



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 28.10.2024

---

# Sorptive Gewächshausklimatisierung mit Thermochemischem Speicher

---



Quelle: IEFE



Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



**Datum:** 28.10.2024

Ort: Winterthur

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Subventionsempfänger/innen:

ZHAW-IEFE  
Technikumstrasse 9  
8401 Winterthur

Meyer Orchideen AG  
Hanspeter Meyer  
Roswiss 537  
8602 Wangen b. Dübendorf

Schmid-Hutter AG  
Daniel Roost  
Gewerbestrasse 4  
8404 Winterthur

Autor/in:

Thomas Bergmann, ZHAW-IEFE, [thomas.bergmann@zhaw.ch](mailto:thomas.bergmann@zhaw.ch)  
Serena Danesi, ZHAW-IEFE, [serena.danesi@zhaw.ch](mailto:serena.danesi@zhaw.ch)  
Kevin Steiger, ZHAW-IEFE, [kevin.steiger@zhaw.ch](mailto:kevin.steiger@zhaw.ch)  
Raphael Baumann, ZHAW-IEFE, [raphaelnino.baumann@zhaw.ch](mailto:raphaelnino.baumann@zhaw.ch)

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, [karin.soederstroem@bfe.admin.ch](mailto:karin.soederstroem@bfe.admin.ch)  
Stephan Mathez, [stephan.mathez@bfe.admin.ch](mailto:stephan.mathez@bfe.admin.ch)

BFE-Vertragsnummer: SI/502038-01

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



## Zusammenfassung

Die Energieversorgung als Herausforderung der aktuellen Zeit ist massgeblich von der Problematik der Speicherlösungen geprägt. Die Versorgungssicherheit über die kalte Halbjahresperiode wird zum Flaschenhals, weil der Verbrauch hoch ist und die Produktion aus erneuerbaren Energien auf einem Minimum verharrt. Um eine Mangellage zu verhindern, bedarf es eines Ausbaus an Speicherlösungen.

Im Pilotprojekt wird eine, im Rahmen des Horizon2020-Projektes "H-DisNet" aufgebaute, Versuchsanlage für einen dauerhaften Betrieb automatisiert. Mit der Nutzung eines Thermochemischen Fluids (wässrige Magnesiumchlorid Lösung, TCF) werden Pflanztische eines 600m<sup>2</sup> grossen Gewächshauses der Meyer Orchideen AG geheizt und gekühlt. In dieser erfolgreich umgesetzten Anwendung eines neuartigen Energieversorgungssystems (Thermochemisches Netzwerk, TCN) kann das TCF auch als saisonaler Speicher fungieren, eine entsprechende Anwendung wurde simuliert.

Das Entfeuchten der Luft mittels TCF reduziert Lüftungsverluste. Durch eine Lokalklimatisierung der Pflanztische wird eine weitere Reduktion des Heiz- und Kühlauwandes erzielt. Der Kühlauwand wird mit adiabater Kühlung und Entfeuchtung durch TCF auf einem höheren Temperaturniveau nötig, als dies Konventionell der Fall ist. In Vorversuchen konnte dabei eine Einsparung und Verschiebung des Aufwandes für Heizwärme von knapp 80% nachgewiesen werden. Die elektrische Einsparung wurde auf knapp 5% voranschlagt.

Ein Lösungstransportsystems mit entsprechenden Niveauüberwachungen wurde umgesetzt. Ein Sicherheitsüberwachungssystem verhindert Überhitzung und Unterkühlung der Pflanztische sowie Lösungsaustritt und Fehlfunktionen der Apparate. Die Programmierung der SPS-Steuerung wurde im Rahmen des Projektes entwickelt.

Im Sommer werden die Pflanztische zusätzlich über Verdunstungskühlung klimatisiert. Diese kann selbst bei hohen Lufttemperaturen und intensiver Sonneneinstrahlung den gewünschten Kühleffekt erreichen.

Vom Januar 2023 bis Mai 2024 konnte die Sorptionsanlage im Dauerbetrieb erprobt werden. Im Auswertungszeitraum von einem Jahr konnten eine direkte Energieeinsparung von 120 MWh/a ermittelt werden. Weitere 65 MWh/a werden als Lastverschiebung ausgewiesen. Eine Einsparung von mehr als 60% der Heizenergie ist damit nachgewiesen. Wird die für den Betrieb nötige TCF in einer Solarthermieanlage regeneriert ist ein Speichervolumen von 100m<sup>3</sup> nötig.

Für die Regeneration der Salzlösung werden gemäss Simulationsrechnung der Soalranlage 100 m<sup>2</sup> Kollektorfläche benötigt.

Eine Betriebskostenanalyse prognostiziert eine Amortisationszeit der Gesamtanlage (Gewächshausklimatisierung und Regeneration der Salzlösung) von rund 18 Jahren. Übliche Amortisationszeiten für Investitionen in der Pflanzenaufzucht liegen im Bereich von 7 bis 10 Jahren. Die lange Amortisationszeit resultiert auch aus den tiefen Energiegestehungspreisen der Meyer Orchideen AG.

Optimierungspotenzial bietet die zentrale Luftkonditionierung für mehrere Pflanztische. Aufgrund langer Transportwege konnte die gewünschte Lufttemperatur im Pflanzbereich nur durch nachheizen mittels Untertischheizung erreicht werden. Dies führt zu einem hohen Bedarf an elektrischer Antriebsenergie für den Luftrransport. Der gemessene Mehrverbrauch an elektrischer Energie von gut 20% gegenüber einem konventionellen Gewächshaus liesse sich damit soweit reduzieren, dass eine Ersparnis resultiert. Zu empfehlen wäre eine dezentrale Luftkonditionierung, kleinere Absorber würden die Luft direkt im Pflanzbereich konditionieren (z.B. unter den Pflanztischen).

Die Meyer Orchideen AG hat sich dafür entschieden die Anlage nicht weiter zu betreiben. Ein verändertes Nutzungsprofil des Gewächshauses sowie Mangel an technischem Support haben zu diesem Entscheid geführt.



## Résumé

L'approvisionnement en énergie, défi de l'époque actuelle, est en grande partie marqué par la problématique des solutions de stockage. La sécurité de l'approvisionnement pendant la période froide des six mois devient un goulot d'étranglement, car la consommation est élevée et la production à partir d'énergies renouvelables reste à un niveau minimum. Pour éviter une situation de pénurie, il est nécessaire de développer des solutions de stockage.

Dans le cadre du projet pilote, une installation expérimentale mise en place dans le cadre du projet Horizon2020 « H-DisNet » est automatisée pour une exploitation durable. L'utilisation d'un fluide thermochimique (solution aqueuse de chlorure de magnésium, TCF) permet de chauffer et de refroidir les tables de plantation d'une serre de 600 m<sup>2</sup> de la société Meyer Orchideen AG. Dans cette application d'un nouveau système d'approvisionnement en énergie (réseau thermochimique, TCN) mise en œuvre avec succès, le TCF peut également faire office de stockage saisonnier, une application correspondante a été simulée.

La déshumidification de l'air au moyen du TCF réduit les pertes de ventilation. La climatisation locale des tables de plantes permet de réduire encore les dépenses de chauffage et de refroidissement. Le refroidissement adiabatique et la déshumidification par TCF nécessitent un niveau de température plus élevé que la méthode conventionnelle. Des essais préliminaires ont permis de démontrer une économie et un déplacement des dépenses de chauffage de près de 80%. L'économie d'électricité a été estimée à 5%.

Un système de transport de la solution avec des contrôles de niveau correspondants a été mis en place. Un système de surveillance de sécurité empêche la surchauffe et le sous-refroidissement des tables de plantation ainsi que les fuites de solution et les dysfonctionnements des appareils. La programmation de la commande API a été développée dans le cadre du projet.

En été, les tables de plantation sont en outre climatisées par un système de refroidissement par évaporation. Celui-ci permet d'obtenir l'effet de refroidissement souhaité même lorsque la température de l'air est élevée et que le rayonnement solaire est intense.

De janvier 2023 à mai 2024, l'installation à sorption a pu être testée en fonctionnement continu. Au cours de la période d'évaluation d'un an, une économie d'énergie directe de 120 MWh/a a pu être déterminée. 65 MWh/a supplémentaires ont été comptabilisés comme report de charge. Une économie de plus de 60% de l'énergie de chauffage est ainsi démontrée. Si le TCF nécessaire au fonctionnement est régénéré dans une installation solaire thermique, un volume de stockage de 100 m<sup>3</sup> est nécessaire. Selon les calculs de simulation de l'installation de saumure, 100 m<sup>2</sup> de capteurs sont nécessaires pour la régénération de la solution saline.

Une analyse des coûts d'exploitation prévoit une durée d'amortissement de l'ensemble de l'installation (climatisation de la serre et régénération de la solution saline) d'environ 18 ans. Les durées d'amortissement habituelles pour les investissements dans la culture des plantes sont de l'ordre de 7 à 10 ans.

La longue durée d'amortissement résulte également des bas prix de production d'énergie de Meyer Orchideen AG.

Le conditionnement central de l'air pour plusieurs tables de plantation présente un potentiel d'optimisation. En raison des longs trajets de transport, la température de l'air souhaitée dans la zone de plantation ne pouvait être atteinte qu'en chauffant ultérieurement au moyen d'un chauffage sous la table. Cela entraîne un besoin élevé en énergie électrique d'entraînement pour le transport de l'air. La surconsommation d'énergie électrique mesurée, d'un peu plus de 20% par rapport à une serre conventionnelle, pourrait ainsi être réduite de manière à réaliser des économies. Il serait recommandé



de décentraliser le conditionnement de l'air, de petits absorbeurs conditionneraient l'air directement dans la zone de plantation (par ex. sous les tables de plantation).

Meyer Orchideen AG a décidé de ne pas poursuivre l'exploitation de l'installation. Un changement de profil d'utilisation de la serre ainsi qu'un manque de support technique ont conduit à cette décision.

## Summary

The current challenge of energy supply is largely characterised by the problem of storage solutions. Security of supply over the cold six-month period is becoming a bottleneck because consumption is high and production from renewable energies remains at a minimum. In order to prevent a shortage situation, an expansion of storage solutions is required.

In the pilot project, a test facility set up as part of the Horizon2020 project 'H-DisNet' is being automated for permanent operation. A thermochemical fluid (aqueous magnesium chloride solution, TCF) is used to heat and cool plant tables in a 600m<sup>2</sup> greenhouse at Meyer Orchideen AG. In this successfully implemented application of a new type of energy supply system (thermochemical network, TCN), the TCF can also function as a seasonal storage system; a corresponding application was simulated.

Dehumidifying the air using TCF reduces ventilation losses. A further reduction in heating and cooling costs is achieved by local air conditioning of the plant tables. With adiabatic cooling and dehumidification by TCF, the cooling effort is required at a higher temperature level than is conventionally the case. In preliminary tests, a saving and shift in the expenditure for heating of just under 80% could be demonstrated. The electrical savings were estimated at just under 5%.

A solution transport system with corresponding level monitoring was implemented. A safety monitoring system prevents overheating and undercooling of the plant tables as well as solution leakage and malfunctions of the equipment. The programming of the PLC control system was developed as part of the project.

In summer, the plant tables are additionally air-conditioned via evaporative cooling. This can achieve the desired cooling effect even at high air temperatures and in intense sunlight.

The sorption system was trialled in continuous operation from January 2023 to May 2024. During the evaluation period of one year, direct energy savings of 120 MWh/a were achieved. A further 65 MWh/a are reported as load shifting. A saving of more than 60% of the heating energy has thus been proven. If the TCF required for operation is regenerated in a solar thermal system, a storage volume of 100m<sup>3</sup> is required.

According to the simulation calculation of the brine system, 100 m<sup>2</sup> of collector area is required for the regeneration of the brine solution.

An operating cost analysis predicts an amortisation period for the entire system (greenhouse air conditioning and regeneration of the brine solution) of around 18 years. Typical amortisation periods for investments in plant cultivation are in the range of 7 to 10 years.

The long amortisation time is also a result of the low energy production prices of Meyer Orchideen AG.

The central air conditioning for several plant tables offers potential for optimisation. Due to long transport distances, the desired air temperature in the planting area could only be achieved by reheating using under-table heating. This leads to a high demand for electrical drive energy for air transport. The measured additional consumption of electrical energy of a good 20% compared to a conventional greenhouse could thus be reduced to such an extent that a saving would result. Decentralised air conditioning would be recommended; smaller absorbers would condition the air directly in the planting area (e.g. under the planting tables).



Meyer Orchideen AG has decided not to continue operating the system. A change in the utilisation profile of the greenhouse and a lack of technical support have led to this decision.

## Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Mit der im Projekt erfolgreich umgesetzten Anwendung eines neuartigen Energieversorgungssystems (Thermochemisches Netzwerk), welches auf einem verlustlosen Speichermedium basiert, in Verbindung mit der Klimatisierung von Gewächshäusern konnten die Vorteile der Speichertechnologie in Zusammenhang mit einer erheblichen Energieeinsparung demonstriert werden.
- Die Erfahrungen aus dem Projekt können auf andere Anwendungen, z.B. Trocknungsprozesse und Raumklimatisierung übertragen werden.
- Die Technologie ist aktuell nicht kommerziell verfügbar. Mit dem momentanen Entwicklungsstand ist die Amortisationszeit in etwa doppelt so lange wie brachenüblich.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>1</b> <b>Einleitung</b> .....	<b>10</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	10
1.2 Motivation des Projektes .....	11
1.3 Projektziele .....	11
<b>2</b> <b>Anlagenbeschrieb</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b> <b>Vorgehen und Methode</b> .....	<b>19</b>
3.1 Betriebskonzept.....	19
3.1.1 Sorptionsgestützte Klimatisierung .....	19
3.1.2 Strategien für die Prozessführung .....	20
3.2 Kiesbefeuchtungsanlage .....	22
3.3 Automatisierung.....	24
3.4 Auswertung des Anlagebetriebs.....	33
3.5 Modell für Netzwerkbetrieb.....	36
3.6 Betriebswirtschaftliche Auswertung.....	37
<b>4</b> <b>Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>39</b>
4.1 Betriebskonzept.....	39
4.2 Kiesbefeuchtungsanlage .....	43
4.3 Automatisierung.....	47
4.4 Energie und Lösungsbedarf Ergebnisse .....	52
4.5 Ergebnisse Simulation .....	58
4.6 Ergebnisse betriebswirtschaftliche Auswertung .....	60
<b>5</b> <b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>61</b>
<b>7</b> <b>Nationale und internationale Zusammenarbeit</b> .....	<b>63</b>
<b>8</b> <b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>65</b>
<b>9</b> <b>Anhang Dokumente</b> .....	<b>66</b>



## Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung
$n_A$	Anzahl möglicher Lösungswechsel
$n_{AL}$	Anzahl der Abpumpvorgänge beim Entleeren der Absorber
$T, \vartheta$	Temperatur in K resp. °C
$k$	Koeffizient
$x$	Wäschernummer
$y$	Tischnummer
$\xi$	Salzkonzentration (Massenanteil)
$\varphi$	relative Luftfeuchte
$\tau$	Zeit
$W^E$	Elektrische Energiemenge
$Q$	Wärmemenge
$q$	Spezifische Wärmemenge
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$\dot{q}$	Spezifischer Wärmestrom
$V$	Volumen
$v$	Spezifisches Volumen
$m$	Masse
$\dot{m}$	Massestrom
$A$	Fläche
$p$	Druck
Gesamt	Gesamt- Grösse-/Verbrauch von Meyer Orchideen AG
$H$	Enthalpie
$h$	Spezifische Enthalpie

### Indizes

Symbol	Beschreibung
$\Delta$	Differenz
<b>tiefgestellt:</b>	
$V_A$	Vorlauf Absorberkreislauf
$0$	Umgebungsbedingungen
$P_T$	Pflanztisch
$L_K$	Lüftungsklappen
$L_W$	Absorber
$L_A$	Lösung im Absorber
max	Maximalwert



min	Minimalwert
GH12	Gewächshaus 12 mit Sorptionsanlage
GH13	Gewächshaus 13 mit Sorptionsanlage
Reg	Regression
Des	Desorber
des	desorption
Konv	Vergleichsgrösse aus konventionellem Betrieb ohne Sorptionsanlage
K	Kollektor
R	Regeneration
El	Elektrolyt
W	Wasser
Amort.	Amortisation
<b>hochgestellt:</b>	
I	Istwert
S	Sollwert
LV	Auf der Siedeline Liquid/Vapor
RL	Rücklauf
VL	Vorlauf
KB	Kiesbefeuchtung
S	Sensibel
L	Latent

#### Abkürzungen und Summenformeln

Abkürzung	Beschreibung
IEFE	Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften
GH12	Gewächshaus 12 mit Sorptionsanlage (600m <sup>2</sup> )
IUNR	Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen
TRL	Technologie- Reifegrad
RH	relative Luftfeuchte
TCF	Thermochemisches Fluid
TCN	Thermochemisches Netzwerk



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Im Rahmen des Horizon2020-Projektes H-DisNet (grant agreement No. 695780) hat das IEFE zusammen mit Partnern aus Belgien, Deutschland, den Niederlanden und England eine neuartige Technologie für Energieversorgungsnetze im Niedertemperaturbereich entwickelt, welche auf Absorptionsprozessen beruht [1]. Bei einem solchen "Thermochemischen Netzwerk" handelt es sich um die Anwendung einer bekannten Technologie (Absorptionswärmepumpe) in einem neuen Kontext. Dieser sieht die Teilprozesse, welche traditionell als simultan ablaufender Gesamtprozess betrachtet werden, in einer sowohl räumlichen als auch zeitlichen Aufspaltung. In den Vordergrund tritt dabei das flüssige Arbeitsmittel, in dem ein "chemisches Potential" gespeichert ist, welches für die Temperaturänderung von Wärme genutzt werden kann. Dies bedeutet, dass aus Umgebungswärme Nutzwärme oder -kälte generiert werden kann, indem das chemische Potential abgebaut wird. Der wesentliche Vorteil eines solchen "Potentialträgers" im Vergleich mit herkömmlichen Wärmeträgermedien besteht darin, dass das gespeicherte Potential über beliebig lange Zeiträume verlustlos erhalten bleibt. Mit thermochemischen Energieversorgungsnetzwerken können somit regenerative Energiequellen effizienter eingebunden und Abwärmequellen, die bislang nicht ökonomisch nutzbar waren, erschlossen werden. Ein weiterer Vorteil Thermochemischer Netzwerke besteht in der hohen "Energiedichte" des Transportmediums. Vergleicht man klassische Warmwasserspeicher (bei  $\Delta T=70\text{K}$ ) mit thermochemischen Speichern, liegt die "Energiedichte" thermochemischer Speichermedien um einen Faktor 5 höher [2]. Das Einsatzspektrum Thermochemischer Netzwerke ist sehr gross und umfasst sowohl industrielle Prozesse (z.B. Trocknungsprozesse) als auch die Gebäudeklimatisierung. Vorteilhaft bei Klimatisierungsanlagen ist die Möglichkeit einer simultanen (d.h. in einem Prozessschritt realisierbaren) Einstellung von Lufttemperatur und -feuchte - darin liegt das Potential für eine neue Generation der Gebäudeklimatisierung.

Neben Grundlagenuntersuchungen zu verschiedenen Arbeitsstoffen (Stoffdatenbestimmung und Entwicklung von Stoffdatenberechnungsroutinen) sowie der Entwicklung und Konstruktion verschiedener Anlagenkomponenten hat das IEFE im Rahmen des Horizon2020-Projektes eine Anwendung für ein Thermochemisches Netzwerk zur Klimatisierung eines Gewächshauses (Grundfläche ca. 600 m<sup>2</sup>) der Meyer Orchideen AG in Wangen-Brüttisellen entwickelt und praktisch erprobt [3].

Das Klimatisierungskonzept unterscheidet sich grundlegend vom gegenwärtigen Standard, da hier nicht das gesamte Gewächshaus klimatisiert wird, sondern nur der Bereich der Pflanzen auf den Pflanztischen mit konditionierter Luft (Lufttemperatur und -feuchte sind auf das Pflanzenwachstum optimiert) versorgt wird. Dadurch kann der Energiebedarf für die Beheizung und Kühlung des Gewächshauses erheblich gesenkt werden (Verringerung der konvektiven Wärmeverluste durch Temperaturabsenkung im Gewächshaus, keine Lüftungsverluste, Verdunstungskühlung ersetzt Kühlanlagen).

Die Luftkonditionierung erfolgt in Absorptionswäschern, welche mit einer Magnesiumchloridlösung arbeiten. Durch die Einstellung des Salzgehaltes und die Temperierung der Lösung kann die Temperatur und die Feuchte der Luft exakt eingestellt werden. Hierfür wurden am IEFE spezielle Luftwässcher entwickelt und deren Performance anhand von Laborversuchen untersucht. Im Gewächshaus werden 28 Pflanztische durch 9 Absorptionswässcher mit konditionierter Luft versorgt. Die Anlage wurde Anfang 2019 in Betrieb genommen. Durch mehrere Langzeitmessungen (24 h) konnte nachgewiesen werden, dass im Heizbetrieb eine Energieeinsparung von 50 % erreicht werden kann und dass die Absorptionsanlage auch zur Kühlung erfolgreich eingesetzt werden kann (10 kW Kühlleistung pro Wässcher im Versuchsbetrieb). [4]



Das H-DisNet Projekt wurde Ende 2019 erfolgreich abgeschlossen. Zum Projektende kann anhand von praktischen Versuchen an der vom IEFE errichteten Versuchsanlage die technische Umsetzung einer Anwendung in einem realen, anwendungsrelevanten Umfeld nachgewiesen werden. [5] Gegenüber den übrigen am Projekt beteiligten Partnern, welche verschiedene praktische Anwendungen im Labor- und Technikumsmassstab realisierten, hat das IEFE mit dem in der Schweiz umgesetzten Projekt einen hohen Technologie-Reifegrad (TRL 5 bis 6) erreicht.

## 1.2 Motivation des Projektes

Für die kommerzielle Anwendung und Verbreitung der Technologie Thermochemischer Energieversorgungsnetzwerke reicht allein die Demonstration der technischen Umsetzbarkeit im Versuchsbetrieb nicht aus. Potentielle Anwender der Technologie benötigen belegbare ökonomische Kennzahlen für die Entwicklung erfolgreicher Geschäftsmodelle. Dafür fehlen jedoch noch Erfahrungen aus einer dauerhaften, kommerziellen Netzwerkanwendung.

Mit dem innerhalb des H-DisNet Projektes erreichten Umsetzungsgrad der Sorptionsgestützten Pflanztischklimatisierung in einem Gewächshaus der Meyer Pflanzkulturen AG bietet sich eine gute Ausgangslage für den Ausbau des Projektes zu einer weltweit erstmals im industriellen Massstab umgesetzten Demonstrationsanwendung eines Thermochemischen Netzwerkes. Trotz dem hohen Innovationsgrad der Technologie ist das Entwicklungsrisiko gering, da Einzelkomponenten (Luftkonditionierung im Absorptionswäscher, direkte Pflanztischklimatisierung, Regeneration des Arbeitsmittels im Verdunstungsabsorber) bereits erfolgreich umgesetzt und erprobt wurden.

## 1.3 Projektziele

Mit dem in diesem Projektantrag formulierten Vorhaben für ein Pilotprojekt soll die bestehende Versuchsanlage zunächst vollständig automatisiert und ein optimiertes Konzept für die Betriebsführung entwickelt werden. Damit kann die Anlage im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Durch die Aufzeichnung und Auswertung aller relevanten Betriebsparameter soll der Betrieb der Anlage über eine Jahresperiode vollständig dokumentiert und bewertet werden. Die Regeneration des Arbeitsmittels erfolgt dabei jedoch noch nicht über einen Netzwerkverbund, sondern direkt beim Anwender durch den Anschluss an das Heizungssystem. Für die Dimensionierung einer Netzwerkanwendung (Leitungs- und Speicherdimensionierung) fehlt eine Jahresprognose für die zu übertragenden Mengenströme, welche bisher nur auf der Basis theoretischer Modelle abgeschätzt werden kann. Nach Projektabschluss werden diese Daten mit der Auswertung der aufgezeichneten Messdaten vorliegen. Damit wird wiederum das Entwicklungsrisiko bei der Umsetzung eines leitungsgebundenen Netzwerkes (nicht Bestandteil dieses Projektes) mit der zugehörigen Einbindung von durch Abwärme und Solarthermie angetriebenen Regenerationsanlagen erheblich reduziert.



## 2 Anlagenbeschrieb

Mit der Sorptiven Gewächshausklimatisierungsanlage wird ein Gewächshaus (Nr. 12) der Meyer Orchideen AG in Wangen (b. Dübendorf) mit 28 Pflanztischen auf einer Grundfläche von über 600 m<sup>2</sup> klimatisiert. Die Orchideen in diesem Gewächshaus befinden sich im Stadium der Blütenbildung, wofür ein konstantes Raumklima mit einer Temperatur von 18 bis 22°C bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 50% und 70% benötigt wird (Abbildung 1). Der Aufbau der Gesamtanlage wird im R&I-Schema (Abbildung 2) dargestellt.

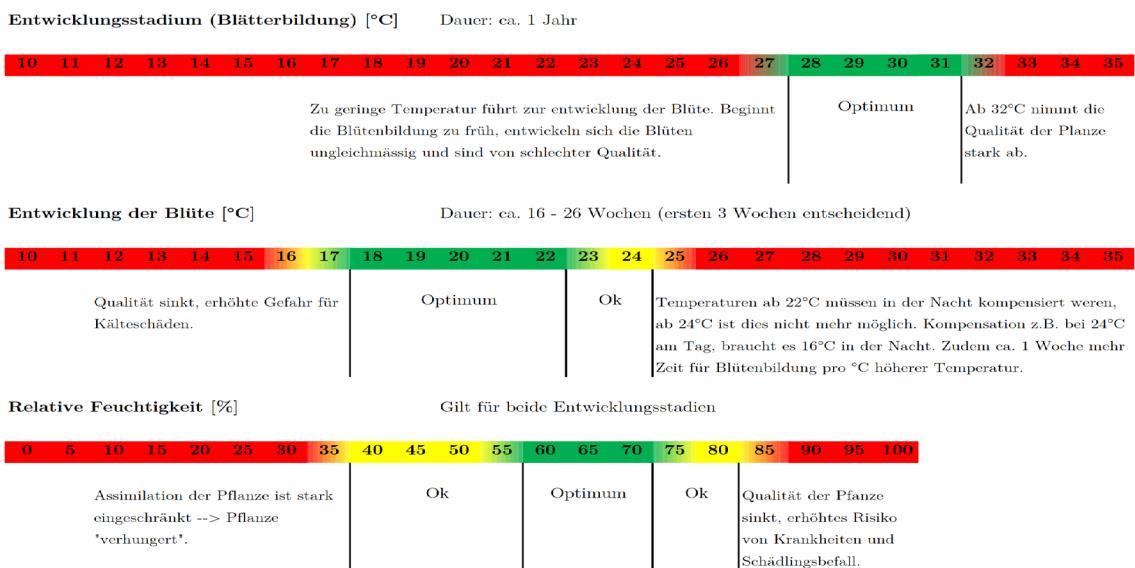


Abbildung 1: Optimale Luftkonditionen für die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Phalaenopsis. [6]

In neun Absorptionswäschen (LW1 - LW9) wird Luft, die über ein Rohrleitungssystem gleichverteilt an der Gewächshausdecke entnommen wird, durch eine temperierte Salzlösung (Thermochemisches Fluid "TCF": wässrige Magnesiumchloridlösung) konditioniert, so dass sie den o.g. Ansprüchen der Pflanzen (Temperatur und Feuchte) entspricht. Durch Ventilatoren wird die konditionierte Luft anschliessend über Rohrleitungen zu den Pflanztischen transportiert. Pro Wäscher werden so zwei bis vier Pflanztische mit konditionierter Luft versorgt.

