

Endbericht zum Projekt

**WISSENSCHAFTLICHE
BEGLEITFORSCHUNG ZUM
FÖRDERPROGRAMM
„SOLARTHERMIE – SOLARE
GROßANLAGEN 2021
1. JURIERUNG“**

Autoren

Christian Fink, Projektleitung
Walter Becke
Manuel Baumgartner
Lorenz Leppin
Peter Gruber
Roland Kerschenbauer

AEE – Institut für Nachhaltige Technologien

Harald Dehner

FH-OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

Forschungsgruppe ASiC

Gleisdorf, im September 2025

Auftraggeber

Klima- und Energiefonds

Leopold-Ungar-Platz 2/ Stiege 1/4. OG/Top 142
1190 Wien



Beauftragt im Rahmen des Förderprogramms „Solarthermie – Solare Großanlagen“ – (GZ C108882)

Programmabwicklung:

Kommunkredit Public Consulting

Türkenstraße 9
1092 Wien



Auftragnehmer und Projektleitung:

AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

A-8200 Gleisdorf, Feldgasse 19

Tel.: +43-3112 5886 -14

Fax: +43-3112 5886 -18

E-Mail: c.fink@aee.at

www.aee-intec.at



Projektpartner:

FH-OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

Forschungsgruppe ASiC

Ringstraße 43a, A-4600 Wels

www.asic.at



Inhalt

1	KURZFASSUNG	4
2	EINLEITUNG	6
3	ÜBERBLICK ÜBER DIE BEGLEITFORSCHUNGSPROJEKTE	8
4	BESCHREIBUNG DER TÄTIGKEITEN IN VERBINDUNG MIT DEN MESSANLAGEN IM BERICHTSZEITRAUM.....	9
5	VERBREITUNGSAKTIVITÄTEN	11
6	KENNZAHLEN AUS SIMULATION UND MESSUNG IM ANLAGENVERGLEICH	13
7	BESCHREIBUNG DER PROJEKTE UND DARSTELLUNG DER RELEVANTEN MESSERGEBNISSE.....	16
	7.1 Anton Paar GmbH, Stmk.....	16
	7.2 Trocknungsanlage Kutschera, OÖ.....	48
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	62

1 Kurzfassung

Österreich kann im Bereich kleiner Heizung-Warmwasser-Kombinations-Anlagen auf eine lange und sehr erfolgreiche Historie verweisen. Große Solarthermieranlagen stellen hier ein bisher wenig genutztes Potential dar. Um eine verstärkte Erschließung dieses Potentials erreichen zu können, bedarf es technologischer Weiterentwicklungen und eine Reduktion der Endkundenpreise.

Vor diesem Hintergrund definierte der Klima- und Energiefonds im Arbeitsprogramm 2010 erstmals einen Förderschwerpunkt für große solarthermische Anlagen in gewerblichen Anwendungen („Solare Prozesswärme in Produktionsbetrieben“, „Solare Einspeisung in netzgebundene Wärmeversorgung“, „Hohe solare Deckungsgrade in Gewerbe und Dienstleistungsgebäuden“ und „Kombinierte Anwendungen zum solaren Kühlen und Heizen“). Bisher wurden zehn erfolgreiche Ausschreibungen durchgeführt und es wurden Förderzusagen an knapp 380 Projekte vergeben. Als zentrale Instrumente des Förderprogramms wurden einerseits eine spezielle Anreizförderung und andererseits eine wissenschaftliche Programmbegleitung gewählt.

Die Hauptaufgabe der wissenschaftlichen Programmbegleitung liegt dabei in der Durchführung von Einreichberatungen für die Förderwerber, der technischen Unterstützung im Umsetzungsprozess sowie der nachfolgenden messtechnischen Begleitung ausgewählter Projekte über zumindest ein Jahr. Neben der Einleitung von Optimierungsschritten bei den konkreten Projekten, gilt es die Erkenntnisse aus dem Messprogramm gezielt in der Weiterentwicklung der Technologieschwachstellen und beim Aufzeigen von weiterführendem Forschungsbedarf einzusetzen.

Das Begleitforschungsteam war im gegenständlichen Berichtszeitraum (Dezember 2021 bis September 2025) mit den im Monitoringprogramm befindlichen Projektverantwortlichen in intensivem Kontakt. Dabei galt es im ersten Schritt neben dem Projektstatus (Umsetzungszeitplan) insbesondere die technischen Details (wie z.B. Anlagenhydraulik) und die Details zum Monitoringkonzept abzuklären. In weiterer Folge wurden die Datenanbindung umgesetzt und der Anlagenbetrieb analysiert und bewertet.

Die durchgeführten Arbeiten und Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kontakthaltung mit den im Monitoringprogramm befindlichen Projektverantwortlichen und dessen Partnern (Anlagenbetreiber, Planer, ausführende Unternehmen, Regelungsfirmen, etc.)
- Unterstützungsleistungen bei der technischen Projektumsetzung (Umsetzung des „Stand der Technik“)
- Systemhydraulik und Monitoringkonzept – Erstellung von harmonisierten Blockschaltbildern
- Begleitung bei der Umsetzung und Durchführung der Inbetriebnahme des Monitoringsystems
- Laufende Verbesserungen betreffend Messkonzept und Messtechnik (Sensorik, Datenlogger, Schnittstellen mit Regelungsgeräten, Datentransfer, automatisierte Ausleseroutine, Datenbankintegration, Plausibilitätsprüfungen, etc.)
- Weiterentwicklung von standardisierten Darstellungen und Abbildungen zur Visualisierung der Messergebnisse
- Die technologierelevanten Erkenntnisse bildeten in unmittelbarem Zusammenhang mit den Projekten „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“, für die Ausschreibungsjahre 2010 bis 2023 die Basis für

zahlreiche Technologieentwicklungen bei Unternehmen, führten zu kooperativen Forschungsprojekten und gaben gezielten Input zu bestehendem Forschungsbedarf.

- Durch das Begleitforschungsteam konnten die gewonnenen Erkenntnisse in Neuauflagen des gegenständlichen Förderprogramms eingebracht werden
- 29 Beiträge bei einschlägigen Veranstaltungen (in unmittelbarem Zusammenhang mit den Projekten „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie – Solare Großanlagen“ für die Ausschreibungsjahre 2012 bis 2023) zeigen deutlich die geleisteten Beiträge des Begleitforschungsteams zur Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse in der Branche und tragen damit gleichzeitig zur Steigerung des Bekanntheitsgrades des Förderprogramms bei.

2 Einleitung

Österreich kann im Bereich kleiner Heizung-Warmwasser-Kombinations-Anlagen auf eine lange und sehr erfolgreiche Historie verweisen. Große Solarthermieranlagen stellen hier ein bisher wenig genutztes Potential dar. Um eine verstärkte Erschließung dieses Potentials erreichen zu können, bedarf es technologischer Weiterentwicklungen und eine Reduktion der Endkundenpreise.

Vor diesem Hintergrund definierte der Klima- und Energiefonds im Arbeitsprogramm 2010 erstmals einen Förderschwerpunkt für große solarthermische Anlagen in gewerblichen Anwendungen („Solare Prozesswärme in Produktionsbetrieben“, „Solare Einspeisung in netzgebundene Wärmeversorgung“, „Hohe solare Deckungsgrade in Gewerbe und Dienstleistungsgebäuden“ und „Kombinierte Anwendungen zum solaren Kühlen und Heizen“). Bisher wurden dreizehn erfolgreiche Ausschreibungen durchgeführt und es wurden Förderzusagen an knapp 380 Projekte vergeben. Als zentrale Instrumente des Förderprogramms wurden einerseits eine spezielle Anreizförderung und andererseits eine wissenschaftliche Programmbegleitung gewählt.

