSchweiz (Wärmepumpenprogramm) definiert worden sind.

Ob ein System lokalen PV-Strom erzeugt oder nicht hat keinen Einfluss auf die in diesem Kapitel beschriebenen Kennwerte.

$$SNG+ = \frac{Q_{\text{nutz}}}{E_{\text{sys}}}$$

Gl. 3

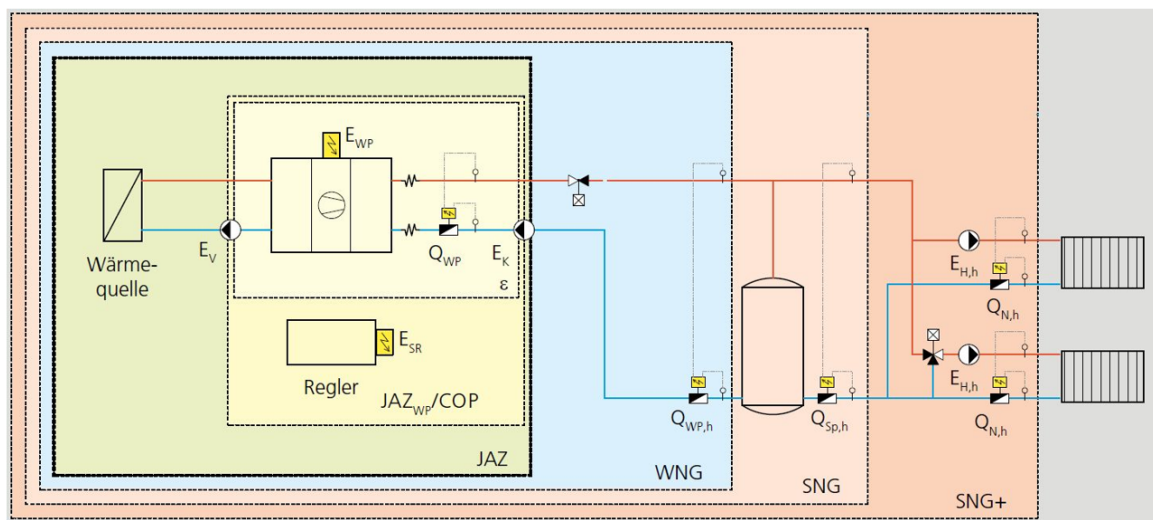


Abbildung 10: Systemgrenzen und Definitionen für den Coefficient of Performance (COP), die Jahresarbeitszahl (JAZ) und den Systemnutzungsgrad (SNG) (modifiziert nach [1]).



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Anlagenänderungen, Optimierungen und Monitoring

Die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse beziehen sich hauptsächlich auf die Auswertungen im Jahr 2022 und die erste Hälfte des Jahres 2023. Im Verlauf der Jahre 2021 und 2022 wurden diverse Komponenten der Gesamtanlage in Betrieb genommen, umgebaut oder Fehler behoben. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Änderungen am System zusammengefasst.

Tabelle 2: Wichtige Anpassungen am Gesamtsystem oder dem Monitoring.

Anlagekomponente	Datum	Bemerkungen
Wärmepumpe 2	04.2020	Austausch nach Defekt aufgrund fehlerhafter Regelung
Fundamentplatte	09.2021	Umstellung von Wasser zu Glykol in Fundamentplatte und Heizverteilung, um tiefere Temperaturen zu erreichen
PVT-Anlage/BWW-Speicher	09.2021	Anstatt dem BWW-Speicher zu beladen, kann jetzt die PVT-Anlage als Quelle für die Wärmepumpe genutzt werden
PVT-Anlage	03.2021	Erneuter hydraulischer Abgleich nach Infrarotaufnahmen
Wärmepumpe1 BWW	04.2023 bis 06.2023	Heizeinsatz produziert WW, Probleme durch zu hohe Temperatur beim Wechsel von WW zum Heizen da Verdichterleistung steigt und das bereits warme BWW kurzzeitig 65°C übersteigt -> Regelung angepasst



4.2 Energieflüsse und Energiebilanzen

Drei verschiedene Energieflussdiagramme der Anlage sind in Abbildung 11 bis Abbildung 13 zu sehen. Die erste Abbildung zeigt den gesamten Zeitraum des Jahres 2022, die zweite nur den Zeitraum der Heizperiode und die dritte den Zeitraum ausserhalb der Heizperiode. Alle Werte sind in MWh/a angegeben. Die Pfeile zeigen immer in Wärmeflussrichtung, um die Bilanzen in den Speichern aufstellen zu können. Das heisst, dass beispielsweise im Kühlfall der Pfeil mit der Energie weg vom Verbraucher zeigt, da die Wärme dem Verbraucher entzogen wird. Die Pfeile bei der Wärmepumpe unterscheiden zwischen Produktion bei Bedarf und Produktion als Abwärme sowie Kühlen der Quelle bei Heizbedarf. Das gilt zum Beispiel bei der Wärmeproduktion (Abwärme) im Kühlfall und Wärmeentnahme des Kältespeichers im Heizfall. Gibt es einen gleichzeitigen Bedarf an Kühlung und Heizen/BWW-Produktion wird der Prozess der Wärmeproduktion zugeschrieben. Daher ist der Pfeil für aktives Kühlen zwischen Verbraucher und Kältespeicher dicker als zwischen Kältespeicher und Wärmepumpe.

Die Bilanz zwischen Kältespeicher und WRG-Speicher, welcher in erster Linie als hydraulische Weiche dient, kann nicht vollständig angegeben werden, da nicht alle Energieströme gemessen werden, zudem gab es im Februar 2022 einen Ausfall eines Zählers am WRG-Speicher. Auch der Brauchwarmwasserbedarf wird nicht gemessen. Die wichtigsten Teile der Anlage werden aber bilanziert, dazu gehören die Fundamentplatte, die PVT-Anlage und die Heizwärme- und Kälteverbraucher.

Auffällig ist die geringe Wärmeproduktion der PVT-Anlage (oranger und lila Pfeil in Abbildung 11), darauf wird im Kapitel 4.6 näher eingegangen. Die Wärme, die zwecks Wärmeabwurf in die PVT-Anlage geleitet wird, wird an die Umgebungsluft abgegeben (hellgrüner Pfeil). Das Brauchwarmwasser wurde zu einem Fünftel über den Elektroeinsatz erzeugt. Dies lag daran, dass die Wärmepumpe für einen Zeitraum von etwa zwei Monaten kein Brauchwarmwasser produzierte, da sie im Fall von anschliessender Heizwärmeproduktion in Störung ging. Da hierbei die Verdichterleistung aufgrund des grösseren Durchsatzes ansteigt, überschritt das Wasser, welches noch von der Brauchwarmwasserladung aufgeheizt war, den Temperaturgrenzwert der Wärmepumpe von 65 °C. Dies wurde durch eine Anpassung der Regelung behoben.

In Abbildung 12 sieht man, dass es auch einen Kühlbedarf der Büroräume während der Heizperiode gibt. Dies ist vor allem in der Übergangszeit der Fall. Ein kleiner Teil wird auch Winter gekühlt, da nichtbelegte Räume durch Sonneneinstrahlung gezielt überhitzt werden um die so gewonnen Wärme durch Kühlen des Raumes nutzen zu können. Dadurch kann die Fundamentplatte als Wärmequelle entlastet werden.

Abbildung 13 zeigt die Kühlperiode im Jahr 2022. Die Abwärme, welche beim aktiven Kühlen produziert wird, geht zum grössten Teil (80.7 MWh) in die Fundamentplatte, welche die Wärme wiederum zum Teil an das Erdreich (nicht gemessen) und an die PVT-Anlage abgibt. Ein kleiner Teil (15.4 MWh) der produzierten Abwärme der Wärmepumpen wird über die PVT-Anlage direkt an die Umwelt abgegeben.

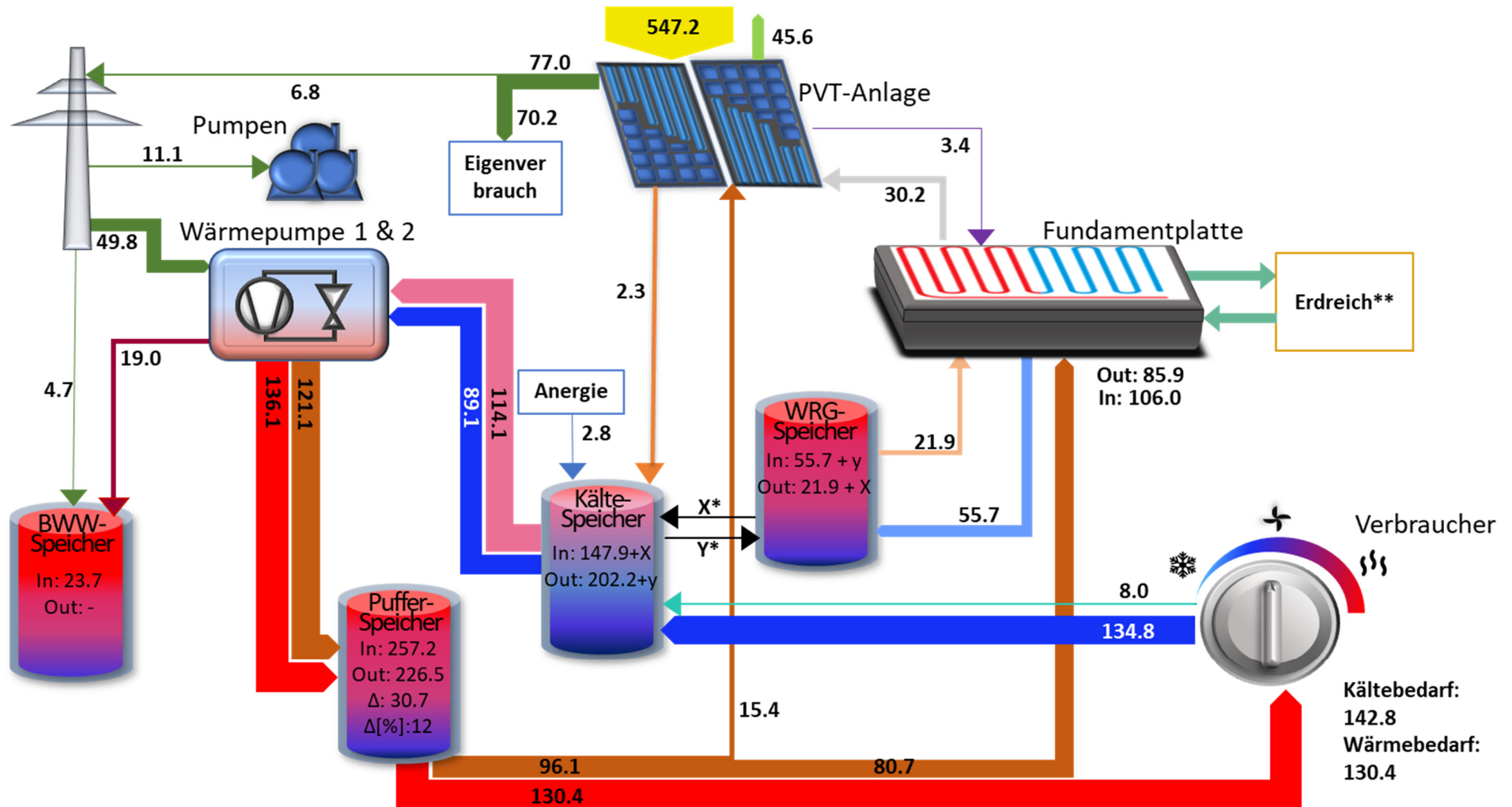


Abbildung 11: Energieflussdiagramm, die Einheiten sind in MWh/a. *Zwischen Kältespeicher und WRG-Speicher gibt es keinen separaten Zähler, weshalb hier keine endgültige Bilanz aufgestellt werden kann (mit X und Y gekennzeichnet). ** Die Wärmebilanz zwischen Erdreich und Fundamentplatte wird nicht gemessen.

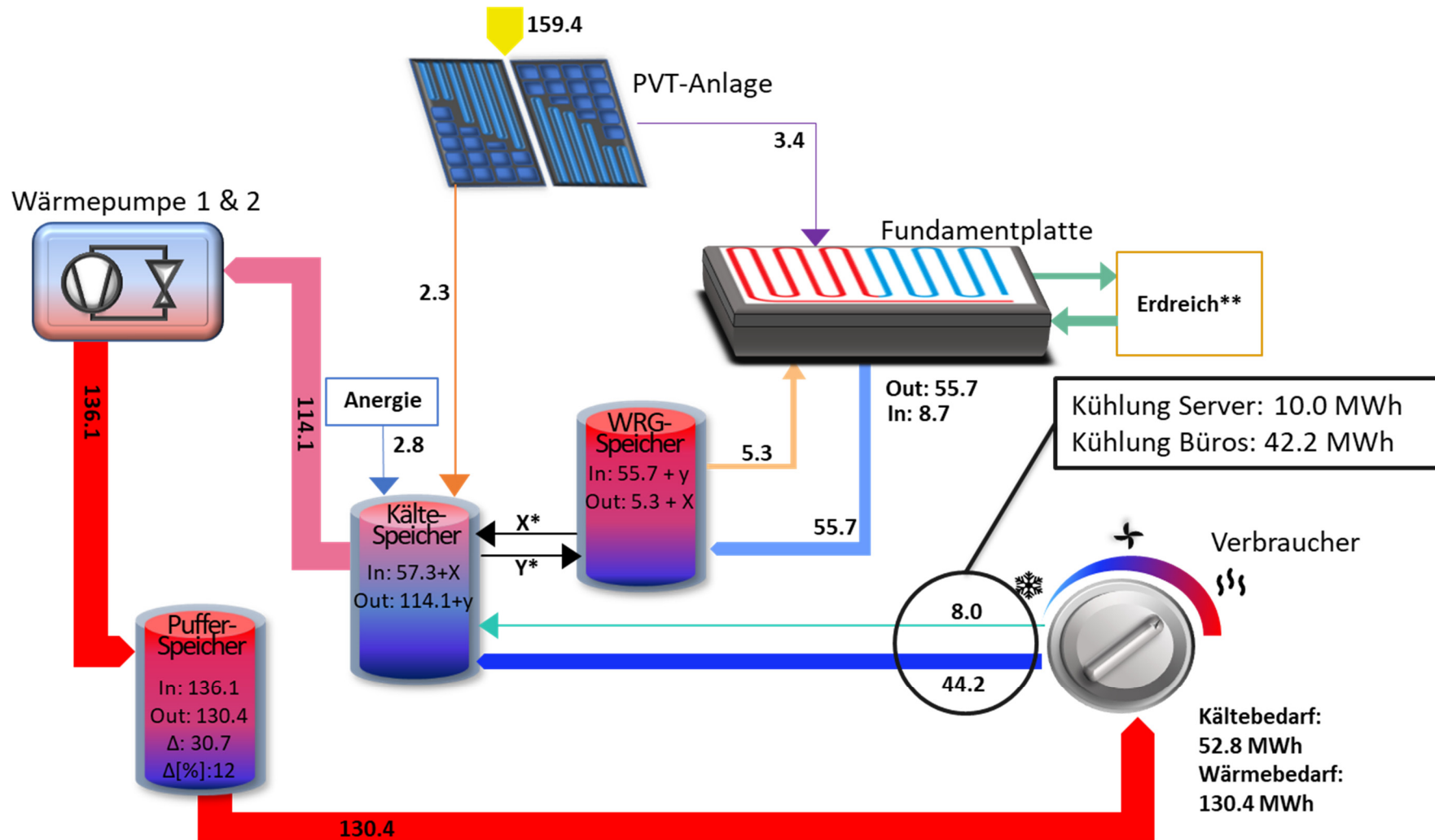


Abbildung 12: Ausschnitt Energieflussdiagramm für die Heizperiode 2022, die Einheiten sind in MWh/a. Vor allem in den Übergangszeiten werden die Büros über den Tag sowohl geheizt und gekühlt. ** Die Wärmebilanz zwischen Erdreich und Fundamentplatte wird nicht gemessen.

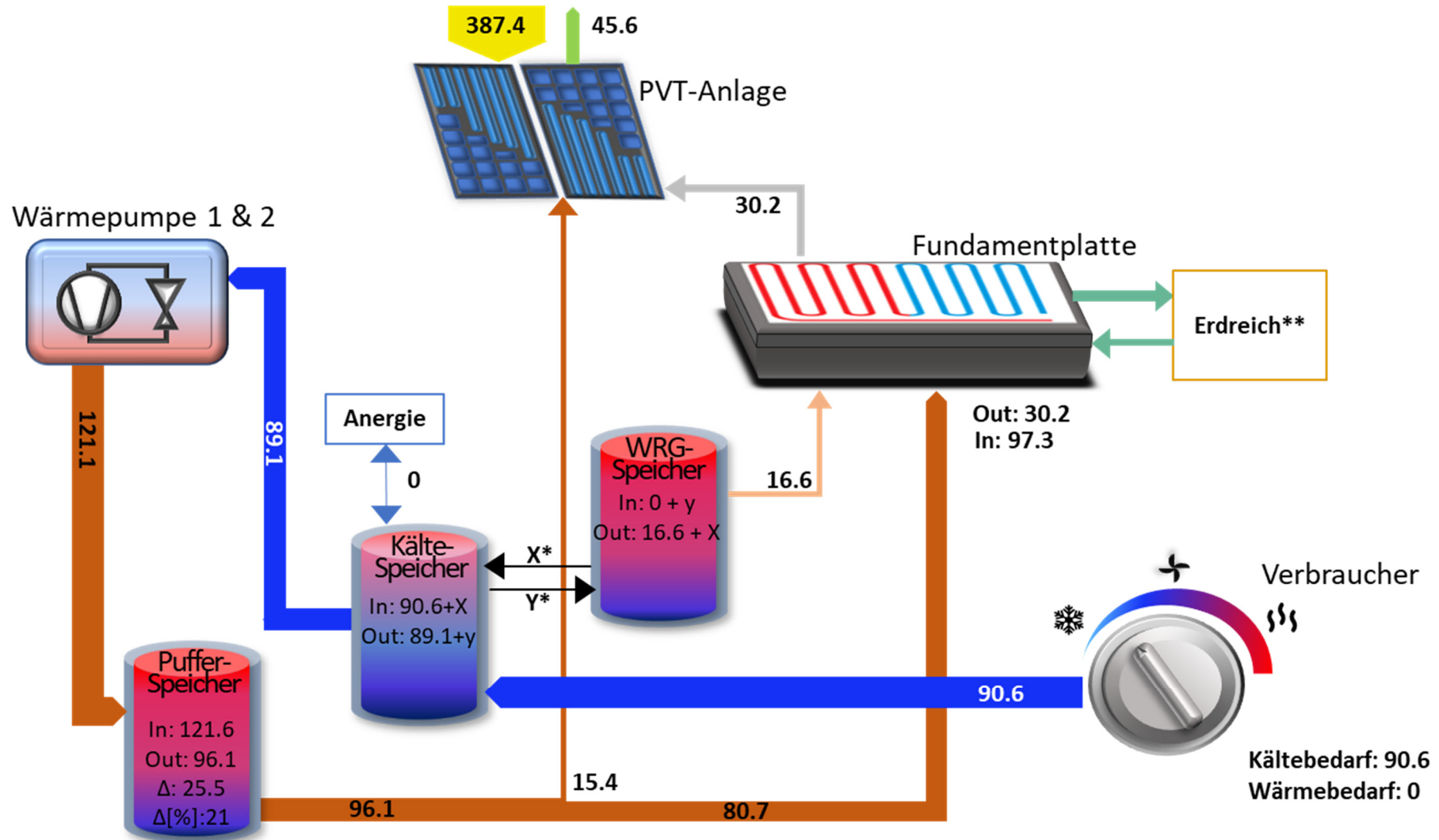


Abbildung 13: Ausschnitt Energieflussdiagramm für den Zeitraum ausserhalb der Heizperiode 2022, die Einheiten sind in MWh/a. Als Wärmesenke für die Abwärme, welche beim aktiven Kühlen entsteht dienen der Pufferspeicher, die Fundamentplatte und die PVT-Anlage (ein kleiner Teil wird auch für die BWW-Produktion verwendet, hier nicht eingezeichnet). ** Die Wärmebilanz zwischen Erdreich und Fundamentplatte wird nicht gemessen.



Tabelle 3: Farbcode für die Darstellung der Energieflüsse in den Energieflussdiagrammen.

	Elektrische Energie
	Heizwärme
	Abwärme/Wärmeregeneration Fundamentplatte (aktives Kühlen)
	Brauchwarmwasser
	Aktive Kühlung
	Free-Cooling
	Wärme als Quelle für Wärmepumpe aus Kältespeicher in der Heizsaison
	PVT-Wärme als Quelle für Wärmepumpe
	Kältereeneration Fundamentplatte als Quelle zum Heizen/BWW-Produktion
	Wärmeregeneration Fundamentplatte als Senke bei aktivem Kühlen/Free-Cooling
	Kältereeneration Fundamentplatte durch PVT-Anlage
	Wärmeregeneration Fundamentplatte durch PVT-Anlage
	Wärmeströme zwischen Kältespeicher und WRG-Speicher werden nicht erfasst
	Solarstrahlung auf die PVT-Kollektorfläche
	Wärmeabgabe der PVT-Anlage an die Umwelt
	Wärmeströme zwischen Erdreich und Fundamentplatte

Der Wärmefluss zwischen Fundamentplatte und Erdreich wird nicht gemessen, jedoch die Temperaturen auf verschiedenen Höhen, um den Einfluss der thermoaktiven Fundamentplatte abschätzen zu können. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.3 Fundamentplatte

Die Bodenplatte zusammen mit der PVT-Anlage ist das Kernstück des Heiz- und Kühlsystems. Die Platte weist bei einem Volumen von 300 m³ ein spezifisches Speichervermögen von etwa 200 kWh pro ein Kelvin auf. Bei einem ΔT von 20 K entspricht dies einer gespeicherten Energie von 4 MWh. Die Wärmekapazität von Beton beträgt bezogen auf die Masse etwa ein Fünftel der von Wasser, die Dichte ist jedoch fast Faktor drei grösser. Ein Wasserspeicher mit gleicher Speicherfähigkeit hätte daher ein Volumen von ungefähr 170 m³.

Die Temperatur der Fundamentplatte ist stark abhängig vom Heiz- und Kältebedarf des Gebäudes. Der über fast drei Jahre gemessene Temperaturverlauf in der Bodenplatte ist in Abbildung 14 dargestellt. Neben dem saisonalen Temperaturverlauf Winter/Sommer sind auch kurzfristige Temperaturschwankungen zu sehen, welche auf die Regelung und den Heiz- und Kältebedarf zurückzuführen sind. So sieht man im Frühjahr 2023 gut, wie die Fundamentplatte nur bis max. 10 °C aufgewärmt wird, um ein Überhitzen im Sommer zu vermeiden.

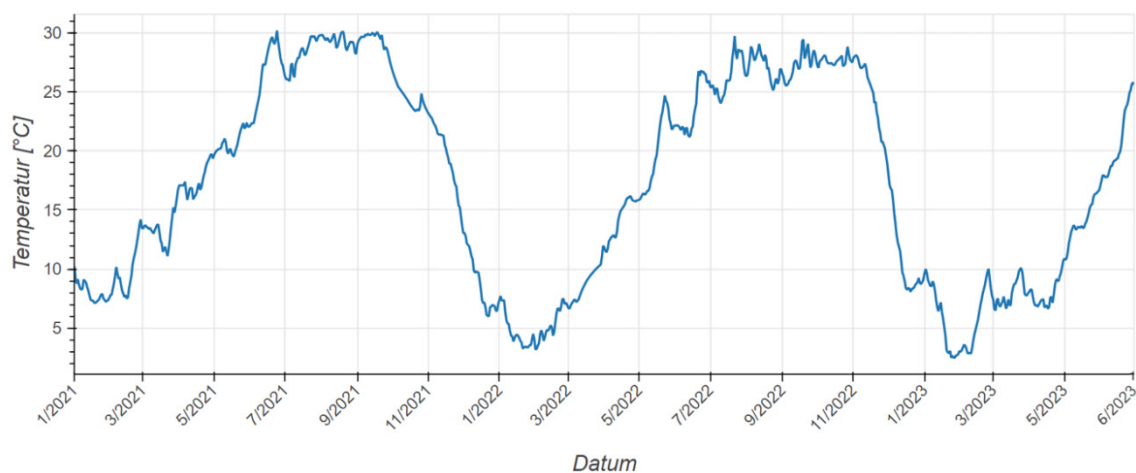


Abbildung 14: Mittlerer Temperaturverlauf der Fundamentplatte über den gesamten Messzeitraum.

Abbildung 14 zeigt, dass die Temperatur in der Bodenplatte zwischen Februar und Juli steigt und das Fundament sich um bis zu 30 K erwärmt. Jeweils am Ende eines Jahres kühlt die Fundamentplatte innerhalb kurzer Zeit ab. Im Jahr 2021 betrug die Minimaltemperatur 7.0 °C, im Jahr 2022 und Anfang 2023 lag dieser Wert auf 2.7 °C resp. 2.0 °C. Ermöglicht wurde diese stärkere Abkühlung durch eine Glykolbeimischung als Frostschutzmittel, welche einen Betrieb bei tieferen Temperaturen erlaubt. Die maximale Temperatur der Fundamentplatte wird durch die Regelung auf 31 °C beschränkt. Wird dieses Temperatur erreicht, wird auf das Anergienetz zurückgegriffen. Dies war in der Auswertungsperiode jedoch nie nötig.

Abbildung 15 zeigt den Temperaturverlauf der Bodenplatte und der Aussenluft sowie die zugeführte Wärme an die Fundamentplatte (WärmeReg) bzw. abgeführte Wärme (KälteReg). Eine Wärmeregeneration kann durch die PVT-Anlage erfolgen sowie durch Free-Cooling oder aktives Kühlen. Kälteregeneration entsteht bei einem Wärmebedarf (Heizen und BWW) oder beim Herunterkühlen der Fundamentplatte durch die PVT-Anlage im Sommer, um deren Überhitzen zu verhindern. Die horizontale blaue Linie in Abbildung 15 markiert die Heizgrenze (12° C) in Bezug auf die Aussentemperatur. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur der Bodenplatte stark auf das Unterschreiten der Heizgrenze reagiert und innerhalb des ersten Monats mit hohem Heizbedarf (hier November) um mehr als 15 K abkühlt. Auch wenn sich die Platte anfangs Heizsaison sehr schnell abkühlt, zeigt sich, dass sie etwa bis Februar/März



wärmer als die Aussenluft ist. Die hohe Wärmeregeneration im Februar ist unter anderem auf die PVT-Anlage zurückzuführen. Im März wird dies durch die Regelung auf eine Fundamentplattentemperatur von max. 10 °C limitiert, damit sich die Platte nicht vorzeitig aufheizen kann und genügend Kapazität im Sommer für die Kühlung bereitstellt. Der Wärmeeintrag im März kommt daher hauptsächlich durch Free-Cooling oder aktives Kühlen.