Die Temperierung der Salzlösung erfolgt über Wärmeübertrager (W1.1 - W9.1) mit einer speziellen Beschichtung (Korrosionsschutz) durch einen Heiz- bzw. Kühlkreislauf (Absorberkreislauf), an dem alle neun Wäscher angeschlossen sind. Dieser mit Wasser als Wärmeträger betriebene Kreislauf dient einerseits dem Temperaturausgleich zwischen den Wäschen und kann darüber hinaus über die Wärmeübertrager W20.2 und W20.3 durch einen Kühlkreislauf (Grundwasserleitung) gekühlt bzw. durch einen Heizwasserkreis beheizt werden. Dabei wird die Temperatur des Absorberkreislaufs über eine Beimischregelung auf einen vorgegebenen Wert eingestellt. Die Einbindung des Heizwasserkreises am Wärmeübertrager W20.2 erfolgt ebenfalls über eine Beimischregelung, da so eine gute Stabilität der Vorlauftemperatur im Absorberkreislauf erreicht werden kann (Kaskadenregelung). Der Heizwasserkreis (Heizkreis) der gesamten Gewächshausanlage wird über Grundwasserwärmepumpen sowie über eine Holzschnitzelheizanlage versorgt.

Über die Konzentration der Salzlösung in den Absorptionswäschen kann direkt die relative Feuchte der konditionierten Luft, welche im Wäscherkopf nahezu im Phasengleichgewicht mit der Waschlösung steht, eingestellt werden. Da sich die Waschlösung im Laufe des Absorptionsbetriebes ständig mit Wasser aus der Gewächshausluft anreichert (Luftentfeuchtung), ist es notwendig, diese periodisch durch eine konzentrierte Lösung zu ersetzen. Dies erfolgt über ein Rohrleitungssystem (Schläuche), mit



dem die verdünnte Salzlösung (*TCF verdünnt*) von den Absorptionswäschern in den *Speicher S2* bzw. die im *Speicher S1* bevoorraute konzentrierte Lösung (*TCF konzentriert*) in die Absorber transportiert werden kann. Die Förderung der Salzlösung erfolgt durch Membranpumpen (*P1.2 - P9.2* und *P30.1 - P30.9*).

Die Regeneration (Aufkonzentrierung) der Salzlösung erfolgt durch einen im Batchbetrieb arbeitenden zentralen Verdunstungsapparat (Desorber: *LW10*). Der Desorber wird mit verdünnter Lösung aus dem *Speicher S2* durch ein natürliches Gefälle über das Ventil *V40.1* befüllt. Nachdem die gewünschte Lösungskonzentration (Konzentrationsbestimmung über Dichte- und Temperaturmessung: *D10.1, T10.1*) erreicht ist, wird die nun aufkonzentrierte Lösung durch Umstellung des Dreiegeventiles *V10.1* in die Vorlage für die konzentrierte Lösung (*Speicher S1*) gefördert.

Die Beheizung des Desorbers erfolgt durch einen Zwischenheizkreis (*Desorberkreislauf*), dessen Vorlauftemperatur über eine Beimischregelung eingestellt wird, über den Wärmeübertrager *W10.1*. Der *Desorberkreislauf* wird mit einem Wasser-Glykol-Gemisch als Wärmeträgermedium betrieben, da der Desorber in einem Nebengebäude untergebracht ist und deshalb die Rohrleitungstrasse frostsicher ausgeführt werden musste. Über den Wärmeübertrager *W20.1* wird der *Desorberkreislauf* durch den Heizwasserkreis (*Heizkreis*) der Gewächshausanlage mit Wärme versorgt. Die Vorlauftemperatur des Heizwasserkreises am Wärmeübertrager *W20.1* wird ebenfalls über eine Beimischregelung eingestellt, da so eine gute Stabilität der Vorlauftemperatur im *Desorberkreislauf* erreicht werden kann (Kaskadenregelung).

Mit der *Untertischheizung* ist es möglich, alle 28 Pflanztische von unten, d.h. durch eine Wärmezufuhr unterhalb der Pflanztische, zu beheizen. Die Sorptive Gewächshausklimatisierungsanlage nutzt diese *Untertischheizung* zur Kompensation der durch Wärmeverlust an die Umgebung auftretenden Temperaturänderung der konditionierten Luft auf dem Weg zwischen Absorberaustritt und Pflanzen.

Über die *Oberheizung* kann der gesamte Gewächshausraum beheizt werden. Die Heizflächen der *Oberheizung* befinden sich an der Decke des Gewächshauses oberhalb der Pflanztische sowie an der Außenfassade.

*Oberheizung* und *Untertischheizung* sind direkt in den *Heizkreis* der Gewächshausanlage eingebunden. Die Vorlauftemperatur der beiden Heizkreise wird jeweils über eine Beimischschaltung geregelt.

Bei intensiver Sonneneinstrahlung wird an der Blattoberfläche der Pflanzen mehr Strahlungsenergie absorbiert als durch die von den Absorptionswäschern zugeführte, konditionierte Luft aufgenommen werden kann. Damit die gewünschte Lufttemperatur im Bereich der Pflanzen trotzdem realisiert werden kann, wird die Oberfläche der Kiesschüttung auf den Pflanztischen periodisch mit Wasser benetzt (Kapitel 3.2), damit die überschüssige Energie durch Verdunstung abgeführt werden kann (Temperaturregelung *C0.1* bis *C0.28*).

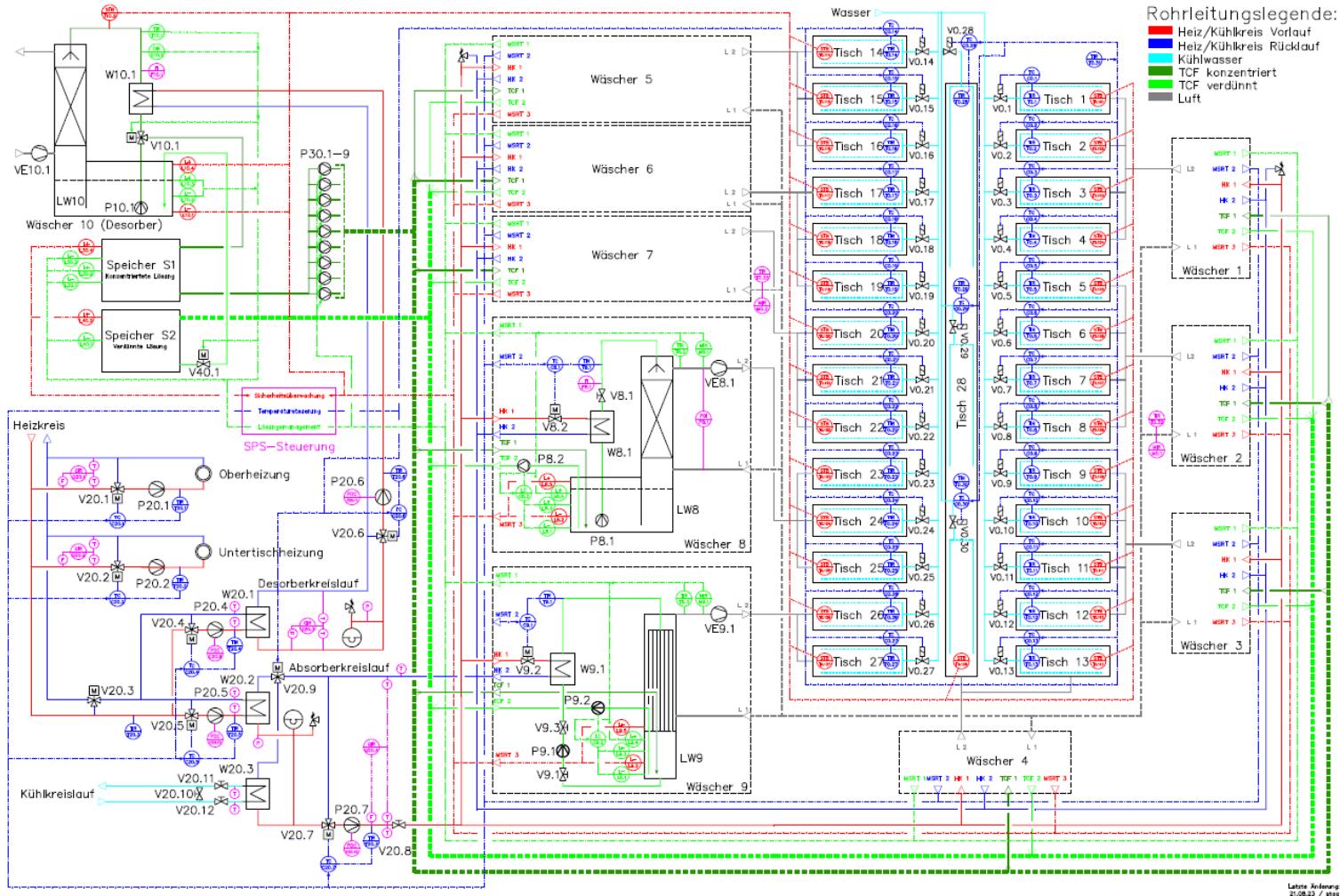


Abbildung 2: R&I-Schema



Im Folgenden werden die Hauptkomponenten der Sorptiven Gewächshausklimatisierung detailliert beschrieben:

#### Absorber (LW1 - LW9):

Die Luftkonditionierung erfolgt in Füllkörperwäsichern, welche im Unterdruck betrieben werden. Durch einen Saugzugventilator am Wäscheraustritt wird die Luft zunächst von oben über einen seitlichen Kanal in den Wäschersumpf eingeführt, gelangt danach über die Füllkörperschüttung im Gegenstrom zur herabrieselnden Salzlösung in den Wäscherkopf, passiert einen Tropfenabscheider und wird letztendlich über einen seitlichen Kanal wieder nach unten zum Ventilator geführt (Abbildung 3).

Vom Vorlagebehälter wird die Salzlösung durch eine Tauchkreiselpumpe über einen Plattenwärmeübertrager in den Wäscherkopf gefördert, wo sie durch einen Flüssigkeitsverteiler gleichmäßig über die Füllkörper verteilt wird. Die, aus der Füllkörperschüttung austretende Lösung, wird im Wäschersumpf durch aufschwimmende Füllkörper aufgefangen und fliesst an deren Oberfläche in die Lösungsvorlage. Dadurch wird eine Aerosolbildung im Wäscherkopf vermieden. Der Wäscherkopf steht vollständig im Vorlagebehälter und besitzt am Boden Auslassöffnungen für die Salzlösung. Durch diesen Siphon wird die Luft im Wäscherkopf von der Atmosphäre im Vorlagebehälter getrennt, so dass dieser atmosphärisch offen zur Gewächshausumgebung betrieben werden kann.

Zwischen Wäscherkopf und Lösungsumwälzpumpe befindet sich im Vorlagebehälter eine Trennwand, welche als Überlauf dient. Die Vorlage wird in Wäschersumpf und Pumpenvorlage aufgeteilt. Dadurch wird eine gleichmässige Durchströmung sicherstellt und das Auftreten einer heterogenen Lösungskonzentrationsverteilung wird verhindert. In der Trennwand hat es unten eine Ausgleichsbohrung, welche sicherstellt, dass beim Lösungswechsel der gesamte Vorlagebehälter leergepumpt werden kann.

Alle Lösungsberührenden Teile des Wäschers sind aus Polypropylen oder Polyvinylchlorid gefertigt. Der Wärmeübertrager besitzt auf der Lösungsseite eine Beschichtung aus Parylene.

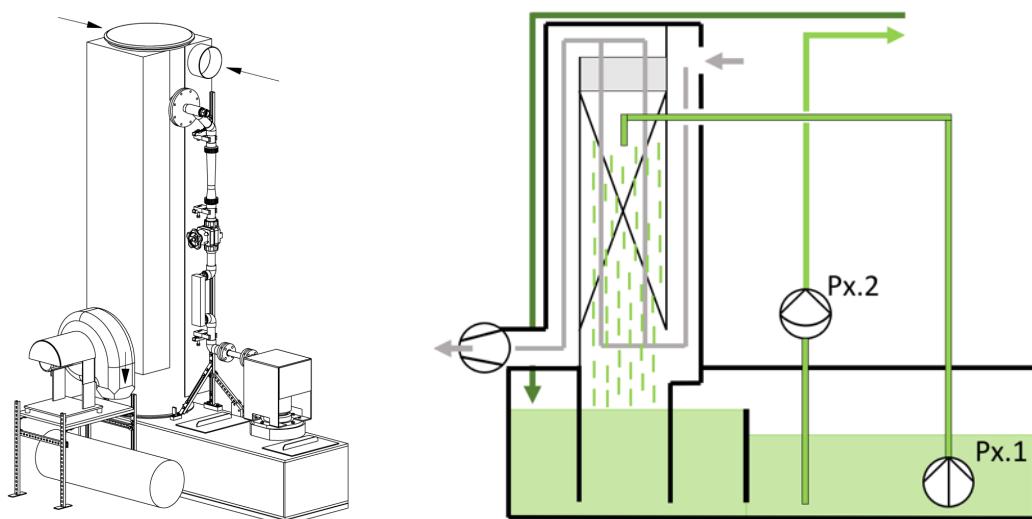


Abbildung 3: Fertigungszeichnung und Prinzipschema der Absorptionswäscher 1 bis 8.



#### Wesentliche konstruktive Merkmale und Betriebsdaten:

- Wäscherdurchmesser: 0.5 m
- Lösungsvorlage: 0.4 m<sup>3</sup>
- Füllkörperschüttung: Pall-Ring 15, 1.3 m Schütt Höhe
- Flüssigkeitsverteiler: Lochbodenverteiler
- Tropfenfänger: Demister aus Drahtgestrick
- Gasleerrohrgeschwindigkeit: 1 m/s
- Berieselungsdichte: 12 m<sup>3</sup>/(h m<sup>2</sup>)

Für die Versorgung der *Pflanztische* 26 und 27 wird momentan ein Absorptionswäscher der TU-Berlin eingesetzt (LW9), welcher sowie in seiner Funktion als auch im Aufbau erheblich von den übrigen Apparaten abweicht. Es handelt sich bei diesem Apparat um eine Spezialkonstruktion, bei der die Salzlösung an einer Gewebeoberfläche im Gegenstrom zur Luft abläuft. Die Konstruktion ist etwas aufwendiger als die Füllkörperapparate und besitzt eine geringere Luftbelastungsfähigkeit (Leerrohrgeschwindigkeit). Vorteilhaft ist hingegen die sehr geringe Berieselungsdichte, mit der dieser Wäscher betrieben werden kann.

#### Pflanztisch (Tisch 1 - 28):

Die Zufuhr der konditionierten Luft erfolgt über Verteilrohre, welche unterhalb des Pflanztisches angebracht sind und über Bohrungen die Luft gleichmäßig im Raum verteilen. Die Pflanztische sind rundum luftdicht mit Plachen eingehaust, so dass die Luft über die Tischfläche nach oben in den Bereich der Pflanzen strömt. Das seitliche Entweichen der Luft wird durch eine ca. 20 cm hohe Umrundung des gesamten Pflanztisches verhindert. Eine Kiesschüttung auf der Tischfläche sorgt für die gleichmäßige Verteilung der aufströmenden Luft. Der Kies besitzt eine grosse Wärmekapazität und kann dadurch Temperaturschwankungen im Pflanzenbereich kompensieren. Die grosse Oberfläche der Schüttung wird für die Verdunstungskühlung genutzt (Kapitel 3.2). Eine durch Wärmeverlust an die Umgebung bedingte Temperaturänderung der konditionierten Luft auf dem Weg zwischen dem Absorberaustritt und dem Bereich der Pflanzen kann durch die Untertischheizung kompensiert werden.

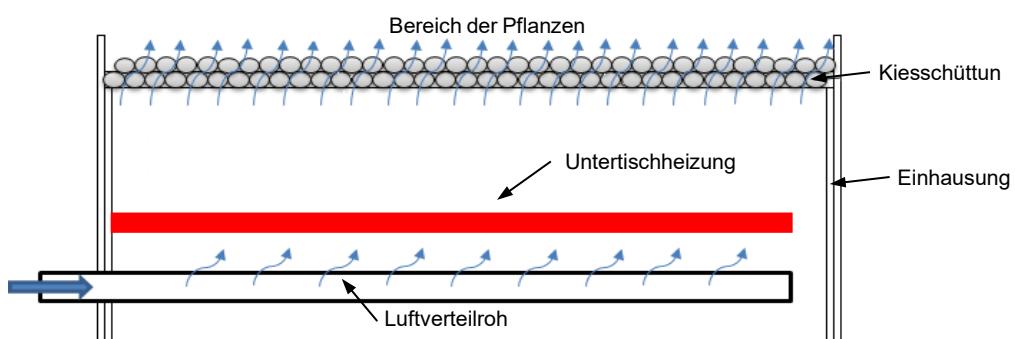


Abbildung 4: Aufbau der direktklimatisierten Pflanztische.



### Desorber (LW10):

Der Desorber besitzt einen ähnlichen Aufbau wie die Absorptionswässcher. Im Gegensatz zu diesen wird er jedoch im Überdruck betrieben (Ventilator am Lufteintritt) und besitzt keine seitlichen Kanäle zur Luftumlenkung. Der für die Desorption notwendige Energieeintrag erfolgt lösungsseitig über den Wärmeübertrager W10.1.

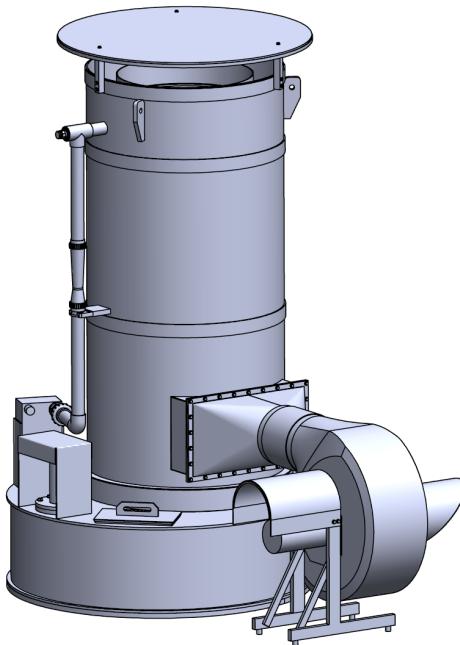


Abbildung 5: Fertigungszeichnung des Desorbers.

Wesentliche konstruktive Merkmale und Betriebsdaten:

- Wäscherdurchmesser: 1.2 m
- Lösungsvorlage: 1 m<sup>3</sup>
- Füllkörperschüttung: Pall-Ring 25, 1 m Schüttthöhe
- Flüssigkeitsverteiler: Rinnenverteiler
- Tropfenfänger: Demister aus Drahtgestrick
- Gasleerrohrgeschwindigkeit: 1 m/s
- Berieselungsdichte: 12 m<sup>3</sup>/(h m<sup>2</sup>)

**Pufferspeicher** für die konzentrierte (Speicher S1) und verdünnte (Speicher S2) Salzlösung:

Als Pufferspeicher für die verdünnte und die konzentrierte Salzlösung dienen je zwei hydraulisch verbundene IBC-Behälter, welche im Nebengebäude des Gewächshauses beim Desorber installiert sind. Die Speicher mit je ca. 2 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen können die Gesamtmenge an konzentrierter Salzlösung aufnehmen, mit der die Sorptionsgestützte Gewächshausklimatisierungsanlage betrieben wird. (Im Normalbetrieb befinden sich in den Vorlagebehältern der Absorber je bis zu 0.35 m<sup>3</sup> sowie im Desorber und in den Pufferspeichern insgesamt ca. 2 m<sup>3</sup> Salzlösung.)

Nachfolgend werden wichtige Messeinrichtungen der Sorptiven Gewächshausklimatisierung erläutert. Eine vollständige Auflistung aller Messstellen befindet sich im Anhang Verzeichnis Messstellen.



### **Füllstandsüberwachung:**

Alle 9 Absorber, der Desorber sowie die beiden Pufferspeicher sind mit konduktiven Füllstandsonden ausgestattet (Absorber:  $Lx.1$  bis  $Lx.5$ , Desorber:  $L10.1$  bis  $L10.4$ , Speicher S1:  $L30.1$  bis  $L30.4$ , Speicher S2:  $L40.1$  und  $L40.2$ ). Diese liefern bei einer Über- oder Unterschreitung der fest eingestellten Grenzniveaus ein binäres Signal, welches einerseits für die Steuerung der Lösungstransportvorgänge zwischen den Absorptionswäscheren, den Pufferspeichern und dem Desorber dienen (Kapitel 3.3) und andererseits in eine Sicherheitsschaltung eingebunden sind, welche das Überlaufen der Behälter und den Trockenlauf der Tauchkreiselpumpen in Folge von Fehlfunktionen der Anlage durch eine Sicherheitsabschaltung der gesamten Anlage verhindert.

### **Konzentrationsbestimmung:**

In den Absorptionswäscheren erfolgt die Überwachung der Lösungskonzentration über die relative Feuchte der konditionierten Luft ( $Mx.1$ ). Zusätzlich kann die Änderung der Lösungskonzentration anhand der Volumenzunahme im Vorlagebehälter kontrolliert werden.

Während der Aufkonzentrierung der Salzlösung im Desorber wird deren Konzentration durch eine kontinuierliche Temperatur- ( $T10.1$ ) und Dichtemessung (Vibrationssonde  $D10.1$ ) bestimmt.

### **Luftqualität (Temperatur- und Luftfeuchtigkeit):**

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte der konditionierten Luft wird kontinuierlich am Austritt der Absorptionswäscher ( $Tx.3$  und  $Mx.1$ ) überwacht. Zusätzlich wird auch die Temperatur und die relative Feuchte der aus dem Gewächshausraum angesaugten Luft auf beiden Hälften des Luftansaugsystems gemessen ( $T0.32$ ,  $T0.33$ ,  $M0.1$  und  $M0.2$ ). Damit ist es möglich, die Arbeitsweise der Absorptionswäscher zu kontrollieren.

Unabhängig von der Prozesssteuerung erfolgt eine Überwachung der Lufttemperatur im Bereich der Pflanzen auf jedem Pflanztisch ( $T0.1$  bis  $T0.30$ ). Wird von einer dieser Temperaturmessstellen die Unterschreitung einer vorgegebenen Mindesttemperatur oder die Überschreitung einer vorgegebenen Maximaltemperatur registriert, wird die Klimatisierung des Gewächshauses automatisch an die konventionelle Klimasteuerung übergeben. Die Sorptive Gewächshausklimatisierungsanlage wird abgestellt und es erfolgt eine Störungsmeldung.

Während der Testphase des Sorptiven Gewächshausklimatisierungssystems liefert ein Messdatenloggersystem Informationen über die Qualität der Pflanztischklimatisierung (Temperatur- und Luftfeuchteprofil über der Fläche ausgewählter Pflanztische - nicht im R&I-Schema aufgeführt). Anhand dieser Messungen kann die Klimatisierungsanlage optimiert werden.

### **Luftvolumenstrom:**

Der über die Absorptionswäscher abgegebene Luftvolumenstrom kann durch eine manuelle Differenzdruckmessung mit einem U-Rohr-Manometer ( $Px.1$ ) ermittelt werden.

### **Bilanzierung der Energieströme:**

Ein wichtiges Anliegen des Pilotprojektes ist ein Nachweis der innerhalb eines Jahres durch den konventionellen Betrieb der Sorptiven Gewächshausklimatisierungsanlage erzielten Energieeinsparung. Dafür ist es notwendig, die vom Heizsystem der Gewächshausanlage bezogene Wärmeenergiemenge für alle Heizkreise (*Oberheizung, Untertischheizung, Desorberkreislauf, Absorberkreislauf*) zu registrieren (Wärmemengenzähler  $Q20.1$  bis  $Q20.4$ ).

## 3 Vorgehen und Methode

### 3.1 Betriebskonzept

#### 3.1.1 Sorptionsgestützte Klimatisierung

Mit der Integration der Luftwäscher und deren Peripherie ergeben sich neue Möglichkeiten zur Gewächshausklimatisierung. Grundsätzlich kann von vier unterschiedlichen Zuständen der Luft im Gewächshaus (am Absorbereintritt) ausgegangen werden. In der Abbildung 6 wird der Sollzustand der Luft als roter Punkt dargestellt. Die Enthalpie und die Wasserbeladung dieses Zustandspunktes teilen das Mollier-Diagramm über die Beladungssachse und die Isenthalpe in vier Sektoren ein. Ausgehend von den vier möglichen Zuständen der unkonditionierten Luft und dem Sollzustand der Luft im Pflanzbereich, werden die Zustandsänderungen im Absorber im Vergleich zu den Zustandsänderungen einer konventionellen Klimatisierung dargestellt.

Für die Klimatisierungsstrategie im Gewächshaus der Meyer Orchideen AG kristallisieren sich lediglich zwei zu erwartende Klimasituationen heraus. Die Zustände 1 und 2 sind aufgrund der ständigen Transpiration der Pflanzen und das Verdunsten überschüssigen Giesswassers, nur in Gewächshäusern mit versiegelten Bodenflächen und dosierten Giesskonzepten (z.B. Topfbewässerung) zu erwarten.

Bei einer nicht sorptiven Luftkonditionierung muss die Luft zunächst auf eine Temperatur unterhalb der Taupunkttemperatur des Sollzustandes abgekühlt werden, damit der überschüssige Wassergehalt als Kondensat abgeschieden werden kann. Durch den Salzgehalt der Lösung kann der Sättigungsdruck des Wasserdampfes über der Lösung verschoben und somit direkt die relative Feuchtigkeit der Luft eingestellt werden. Die Temperatur der konditionierten Luft wird, über die im thermodynamischen Gleichgewicht stehenden Lösung definiert.