Das Förderprogramm

Das Förderprogramm richtet sich an gewerbliche Anwendungen in fünf speziellen Kategorien und Systemgrößen zwischen 100 und 2.000 m² Bruttokollektorfläche (außer Themenfeld 5: ab 50 m² bis 250 m² Bruttokollektorfläche):

1. Solare Prozesswärme in Produktionsbetrieben
2. Solare Einspeisung in netzgebundene Wärmeversorgung
3. Hohe solare Deckungsgrade in Gewerbe und Dienstleistungsgebäuden (>20%)
4. Solarthermie in Kombination mit Wärmepumpe
5. Neue Technologien und innovative Ansätze

Die wissenschaftliche Programmbegleitung

Ziel der wissenschaftlichen Programmbegleitung ist die Umsetzung von Anlagen nach dem letzten Stand der Technik sowie die Funktionalität und Effizienz der Anlagen in einem einjährigen Monitoringprozess zu bestimmen, Optimierungspotenziale zu detektieren und umzusetzen sowie basierend auf den Erfahrungen und Erkenntnissen gezielt Anstöße für die strukturierte Weiterentwicklung der Technologie zu geben. Nachfolgend sind die wesentlichen Aktivitäten der Programmbegleitung zusammengefasst:

- Durchführung von technischen Beratungen vor Fördereinreichung (verpflichtend für jeden Förderwerber)
- Prüfung der Systemhydraulik und ggf. Rückmeldung von Verbesserungsmaßnahmen – Erstellung von harmonisierten Blockschaltbildern
- Definition eines Monitoringkonzeptes (Input-Output Bilanzierung) und Spezifikation der Messtechnik
- Unterstützungsleistungen bei der technischen Projektumsetzung (Umsetzung des „Stand der Technik“ und des Monitoringkonzeptes)
- Begleitung bei der Umsetzung und Durchführung der Inbetriebnahme des Monitoringsystems

- Laufende Verbesserungen betreffend Messkonzept und Messtechnik (Sensorik, Datenlogger, Schnittstellen mit Regelungsgeräten, Datentransfer, automatisierte Ausleseroutine, Datenbankintegration, Plausibilitätsprüfungen, etc.)
- Messdatengestützte Analyse des Anlagenbetriebs über die Monitoringphase von einem Jahr. Üblicherweise stellt sich in den ersten Betriebsmonaten eine höhere Analyseintensität (detaillierte Prüfung des Verhaltens aller hydraulischer Kreisläufe und ggf. Detektion von Optimierungspotenzialen) ein.
- Weiterentwicklung von standardisierten Darstellungen und Abbildungen zur Visualisierung der Messergebnisse – regelmäßige Darstellung aller bereits in Betrieb befindlichen Messanlagen
- Aufzeigen und Umsetzung von Optimierungspotenzial in Zusammenarbeit mit den Förderwerbern bzw. mit dessen Partnern.
- Gespräche mit Technologieanbietern und Haustechnikplanern im Zuge der Optimierungsarbeiten – In diesem Zuge konnte eine Vielzahl von Erkenntnissen als Basis für zahlreiche Technologieentwicklungen bei Unternehmen eingesetzt werden bzw. führten zu einzelnen kooperativen Forschungsprojekten.
- Regelmäßige Gespräche mit der Programmleitung beim Klima- und Energiefonds – Dadurch kann einerseits direkt Rückmeldung zum Status Quo der Technologie gegeben werden sowie können andererseits gewonnene Erkenntnisse in Neuauflagen des gegenständlichen Förderprogramms eingebracht werden.
- Disseminierungsaktivitäten in der Branche (Workshops und Tagungen der Branche) - Insgesamt konnten innerhalb des gegenständlichen Projekts 29 Beiträge bei einschlägigen Veranstaltungen geleistet werden (in unmittelbarem Zusammenhang mit den Projekten „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“ für die Ausschreibungsjahre 2010 bis 2023). Zusätzlich wurde eine akademische Masterarbeit verfasst.
- Aufzeigen von bestehendem Forschungsbedarf und Kommunikation an Industrieverbände (z.B. Austria Solar) bzw. den Klima- und Energiefonds betreffend die Möglichkeit der Auslobung in zukünftigen Forschungsausschreibungen.

Im gegenständlichen Zwischenbericht werden die Aktivitäten und Erfahrungen zur Programmausschreibung 2021 im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung zusammengefasst. Dieser wurde in Anlehnung an die Endberichte des Projektes „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“ für die Ausschreibungsjahre 2010 - 2019 (Fink et al., 2015; Fink et al., 2016; Fink et al., 2019a; Fink et al., 2019b; Fink et al., 2022; Fink et al., 2023a; Fink et al., 2023b; Fink et al., 2024a; Fink et al., 2024b; Fink et al., 2025) erstellt.

3 Überblick über die Begleitforschungsprojekte

Seitens des Begleitforschungsteams wurde zu Beginn des Berichtszeitraums mit den beiden Förderwerbern im Monitoringprogramm Kontakt aufgenommen. Dabei galt es neben dem Projektstatus (Umsetzungszeitplan) auch technische Details (wie z.B. die schlussendliche Anlagenhydraulik) und Details zum Monitoringkonzept abzuklären, teilweise war eine wiederholte Kontaktaufnahme für den Erhalt der notwendigen Informationen erforderlich. Schlussendlich wurden beide solarthermischen Anlagen definitiv umgesetzt und messtechnisch begleitet (siehe Abbildung 1). Aufgrund eines Formalfehlers im Verlauf der Antragsphase musste bei der Trocknungsanlage Kutschera die Begleitforschung nach 8 Monaten abgebrochen werden.

Solaranlagen und Wärmepumpen		m ²
2021_1	Anton Paar GmbH, Stmk	1310

Prozesswärme		m ²
2021_1	Trocknungsanlage Kutschera, OÖ	115

Anlage realisiert
Anlage realisiert, Begleitforschung abgebrochen

Abbildung 1: Status Quo der Anlagen aufgeteilt nach Einreichkategorien (Förderprogramm 2021 – 1. Jurierung)

Im Zusammenhang mit der Auszahlung von Förderraten durch die KPC übernimmt die Begleitforschung zu zwei Zeitpunkten die Bestätigung zum Status Quo des Anlagenmonitorings. Die erste Bestätigung wird von der Begleitforschung ausgestellt, wenn der Förderwerber das Monitoringkonzept wie vereinbart umgesetzt hat und die Messdaten vollständig und plausibel über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen beim jeweils zuständigen Institut der Begleitforschung eintreffen. Ab diesem Zeitpunkt startet dann die offizielle, einjährige Monitoringphase. Den zweiten relevanten Zeitpunkt bildet der Abschluss der einjährigen Monitoringphase, der ebenso vom Team der Begleitforschung bestätigt wird. Den zweiten relevanten Zeitpunkt bildet der Abschluss der einjährigen Monitoringphase, der ebenso vom Team der Begleitforschung bestätigt wird. Wie Abbildung 2 zu entnehmen ist, konnte bei einem Projekt die Monitoringphase über ein Betriebsjahr abgeschlossen werden, während das Begleitmonitoring beim zweiten Projekt abgebrochen werden musste.

AEE INTEC					FH OÖ				
Projektname	Bestätigung		Start	Ende	Projektname	Bestätigung		Start	Ende
	1.	2.				1.	2.		
Anton Paar GmbH, Stmk			Jun. 24	Mai. 25	Trocknungsanlage Kutschera, OÖ		-	Jul. 24	Feb. 25

Abbildung 2: Dokumentation der ausgestellten offiziellen Bestätigungen zu den Messprojekten (Förderprogramm 2021 – 1. Jurierung)

4 Beschreibung der Tätigkeiten in Verbindung mit den Messanlagen im Berichtszeitraum

Kontakthaltung mit Anlagenbetreibern und dessen Partnern

Um die Basis für die Durchführung der wissenschaftlichen Begleitforschung zu schaffen (Hydraulik- und Messkonzept, Spezifikation der Messtechnik, Bestellung und Montage, Inbetriebnahme, erste Auswertungen, etc.), mussten zahlreiche Informationen zu den Messanlagen gesammelt werden sowie ein reger Austausch zwischen den Anlagenbetreibern und dessen Partnern (Haustechnikplaner, Installationsbetrieb, Elektriker, etc.) betrieben werden.

Unterstützungsleistungen bei der technischen Projektumsetzung (Umsetzung des „Stand der Technik“)

Die von den Anlagenbetreibern übermittelten Hydraulikkonzepte und Unterlagen wurden analysiert, gegebenenfalls vorhandenes Verbesserungspotenzial definiert und mit den Anlagenbetreibern Rücksprache gehalten. In zahlreichen Projekten gelang es, Verbesserungsvorschläge auch tatsächlich umzusetzen, in manchen Projekten aber auch nicht (z.B. wenn das Projekt zeitlich in einer fortgeschrittenen Phase; Mehrkosten angefallen wären; bauliche Maßnahmen notwendig wären, etc.)

Systemhydraulik und Monitoringkonzept – Erstellung von harmonisierten Blockschaltbildern

Des Weiteren erfolgte für die sechs Messprojekte aus dem Begleitforschungsprogramm die Festlegung des Monitoringkonzeptes in Anlehnung an die Vorgaben im speziell definierten Monitoringleitfaden (Fink et al., 2021) und die Spezifikation der Messtechnik. Basierend auf diesem Wissensstand wurden zwecks einheitlicher Darstellung im gegenständlichen Forschungsprojekt harmonisierte Blockschaltbilder der gesamten Wärmeversorgungsanlage inkl. eingezeichneter Messpunkte erstellt.