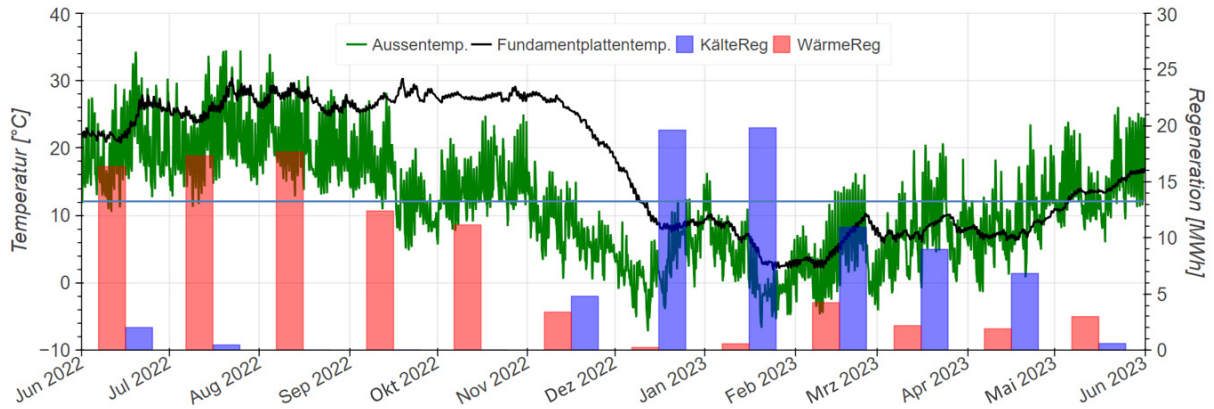


Abbildung 15: Temperaturverlauf der Bodenplatte und der Aussenluft. Die Balken zeigen, wie viel Wärme der Fundamentplatte zugeführt (WärmeReg) bzw. entnommen wird (KälteReg). Die horizontale blaue Linie markiert die Heizgrenze in Bezug auf die Aussentemperatur.

Die höhere Temperatur der Fundamentplatte im Vergleich zur Aussenluft hat einen wichtigen Einfluss in Bezug auf die Effizienz der Wärmepumpen, z.B. im Vergleich zu einem System mit Luft/Wasser-Wärmepumpen. Abbildung 16 verdeutlicht diesen Unterschied nochmals für den Winter 22/23. Zu Beginn der Heizsaison ist die Platte noch 25 K wärmer als die Aussenluft. Im Frühjahr ist die Fundamentplatte während der meisten Zeit wärmer, jedoch gibt es im März und April Phasen, wo die Luft 10 K wärmer ist. Um einen möglichst fairen Rückschluss auf die Effizienz zu gewinnen, wird mit gewichteten Temperatur gerechnet. Dabei wird wie in Gleichung 4 zu sehen, die produzierte Heizwärme mit der Quelltemperatur der Wärmepumpe multipliziert, aufsummiert und durch die gesamte produzierte Wärme geteilt. Somit erhält man eine Durchschnittstemperatur $\vartheta_{m,th}$, bei welcher die meiste Wärme produziert wurde.

$$\overline{\vartheta_{m,th}} = \frac{\int dt \vartheta_{th} \cdot \dot{Q}_{WP}}{\int dt \dot{Q}_{WP}} \quad \text{Gl. 4}$$

Um die Werte zu berechnen, wurde einmal für ϑ_{th} , die Vorlauftemperatur der Fundamentplatte für jeden Zeitpunkt mit Heizbedarf genommen. Für den Vergleich wurde die Aussenlufttemperaturen zu den exakt gleichen Zeiten genommen. Über den Carnot-Wirkungsgrad (höchster theoretisch mögliche Wirkungsgrad bei der Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie), wie in Gl. 5 zu sehen, lassen sich, unter der Annahme, dass beide Systeme einen gleichen Wirkungsgrad haben, Rückschlüsse auf die Effizienz in Abhängigkeit der Quelltemperatur ziehen.

$$\eta_c = \frac{T}{T - T_0} \quad \text{Gl. 5}$$



Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zu sehen. Die durchschnittliche Quelltemperatur ist mit der Fundamentplatte im Vergleich zur Aussenluft 5.1 K höher, was einen um 14 % höheren Carnot-Wirkungsgrad ergibt.

Tabelle 4: Vergleich der theoretischen Effizienz der Fundamentplattenlösung und einer Luft-Wasser Wärmepumpe bei einer Heiztemperatur von 40 °C.

System	Fundamentplatte Sole-Wasser WP	Aussenluft Luft-Wasser WP
Heizwärmeproduktion $\int dt \dot{Q}_{WP}$	79'000 [kWh/a]	79'000 [kWh/a]
Gewichtete Durchschnittstemp. $\overline{\vartheta_{m,th}}$	8.2 °C	3.1 °C
Carnot-Wirkungsgrad η_c	9.9	8.5

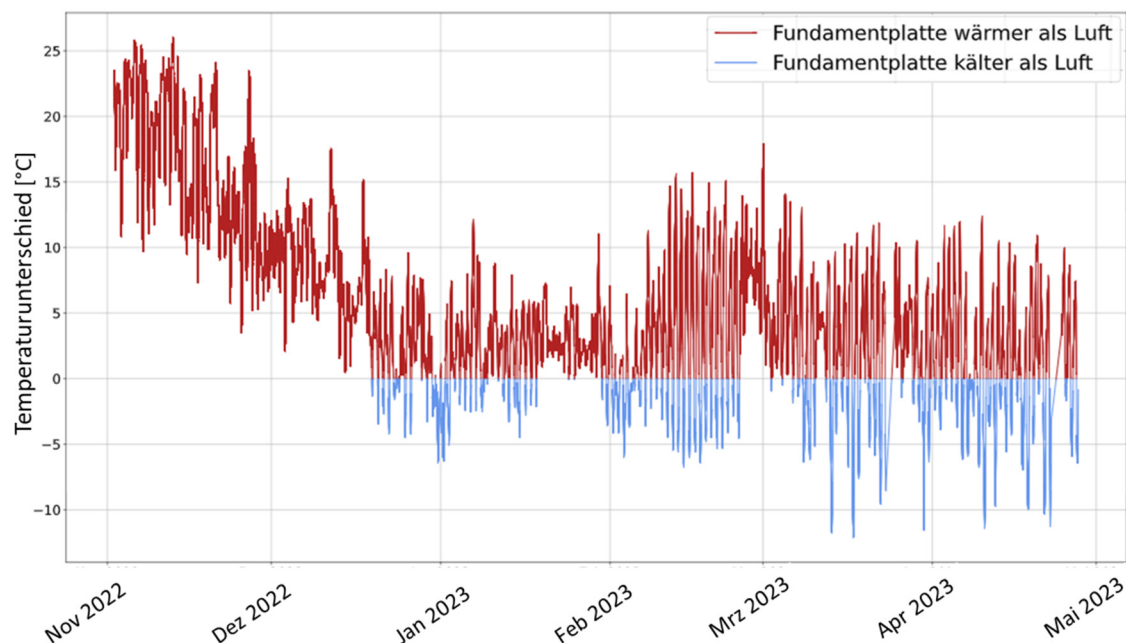


Abbildung 16: Temperaturunterschied der Fundamentplatte im Vergleich zur Aussenluft, oberhalb von 0 °C ist die Fundamentplatte wärmer, unterhalb 0 °C ist sie kälter als die Aussenluft.

Zusätzlich zur Fundamentplatte wird das Erdreich mitaktiviert, dies ist in Abbildung 17 und Abbildung 18 zu erkennen. Insgesamt wurden drei Reihen Temperaturfühler installiert. Die Reihe 201 bis 205 und 301 bis 305 weisen in eine höhere Temperatur auf als die Reihen 401 bis 405, welche 16 m ausserhalb des Gebäudeperimeters liegen. Genaue Positionen der Temperaturfühler und Abstände sind in Abbildung 9 zu sehen.

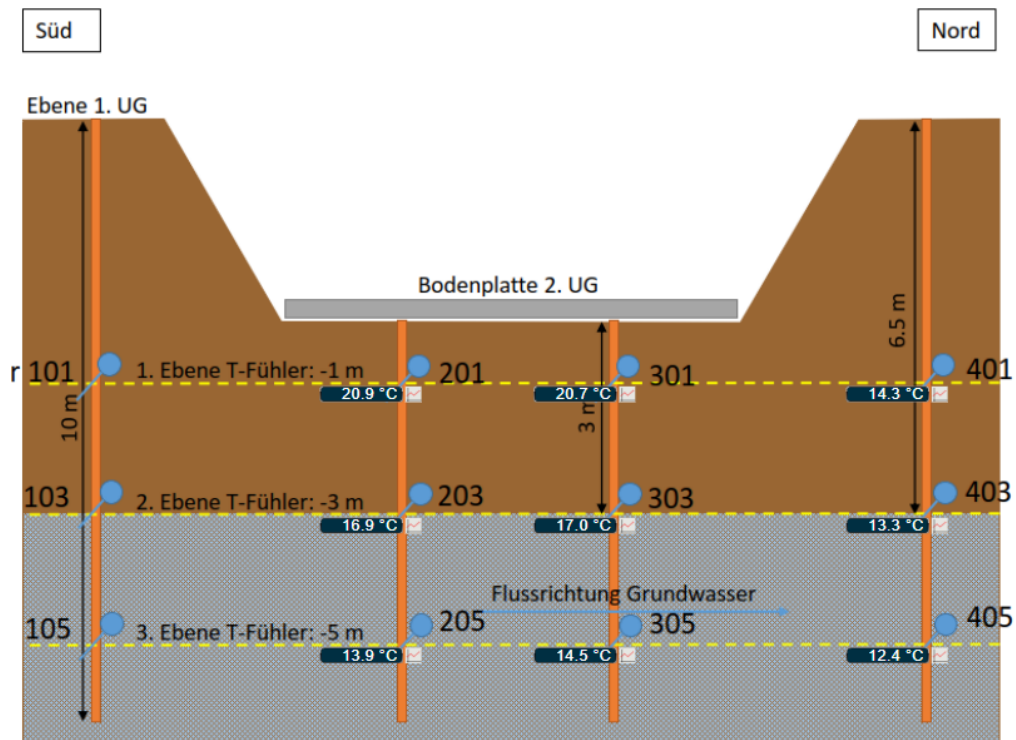


Abbildung 17: Momentaufnahme der Erdreichtemperatur am 08.08.2023 um 15 Uhr und Position der Temperaturfühler um und unterhalb der Fundamentplatte.

Die Auswertung der Bodentemperaturen lassen darauf schliessen, dass es keinen Effekt des Grundwassers auf diese gibt. Dies wird in Kapitel 4.5 ersichtlich, in welchem ein Modell der Fundamentplatte keine Grundwasserströme berücksichtigen muss, um das Verhalten des Erdreichs und der Fundamentplatte gut abbilden zu können.

Abbildung 18 zeigt den Temperaturverlauf während fast drei Jahren auf drei verschiedenen Tiefen unterhalb und neben der Bodenplatte. Innerhalb des ersten Meters unterhalb der Fundamentplatte zeigt sich die grösste Temperaturschwankung mit etwa 18 K (Sensor 201). drei Meter unterhalb der Bodenplatte (Sensor 203) beträgt die Schwankung 10 K und bei fünf Metern (Sensor 205) noch etwa 6 K. Der Temperatureintrag in das Erdreich wirkt sich in der Heizperiode positiv auf die Effizienz der Wärmepumpen aus, da ab etwa November das Erdreich Wärme an die Fundamentplatte zurückgegeben werden kann. Gleichzeitig kann im Sommer von einer kühlenden Wirkung des Erdreichs auf die Fundamentplatte profitiert werden. Seitlich neben der Fundamentplatte ist die Schwankung auf derselben Höhe mit 5 K, 4 K und 3 K deutlich geringer.

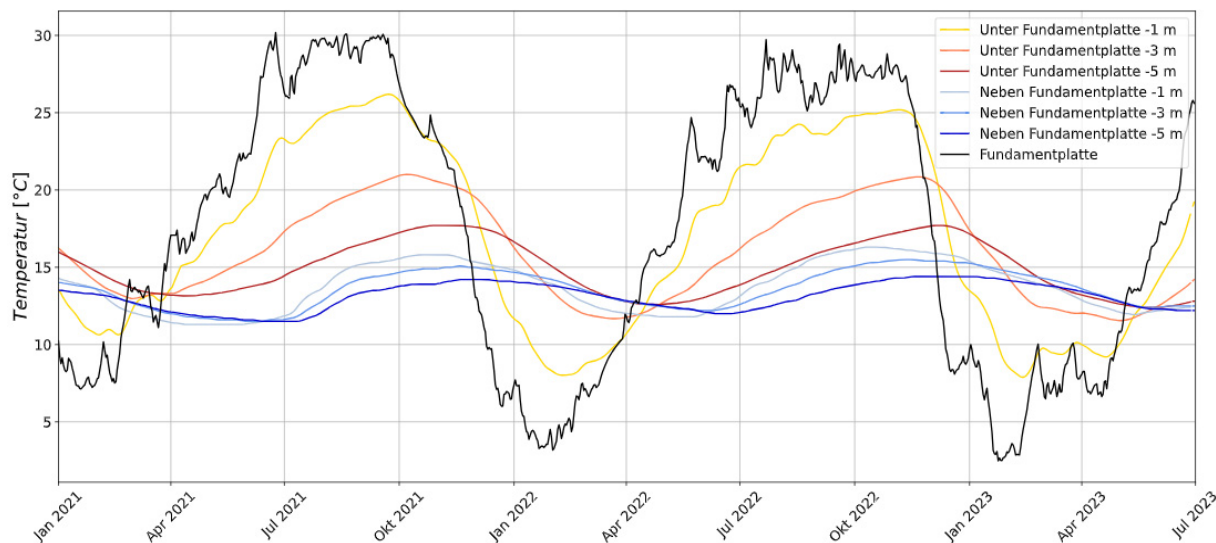


Abbildung 18: Temperaturverlauf im Erdreich in drei verschiedenen Abständen zur Fundamentplatte. Ein Trend zur langfristigen Erhöhung oder Absenkung der Erdreichtemperatur lässt sich noch nicht bewerten.

In Tabelle 5 ist der jährliche Wärmeein und -austrag der Fundamentplatte zu sehen. Man sieht, dass in den Jahren 2021 und 2022 mehr Wärme in das Fundament eingetragen als entnommen wurde. Die Wärmeregenerationsquoten liegen hier bei 147 % resp. 171 %. Das Jahr 2023 ist nur zur Hälfte ausgewertet und hat aufgrund des geringeren Wärmeeintrags im ersten Halbjahr im Vergleich zur zweiten Jahreshälfte eine Wärmeregenerationsquote von 38 %.

Tabelle 5: Jährliche Energiebilanz und Regenerationsgrad der Bodenplatte im Zeitraum von 2021 bis Juni 2023.

	Wärmezufuhr [kWh]	Wärmeabgabe [kWh]	Regeneration [%]
2021	79'000	53'700	147
2022	104'400	86'000	121
01.2023 – 06.2023	18'300	48'400	38

In Abbildung 19 ist eine monatliche Energiebilanz der Bodenplatte aufgeführt. Hier ist ersichtlich, dass in den Sommer- und Herbstmonaten viel Wärme in die Bodenplatte über die aktive Kühlung des Gebäudes eingebracht wird. Der Wärmeeintrag ist in der ersten Hälfte des Jahres geringer, was sich mit den Werten aus Tabelle 5 deckt. Ein Teil der eingebrachten Wärme kann über die PVT-Anlage abgegeben werden. Auch wenn deutlich mehr Wärme eingebracht als entnommen wird, überhitzt die Fundamentplatte, wie in Abbildung 18 zu sehen, nicht. Die PVT-Anlage produziert erst Anfang Jahr genügend Wärme, um die



Fundamentplatte zu regenerieren. Wie bereits erwähnt wird dies ab März limitiert, da ab hier der Kältebedarf steigt und die Abwärme in die Fundamentplatte gegeben wird.

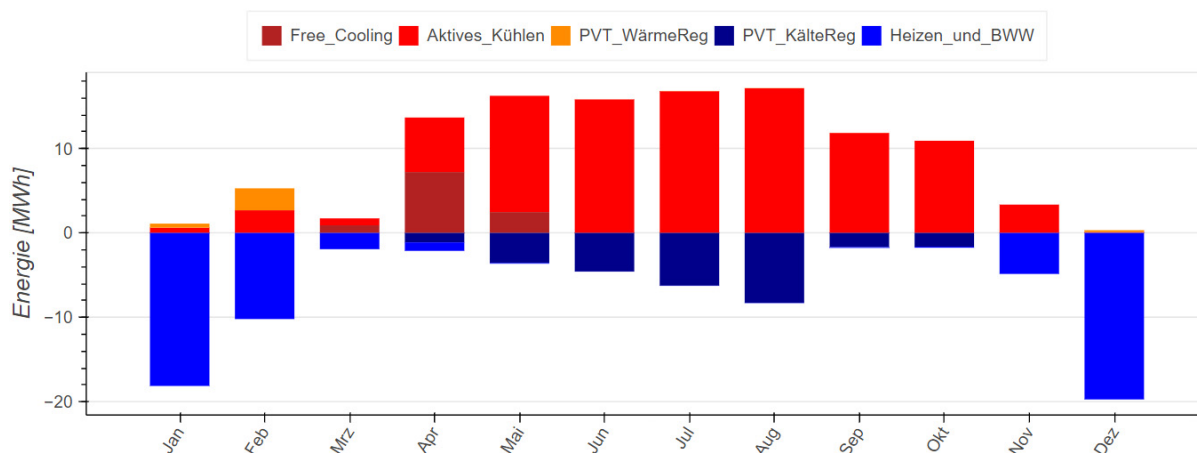


Abbildung 19: Energieflüsse in der Bodenplatte für das Jahr 2022, ein Wärmeeintrag kommt durch aktives Kühlen, Free Cooling und durch die PVT-Anlage. Wärme wird entnommen beim Heizen, bei der Brauchwarmwasserproduktion und bei der Abkühlung durch die PVT-Anlage.

Tabelle 6 zeigt zusammenfassend die wichtigsten Parameter und Eigenschaften der Fundamentplatte. Der Auswertungszeitraum bezieht sich auf das Jahr 2022.

Tabelle 6: Auslegungs- und Messwerte der Fundamentplatte, Messwerte beziehen sich auf das Jahr 2022.

Parameter Fundamentplatte	
Fläche	1000 m ²
Rohrleitung	4'870 m
Max. Durchflussmenge	19 m ³ /h
Spezifischer Wärmeertrag	60 kWh/m ²
Spezifischer Kühlertrag	104 kWh/m ²
Max. Wärmeleistung*	119 kW
Max. Kälteleistung*	153 kW
Wärmeabgabe Heizen	59 MWh/a
Wärmeabgabe PVT-Anlage	30 MWh/a
Wärmeabgabe total	86 MWh/a
Wärmeregeneration PVT-Anlage	3.4 MWh/a
Wärmeregeneration aktive Kühlung	101 MWh/a

*Ermittelt über einen gleitendes Mittel aus 60 min

4.4 Anergienetz

Das Anergienetz dient als Backup, wenn Fundamentplatte und PVT-Anlage nicht ausreichen, um den Wärme- bzw. Kältebedarf zu decken. Das Ziel ist, die Anlage so weit zu optimieren, dass auf das Anergienetz verzichtet werden kann. Der Bedarf ist in Tabelle 7 dargestellt, der zeitliche Verlauf für die Nutzung des Anergienetzes zur Wärmebereitstellung ist in Abbildung 20 dargestellt.

Tabelle 7: Gemessener Wärmeaustausch mit dem Anergienetz.

	Anergie – Wärme	Anergie - Kälte
2021	4'000 kWh	10 kWh
2022	2'800 kWh	0 kWh
01.2023 – 06.2023	1'700 kWh	0 kWh

Vergleicht man Abbildung 14 aus Kapitel 4.3 mit folgender Abbildung des Anergienetzes, ist ersichtlich, dass das Anergienetz nur dann als zusätzliche Energiequelle benötigt wird, wenn die Fundamentplatte die Grenztemperatur von 2 °C erreicht. Der geringe Bedarf an Wärme aus dem Anergienetz über das Jahr 2022 mit 2.8 MWh macht ca. ein bisschen mehr als 2 % des Gesamtjahresbedarfs an Heizwärme aus. Daraus lässt sich schliessen, dass die Fundamentplatte im Zusammenspiel mit der PVT-Anlage sehr gut auf die Bedürfnisse des Gebäudes ausgelegt wurde. Seit Optimierungen wie beispielsweise der Glykolbeimischung und des hydraulischen Abgleiches der PVT-Anlage sank der Bedarf über den Beobachtungsmessraum von knapp 4'000 kWh/a auf 1'700 kWh/a. Meteorologische Einflüsse führen ebenfalls zu Unterschieden. Wichtig wäre es daher, weitere Jahre auszuwerten, um auch mit statistischer Relevanz die gute Bewertung des Energiesystems belegen zu können. Eine Grafik für die Kälte, welche durch das Anergienetz bereitgestellt wird, wurde wegen dem minimalen Bezug in der Messperiode nicht erstellt. Auch hier zeigt sich, dass das System gut ausgelegt ist.

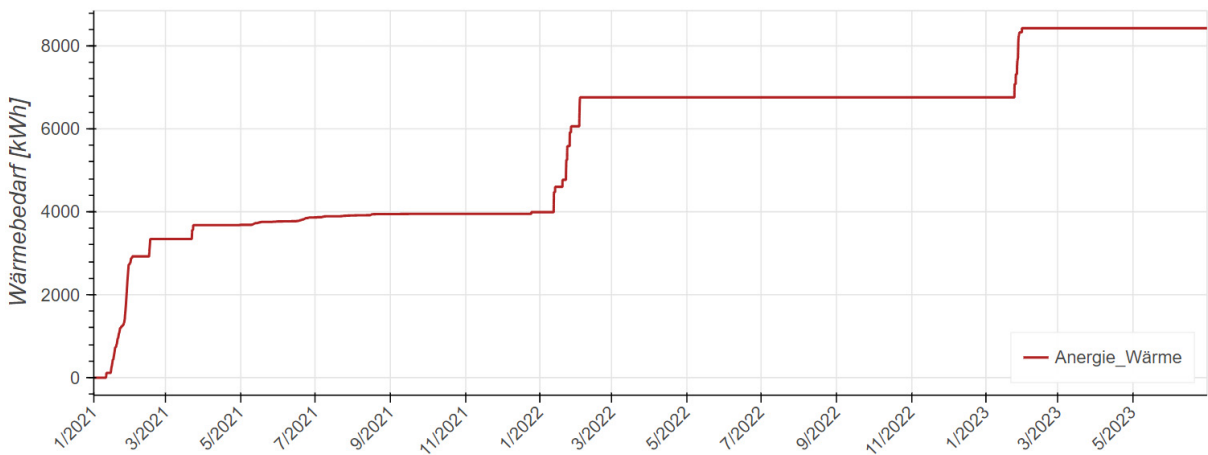


Abbildung 20: Wärmebezug aus dem Anergienetz. Der Bedarf konnte im Jahr 2022 und 2023 verringert werden.



4.5 Modellierung Fundamentplatte

Die Temperaturen wurden an unterschiedliche Positionen und Tiefen unter der Fundamentplatte gemessen. Dabei zeigt sich ein sehr ähnlicher Verlauf für die Fühlergruppen 20x und 30x, welche beide unterhalb der Fundamentplatte in verschiedenen Tiefen im Erdreich messen (rot und grün). Die Sensoren der Position 4 (im Grundwasserfluss unter dem Gebäude gelegen) zeigen eine lediglich leichte Schwankung im Jahresverlauf, welche den Erwartungen für nicht beeinflusstes Erdreich entspricht.

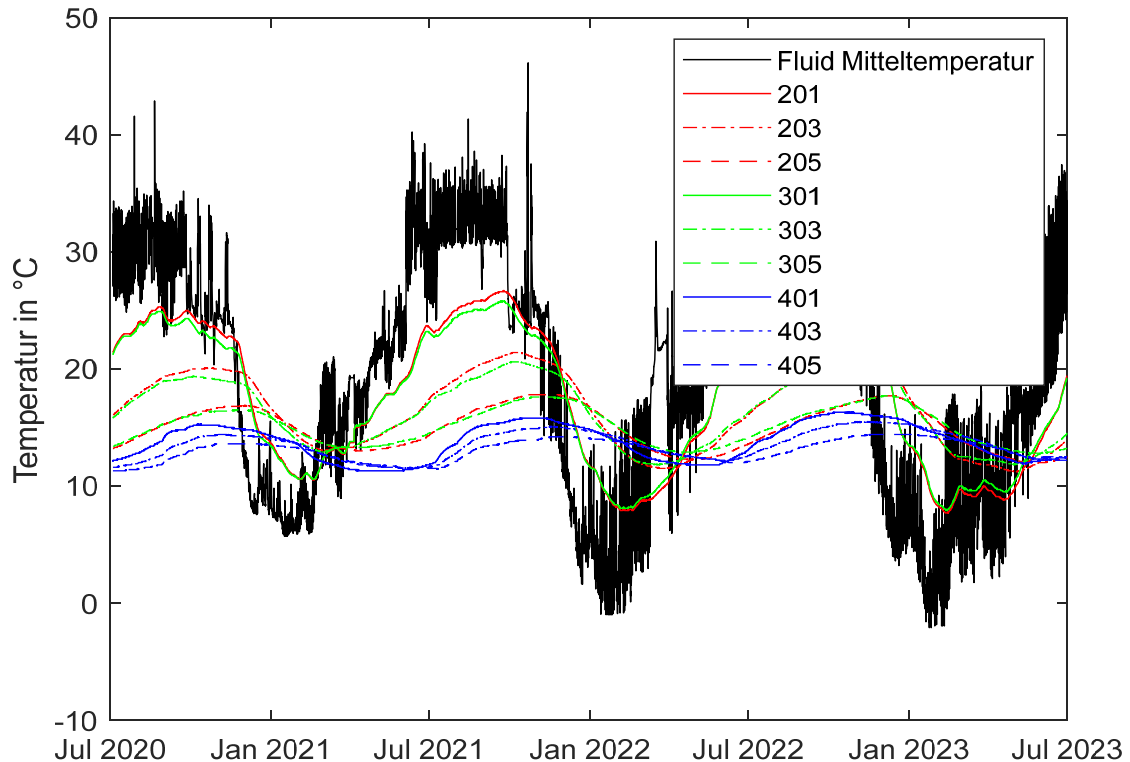


Abbildung 21: Temperaturverlauf an unterschiedlichen Positionen unterhalb der Fundamentplatte. Die Farben beziehen sich auf die jeweiligen Positionen (2 und 3 unterhalb der Fundamentplatte, 4 daneben) und die Linienstrichung auf die Tiefe unterhalb der Fundamentplatte (01,03,05) in Metern.