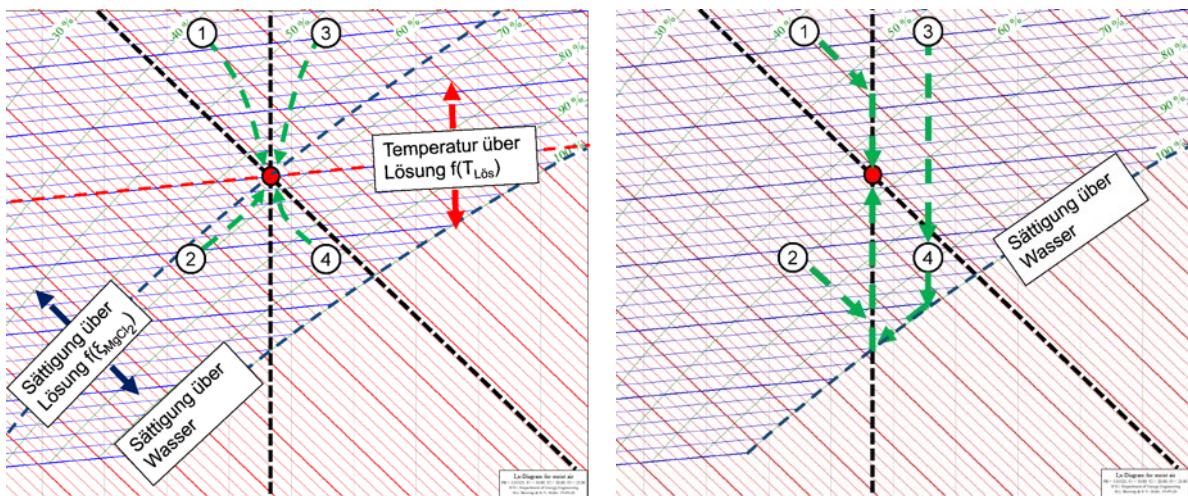


Abbildung 6: Gewächshausklimatisierung (links: Zustandsänderungen einer sorptiven Klimatisierung, rechts: Zustandsänderungen einer konventionellen Klimatisierung).

Die übliche Tagessituation zeigt sich im Zustandspunkt 3. Hierbei weist die Luft eine Überbeladung an Wasserdampf sowie einen Überschuss an Enthalpie auf. Ist die Außenluft kalt und trocken, kann ein solcher Zustand mit einem ausreichenden Luftwechsel kompensiert werden. An warmen Sommertagen, wo die Enthalpie der Außenluft höher ist als die Enthalpie des Sollzustandes der konditionierten Luft, ist dies nicht möglich und es muss auf aktive Kühlprozesse zurückgegriffen werden.

Der Zustand 4 zeigt eine typische Nachtsituation, bei der die Luft eine zu hohe Wasserbeladung und eine zu geringe Enthalpie aufweist. Aufgrund der zu hohen Feuchte muss in konventionell gesteuerten



Gewächshäusern ein Luftwechsel in Kauf genommen werden. Dabei wird energetisch minderwertige Aussenluft mit der ohnehin bereits enthalpiearmen Innenluft getauscht, was auch während den Sommermonaten teilweise zu einem hohen Heizenergiebedarf führt. Mit der sorptiven Klimatisierung kann die in der unkonditionierten Luft in Form von Wasserdampf enthaltene latente Wärme direkt in fühlbare Wärme (Temperaturanstieg) umgewandelt werden.

### 3.1.2 Strategien für die Prozessführung

Ausgehend von diesen theoretischen Betrachtungen können drei Betriebsarten für die Sorptive Gewächshausklimatisierung abgeleitet werden. Die Umsetzung der Betriebsstrategien erfolgt durch eine SPS-Steuerung (Kapitel 4.3 Automatisierung).

#### 1. Kühlbetrieb (Abbildung 7 a):

Während des Kühlbetriebs wird die warme und feuchte Luft an der Gewächshausdecke angesaugt und im Absorber gewaschen. Durch den Waschprozess der Luft mit der temperierten Lösung wird die Luft abgekühlt und – in Abhängigkeit der Salzkonzentration – entfeuchtet (Prozess 1 => 2). Die konditionierte Luft wird nach dem Waschprozess über ein Rohrleitungssystem zu den Pflanztischen geführt, wo sie über eine Kiesschüttung den Pflanzbestand von unten durchströmt. Dabei erwärmt sich die Luft (Prozess 2 => 3).

Übersteigt die Temperatur der Luft im Bereich der Pflanzen den zugelassenen Bereich (in der Abbildung schwarz markiert), ist es notwendig, die Luft im Wäscher auf eine niedrigere Temperatur abzukühlen. Dadurch verschiebt sich das Phasengleichgewicht im Wäscher und die Luft besitzt eine geringere Luftfeuchte (Zustandspunkte 2' und 3'). Durch das Grundwasser kann die Salzlösung im Absorber auf eine Temperatur von 16°C abgesenkt werden.

Bei starker Sonneneinstrahlung kann die damit eingebrachte Energie nicht mehr vollständig durch die konditionierte (gekühlte) Luft abgeführt werden (Zustandspunkt 3''). Hier kommt die Kiesbefeuchtung zur Anwendung. Die Wiederbefeuchtung der im Absorptionswäscher entfeuchteten Luft, führt zu einer starken Abkühlung im Pflanzenbereich (Prozess 3'' => 3).

#### 2. Adiabater Betrieb (Abbildung 7 b):

Oft tritt die Situation ein, dass einige Absorber einen Kühlbedarf und andere einen Heizbedarf aufweisen. Dies ist der Fall, wenn die Enthalpiedifferenz der Luft zwischen Ein- und Austritt am Absorptionswäscher nicht sehr gross ist. Bedingt durch unterschiedliche Momentankonzentrationen der Salzlösung in den Absorptionswäschern besitzt die konditionierte Luft an den Wäschern bei konstanter Temperatur eine unterschiedliche Feuchte. Über den Absorberkreislauf erfolgt der Ausgleich (Wärmeabgabe 1 => 2<sub>1</sub> bzw. -aufnahme 1 => 2<sub>2</sub>) zwischen den einzelnen Absorptionswäscher.

Je nachdem, ob in Summe von den Wäschern Wärme aufgenommen oder abgegeben wird, verschiebt sich in diesem Betriebsregime die Temperatur im Absorberkreislauf und damit die Temperatur der konditionierten Luft am Austritt der Wässcher. Über- oder unterschreitet dadurch die Lufttemperatur im Pflanzenbereich den zulässigen Sollbereich, muss das System vom *adiabaten Betriebszustand* in den *Kühlbetrieb* oder in einen *Heizbetrieb* wechseln.

#### 3. Heizbetrieb (Abbildung 7 c):

Während des Heizbetriebs treten über die Gewächshaushülle Wärmeverluste auf, welche durch die Beheizung der Salzlösung ausgeglichen werden (1 => 2). Mit der Untertischheizung ist es möglich, den Temperaturverlust der konditionierten Luft zwischen Absorber und Pflanztisch (2 => 3) zu kompensieren (3 => 2). Bei kalten Nächten kann die Oberheizung dazu genutzt werden, Kondensatbildung an den Aussenwänden des Gewächshauses zu vermeiden.

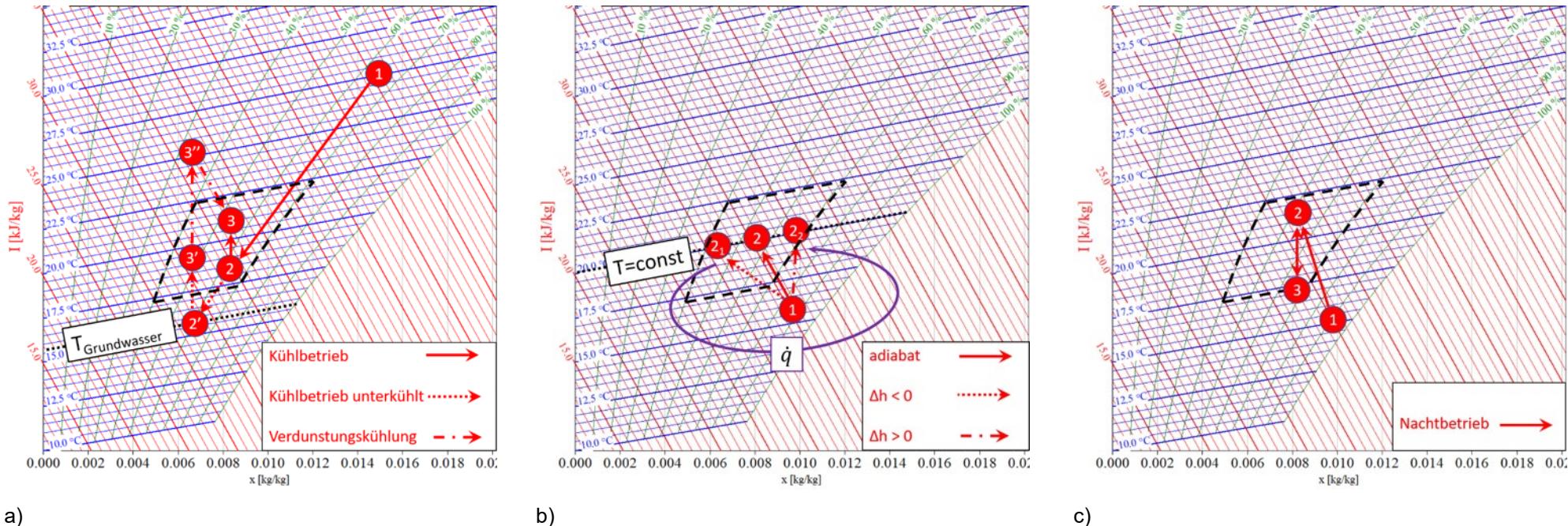


Abbildung 7: Betriebsarten der Sortiven Klimatisierung: a) Kühlbetrieb b) Adiabater Betrieb c) Heizbetrieb



### 3.2 Kiesbefeuchtungsanlage

Wenn bei intensiver Sonneneinstrahlung die im Kühlbetrieb konditionierte Luft nicht in der Lage ist, die Strahlungsenergie aufzunehmen, wird die Luft im Bereich der Pflanzen zusätzlich durch Verdunstung von Wasser gekühlt. Dafür soll ein feiner Wasserfilm gleichmäßig auf die Kiesschüttung der Pflanztische aufgebracht werden. Zielgrößen für die Kiesbefeuchtung sind eine gleichmässige Benetzung der Kiesschüttung, die Vermeidung einer Durchnässung der Schüttung sowie die Verhinderung einer Befeuchtung der Pflanzen.

Der gem. Zwischenbericht 2020 (03.01.2021) installierte Prototyp der Kiesbefeuchtungsanlage zeigte unzufriedenstellende Resultate bezüglich der Handhabung während dem alltäglichen Betrieb der Meyer Orchideen. Mit der Pflanzenablagefläche mittels Pflanztopfpalletten ist keine zuverlässige Abgrenzung der Pflanzen von der Befeuchtungsebene gegeben, die gleichmässige Verteilung des Wassers wird durch die dicht gestapelten Pflanzpalletten behindert und durch die Verwendung der Nebeldüsen wurde teilweise auch der Pflanzbestand befeuchtet.



Abbildung 8: Nasse Pflanzen nach Befeuchtung und Prototyp Ablagefläche.

Wie in Abbildung 8 ersichtlich, sind die Pflanzen nach der Befeuchtung durch die Nebeldüsen nass. Im zweiten Bild ist der Aufbau der Pflanzenablagefläche aus Pflanztopfpalletten ersichtlich. Der Aufbau mit Pflanztopfpalletten verhindert eine gleichmässige Befeuchtung der Kiesschüttung und die Nutzung der Palletten als Arbeitsfläche erwies sich als ungeeignet, da sich die Pflanztöpfe in die Palletten absenken können. Aus diesen Gründen sollen die Befeuchtungs- und Pflanzenebene voneinander getrennt werden, sodass eine funktionale, stabile Ablagefläche für die Lagerung und Arbeit mit den Pflanzen entsteht, welche keinen Kontakt mit der Kiesbefeuchtungsanlage hat.

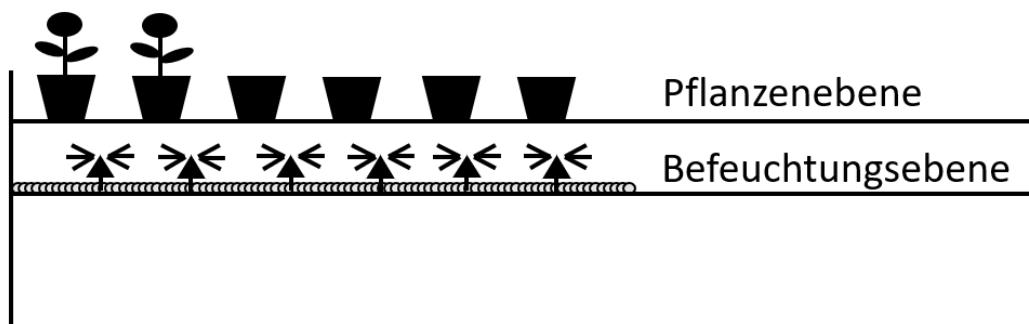


Abbildung 9: Unterteilung Pflanzenebene/Befeuchtungsebene.



### Steuerstrategie der Kiesbefeuchtung:

In regelmässigen Zeitabständen ( $\tau_1$ , Abbildung 10) prüft ein Regler die Temperatur auf den Pflanztischen. Wird die Grenztemperatur  $T_{max}$  (Steuerungskonzept: T-PT-max) überschritten, löst der Regler eine Befeuchtung aus. Die Befeuchtung wird während der Zeitdauer  $\tau_2$  vollzogen. Befindet sich die Tischtemperatur nach dem darauffolgenden Intervall noch immer über der Grenztemperatur  $T_{max}$ , wird erneut eine Befeuchtung ausgelöst. Dies geschieht solange, bis die Temperatur unter der Grenztemperatur  $T_{max}$  liegt.

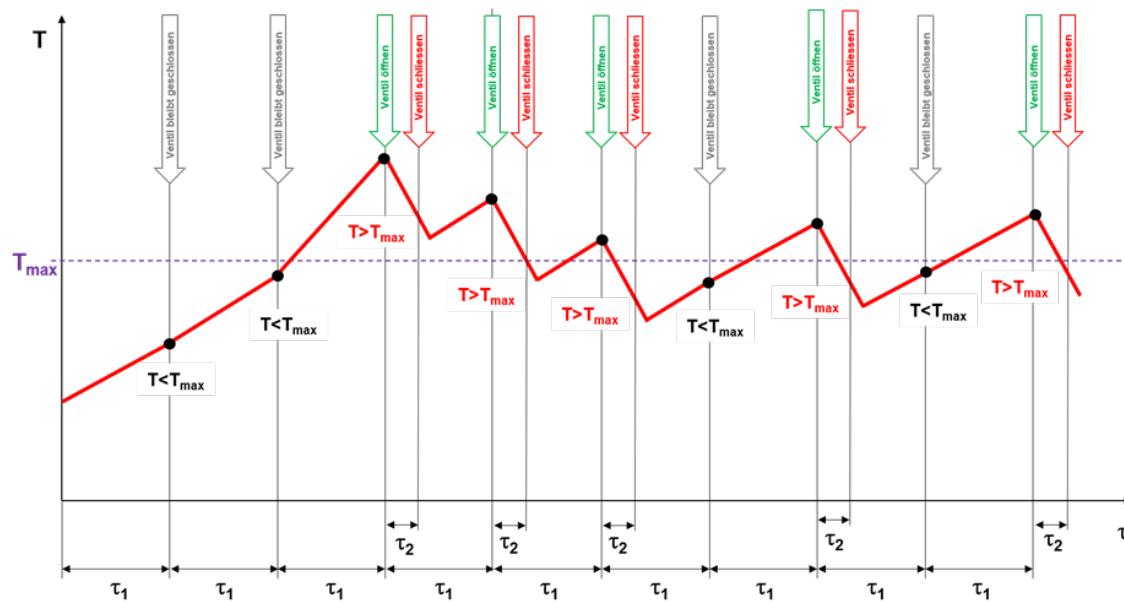


Abbildung 10: Strategie der Kiesbefeuchtung.

### Wasserbilanz

Zur Bilanzierung des Wassers der adiabaten Kühlung wurden Messungen am Tisch 9 vorgenommen. Dabei wurde die Wassermenge mit einer Wasseruhr gemessen. Im Zeitraum von 24.07.2023 bis 23.04.2024 wurden 429 Liter Wasser auf 1313 Befeuchtungen gemessen. Daraus resultiert eine Wassermenge von 0.327 Liter pro Befeuchtung. Diese Grösse wurde mit der Gesamtzahl erfolgter Befeuchtungen multipliziert.

Daraus resultiert das Wasservolumen der Kiesbefeuchtung:  $V_W^{KB} = 0.327 \cdot n_{\text{Kiesbefeuchtungen}}$ .



### 3.3 Automatisierung

Die Auslegung der Vollautomatisierung wurde basierend auf den Erkenntnissen, welche im Betrieb mit einer teilautomatisierten Anlage gewonnen werden konnten, durchgeführt. Die Umsetzung der automatisierten Steuerung ist einem Steuerkonzept (Kapitel 4.1 Betriebskonzept) festgehalten. Im folgenden Kapitel werden der Aufbau und die Schnittstellen der Steuerung erläutert.

Nach Testbetrieben der teilautomatisierten Anlage im Herbst 2020 wurden folgende Anpassungen vorgesehen: Der geforderte Mindestvolumenstrom für den Lösungswechsel wurde erhöht, damit der Lösungswechsel gemäss den Zielvorgaben in Kapitel 2 vollzogen werden kann. Dies bedingte auch, dass der Leitungsquerschnitt der Schläuche angepasst wurde, um den Druckverlust gering zu halten.

#### Aufbau Steuerung

Die Sorptive Gewächshaussteuerung besteht aus einer Übergeordneten Steuerung, der Absorber- und Desorbersteuerung und einer Sicherheitskette. Die Sorptionsgestützte Gewächshausklimatisierung wird von der übergeordneten Steuerung gesteuert, welche mit den Unterstationen der Absorber- und der Desorbersteuerung kommuniziert und während dem Sorptionsbetrieb die Vorlauftemperaturen der Untertisch- und Oberheizung regelt. Die Absorbersteuerung regelt das Lösungsmanagement (Entleerung und Befüllung der Absorber), die Beheizung und Kühlung der Absorber über den Absorberkreis und die Kiesbefeuchtung zur Kühlung der Pflanzen. Die Desorbersteuerung regelt die Regeneration der Salzlösung.

Eine schematische Darstellung der Steuerung ist in Abbildung 11 auf der folgenden Seite zu sehen.

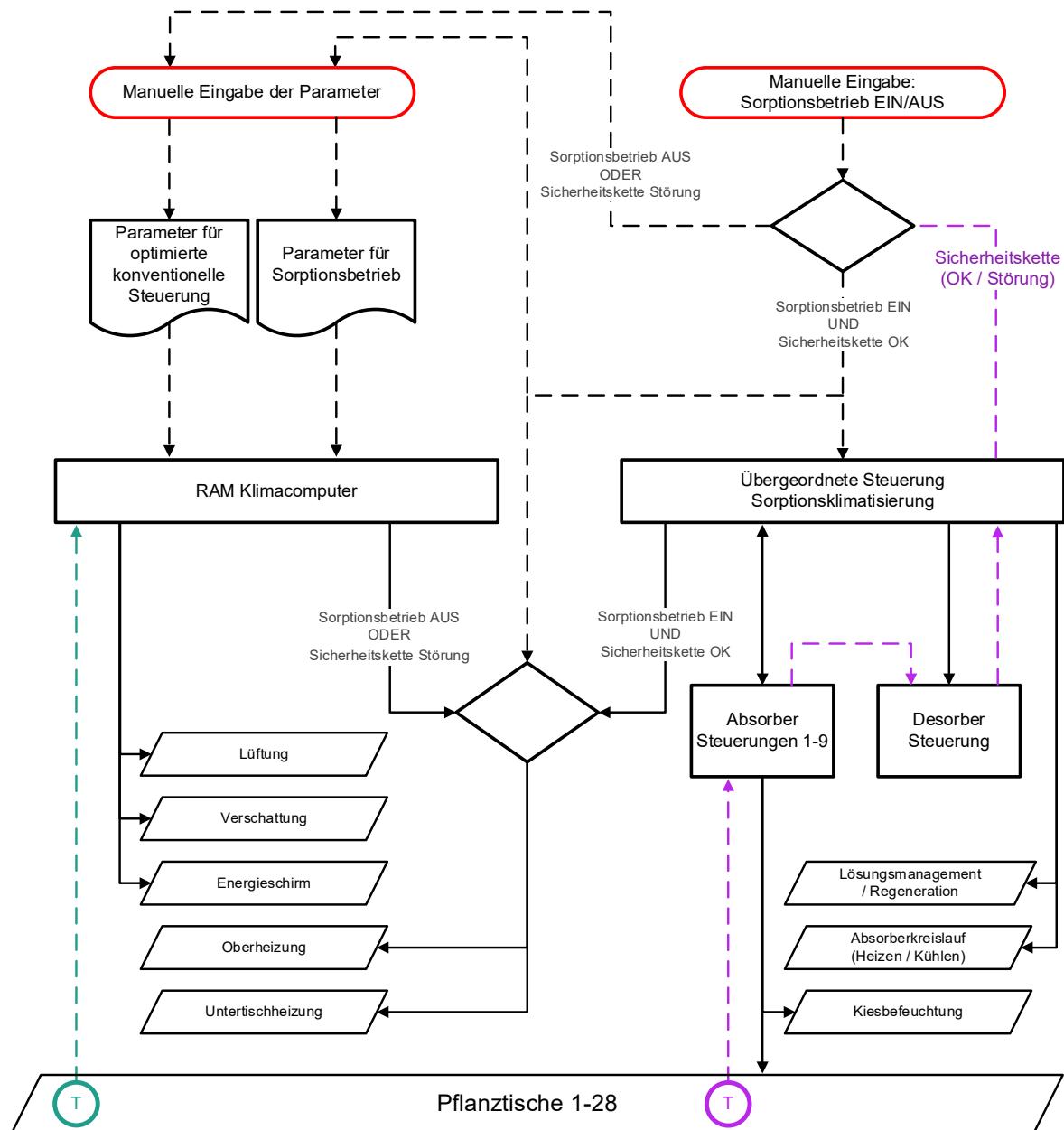


Abbildung 11: Schema Aufbau Steuerung.

### Schnittstellen zum Klimacomputer der konventionellen Gewächshausklimatisierung

Die Gewächshäuser der Meyer Orchideen AG werden durch ein Klimasteuersystem (Klimacomputer) der Firma RAM GmbH gesteuert.

Für den Betrieb der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung ist es notwendig, die Steuerung der Untertisch- und Oberheizung für das Gewächshaus Nr. 12 von der konventionellen Gewächshaussteuerung zu übernehmen. Dazu wird eine Signalumlenkung über ein zusätzliches Relais im Schaltschrank des Klimacomputers installiert. Bei Kabelbruch, Stromausfall oder Aktivierung der



Sicherheitskette fällt das Relais ab und es erfolgt die Übergabe der Steuerung von der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung an den Klimacomputer.

Alle übrigen Sensoren und Aktoren (Tabelle 1) des Klimacomputers werden von der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung nicht beeinflusst. Die Umluftventilatoren werden während dem Betrieb der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung manuell deaktiviert (Tabelle 3). Nach Deaktivierung der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung müssen die Umluftventilatoren manuell aktiviert werden.

Tabelle 1: Sensoren und Aktoren der konventionellen Gewächshausklimatisierung

Sensoren	Aktoren
Regen- bzw. Schneesensor	Untertischheizung
Windsensor (Geschwindigkeit und Richtung)	Oberheizung
Aussentemperatur und relative Feuchte	Lüftungsklappen
Aussenhelligkeit	Schattierungsschirm
Raumhelligkeit	Energieschirm
	Umluftventilator

### Sicherheitskette

Zur Vermeidung von Schäden am Pflanzenbestand und an den Anlagenteilen werden folgende kritische Parameter in Serie in einer Sicherheitskette (Abbildung 11, Abbildung 37) überwacht:

- Pflanzen vor Schäden schützen.
  - Temperatur im Pflanzenbereich auf allen Pflanztischen überwachen (*T0.101 – T0.128*) *STB*
  - Temperatur muss im Bereich 15 – 26°C sein.
- Austreten der Lösung vermeiden
  - Überlaufschutz in den Absorptionswäschern (*LW1-9*, Füllstandswächter *Lx.5*) und dem Desorber (*LW10*, Füllstandswächter *L10.4*).
  - Überlaufschutz an den Speichern *S1* (Füllstandswächter *L30.4*) und *S2* (Füllstandswächter *L40.2*)
- Schäden an Kreiselpumpen durch Trockenlauf vermeiden
  - Trockenlaufschutz in den Absorptionswäschern (*LW1-9*, Füllstand *Lx.2: Pumpenschutz Px.1*) und dem Desorber (*LW10*, Füllstand *L10.1: Pumpenschutz Desorber P10.1*)
- Zu hohe Temperaturbelastung an Desorber ( $\vartheta_{\max} = 60^\circ\text{C}$ ) vermeiden.
  - Lösungseintrittstemperatur (*T10.2*) *STB*

Die oben aufgeführten Sensoren sind in einer Sicherheitskette integriert, die bei Auslösung durch ein sicherheitsrelevantes Ereignis über eine Hardwaresteuerung die Steuerung der Ober- und Untertischheizung an die konventionelle Gewächshaussteuerung übergibt und die Sorptionsgestützte Gewächshausklimatisierung deaktiviert (Abbildung 11). Die Sicherheitskette ist eigensicher, funktioniert bei Stromausfall oder Softwarefehler und ist unabhängig von der SPS der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung.



## Lösungswechsel

Die Lösungswechselstrategie wird als Batchprozess realisiert. Beim Batchprozess wird die fast komplett entleerte Vorlage (50 Liter verdünnte Salzlösung bleiben als Restvolumen in der Vorlage) mit konzentrierter Lösung von 32% bis zum Füllstand *Lx.3: Befüllung beenden* befüllt. Nach der Befüllung liegt im Vorlagebehälter des Absorbers eine Salzkonzentration von 31.5% vor ( $\xi=31.5\%$   $\text{MgCl}_2$ , entspricht einer relativen Luftfeuchte von 46%RH im Phasengleichgewicht). Diese Konzentration entsteht durch Befüllung des Vorlagebehälters mit 150 Litern konzentrierter Lösung und dem Restvolumen von 50 Litern Lösung mit einer Konzentration von 28.6%. Die angegebenen Konzentrationen wurden für eine Lösungstemperatur von 20°C berechnet.

Durch die Absorption des Wasserdampfes aus der Gewächshausluft verdünnt sich die Lösung. Dabei steigt die relative Feuchte der konditionierten Luft. Wird die maximal zulässige relative Feuchte von 55% (entspricht einer Salzkonzentration von  $\xi=28.6\%$  im Phasengleichgewicht) in der konditionierten Luft (am Wäscheraustritt, *Mx.1*) erreicht, muss die Lösung gewechselt werden. Der Absorber meldet den Lösungswechsel an und wird in eine Warteschlange gesetzt. Mit Erreichen des Füllstandes *Lx.4: Priorität* erhält der Absorber Priorität gegenüber den anderen Absorbern in der Warteschlange. Befinden sich weniger als  $n_A$  Absorber im Lösungswechsel, kann ein weiterer Lösungswechsel sofort ausgeführt werden. Die aus diesen Bedingungen resultierenden Steuergrößen sind in der Tabelle 2 aufgelistet.