Begleitung bei der Umsetzung und Durchführung der Inbetriebnahme des Monitoringsystems

Die Anlageneigentümer und deren Partner wurden hinsichtlich der Beschaffung, der richtigen Positionierung, der Montage als auch der Verkabelung umfangreich betreut. Es erfolgte die Inbetriebnahme des Anlagenmonitorings, was Arbeitsschritte wie z.B. Prüfung der Sensorpositionen, die Programmierung der Datenloggersoftware, das Klemmen aller Sensorkabel am Datenlogger, die Inbetriebnahme des Datenloggings, die Aufzeichnungsüberprüfung aller Sensoren, die Überprüfung der Datenübertragung (Fernübertragung), etc. erforderlich machte. Im Zuge des für die Messtechnikinbetriebnahme notwendigen Vororttermins erfolgte auch der Vergleich der seitens der Anlagenbetreiber übermittelten Hydraulikkonzepte mit den tatsächlich erfolgten Installationen. Gegebenenfalls vorhandene Abweichungen werden am Planstand vermerkt und auch an den Anlageneigentümer kommuniziert.

Herstellung einer automatisierten Ausleseroutine und Integration in eine Datenbank

Bei Anlagen mit in Betrieb befindlicher Messdatenerfassung werden die Messdaten am Datenlogger zwischengespeichert und einmal täglich per Fernzugriff (je nach örtlicher Gegebenheit über Festnetz, GSM-Netz, Internet) ausgelesen und in weiterer Folge in einer eigens definierten Datenbank für Messdaten abgelegt. Beim Einspielen in die Datenbank

erfolgt eine erste automatisierte Plausibilitätsprüfung der Messdaten (Vollständigkeit, Messdatenformat, Grenzwertüberschreitung, etc.).

Messdatengestützte Analyse des Anlagenbetriebs

Ziel der messdatengestützten Anlagenanalyse ist eine Plausibilitätsüberprüfung der Vorgänge in allen hydraulischen Kreisläufen (Solarsystem, Nachheizung und Wärmeverbraucher). Zu diesem Zwecke werden Temperaturverläufe als auch Energiebilanzen erstellt und analysiert. In den ersten Betriebsmonaten (der sogenannten Optimierungsphase) erfolgen diese Analysen sehr detailliert. Danach gehen die Anlagen in die Phase der Routineüberwachung über.

Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von standardisierten Darstellungen und Abbildungen zur Visualisierung der Messergebnisse

Hinsichtlich einer harmonisierten Darstellung der Messergebnisse zu den einzelnen Messanlagen wurden einzelne standardisierte Darstellungen und Abbildungen definiert. Zu erwähnen sind dabei insbesondere die Darstellungen „Energiebilanz – Input/Output/Analyse“, „Spezifischer Jahressolarertrag – Vergleich Messung und Simulation“, „Solarer Deckungsgrad – Messung vs. Simulation“, „Verbraucherverhalten – Messung vs. Simulation“ sowie eine Vielzahl „Ausgewählter Temperaturverläufe“.

Aufzeigen und Umsetzung von Optimierungspotenzial

Ergeben sich aus den Anlagenanalysen Verbesserungspotenziale, wurde in weiterer Folge versucht, diese in Zusammenarbeit mit den Anlageneigentümern und deren Partnern (Haustechnikplaner, Installateure, Regelungsunternehmen, Elektriker, etc.) auch zu erschließen. Die Messdatenanalyse schafft hier gute Möglichkeiten, getätigte Modifikationen hinsichtlich ihrer Wirkung zu überprüfen. So konnten vier Optimierungsmaßnahmen detektiert, davon eine während der Monitoringperiode umgesetzt werden.

5 Verbreitungsaktivitäten

Das Team der wissenschaftlichen Begleitforschung hat innerhalb des Projektzeitraums (Dezember 2021 bis September 2023) 29 Beiträge zu einschlägigen Veranstaltungen geleistet (in unmittelbarem Zusammenhang mit den Projekten „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“ für die Ausschreibungsjahre 2010 bis 2023).

Der nachfolgenden Tabelle können die kumulierten Disseminierungsaktivitäten (Veranstaltungen inkl. Vortragstitel und Teilnehmerzahlen) entnommen werden.

Tabelle 1: Übersicht zu durchgeführten Verbreitungsaktivitäten im Berichtszeitraum

Art der	Titel der Veranstaltung	Vortragstitel	Teilnehmer
Tagung	23. österreichischer Biomassetag 15.-16. September 2021, Klagenfurt	Solare Großanlagen: Praxiserfahrung, Förderung und Umsetzung	ca. 200
Workshop	Meeting HeatHighway (Netzbetreiber und Planer) - Vorzeigeregion Energie, 8.10.2021	Solarthermische Integration in Fernwärmesysteme	ca. 30
Workshop	Workshop für eine türkische Delegation zu den Themen: Solare Fernwärme, PVT und Großwärmespeichertechnologien, 12.10.21	Solarthermal District Heating - technologies, market, applications, examples	18
Webinar	Effizienter Heizwerkbetrieb, FAST Pichl, 3.3.2022	Solare Großanlagen für Nahwärmenetze – Praxiserfahrung, Förderung und Umsetzung	ca. 35
Konferenz	2nd International Sustainable Energy Conference – ISEC 2022, 05 - 07. April 2022	Solar Thermal District Heating in Austria	350
Vorlesung	Erneuerbare thermische Energiesysteme 2022, FHOÖ, Bachelor Studiengang „Angewandte Energietechnik“	Solarthermische Großanlagen	28
Workshop	Treffen der Arbeitsgruppe "Fernwärme" des BMK und der Bundesländer, 6.5.2022	Solarthermie und netzgebundene Wärmeversorgung	16
Webinar	KONNEX BAU der IG LEBENSZYKLUS BAU, 24.5.2022	Solarthermische Eigenversorgung von Gebäuden und Quartieren - Erfahrungen aus der Begleitforschung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“ des Klima- und Energiefonds	25
Themenveranstaltung	plannING Day 2022 des Fachverbands Ingenieurbüros, 10.6.2022	Kostengünstige Energiespeicherflexibilität durch Bauteilaktivierung - Innovative Ansätze in Neubau und Sanierung	ca. 60
Webinar	Vortragsreihe von Austria Solar (30.11.2022)	Wege zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse ab 70°C bis 150°C	ca. 50
Workshop	Bionet-Know, 24.1.2023	Solare Großanlagen: Praxiserfahrung, Förderung und Umsetzung	15
Workshop	Innovationslabor DigiPEQ, 9.3.2023	Innovative Warmwassersysteme für großvolumige Gebäude und Quartiere	ca. 30
Seminar	Effiziente Heizwerkführung – Nutzung alternativer Energiequellen (Forstliche Ausbildungsstätte Pichl), 23.3.2023	Solarthermische Großanlagen und Wärmepumpen als sinnvolle Erweiterungen für die Biomasse-Nahwärme	20
Symposium	33. Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“ 9. - 11. Mai 2023, Bad Staffelstein, Deutschland	Herausforderungen und Lösungen zur vollständigen solaren Deckung des sommerlichen Wärmebedarfs eines Fernwärmenetzes - Referenz Solaranlage Friesach	ca 150
Symposium	33. Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“ 9. - 11. Mai 2023, Bad Staffelstein, Deutschland	Ergebnisse aus 12 Jahren wissenschaftlicher Begleitung zum Förderprogramm „Solarthermie – Solare Großanlagen“	ca 150
Tagung	Veranstaltung "Solare Eigenversorgung von Industriebetrieben"	CO2-freie Energieversorgung für die Industrie	ca 80
Vorlesung	Erneuerbare thermische Energiesysteme 2023, FHOÖ, Bachelor Studiengang „Angewandte Energietechnik“	Solarthermische Großanlagen	32
Vorlesung	Akademische/r Expert/in für Integrales Gebäude- und Energiemanagement, FH Wien (Mai 2023)	Modul E10: Nachhaltige Gebäudekonzepte im Bau und Klima Aktiv	11
Vorlesung	Universitätslehrgang "Energie Autarkie Coach", Donau-Universität Krems, 13.9.2023	Solare Energieversorgung	8

Workshop	IEA SHC Task66 - SolarEnergyBuildings: Industry Workshop No 5	Solar Concepts and monitoring results of buildings with high solar thermal fraction in Austria	100
Vorlesung	Building Innovation, MEng Modul 05 - Heizung, Klima, Lüftung - Basic Level Universität für Weiterbildung Krems	Grundlagen der Wärme- und Kälteerzeugung - Solare Energieversorgung	8
Konferenz	3rd International Sustainable Energy Conference – ISEC 2024, 10 - 11. April 2024	Big solar thermal plants - a possible game changer for heating grids and industry	350
Symposium	34. Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“ 14. - 16. Mai 2024, Bad Staffelstein, Deutschland	Große Solarthermieranlagen als möglicher Gamechanger für Wärmenetze und Industrie	ca. 120
Konferenz	ISES and IEA SHC Conference on Solar Energy for Buildings and Industry (EuroSun 2024), Limassol, Cyprus, August 2024.	„Sensitivity Analysis Of Solar District Heating Systems“	180
Exkursion	Exkursion der Steirischen Energieagentur, 1.10.2024, Wies	Messergebnisse zur Trocknungsanlage Wies	40
Vorlesung	Universitätslehrgang "Energie Autarkie Coach", Donau-Universität Krems, 13.9.2023	Solare Energieversorgung	4
Vorlesung	Erneuerbare thermische Energiesysteme 2024, FHOÖ, Bachelor Studiengang „Angewandte Energietechnik“	Solarthermische Großanlagen	26