Es stellt sich die Frage, welche Effekte für das Potenzial der Fundamentplattennutzung limitierend wirken und wie die Erkenntnisse und Messdaten aus dem Pilotprojekt auf Folgeprojekte übertragen werden können. Dazu wurde ein einfaches, eindimensionales FEM-Modell ("finite elemente") in der Software matlab erstellt. Das Modell berücksichtigt den Wärmeübergang zwischen Fluid und Fundamentplatte, den Wärmeübergang zum Keller/Tiefgarage und die horizontale Wärmeleitung im Untergrund. Inputdaten für das Modell sind einzig die gemessenen Leistungen und die ungestörte Erdreichtemperatur, für welche einen sinusförmigen Verlauf vorgegeben wurde. Die Erdreichparameter wurden mit der Matlab-eigenen Funktion "lscurvefit" gefittet, wobei eine Leitfähigkeit von 2.7 W/mK ermittelt wurde. Ein Vergleich von Messdaten und dem eindimensionalen Modell zeigt über den Verlauf von drei Jahren eine sehr gute Übereinstimmung. Dies wird in Abbildung 22 anhand der gemessenen und modellierten Temperaturen in unterschiedlicher Tiefe unter der Fundamentplatte gezeigt. Die gute Übereinstimmung legt nahe, dass ein eindimensionales Modell, welches lediglich die Wärmeleitung in den sieben Metern unterhalb der Fundamentplatte berücksichtigt, für eine realistische Modellierung und Vorhersage der Temperaturverläufe ausreicht. Dieses oder ähnlich einfache Modelle können also für die Auslegung von weiteren Projekten mit Fundamentplattenaktivierung verwendet und



Randeffekte vernachlässigt werden. Bei kleineren Objekten nimmt das "Randvolumen" im Vergleich zur Fundamentfläche zu und es ist möglich, dass bei deutlich kleineren Objekten auch Randeffekte berücksichtigt werden müssen.

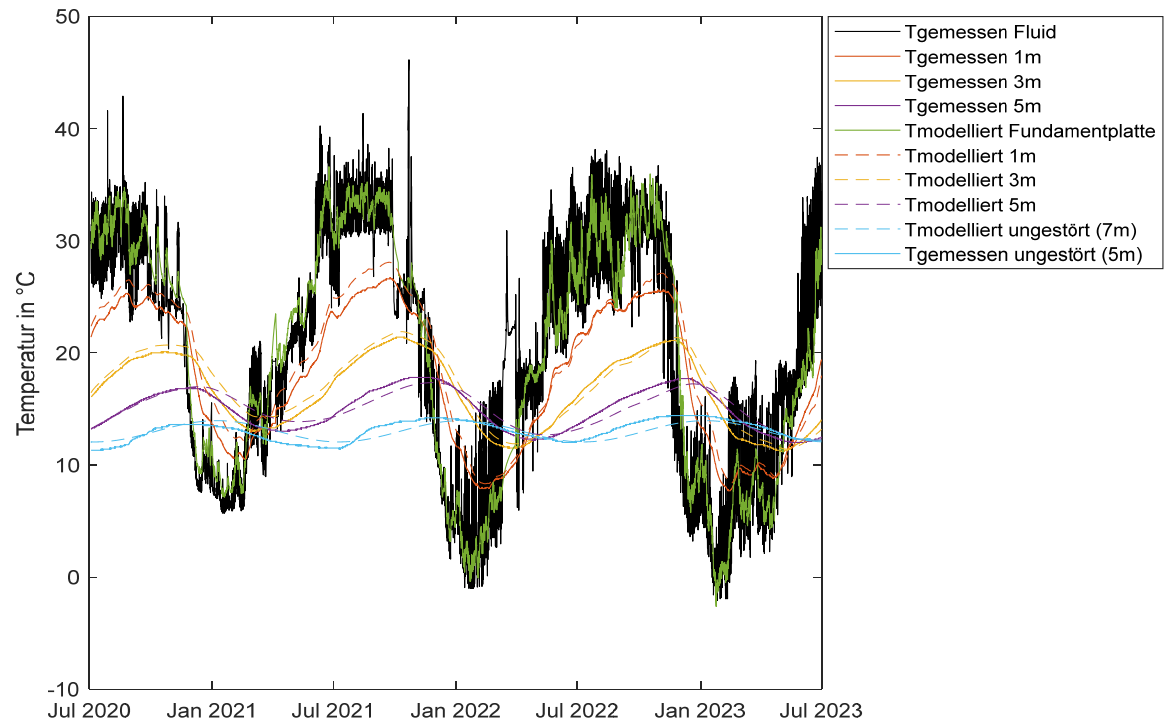


Abbildung 22: Vergleich der Messdaten mit einem einfachen eindimensionalen Modell.



4.6 PVT-Anlage

Die PVT-Anlage spielt eine zentrale Rolle für das Anlagenkonzept des Projektes. Sie wurde anstatt eines Rückkühlers gewählt, nachdem eine vorab durchgeführte Simulation dies als energieeffizientere Lösung ermittelt hat. Zudem wollte der Bauherr, wie im Rest des Gebäudes, energieeffiziente und zukunftsweisende Lösungen umsetzen. Nicht zuletzt spielte auch die Ästhetik eine Rolle bei der Entscheidung auf einen Rückkühler zu verzichten.

Die wichtigsten Parameter der PVT-Anlage sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8: Parameter der PVT-Anlage, die Messwerte beziehen sich auf das Jahr 2022.

	PVT-Anlage
Bruttofläche [m ²]	384
El. Leistung [kWp]	71
Spezifischer Solarertrag [kWh/m ²]	14
Max. Heizleistung [kW]	60
Spezifischer Kühlertrag [kWh/m ²]	128
Max. Kühlleistung [kW]	80
Durchschnittliche Kühlleistung [kW]	16
Spezifischer Stromertrag [kWh/m ²]	181

Abbildung 23 zeigt einen Überblick über die Steuerung der PVT-Anlage anhand von Leistungs- und Temperaturdaten. Alle Werte sind ein gleitendes Mittel aus 24 Stunden, um die Kurven zu glätten. Zeitlich höher auflösende Grafiken sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass im Sommer die PVT-Anlage ausschliesslich zum Kühlen verwendet wird. Durch den hohen Kühlbedarf des Gebäudes wird mehr Wärme produziert, als verwendet werden kann. Diese wird über die PVT-Anlage abgegeben.

Da an sonnigen Tagen keine Wärme abgeführt wird, heizt sich die PVT-Anlage auf und kann damit nicht vom kühlenden Effekt profitieren, welcher die Effizienz der Stromproduktion erhöhen würde. Da die Module jedoch keine Wärmeisolation haben, ist der Effekt auf die Effizienzminderung gering. Der spezifischen Stromertrag liegt mit 180 kWh/m²a im Vergleich zur Studie von D. Zenhäusern [5] nahe an dem zu erwartenden Bereich für PVT-Anlagen von 176 kWh/m²a.

Im Winter übersteigt die PVT-Temperatur nur selten die Fundamentplattentemperatur, zwischen November und Februar ist sie fast identisch zur Aussenlufttemperatur. Dies entspricht dem typischen Verhalten von PVT-Kollektoren, da die Wärmergewinnung auf dem Prinzip von unabgedeckten Absorbern beruht. Hier wirkt sich die fehlende Wärmedämmung zudem als Nachteil aus. Im Sommer ist Wärme für die Brauchwarmwasserbereitstellung, wie im Kapitel 4.3 beschrieben, aus den anderen Quellen im Überschuss vorhanden. Aus diesen Gründen ist die Nutzung der Wärme der PVT-Kollektoren nur begrenzt möglich. Der spezifische Solarertrag liegt bei 14 kWh/m² und Jahr. Optimiert man ein System auf die Wärmenutzung von herkömmlichen PVT-Kollektoren, sind die Werte mit 270 kWh/m² und Jahr [2] fast um den Faktor 20 höher. Die Anlage im vorliegenden Projekt ist hingegen auf das Kühlen ausgelegt.

Die PVT-Kühlung begann im Jahr 2023 schon Mitte Februar, um im Sommer ein Überhitzen der Platte zu vermeiden. Ab Oktober wird die Kühlleistung durch die Regelung reduziert, um die Wärme der Fundamentplatte zum Heizen nutzen zu können. Die Platte wird durch die PVT-Anlage im Sommer unter 31 °C gehalten.

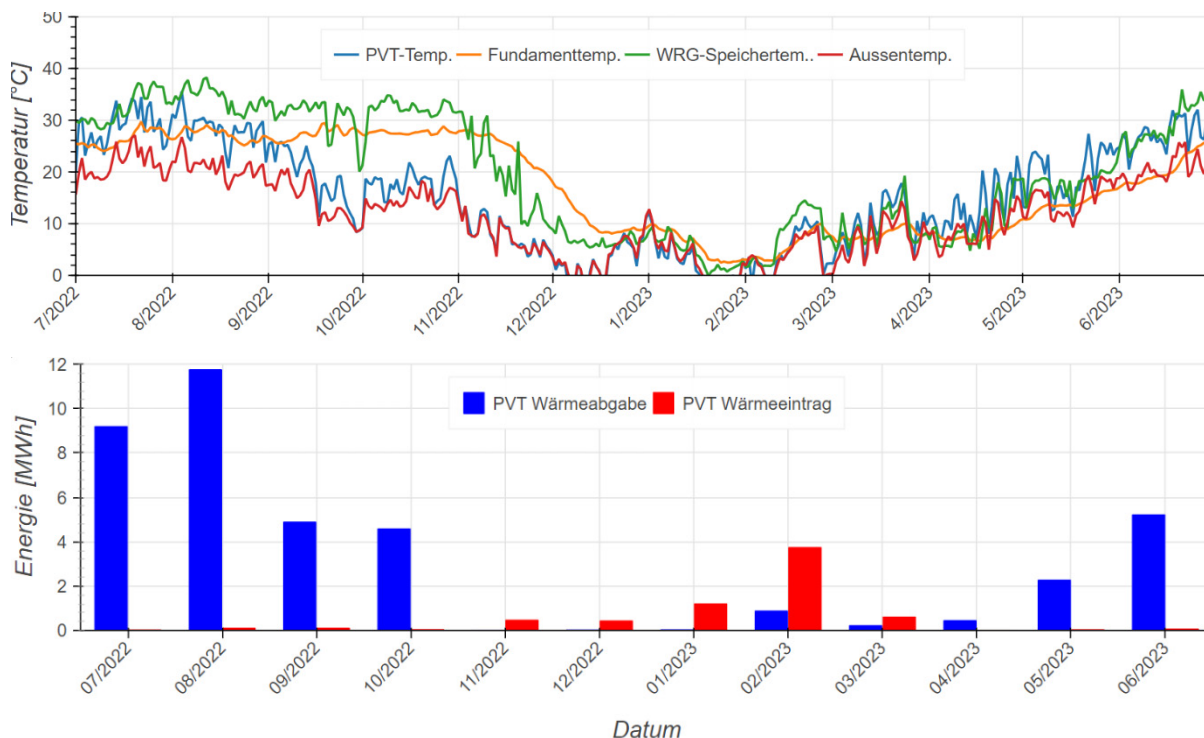


Abbildung 23: Oben: Temperaturen der Aussenluft, der PVT-Anlage, des WRG-Speichers und der Fundamentplatte für den Zeitraum Jul 2022 bis Jun 2023. Unten: Monatlich produzierte Wärmemenge und Wärmeabgabe.

Die Kühlleistung des PVT-Felds ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen der Aussenluft und der Komponente, welche gekühlt werden soll (Fundamentplatte, Pufferspeicher resp. WRG-Speicher).

Die Kühlleistung der PVT-Anlage ist beim Rückkühlen der Fundamentplatte im Vergleich zum WRG-Speicher geringer. Dies liegt an den unterschiedlichen Temperaturniveaus. Die Fundamentplatte erreicht max. 31 °C, der Pufferspeicher 40 °C. Die Konsequenz auf die Funktion als Wärmequelle/-senke zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Kühlleistung und Wärmeübertragung der PVT-Anlage, der Zeitraum Nacht bezieht sich auf 20:00 Uhr bis 08:00 Uhr, der Zeitraum Tag 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr. Der Auswertzeitraum bezieht sich auf das Jahr 2022.

	Fundamentplatte	WRG-Speicher
Max. Kälteleistung Nacht	36 kW	60 kW
Max. Kälteleistung Tag	32 kW	55 kW
Kühlung Nacht	13.9 MWh/a	8.5 MWh/a
Kühlung Tag	2.3 MWh/a	4.9 MWh/a



Aus Tabelle 9 wird ersichtlich, dass sowohl nachts wie auch tags gekühlt wird. Die maximale Leistung ist dabei beim WRG-Speicher höher, aufgrund des höheren Temperaturunterschieds zur Aussenluft. Das erklärt auch, warum der WRG-Speicher Tagsüber etwa doppelt so viel gekühlt wurde wie die Fundamentplatte. In Abbildung 23 sieht man beispielsweise für den März 2023, dass hier die Temperatur des WRG-Speichers höher als die der Aussenluft ist und daher gekühlt werden kann. Die Fundamentplatte ist hier noch kälter als die Luft ist und kann daher nicht gekühlt werden.

Abbildung 24 zeigt den Betrieb der PVT-Anlage während einer Woche im Sommer. Sobald die Temperatur der Kollektoren geringer ist, als die der Fundamentplatte resp. die des WRG-Speichers, kann gekühlt werden. Das ist vor allem nachts der Fall, kann aber auch an einem bewölkten Tag sein wie am 19.08.2022 zu sehen. Nachts ist die Temperatur der PVT-Anlage sogar unterhalb der Temperatur der Aussenluft und könnte somit die Fundamentplatte auf niedrigere Temperaturen bringen als ein Luftkühler. Da die thermische Masse der Platte jedoch sehr gross im Vergleich zur Kälteleistung der PVT-Anlage ist, kühlt diese nur um etwa 1 K während einer Nacht ab. An einem sonnigen Tag steigt die Temperatur der PVT-Anlage um etwa 30 K auf 50 °C (Stagnation). Die Fundamentplatte mit einer Temperatur von 28 °C kann in dieser Zeit nicht gekühlt werden.

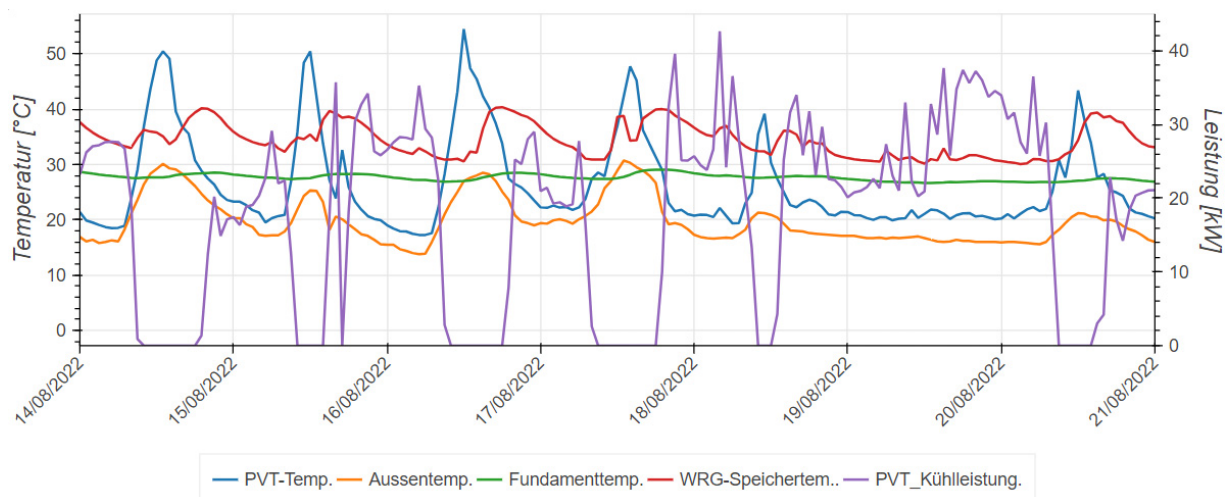


Abbildung 24: Betrieb der PVT-Anlage während einer Woche im Sommer von 14.08.2022 bis 21.08.2022.

Abbildung 25 zeigt den Betrieb der PVT-Anlage in einer Winterwoche. Die Vorlauftemperatur der PVT-Anlage übersteigt nur an sonnigen Tagen die Temperatur der Fundamentplatte leicht und nur für eine kurze Zeit. Der Wärmeintrag in die Fundamentplatte fällt daher sehr gering aus. Die Nutzung als Quelle für die Wärmepumpe ist aufgrund der meist zu niedrigen Temperaturen kaum möglich.

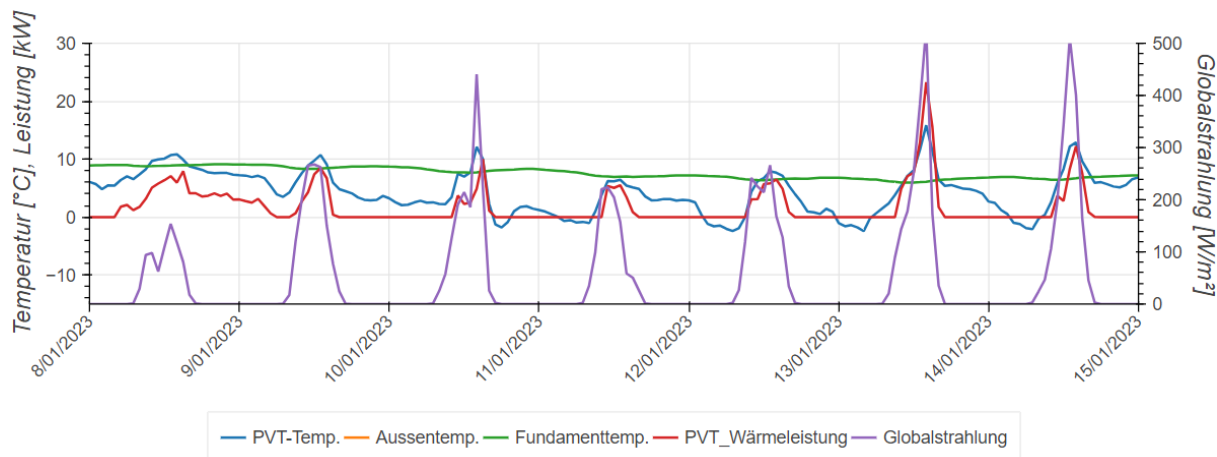


Abbildung 25: Betrieb der PVT-Anlage während einer Woche im Winter von 12.01.2023 bis 22.01.2023. Temperaturen und Wärmeleistung sind auf der linken Y-Achse, Globalstrahlung auf der rechten Y-Achse. Die Vorlauftemp. der PVT-Anlage übersteigt die Temperatur der Fundamentplatte an sonnigen Tagen nur leicht.

Tabelle 10 zeigt die gesamte produzierte Wärme, sowie die gesamte Wärmeabgabe in kWh/a. Die Wärmeproduktion hat sich von 2021 auf 2022 halbiert. Warum weniger Wärme produziert wurde, wird im nachfolgenden Kapitel 4.7 beschrieben. Wie schon in den vorherigen Auswertungen zu sehen, fällt der Grossteil des Kühlbedarfs erst im zweiten Halbjahr an. Im ersten Halbjahr 2023 sind es etwa 20% im Vergleich zur abgegebenen Wärmemenge im Jahr 2022. Vergleicht man die ersten beiden Jahreshälften der Jahre 2022 und 2023 sieht man, dass aufgrund des in Kapitel 4.3 beschriebenen geringeren Kühlbedarfs im Frühling 23, die von der PVT-Anlage an die Aussenluft abgegebene Wärme mit 8'900 kWh nur die Hälfte des Betrags im Jahr 2022 mit 18'900 kWh ist.

Tabelle 10: Wärmeproduktion und Kühlung durch die PVT-Anlage über den gesamten Auswertungszeitraum.

	Wärmeproduktion [kWh]	Wärmeabgabe [kWh]
2021	11'500	34'100
2022	5'700	49'500
01.2023 – 06.2023	5'700	8'900



4.6.1 Änderungen und Optimierungen der PVT-Anlage

Im Laufe der Zeit gab es diverse Änderungen in der Regelung und Hydraulik der PVT-Anlage. Da der Ertrag an nutzbarer Wärme für die Brauchwarmwasserbereitung mit 11'500 kWh/a sehr gering ausfiel, wurde im Jahr 2022 die Hydraulik geändert. Anstatt des Brauchwarmwassertanks wurden die Leitungen der PVT-Anlage mit dem Kältespeicher verbunden, was eine direkte Nutzung als Wärmequelle für die Wärmepumpen ermöglicht. Aus Tabelle 11 geht hervor, dass danach der Ertrag der PVT-Anlage jedoch noch geringer ausfällt. Eine genauere Analyse ist in folgender Tabelle zu sehen:

Tabelle 11: Analyse Wärmeproduktion PVT-Anlage

	Wärmeregeneration Fundamentplatte [kWh]	Brauchwarmwasser Erwärmung [kWh]	Quelle Wärmepumpe [kWh]
2021	4'900	6'600	-
2022	3'400	-	2'300
01.2023 – 06.2023	5'400	-	300

Der Ertrag ist in der neuen Konfiguration gering, da die Temperaturen der PVT-Anlage im Winter selten höher als die der Fundamentplatte sind, wie in Kapitel 4.6 zu sehen. Gründe hierfür liegen auch in der beschriebenen Regelstrategie, die vorsieht, auch im Winter durch die Sonne überheizte Räume zu kühlen, sowie in der Dauerkühlung des Serverraums. Dadurch wird permanent Wärme als Quelle für die Wärmepumpe produziert, was den Ertrag der PVT-Anlage verringert. In Abbildung 26 sieht man zudem, dass die Wärme der PVT-Anlage, welche als Quelle der Wärmepumpen genutzt wird und die, welche zur Wärmeregeneration der Fundamentplatte benötigt wird, während denselben Monaten stattfindet. Daher fällt der Mehrertrag im Vergleich zur Brauchwarmwassererwärmung gering aus, welche den Vorteil hat, auch im Sommer zu funktionieren. Aus diesen genannten Gründen ist der Ertrag der PVT-Anlage im Jahr 2021 deutlich höher.

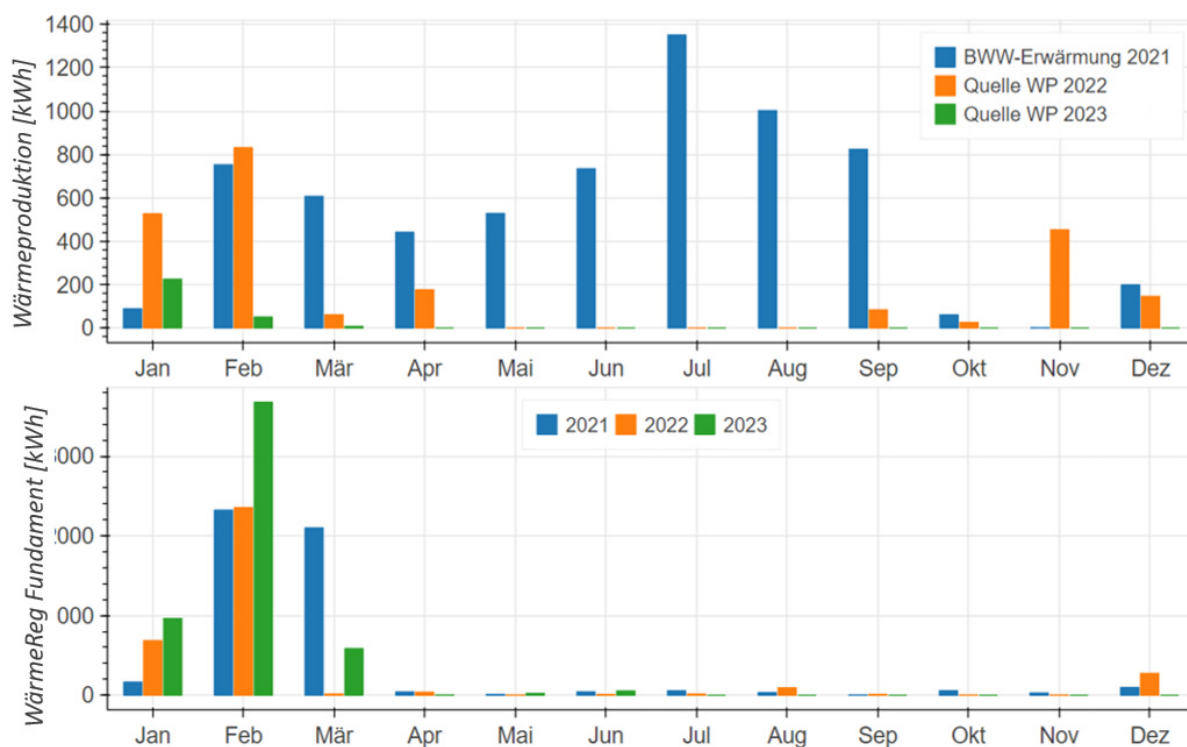


Abbildung 26: Oben: Nutzung der Wärme der PVT-Anlage zur BWW-Erwärmung im Jahr 2021 und als Quelle für die Wärmepumpen im Jahr 2022 und 2023. Unten: Nutzung der Wärme der PVT-Anlage zur Regeneration der Fundamentplatte.

Im März 2022 wurde die PVT-Anlage hydraulisch neu abgeglichen, nachdem man nicht zufrieden mit der Leistung war. In einem ersten Schritt wurden Infrarotbilder der Module aufgenommen. Dafür wurde an einem kalten Morgen kurzzeitig warmes Wasser durch die Kollektoren geschickt, um den Durchfluss mit der Kamera sichtbar zu machen. Das Ergebnis ist in Abbildung 27 zu sehen.