Der gesamte Ablauf des Lösungswechsels ist in Abbildung 13 dargestellt. In der oberen Grafik sind die Füllstände des Wäschersumpfes und der Pumpenvorlage über den Zeitraum des gesamten Lösungswechsels dargestellt. Dabei sind die Füllstände *Lx.1* bis *Lx.4* und die daraus resultierenden Zeitpunkte  $\tau_0$  bis  $\tau_5$  eingezzeichnet. In der unteren Grafik ist das gesamte Füllvolumen in der Vorlage und deren Konzentration dargestellt. Im Anschluss werden die Füllstände zu den Zeitpunkten  $\tau_0$  bis  $\tau_5$  genauer erläutert.

Für einen kompletten Lösungswechsel werden rund 25 Minuten benötigt, wobei der Sorptionsprozess während 20 Minuten nicht aktiv ist (Zeitpunkt  $\tau_1$  bis  $\tau_5$ ). Voruntersuchungen an der automatisierten Pflanztischklimatisierung im Kulturlabor des Instituts für Umwelt und Natürliche Ressourcen (IUNR) haben ergeben, dass durch die thermische Speicherfähigkeit der Kiesschüttung und der Absorptionsfähigkeit der an den Füllkörpern anhaftenden Lösung eine ausreichende Qualität der konditionierten Luft über einen **Betriebszeitraum ohne Lösungsumlauf von 30 Minuten** gegeben ist.

Tabelle 2: Steuergrößen für den Lösungswechsel (Lösungs- und Lufttemperatur: 20°C).

Füllstand	Volumen [L]	Salzkonz. [-]	Rel. Luftf. [%]
Restvolumen	50	28.6	55
Befüllung	150	32.5	43
<i>Lx.3, Befüllung beenden</i>	200	31.5	46
Lösungswechselanforderung bei 55%RH	220	28.6	55
<i>Lx.4, Lösungswechsel Priorität</i>	290	23.3	72



## Betriebsoptimierung Absorberabschaltung

Ein durchgehener Betrieb der Absorber ist nicht notwendig. Wenn für die Pflanzen passende Konditionen vorliegen können die Absorber abgeschaltet werden. Der Betrieb eines Absorbers ist von den Tischtemperaturen, der zugeordneten Tische, abhängig. Befinden sich die Tischtemperaturen zwischen 19°C und 24°C bleibt der Absorber abgeschaltet, wird das vorgesehene Temperaturfeld von einem oder mehreren Tischen unter oder überschritten, schaltet sich der Absorber ein. Sind die Absorber im Kühlbetrieb, wird dieser 3 Stunden vor Sonnenuntergang deaktiviert.

Abbildung 12 zeigt die Absorberabschaltung der Betriebsoptimierung anhand von Absorber 3 mit den Temperaturen der zugeordneten Tische 9 bis 12.

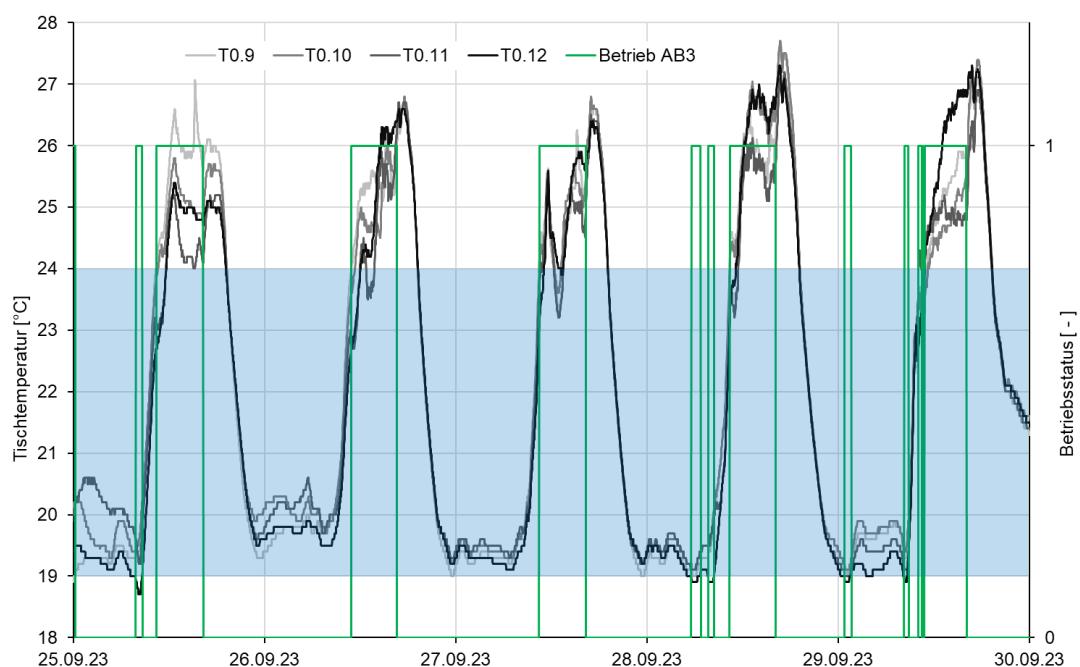


Abbildung 12: Betriebsoptimierung: Absorberabschaltung und Betrieb an Absorber 3.

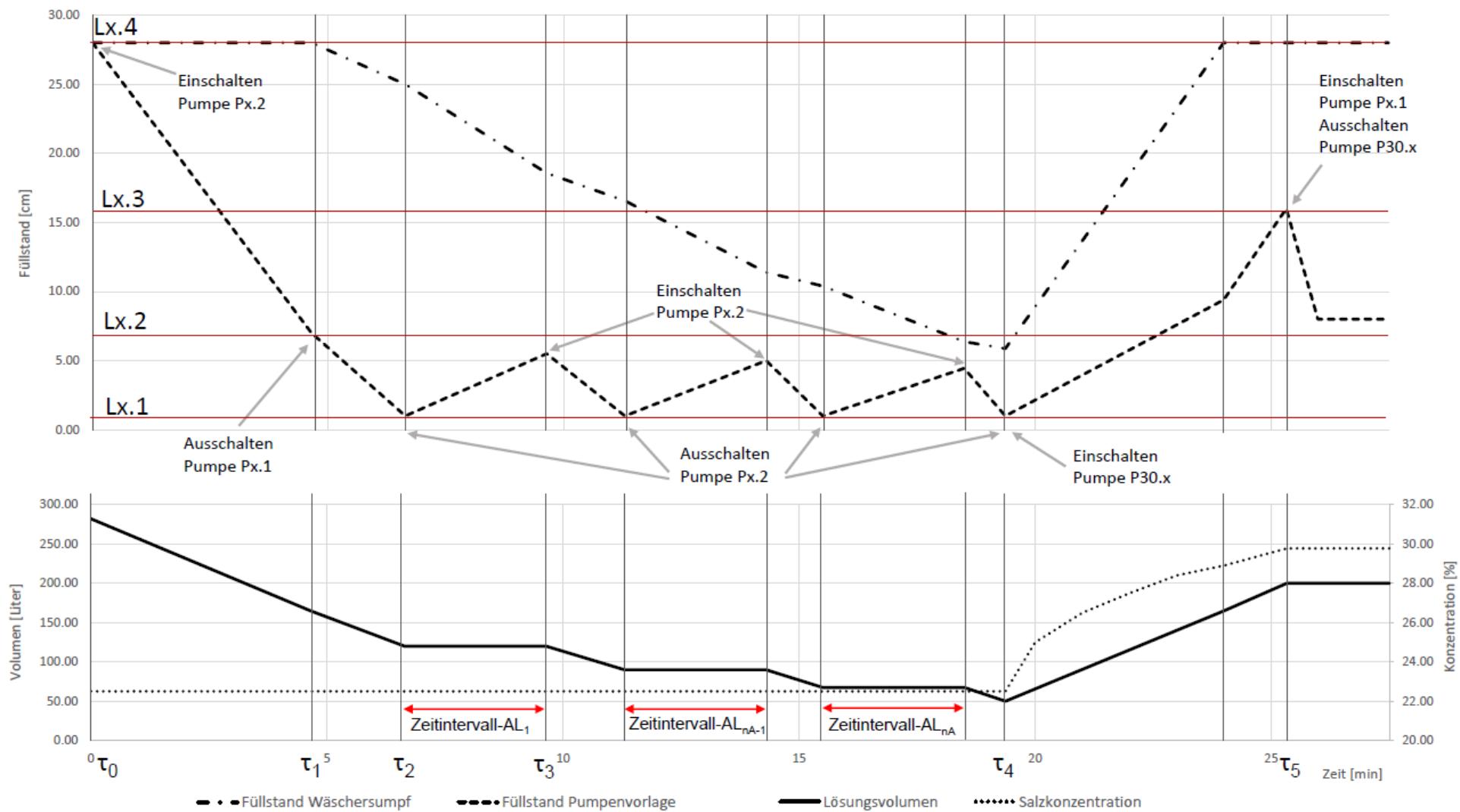


Abbildung 13: Ablauf des Lösungswechsels mit Darstellung des Füllvolumens und der Füllstände Wäschersumpf und Pumpenvorlage über den gesamten Zeitraum des Lösungswechsels.



Wenn die relative Luftfeuchtigkeit am Ausgang des Wäschers den Grenzwert von 55%RH überschreitet, dann wird ein Lösungswechsel angefordert und der Wäscher wird in die Wartschleife gesetzt. Während der Wäscher in der Wartschleife ist, wird der Betrieb normal weitergeführt. Es können maximal zwei Wäscher gleichzeitig einen Lösungswechsel ausführen. Dies ist durch den Füllstand L30.2 im Speicher S1 vorgegeben.

Ein Wäscher fordert Lösungswechsel Priorität, wenn der Füllstand Lx.4 erreicht ist (

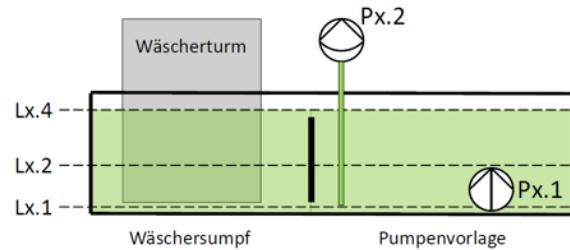


Abbildung 14). Wenn zu diesem Zeitpunkt keiner oder nur einer der Absorber einen Lösungswechsel betreibt, wird der Prozess gestartet.

Zeitpunkt  $\tau_0$ :

Start des Lösungswechsels bei Erreichen des Füllstandes Lx.4. Beide Vorlagebehälter sind bis über die Trennwand gefüllt. Die Pumpe Px.2 wird eingeschaltet.

Im Wäschersumpf befindet sich 120 Liter Lösung und in der Pumpenvorlage befindet sich 140 Liter Lösung.

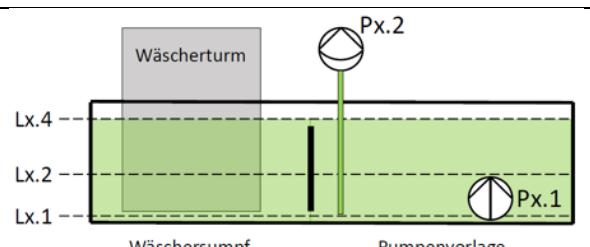


Abbildung 14: Füllstand der Absorber vor dem Lösungswechsel zum Zeitpunkt  $\tau_0$

Für den Zeitraum des Lösungswechsels wird der Pumpenschutz (Lx.2) in der Sicherheitskette überbrückt. Die Lösungsumwälzpumpe (Px.1) bleibt solange in Betrieb, bis der Füllstand ab dem die Umwälzpumpe trocken laufen würde Lx.2 erreicht ist. Nach Abstellung der Lösungsumwälzpumpe (Px.1) sind noch rund 155 Liter Lösungsvolumen in der gesamten Vorlage vorhanden. Der Wäschersumpf ist mit 120 Liter bis zum Rand des Überlaufes gefüllt und die Pumpenvorlage mit 35 Litern bis zum Füllstand Lx.2 (

Abbildung 15).

Zeitpunkt  $\tau_1$ :

Stopp der Umwälzpumpe Px.1 bei Erreichen des Füllstandes Lx.2. Der Wäschersumpf ist bis zur Trennwand gefüllt und die Pumpenvorlage bis zum Füllstand Lx.2.

Im Wäschersumpf befindet sich 120 Liter Lösung und in der Pumpenvorlage befindet sich 35 Liter Lösung.

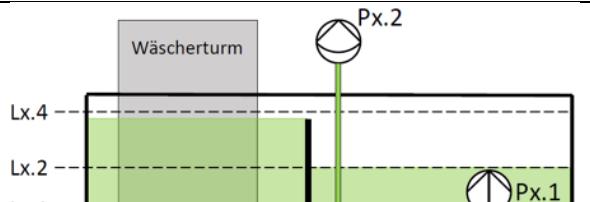


Abbildung 15: Füllstand der Absorber zum Zeitpunkt  $\tau_1$

Die gesamte Pumpenvorlage wird mittels den Membranpumpen Px.2 in den Speicher S2 (verdünnte Lösung) entleert bis der Füllstand Lx.1: Entleerung beenden erreicht wird (

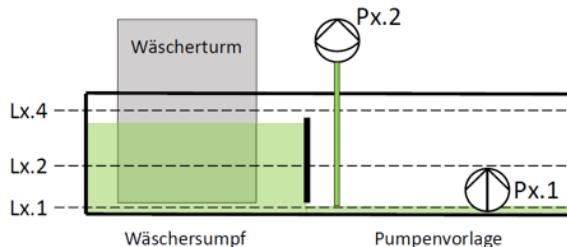


Abbildung 16). Bei Erreichen des Füllstandes Lx.1 wird die Membranpumpe Px.2 abgestellt.

Zeitpunkt  $\tau_2$ :

Stopp der Membranpumpe Px.2 bei Erreichen des Füllstandes Lx.1.

Im Wäschersumpf befindet sich 105 Liter Lösung im Wäschersumpf und in der Pumpenvorlage befindet sich 5 Liter Lösung.

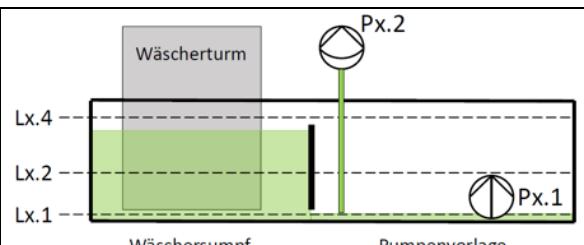


Abbildung 16: Füllstand der Absorbervorlage zum Zeitpunkt  $\tau_2$

Da die Membranpumpe Px.2 die Pumpenvorlage schneller leerpumpt, als die Lösung durch die Ausgleichsbohrung in der Trennwand vom Wäschersumpf nachfliesst, erfolgt der Abpumpvorgang in zeitlichen Intervallen. Nach Erreichen des Zeitpunkts  $\tau_2$  werden die Füllstände von Wäschersumpf und Pumpenvorlage während einem Zeitintervall (Abbildung 13) von drei Minuten über die Ausgleichsbohrung ausgeglichen, sodass genügend Lösung in den Pumpenseitigen Vorlagebehälter nachfliessen kann für einen weiteren Abpumpvorgang.

Zeitpunkt  $\tau_3$ :

Ausgleich durch Ausgleichsbohrung während des Zeitintervall-AL von drei Minuten.

Im Wäschersumpf befindet sich 80 Liter Lösung und in der Pumpenvorlage befindet sich 30 Liter Lösung.

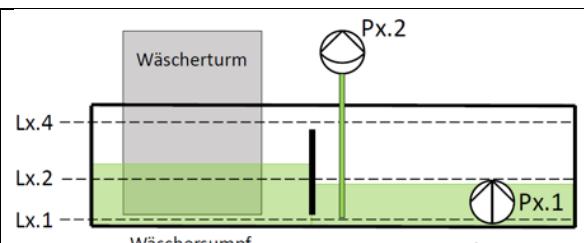


Abbildung 17: Füllstand der Absorbervorlage zum Zeitpunkt t3

Nach Ablauf der Ausgleichszeit wird der Wäschersumpf der Membranpumpe Px.2 erneut gestartet, bis der Füllstand Lx.1 erneut erreicht wird. Der Prozess wird dreimal wiederholt, sodass zum Schluss ein Restvolumen von ca. 50 Litern Lösung zurückbleibt (Abbildung 18). Die Parameter für die Anzahl Abpumpvorgänge  $n_{AL}$ , sowie die Zeitdauer des Warteintervalls  $Zeitintervall-AL$ , können in der Übergeordneten Steuerung nach Bedarf verändert werden.



#### Zeitpunkt $\tau 4$

Der Abpumpvorgang ist abgeschlossen. In der Vorlage befindet sich ein Restvolumen von 30 Litern Lösung mit einer Salzkonzentration von 28.6%.

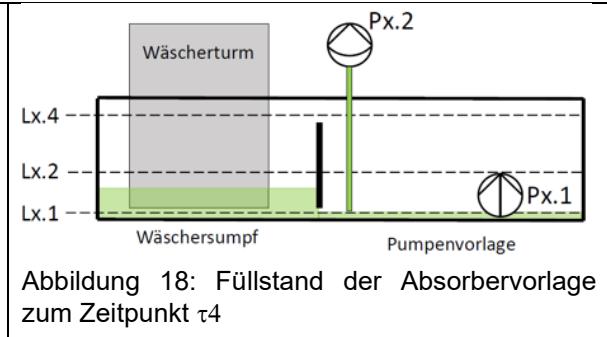


Abbildung 18: Füllstand der Absorbervorlage zum Zeitpunkt  $\tau 4$

Nach Abschluss der Entleerung wird die Absorbervorlage mit konzentrierter Lösung aus dem Speicher S1 durch die Membranpumpen (P30.x) befüllt, bis zum Füllstand Lx.3: *Befüllung beenden*.

Durch das Restvolumen von 50 Litern mit einer Salzkonzentration von 28.6% und das Befüllen von 150 Litern mit aufkonzentrierter Lösung von 32.5% ergibt sich nach der Befüllung eine Salzkonzentration von 29%, was einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50%RH entspricht.

Nach Beendung des Lösungswechsels mit dem Erreichen von Lx.3, wird die Pumpe P30.x deaktiviert, die Pumpe Px.2 aktiviert und die Überbrückung des Pumpenschutzes Lx.2 wird deaktiviert.

#### Zeitpunkt $\tau 5$

Befüllung der Vorlage über den Wäschersumpf mit konzentrierter Lösung, bis zum Füllstand Lx.3.

Nach der Befüllung ist die Vorlage mit 200 Litern Lösung befüllt.

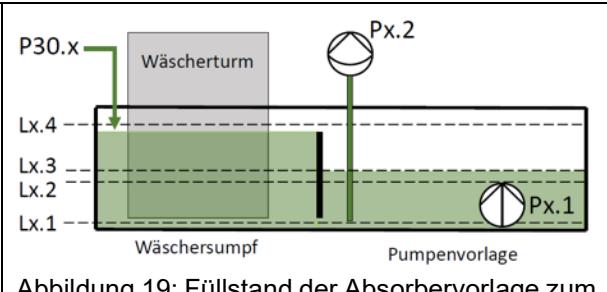


Abbildung 19: Füllstand der Absorbervorlage zum Zeitpunkt  $\tau 5$

### 3.4 Auswertung des Anlagebetriebs

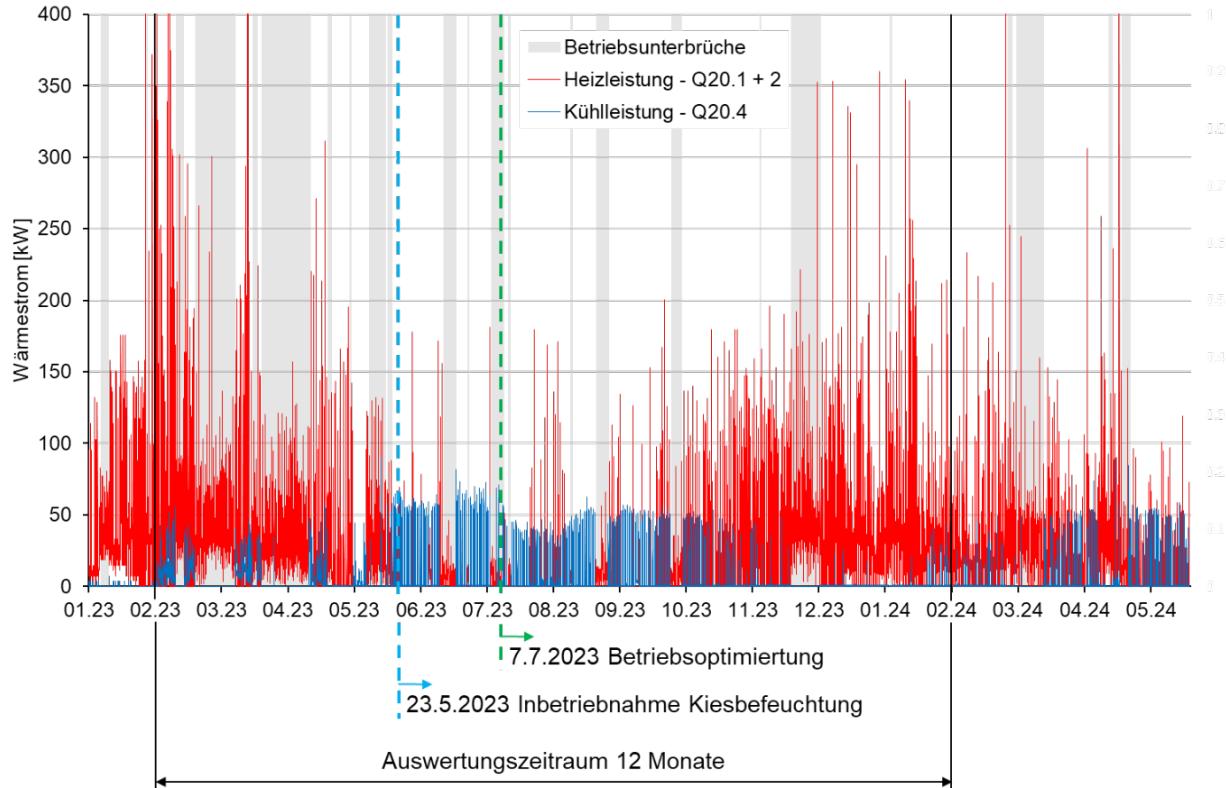


Abbildung 20: Übersicht über den Betriebszeitraum der Versuchsanlage in Wangen.

Die Anlage wurde im Zeitraum vom 1. Januar 2023 bis 31. Mai 2024 betrieben. Der Auswertungszeitraum umfasst 12 Monate von Februar 2023 bis Februar 2024. Im Betriebszeitraum (Abbildung 20) ist die Anlage für 115 Tage ausgefallen, was einer Ausfallquote von 22% entspricht. Grund dafür waren Probleme, meist technischer Natur, die behoben werden konnten. Am 23. Mai 2023 erfolgte die Inbetriebnahme Kiesbefeuchtung, am 7. Juni 2023 die Betriebsoptimierung (Kapitel 3.3).

Für die Zeiträume der Betriebsunterbrüche werden anhand der gemessenen Daten, mit einer Regressionsfunktion (Abbildung 21) in Abhängigkeit der Aussentemperatur, Abschätzungen gemacht. Für den elektrischen Verbrauch werden zur Ermittlung der Regressionsfunktion die Daten nach der Betriebsoptimierung verwendet. Mit der Regressionsfunktion wird auch der Verbrauch vor der Optimierung abgeschätzt.

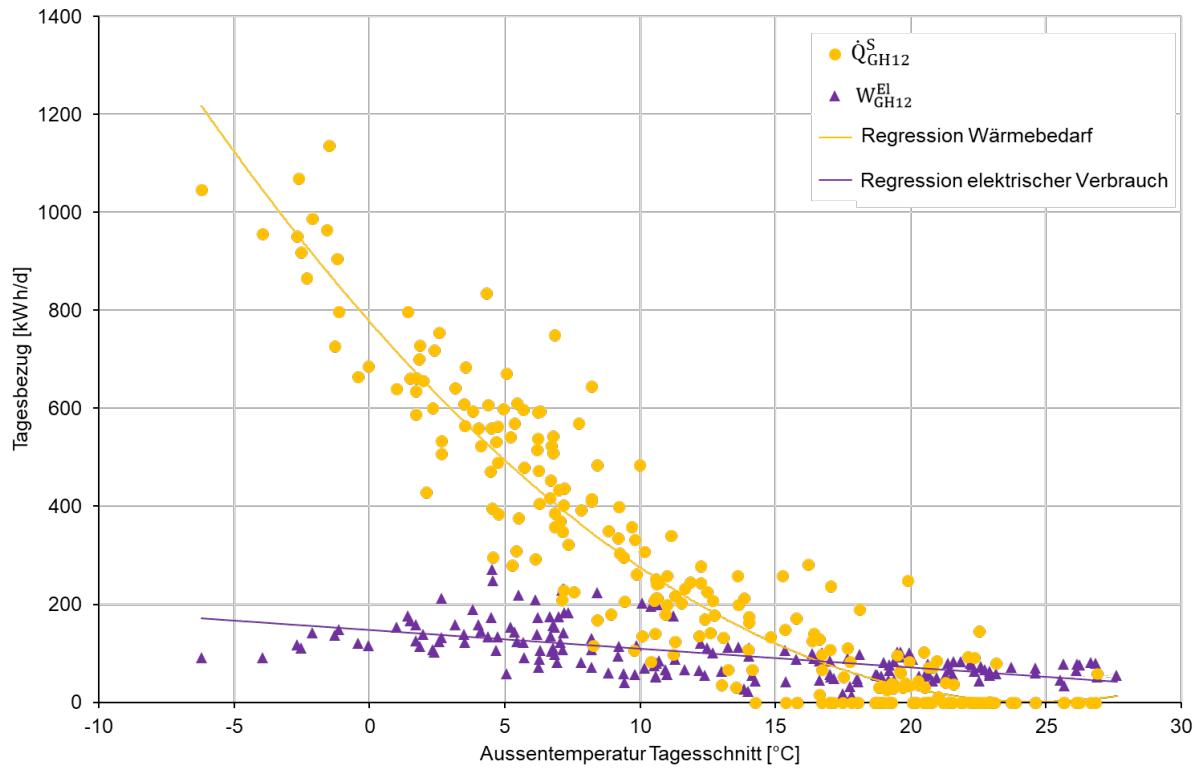


Abbildung 21: Regressionsfunktion für die Größen Wärmebedarf und elektrischer Verbrauch.

$$\dot{Q}_{\text{GH12}}^S = 1.28 \cdot \vartheta_0^2 - 63 \cdot \vartheta_0 + 777 \quad (1)$$

$$W^{\text{El}} = -3.83 \cdot \vartheta + 147 \quad (2)$$

Der Lösungsverbrauch wird über die desorbierte Lösungsmenge des Desorbers bilanziert. Berücksichtigt wird die Startkonzentration  $\xi_{\text{Des}}$  (M10.1) sowie Füllmenge  $V_{\text{Des}}$  (L10.3) vor Desorptionsvorgang. Mit der erreichten Endkonzentration  $\xi^{\text{VL}}$  lässt sich das Ausgetriebene Wasser flächenspezifisch (Gleichung 3) ermitteln. Wird zusätzlich die Rücklaufkonzentration  $\xi^{\text{RL}}$  herangezogen, kann der flächenspezifische Bedarf an konzentrierter Lösung  $v_{\text{VL}}$  (Gleichung 4) errechnet werden. Dazu wird die spezifische latente Wärmemenge  $q_{\text{GH12}}^L$  welche durch die Absorption der Wassermengen  $m_{\text{Wdes}}$  im Gewächshaus anfällt (Gleichung 5) errechnet.

$$m_{\text{Wdes}} = \frac{V_{\text{Des}} \cdot \rho(T, \xi_{\text{Des}}) \cdot \left(1 - \frac{\xi_{\text{Des}}}{\xi^{\text{VL}}}\right)}{A_{\text{GH12}}} \cdot n_{\text{des}} \quad (3)$$

$$v_{\text{EL}}^{\text{VL}} = \frac{m_{\text{Wdes}}}{\left(\frac{\xi^{\text{VL}}}{\xi^{\text{RL}}} - 1\right) \cdot \rho(T, \xi^{\text{VL}})} \quad (4)$$

$$q_{\text{GH12}}^L = m_{\text{Wdes}} \cdot h_w^{\text{LV}} \quad (5)$$

Der sensible thermische Verbrauch  $Q_{\text{GH12}}^S$  (Gleichung 6) der Versuchsanlage wird an den Wärmemengenzählern Q20.1, Q20.2 Q20.3 und Q20.4 (R&I, Abbildung 2) gemessen.