6 Kennzahlen aus Simulation und Messung im Anlagenvergleich

Zur Darstellung der prognostizierten Ergebnisse zum Zeitpunkt der Einreichung sowie der Messergebnisse werden in den nachfolgenden drei Abbildungen die wesentlichen Kennzahlen der beiden solarunterstützten Wärmeversorgungsanlagen dargestellt. Abbildung 3 zeigt dazu die aus der Einreichphase jährlichen spezifischen Solarerträge (kWh/m^2 Aperturfläche und Jahr), Abbildung 4 die solaren Deckungsgrade und Abbildung 5 die Wärmeverbräuche. Nach Abschluss des Monitoringjahres werden die gemessenen Werte (Balken) mit den Prognosewerten (schwarze Striche) aus den Einreichunterlagen verglichen.

Zu beachten ist, dass eine isolierte Interpretation bzw. ein direkter Vergleich des spezifischen Solarertrags der untersuchten Anlagen nicht möglich sind. Vielmehr müssen die speziellen Rahmenbedingungen jedes Projektes (Höhe des solaren Deckungsgrades, Temperaturniveau der Anwendung, Kollektortype, etc.) genauso berücksichtigt werden wie die tatsächlichen Verhältnisse.

Abbildung 3 zeigt die prognostizierten und gemessenen Solarerträge für die beiden betrachteten Anlagen. Die Begleitforschung für die Trocknungsanlage Kutschera musste zwar mit Ende Februar abgebrochen werden, es liegen jedoch trotzdem Messdaten für ein ganzes Jahr vor. Obwohl die Jahreseinstrahlung bei dieser Anlage etwas über der Prognose lag, wurde der Prognosewert etwa 18 % unterschritten. Eine mögliche Erklärung dafür ist eine geringere Auslastung der Anlage gegenüber der Planung.

Bei der Anlage „Anton Paar GmbH“ erreichte der solare Ertrag nur 40 % der Prognose. Wesentlich verantwortlich dafür ist einerseits der geringere Bedarf (vgl. Abbildung 5) und andererseits die geringe Ausnutzung des Eisspeichers im ersten Betriebsjahr (und dadurch geringer Bedarf an Regeneration). Aufgrund der Saisonalität dieses Betriebsmodus konnte das im Monitoringzeitraum der Begleitforschung nicht gelöst werden. In einer weiterführenden Begleitung der Anlage wird das jedoch gezielt adressiert.

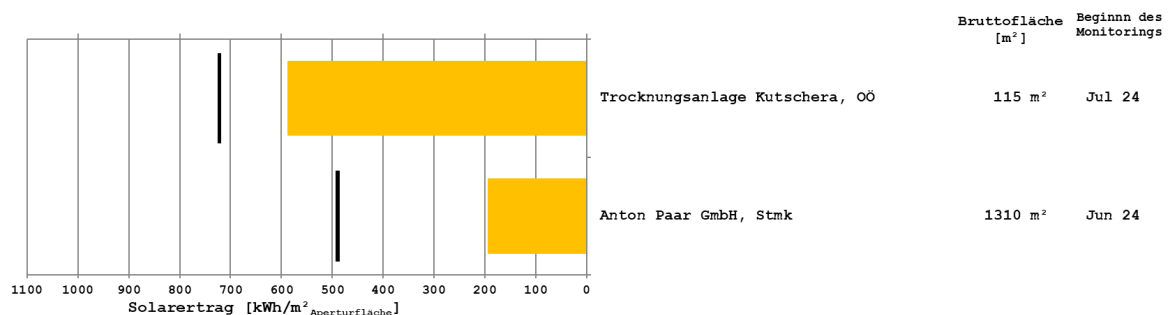


Abbildung 3: Vergleich der gemessenen spezifischen Solarerträge (orange Balken) mit den prognostizierten spezifischen Solarerträgen (schwarze Striche)

Betreffend die Darstellung des solaren Deckungsgrades wird folgende mathematische Definition verwendet:

$$SD = \frac{Q_{\text{Solar}}}{Q_{\text{konv We}} + Q_{\text{Solar}}}$$

Gleichung 1

Q_{Solar} jährlicher Wärmeinput des Solarsystems, gemessen auf der Sekundärseite des Solarkreises (nach Möglichkeit in der Systemhydraulik)

$Q_{konv\ We}$ jährlicher Wärmeinput des konventionellen Wärmeerzeugers, gemessen zwischen Energiespeicher und Wärmeerzeuger

Bei Anlagen, wo solare Wärme einerseits als Wärmequelle für den Verdampfer der installierten Wärmepumpen dient als auch andererseits direkt zur Brauchwasserbereitung und Heizungsunterstützung verwendet wird, wird neben dem solaren Deckungsgrad (Gleichung 1) auch der direkte solare Deckungsgradanteil ermittelt. Nach dieser Definition (Gleichung 2) wird nur der Anteil der Solarwärme für die Berechnung herangezogen, welcher direkt zur Brauchwasserbereitung bzw. Heizungsunterstützung in Energiespeicher eingespeist wird:

$$SD_{direkt} = \frac{Q_{Solar-direkt}}{Q_{konv\ We} + Q_{Solar-direkt}} \quad \text{Gleichung 2}$$

$Q_{Solar-direkt}$ jährlicher Wärmeinput des Solarsystems welcher direkt zur Brauchwasserbereitung bzw. Heizungsunterstützung herangezogen wird

$Q_{konv\ We}$ jährlicher Wärmeinput des konventionellen Wärmeerzeugers, gemessen zwischen Energiespeicher und Wärmeerzeuger

Der Vergleich der prognostizierten solaren Deckungsgraden (schwarze Striche) ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei der „Trocknungsanlage Kutschera“ gibt es keine Nachheizung, daher liegt der solare Deckungsgrad – wie auch in der Einreichphase - bei 100%. Bei der Anlage „Anton Paar GmbH“ wird der Solarertrag ausschließlich quellseitig der Wärmepumpe verwendet. Damit ist eine Definition des solaren Deckungsgrades nicht sinnvoll definierbar und wird daher auch nicht dargestellt.

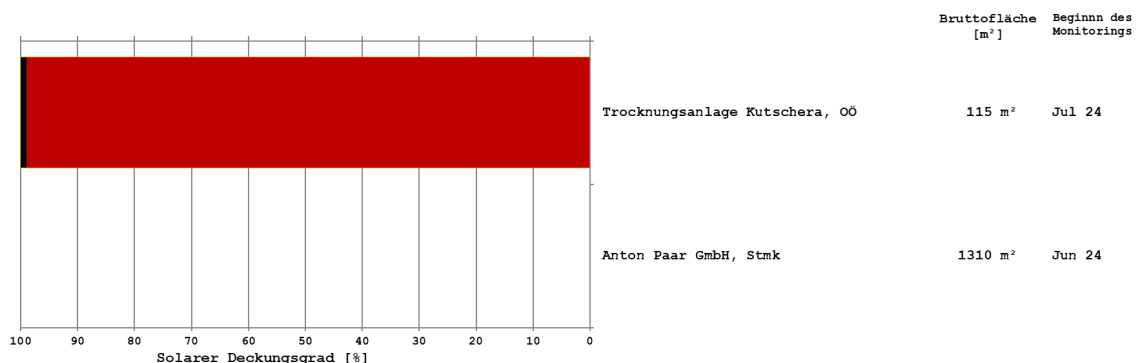


Abbildung 4: Vergleich der gemessenen solaren Deckungsgrade (rote Balken) mit den prognostizierten solaren Deckungsgraden (schwarze Striche)

Eine entscheidende Einflussgröße auf die vorherigen Kennzahlen für solarunterstützte Wärmeversorgungssysteme bildet der tatsächlich vorherrschende Wärmeverbrauch.

Abbildung 5 zeigt die prognostizierten und gemessenen Wärmeverbräuche beider betrachteten Anlagen. Bei der „Trocknungsanlage Kutschera“ entspricht die Verbrauchsabweichung von der Prognose jener des solaren Ertrags (aufgrund der vollständigen solaren Deckung; siehe oben). Die Anlage „Anton Paar GmbH“ zeigt ebenso einen geringeren (Wärme-)Verbrauch gegenüber der Prognose.