PVT-Kollektoren Wärmebild Map

Igor Bosshard, Institut für Solartechnik
Patricia Meier, Institut für Landschaft und Freiraum



PVT-Kollektoren Wärmebild Map

Igor Bosshard, Institut für Solartechnik
Patricia Meier, Institut für Landschaft und Freiraum

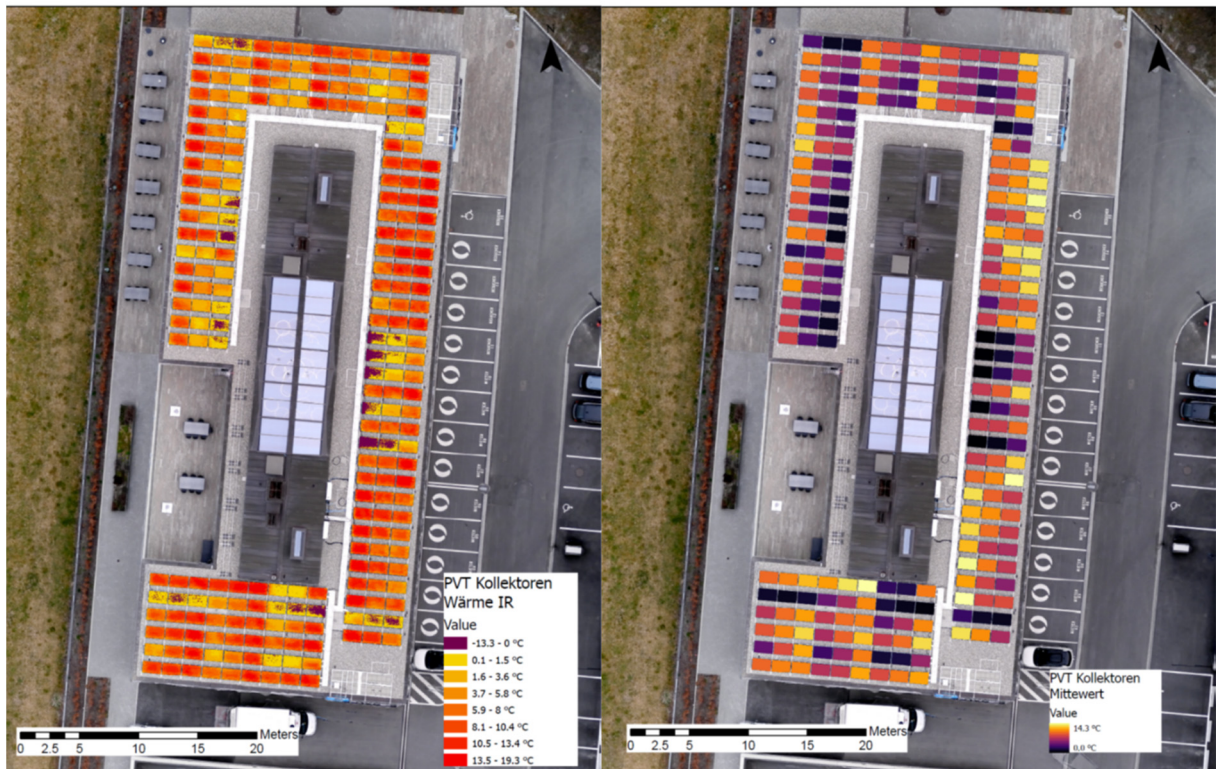


Abbildung 27: Wärmebildaufnahmen der PVT-Anlage vom 22.03.2022. Links: Temperaturen der Kollektoren gemäss Wärmebildkamera. Rechts: Mittlere Modultemperaturen mit größerer Auflösung der Temperaturbereiche zur besseren Visualisierung der Unterschiede

Die Module sind so geschaltet, dass ein Abgleichventil den Durchfluss von jeweils drei Kollektoren regelt. Aufgrund der zu sehenden Unterschiede in Abbildung 27 wurde ein Abgleich durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit einer kleineren Wärmebildkamera ohne Drohne überprüft und eine Verbesserung bestätigt. Ein Anstieg der Nutzwärme und der Kälteabgabe seit dem Abgleich im März 22 kann in Abbildung 28 gesehen werden. Seit der Umstellung wird mehr Wärme produziert (BWW-Vorwärmung im Jahr 2021 ausgenommen) und abgegeben. Wie stark hier meteorologische Effekte hineinspielen, ist nicht untersucht, weshalb die Produktionszahlen weiter überwacht und ausgewertet werden sollten. Auch eine Rückinstallation zur Brauchwarmwassererwärmung könnte angedacht werden.

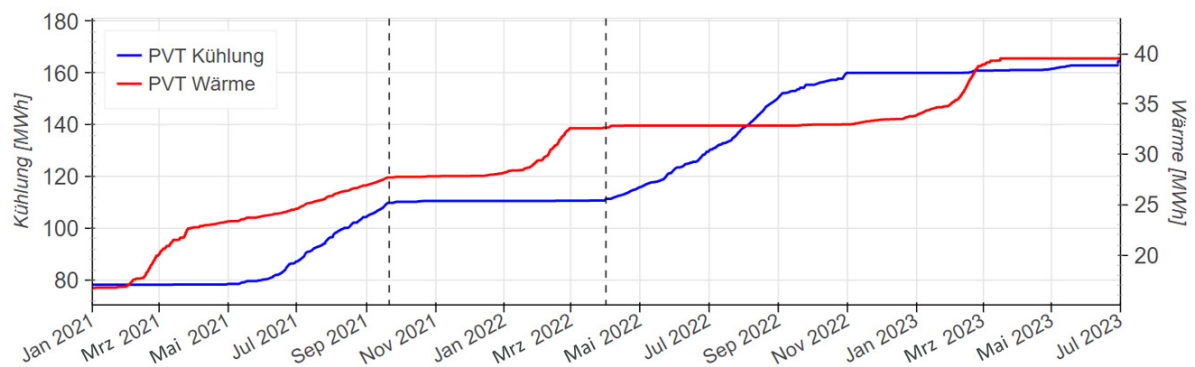


Abbildung 28: Kühlung (linke Y-Achse) und Wärmeproduktion (rechte Y-Achse) der PVT-Anlage. Die erste gestrichelte Linie zeigt den Wechsel von der Brauchwarmwassererwärmung hin zur Nutzung als Quelle der Wärmepumpe, die zweite Linie den neuen hydraulischen Abgleich.

4.7 Heizwärme- und Kälteverbrauch

Die Auswertung des Heiz- und Kälteverbrauchs über den gesamten Zeitraum ist in Abbildung 29 zu sehen. Eine Auffälligkeit der Anlage ist wie bereits erwähnt, dass es einen ganzjährigen Kühlbedarf der Sever und Notkühlung und zudem einen ganzjährigen (wenn auch nicht konstanten) Kühlbedarf der Büros gibt. Die Storen bleiben bei Sonneneinstrahlung lange oben, um die Kühlung zu aktivieren. Die Räume werden somit als thermische Solarkollektoren genutzt. Die Abwärme des Kühlens kann dann für Räume genutzt werden, welche nicht von einer solaren Einstrahlung profitieren, oder zu Regeneration der Fundamentplatte. So beträgt die Kühlmenge im Februar 2022 mit fast 10 MWh bereits mehr als 50% der Kühlmenge eines Sommermonats desselben Jahres, zum Beispiel Juni mit 16 MWh.

Die Werte sind stark abhängig von der Witterung und weisen daher grosse Schwankungen auf. Lag der Kühlbedarf in den ersten sechs Monaten im Jahr 2022 bei etwa 72 MWh, lag dieser durch den kalten Frühling im Jahr 2023 bei 48 MWh, also etwa 50 % tiefer. Der Heizbedarf erhöhte sich in der Periode um 16 % von 81 MWh auf 97 MWh. Die benötigte Kälteleistung für die Server ist nur etwa ein Drittel so gross wie in der Planung ausgelegt (12 kW geplant, 3 kW gemessen). Daher steht für die Wärmepumpen weniger Wärme quellenseitig zur Verfügung wie ursprünglich angedacht.

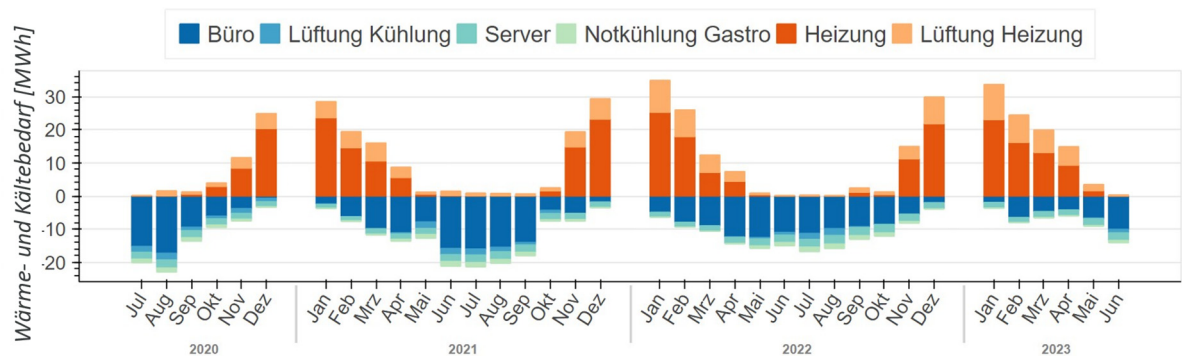


Abbildung 29: Energiebilanz der Wärme- und Kälteabgabe im Zeitraum von Juli 2020 bis Juni 2023.

Tabelle 11 zeigt den Wärme- und Kältebedarf der vier Verbrauchergruppen im Viega-Gebäude. Die Büros mit den Deckensegeln haben den höchsten Energiebedarf. Dieser liegt bei einem Wärmebedarf von 23 kWh/m² und einem Kältebedarf von 27 kWh/m². Der spezifische Gesamtbedarf liegt bei 21 kWh/m² fürs Heizen und 24 kWh/m² respektive 18 kWh/m² (ohne Server und Notkühlung) fürs Kühlen.

Tabelle 12: Wärme- und Kältebedarf der einzelnen Verbrauchsgruppen im Jahr 2022. Die Energiebezugsfläche des Gebäudes beträgt 6064 m².

	Wärmebedarf [kWh]	Kältebedarf [kWh]
Lüftung	41'100	5'600
Deckensegel	89'200	104'700
Server	-	24'500
Notkühlung Gastro	-	7'900



4.7.1

4.7.1 Auswertung Betrieb und Effizienz Wärmepumpe

Für die Wärme- und Kälteversorgung wurden zwei Inverter-Wärmepumpen von Heliotherm mit 80 kW Heizleistung und 45 kW Kälteleistung installiert. Diese können sowohl parallel als auch in Serie betrieben werden. Somit steht insgesamt eine Wärmeleistung von 160 kW und Kälteleistung von 90 kW zur Verfügung. Aus Abbildung 30 wird deutlich, dass diese Leistung überdimensioniert ist. Bei der Auslegetemperatur von -7°C wird eine Wärmeleistung von etwa 75 kW benötigt. Anzumerken ist, dass anhand der Auslegung nach SIA 384/1 für den Wärmebedarf und VDI 2078 für die Kühllast ursprünglich die installiert Leistung 360 kW für die Wärmeerzeugung und 252 kW für die Kältebereitstellung hätten installiert werden sollen. Die real installierte Leistung ist jedoch um 54 % (Wärmeleistung) resp. 64 % (Kälteleistung) geringer, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass die Planung des Energiekonzeptes eng durch das SPF über Simulationen begleitet wurde. Genauere Informationen zur Überdimensionierung im Allgemeinen und speziell zu diesem Fall können dem Schlussbericht OptiPower [6] entnommen werden.

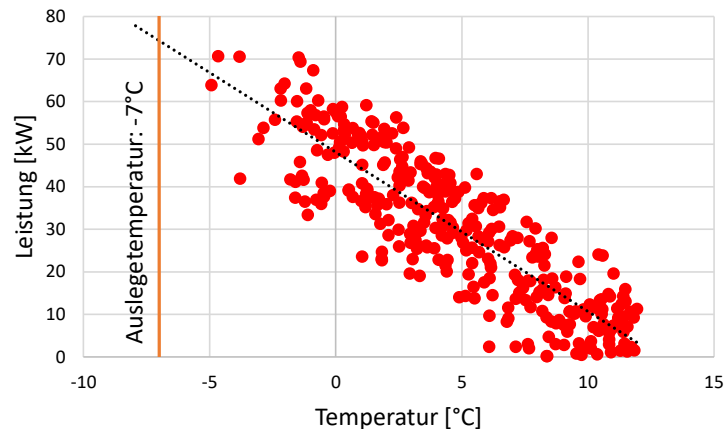


Abbildung 30: Leistungskennlinie für den Heizbetrieb des Oblamatik-Gebäudes für die Messperiode vom 1.1.2022 bis 31.12.2022. Linearer Fit (schwarz-gestrichelte Linie) über die Tagesmittelwerte der gemessenen Leistung ab Wärmeverteilung (Nutzenergie) [3].

Die Überdimensionierung wird auch in Abbildung 31 sichtbar, hier sind die Laufzeiten der Wärmepumpen angegeben. Über 70 % der Zeit laufen die Wärmepumpen unter einer Stunde, was für eine Überdimensionierung spricht.

Obwohl die Inverter-Wärmepumpen ihre Leistung anpassen können, sind also in über 70 % der Fälle die Speicher so schnell geladen, dass die Wärmepumpe nach weniger als einer Stunde wieder ausschalten. Da der Heiz- oder Kühlbedarf aber meist deutlich länger als eine Stunde dauert und die Speichermöglichkeiten begrenzt sind, springt die Wärmepumpe kurze Zeit später wieder an (sie taktet also). Im Optimalfall würde sie deutlich länger laufen und ihre Leistung entsprechend dem aktuellen Bedarf im Gebäude nachgeregelt werden. Jeder Start des Verdichters der Wärmepumpen führt zu Takten und reduziert deren Lebensdauer um mindestens eine Stunde. Die Verdichterstarts sind in Tabelle 13 zu sehen. Mit durchschnittlich über fünf Starts pro Tag fällt dieser Wert hoch aus. Eine Lebensdauer von bis zu 80'000 Stunden ist für qualitativ hochwertig gefertigte Wärmepumpen-Verdichter realistisch. Abschätzungen der Lebensdauer sind in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Betriebsstunden und Verdichterstarts der Wärmepumpen für das Jahr 2022.

	Wärmepumpe 1	Wärmepumpe 2
Betriebsstunden pro Jahr	2'680 h	3'700 h
Verdichterstarts pro Jahr	2'000	1'900
Betriebsstunden + Starts	4'700	5'600
Geschätzte Lebensdauer Verdichter	80'000 h	80'000 h
Erwartet Lebensdauer Verdichter	17 Jahre	14 Jahre

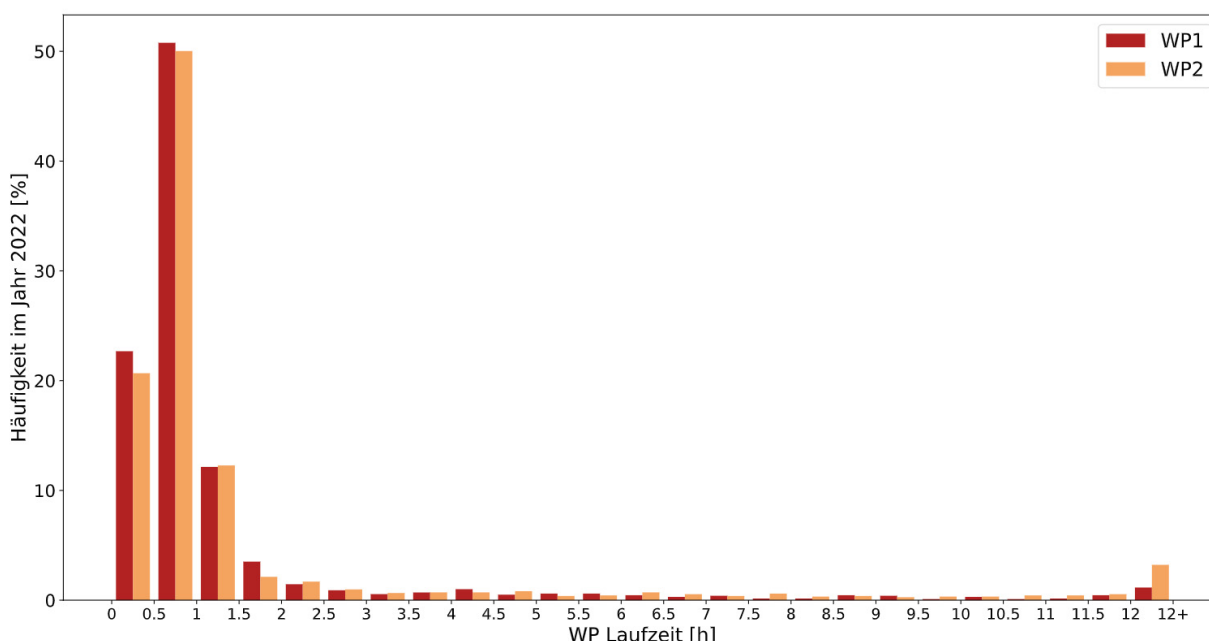


Abbildung 31: Laufzeiten der Wärmepumpen. Die Bereiche sind in 30 Minuten Intervallen angegeben. Über 70 % der Fälle laufen die Wärmepumpen unter einer Stunde, was ein Indiz für eine Überdimensionierung ist.

Das jedoch nicht nur von Überdimensionierung, sondern auch von einer Art Unterdimensionierung gesprochen werden kann wird in Abbildung 32 ersichtlich. Hier sieht man für die erste Februarwoche den Wärmebedarf sowie die Leistung der Wärmepumpen. Die orange Linie zeigt die Stromaufnahme von Wärmepumpe 2. Diese ist in diesem Fall für die Wärmeproduktion hauptverantwortlich (gemäss Regelung wird hier gewechselt, um einen gleichmässigen Betrieb der Wärmepumpen zu gewährleisten). Ist der Wärmebedarf unter 60 kW, läuft nur Wärmepumpe 2. Sie moduliert dabei zwischen 4 kW und 11 kW Stromaufnahme, um sich dem Bedarf anzupassen. Dabei taktet sie kaum. Ist der Wärmebedarf unter 30 kW fängt sie an zu Takten, wie zwischen dem 04.02. und 06.02. zu sehen ist. Steigt der Bedarf über 60 kW schaltet sich Wärmepumpe 1 hinzu, was oft dazu führt, dass zu viel Leistung zur Verfügung steht, da die minimale Leistung zu gross ist und Wärmepumpe 1 gleich wieder ausschaltet. Am zweiten Februar taktet Wärmepumpe 1 dreizehnmal. Hier könnte man davon sprechen, dass Wärmepumpe 2 unterdimensioniert ist und mit einer leicht höheren Leistung das Takten von Wärmepumpe 1 sich stark reduzieren liesse. Eine Lösung dieses Problems könnte die Kombination einer leistungsfähigeren Wärmepumpe mit einer kleineren sein, damit sowohl der obere als auch der unter Leistungsbereich ohne Takten abgedeckt werden kann. Ein weiterer Ansatz wäre die Regelung der Wärmepumpen zu optimieren. Würde Wärmepumpe 2 in den Teillastbetrieb



gehen, wenn Wärmepumpe 1 hinzugeschaltet wird, könnten beide Wärmepumpen durchlaufen. Ob sich das umsetzen lässt sollte untersucht werden.

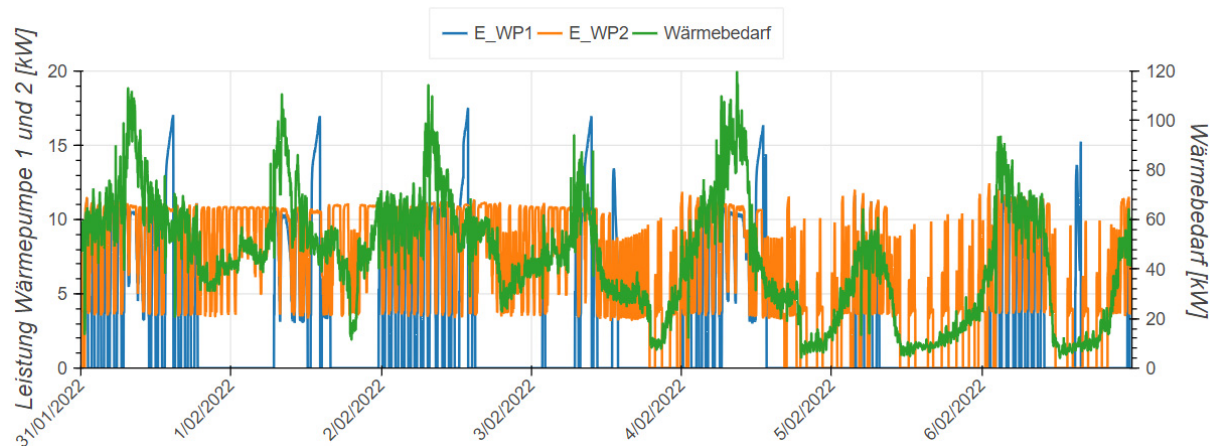


Abbildung 32: Betrieb der Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Wärmebedarf. Wärmepumpe 2 läuft fast durchgehend. Wärmepumpe 1 nur dann, wenn der Wärmebedarf zu hoch ist. Dabei taktet sie stark, am 2. Februar 13-mal.

In Abbildung 33 ist der Coefficient of Performance (COP) sowie die Energy Efficiency Ratio (EER) dargestellt. Diese beschreiben das Verhältnis von der eingebrachten Energie im Vergleich zur Nutzwärme (COP) oder Kälte (EER). Berechnet sind sie wie in Gleichung 2 aus Kapitel 3.2.1 beschrieben, jedoch auf stündlicher Basis und nicht auf Jahresbasis. Beide Wärmepumpen weisen eine sehr ähnliche Effizienz auf und unterscheiden sich kaum in den Werten. Das dies trotz baugleicher Wärmepumpen nicht immer der Fall sein muss, hat das P&D Projekt Sentmatt gezeigt [7].

Die Werte liegen beim Heizen zwischen 5 und 8 (hohe Quellentemperatur) und liegen damit im angegebenen Bereich des Datenblatts (B0/W45 bis B0/W24: 3.85 bis 6.79). 'B' steht bei den Werten aus dem Datenblatt für das englische Wort 'Brine' also Sole und gibt die Quellentemperatur an, 'W' steht für 'Water' und gibt die Temperatur des Heizwassers an. Die Werte für die Brauchwarmwasserbereitstellung liegen um einen COP von 3, auch das deckt sich mit dem Datenblatt (B0/W55: 3.05). Beim Kühlen liegt der EER zwischen 4 und 6 und somit unter der Angabe des Datenblatts (B10/W18 8.09). Ein Grund dafür könnte die deutlich höhere Quellentemperatur sein, die in diesem System zwischen 30 °C und 40 °C liegt. Die Streuung, die in Abbildung 33 zu sehen ist, beruht auf Schaltmomenten, z.B. Ein- oder Ausschalten sowie direkter Wechsel zwischen zwei Modi, z.B. Heizen zu Brauchwarmwasser, weshalb die Werte für Wärmepumpe 1 auch etwas mehr streuen.

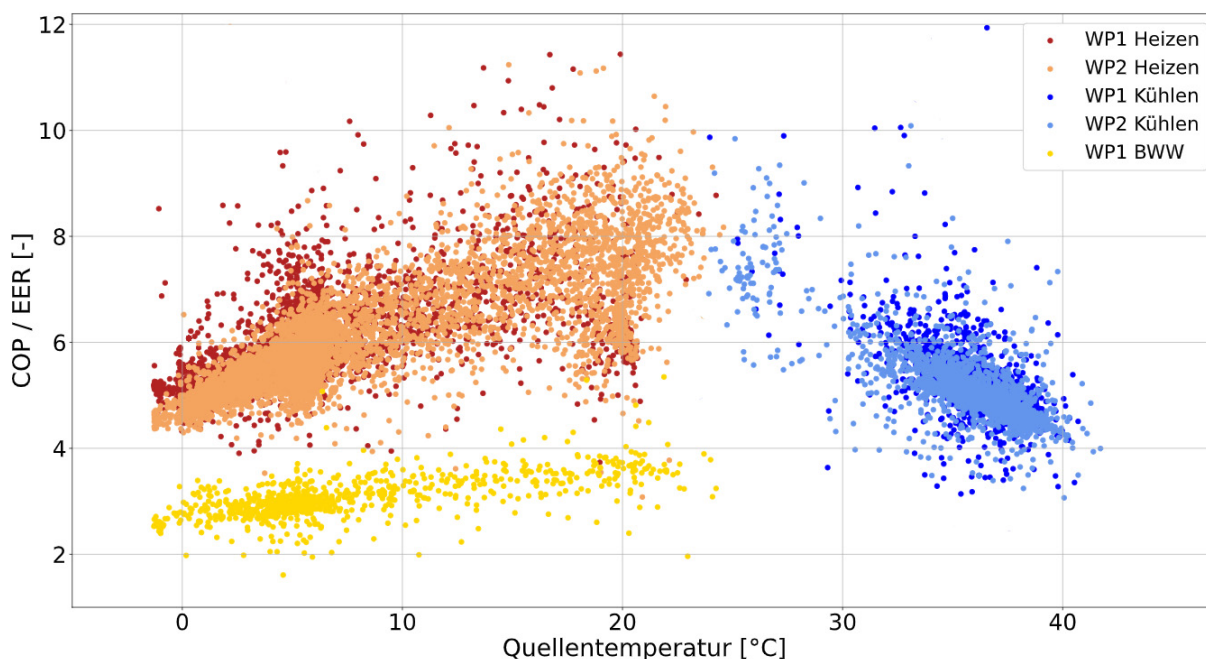


Abbildung 33: COP und EER in Abhängigkeit der Quellentemperatur und des Betriebsmodus der Wärmepumpe. Stundenwerte aus dem Jahr 2022.

In Tabelle 13 werden alle wichtigen Ergebnisse der Auswertung der Wärmepumpen zusammengefasst. Da nur Wärmepumpe 1 für die Brauchwarmwasserproduktion zuständig ist, hat diese eine niedrigere Jahresarbeitszahl (JAZ) als Wärmepumpe 2. Dies liegt daran, dass die Effizienz sich mit steigendem Temperaturhub zwischen Quellen- und Nutztemperatur verschlechtert. Für die gesamte Anlage liegt der Systemnutzungsgrad bei 4.92. Zu beachten gilt allerdings, dass hier die Brauchwarmwasserproduktion sowie diverse kleinere Pumpen, wie in Abbildung 5 gezeigt, nicht einberechnet werden. Der Wert wird dadurch geringer.

Tabelle 14: Parameter der Wärmepumpen für das Jahr 2022.

	Wärmepumpe 1	Wärmepumpe 2
Wärmeleistung	80 kW	80 kW
Kälteleistung	45 kW	45 kW
Bereitgestellte Heizwärme	44'263 kWh	91'818 kWh
Bereitgestelltes BWW	19'185 kWh	-
Bereitgestellte Kälte*	41'470 kWh	47'779 kWh
Stromverbrauch	21'968 kWh	27'870 kWh
Jahresarbeitszahl Heizen & BWW	4.80 (±0.29)	5.82 (±0.35)
Jahresarbeitszahl Kühlen	4.85 (±0.29)	4.71 (±0.28)
Systemnutzungsgrad+	4.92 (±0.30)	

* Reiner Kältebedarf ohne Wärmeanforderung



4.8 Kosten/Nutzen Vergleich

Eine thermisch aktivierte Fundamentplatte für die Wärme- und Kälteversorgung wird heute noch selten eingesetzt. Daher soll in diesem Kapitel ein Vergleich der Kosten mit marktüblichen Alternativen abgeschätzt werden. Als Alternativen werden hierfür ein System mit Luft/Wasser-Wärmepumpen und ein System mit Erdwärmesonden und Sole/Wasser-Wärmepumpen herangezogen werden. Bei beiden Alternativen wird zudem die PVT-Anlage durch eine hinsichtlich der Stromerzeugung gleichwertige PV-Anlage ersetzt. Die Kosten der Vergleichssysteme sind Tabelle 15 zu entnehmen.