Für den elektrischen Verbrauch der Sorptionsanlage  $w_{GH12}^{El}$  wurden Leistungsmessungen (Anhang Elektrische Leistungsmessung) durchgeführt, mittels der Betriebszeiten werden die Verbrauchsdaten über die Zeit errechnet.

Betriebsdaten vom Gewächshausbetrieb Meyer Orchideen AG werden monatlich ausgelesen und dokumentiert. Diese Daten umfassen die Wärmemengen von Holzschnitzelheizung, Wärmepumpe und Öl sowie der Strommenge aus dem elektrischen Netz. Aus diesen Daten errechnet sich die Gesamtwärmemenge  $Q_{Gesamt}$  respektive der Gesamtstromverbrauch  $W_{Gesamt}^{El}$  pro Jahr. Dazu liegen Daten zum durchschnittlichen Preis fürs Jahr 2023 vor.

Daraus werden Vergleichsgrößen eines konventionellen Gewächshauses berechnet  $q_{Konv}$  (Gleichung 8).

$$Q_{GH12}^S = Q20.1 + Q20.2 + Q20.4 \quad (6)$$

$$q_{GH12}^S = \frac{Q_{GH12}}{A_{GH12}} \quad (7)$$

$$q_{Konv} = \frac{Q_{Gesamt} - Q_{GH12}}{A_{Gesamt} - A_{GH12}} \quad (8)$$

Unterschiedliche Baustuktur und Temperaturniveau in den Gewächshäusern können dabei nicht berücksichtigt werden.

Die elektrischen Verbrauchsdaten werden auf das mit Kältekompessoren gekühlte Gewächshaus 13 der Meyer Orchideen AG bezogen. Der Verbrauch des GH13 wird mittels Betriebsdauer der Kältemaschine und dem auf die Fläche bezogenen Anteil des Gesamtbedarfs ermittelt (Gleichung 10).

$$w_{GH12}^{El} = \frac{W_{GH12}^{El}}{A_{GH12}} \quad (9)$$

$$w_{konv}^{El} = \frac{W_{Gesamt}^{El} - W_{GH12}^{El} - W_{GH13}^{El}}{A_{Gesamt} - A_{GH12} - A_{GH13}} + \frac{W_{GH13}^{El}}{A_{GH13}} \quad (10)$$

### 3.5 Modell für Netzwerkbetrieb

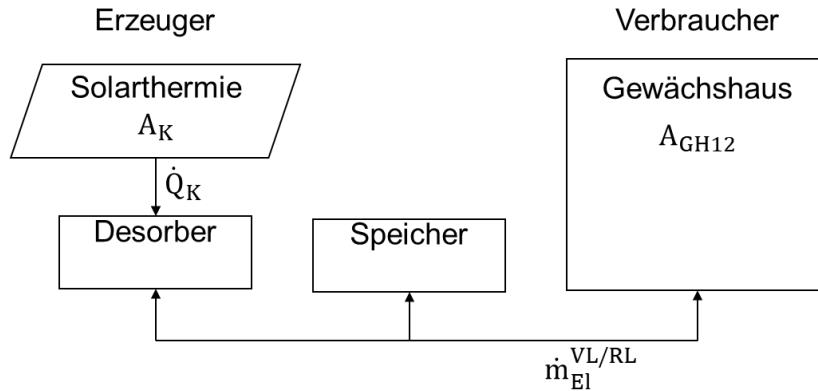


Abbildung 22: Schematisch das simulierte Thermochemisches Netz.

In einem Thermochemischen Netzwerk (Abbildung 22) soll  $q_{GH12}^L$  in Form von Elektrolytlösung  $\dot{m}_{EL}^{VL/RL}$  bereitgestellt werden. In diesem Fallbeispiel wird das Gewächshaus als Verbraucher und einem Erzeuger mit Solarthermieanlage als Antrieb, deren Aufwand, die Kollektorfläche  $A_K$ , über Simulation ermittelt wird. Für Speicherung und Transport, wird der Aufwand des Speichers betrachtet.

Der Erzeugerprozess als geschlossene Anlage ist in Abbildung 23 schematisch dargestellt. Die Zielgrösse der Simulation ist die Kollektorfläche  $A_K$ . Die Wärmeabgabe  $\dot{Q}_0$  erfolgt bei Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$ , die Wärmezufuhr auf Kollektortemperatur  $\vartheta_K$ . Die minimale Temperaturdifferenz in den Wärmeübertragern beträgt  $\Delta T = 5K$ .

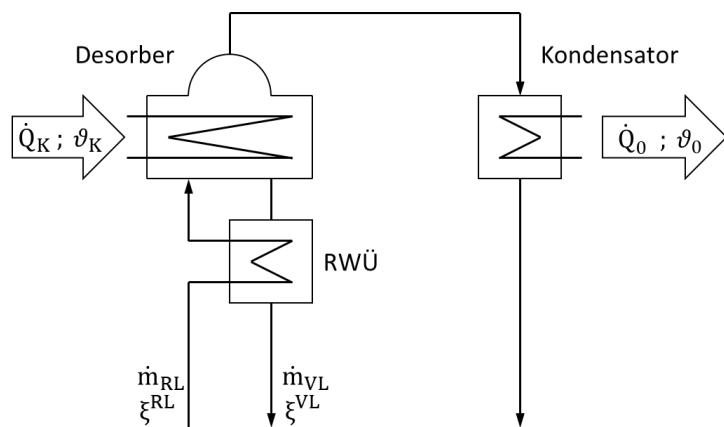


Abbildung 23: Prinzipskizze des Desorbers.

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_0 + H^{VL} - H^{RL} \quad (11)$$

In dieser Simulation wird die für den Austreibungsprozess benötigten Energie  $\dot{Q}_K$  (Gleichung 11) durch eine Solarthermieanlage bereitgestellt. Die Berechnung des spezifischen Wärmeertrages  $\dot{Q}_K$  der Solarthermieanlage erfolgt nach dem Ansatz Klucher, aus Quaschning [7] (Projektarbeiten Broggi [8], Burri [9]), anhand der Wetterdaten (Strahlung E vom Standort Wangen-Brüttisellen), der Kollektordaten (Anhang Kollektordatenblatt), der Kollektortemperatur  $\vartheta_K$  und der Ausrichtung der Kollektoren (Süd, 45° geneigt). Die Kollektortemperatur  $\vartheta_K$  entspricht der Siedetemperatur der konzentrierten Lösung  $\vartheta_{EL}^{LV}$ ,



zuzüglich  $\Delta T$ , beim Betriebsdruck der dem Dampfdruck von Wasser  $p_W^{LV}$  bei Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$ , zuzüglich  $\Delta T$  (Gleichung 12).

In der Simulation lässt sich mit der Gleichung 13 die Kollektorfläche  $A_K$  ermitteln.

$$\vartheta_K = \vartheta_{EI}^{LV}(p_W^{LV}(\vartheta_0 + \Delta T), \xi^{VL}) + \Delta T \quad (12)$$

Der Rekuperator wird in der Simulation mit einer minimalen Triebkraft von  $\Delta T = 5K$  berechnet. Wärmeverluste im Desorber, Kondensator und Rekuperator werden nicht berücksichtigt.

Parameter aus dem Kollektordatenblatt (Anhang Kollektordatenblatt):

$$\eta_0 = 0.754$$

$$\alpha_1 = 3.66$$

$$\alpha_2 = 0.0078$$

$$Q_K = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\eta_0 \cdot E \cdot A_K - (\alpha_1 \cdot A_K \cdot (\vartheta_K - \vartheta_U) + \alpha_2 \cdot A_K \cdot (\vartheta_K - \vartheta_U)^2)) \cdot dt \quad (13)$$

Das Netzwerk wird durch eine Speichersimulation über eine Jahresperiode ( $\tau_2 - \tau_1 = 1$  Jahr) beschrieben. Verluste treten nicht auf. Der Speicher besteht aus einer unbestimmten Menge an Behälter einheitlicher Grösse, die je nach Bedarf mit konzentrierter (Vorlauf) oder verdünnter Lösung (Rücklauf) befüllt werden können. Durch den Speicher sind Verdünnung und Aufkonzentrierung zeitlich voneinander entkoppelt, die Teilnehmer des Netzwerkes können sich nach eigenem Bedarf am Speicher bedienen oder mit verfügbarer Regenerationsenergie diesen mit konzentrierter Lösung auffüllen.

### 3.6 Betriebswirtschaftliche Auswertung

Das Kostenmodell berücksichtigt Investitionskosten  $K_A$  und laufende Kosten für Thermische  $k_Q$  und elektrische Energie  $k_{\text{Elektrisch}}$  spezifisch auf die Energiemenge bezogen. Der Annuitätsfaktor  $\alpha = 1/\tau_{\text{Amort}}$  ohne Berücksichtigung von Kapitaldienst.

Energiekosten werden die durchschnittlichen Kosten der Meyer Orchideen AG fürs Jahr 2023 herangezogen.

Energieträger	$k$ [CHF/MWh]	$\nu$ Anteil am thermischen Bezug Meyer Orchideen AG 2023
Elektrisch	206	-
Holzschnitzel	47	85%
Wärmepumpe	69.25	15%

Abbildung 24: Spezifische Betriebskosten auf Energiemenge bezogen nach Energieträger aufgeschlüsselt.

Anlagekosten  $K_A$  abgeschätzt nach Absprache mit Kunststoffbauern. Preise von Solaranlage und Speicher nach SONITRO [10].



Anlagekosten $K_A$	Spezifischer Preis		Quantität		Total [CHF]
Absorber	1000	CHF / Stk.	8	Stk.	8000
Desorber	1000	CHF / Stk.	1	Stk.	1000
Sonstige Anlage	30000	CHF			30000
Solaranlage	820	CHF/m <sup>2</sup>	100	m <sup>2</sup>	82000
Speicher	100	CHF/m <sup>3</sup>	100	m <sup>3</sup>	10000
Total					<b>131000</b>

Abbildung 25: Anlagekosten  $K_A$  für Gewächshaus sowie Regeneration.

$$k_Q = k_{\text{Holzschnitzel}} \cdot v_{\text{Holzschnitzel}} + k_{\text{Wärmepumpe}} \cdot v_{\text{Wärmepumpe}} \quad (14)$$

Kosten für Wärme  $k_Q$  in Gleichung 14 spezifisch auf Wärmemenge bezogen.

$$\Delta k = -\frac{K_A}{A_{\text{GH12}}} + \alpha \cdot (w^{\text{El}} - w_{\text{konv}}^{\text{El}}) \cdot k_{\text{Elektrisch}} + (q_{\text{GH12}}^S - q_{\text{konv}}) \cdot k_Q \quad (15)$$

Betriebskostendifferenz  $\Delta k$  von Konventionell zu Sorptionsbetrieb, in Gleichung 15 spezifisch auf die Gewächshausfläche bezogen.



## 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### 4.1 Betriebskonzept

#### Parametrierung der Konventionellen Gewächshaussteuerung (Klimacomputer)

Wenn die Sorptionsgestützte Gewächshausklimatisierung aktiviert ist, übernimmt sie die Steuerung der Untertisch- und Oberheizung von der konventionellen Gewächshaussteuerung, kann die Lüftung, Verschattung und Energieschirm jedoch nicht beeinflussen (Abbildung 11). Die Sollwerte der konventionellen Gewächshaussteuerung werden so eingestellt, dass die konventionelle Gewächshaussteuerung innerhalb eines definierten Bereiches keine Regelung der Lüftung vornimmt. Die Parameter werden dabei wie folgt gesetzt:

Tabelle 3: Parametrierung des Klimacomputers

	Optimierte konventionelle Steuerung		Sorptionsbetrieb	
	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert	Unterer Grenzwert	Oberer Grenzwert
Reglerwert Lüftung Tag	19°C	21°C	19°C	26°C
Reglerwert Lüftung Nacht	19°C	22°C	19°C	26°C
Bereich rel. Luftfeuchtigkeit	35%RH	70%RH	35%RH	75%RH
Umluftventilator	EIN		AUS	
Alarmwert Temperatur	Min. 15.0°C	Max. 37.0°C	Min. 15.0°C	Max. 37.0°C
Alarmwert rel. Luftfeuchtigkeit	Min. 20%RH	Max. 95%RH	Min. 20%RH	Max. 95%RH

Bei Überschreitung der kritischen Grenzwerte kommt es laut Meyer Orchideen innerhalb kurzer Zeit zu Schäden am Pflanzbestand und ein Eingreifen ist notwendig. Die Alarmwerte der konventionellen Gewächshaussteuerung sind auf diese Werte eingestellt und werden nicht verändert. Um ein Erreichen dieser Werte zu verhindern werden die Pflanztischtemperaturen (T0.xx, Tabelle 4) überwacht. Bei Überschreitung wird die Sicherheitskette aktiviert, der Sorptionsbetrieb wird gestoppt und es erfolgt eine automatische Übergabe der Steuerung an die konventionelle Gewächshaussteuerung.

#### Steuerungskonzept

Die Betriebsführung der Sorptiven Gewächshausklimatisierung wird in folgende Teilprozesse unterteilt:

- Absorberkreislauf (Beheizung/Kühlung)
- Kiesbefeuchtung
- Untertischheizung
- Oberheizung
- Lösungsmanagement/Regeneration



Absorberkreislauf:

**Ausgleichsbetrieb:** (Steuerkonzept: Absorbersteuerung Task3)

Diese Betriebsphase entspricht der im Kapitel 3.1.2 erläuterten Strategie der adiabaten Prozessführung. Dabei wird der Absorberkreis weder beheizt noch gekühlt, es erfolgt keine Regelung der Vorlauftemperatur ( $T20.7$ ), das Ventil  $V20.7$  öffnet den Bypass zu den Wärmeübertragern  $W20.2$  und  $W20.3$  vollständig. Die Lösungstemperaturregelventile ( $Vx.2$ ) des Absorberkreislaufes werden für den Temperaturausgleich der Absorber maximal geöffnet.

Der Wechsel zwischen Kühl- und Heizbetrieb erfolgt stets über den Ausgleichsbetrieb. Voraussetzung für einen Betriebswechsel ist, dass bei allen Absorbern die Ventile  $Vx.2$  geschlossen sind. Das heißt, dass während dem Heizbetrieb keiner der Absorber Wärme bezieht respektive während dem Kühlbetrieb Wärme abführt.

Die Betriebsarten Heizen und Kühlen werden über das Ventil  $V20.9$ , welches als Umschaltventil zwischen den Wärmeübertragern  $W20.2$  und  $W20.3$  fungiert, geregelt.

Mit der Stellung geschlossen (0%) wird dem Absorberkreislauf Wärme über den Wärmeübertrager  $W20.2$  zugeführt, das System befindet sich im Heizbetrieb. Mit der Stellung offen (100%) wird der Absorberkreislauf über den Wärmeübertrager  $W20.3$  gekühlt, die Anlage befindet sich im Kühlbetrieb.

**Heizbetrieb:** (Steuerkonzept: Absorbersteuerung Task3)

Im Heizbetrieb wird der Absorberkreislauf über den Wärmeübertrager  $W20.2$  beheizt. Die Lösungseintrittstemperatur der Absorptionswäscher ( $Tx.1$ ) wird über eine Kaskadenregelung ( $C20.7$  und  $Cx.1$ ) auf einen Sollwert ( $TSh$ ), der in Abhängigkeit des Temperaturabfalls zwischen der Luftaustrittstemperatur am Absorber und der Lufttemperatur auf dem Pflanztisch ( $dT-PTzukalt[x]=T0.y-Tx.3$ ) und einem Regelungsfaktor #KLAH definiert wird, geregelt.

Über die Ventilstellung zur Lösungstemperierung ( $Vx.2$ ) wird beobachtet, wann der Heizbetrieb endet. Wenn keiner der Absorber mehr Wärme aufnimmt (Ventile  $Vx.2$  sind geschlossen), erfolgt der Wechsel in den Ausgleichsbetrieb. (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task2)

**Kühlbetrieb:** (Steuerkonzept: Absorbersteuerung Task3)

Im Kühlbetrieb wird der Absorberkreislauf über den Wärmeübertrager  $W20.3$  durch das Grundwasser gekühlt. Die Lösungseintrittstemperatur der Absorptionswäscher ( $Tx.1$ ) wird über eine Kaskadenregelung ( $C20.7$  und  $Cx.1$ ) auf einen Sollwert ( $TSk$ ), der in Abhängigkeit des Temperaturunterschieds zwischen der Luftaustrittstemperatur am Absorber und der Lufttemperatur auf dem Pflanztisch ( $dT-PTzuwarm[x]=T0.y-Tx.3$ ) und einem Regelungsfaktor #KLAK definiert wird, geregelt.

Über die Ventilstellung zur Lösungstemperierung ( $Vx.2$ ) wird beobachtet, wann der Kühlbetrieb endet. Wenn über alle Absorber keine Wärme mehr abgeführt wird (Ventile  $Vx.2$  sind geschlossen), erfolgt der Wechsel in den Ausgleichsbetrieb. (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task2)

Durch das Grundwasser kann die Lösung auf ca. 16°C rückgekühlt werden. Daraus resultiert eine Kühlleistung pro Pflanztisch von etwa 600 W (Zuluftstrom: 100 l/s, Lufttemperatur auf dem Pflanztisch: 22°C).

**Kiesbefeuchtung:** (Steuerkonzept Absorbersteuerung Task1)

Die Kiesbefeuchtungsanlage wird an jedem Pflanztisch über die Temperatur im Bereich der Pflanzen ( $T0.y$ ) geregelt. Wird die zulässige Temperatur im Pflanzbereich überschritten ( $T0.yy>T-PTmax$ ), wird die Kiesschüttung, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, über die Ventile  $V0.y$  befeuchtet. Nach dem Befeuchtungsintervall Zeitintervall-PT1, wird das Zeitintervall-PT2 abgewartet (Abbildung 10). Wenn die



Pflanztischtemperatur nach der Wartezeit noch immer über dem Grenzwert T-PTmax liegt, wird das Ventil V0.y erneut während dem Zeitintervall-PT1 geöffnet.

#### *Untertischheizung:* (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task1)

Die Untertischheizung wird zur Kompensation des Wärmeverlustes der konditionierten Luft zwischen Absorber und Pflanztisch eingesetzt. Übersteigt der Temperaturabfall ( $dT-PTmax = T0.yy-Tx.3$ ) an einem der Pflanztische einen definierten Grenzwert dT-PT-UE wird die Untertischheizung mit einer Vorlauftemperatur (TUH), welche in der übergeordneten Steuerung als Einstellparameter definiert wird, in Betrieb gesetzt. Ist der Temperaturabfall dT-PTmax an allen Pflanztischen geringer als dT-PT-UA, wird die Untertischheizung abgestellt.

#### *Oberheizung:* (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task1)

Die Oberheizung wird als Wärmequelle zur Verhinderung von Kondensation an der Gewächshaushülle eingesetzt.

Wenn die Gewächshaustemperatur  $T0.31$  den vorgegebenen Grenzwert TG-OE unterschreitet, wird die Oberheizung in Betrieb gesetzt. Überschreitet die Gewächshaustemperatur  $T0.31$  den vorgegebenen Grenzwert TG-OA, dann wird die Oberheizung ausser Betrieb gesetzt.

Tabelle 4: Sollwerte für die Steuerung (EINSTELLPARAMETER)

T_PT_max	Maximal zulässige Temperatur am Pflanztisch (Kiesbefeuchtung) [°C]
TAMIN	Grenzvorlauftemperatur des Absorberkreislaufes für Aktivierung des Heizbetriebes [°C]
TAMAX	Grenzvorlauftemperatur des Absorberkreislaufes für Aktivierung des Kühlbetriebes [°C]
TL	Sollwert Lufttemperatur am Pflanztisch [°C]
THD	Sollwert Vorlauftemperatur Heizkreisabzweig Desorberkreis [°C]
TD	Sollwert Vorlauftemperatur Desorberkreislauf [°C]
THA	Sollwert Vorlauftemperatur Heizkreisabzweig Absorberkreis [°C]
TAH	Sollwert Vorlauftemperatur Absorberkreislauf im Heizbetrieb [°C]
TAK	Sollwert Vorlauftemperatur Absorberkreislauf im Kühlbetrieb [°C]
dT_PT_UE	Übertemperaturgrenzwert (Abweichung vom Sollwert #TL) der Lufttemperatur über den Pflanztischen (T0_yy), ab der die Untertischheizung in Betrieb geht [K]
dT_PT_UA	Übertemperaturgrenzwert (Abweichung vom Sollwert #TL) der Lufttemperatur über den Pflanztischen (T0_yy), ab der die Untertischheizung abgeschaltet wird [K]
TUH	Sollwert Vorlauftemperatur Untertischheizung [°C]
TG_OE	Grenzwert der Gewächshaustemperatur, ab der die Oberheizung in Betrieb geht [K]
TG_OA	Grenzwert der Gewächshaustemperatur, ab der die Oberheizung abgeschaltet wird [K]
TOH	Sollwert Vorlauftemperatur Oberheizung [°C]
LK	Konzentration der konz_ Lösung (Abbruchkriterium der Desorption) [Ma%]
Mmax	Maximal zulässige relative Luftfeuchtigkeit am Absorberaustritt [%]



## Lüftung und Schirme:

Die Schattierungsschirme werden während des Sorptionsbetriebes von der konventionellen Gewächshaussteuerung nach dem Lichteinfall im Gewächshaus gesteuert. Auch die Lüftungsklappen werden während dem Sorptionsbetrieb von der konventionellen Gewächshaussteuerung gesteuert. Die SPS der Sorptionsgestützten Klimatisierung beeinflusst diese Stellgrößen nicht, die Prozesse laufen parallel.

Die Umluftventilatoren im Gewächshaus 12 werden durch handbetrieb ein- und ausgeschalten und werden nicht von der Konventionellen Gewächshaussteuerung geregelt.

## Lösungsmanagement

### Warteposition der Absorber:

Überschreitet die relative Feuchte der konditionierten Luft einen definierten Grenzwert ( $Mx.1 > Mmax$ ), muss die verdünnte Salzlösung im Absorber durch konzentrierte Lösung ausgewechselt werden. Ist dies nicht sofort möglich, da entweder zu wenig konzentrierte Lösung im Speicher S1 zur Verfügung steht oder kein Speichervolumen für die verdünnte Lösung im Speicher S2 vorhanden ist, befindet sich der Absorber in einer Warteposition. Sollten sich mehrere Absorber in Warteposition für den Lösungswechsel befinden, erfolgt eine zusätzliche Prioritätsvergabe bei Überschreitung des Füllstands  $Lx.4$ : *Lösungswechsel: Priorität.* (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task2)

Befindet sich der Füllstand im Speicher S2 unterhalb des Niveaus  $L40.1$ , kann eine (durch das Füllvolumen der Absorber) bestimmte Anzahl  $n_A$  an Absorbern entleert werden. Des Weiteren muss ausreichend konzentrierte Lösung im Speicher S1 vorhanden sein, damit der Lösungswechsel gestartet werden kann. Liegt der Füllstand im Speicher S1 oberhalb des Niveaus  $L30.2$ , ist genug konzentrierte Lösung im Speicher vorhanden, um  $n_A$  Absorber mit konzentrierter Lösung zu füllen.

### Lösungswechsel im Absorber: (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task3)

Für den Zeitraum des Lösungswechsels (Kapitel 3.3) wird der Pumpenschutz ( $Lx.2$ ) überbrückt. Die Lösungsumwälzpumpe ( $Px.1$ ) bleibt solange in Betrieb, bis der Mindestansaugfüllstand  $Lx.2$  erreicht ist. Die Absorbervorlage wird mittels den Membranpumpen  $Px.2$  in den Speicher S2 (verdünnte Lösung) entleert bis das Niveau  $Lx.1$ : *Lösungswechsel: Entleerung beenden* erreicht wird. Der Prozess wird gemäss den Ausführungen im Kapitel 3.3  $n_A$  Abpumpvorgängen wiederholt. Danach wird die Absorbervorlage mit konzentrierter Lösung aus dem Speicher S1 durch die Membranpumpen ( $P30.1-9$ ) bis zum Füllstand ( $Lx.3$ : *Lösungswechsel: Befüllung beenden*) befüllt.

### Desorberbetrieb: (Steuerungskonzept: Übergeordnete Steuerung Task2)

Der Desorber wird mit verdünnter Lösung aus dem Speicher S2 durch ein Gefälle über das Ventil V40.1 befüllt. Erreicht der Füllstand im Desorber das Niveau  $L10.3$ , wird das Ventil V40.1 geschlossen und der Desorptionsbetrieb startet. Dafür werden die Lösungspumpe  $P10.1$ , der Ventilator  $VE10.1$  und der Desorberheizkreis ( $V20.4, P20.4, V20.6, P20.6$ ) in Betrieb genommen. Das Ventil V10.1 befindet sich in Umlaufstellung. Anhand der Dichtemessung ( $D10.1$ ) und der Lösungstemperatur  $T10.1$  kann die Konzentration der Lösung ermittelt werden. Ist eine Lösungskonzentration von 32 % erreicht, wird der Desorptionsprozess beendet.

Befindet sich der Füllstand im Speicher S1 unterhalb des Niveaus  $L30.3$ , kann der Desorber in den Speicher entleert werden. Dazu wird das Ventil V10.1 in die Entleerposition gebracht und die Lösung durch die Pumpe  $P10.1$  aus dem Desorber gefördert, bis das Füllniveau  $L10.2$  erreicht wird. Nach der Entleerung des Desorbers wird die Pumpe  $P10.1$  abgeschaltet, das Ventil V10.1 auf Umlaufstellung zurückgesetzt und das Ventil V40.1 geöffnet.



## 4.2 Kiesbefeuchtungsanlage

### Pflanzenablagefläche

Um einen reibungslosen Betrieb im Gewächshaus gewährleisten zu können, wurde auf den Pflanztischen eine neue Pflanzablagefläche eingerichtet, welche sich am Aufbau der bereits bestehenden Pflanztische der Meyer Orchideen orientiert. Die tragende Struktur der Ablagefläche wurde mittels Querstreben aufgebaut, welche am Rande des Tisches mit einem L-Winkel versenkt und stabilisiert sind. Die Ablagefläche wurde mit denselben Wellengittern, wie sie bei den anderen Pflanztischen im Gewächshaus bereits zum Einsatz kommen, aufgebaut.