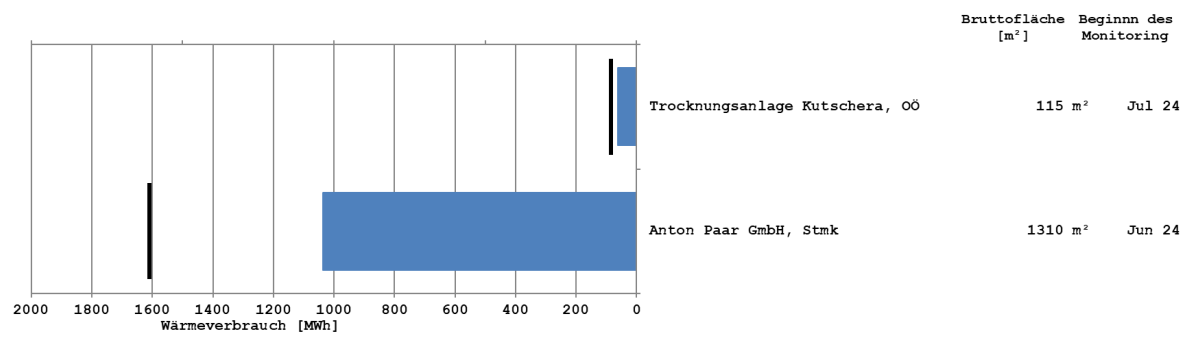


Abbildung 5: Vergleich der gemessenen Wärmeverbräuche (blaue Balken) mit den prognostizierten Wärmeverbräuchen (schwarze Striche)

7 Beschreibung der Projekte und Darstellung der relevanten Messergebnisse

7.1 Anton Paar GmbH, Stmk

7.1.1 Allgemeine Anlagenbeschreibung

<u>Projektname:</u>	Anton Paar GmbH
<u>Adresse:</u>	Anton Paar Straße 20, 8054 Graz
<u>Art der Anwendung:</u>	Solaranlagen in Kombination mit Wärmepumpen
<u>Wärmeverbraucher:</u>	Wärmeversorgung Fußbodenheizung, Lüftung und Warmwasser
	Kälteversorgung der Sozialräume und der Produktion
<u>Bruttokollektorfläche:</u>	1310m ² (182 x Viessmann SLK-600, unabgedeckte Absorbermatten)
<u>Neigung:</u>	0°
<u>Nachheizung:</u>	3x Sole-Wasser-Wärmepumpe/Kältemaschine (je 483 kW Heizen/510 kW Kühlen)
<u>Speicher</u>	2x 10.000l Wärmespeicher 2x 10.000l Kältespeicher 1.468 m ³ Eisspeicher
<u>Spezifischer Solarertrag:</u>	194 kWh/m ² a (Messung, bezogen auf die Aperturfläche)
<u>Projektstatus:</u>	Monitoringphase mit Mai 2025 beendet
<u>Zuständigkeit Begleitforschung:</u>	AEE INTEC

Die Anton Paar GmbH entwickelt und produziert Präzisionslaborgeräte sowie hochgenaue Prozessmesstechnik und liefert maßgeschneiderte Automations- und Robotik-Lösungen. Das Unternehmen plant in Graz (ST) die Errichtung eines neuen Betriebsgebäudes mit 26.900 m² Bruttogeschoßfläche für Büros und Labors und soll mittels effizienter Nutzung der Sonnenwärme durch den Einsatz von Wärmepumpen und einem Eisspeicher zur Deckung des Raumwärmebedarfs ausgestattet werden.

Es wurde eine Solarabsorberfläche mit 1.310 m² am Dach des Gebäudes errichtet. Es werden 182 Stück offene Solarabsorber der Fa. Viessmann vom Typ SLK 600 am Flachdach des Gebäudes liegend (Anstellwinkel 0°) montiert. Bei diesem Kollektortyp dienen sowohl die direkte und diffuse Sonneneinstrahlung als auch Umgebungsluft, Niederschläge und Luftfeuchte als Energiequellen. Die so gewonnene solare Wärmeenergie soll in einen Eisspeicher mit einem Volumen von 1.468 m³ geladen, oder direkt als Wärmequelle der Wärmepumpen genutzt werden.

Der Eis-Energiespeicher, gefüllt mit Wasser, fungiert als saisonaler Pufferspeicher und wird mittels unverglasten Solarkollektoren, sowie durch im Gebäude anfallende Abwärme aus aktiver Kühlung mit Niedertemperatur beladen bzw. regeneriert. Eis-Energiespeicher (Niedertemperatur-Latentspeicher) und Solarkollektoren bilden somit die Wärmequelle für die Wärmepumpen. Der mit Wasser gefüllte Eisspeicher kann Energie (Solar, Erdreich, Abwärme aus Gebäude) zwischenspeichern und an die Wärmepumpe abgeben.

Der Wärmeentzug durch die Wärmepumpen führt zu einem Vereisungsvorgang und damit zur Freisetzung der Kristallisationsenergie, wodurch ein großer Teil der gespeicherten

Wärme bei konstanter Temperatur abgeben werden kann. Die Regeneration (Schmelzvorgang) und Beladung des Speichers erfolgt mittels Solarabsorbern, welche die eintreffende Solarstrahlung sowie Lufttemperaturen nutzen, und andererseits durch das den Speicher umgebende Erdreich sowie Abwärme aus dem Kühlbetrieb des Gebäudes, erfolgt.

Mit der Anlage kann sowohl geheizt als auch gekühlt werden. Die Wärmeerzeugung erfolgt über drei Sole-Wasser-Wärmepumpen. Als Wärmequelle dienen der Eis-Energiespeicher im Erdreich, die Solar-Luft-Kollektoren auf dem Dach und die Abwärme aus dem Gebäude im Kühlfall. Die Kühlung erfolgt über einen Plattenwärmetauscher, welcher mit dem Regenerationswärmetauscher im Eis-Energiespeicher verbunden ist. Die Kälteerzeugung kann sowohl durch natürliches Kühlen als auch durch aktives Kühlen erfolgen. Das heißt, der Eis-Energiespeicher dient so lange als Wärmesenke, bis sich die Speichertemperatur der Kühlsolltemperatur auf der Primärseite angenähert hat. Ist dieser Punkt erreicht, so kann mit der Wärmepumpe direkt über den Plattenwärmetauscher gekühlt werden. Die Abwärme wird über den Rückkühler an die Umgebung bzw. den Eisspeicher abgegeben. Bei gleichzeitiger Kühl- und Heizanforderung kann mit den Wärmepumpen auch ein Parallelbetrieb ausgeführt werden. Das heißt, es kann zur gleichen Zeit gekühlt und geheizt werden. Der Wärmetransport zwischen den einzelnen Komponenten auf der Primärseite erfolgt durch ein Wasser-Glykol-Gemisch auf Basis Ethylenglykol.

Die drei Wärmepumpen mit dem Kältemittel R513A (GWP 573) sind für den Heiz- und Kühlbetrieb jeweils unterschiedlich ausgelegt. Systembedingt werden zur Abdeckung der gesamten Kühllast drei Wärmepumpen benötigt. Für den Heizbetrieb und zur Abdeckung der erforderlichen Heizleistungen werden zwei Wärmepumpen mit einer Wärmeleistung von je 483 kW (gesamt 966 kW bei B-5/W45) eingesetzt. Die dritte Wärmepumpe ist aufgrund des hybriden Konzeptes Teil des gesamten Energieversorgungskonzeptes wird aber vorwiegend zur Kältebereitstellung genutzt. In einzelnen Betriebszuständen kann es dazu kommen, dass diese vereinzelt auch Aufgaben der Wärmebereitstellung übernimmt. Es handelt sich um keine redundante Ausführung der Anlage. Für die Bereitstellung der erforderlichen maximalen Kälteleistung sind 3 Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen zu je 510 kW (gesamt 1.530 kW bei B45/W6) erforderlich. Der Kühlbedarf während der Heizperiode resultiert aus dem Kühlbedarf der Laborbereiche, welche teilweise ganzjährig Kühlenergie benötigen. Im Sommer ergibt sich der Kühlbedarf als Folge des Betriebes der raumlufttechnischen Anlagen (Lüftung für Labor und Bürobereich) samt Entfeuchtungsbetrieb sowie der geplanten Kühldecken zur Raumkonditionierung.

In Abhängigkeit der meteorologischen Bedingungen wird mittels übergeordneter Mess-Steuerungs- und Regelungstechnik die Wärmequelle für die Wärmepumpen ausgewählt. Durch dieses aktive Energiequellenmanagement können verschiedene Betriebsarten auf Basis von Effizienzkriterien umgesetzt werden. Damit kann für die Wärmebereitstellung (Heiz- oder Dualbetrieb) von ca. 1.600 MWh/a eine SJAZ (inkl. Nebenaggregate) von 4,22 erreicht werden. Dabei wird die solare Nutzenergie von den Solar-Kollektoren über Regenerationsenergie in den Eisspeicher (79 MWh/a) und Direktnutzung der Solarabsorberwärme (557 MWh/a) als Wärmequelle für die Wärmepumpen eingesetzt.