Bei einem System mit Luft/Wasser-Wärmepumpe ist zu berücksichtigen, dass hier der COP bzw. die JAZ geringer ist. Für das Vergleichssystem wurde eine JAZ von 3.5 angenommen. Das bedeutet, dass hier der Strombedarf höher ist, was in den Kostenvergleich einfließt. Bei einem Strombedarf der Wärmepumpen für die Fundamentplattenlösung von 50 MWh pro Jahr bei einer JAZ von 4.8, würde sich ein Strombedarf von 69 MWh bei einer JAZ von 3.5 ergeben. Es kann auch Strom eingespart werden, da Pumpenstrom für die PVT-Anlage und für die Fundamentplatte wegfällt. Dieser Wegfall wird jedoch ausgeglichen, da für die Split-Geräte der Luft/Wasser-WP zusätzliche Pumpen benötigt werden. Auf Investitionskosten Seite fallen die Mehrkosten für die aktivierte Fundamentplatte, den WRG-Speicher, sowie für die aufwändigere Hydraulik weg. Die Mehrkosten für ein Luft/Wasser-Wärmepumpensystem wurden von der Firma Caotec bereitgestellt. Diese empfiehlt drei Luft/Wasser-Wärmepumpen à 55 kW mit Mehrkosten von rund 166'000 CHF, gegenüber den eingesetzten Sole/Wasser-Wärmepumpen. Die Mehrkosten betreffen dabei vor allem die Split-Ausseneinheit und die Reversibilität (Kühleinheit) der Luft/Wasser-WP.

Bei dem Vergleichssystem mit Erdwärmesonden entfallen die Mehrkosten für die aktivierte Fundamentplatte, es kommen jedoch die Kosten für ein Erdwärmesondenfeld hinzu. Die Kosten für die Hydraulik und den Pumpenstrom werden als gleichwertig wie bei der hier untersuchten thermoaktiven Fundamentplatte angenommen. Auch bei der Jahresarbeitszahl wird von keinem Unterschied ausgegangen.

Die benötigte Anzahl an Sonden und deren Tiefe wurde dabei anhand folgender Parameter geschätzt: Bei einer Volllast beider Wärmepumpen, d.h. Wärme und Warmwasser gleichzeitig, erzeugen sie eine thermische Leistung von 160 kW. Bei einer JAZ von 4.8 beträgt die Wärmeentzugsleistung des Erdsondenfeldes 117 kW. Unter der Annahme, dass die maximale spezifische Wärmeentzugsleistung der Erdwärmesonden für Chur 25 W/m beträgt, werden 4'680 m Erdwärmesonden benötigt. Bei einem durchschnittlichen Installationspreis von 100 CHF/ml würde die Realisierung des Erdwärmesondenfeldes etwa 468'000 CHF kosten.

Des Weiteren muss für beide Vergleichssysteme noch der zusätzliche Strom berechnet werden, welcher für die Wärme benötigt wird, um den Wegfall der PVT-Anlage zu substituieren. In diesem Szenario wird das Jahr 2021 als Vergleich herangezogen, bei dem die PVT-Anlage mehr Wärme wegen der Brauchwarmwasser-Vorwärmung liefern konnte. Im Jahr 2021 stellte die PVT-Anlage 11'500 kWh Wärme bereit. Bei einer JAZ von 4.8 (Sole/Wasser-WP) für Heizen und Brauchwarmwasser benötigen die Wärmepumpen etwa weitere 2'400 kWh Strom pro Jahr zusätzlich zur Bereitstellung dieser Wärme. Bei der angenommenen JAZ der Luft/Wasser-WP von 3.5 wären es 3'200 kWh Strom pro Jahr. Beim momentanen Strompreis in Chur von 0.30 CHF/kWh sind dies 720 CHF resp. 990 CHF pro Jahr.



Der Wartungsaufwand wurde für alle System ähnlich eingeschätzt.

Anzumerken ist, dass besonders bei der Abschätzung der hinzukommenden resp. wegfallenden Stromkosten hier nur mit Annahmen gearbeitet wird. Nur eine Simulation kann hier den tatsächlichen Strombedarf hinreichend genau bestimmen. Auch wurde ein fixer Strompreis angenommen und Inflation und Zinsen nicht berücksichtigt.

Die Kosten der PV-Anlage, welche die PVT-Anlage ersetzt, können anhand des Berichtes 'Observation des prix de marché photovoltaïque 2021' von Lionel Bloch et al. [8] berechnet werden.

$$y = \frac{5523}{x^{0.4862}} + 156.2 \cdot e^{-0.2321 \cdot x} + 578.4 \quad \text{Gl. 6}$$

Dabei steht y für die spezifischen Kosten pro kW vor Steuern und x für die installierte Leistung in kW. Aus Gleichung 6 ergeben sich spezifische Kosten von 1'301 CHF/kW. Bei einer installierten Leistung von 77 kW ergibt sich somit ein Gesamtpreis von 100'200 CHF.

Tabelle 15: Kostenvergleich Fundamentplatte & PVT-Anlage gegenüber marktüblichen Vergleichslösungen

	Thermoaktive Fundamentplatte mit PVT-Anlage	Luft-Wasser-WP mit PV-Anlage	Erdsondenfeld mit PV- Anlage
Kosten PV/PVT-Anlage + Installation	284'000 CHF	100'000 CHF	100'000 CHF
Mehrkosten Fundament	220'000 CHF	-	-
Kosten Erdsondenfeld	-	-	470'000 CHF
Mehrkosten reversible Luft- Wasser-WP	-	166'000 CHF	-
Mehrkosten Strom Luft- Wasser-WP (20 Jahre)*	-	111'000 CHF (371 MWh)	-
Mehrkosten Strom für Wärme durch Ersatz PVT- Anlage mit WP*		20'000 CHF (64 MWh)	14'400 CHF (48 MWh)
Gesamtkosten	504'000 CHF	326'000CHF	584'000 CHF

*Gerechnet mit einem Strompreis von 0.30 CHF/kWh

Tabelle 15 zeigt, dass die Fundamentplattenlösung rund 14 % günstiger ist als das Vergleichssystem mit Erdwärmesondenfeld, was vor allem auf die Kosten des Erdwärmesondenfeldes zurückzuführen ist. Aufgrund der Unsicherheiten der Kosten-schätzung ist von etwa gleichen Kosten auszugehen. Demgegenüber ist das System mit Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 326'000 CHF rund 35 % günstiger. Dabei ist zu beachten, dass sich hier die Betriebs- und Investitionskosten nahezu entsprechen. Das heisst, dass dieses System stark auf den Strompreis reagiert. Bei der hier durchgeführten Rechnung wäre eine Verdoppelung des Strompreises nötig, damit sich die Preise angleichen. Aber auch die Zinsen bei Kreditaufnahme und die Laufzeit, mit denen das System finanziert wird, haben einen



starken Einfluss. Unter der Annahme, dass alle Anlagen mit selbem Zinssatz über den gleichen Zeitraum finanziert werden, wird die Lösung mit der Luft/Wasser-WP im Vergleich zu den beiden anderen Systemen nochmals deutlich günstiger, da bei dieser die Anfangsinvestitionen den größten bzw. den gesamten Anteil ausmachen.

Falls jedoch keine Ausseneinheit installiert werden kann (z. B. aus Lärmschutzgründen, oder wegen der Ästhetik oder wegen zu tiefen Aussenlufttemperaturen), ist das Fundamentplattensystem die finanziell beste Lösung.

Im Bezug auf den Strombedarf lässt sich bei der thermoaktiven Fundamentplatte mit PVT-Anlage am meisten einsparen. Gerade im Hinblick auf eine potenzielle Winterstromlücke kann dies ein entscheidendes Kriterium sein.

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Das Projekt ist aus Sicht des Projektteams ein Erfolg. Es konnte gezeigt werden, dass eine durch ein Rohrregister thermisch aktivierte Fundamentplatte als Speicher für eine Wärmepumpe bei einem grossen Verwaltungsgebäude sehr gut und effizient funktioniert und auch tendenziell günstiger ist als ein Erdsondenfeld. Das Energiesystem ist in seinem Umfang und seinen Funktionen sehr komplex, die gemachten Erfahrungen helfen jedoch, die Umsetzung von weiteren Projekten zu verbessern, die auf eine ähnliche Lösung setzen wollen.

Der Monitoring- und Optimierungsaufwand bei einer solchen Anlage ist besonders in den ersten Betriebsjahren sehr hoch. Umso wichtiger ist eine Betreuung der Anlage durch einen professionellen Anlagenbetreiber. Im vorliegenden Fall wurde dies von Bouygues Energies & Services vorgenommen. Die Zusammenarbeit funktionierte stets reibungslos, Optimierungen wurden zeitnah umgesetzt und der Eigentümer ist entsprechend vollauf zufrieden.

Auch auf Seiten des Anlagenbetreiber ist man insgesamt zufrieden. Auf die Frage hin, was man beim nächsten Mal besser machen könnte, wurden u.A. folgende Punkte genannt:

- Frühere Einbindung, um sich besser auf die Innovationen und Komplexität der Anlage vorzubereiten
- Bessere Absprache zwischen den einzelnen Gewerken
- Mehr Möglichkeiten/Freiheitsgrade die Wärmepumpe zu (über-)steuern, da man hier einige Male limitiert war, die Regelung gemäss Wunsch umzusetzen.

Die Mitarbeiter bei Viega (ehem. Oblamatik) sind sehr zufrieden mit dem neuen Gebäude, es war jedoch wichtig, sie auf die Besonderheiten aufmerksam zu machen. So zum Beispiel die Nutzung der Räume als «Solarkollektor» durch die Storensteuerung und die schwankenden Temperaturen in der Lagerhalle, bedingt durch die Aktivierung der Fundamentplatte. Die Temperaturen in den Lagerräumen, welche direkt über der Fundamentplatte sind, kommen ohne zusätzliche Heiz- oder Kühlgeräte aus, was in der Planungsphase noch ein offener Punkt war.

Die Auswertung des umfangreichen Monitorings lieferte wichtige Erkenntnisse zu den im Antrag formulierten Fragestellungen. Nachfolgend werden themenbezogen die wichtigsten Schlussfolgerungen erläutert.

Aktivierung Fundamentplatte

Die Aktivierung der Fundamentplatte als Quelle der Wärmepumpe im Winter und Wärmesenke im Sommer hat sehr gut funktioniert. Die Nutzung des Anergienetzes als Backup konnte Stück für Stück reduziert werden. Jetzt macht dieses nur noch einen Bruchteil der benötigten Gesamtwärmemenge aus. Durch die hohen Produktion von Abwärme im Gebäude wird mehr Wärme in die Fundamentplatte und das umliegende Erdreich eingetragen als herausgeholt wird. Die Erwärmung ist auch fünf Meter unter Fundamentplatte messbar, kühlt aber im Winter auf ähnliche Temperaturen ab, wie 16 Meter neben dem Gebäude. Ob und wie stark sich das Erdreich langfristig erwärmt, sollte im Auge behalten werden. Das Grundwasser hat am Standort keinen Effekt auf die Aktivierung des Erdreichs und umgekehrt.

Ein wichtiger Punkt für die Autarkie ist ein rechtzeitiges Stoppen der Wärmeregeneration im Winter bzw. Kältereeneration im Sommer. Als gute Einstellung hat sich bisher folgende Strategie bewiesen: Zwischen März und Juli wird keine zusätzliche Wärme zugeführt, sobald die Fundamentplatte 7 °C erreicht hat. Dadurch verliert man an Effizienz beim Heizen in den



Monaten ab März, verhindert aber im Sommer ein Überhitzen der Fundamentplatte. Bis dato wurde so die Fundamentplatte im Sommer, wenn auch knapp, immer unter 31 °C gehalten.

Von Oktober bis März wird das Fundament nur dann gekühlt, wenn die Temperatur in der Fundamentplatte über 28 °C steigt. Somit wird die Wärme aus dem Sommer möglichst weit in die Wintermonate gebracht.

Durch die Glykol-Beimischung konnte die Energiemenge, welche der Fundamentplatte entzogen wird, erhöht werden, da nun weiter abgekühlt werden kann. Ein Abkühlen auf 1 °C (Nutzungsgrenze wegen Vereisungsschutz) fand bisher dennoch jedes Jahr statt und das Anergienetz musste herbeigezogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass besonderes in kühlen Jahren das Anergienetz als zusätzliche Wärmequelle nötig sein wird ohne weitere Optimierungsmassnahmen.

Es wurde ein vereinfachtes mathematisches Modell erstellt und validiert, welches das Verhalten der Fundamentplatte und das des Erdreichs abbildet. Das Modell verwendet dafür die Wärmeleitung und die Wärmekapazität des umliegenden Erdreichs und der Fundamentplatte. Wie im Kapitel 4.5 zu sehen, bildet es die Temperaturverläufe sehr gut ab. Das Modell könnte als Dimensionierungshilfe für thermisch aktivierte Fundamentplatten dienen.

PVT-Anlage zur Wärmeproduktion und Kühlung

Die Kühlleistung der PVT-Anlage war mit maximal 80 kW ausreichend gross um die Wärmesenken wie Fundamentplatte und Pufferspeicher (respektive WRG-Speicher) ausreichend zu kühlen. Dabei lag die Kühlleistung im Schnitt bei 16 kW. Diese ist stark abhängig von der Quellentemperatur und der Aussenlufttemperatur.

Die Fundamentplatte wurde dank der Kühlung durch die PVT-Anlage immer unter den gewünschten 31 °C gehalten und das Anergienetz musste nicht unterstützend als Kältequelle hinzugezogen werden.

Die Wärme, welche die PVT-Anlage liefern kann, findet kaum Verwendung. Im Sommer ist die Abwärme, welche durch das Gebäude produziert wird (passive solare und interne Gewinne), zu gross. Im Winter ist die Temperatur der Fundamentplatte lange höher als die der PVT-Anlage, was ebenfalls die Nutzung der PVT-Wärme mit der momentanen Regelung reduziert. Erst im Frühjahr, wenn die Fundamentplatte ausgekühlt ist, kann die Wärme genutzt werden. Um den Ertrag zu erhöhen, wurde die Leitung zum Brauchwarmwasserspeicher abgebaut und eine neue Leitung zur Nutzung als Quelle der Wärmepumpen installiert. Dies zeigte leider die entgegengesetzte Wirkung und der Ertrag hat sich seither verringert. Dies liegt daran, dass um ein möglichst effizienten Betreib zu gewährleisten, die wärmere Quelle (Fundamentplatte) genutzt wird. Es wäre aber denkbar, die PVT-Anlage auch dann einzusetzen, wenn die VL-Temperaturen leicht unterhalb derjenigen der Fundamentplatte liegen. Somit kann diese länger als Wärmespeicher genutzt werden und ggf. sogar das Auskühlen verhindern.

Eine weitere Möglichkeit für Energiesysteme, die auf eine thermoaktive Fundamentplatte setzen könnte sein, die PVT-Anlage durch eine PV-Anlage mit Rückkühler zu ersetzen, sofern dies möglich ist. Dadurch könnten die Investitionskosten gesenkt, und noch höhere Kühlleistungen erreicht werden. Das könnte vor allem dann interessant sein, wenn die lieferbare Wärme der PVT-Anlage nicht genutzt werden kann.

Wärmepumpen

Der hier ermittelte Systemnutzungsgrad für Heizen und Kühlen liegt mit 4.92 (± 0.30) bei einem sehr guten Wert. Die Fundamentplatte versorgt die Wärmepumpen mit einer höheren Quellentemperatur als die Aussenluft, was für eine höhere Effizienz sorgt. Zudem sorgt die Regelstrategie, welche das Gebäude respektive die Büroflächen als «Solarkollektor» nutzt, und der permanente Kühlbedarf der Serverräume zusätzlich für (Ab-)Wärme, welche als Quelle für die Wärmepumpen dient. Die Wärmepumpen wurden mit deutlich kleinerer Leistung installiert, als nach SIA und VDI-Normen berechnet. Dieser Schritt hat sich bewährt und der Mut der Bauherrschaft dieses Risiko einzugehen. Dennoch ist die Gesamtleistung mit 160 kW für Heizen und 90 kW für Kühlen immer noch zu hoch, was ohne weitere Optimierungen zu einem Takten der Wärmepumpen führt.

Kosten/Nutzen Vergleich

Es wurde anhand einer vereinfachten Rechnung die Kosten des hier eingesetzten Systems mit einer Luft/Wasser-WP und einem Erdsondenfeld verglichen. Dazu wurden einerseits verschiedene Hypothesen getroffen, andererseits auch Informationen eingeholt wurden, um möglichst genau die nötigen Investitionen abschätzen zu können. Für die Betriebskosten wurden bei den Vergleichssystemen Annahmen getroffen so z.B. bei der Effizienz und dem Stromverbrauch. Es zeigt sich, dass deren Einfluss auf das Ergebnis geringer ist als die Investitionskosten, so dass auch ohne zusätzliche Simulationen mit den getroffenen Annahmen plausible Ergebnisse erzielt werden konnten.

Das günstigste Gesamtsystem ist die Luft/Wasser-WP mit PV-Anlage. Dies ist auf die vergleichsweise geringen Investitionskosten zurückzuführen. Die niedrigere Effizienz aufgrund der geringeren Quellentemperatur führt zwar zu höheren Betriebskosten, aber auch über einen Zeitraum von 20 Jahren werden die Kosten der thermoaktiven Fundamentplatte mit WRG-Speicher und PVT-Anlage nicht überschritten.

Ein Erdsondenfeld mit Sole/Wasser-WP und PV-Anlage war in dem durchgeführten Vergleich die teuerste Lösung. Hinsichtlich der Effizienz wurde angenommen, dass diese mit der thermoaktiven Fundamentplatte identisch ist. Allerdings muss zusätzlich Strom aufgewendet werden, um die Wärme aus der PV-Anlage zu substituieren. Die Betriebskosten sind daher etwas höher, wobei die Kosten für das Erdsondenfeld mit Abstand den größten Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Der Vorteil gegenüber dem hier verwendeten System ist, dass das Erdsondenfeld bei richtiger Auslegung und Betrieb nicht auskühlen oder überhitzen kann. Dies gilt auch für die Luft/Wasser-WP. Hier ist man auf die Größe und das Volumen der Fundamentplatte (und die daraus resultierende Wechselwirkung mit dem Erdreich) beschränkt und muss ggf. mit zusätzlichen Wärmequellen und -senken (z.B. Anergienetz) arbeiten.

Die thermoaktive Fundamentplatte ist daher vor allem dann sinnvoll, wenn keine Luft/Wasser-Wärmepumpe gebaut werden darf (z.B. wegen Lärmemissionen) oder die Außentemperaturen zu niedrig sind, um die Wärmepumpe wirtschaftlich zu betreiben (z.B. in höheren Lagen). Wird ein besonders netzdienliches System gewünscht, ist die thermoaktive Fundamentplatte mit PVT-Anlage ebenfalls zu bevorzugen, da der Netzbezug geringer ist, was insbesondere im Hinblick auf die Diskussion um die «Winterstromlücke» von Vorteil ist.



Gesamtsystem

Im Zuge der Analyse des Pilot- und Demonstrationsprojekts OblaTherm hat sich gezeigt, dass die Wärme- und Kälteversorgung mittels thermoaktiver Fundamentplatte einen bedeutenden Schritt in Richtung nachhaltiger und sehr effizienter Energienutzung darstellt. Trotz der noch vorhandenen Abhängigkeit von dem Energienetz (etwa 1 %) ist das Projektteam optimistisch, dass durch weitere Optimierungen an der Regelung des Energiesystems eine vollständige Unabhängigkeit davon erreicht werden kann. Ein Vorteil, der in dieser Hinsicht erwähnenswert ist, ist die Abwärme des Serverraums. Mit 11.5 MWh im Jahr 2022 während der Heizperiode macht diese knapp 10 % des Gesamtwärmebedarfs aus. Dies gilt es zu berücksichtigen, möchte man das Konzept auf andere Projekte übertragen. Ob auch ohne eine solche Abwärme das System effizient funktioniert, weil dadurch ggf. die PVT-Anlage mehr Ertrag liefert, muss Anhand von Simulationen geprüft werden.

Auch wenn das hier entwickelte Gesamtsystem (noch) aus wirtschaftlicher Sicht nicht mit einem Wasser/Luft-Wärmepumpensystem mithalten kann bietet es vor allem im Bereich Energieeffizienz und Netzdienlichkeit Vorteile.

Stellt sich die Frage, ob ein Erdsondensystem oder eine thermoaktive Fundamentplatte verwendet werden soll, ist diese auch wirtschaftlich interessant. Die Nutzung des Fundaments, welches jedes Gebäude benötigt, sorgt zudem kaum für zusätzliche graue Energie, welche für die Bohrung von Erdsonden benötigt wird. Diese machen bis zu 50 % der grauen Energie und Treibhausgasemission bei einer Wärmeanlage aus [9].

Die Herausforderung des hier untersuchten Systems liegt vor Allem in der höheren Komplexität und dem erhöhten Regelaufwand. Ein Monitoring und eine lange Optimierungsphase waren unabdingbar, was sicherlich auch durch den P&D-Charakter herrührt.

Die Zukunft dieser Technologie liegt daher in der Weiterentwicklung intelligenter Energiemanagementsysteme, die das Verhalten der Fundamentplatte automatisch analysieren und anhand der Bedürfnisse des Verbrauchers regulieren können. Mit einem solchen Ansatz wird es möglich sein, die Vorteile der thermoaktiven Fundamentplatte mit PVT-Anlage nicht nur für Verwaltungsgebäude, sondern auch für neue Ein- und Mehrfamilienhäuser nutzbar zu machen – vorausgesetzt, der Wärme- und Kältebedarf liegt im Bereich der Leistungsfähigkeit dieser Technologie (hier lieferte die Fundamentplatte etwa 60 kWh/m² und Jahr Wärme und 100 kWh/m² und Jahr Kälte).

Insgesamt betrachtet stellt die thermoaktive Fundamentplatte mit PVT-Anlage oder in abgewandelter Form mit bspw. PV und Rückkühler somit eine vielversprechende Option dar, um den Anforderungen an eine nachhaltige und effiziente Energieversorgung gerecht zu werden.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzungen

Im Zuge der Auswertungen für den Schlussbericht sind einige Optimierungsmöglichkeiten aufgedeckt worden, die mit dem Anlagenbetreiber näher angeschaut werden.

Das Anergienetz wird im Winter benötigt, sobald die Fundamentplattentemperatur unter 1 °C fällt. Dies ist bereits in allen drei Auswertungsjahren der Fall gewesen. Möchte man auf die Nutzung des Anergienetzes verzichten, sollten weitere Optimierungen/Regelstrategien getestet werden. Im Winter könnte öfters die PVT-Anlage als Quelle genutzt werden, auch wenn die Fundamentplatte wärmer ist. Somit kann die gespeicherte Wärme in der Fundamentplatte und in dem Erdreich länger genutzt werden.

Im Sommer wurde das Anergienetz noch nicht benötigt, da die Grenztemperatur von 31 °C knapp nicht erreicht wird. Bedingt durch die Klimaerwärmung ist davon auszugehen, dass ohne weitere Massnahmen die 31 °C wahrscheinlich in den nächsten Jahren erreicht werden.

Für zukünftige Projekte wäre daher die Installation einer PV-Anlage mit Rückkühler anstatt einer PVT-Anlage dankenswert. Der Rückkühler kann im Winter das Anergienetz als Wärmequelle ersetzen um im Sommer für die nötige Auskühlung der Fundamentplatte sorgen.

Ein weiterer Punkt ist die Steuerung der Wärmepumpen. Liegt der Wärmebedarf in einem Bereich, in welchem die Leistung einer Wärmepumpe knapp nicht ausreicht, wird die zweite Wärmepumpe zugeschaltet. Dies führt im Vergleich zum Bedarf zu einer überhöhten Leistung. Das passiert auch, wenn die Regelung die zweite Wärmepumpe dazuschaltet, obwohl die erste noch nicht am Maximum läuft. Durch diesen Mechanismus kommt es zum Takten der Wärmepumpen, was ihre Lebensdauern reduziert. Eine Möglichkeit dies zu verhindern wäre, dass beim Hinzuschalten der zweiten Wärmepumpe die erste in einen Teillastbetrieb geht, damit die minimale Leistung der zweiten vollständig genutzt werden kann, ohne zu Takten. Die Regelungslogik sollte erkennen, in welchen Bereichen eine oder beide Wärmepumpen laufen können, um ein Takten zu minimieren. Für zukünftige Projekte macht es Sinn, eine Kombination einer grossen mit einer kleinen Wärmepumpe zu untersuchen, um einem möglichst grossen Leistungsbereich abdecken zu können, ohne ein Takten zu verursachen.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der untersucht wird, ist wie man die Wärme der PVT-Anlage besser nutzen kann. Die Reaktivierung des BWW-Speichers als Wärmesenke sollte in Erwägung gezogen werden. Zudem sollte man die Temperatur der Fundamentplatte im März durch die PVT-Anlage weiter erhöhen, momentan wird bei 7 °C der Wärmeeintrag unterbunden, um für den Sommer die Platte nicht frühzeitig zu stark zu erwärmen. Durch den Wärmebedarf im April und Mai könnte die höhere Temperatur der Fundamentplatte im März kompensiert werden, welches die Effizienz der Wärmepumpen erhöht. Zudem sollte die PVT-Anlage als Quelle für die Wärmepumpen auch dann genutzt werden, wenn sie eine etwas geringere Vorlauftemperatur hat wie die Fundamentplatte. Das führt zwar zu einer schlechteren Effizienz der Wärmepumpe, der Wärmespeicher Fundamentplatte wird dadurch aber entlastet und kann so ggf. vor dem Auskühlen bewahrt werden.

Als letzter Punkt wird von Seiten des SPF geprüft, ob sich ein kleines Folgeprojekt umsetzen lässt. Dabei soll anhand eines linearen Modells eine Dimensionierungshilfe erstellt werden, um aktivierte Fundamentplatten als (Teil-)quellen für Wärmepumpensystem auszulegen.

Abschliessend ist zu bemerken, dass das Monitoring auf Seiten von Equans (ehem. Bouygues) weiter fortgeführt wird. Die Messtechnik bleibt bestehen. Auch das SPF zeichnet weiterhin die Daten auf, um das erwähnte Dimensionierungstool zu erstellen und um bei Fragen zur Optimierung beratend zur Seite stehen zu können.