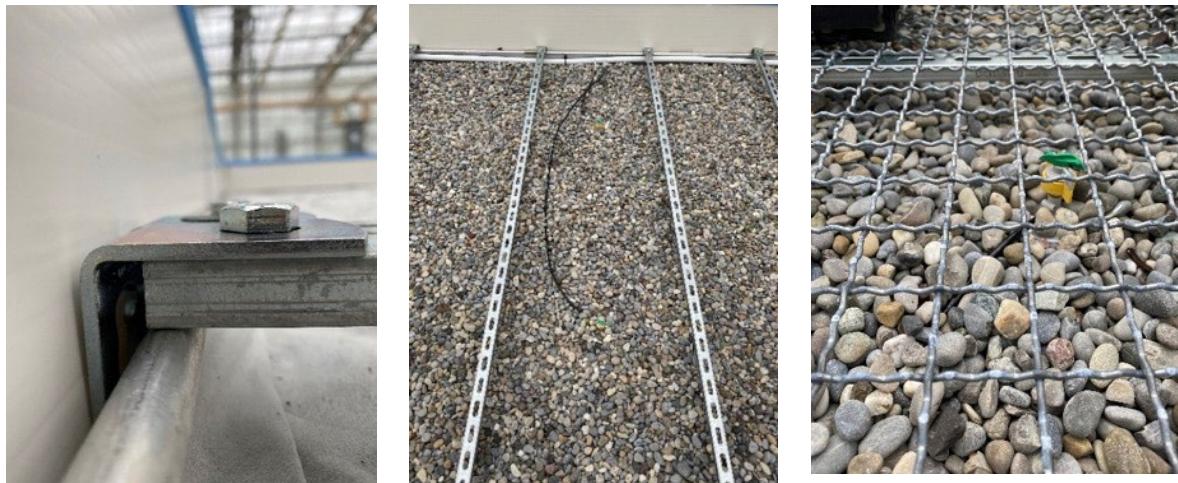


Abbildung 26: Installation der Ablagefläche.

### Wasserspeisung

Die Erschliessung der Pflanztische erfolgt mit einer unter der Decke installierten Wasserleitung, welche jeden Pflanztisch über einen T-Stück Abgang und einer senkrechten Steigleitung mit Wasser versorgt. Nach dem T-Stück ist ein 24V Magnetventil zur Steuerung der Kiesbefeuchtung zwischengeschaltet. Die Speisung des Wasserverteilungsnetzes für die Kiesbefeuchtung erfolgt über einen Abzweig der Hauptleitung zum Gewächshaus 12.



Abbildung 27: Wasserzuleitung über Magnetventile zu den Tischen.



Die Wasserverteilung auf den Tischen erfolgt über eine am Tischrand entlang gezogene Leitung mit doppelten Abgängen zu den Bewässerungsdüsen in einem regelmässigen Abstand von 1m. Die Schlauchabgänge am Rande des Tisches ermöglicht eine flexible Bestückung der Tische mit geringem Installationsaufwand.

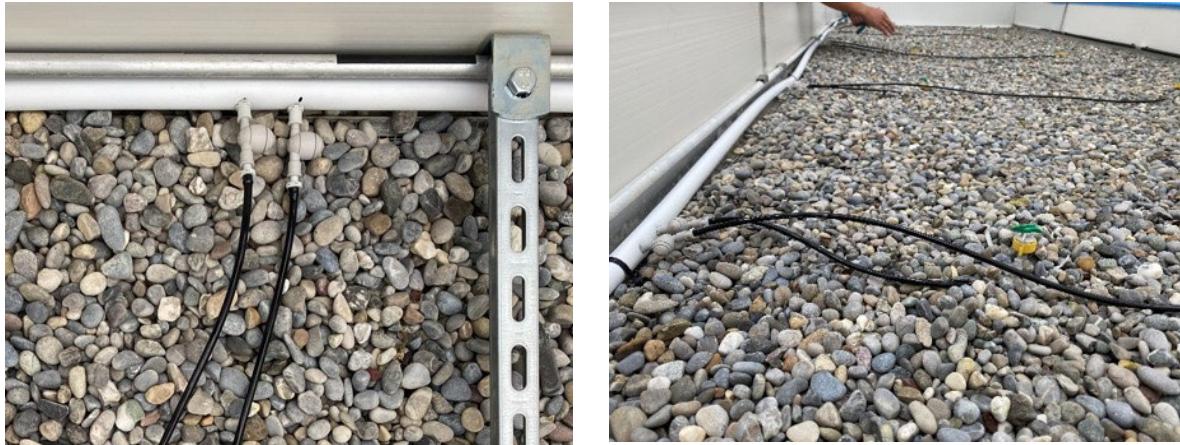


Abbildung 28: Wasserverteilung auf den Tischen.

### Wasserverteilung

Zur Versprühung des Wassers auf dem Tisch kommen konventionelle «Spinnet» Bewässerungsdüsen zum Einsatz. Diese verteilen das Wasser als Tropfen mit einer horizontalen Wurfparabel über der Kiesschüttung und garantieren somit eine gleichmässige Verteilung des Wassers, ohne dass der Pflanzbestand nass wird. Die Düsen sind über ein L-Winkel auf einem Kunststoff Plättchen, welches unter der Kiesschicht versenkt ist und die Position des Plättchens hält, befestigt. Die Verbindung zur Hauptleitung am Tischrand ist mittels Pneumatik Schläuchen und einem Pneumatik Verbindungssystem umgesetzt. Eine gleichmässige Druckverteilung im System wird mittels Netafim Tropfenstop Ventilen erreicht. Diese Ventile öffnen ab einem Leitungsdruck von 3.6 bar wodurch erreicht wird, dass alle Düsen gleichzeitig aktiviert werden und der Leitungsdruck in der Zuleitung erhalten bleibt.

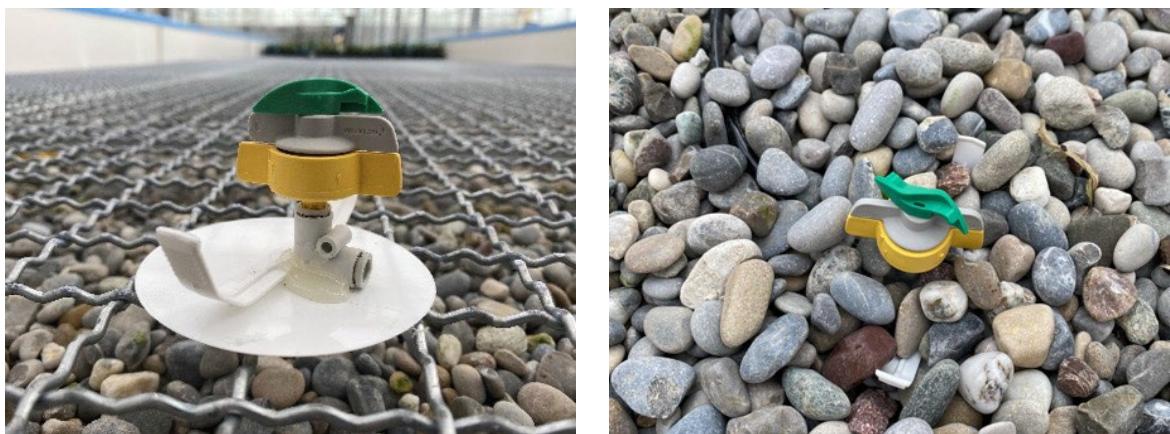


Abbildung 29: Aufbau und Installation der Düsen auf der Kiesschicht.



## Befeuchtungsintervall

Befeuchtungsintervall und Dauer sind in einer Versuchsreihe ermittelt worden (Tabelle 5). Zu häufige respektive zu lange Befeuchtung hat in einer früheren Versuchphase zu tropfendem Kies und durchnässten Töpfen geführt. Wasser an Kies und Töpfen wurden daher in einer Versuchsreihe beobachtet. Zielgröße sind trockene Töpfe und ein benetztes Kiesbett, das nicht tropft. Für alle Tische wurde eine Befeuchtungsdauer von 200ms gewählt. Die Töpfe sind in der Versuchsreihe alle trocken geblieben.

Tisch	Intervall [min]	Kies
9	6	benetzt, tropfend
10	8	benetzt, tropfend
11	12	benetzt, tropfend
12	20	nicht tropfend, vereinzelt trockene Stellen

Tabelle 5: Versuchsreihe am 4. Mai 2023

Bei Intervallzeiten von 6, 8 und 12 Minuten tropft das Kiesbett, daher sind diese zu kurz. Zusätzliche Versuche mit Intervallzeiten von über 20 Minuten zeigten grössere trockene stellen auf dem Kies. Weshalb das 20 Minuten Intervall gewählt wurde.

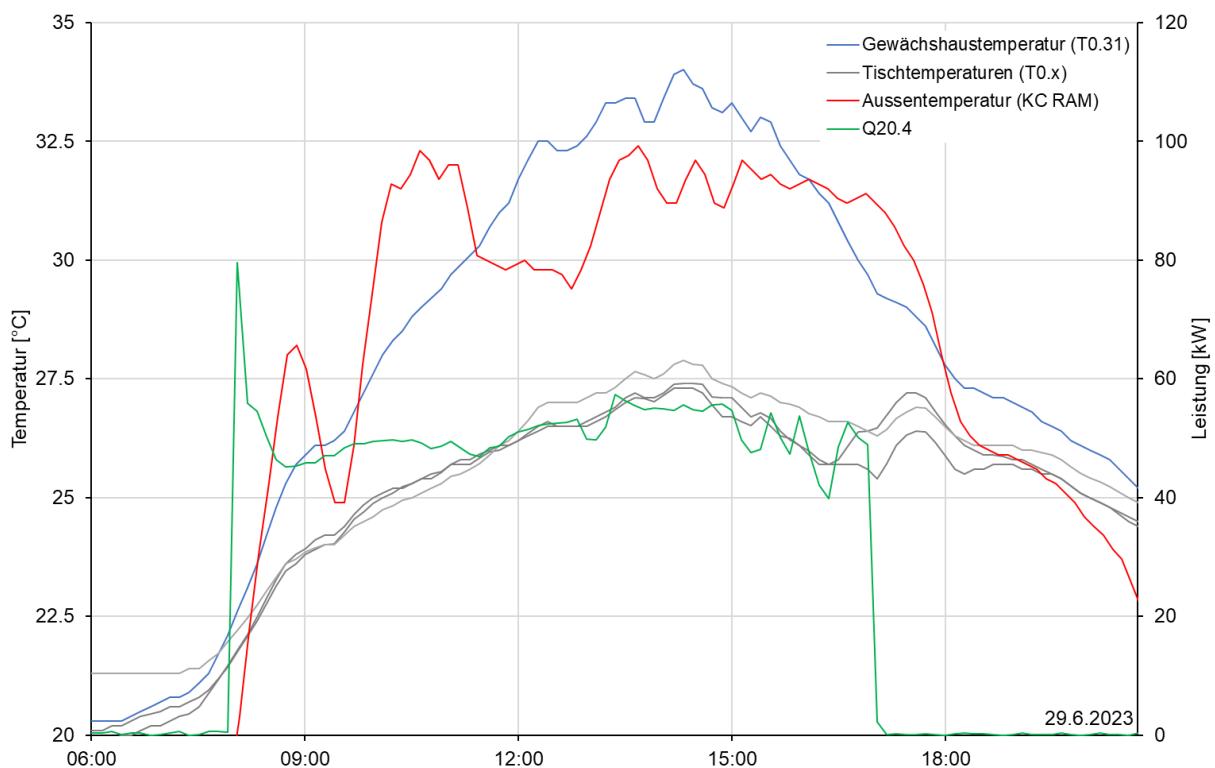


Abbildung 30: Charakteristischer Tag im Kühlbetrieb.

Abbildung 30 zeigt einen charakteristischen Tag im Kühlbetrieb. Es liegt ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Gewächshaustemperatur (T0.31) und Pflanztischtemperaturen (T0.xx) vor.



## Wasserbedarf

Der tägliche Wasserverbrauch übers Jahr ist in Abbildung 31 dargestellt.

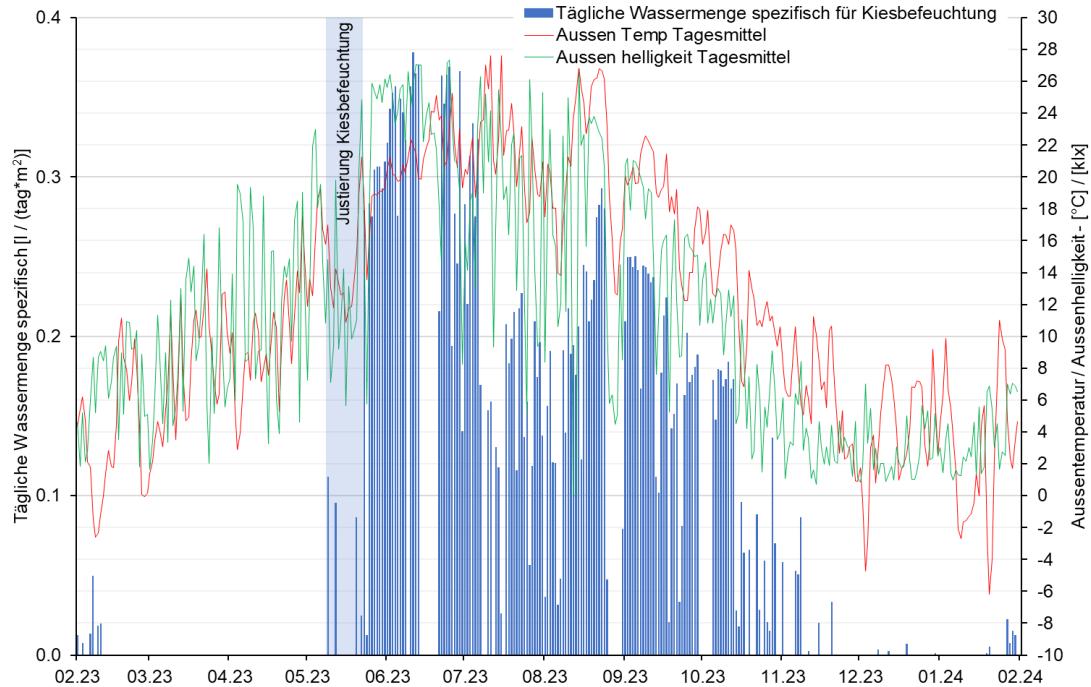


Abbildung 31: Spezifischer täglicher Wasserverbrauch der Kiesbefeuertungsanlage.

Für den Zeitraum vor dem 23. Mai wurde der Wasserverbrauch approximiert ähnlich Abbildung 21 durch Regression in abhängigkeit der Aussentemperatur. In Abbildung 32 den Wasserverbrauch summiert übers Jahr.

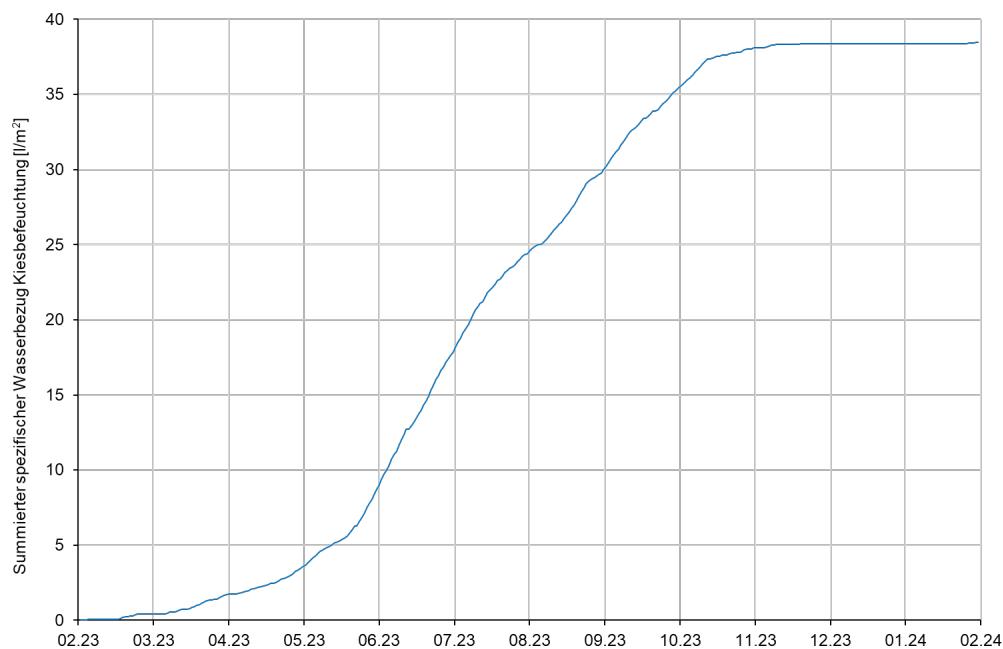


Abbildung 32: Der spezifische Wasserverbrauch der Kiesbefeuertungsanlage beläuft sich auf 40l/m<sup>2</sup> Gewächshausfläche.

## 4.3 Automatisierung

### Lösungstransportsystem

Gemäss den Anforderungen bezüglich der Zeitdauer für den Lösungswechsel von maximal 30 Minuten (Kapitel 2), wurde die Installation der Membranpumpen und Schläuche zwischen den Absorbern und dem Desorber angepasst. Als Förderpumpen werden neu Membranpumpen mit einer Förderleistung von 25 l/min eingesetzt, welche an den Säulen des Gewächshauses montiert sind. Die zwischen den Lösungsspeichern im Desorberhaus und den Absorptionswäschern (LW1-9) im Gewächshaus verlegten 1/2"-Schläuche wurden durch 3/4"-Schläuche ersetzt, damit der Druckverlust durch den erhöhten Volumenstrom nicht höher als 3 bar wird.

Der Betriebsbereich der Membranpumpen befindet sich in Abhängigkeit der Schlauchlänge und dem dazugehörigen Druckverlust von 1.2 bis 2 bar bei einer Förderleistung von 22.5 l/min bis 24.5 l/min. (Abbildung 33)

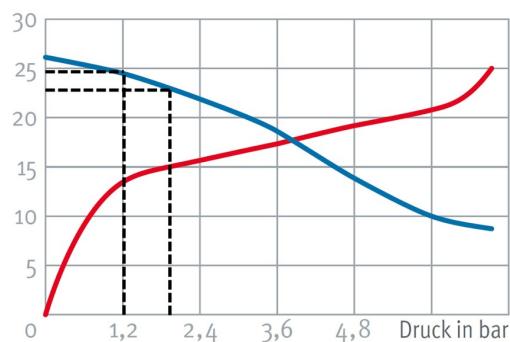


Abbildung 33: Kennlinie der Membranpumpen mit Förderleistung in l/min (blau) und Stromaufnahme in Ampere (rot).

Betriebsausfälle dargestellt in Abbildung 20 sind grösstenteils auf Kristallbildung in den Membranpumpen zurückzuführen Abbildung 34 (links). Neben den Ablagerungen in den Pumpen hatte sich Carnallit in den Tanks der Konzentrierten Lösung abgesetzt (Abbildung 34, rechts). In anderen Anlageteilen wurden keine Ablagerungen festgestellt.



Abbildung 34: Membranpumpe mit Kristallbildung (links). Kristallbildung im konzentrierten Lösungstank (rechts).

Eine XRD (Röntgendiffraktion) Untersuchung der gefundenen Kristalle (Abbildung 35) zeigt, dass es sich um Carnallit ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) handelt. Zusätzlich wurden Hexahydrat und Bihydrat von Magnesiumchlorid als nebenbestandteile nachweisen.

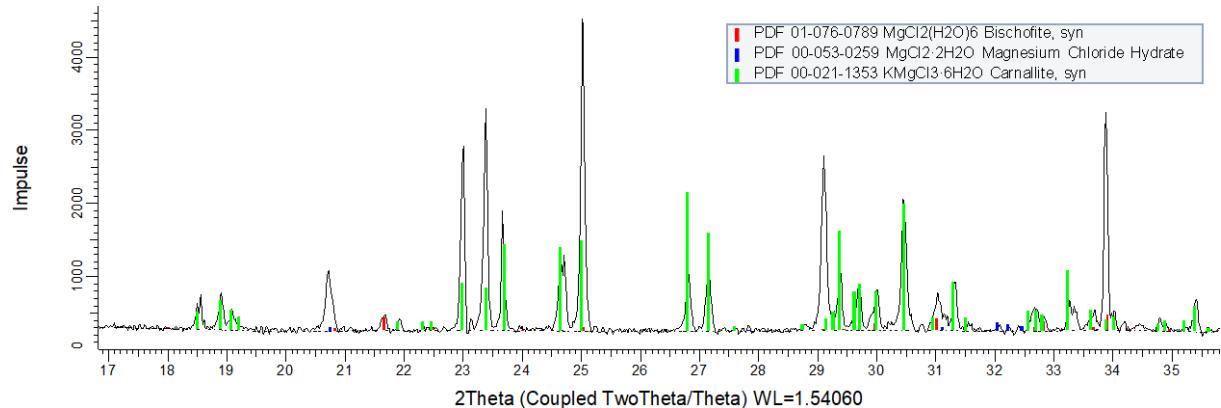


Abbildung 35: Röntgendiffraktion der untersuchten Kristalle aus der Membranpumpe.

Ob das Kalium im Prozess eingetragen wird, ist eine wichtige Frage dieser Problematik. Um dies zu ermitteln, wurde eine ICP-OES Analyse (inductively coupled plasma optical emission spectrometry) Analyse durchgeführt. In Drei Lösungen wurde der Kaliumanteil prozentual an den gemessenen Ionen bestimmt.

Lösung 1: Versuchsanlage	Dezember 2022	3.18%
Lösung 2: Versuchsanlage	März 2023	2.41%
Lösung 3: Unbenutzte Lösung	Februar 2023	2.74%

Ein Vergleich mit unbenutzter Lösung einer anderen Charge vom selben Lieferanten zeigen einen ähnlich hohen Kaliumanteil. Über die Zeit ist der Kaliumgehalt in der Lösung der Versuchsanlage gesunken, dies aufgrund der Ablagerungen im konzentrierten Lösungstank. Aus diesen Erkenntnissen lässt sich schliessen, dass das Kalium nicht im Anlagenbetrieb in die Lösung gelang, sondern schon in der Lösung war bei deren Beschaffung.

### Aufbau SPS-Steuerung

Die Schnittstelle zur konventionellen Gewächshaussteuerung ist gemäss den Ausführungen in Kapitel 3.3 umgesetzt und die Planung der SPS Steuerung wurde im Frühling 2021 mit der Fertigstellung des Steuerungskonzeptes (Anhang: Steuerkonzept) abgeschlossen. Die Steuerung ist im Bau und wird seit Februar 2022 in Betrieb genommen.

Der Schaltschrank der übergeordneten Steuerung befindet sich neben dem Eingang des Gewächshauses und fungiert als zentrale Steuerungseinheit. Über ein Display (Abbildung 36) können die Wäscher bedient, Regelparameter eingestellt und Messdaten in Echtzeit angezeigt werden. Am Schaltschrank der Übergeordneten Steuerung gibt es zwei Schalter zum Einschalten respektive Ausschalten des Sorptionsbetriebes. Der Schaltschrank der übergeordneten Steuerung dient als Hauptverteilung der elektrischen Anschlüsse an die Unterstationen und Wäscher ( Abbildung 37).

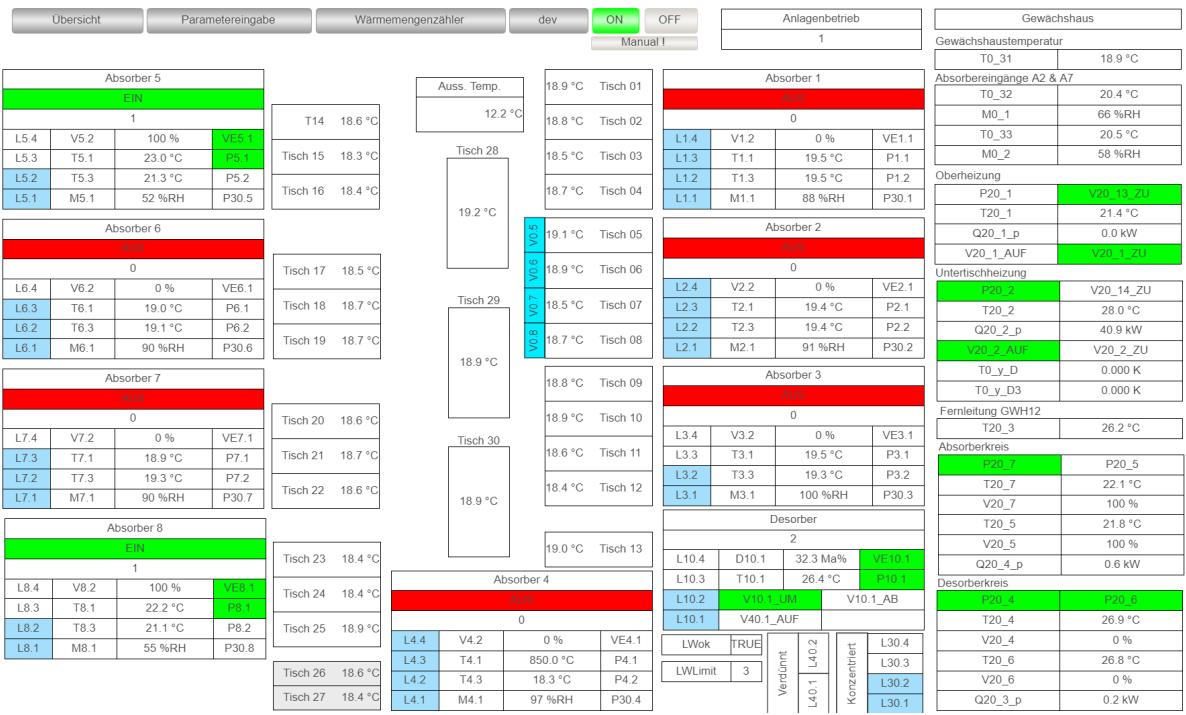


Abbildung 36: Darstellung des Bediendisplays der Übergeordneten Steuerung.

Pro Absorber ist dezentral ein baugleicher Schaltschrank mit einer eigenen SPS, welche die Absorber steuert und als Unterstation zur Übergeordneten Steuerung fungiert, verbaut. Die Wäscher regulieren die Pflanztischtemperaturen selbstständig, indem sie die Lösung über den Absorberkreislauf temperieren. Sie aktivieren bei erhöhtem Kühlbedarf die Kiesbefeuungsanlage und kommunizieren mit der Übergeordneten Steuerung, wenn ein Lösungswechsel benötigt wird (Kapitel 4.1). An den Schaltschränken der Wäscher gibt es einen Schalter, mit dem der Absorber z.B. für Wartungsarbeiten vom Strom genommen werden kann und einen Schalter zur Überbrückung der Sicherheitskette im Inneren der Schaltschränke.