Ergänzt wird das Gesamtkonzept um eine PV-Anlage mit rund 50 kWp.



Abbildung 6: Anlagentechnik am Dach, mit Solarabsorbern im Hintergrund (Quelle: AEE INTEC)



Abbildung 7: Anlagentechnik im Betriebsraum (Quelle: AEE INTEC)

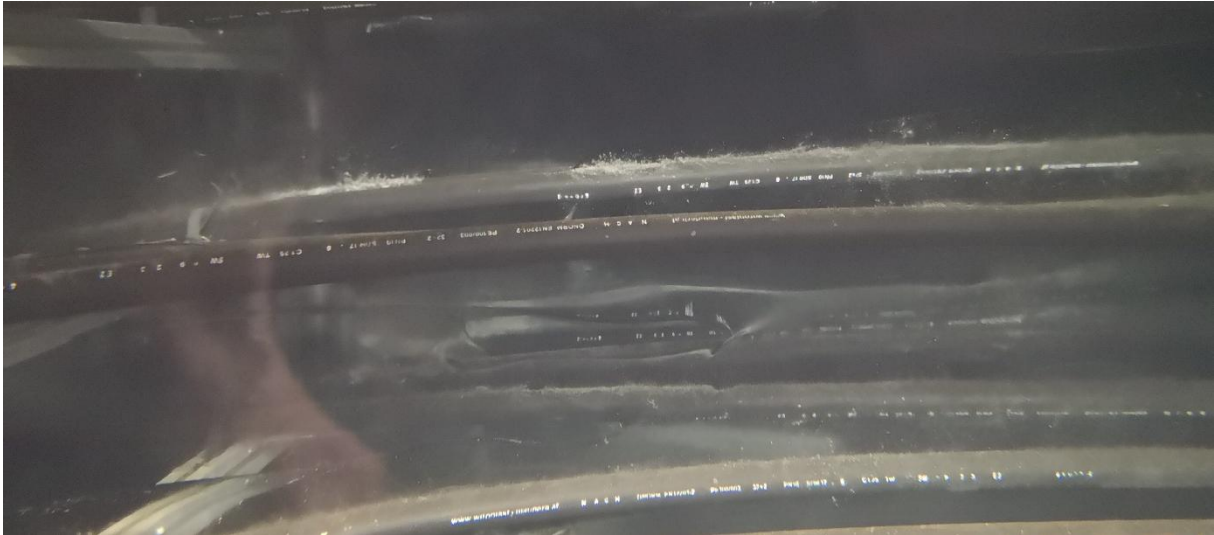


Abbildung 8: Einblick in Eisspeicher, mit sich ausbildender Eisschicht um die Wärmetauscher im Tank (Quelle: AEE INTEC)

7.1.2 Hydraulik- und Messkonzept

Das gesamte Wärmeversorgungssystem zum Projekt „Anton Paar GmbH“ ist als Blockschaltbild in Abbildung 9 dargestellt.

Die messtechnische Bestückung der Anlage enthält folgende Sensorik:

- 23 Temperaturfühler
- 7 Wärmemengenzähler
- 6 Kältezähler
- 1 Globalstrahlungssensor
- 5 Stromzähler
- 24 Ventilstellung
- 1 Vereisungsgrad
- 1 Betriebsart (Modus)

Es werden 14 unterschiedliche Betriebsmodi gefahren. Diese werden unten über die Prinzipschemata veranschaulicht und sind die Folgenden:

- 2 Entzugsbetrieb
- 3 Mischbetrieb
- 4 Absorberdirektbetrieb
- 5 Regeneration
- 6 Passive Vorkühlung
- 7 Aktive Vorkühlung
- 8 Natürliche Kühlung (NC)
- 9 NC mit Mischbetrieb
- 10 Freie Kühlung (FC)
- 11 FC mit Heizbetrieb
- 12 Aktive Kühlung (AC)
- 13 AC mit Heizbetrieb (AC Dual)
- 16 NC mit Entzugsbetrieb
- 17 NC mit Absorberdirektbetrieb

Mess- und Instrumentierungsschema

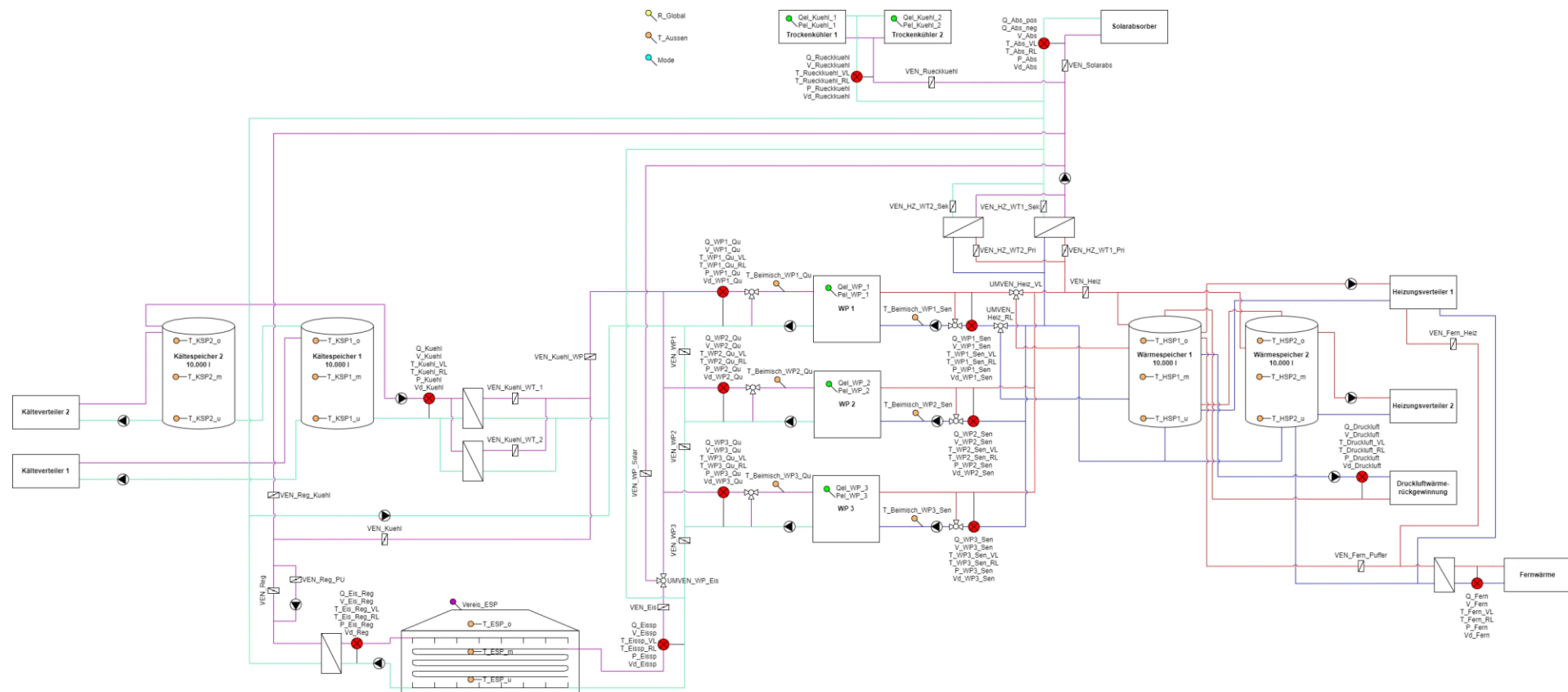


Abbildung 9: Messkonzept zum Projekt „Anton Paar GmbH“ (Orange: Temperaturfühler; Gelb: Einstrahlungssensoren; Rot: Wärme- und Kältemengenzähler; Grün: Strommesser; sowie Ventilpositionen)