7 Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr.-Ing. M. N. Fisch, Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann, Dipl.-Ing. Herdis Kipry, und Dipl.-Ing. Christian Sasse, „WKSP Wärme- und Kältespeicherung im Gründungsbereich energieeffizienter Bürogebäude“, Forschungsbericht, TU Braunschweig Institut für Gebäude- und Solar-technik, Braunschweig, 2010.
- [2] M. Ziegler und S. Kürten, Erdwärmenutzung mit Hilfe von geothermisch wirksamen Abdichtungselementen an erdberührten Untergeschoßkonstruktionen im Grundwasser: Abschlussbericht. in Forschungsinitiative Zukunft Bau, no. F 2788. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl, 2011.
- [3] Kürten, Sylvia, „Zur thermischen Nutzung des Untergrunds mit flächigen thermo-aktiven Bauteilen“, Dissertation / PhD Thesis, Aachen, Techn. Hochsch., Aachen, 2014.
- [4] von Euw R, Alimpic Z, Huber H, Schrader B, Nipkow J, Steiger O, et al. Gebäudetechnik - Systeme integral planen. 2nd ed. Faktor; 2022.
- [5] D. Zenhäusern, A. Baggenstos, O. Türk, S. Brunold, M. Rommel, PVT-Kollektoren für die Brauchwarmwasser-Vorwärmung – Mess- und Simulationsresultate einer Testanlage Institut für Solartechnik SPF, Hochschule für Technik Rapperswil HSR, 2014.
- [6] I. Bosshard, M. Troxler, A. Guliyeva, K. Klevitz, M. Haller, et al. OptiPower - Untersuchung der optimalen Auslegung der Leistung von Heiz- und Kühlsystemen für Wohn- und Verwaltungsgebäude, SPF Institut für Solartechnik, Bundesamt für Energie BFE; 2023.
- [7] M. Bättschmann, I. Bosshard, S. Crameri, A. Schmitt, N. Dimri, et al. Pilot- und Demonstrationsprojekt Sentmatt - Emissionsfreie Wärmezeugung mit tiefer Erdwärmesonde, effizienter Niederhub-Wärmepumpe und optimierter Wärmeverteilung, SPF Institut für Solartechnik, Bundesamt für Energie BFE; 2022.
- [8] L. Bloch, Y. Sauter, F. Jacqimin, Observation des prix de marché photovoltaïque 2021, SuisseEnergie, Office fédéral de l'énergie OFEN, 2021
- [9] D. Bionda, G. Settembrini, S. Domingo. SYGREN - Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE, Bundesamt für Energie BFE; 2021.



8 Anhang

8.1 Verbaute Zähler

Tabelle 16: Übersicht der Wärme- und Elektrozähler sowie Temperatursensoren

Kürzel	Bezeichnung im Projekt	Beschreibung
Wärmezähler		
WZ1	PVT_Wärme_Fund	Wärme PVT Anlage an Fundament oder WP
WZ1*	PVT_Kühlung_Fund	Wärmeabgabe an PVT-Anlage vom Fundament oder Pufferspeicher
WZ2	Fund_WärmeReg	Wärmeabgabe an Fundamentplatte zur Regeneration oder beim Kühlen
WZ2*	Fund_KälteReg	Wärme vom Fundament zum Heizen oder Abgabe an PVT-Anlage im Kühlfall
WZ3	WRG_Speicher	Wärmeabgabe des WRG-Speichers im Kühlfall
WZ3*	WRG_Speicher_neg	Wärmeaufnahme des WRG-Speichers vom Kältespeicher im Kühlfall
WZ4	Anergie_Wärme	Wärme vom Anergienetz falls Fundament ausgekühlt
WZ5	Anergie_Kälte	Kälte vom Anergienetz falls Fundament überhitzt
WZ6		
WZ7	Notkühlung_Gastro	Notkühlung Gastro
WZ8	Kühlung_Server	Kühlung Server
WZ9	Kühlung_Deckensegel_FBH	Kühlung Deckensegel und Fussbodenheizung
WZ10	Kühlung_Lüftung	Kühlung durch Lüftung
WZ11	WP1_Verd	Wärmepumpe 1 Kühlkreislauf
WZ12	WP1_Kond	Wärmepumpe 1 Heizkreislauf
WZ13	WP2_Verd	Wärmepumpe 2 Kühlkreislauf
WZ14	WP2_Kond	Wärmepumpe 2 Heizkreislauf
WZ15	WP1_Kond_BWW	Wärmepumpe 1 Brauchwarmwasser
WZ16	PVT_BWW	PVT als Quelle für die WP (ehemalig Direkteinspeisung BWW)
WZ17	Heizung_Deckensegel_FBH	Heizen Deckensegel und Fussbodenheizung
WZ18	Heizung_Lüftung	Heizen Lüftung
Elektrozähler		
EZ1	E Pumpe PVT	Pumpe PVT
EZ2	E Pumpe Fund	Pumpe Fundament
EZ3	E Pumpe Rück	Pumpe Rückkühlung Pufferspeicher
EZ6	E Pumpe Notkühlung	Pumpe Notkühlung Gastro
EZ16	E Pumpe Heizung Lüftung	Pumpe Heizen Lüftung



EZ100	E_WP1+	Strombedarf Wärmepumpe 1 + Pumpe Primär und Sekundärkreislauf
EZ101	E_WP2+	Strombedarf Wärmepumpe 2 + Pumpe Primär und Sekundärkreislauf
EZ103	E_Stab_Speicher	Strombedarf Elektroerinsatz BWW-Speicher
EZ104	E_PVT	Stromproduktion PVT-Anlage
Temperaturfühler		
PT1 – PT3	T_PVT	Temperatur PVT Anfang, Mitte, Ende
PT4 – PT15	T_Fund_11- T_Fund_34	Temperaturen Fundamentplatte
PT16 – PT21	T_Erdreich_201 - T_Erdreich_305	Temperaturen Erdreich unter der Fundamentplatte
PT22 – PT 24	T_Erdreich_401_ung - T_Erdreich_405_ung	Temperaturen Erdreich neben der Fundamentplatte
PT25	T_WT_Solar_In	Temperatur Wärmetauscher Ein
PT26	T_WT_Solar_Out	Temperatur Wärmetauscher Aus
PT27	T_WRG_WP_low	Temperatur WRG-Speicher unten
PT28	T_WRG_WP_top	Temperatur WRG-Speicher oben
PT29	T_Speiche_mid_low	Temperatur Pufferspeicher unten
PT30	T_Speicher_low	Temperatur Pufferspeicher zuunterst
PT31	T_Speicher_mid_top	Temperatur Pufferspeicher oben
PT32	T_Speicher_top	Temperatur Pufferspeicher zuoberst
PT33	T_amb	Temperatur Aussenluft
Globalstrahlung		
SMP	Globalstrahlung	Pyranometer



8.2 Betriebsmodi

Status 1
Free-Cooling
TABS, PVT,
TABS + PVT

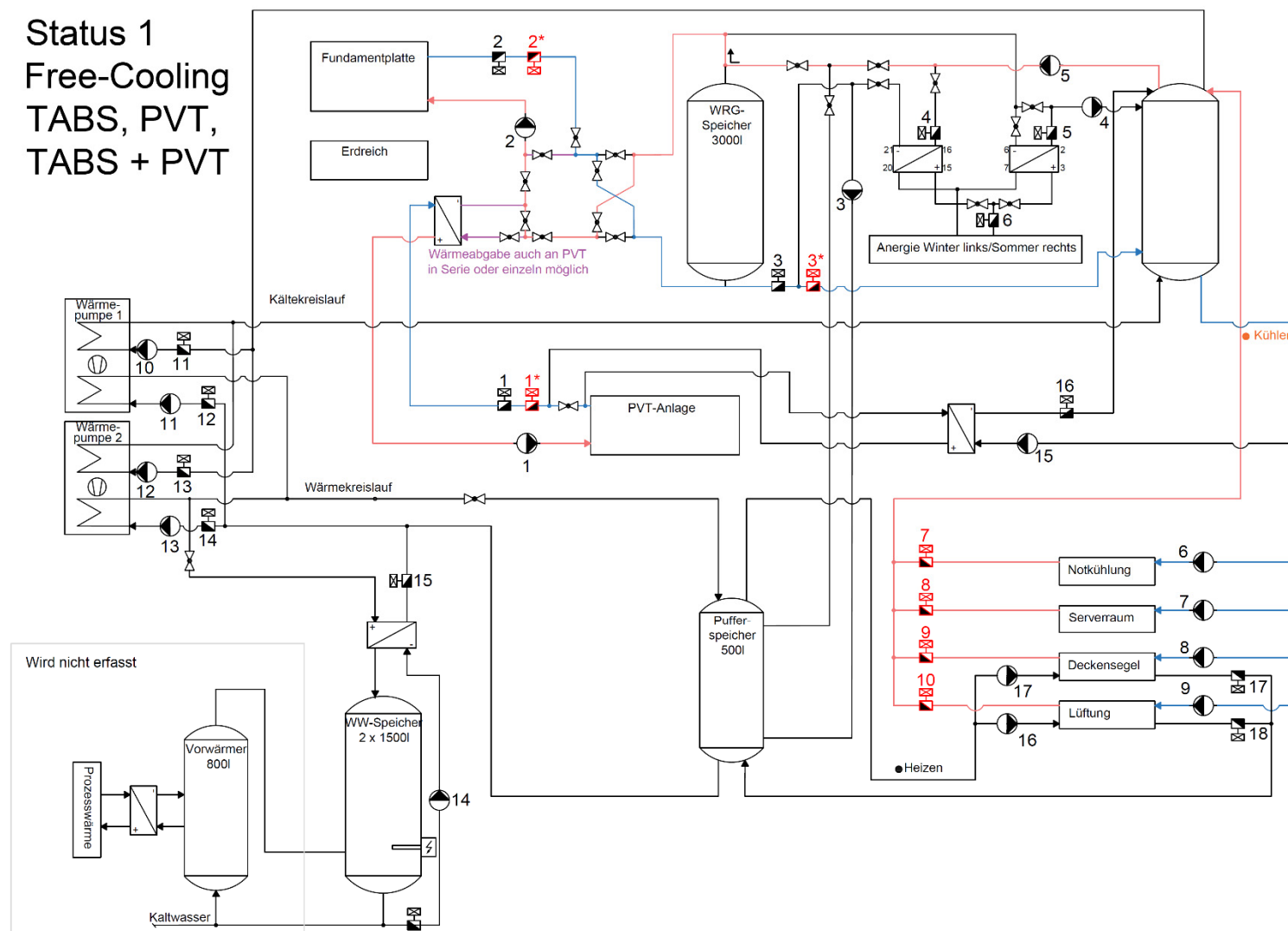


Abbildung 34: Die Fundamentplatte und die PVT-Anlage können das Gebäude auch ohne WP kühlen. Vorausgesetzt, dass die Vorlauftemperaturen tief genug sind.



Status 2
Kälteanforderung
WP ein,
Wärme an Puffer-
oder BWW-Speicher

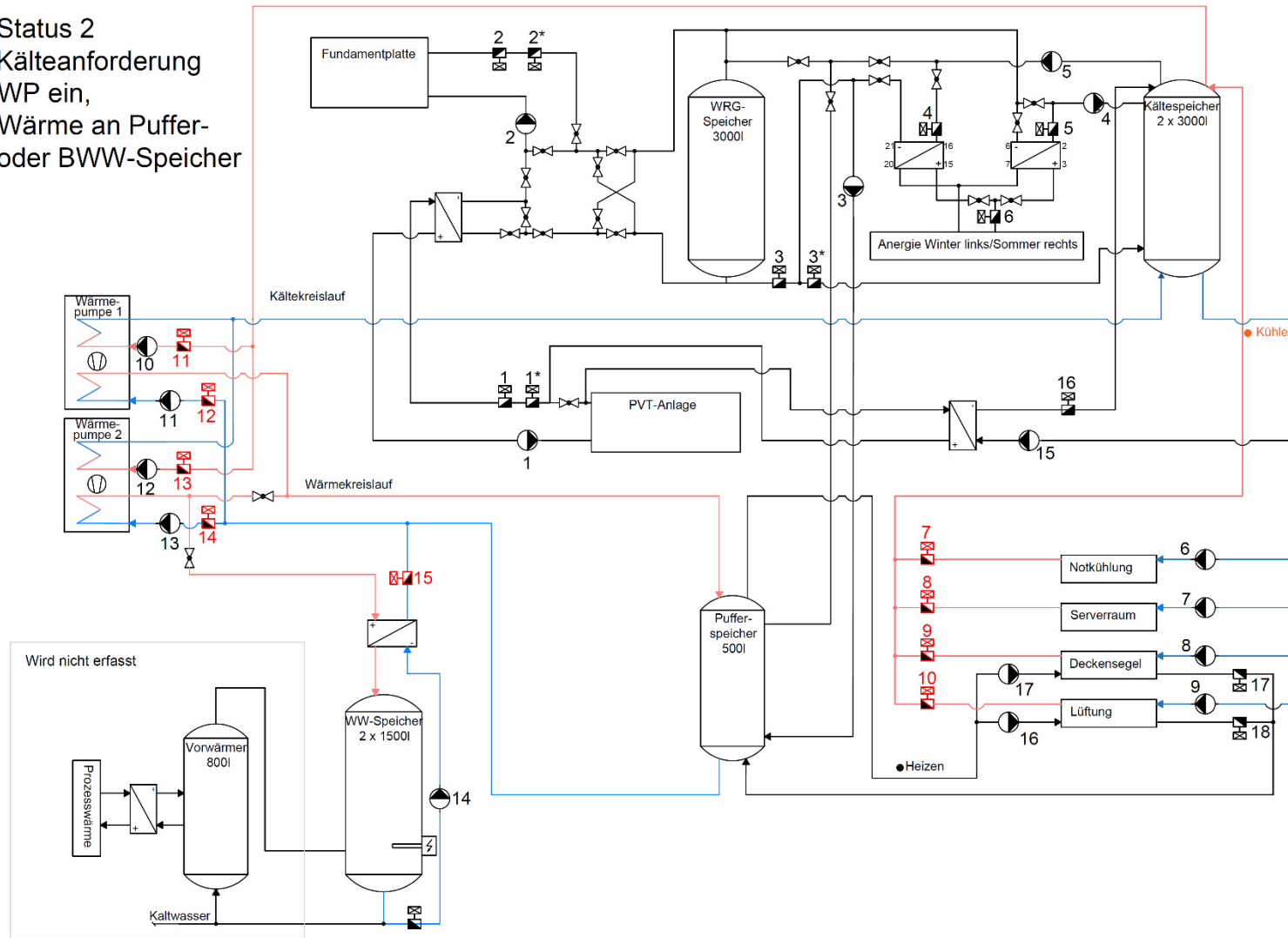


Abbildung 35: Die Wärmepumpen geben die produzierte Abwärme an den Heisspeicher und/oder an den BWW-Speicher ab



Oblamatik AG

Status 3
Kälteanforderung
WP ein,
Wärme an Funda-
mentplatte

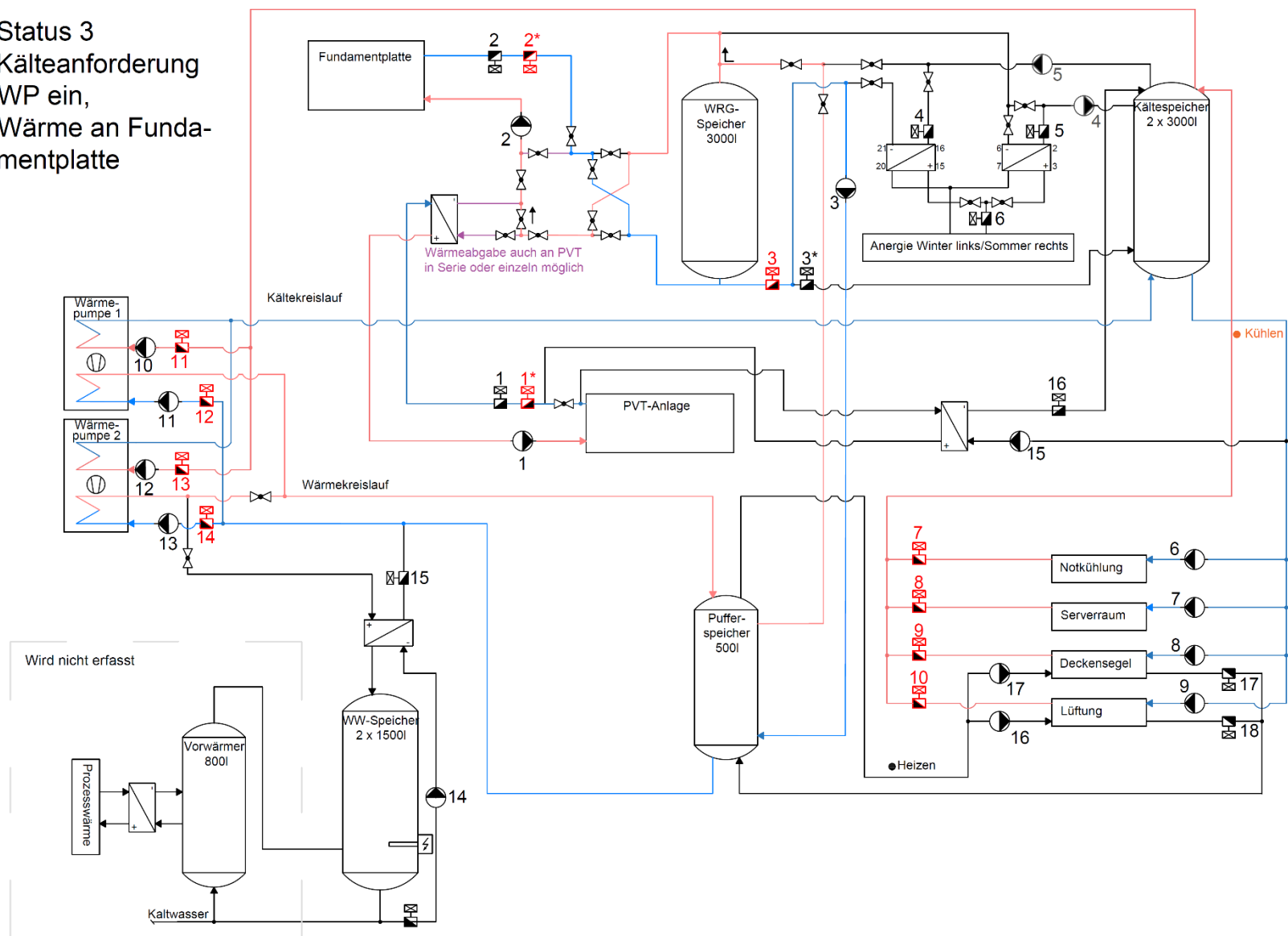


Abbildung 36: Die Abwärme der Wärmepumpen wird über den Pufferspeicher weiter an die Fundamentplatte abgegeben. Die PVT-Anlage kann ebenfalls genutzt werden.



Status 4
Kälteanforderung
WP aus,
Kältebezug von
Grundwasser

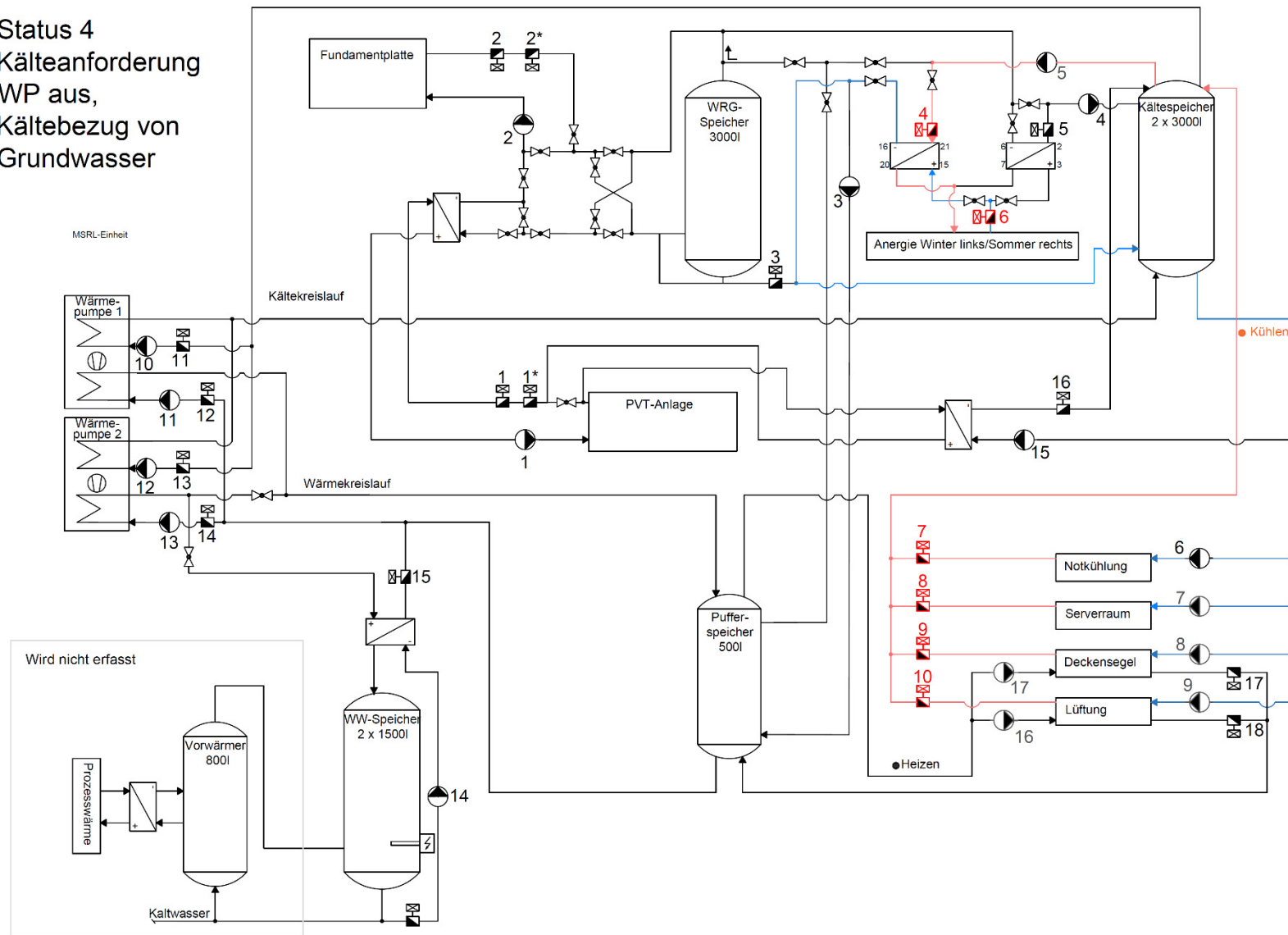


Abbildung 37: Ist die Fundamentplattentemperatur bei 31 °C, wird das Anergienetz genutzt, um das Gebäude zu kühlen.



Status 11
Wärmeanforderung
WP ein
Kälteabgabe an
Kältespeicher

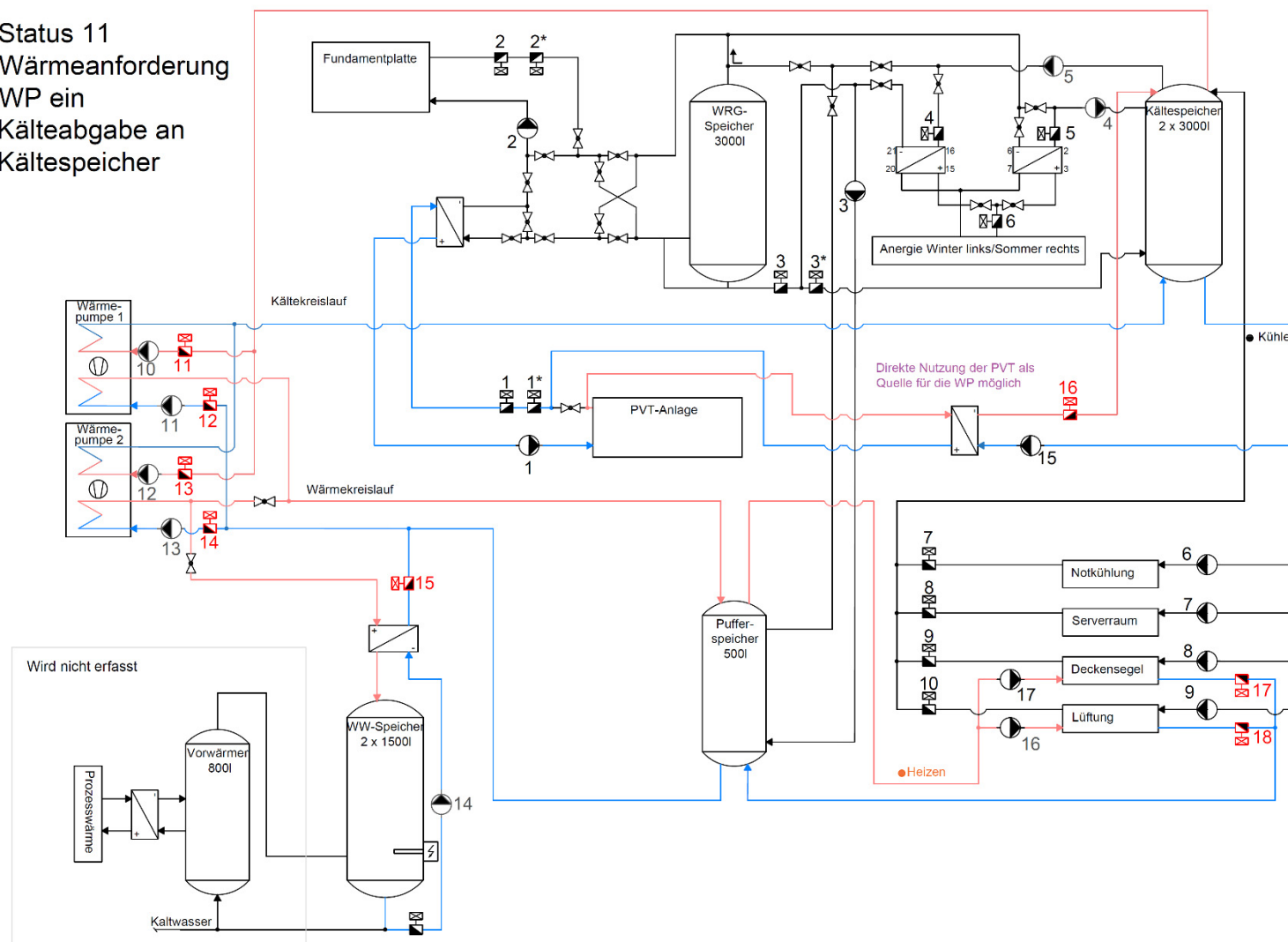


Abbildung 38: Bei Heiz- oder WW-Bedarf, kann der Kältespeicher als Quelle für die WP genutzt werden. Auch die PVT-Anlage kann hierbei genutzt werden.