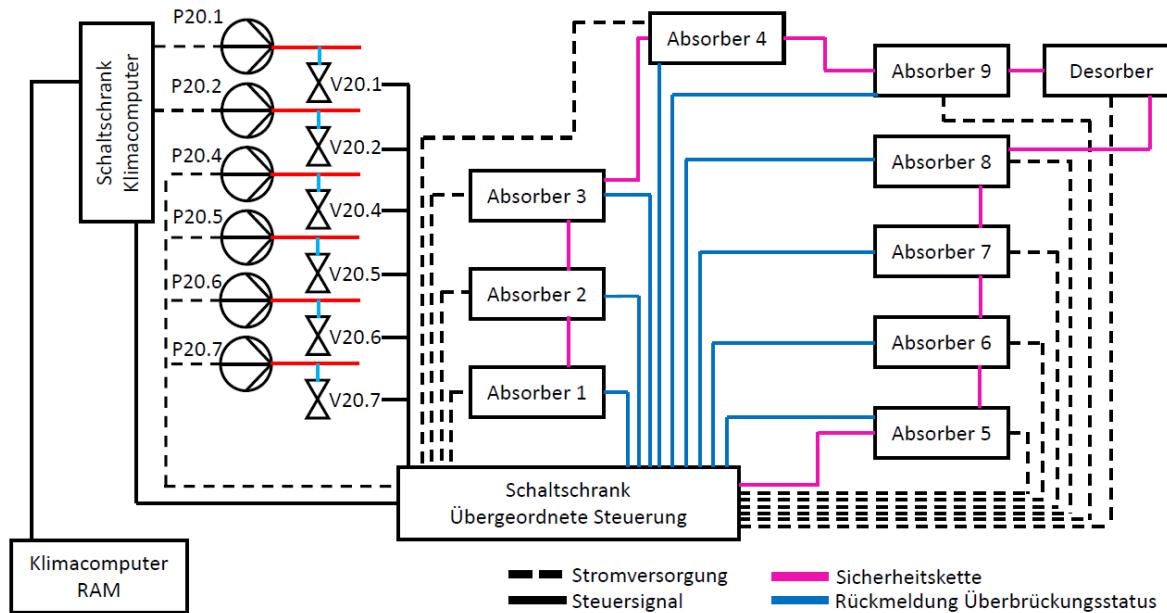


Abbildung 37: Plan Schaltschrankposition und Darstellung Sicherheitskette.

Auch die Steuerung des Desorbers erfolgt dezentral mit einer eigenen SPS Steuereinheit, welche in die Sicherheitskette der gesamten Anlage eingebunden ist. Der Desorber konzentriert Salzlösung selbstständig auf, wenn im Speicher S2 genug verdünnte Lösung vorhanden ist und entleert die konzentrierte Lösung in den Speicher S1, wenn dieser genug freies Volumen für deren Speicherung hat.

### Sicherheitskette

Sowohl in den Absorptionswäschern (LW1-9) als auch im Desorber (LW10) und in den Speichern (S1, S2) sind konduktive Füllstandssensoren installiert, die bei einem zu hohen (Überlaufschutz) oder zu niedrigen Füllstand (Trockenlaufschutz der Tauchkreiselpumpen) über eigensichere Grenzschalter, welche in die Sicherheitskette der Gesamtanlage integriert sind, die Sorptive Klimatisierungsanlage abschalten. Bei der Festlegung der oberen Niveaugrenzen in den Wäschern (LW1-10) wurde das Holdup der Anlage berücksichtigt. Die Funktion aller Niveaustandabschaltungen wurde erfolgreich getestet.

Die Ausrüstung der Pflanztische mit Temperatursensoren zur Sicherheitsüberwachung der Temperatur im Bereich der Pflanzen (T0.101 – T0.128) sowie die Installation der Temperaturüberwachung am Desorber (T10.2) ist im zweiten Quartal 2021 erfolgt. Die Einbindung in die Sicherheitskette erfolgt über Sicherheitstemperaturbegrenzer, welche die Überwachung eines unteren und eines oberen Grenzwertes und den Einsatz einer programmierbaren Ansprechverzögerung ermöglicht. Alle Komponenten der Sicherheitskette sind nach Auslegung im Steuerungskonzept hardwaremäßig in Serie geschaltet. Mit dem hardwaremässigen Überbrückungsschalter in den Schaltschränken der Absorber kann die Sicherheitskette für den jeweiligen Absorber überbrückt werden. Dies ermöglicht die Deaktivierung eines Absorbers und dessen Überwachung über das Bediendisplay, sodass die Anlage mit den übrigen Absorbern normal weiterarbeiten kann. So können einzelne Absorber für Revisionsarbeiten deaktiviert werden, ohne dass die Sicherheitskette unterbrochen und somit die gesamte Anlage deaktiviert wird. Die Überbrückung der Sicherheitskette an den Absorbern wird an die Übergeordnete Steuerung kommuniziert ( Abbildung 37).



### **Schnittstelle zum Klimacomputer**

Die Kopplung des Sicherheitsüberwachungssystems an die konventionelle Klimasteuerung (Klimacomputer) der Meyer Orchideen wurde bis Ende Q3 2021 abgeschlossen. Die Schnittstellen zu den Modulen der RAM GmbH wurden im Rahmen der Planung gemäss den Vorgaben in Kapitel 3.3 definiert. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Verteilung der Lufttemperatur im Gewächshaus während dem sorptionsgestützten Klimatisierung nicht mehr gleichmässig ist. Da die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung des Klimacomputers nicht in unmittelbarer Nähe der Pflanzen erfolgt, kann ein Messunterschied zwischen den Steuergrössen des Klimacomputers und der sorptionsgestützten Gewächshausklimatisierung entstehen. Um diesen Unterschied zu kompensieren, muss der Toleranzbereich von Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit des Klimacomputers ausgeweitet werden. Die Toleranzgrenzen sind im Kapitel 4.1 aufgeführt.

#### 4.4 Energie und Lösungsbedarf Ergebnisse

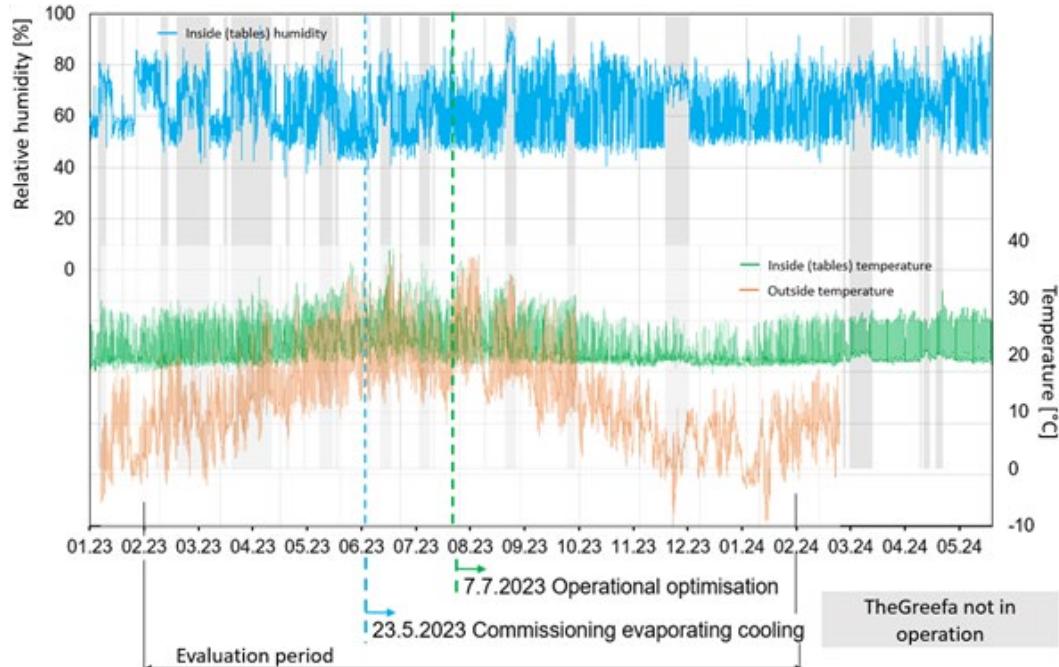


Abbildung 38: Feuchte und Temperaturverlauf auf den Pflanztischen im Betriebszeitraum.

Die Konditionen im Pflanzbereich für den Auswertungszeitraum. Im Anlagebetrieb sind typischerweise tiefere Luftfeuchtigkeiten vorzufinden.

Abbildung 39 zeigt einen charakteristischen Verlauf eines Tages im Heizbetrieb. Tagsüber bei Strahlungseintrag wird keine Heizung oder Absorberbetrieb benötigt. Nimmt bei Sonnenuntergang die Strahlung ab, fallen auch die Tischtemperaturen. Heizung (Q20.1 + 2 + 3) und Absorber werden aktiviert um die Tischtemperaturen (T0.x) im Zielbereich zu halten.

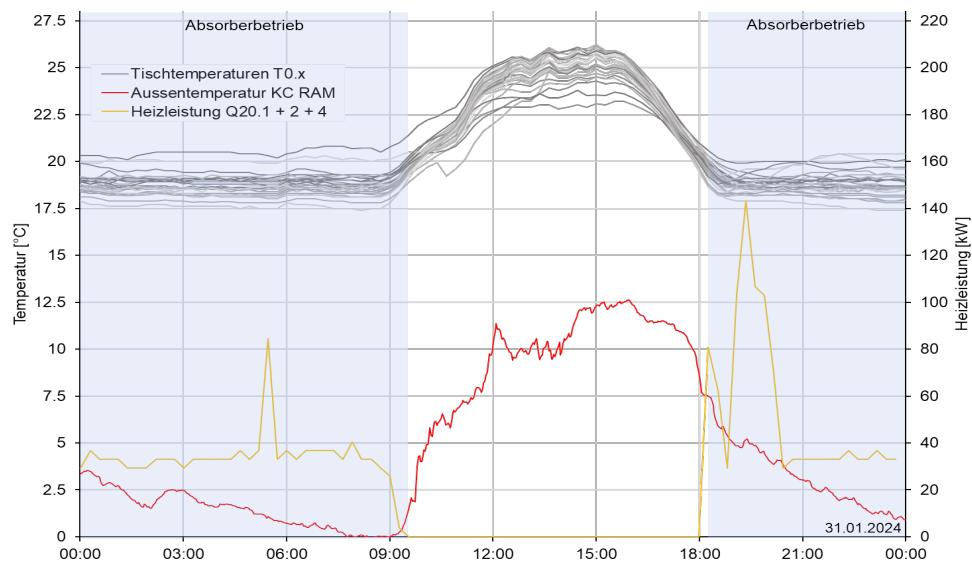


Abbildung 39: Charakteristischer Verlauf eines Tages mit tiefen Aussentemperaturen.



Abbildung 40 zeigt die spezifische auf die Gewächshausfläche bezogene absorbierte Wassermenge  $m_{des}^W$  aus Gleichung 3 übers Jahr.

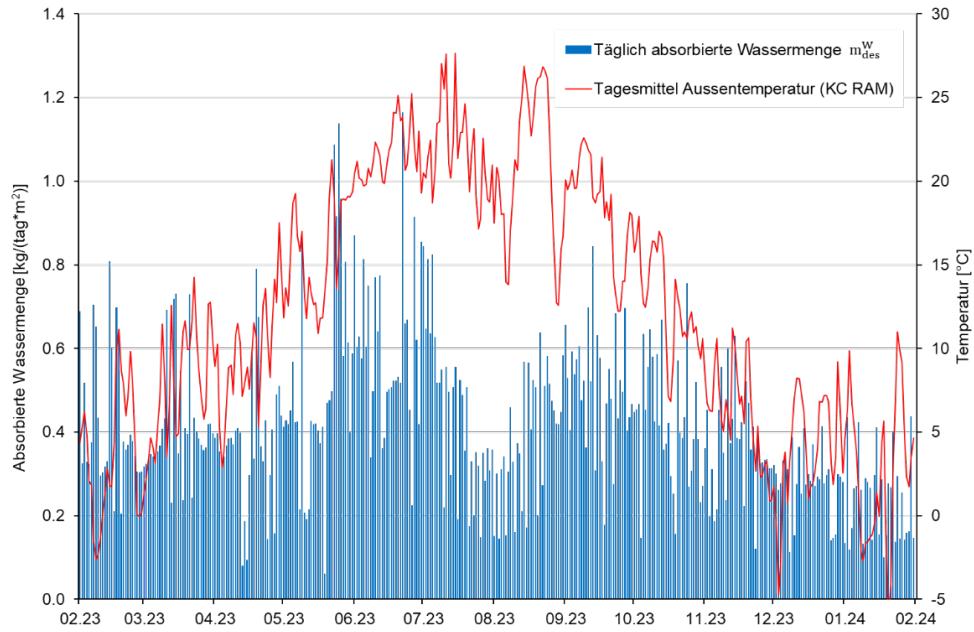


Abbildung 40: Die täglich Absorbierter Wassermenge übers Jahr.

Abbildung 40 zeigt den spezifischen auf Gewächshausfläche bezogenen Lösungsbezug  $v_{des}^{EL}$  (Gleichung 4) konzentrierter Lösung übers Jahr summiert. Übers Jahr werden  $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$  bezogen. Die Verbrauchscharakteristik ist übers Jahr relativ Konstant.

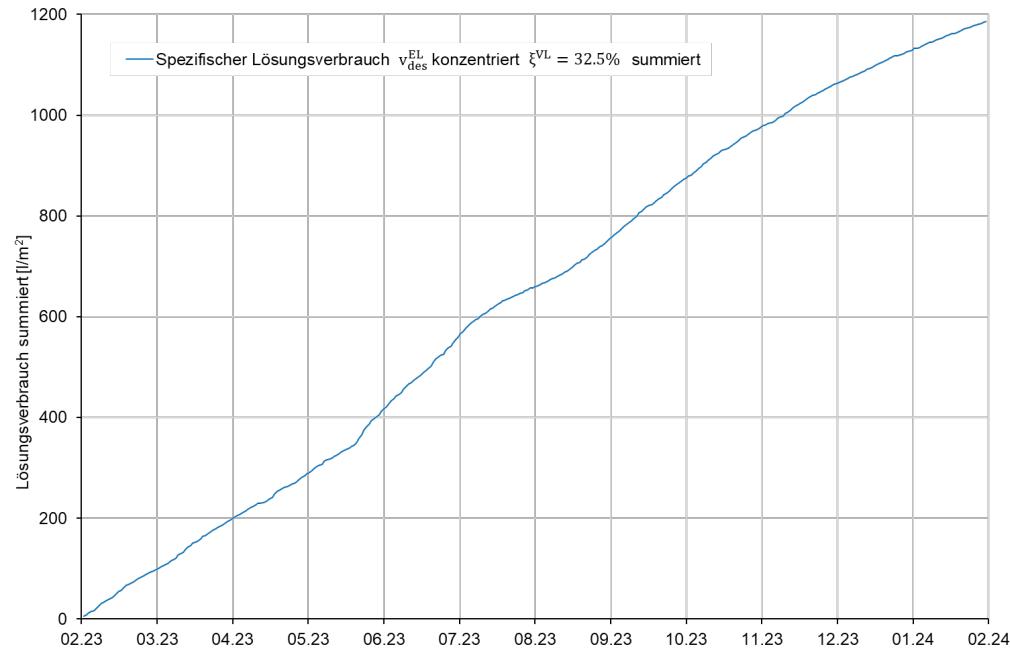


Abbildung 41: Spezifischer Verbrauch konzentrierter Lösung auf Gewächshausfläche bezogen übers Jahr summiert.

Abbildung 42 zeigt den spezifischen Wärmebezug  $\dot{q}_{GH12}$  Gleichung 6, tagesweise übers Jahr.

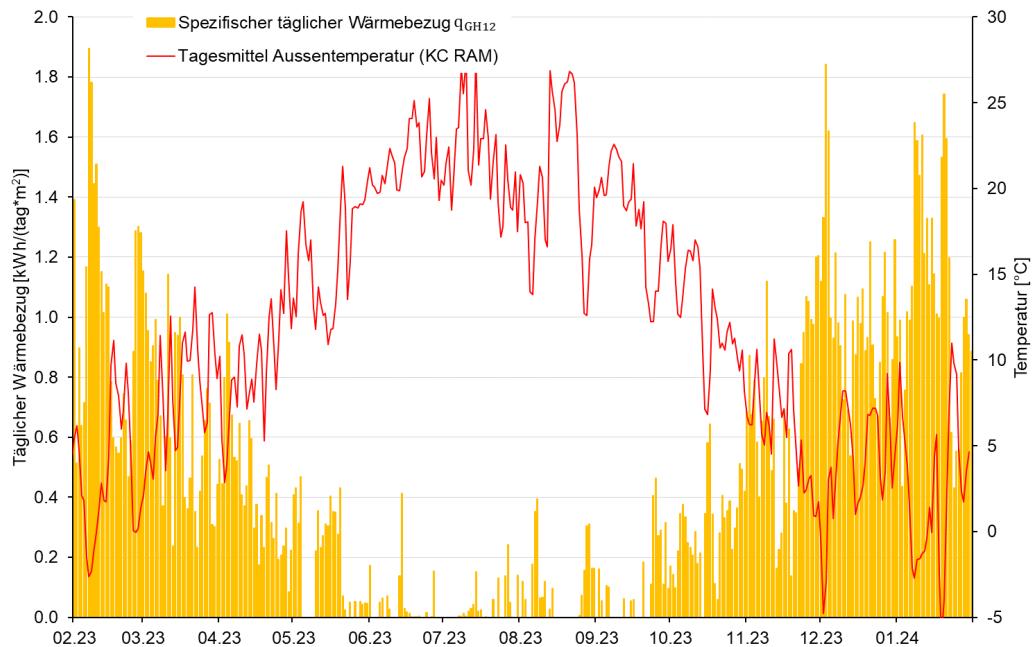


Abbildung 42: Täglicher spezifischer Wärmebezug auf Gewächshausfläche bezogen über das Jahr.

Abbildung 43 zeigt den Latentwärmeverbrauch  $q_{GH12}^L$  und den sensiblen Wärmebezug  $q_{GH12}^S$  als prozentualer Vergleich am konventionellen Wärmebezug  $q_{Konv}$  (100%).

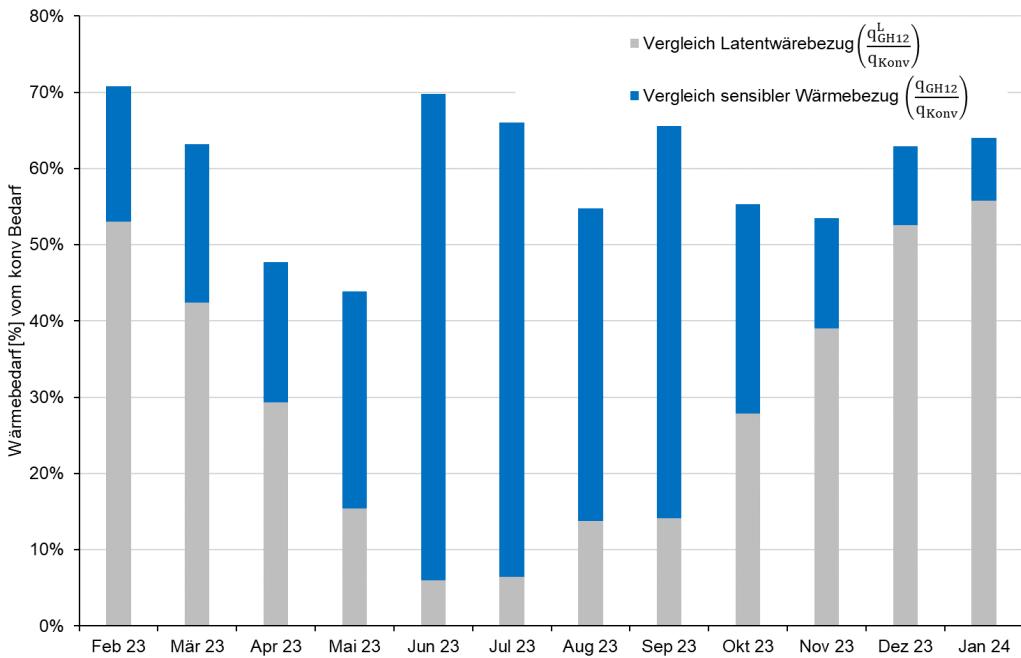


Abbildung 43: Wärmeverbrauch der Sorptionsanlage auf den konventionellen Verbrauch bezogen.

Abbildung 44 zeigt den spezifischen elektrischen Bedarf,  $w_{GH12}^{El}$  aus Gleichung 9, der Versuchsanlage.

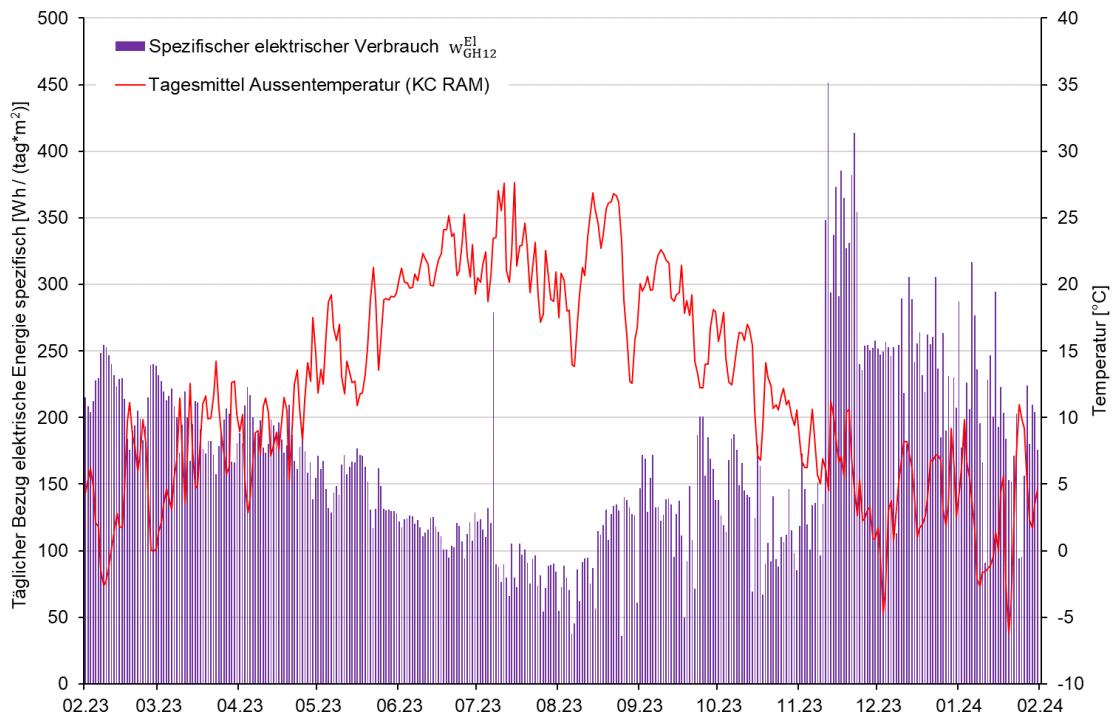


Abbildung 44: Tägliche spezifische elektrische Energie der Sorptionsanlage auf Gewächshausfläche bezogen.

Abbildung 45 zeigt den elektrischen Bezug der Versuchsanlage  $w_{GH12}^{El}$  als prozentualer Vergleich am konventionellen Bezug  $w_{Konv}^{El}$  (100%).

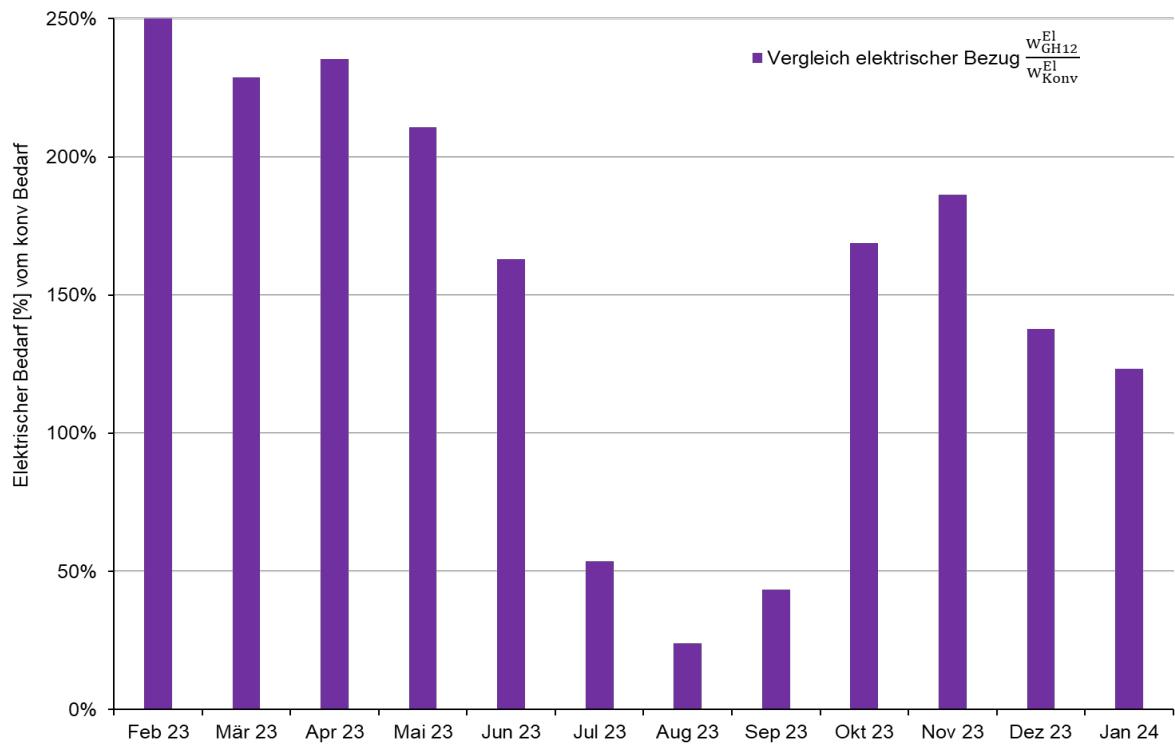


Abbildung 45: Elektrischer Anteil der Absorptionsanlage am konventionellen elektrischen Verbrauch.



Die Kuchendiagramme in Abbildung 46 sind Energiemengen übers Jahr.

Im linken Diagramm ist der volle Kreis der konventionelle Wärmebezug  $q_{\text{konv}}$ , entsprechend lässt sich die Einsparung an Wärmeenergie sowie deren Einteilung in sensible Wärme (Bezug übers Heizsystem) und latente Wärme (Bezug über die Salzlösung) auslesen.

Im rechten Diagramm ist der volle Kreis der elektrische Bezug der Versuchsanlage  $w_{\text{GH12}}^{\text{El}}$  und darin der konventionelle Bezug elektrischer Energie  $w_{\text{konv}}^{\text{El}}$ . Daraus lässt sich der Mehrverbrauch an elektrischer Energie der Sorptionsanlage auslesen.