Betriebsmodus 2: Entzugsbetrieb

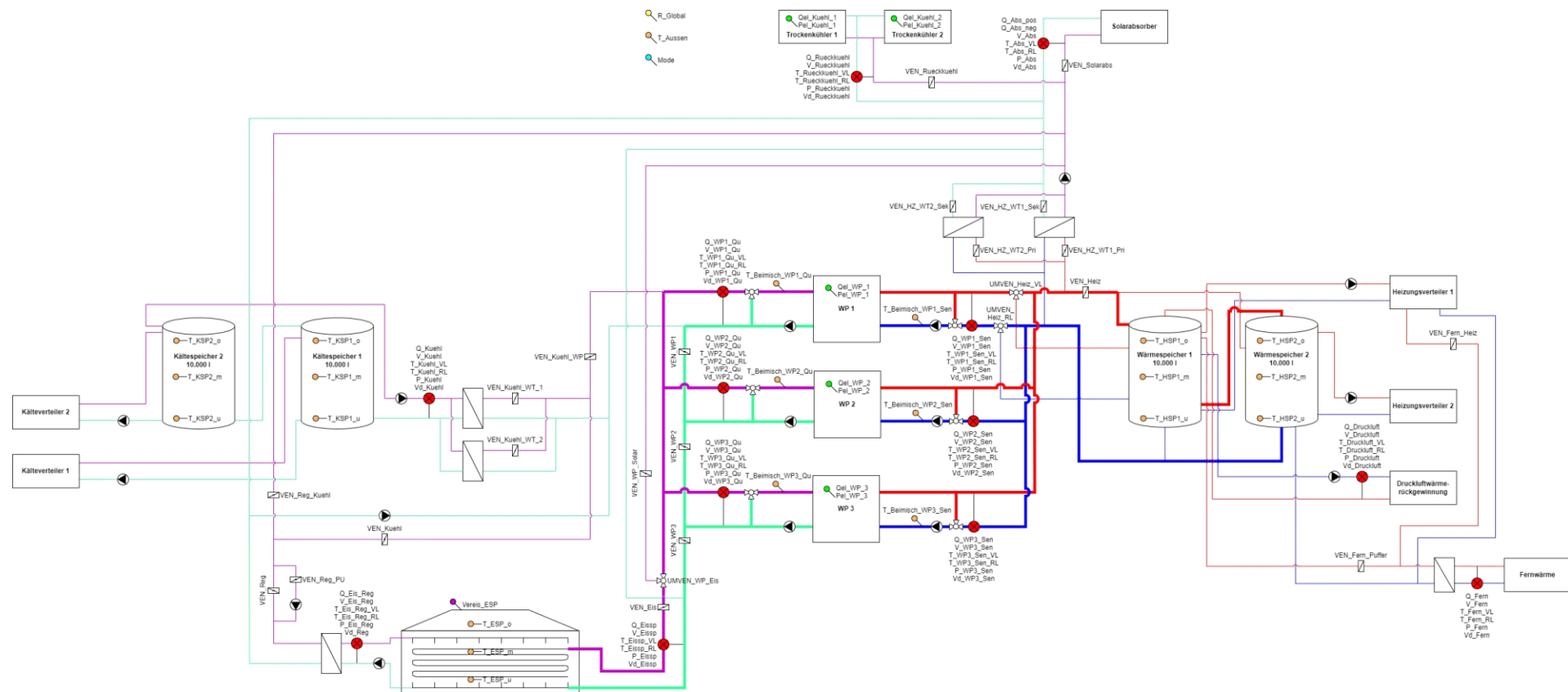


Abbildung 10: Betriebsmodus 2: Entzugsbetrieb – Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Der Eisspeicher dient als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen.

Betriebsmodus 3: Mischbetrieb

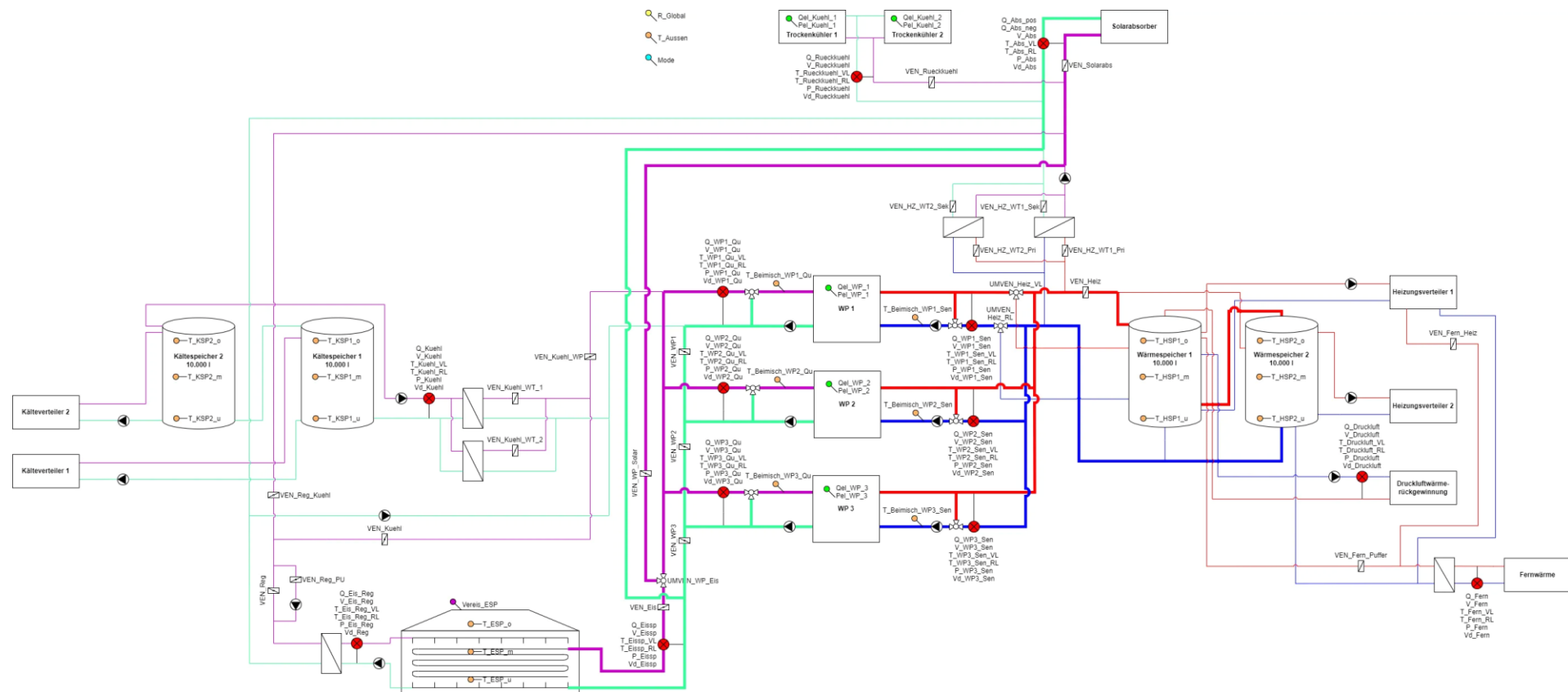


Abbildung 11: Betriebsmodus 3: Mischbetrieb – Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Der Eisspeicher und die Solarabsorber dienen als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen.