Status 12
Wärmeanforderung
WP ein
Kälteabgabe an
Fundament

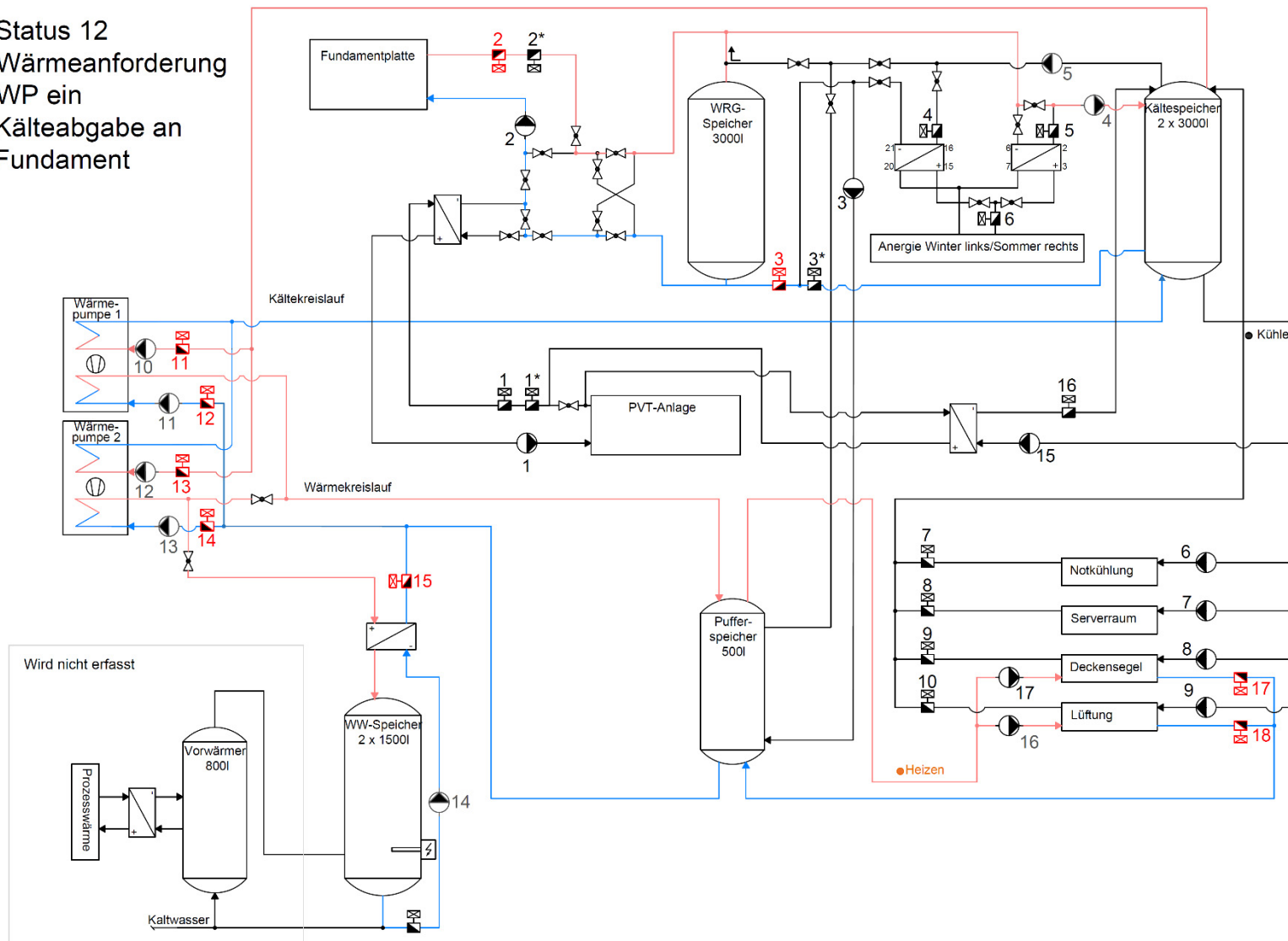


Abbildung 39: Bei Heiz- und/oder WW-Bedarf wird die Fundamentplatte als Quelle genutzt.



Oblamatik AG

Status 13
Wärmeanforderung
WP ein
Kälteabgabe an
Fundament und
Anergienetz

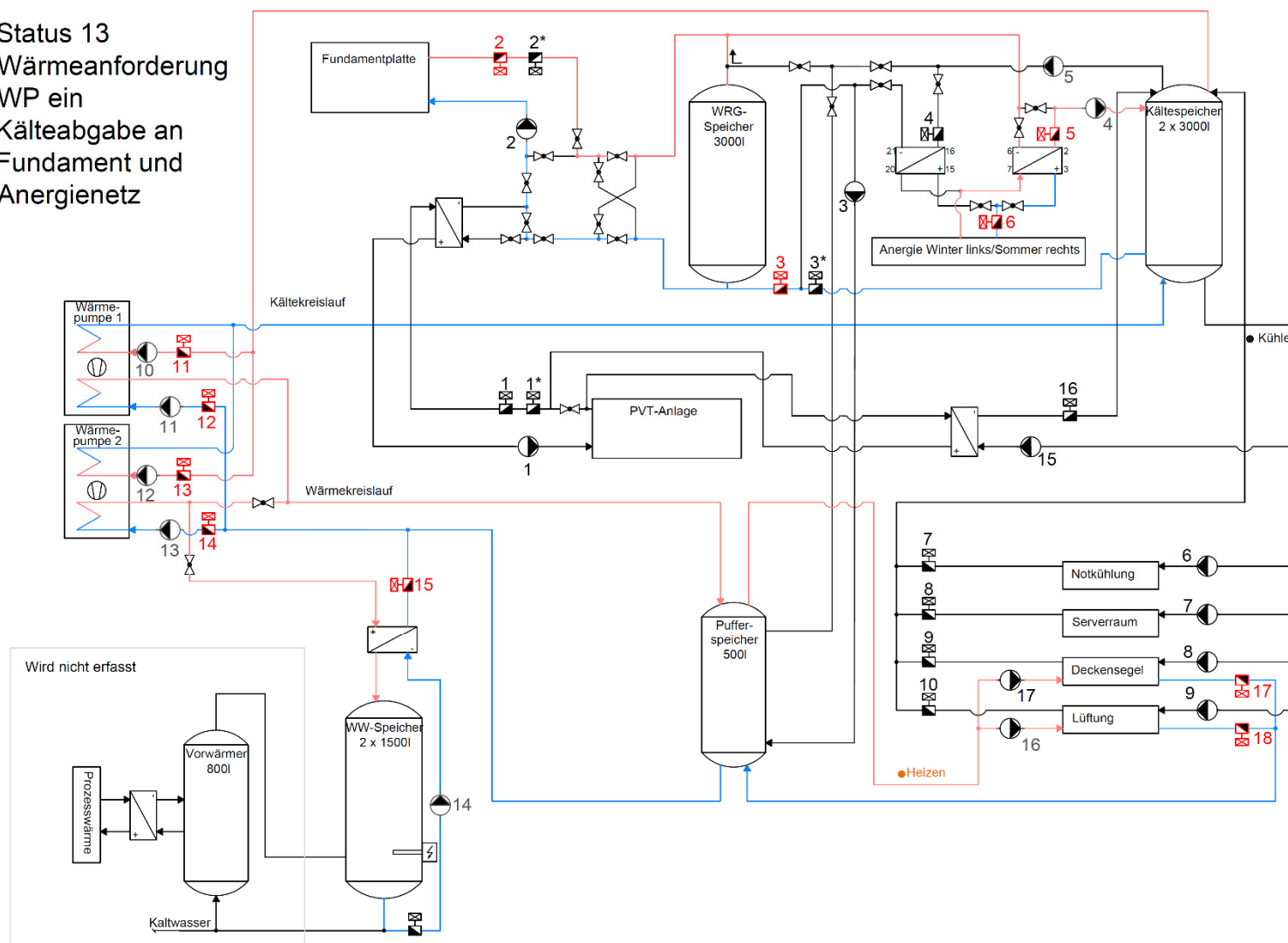


Abbildung 40: Ist die Fundamentplattentemperatur zwischen 1 °C und 1.5 °C, wird das Anergienetz hinzugeschaltet



Status 14
Wärmeanforderung
WP ein
Kälteabgabe an
Anergienetz

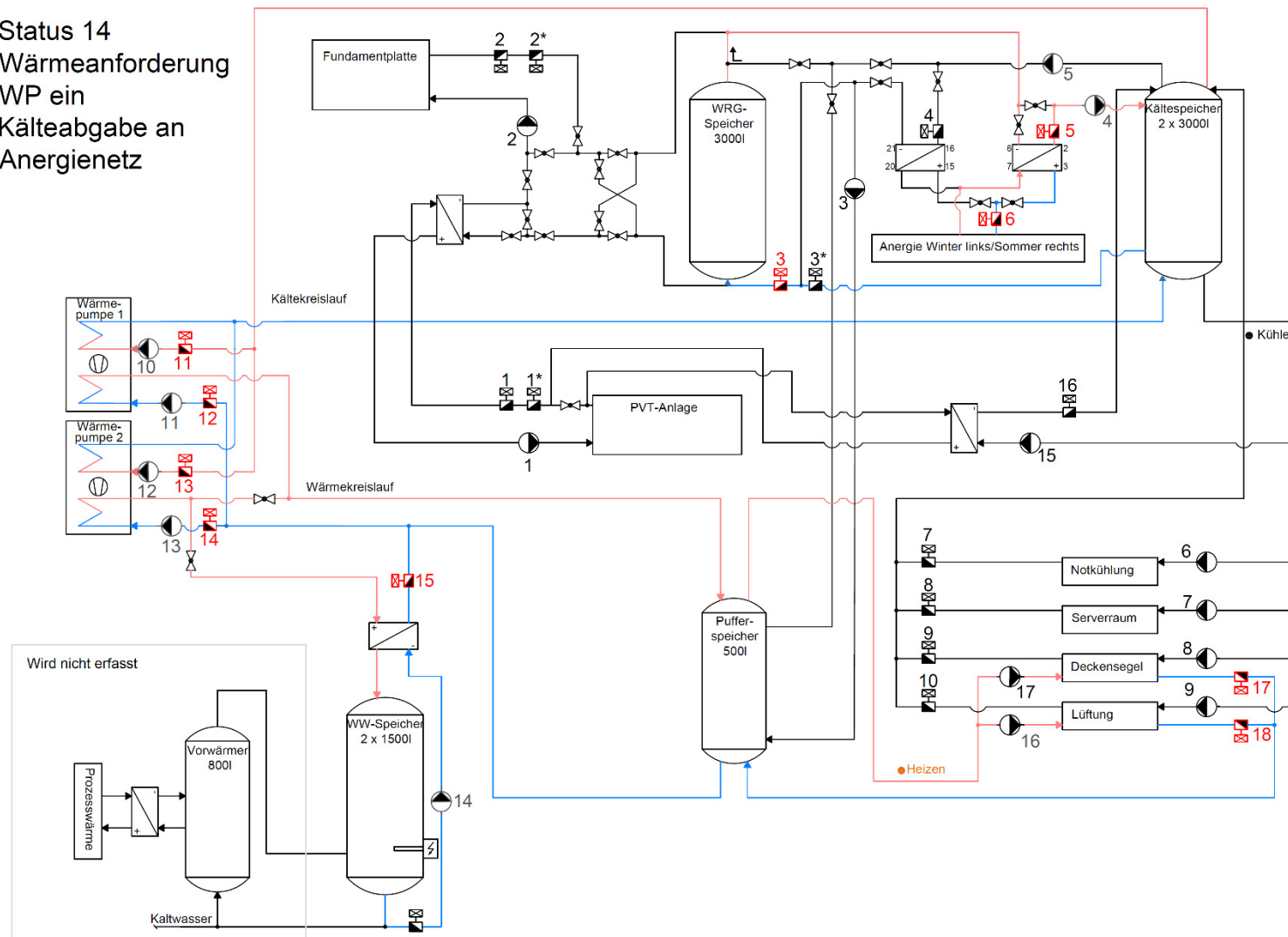


Abbildung 41: Unterschreitet die Fundamentplatte die Temperatur von 1 °C, wird nur noch das Anergienetz als Wärmequelle genutzt

8.3 Impressionen Inbetriebnahme und Installation



Abb. 1 Aushub Neubau Oblamatik AG



Abb. 2 Temperaturfühler unter der Bodenplatte

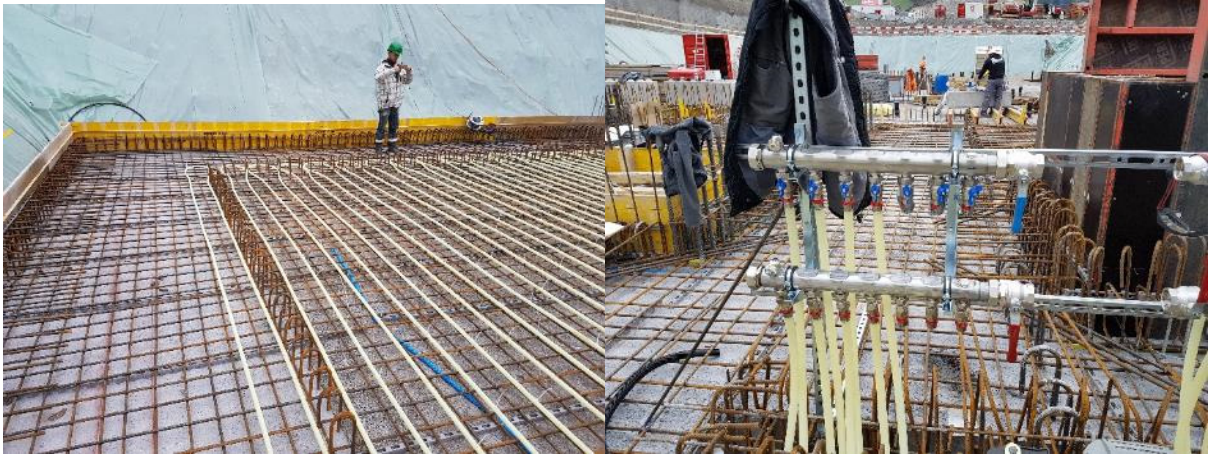


Abb. 3 Verlegung der Leitungen für die Bodenplattenaktivierung

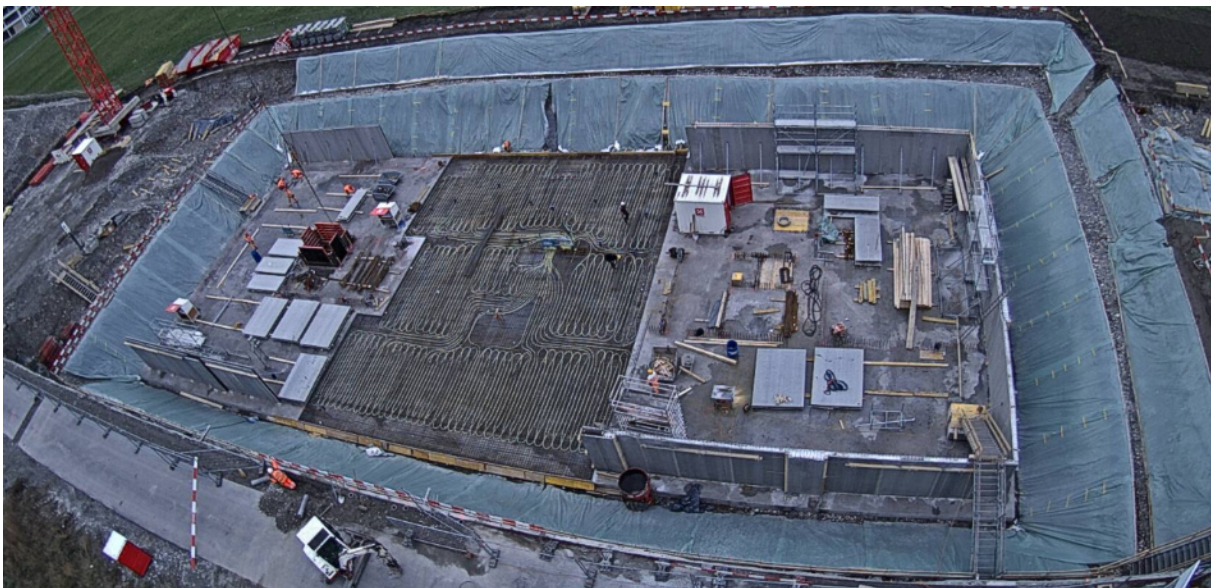


Abb. 4 Verlegung von Heizungsrohren im mittleren Teil der Fundamentplatte



Abb. 5 Stand der Baustelle Ende Oktober 2018



Abb. 6 Vorbereitung der Installationsschläuche



Abb. 7 Das Gebäude wurde im Winter mit einem Dach abgedeckt



Abb. 8 Aufständering für das PVT-Feld



Abb. 9 Fertig installierte PVT-Module



Abb. 10 Atrium auf der linken Seite und rechts Mensa



Abb. 11 Ruheraum



Abb. 12 Wasserlabor



Abbildung 42



Abbildung 43: Fitnessbereich



8.4 Regelbeschreibung

Funktionsbeschreibung

Oblamatik AG
Heizungs- und Kälteanlage

Adresse:	Oblamatik AG La-Nicca-Strasse 12, 7000 Chur
Datum:	31.3.2022
Version:	1.0
Datei:	Funktionsbeschreibung Heizungs- und Kälteanlage.docx



Kontaktdaten

Firma: Oblamatik AG
La-Nicca-Strasse 12, 7000 Chur

Kontaktpersonen

Kevin Tschann
Tel. +41 81 553 53 22
kevin.tschan@oblamatik.ch

Firma: Bouygues E&S InTec Schweiz AG
Triststrasse 3
CH-7007 Chur
Tel. +41 81 286 99 99
Fax +41 81 286 99 90
bouygues-es-intec.ch

Kontaktpersonen:

Zentrale
Tel. +41 81 286 99 99
info.intec.chur@bouygues-es.com

Robert Beer
Projektleiter
Tel. +41 81 286 20 40
robert.beer@bouygues-es.com

Patrik Ruhstaller
Tel. +41 81 286 20 34
patrik.ruhstaller@bouygues-es.com



Oblamatic AG

Inhaltsverzeichnis

1	Änderungsnachweis.....	5
3	Verbraucher.....	6
3.1	Deckensegel.....	6
3.2	Bodenheizungen.....	6
3.3	Brauchwarmwasser.....	6
4	Heizverteiler.....	6
4.1	Heizgruppe Deckensegel + Bodenheizungen.....	6
4.2	Heizgruppe Lüftungsanlagen.....	7
5	Kälteverteiler.....	7
5.1	Kältegruppe Deckensegel.....	7
5.2	Kältegruppe Lüftungsanlagen.....	7
5.3	Kältegruppe Gewerbliche Kälte.....	8
5.4	Kältegruppe Serverräume.....	8
6	Heizspeicher.....	8
6.1	Während Heizperiode.....	8
6.2	Während Kühlperiode.....	8
7	Kältespeicher.....	8
7.1	Während Heizperiode.....	8
7.2	Während Kühlperiode.....	8
8	Erzeugung.....	9
8.1	Wärmepumpen allgemein.....	9
8.2	Wärmepumpe 1 (Brauchwarmwasser).....	9
8.3	Wärmepumpe 2.....	9
8.4	Freecooling (State 1).....	9
8.4.1	Freecooling Allgemein.....	9
8.4.2	TABS.....	9
8.4.3	PVT + TABS.....	9
8.4.4	PVT.....	9
8.5	Anergie Kühlung (State 4).....	9
9	Wärmequellen.....	10
9.1	Wärmequellen Allgemein.....	10
9.2	Kältespeicher (State 11).....	10
9.3	TABS (State 12).....	10
9.4	PVT.....	10
9.5	TABS + Anergie (State 13).....	10
9.6	Anergie (State 14).....	10
10	Wärmesenken.....	10
10.1	Wärmesenken Allgemein.....	10
10.2	Heizspeicher (State 2).....	10
10.3	TABS (State 3).....	10
10.4	PVT.....	10
11	Regeneration.....	11
11.1	Regeneration Allgemein.....	11
11.2	Wärmeregeneration.....	11
11.2.1	Ohne WP.....	11
11.2.2	Mit WP.....	11
11.2.3	Kältespeicher.....	11



11.3	Kälteregeneration	11
11.3.1	Ohne WP.....	11
11.3.2	Mit WP.....	11
11.4	Regenerationssperren	12
11.4.1	Regenerationssperren Allgemein	12
11.4.2	Wärme.....	12
11.4.3	Kälte.....	12
12	Perioden	12
12.1	Perioden Allgemein	12
12.2	Heizperiode.....	12
12.3	Kühlperiode.....	12
12.4	Temperatur Erdreich über das Jahr 2021	13
12.5	Temperatur Fundamentplatte (TABS) über das Jahr 2021	13
13	Beschattung.....	13
13.1	Beschattung Allgemein.....	13



Oblamatik AG

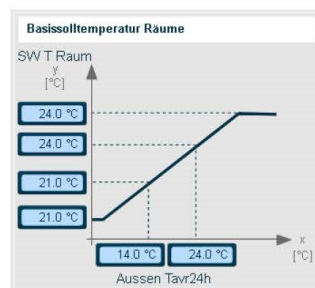
1 Änderungsnachweis

Version	Datum	Beschreibung	Person
1.0	31.03.2022	Dokumentation erstellt	P. Ruhstaller

3 Verbraucher

3.1 Deckensegel

Für die Räume wird eine saisonale Solltemperatur anhand der mittleren Aussentemperatur berechnet.



Die Benutzer können diesen Basissollwert, im Raum über den Tastensollwertgeber, um +/- 1K, in je 3 Schritten, korrigieren

Je nach Sollwertabweichung öffnet das Heiz- oder Kühlventil dessen Raums. Die Ein- Ausschalthysterese beträgt 0.5K (Es kann ganzjährig geheizt oder gekühlt werden.)

3.2 Bodenheizungen

Räume mit Bodenheizungen werden vom Oblamatik eigenen Regulierungssystem gesteuert. Dieses bekommt von unserem System eine Heiz- oder Kühlanforderung, sowie den Sollwert.

3.3 Brauchwarmwasser

Das Brauchwarmwasser wird über die WP 1 oder im Notfall über einen Elektroheizeinsatz bereitgestellt. Bei tiefen Aussentemperaturen, vor allem am Morgen, reicht die Leistung einer WP nicht aus, um die Räume zu heizen. Darum wird die WP 1 während dieser Zeit zur BWW-Produktion gesperrt und der Brauchwarmwasser Einschaltwert reduziert. Sinkt die Brauchwarmwassertemperatur unter den reduzierten Wert, übernimmt der Elektroheizeinsatz.

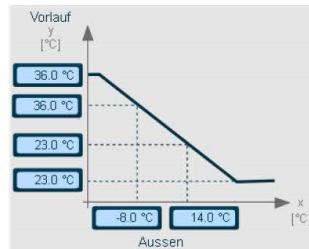
4 Heizverteiler

4.1 Heizgruppe Deckensegel + Bodenheizungen

Öffnen sich die Heizventile der Räume in genügender Anzahl, geht diese HG in Betrieb. Die Heizkurve ist wie folgt eingestellt:

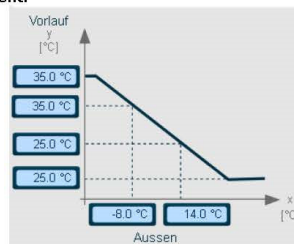


Oblamatik AG



4.2 Heizgruppe Lüftungsanlagen

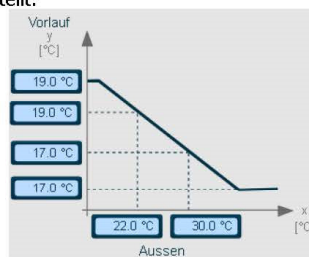
Diese HG geht in Betrieb, wenn eine Lüftungsanlage Wärme anfordert. Die Heizkurve ist wie folgt eingestellt:



5 Kälteverteiler

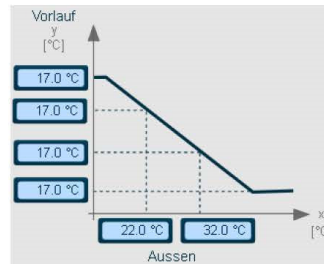
5.1 Kältegruppe Decksegel

Öffnen sich die Kühlventile der Räume in genügender Anzahl, geht diese KG in Betrieb. Die Kühlkurve ist wie folgt eingestellt:



5.2 Kältegruppe Lüftungsanlagen

Diese KG geht in Betrieb, wenn eine Lüftungsanlage Kälte anfordert. Die Kühlkurve ist wie folgt eingestellt:



5.3 Kältegruppe Gewerbliche Kälte

Meldet die Gewerbliche Kälteanlage eine Kälteanforderung, so geht diese KG in Betrieb. Die VL T wird fix auf 30°C reguliert.

5.4 Kältegruppe Serverräume

Diese Kältegruppe ist immer in Betrieb. Die VL T wird fix auf 20°C reguliert.

6 Heizspeicher

6.1 Während Heizperiode

Während der Heizperiode wird anhand des Ladezustandes des Heizspeichers die Leistung der WP bestimmt. Der Ladezustand wird auf 60% gehalten. Der Ladezustand wird anhand dem höchsten SW der aktiven HG berechnet. Sinkt der Ladezustand unter 25%, wird die zweite WP angefordert. Ist der Ladezustand grösser als 85% wird die zweite WP wieder abgeworfen.

6.2 Während Kühlperiode

Während der Kühlperiode dient der Heizspeicher als Wärmesenke, er wird bis auf 40°C überladen.

7 Kältespeicher

7.1 Während Heizperiode

Während der Heizperiode dient der Kältespeicher als Wärmequelle.

7.2 Während Kühlperiode

Während der Kühlperiode wird anhand des Ladezustandes des Kältespeichers die Leistung der WP bestimmt. Der Ladezustand wird auf 60% gehalten. Der Ladezustand wird anhand dem tiefsten SW der aktiven KG berechnet. Sinkt der Ladezustand unter 25%, wird die zweite WP angefordert. Ist der Ladezustand grösser als 85% wird die zweite WP wieder abgeworfen.



8 Erzeugung

8.1 Wärmepumpen allgemein

Die Leistung der WP kann beeinflusst werden. Die Verdampfer- und Kondensatorenpumpen werden von der Maschinensteuerungen dT reguliert. Transportpumpen werden diesen Volumenströmen nachgeführt. Die Verdampfereintrittstemperatur wird auf 19°C gehalten. Die Verdampferaustrittstemperatur wird über die Leistungsvorgabe auf -3°C begrenzt.

Die Pausezeit beträgt mind. 7min. Die Betriebszeiten der beiden WP werden ausgeglichen.

8.2 Wärmepumpe 1 (Brauchwarmwasser)

WP 1 wird für das BWW und für das Heizen/Kühlen gebraucht. Normalerweise hat die BWW-Produktion Vorrang, jedoch wird, wie oben beschrieben, ab AT unter 1°C von 0 Uhr bis 13:30 Uhr die BWW-Produktion unterdrückt.

8.3 Wärmepumpe 2

WP 2 wird nur für das Heizen und Kühlen verwendet.