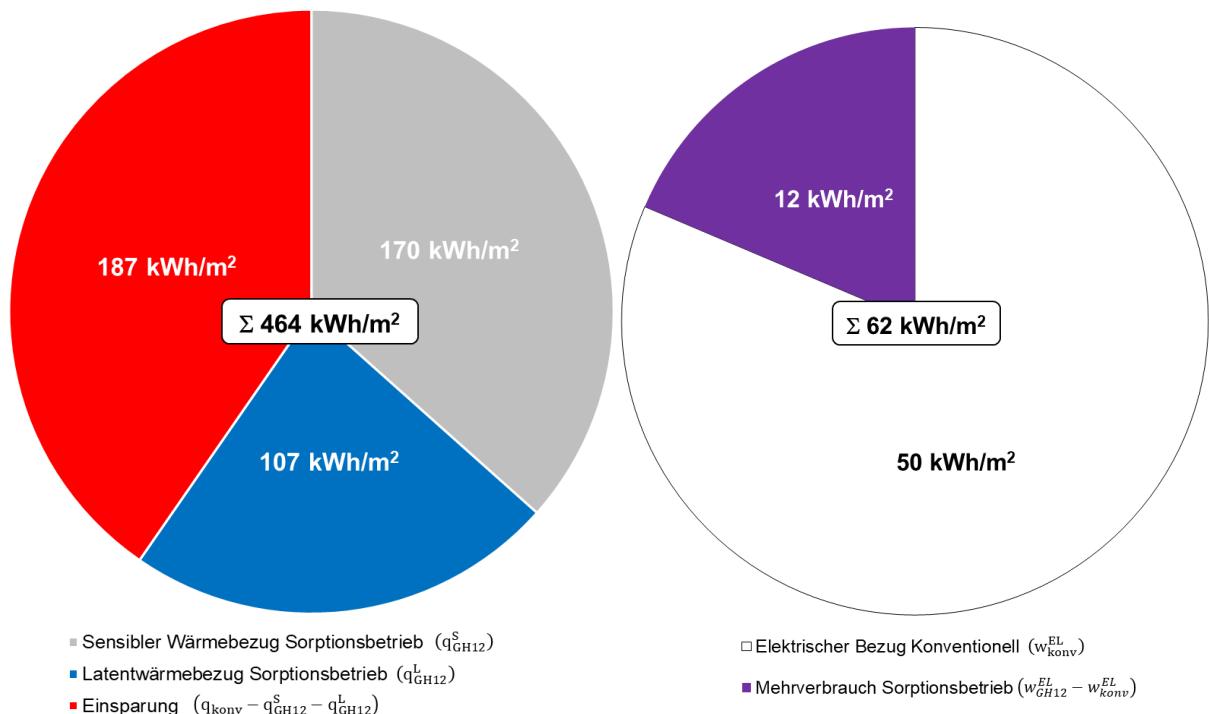


Abbildung 46: Kuchendiagramme für den spezifischen thermischen und elektrischen Verbrauch auf die Gewächshausfläche bezogen.

In Tabelle 6 Ergebnisse zusammengefasst über den Auswertungszeitraum von 12 Monaten.

		Spezifisch (Fläche GH12)	Einheit	Gleichung	Abbildung	Absolut (GH12, 600m²)	Einheit
Absorbierte Wassermenge	$m_{\text{Des}}^{\text{W}}$	0.15	$\text{m}^3/\text{m}^2$	3	39	91	$\text{m}^3$
Benötigte Lösungsmenge konzentriert	$v_{\text{El}}^{\text{VL}}$	1.2	$\text{m}^3/\text{m}^2$	4	40	700	$\text{m}^3$
Wärmemenge Latent GH12	$q_{\text{GH12}}^{\text{L}}$	107	$\text{kWh}/\text{m}^2$	5	-	64	$\text{MWh}$
Wärmemenge Sensibel GH12	$q_{\text{GH12}}^{\text{S}}$	170	$\text{kWh}/\text{m}^2$	6 / 7	41	102	$\text{MWh}$



Wärmemenge Konventionell	$q_{\text{Konv}}$	464	$\text{kWh}/\text{m}^2$	8	45	278	MWh
Elektrischer Bezug GH12	$w_{\text{GH12}}^{\text{El}}$	62	$\text{kWh}/\text{m}^2$	9	45	37	MWh
Elektrischer Bezug Konventionell	$w_{\text{Konv}}^{\text{El}}$	50	$\text{kWh}/\text{m}^2$	10	45	30	MWh

Tabelle 6: Übersicht über die Ergebnisse aus dem Auswertungszeitraum von 12 Monaten.

## 4.5 Ergebnisse Simulation

Abbildung 47 zeigt aufsummiert übers Jahr die desorbierte Wassermenge aus der Simulation. Der von der Anlage absorbierten Wassermenge  $m_{des}^W$  aus Gleichung 3 gegenübergestellt. Der Wirkungsgrad der Solarthermieanlage ist abhängig von 2 Grössen, der globalen Strahlung und der thermischen Verluste. Im Gegensatz zu konventioneller Solarthermienutzung sind die thermischen Verluste übers Jahr annähernd Konstant bei der Nutzung in einem thermochemischen Netzwerk. Daraus resultieren keine grossen Ertragsschwankungen im Jahresverlauf. Der Speicher kompensiert die Schwankungen der Strahlungsleistung.

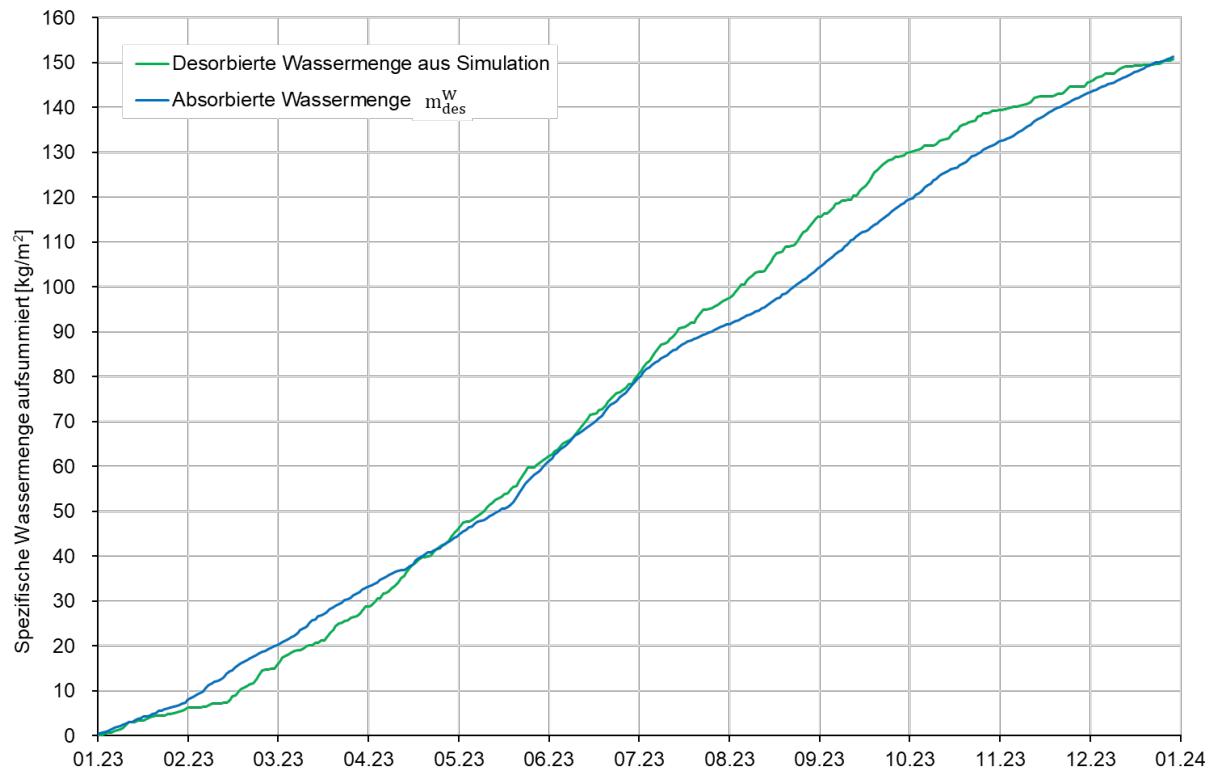


Abbildung 47: Simulierte desorbierte Wassermenge und absorbierte Wassermenge.

Abbildung 48 zeigt den Speicherbedarf resultierend aus simulierter Regenerationsleistung und Lösungsbedarf der Anlage  $V_{des}^{VL}$  (Gleichung 4). Die Simulation ergibt eine Solarthermieanlage mit Flachkollektoren auf einer Fläche von 100m<sup>2</sup>, das benötigte Speichervolumen beträgt 100m<sup>3</sup>.

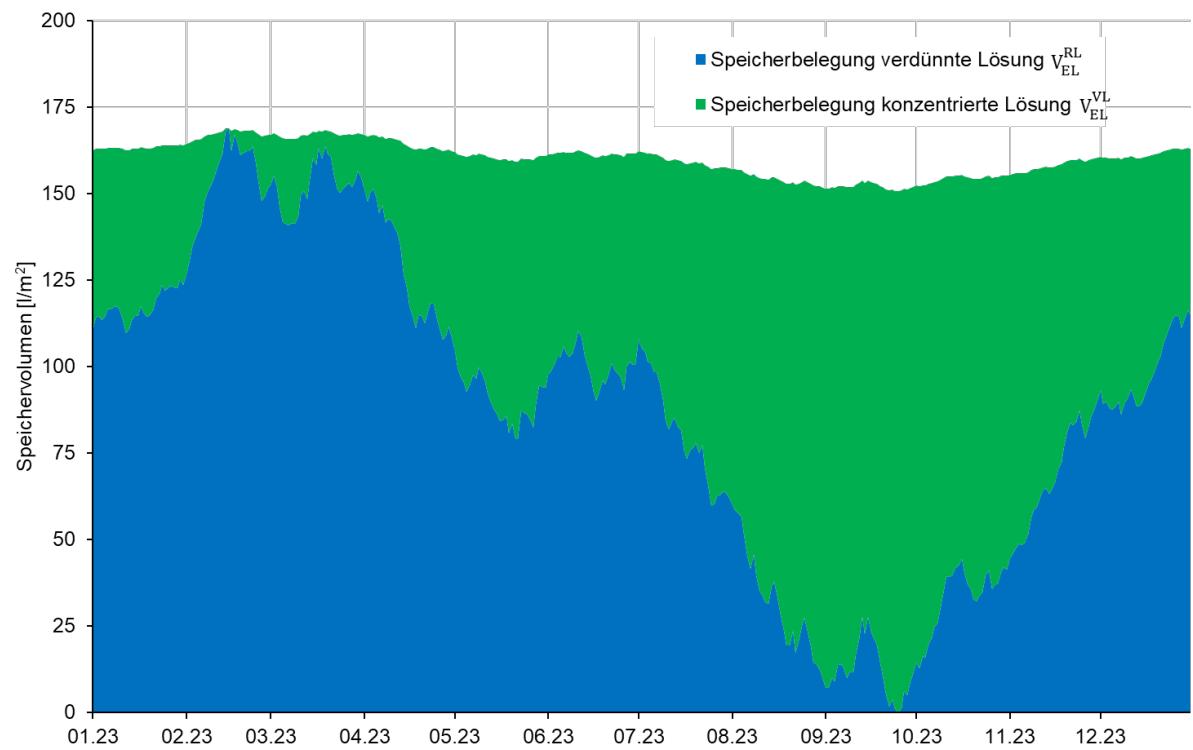


Abbildung 48: Lösungs- Vor- und Rücklauf, simuliert die benötigte Speichergrösse.



## 4.6 Ergebnisse betriebswirtschaftliche Auswertung

Abbildung 49 zeigt die Amortisationszeit anhand der Betriebskostendifferenz (Gleichung 15) über die Betriebszeit der Anlage. Wie der Abbildung zu entnehmen ist mit einer Amortisationszeit von rund 18 Jahren zu rechnen.

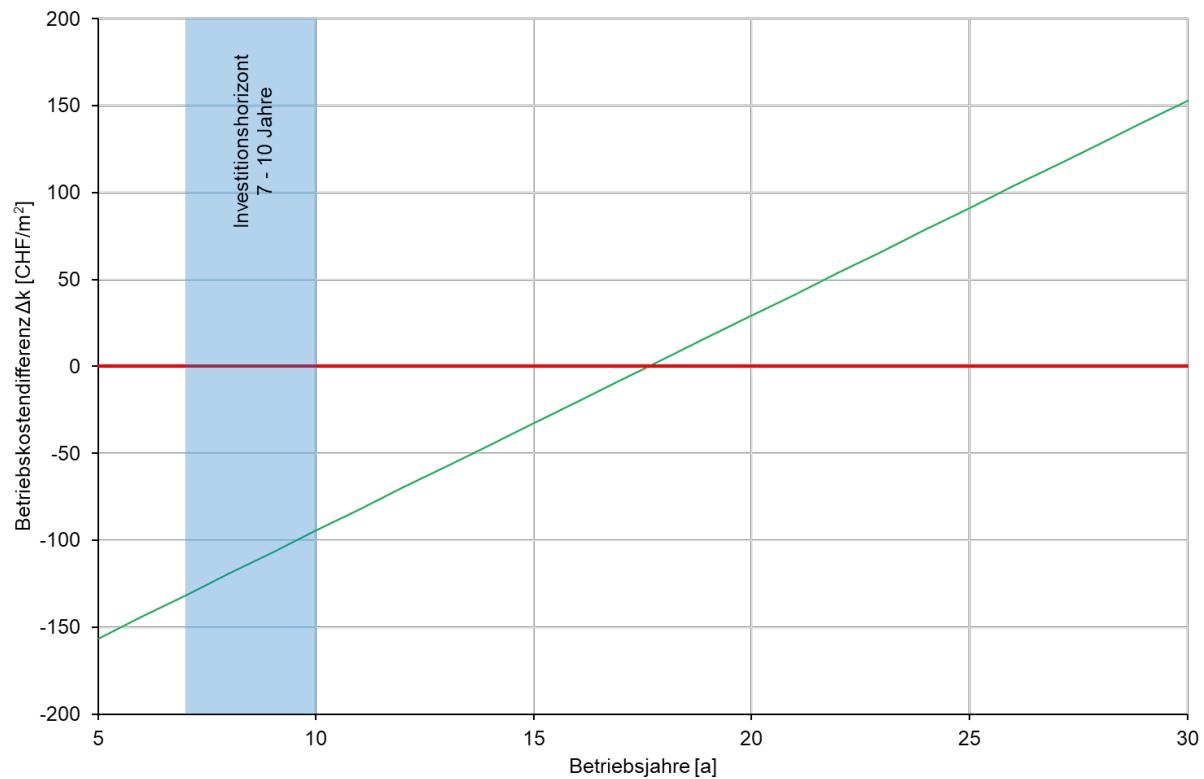


Abbildung 49: Amortisationszeit: Betriebskostendifferenz über die Betriebsjahre.



## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Lösungstransportsystem zwischen den Absorptionswäschern (*LW1-9*), den Pufferspeichern (*S1* und *S2*) und dem Desorber (*LW10*) wurde gemäss den aktualisierten Anforderungen angepasst und erfolgreich getestet. Eine Niveauüberwachung in den Wäschern (*LW1-10*) und in den Speichern (*S1* und *S2*) wurde installiert und in eine Sicherheitskette eingebunden, welche die Sorptive Klimatisierungsanlage bei einer Fehlfunktion automatisch abschaltet. Die Funktion aller Füllstandabschaltungen wurde ebenfalls erfolgreich getestet. Die Auskoppelung der Heizungsregelung aus der Konventionellen Steuerung funktioniert.

Der Kühlbetrieb und die Kiesbefeuchtungsanlage funktionieren störungsfrei im Dauerbetrieb. Vorgabeparameter wie Lösungskonzentration, Befeuchtungs- Intervall und -Dauer wurden optimiert. Die vorgegebenen Zielwerte (Tischtemperatur 15 – 26°C) werden eingehalten. Messdaten wurden ausgewertet und eine Betriebsoptimierung vorgenommen.

Der Heizbetrieb konnte mit Zuschaltung der Untertischheizung im Dauerbetrieb sichergestellt werden. Entsprechende Betriebsparameter wurden optimiert. Die zentrale Luftverteilung hat sich für den Heizbetrieb als nicht optimal erwiesen. Aufgrund der grossen Temperaturänderungen in den Zuluftkanälen wird empfohlen die Absorber dezentral näher zur Pflanze zu bringen. Diese Erkenntnisse konnten in diesem Projekt nicht umgesetzt werden, sind aber ins Projekt Sonitro [10] eingeflossen und konnten dort erfolgreich umgesetzt werden.

Die SPS Stuerung hat sich im Betrieb bewährt. Die Integration in die Prozesssteuerung der Gewächshausanlage funktioniert. Das Gewächshauspersonal wurde im Umgang mit der Sorptionsanlage instruiert. Die Sorptionsanlage wurde während des Betriebes vom Gewächshauspersonal bedient. Die ZHAW hat bei technischen Problemen Support geleistet.

Die Anlage wurde im Rahmen des Projekts in einem Dauerbetrieb von 17 Monaten betrieben.

Messdaten zum Anlagebetrieb und den Konditionen auf den Pflanztischen wurden aufgezeichnet und ausgewertet.

Referenzwerte wurden anhand der Verbrauchsdaten des Gewächshausbetriebes berechnet.

Der Energieverbrauch der Sorptionsanlage konnte in den Vergleich mit benachbarten Gewächshäusern gestellt werden.

Regenerations- und Salzlösungsbedarf wurden ausgewiesen.

Der Energieverbrauch konnte wie erwartet gesenkt werden. Im Zeitraum des Dauerbetriebes wurde eine Reduktion des Gesamtenergiebedarfs um 34% erreicht. Der Bedarf an elektrischer Energie lag etwas höher als prognostiziert. Dieser liesse sich aber durch den Einsatz von effizienteren Pumpen und Ventilatoren, einer Minderung der Lufttransportwege sowie dem Einsatz grösserer Wärmetauscher senken.

Zur Auswertung des Aufwandes für die Regeneration und Speicherung der Salzlösung in einem Netzwerk wurde eine Simulation erstellt. Für das Gewächshaus mit einer Grundfläche von 600 m<sup>2</sup> wird für die Regeneration eine Solarfläche von 100 m<sup>2</sup> sowie einen Speichervolumen von 100 m<sup>3</sup> benötigt.

Die Betriebswirtschaftliche Auswertung ergab aufgrund der hohen Investitionskosten eine Amortisationszeit von 18 Jahren. Das liegt über dem im Gewächshausbau üblichen Investitionshorizont von 7 – 10 Jahren.

Die Meyer Orchideen AG hat sich dafür entschieden die Anlage nicht weiter zu betreiben. Dies aufgrund einer anderen Nutzung des Gewächshauses. Und weil keine Wartungsfirma existiert, die einen entsprechenden technischen Service und Support anbieten könnte ist der Betrieb risikobehaftet. Die Schmid Hutter AG verfügt nicht über Erfahrung im Umgang mit Salzlösungssystemen.



Es wurde kein Thermochemisches Netz projektiert weil die Anlage nicht weiterbetrieben wird.

Die im Rahmen des Pilotprojektes entwickelte Technologie wird jedoch innerhalb des Projektes «Flows» (ZHAW-interne Ausschreibung «Power to X») zur Klimatisierung von Laborräumen im neu errichteten Gebäude (Bezug voraussichtlich Anfang 2027) auf dem ZHAW-Campus Winterthur-Technikumstrasse weiterverwendet.

Im Pilotprojekt konnten viele praktische Erfahrungen zum Betrieb von Energieversorgungsnetzwerken, welche mit thermochemischen Fluiden (Salzlösung) betrieben werden, gesammelt werden. Der Wissenszuwachs fliesst in neue Projekte des IEFE ein (z.B. SwissSTES, Innoswiss: 107.395 FS-EE).



## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das IEFE koordiniert das Horizon2020-Projekt "TheGreefa, Thermochemical fluids in greenhouse farming" (Grant Agreement-101000801), welches im Oktober 2020 begonnen wurde und eine Laufzeit von 44 Monate hat. Das Konsortium von "TheGreefa" besteht aus 12 Partnern aus 7 Ländern Europas und Afrika. Das Projekt verfolgt das Ziel, die CO<sub>2</sub>-Emission in der Landwirtschaft zu senken. Im Rahmen des Projektes werden Anwendungen verschiedener Absorptionstechnologien zur Luftklimatisierung hinsichtlich deren Möglichkeiten zur Energiebedarfsreduzierung und Wasserrückgewinnung untersucht.

Das Projekt «The Greefa» wurde von der Europäischen Kommission als «Radarprojekt» [11] ausgezeichnet. «The Greefa» ist Mitglied und war an der Gründung beteiligt der Forschungsallianz AREA ZERO [12], welche verschiedene Forschungsprojekte aus der Thematik erneuerbare Energienutzung in der Landwirtschaft vereint.

Die Ergebnisse des BFE-Pilotprojektes (Sorptionsgestützte Gewächshausklimatisierung im Sommerbetrieb) sind in das Horizon2020-Projekt "TheGreefa" eingeflossen. Innerhalb des "TheGreefa"-Projektes wurde für die Klimatisierungsanlage in Wangen noch ein Betriebskonzept für den Winterbetrieb entwickelt und umgesetzt. Die Ergebnisse dieser Entwicklungsphase, insbesondere die Betriebsergebnisse von einem Dauerbetrieb über eine Jahresperiode, sind in beide Projekte (BFE-Pilotprojekt und Horizon2020-Projekt) eingeflossen.

Im "TheGreefa"-Projekt werden neben der Anwendung im Gewächshaus der Meyer Orchideen AG noch andere Einsatzfälle einer sorptionsgestützten Klimatisierung unter verschiedenen klimatischen Bedingungen in Europa praktisch untersucht. Ziel des Projektes ist es, neben der Entwicklung und Demonstration verschiedener Anwendungen sorptionsgestützter Klimatisierungs- und Trocknungs-technologien auch deren praktische kommerzielle Umsetzung in verschiedenen Europäischen Ländern zu analysieren und zu fördern. Eine Kombination des nationalen Pilot-Projektes und des europäischen Horizon2020-Projektes führt zu umfassenderen Ergebnissen in beiden Projekten.

Im Rahmen von zwei Ende 2020 abgeschlossenen ZHAW-internen Projekten hat das IEFE zusammen mit dem Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen (IUNR) der ZHAW in Wädenswil einerseits Anwendungserfahrungen mit der Sorptiven Gewächshausklimatisierung sammeln können (Versuchsbetrieb mit diversen Pflanzen auf unterschiedlichen Pflanztischkonstruktionen) und andererseits deren Einsatz in Verbindung mit Indoor-Farming untersucht.

Innerhalb des BFE-Forschungsprojektes SONITRO [10] hat das IEFE eine Sorptiven Niedertemperaturtrocknungsanlage für Kräuter entwickelt. Im Vordergrund steht der Nachweis, dass die Produktqualität des Trockengutes durch den neuartigen Prozess nicht negativ beeinflusst wird. Weiterhin ist auf Basis der Untersuchungen eine Simulation des Gesamtprozesses (inklusive Arbeitsmittelspeicher und solarthermischer Regeneration) für einen Jahresproduktionszyklus aufgestellt worden, um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu analysieren.

Im Rahmen einer Projektarbeit wurde im Herbstsemester 2020 in Zusammenarbeit mit dem Verein Insel Museum Rheinau untersucht, wie historische Gebäude auf der Klosterinsel in Rheinau durch Nutzung von Absorptionsprozessen klimatisiert werden können. Das Projekt soll jetzt, nach einem Unterbruch seitens Verein Insel Museum Rheinau, mit uns als Partner weitergeführt werden.

Im Rahmen einer ZHAW-internen Finanzierung hat das IEFE ein kompaktes System für eine absorptionsgestützte Raumklimatisierung, das in einem Büro des IEFE in Betrieb ist. Dadurch wird der Betrieb unter realen Bedingungen getestet und das System damit hinsichtlich des Energiebedarfs, Steuerung und Komfort von Klima, Geräuschen und Luftverteilung innerhalb des Raumes weiteroptimiert.



Die Ökologie und die Technologiepotentiale der thermochemischen Netzwerke wurden innerhalb des BfE-Projektes TCology (SI 502368-01) vom IEFE und zwei weitere Instituten an der ZHAW untersucht (Projektende Q2 2024).

In der internationalen Zusammenarbeit mit den Projektpartnern TU Berlin und Watergy sind wertvolle Synergien entstanden, die im Zusammenhang mit anderen Projekten weitergeführt werden.



## 8 Literaturverzeichnis

- [1] «Horizon2020-Projekt (grant agreement No. 695780),» <https://www.h-disnet.eu>.
- [2] «BFE-Projekt SPEQUA - Thermische und elektrische Speicher in Gebäuden und Quartieren (Forschungsprogramm Energie in Gebäuden / BFE-Vertragsnummer SI/500987-01),» 2016.
- [3] S. Danesi, C. Koller und T. Bergmann, «Thermochemische Energieversorgungsnetzwerke, 20. Status-Seminar "Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt",» ETH-Zürich, 2018.
- [4] «Videopräsentation ZHAW SOE Forschung H Disnet,» [https://www.youtube.com/watch?v=QkS\\_p7zCHh4&feature=emb\\_title](https://www.youtube.com/watch?v=QkS_p7zCHh4&feature=emb_title).
- [5] «Projektbericht H-DisNet - Technical/Economic report,» 05.01.2020.
- [6] C. Jenni, «Klimatisierung eines Gewächshauses durch einen offenen Sorptionsprozess - Experimentelle und theoretische Studie zur Ermittlung von Auslegungsparametern,» MSE Vertiefungsarbeit, Winterthur, 2019.
- [7] V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, München: Carl Hanser Verlag, 2022.
- [8] J. F. P. Broggi, «Recherche und Potentialabschätzung für ein thermochemisches Energieversorgungsnetzwerk,» ZHAW IEFE Vertiefungsarbeit, Winterthur, 2019.
- [9] E. P. P. Burri, «Theoretische Untersuchung zu einer solarthermischen Regeneration Thermochemischer Fluide,» IEFE ZHAW, Winterthur, 2019.
- [10] S. D. T. B. L. V. C. Koller, «SONITRO - Sorptive Niedertemperaturtrocknung Nr. SI/502013-01,» BfE, Bern, 2023.
- [11] «Radarprojekt "The Greefa" - Humidity and air temperature control based on renewable energy coupled to energy loss free storages,» [Online]. Available: <https://innovation-radar.ec.europa.eu/innovation/52808>. [Zugriff am 14 06 2024].
- [12] «AREA ZERO - Alliance for Renewable Energy in Agriculture and Zero Fossil Energy,» [Online]. Available: <http://area-zero.eu/>. [Zugriff am 14 06 2024].



## 9 Anhang Dokumente

Steuerungskonzept:

zhaw\_steueringskonzept\_gwhWangen\_220616.pdf

Messstellen- und Apparateverzeichnis:

zhaw\_Verzeichnis Messstellen und Apparate\_22-06-16.pdf

Elektrische Leistungsmessung am Absorber:

Elektrische Leistungsmessung am Absorber.pdf

Datenblatt Solarthermieanlage:

Kollektor Datenblatt\_K1.5 SPF Cobra AK 2.8V.pdf