8.4 Freecooling (State 1)

8.4.1 Freecooling Allgemein

Im Frühjahr nachdem im Winter das Erdreich und die Fundamentplatte (TABS) entladen wurde, besteht die Möglichkeit das Gebäude ohne WP zu kühlen. Kältere Nächte können ebenfalls zur Kühlung des Kältespeichers über die PVT genutzt werden.

8.4.2 TABS

ein	$T_{TABS} < SW T_{VLmin} - 2K$
aus	$T_{TABS} > SW T_{VLmin} - 1K$

8.4.3 PVT + TABS

ein	$T_{PVT} < SW T_{VLmin} - 4K$
aus	$T_{PVT} > SW T_{VLmin} - 3K$

8.4.4 PVT

ein	$T_{PVT} < T_{KSpeicherOben} - 4K$
aus	$T_{PVT} > T_{KSpeicherOben} - 3K$

8.5 Anergie Kühlung (State 4)

Ist die Fundamentplatte stark aufgeheizt (August, September) wird Kälte vom Anergienetz der IBC Chur bezogen. Die WP werden ausgeschaltet. Dies soll vermieden werden.

ein	$T_{TABS} > 31^{\circ}C$
aus	$T_{TABS} < 29^{\circ}C$



9 Wärmequellen

9.1 Wärmequellen Allgemein

Den WP stehen nachfolgende Wärmequellen und evtl. deren Kombinationen zur Verfügung.

9.2 Kältespeicher (State 11)

ein	$T_{\text{Kältespeicher}} > 6^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{\text{Kältespeicher}} < 4^{\circ}\text{C}$

9.3 TABS (State 12)

ein	$T_{\text{TABS}} > 2.5^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{\text{TABS}} < 1.5^{\circ}\text{C}$

9.4 PVT

Siehe Kapitel Regeneration

9.5 TABS + Anergie (State 13)

Dies ist ein Mischbetrieb, wenn die Bedingung für State 12 nicht mehr und die Bedingung für State 14 noch nicht erfüllt ist.

ein	$1.0^{\circ}\text{C} < T_{\text{TABS}} < 1.5^{\circ}\text{C}$
-----	---

9.6 Anergie (State 14)

ein	$T_{\text{TABS}} < 1.0^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{\text{TABS}} > 2.5^{\circ}\text{C}$

10 Wärmesenken

10.1 Wärmesenken Allgemein

Während der Kühlperiode können die WP die überschüssige Wärme an folgende Senken abgeben.

10.2 Heizspeicher (State 2)

ein	$T_{\text{HSpOben}} < 38^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{\text{HSpUnten}} > 40^{\circ}\text{C}$

10.3 TABS (State 3)

ein	$T_{\text{HSpUnten}} > 40^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{\text{TABS}} > 31^{\circ}\text{C}$

10.4 PVT

Siehe Kapitel Regeneration



11 Regeneration

11.1 Regeneration Allgemein

Das Erdreich kann per PVT aufgeheizt oder gekühlt werden. Dies ist auch während dem WP-Betrieb möglich.

11.2 Wärmeregeneration

11.2.1 Ohne WP

ein	$T_{PVT} > T_{TABS} + 4K$
aus	$T_{PVT} < T_{TABS} + 3K$
AND	
ein	$T_{TABS} < 29.0^{\circ}C$
aus	$T_{TABS} > 31.0^{\circ}C$

11.2.2 Mit WP

ein	$T_{PVT} > T_{EintrittTABS} + 5K$
aus	$T_{PVT} < T_{EintrittTABS} + 3K$

11.2.3 Kältespeicher

Der Kreislauf zwischen Kältespeicher und PVT wird unabhängig, ob eine WP läuft oder nicht, während der Heizperiode und die Regenerationssperre nicht aktiv ist, wie folgt betrieben:

ein	$T_{KSpUnten} < T_{PVT} - 3K$
aus	$T_{KSpUnten} > T_{PVT} - 2K$
AND	
ein	$T_{PVT} < T_{TABS} - 1K$
aus	$T_{PVT} > T_{TABS} - 0K$

11.3 Kälteregeneration

11.3.1 Ohne WP

ein	$T_{PVT} < T_{TABS} - 2.5K$ AND
ein	$T_{TABS} > 7^{\circ}C$
aus	$T_{PVT} < T_{TABS} - 1.5K$ OR
aus	$T_{TABS} < 5.5^{\circ}C$

11.3.2 Mit WP

ein	$T_{PVT} < T_{Kältespeicher} - 4K$
aus	$T_{PVT} < T_{Kältespeicher} - 2K$



11.4 Regenerationssperren

11.4.1 Regenerationssperren Allgemein

Um zum Start einer anderen Periode den maximal konditionierbaren Zustand des Erdreiches zu erreichen, werden die Regenerationen gestoppt.

11.4.2 Wärme

Ab März bis Juli wird keine zusätzliche Wärme dem Erdreich zugeführt, wenn:

ein	$T_{TABS} > 7.0^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{TABS} < 6.0^{\circ}\text{C}$

11.4.3 Kälte

Ab Oktober bis März wird dem Erdreich keine zusätzliche Wärme entzogen, wenn:

ein	$T_{TABS} < 25.0^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{TABS} > 28.0^{\circ}\text{C}$

12 Perioden

12.1 Perioden Allgemein

Man geht davon aus, dass in der Kühlperiode die Kälteleistung überwiegt und umgekehrt. Geeignete Parameter, um die Perioden automatisch zu bestimmen ist nicht ganz einfach. Aktuell wird das über Grenzwerte der gemittelten AT (24h) gemacht. Es ist aber auch denkbar das Datum einzubeziehen, weil die Minima und Maxima der mittleren Erdreichstemperatur übers Jahr sich in etwa den gleichen Zeiträumen befinden.

12.2 Heizperiode

ein	$T_{AT24h} < 12.0^{\circ}\text{C}$
aus	$T_{AT24h} > 14.0^{\circ}\text{C}$

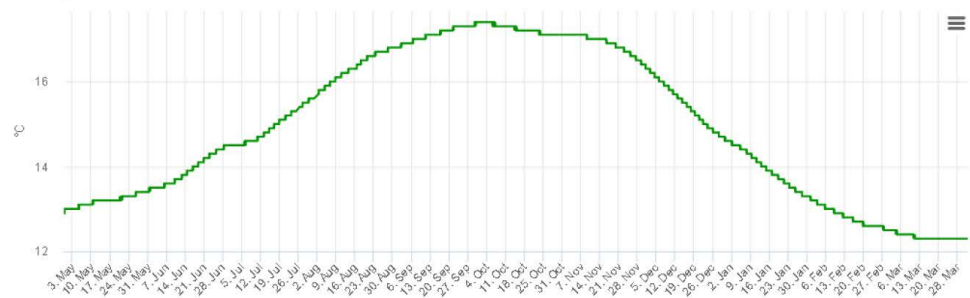
12.3 Kühlperiode

Kühlperiode ist, sobald es keine Heizperiode mehr ist.

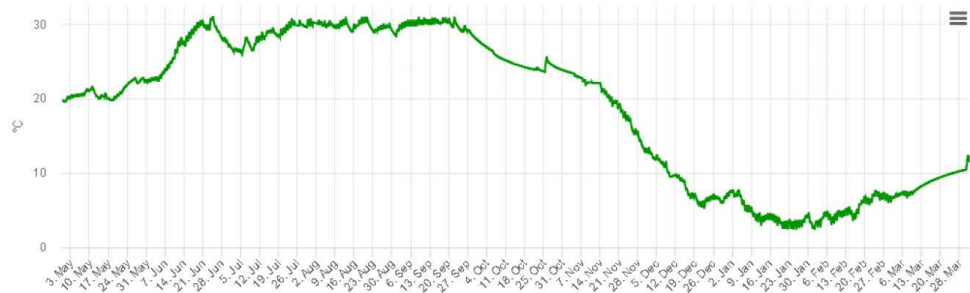


Oblamatik AG

12.4 Temperatur Erdreich über das Jahr 2021



12.5 Temperatur Fundamentplatte (TABS) über das Jahr 2021



13 Beschattung

13.1 Beschattung Allgemein

Die Markisen fahren während der Kühlperiode und der Sperrzeit der Wärmeregeneration je nach Sonneneinstrahlung selbständig herunter. Während der Heizperiode fahren diese nur herunter, wenn die Solltemperatur im Raum 3K höher ist.

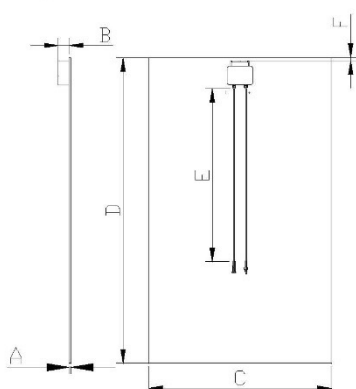
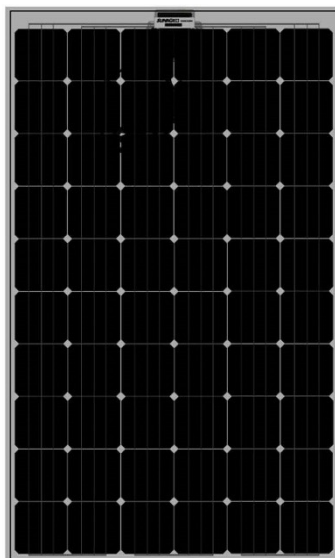


8.5 Datenblätter

8.5.1 PV-Module



SAM60/6 LAM GG BLK *Smart Generation*

Powered by **Tigo** oppure **solaredge**

Caratteristiche generali

Produttore	Sunage S.A.
Stabilimento di produzione	Sunage s.r.l.
Tipo celle	Si-monocristallino
Dimensioni	Pseudosquare 156x156mm
N° celle	60
Tipo di vetro e spessore	Vetro solare testurizzato spessore 2+2 mm
Junction box	TS4-D IP67 - Su richiesta disponibile con: Ottimizzatori Tigo TS4-S/O oppure Solaredge P400J
N° diodi di by-pass	3 di tipo Schottky
Connessioni	2 cavi da 1 mt con connettori rapidi MC4 compatibili

Garanzie

Difetti di fabbricazione	12 anni
Rendimento	Decadimento lineare $\leq 0,6\%$ /anno dal 2° anno fino a 30 anni, decadimento Iniziale $\leq 2\%$

Certificazioni

IEC 61215 Ed.2.0 - EN 61730-1 - EN 61730-2

Caratteristiche fisiche

Peso (Kg)	18,8
Carico neve (Pa)	5.400
Carico vento (Km/h)	130
Grandine	Classe G3; $\varnothing$ 25 mm; 82 Km/h
A (mm)	5
B (mm)	34
C (mm)	985
D (mm)	1.643
E (mm)	1.000
Tolleranza misure +/- 2%	

Per una corretta e sicura installazione consultare il manuale "sicurezza e installazione" Sunage

***Le specifiche elettriche sono misurate in condizioni Standard STC (1000 W/mq, 1.5 Air Mass Spectrum, temperature delle celle 25°C); il modulo di riferimento utilizzato per tarare il nostro Sun Simulator è stato calibrato dall'Università SUPSI di Lugano e la taratura è controllata giornalmente. La precisione delle misure dichiarate è funzione della tolleranza di calibrazione del modulo di riferimento e della tolleranza del nostro Sun Simulator.

Specifiche Elettriche***

Potenza nominale (Wp)	Toller. (Wmp)	Vmp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	*Coeff. α (%/°C)	*Coeff. β (%/°C)	*Coeff. γ (%/°C)	R shunt (Ohm)	R series (Ohm)
Tigo TS4-D, TS4-S, TS4-O										
SAM 60/6 280W	+4.9/-0	31.40	8.94	39.46	9.17	0.048	-0.29	-0.42	210	0.33
SAM 60/6 290W	+4.9/-0	32.24	9.00	39.74	9.49	0.049	-0.29	-0.42	215	0.33
SAM 60/6 300W	+4.9/-0	32.45	9.25	40.01	9.97	0.049	-0.29	-0.41	220	0.32
solaredge P400J										
SAM 60/6 280W	+4.9/-0	31.40	8.94	33.80	9.17	0.048	-0.29	-0.42	210	0.33
SAM 60/6 290W	+4.9/-0	32.24	9.00	33.80	9.49	0.049	-0.29	-0.42	215	0.33
SAM 60/6 300W	+4.9/-0	32.45	9.25	33.80	9.97	0.049	-0.29	-0.41	220	0.32
NOCT: 45°C±2°C - Corrente inversa Ir<15A					Temperature di esercizio: -40 °C + 85°C					
Massima tensione di sistema: 1000 V					* I coefficienti si riferiscono alla Isc, Voc e Pn					



8.5.2 Wärmepumpen



Die Wärmepumpe

Erdreich-Solewärmepumpe

Solid

| 30 kW | 40 kW | 60 kW | 100 kW |

- Hocheffizient** durch innovative **Modulationstechnologie**
- Sehr leiser Betrieb** durch schalloptimierte Gerätekonstruktion
- Aktivkühlung / Passivkühlung** (optional)
▷ optimal temperierte Räume das ganze Jahr
- Photovoltaik-Anbindung**
▷ mit Ihrer PV-Anlage kostenlosen Solarstrom nutzen





► **Ideal für Großanlagen!**

Die komfortable Großwärmepumpe aus der Baureihe Solid passt sich vollautomatisch an den Wärmebedarf Ihres Gebäudes an. Effizienter und kostensparender Betrieb garantiert. Die Solewärmepumpe Solid in kompakter Bauweise ist aufgrund ihrer hohen Heizleistung von bis zu 100 kW die ideale Lösung für großzügige Wohnbauten, Hotels und gewerblichen Bauten aller Art. Abhängig von der Umgebungstemperatur weist Ihr Gebäude einen höheren oder niedrigeren Wärmebedarf auf. Durch die innovative Modulationstechnik passt die Wärmepumpe die zu erzeugende Heizleistung vollautomatisch an. Höhere Effizienz und enorme CO₂ Einsparungen bei minimalen Energiekosten.

► Das ideale Heizsystem mit Heliotherm Wärmepumpentechnik!





Ihr Weg in die **Unabhängigkeit.**



HELIO THERM

Die Wärmepumpe

Erdreich-Solewärmepumpe

Solid

| 30 kW | 40 kW | 60 kW | 100 kW |



- Hochwertige dauerhafte Materialien
- Vollmodulierend
- dsi-Technik®
- twin-X-Technologie®



Erdreich-Solewärmepumpe Solid			30S40W-M-Solid	40S50W-M-Solid	60S80W-M-Solid	100S120W-M-Solid
Heizleistungsbereich EN14825, Vorlauftemperatur 35 °C						
B0/W35	Heizleistung	kW	30,1	40,1	58,5	91,9
	Leistungszahl	COP	5,1	4,9	4,8	5,0
B0/W34	Heizleistung	kW	26,1	34,8	52,1	77,4
	Leistungszahl	COP	5,0	5,0	5,0	5,2
B0/W30	Heizleistung	kW	16,0	21,3	32,8	48,6
	Leistungszahl	COP	5,3	5,5	5,7	6,0
B0/W27	Heizleistung	kW	10,8	14,4	19,5	29,2
	Leistungszahl	COP	5,7	5,7	6,3	6,6
B0/W24	Heizleistung	kW	7,4	9,9	16,2	24,2
	Leistungszahl	COP	5,8	5,8	6,8	6,4
SCOP* EN14825 Klimazone mittel			5,7	5,4	5,8	6,0
Schalleistung lt. EN12102		dB(A)	50	55	58	61
Max. Vorlauftemperaturen		°C	62	62	62	62
Abmessungen (H x B x T)		mm	1602 x 687 x 715	1602 x 687 x 715	1700 x 913 x 1203	1700 x 913 x 1203
Gesamtgewicht		kg	220	265	520	630
Option Kühlung Reversibel						
B10/W18 Kühlleistung / Leistungszahl		kW / EER	20,2 / 9,3	30,3 / 9,3	45,2 / 8,1	70,5 / 7,7
B10/W7 Kühlleistung / Leistungszahl		kW / EER	20,1 / 7,4	30,1 / 7,4	45,1 / 6,3	70,1 / 6,6
PV-Ready			✓	✓	✓	✓
SG-Ready			✓	✓	✓	✓
Version dreiphasig 400V			✓	✓	✓	✓
Aktivkühlung			✓	✓	✓	✓
Passivkühlung			✓	✓	✓	✓
Fernwartung			✓	✓	✓	✓

* **SCOP** (Seasonal Coefficient Of Performance)

= Die Größe der Jahresarbeitszahl ist ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Effizienz von Wärmepumpen. Sie gibt das Verhältnis aus der jährlich abgegebenen Wärmemenge für Raumheizung und Warmwasserbereitung in kWh und der dafür benötigten elektrischen Antriebsenergie in kWh an.

Inhalt urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte vorbehalten. Satz- und Druckfehler vorbehalten.
Stand Januar 2023.



Ihr zuverlässiger Heliotherm-Kompetenzpartner vor Ort



8.5.3 Deckensegel



Plafotherm® DS 320

Heiz-/Kühldeckensegel in filigraner Optik

Produktbeschreibung

Dank der offenen Bauweise sorgt dieses Metalldeckensegel für angenehmes Klima und gute Akustik in Ihren Räumen. Die großformatigen Deckenplatten können mit senkrechter oder optional mit schräger Kantung ausgeführt und frei im Raum angeordnet werden. Der Freiraum zwischen den Segeln ermöglicht eine unabhängige Befestigung von Installationen. Die Deckenplatten sind schnell montierbar und ohne den Einsatz von Werkzeug abnehmbar. Bei diesem kostengünstigen System lassen sich thermisch aktive und passive Bereiche kombinieren.

- angenehmes Raumklima durch Heizung/Kühlung über Strahlung und Konvektion
- Flexibilität durch Kombination von thermisch aktiven und passiven Bereichen
- hohe Heiz-/Kühlleistung und Schallabsorption durch offene Bauweise
- freie Gestaltungsmöglichkeiten durch individuelle Anordnung der Segel und Sichtbeton
- großformatige Deckenplatten, wahlweise mit 90° oder 65°-Aufkantung
- einfache, werkzeuglose Revisionsmöglichkeit der einzeln bedienbaren Deckenplatten
- unabhängige Installation von Leuchten und Einbauten zwischen den Deckensegeln möglich
- einfache und schnelle Montage
- kostengünstiges Deckensegel als wirtschaftliche Lösung
- hygienisch und leicht zu reinigen



Projektlösungen

Dieses Datenblatt bezieht sich auf die Standardausführung des oben genannten Produkts.

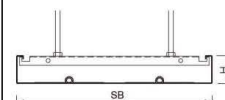
Gerne erarbeiten wir mit Ihnen die passende Lösung für Ihr Projekt. Angepasst an Ihr Bauvorhaben erhalten Sie ein komplett aufeinander abgestimmtes System. Projektspezifische Ausführungen und Anpassungen sind ergänzend aus den Angebotsunterlagen zu entnehmen.

15 Lindner SE | Heiz- und Kühldecken
Bahnhofstraße 29 | 94424 Arnstorf | Deutschland
Telefon +49 8723 20-3630
heating.cooling@Lindner-Group.com | www.Lindner-Group.com

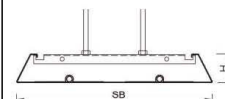
Wir behalten uns vor, sämtliche Angaben und Informationen jederzeit anzupassen oder zu ändern. Für versehentliche fehlerhafte Angaben ist die Haftung ausgeschlossen. Maßtoleranzen sind unter Einhaltung der gültigen Normen zulässig. Diese Unterlage ist durch das Urheberrecht gesetzlich geschützt. Insbesondere ist eine Bearbeitung, unzulässige Verwertung oder öffentliche Wiedergabe und Verbreitung nicht gestattet. Eine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte ist nur mit unserer Zustimmung erlaubt.

**Deckenelemente****Plafotherm® DS 320 Typ 1****90°-Aufkantung als Einzel-/Rand- oder Mittelplatte**

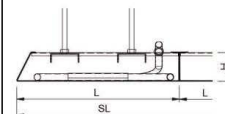
Länge (L)	500 - 3.500 mm
Breite (B)	400 - 1.250 mm
Höhe (H)	50 mm
Segellänge (SL)	variabel
Segelbreite (SB)	400 - 1.250 mm

**Plafotherm® DS 320 Typ 2****65°-Aufkantung als Einzelplatte**

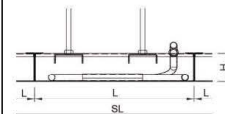
Länge (L)	500 - 3.500 mm
Breite (B)	400 - 1.250 mm
Höhe (H)	50 mm
Segelbreite (SB)	400 - 1.250 mm

**Plafotherm® DS 320 Typ 3****65°-Aufkantung als Randplatte zur stimseitigen Erweiterung**

Länge (L)	500 - 3.500 mm
Breite (B)	400 - 1.250 mm
Höhe (H)	50 mm
Segellänge (SL)	variabel
Segelbreite (SB)	400 - 1.250 mm

**Plafotherm® DS 320 Typ 4****65°-Aufkantung als Mittelplatte zur stimseitigen Erweiterung**

Länge (L)	500 - 3.500 mm
Breite (B)	400 - 1.250 mm
Höhe (H)	50 mm
Segellänge (SL)	variabel
Segelbreite (SB)	400 - 1.250 mm





Technische Daten

Material Deckenplatte	verzinktes Stahlblech
Gewicht	ca. 12 - 15 kg/m ² (ohne Auf-/Einbauten)
Revisionierbarkeit	werkzeuglos abnehmbar

Bauteilliste

1	Metaldeckenplatte	
10/15/65	Gewindestangenabhängung	
437	Heiz-/Kühlregister	
479	PlafoTube® Anschluss-/Verbindungsschlauch	
684	Verbindungsklammer	
1119	Einhängeprofil 16/320	

Akustik

Raumakustik			
äquivalente Schallabsorptionsfläche pro Deckensegel	DIN EN ISO 354		
bewerteter Schallabsorptionsgrad	DIN EN ISO 11654	α_w	0,55 - 1,00
Schallabsorberklasse	DIN EN ISO 11654		D - A
Noise Reduction Coefficient	ASTM C 423	NRC	0,55 - 1,20
Hinweis	Die Berechnung von α_w und NRC kann nur in Anlehnung durchgeführt werden und stellt deshalb lediglich einen Orientierungswert dar.		

Brandschutz

Baustoffklasse		
Baustoffklasse	DIN EN 13501-1	A2 - s1, d0
Baustoffklasse	ASTM E 84	Class A

Dauerhaftigkeit

Beanspruchungsklasse	DIN EN 13964	A
----------------------	--------------	---

3|5 Lindner SE | Heiz- und Kühldecken
Bainhofstraße 29 | 94424 Amstorf | Deutschland
Telefon +49 8723 20-3660
heating.cooling@Lindner-Group.com | www.Lindner-Group.com

Wir behalten uns vor, sämtliche Angaben und Informationen jederzeit anzupassen oder zu ändern. Für versehentliche fehlerhafte Angaben ist die Haftung ausgeschlossen. Maßtoleranzen sind unter Einhaltung der gültigen Normen zulässig. Diese Unterlage ist durch das Urheberrecht gesetzlich geschützt. Insbesondere ist eine Bearbeitung, unzulässige Verwertung oder öffentliche Wiedergabe und Verbreitung nicht gestattet. Eine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte ist nur mit unserer Zustimmung erlaubt.

cs_db_plafothem_ds_320--de | 24.0



Klimatechnik

Heizen und Kühlen

Heiz-/Kühltechnik	Plafotherm® V2A	Plafotherm® Cu
Nenn-Kühlleistung (10 K) nach EN 14240 bezogen auf die aktive Fläche	135 W/m²	139 W/m²
Nenn-Heizleistung (15 K) nach EN 14037:2003 bezogen auf die aktive Fläche	163 W/m²	167 W/m²

Kombinierbar mit

Heiz-/Kühldecken	<u>Plafotherm® DS Tabs 125</u>
------------------	--------------------------------

Nachhaltigkeit

Selbstdeklaration	Selbstdeklaration nach ISO 14021
Umweltproduktdeklaration	Verifizierte EPD nach EN 15804 / ISO 14025
Circular Economy	Cradle to Cradle Certified® Silber
Französische VOC-Verordnung	Emissionsklasse A+

Oberflächen

Pulverbeschichtungen	<u>COLOURline – Pulverbeschichtung</u> <u>MOODline – Pulverbeschichtung tiefmatt</u> <u>ARTline – Dekor-Pulverbeschichtung</u> <u>GRAPHICline – Digitaldruck</u>
Perforationen	<u>BASICline – Standardperforationen</u> <u>REGULARline – Weitere Perforationen</u>

Statik

Erdbebensicherheit	Qualifizierung gemäß AC 156/Eurocode/SIA 261
--------------------	--

Zertifizierung

CE-Kennzeichnung	Das Deckensystem ist ein harmonisiertes Bauprodukt gemäß Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (Bauproduktenverordnung) und EN 13964: Unterdecken – Anforderungen und Prüfverfahren.
TAIM e. V.	Das Deckensystem erfüllt die Anforderungen des "Technischen Handbuchs Metalldecken" (THM) des TAIM e. V. (Verband industrieller Metalldeckenhersteller).



Zusatzausstattung

Akustikeinlagen	<u>Acustica – Akustikstoffeinlage</u> <u>Insula – Mineralwolleinlage in Akustikfolie</u>
Lüftungskomponenten	<u>AirBox S – Zuluftelemente</u> <u>AirBox E – Abluftelemente</u>
Hydraulische Komponenten	<u>PlafoTube® MQC – Anschluss-/Verbindungsschlauch mit MultiQuickConnect</u> <u>Fittinge – Verteiler-System</u>
Leuchten	Lindner Leuchten und Leuchten anderer Hersteller möglich <u>IS 17 – Integrierte Einbauleuchte für Allgemeinbereiche</u> <u>IS 22 – Integrierte Einbauleuchte für Bildschirmarbeitsplätze</u> <u>QZI – Einbauleuchte mit Zellenraster</u>

Anwendungsbeispiele



5|5 Lindner SE | Heiz- und Kühldecken
Bahnhofstraße 29 | 94424 Amstorf | Deutschland
Telefon +49 8723 20-3660
heating.cooling@Lindner-Group.com | www.Lindner-Group.com

Wir behalten uns vor, sämtliche Angaben und Informationen jederzeit anzupassen oder zu ändern. Für versehentliche fehlerhafte Angaben ist die Haftung ausgeschlossen. Maßtoleranzen sind unter Einhaltung der gültigen Normen zulässig. Diese Unterlage ist durch das Urheberrecht gesetzlich geschützt. Insbesondere ist eine Bearbeitung, unzulässige Verwertung oder öffentliche Wiedergabe und Verbreitung nicht gestattet. Eine Vervielfältigung oder Weitergabe an Dritte ist nur mit unserer Zustimmung erlaubt.

cs_db_plafothem_ds_320-de | 24.0