Betriebsmodus 4: Direktbetrieb

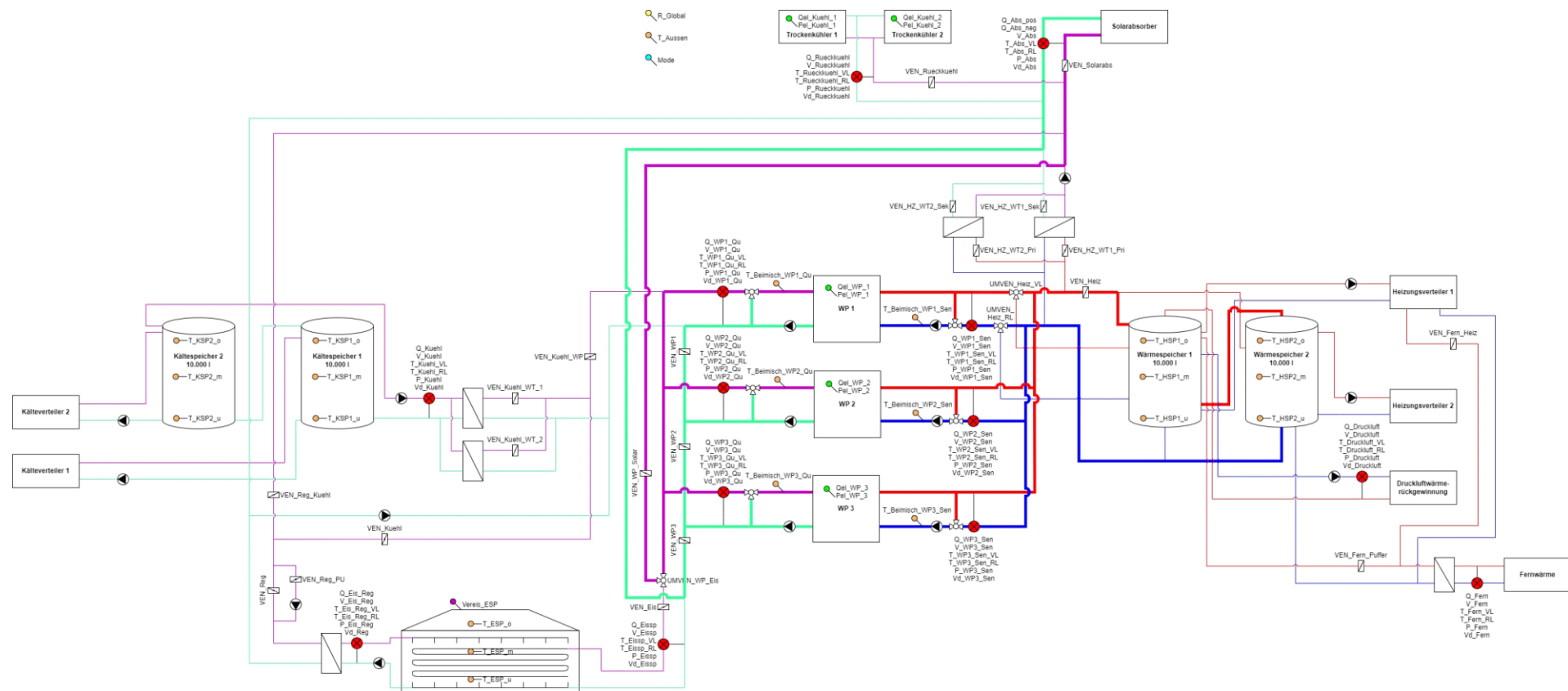


Abbildung 12: Betriebsmodus 4: Direktbetrieb – Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Die Solarabsorber dienen als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen.

Betriebsmodus 5: Regeneration

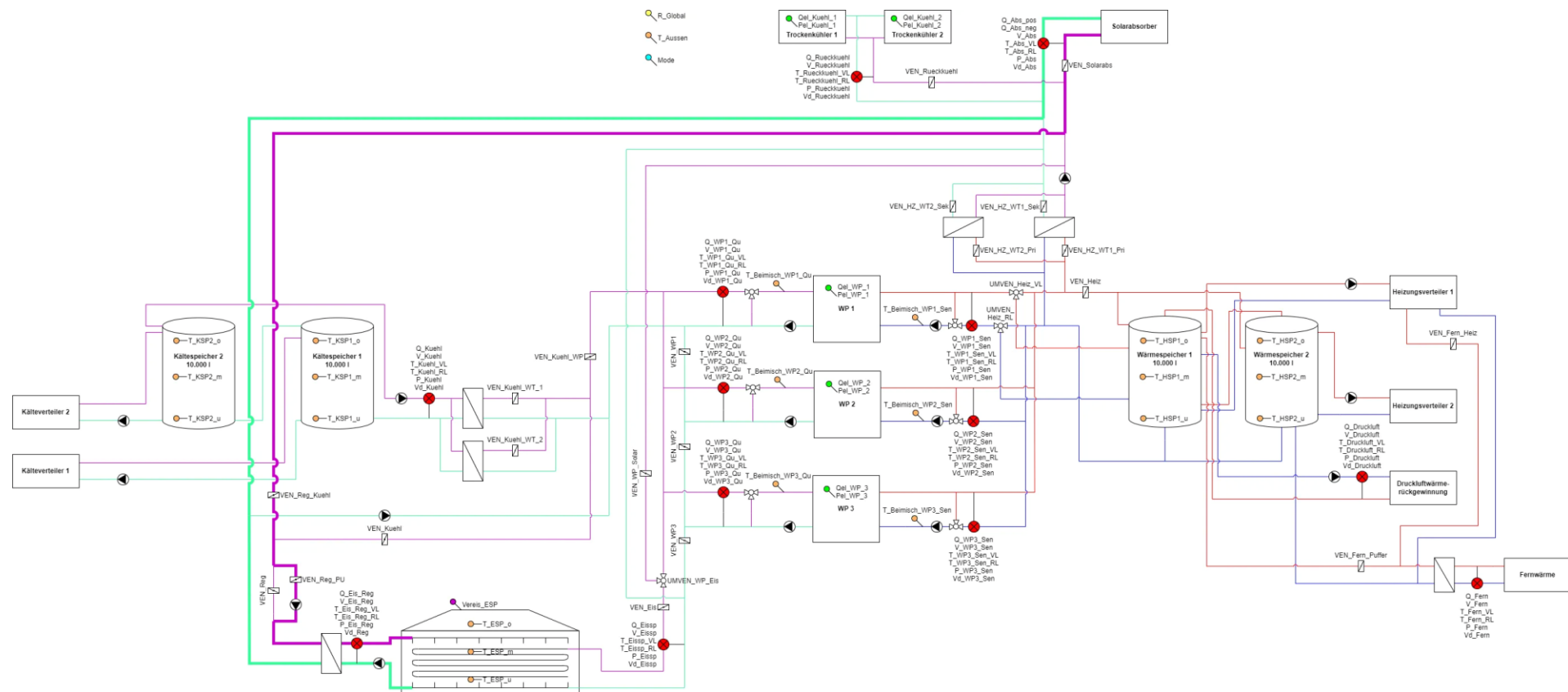


Abbildung 13: Betriebsmodus 5: Regeneration – Der Eisspeicher wird mittels Wärme aus den Solarabsorbern regeneriert (abgeschmolzen bzw. aufgewärmt).

Betriebsmodus 6: Passive Vorkühlung

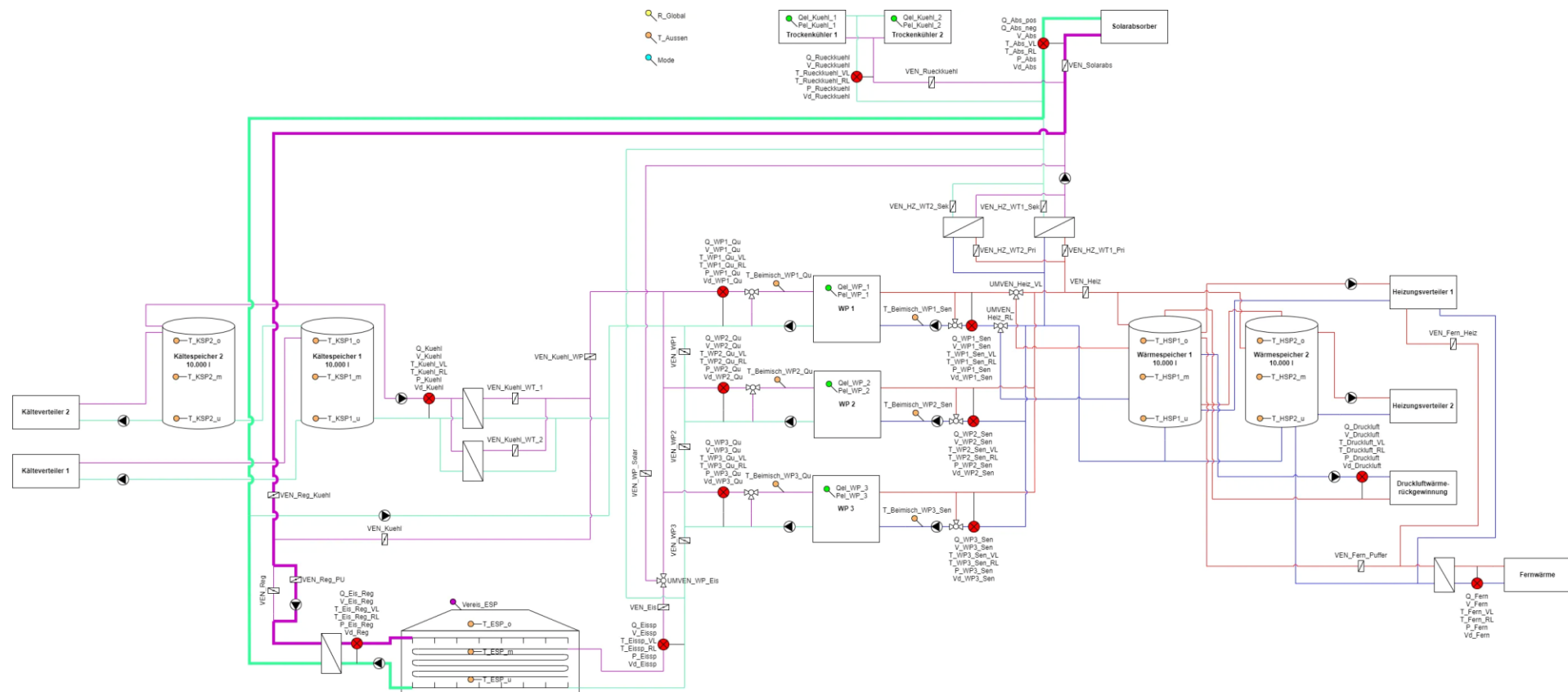


Abbildung 14: Betriebsmodus 6: Passive Vorkühlung – Der Eisspeicher wird über die Solarabsorber abgekühlt.

Betriebsmodus 7: Aktive Vorkühlung

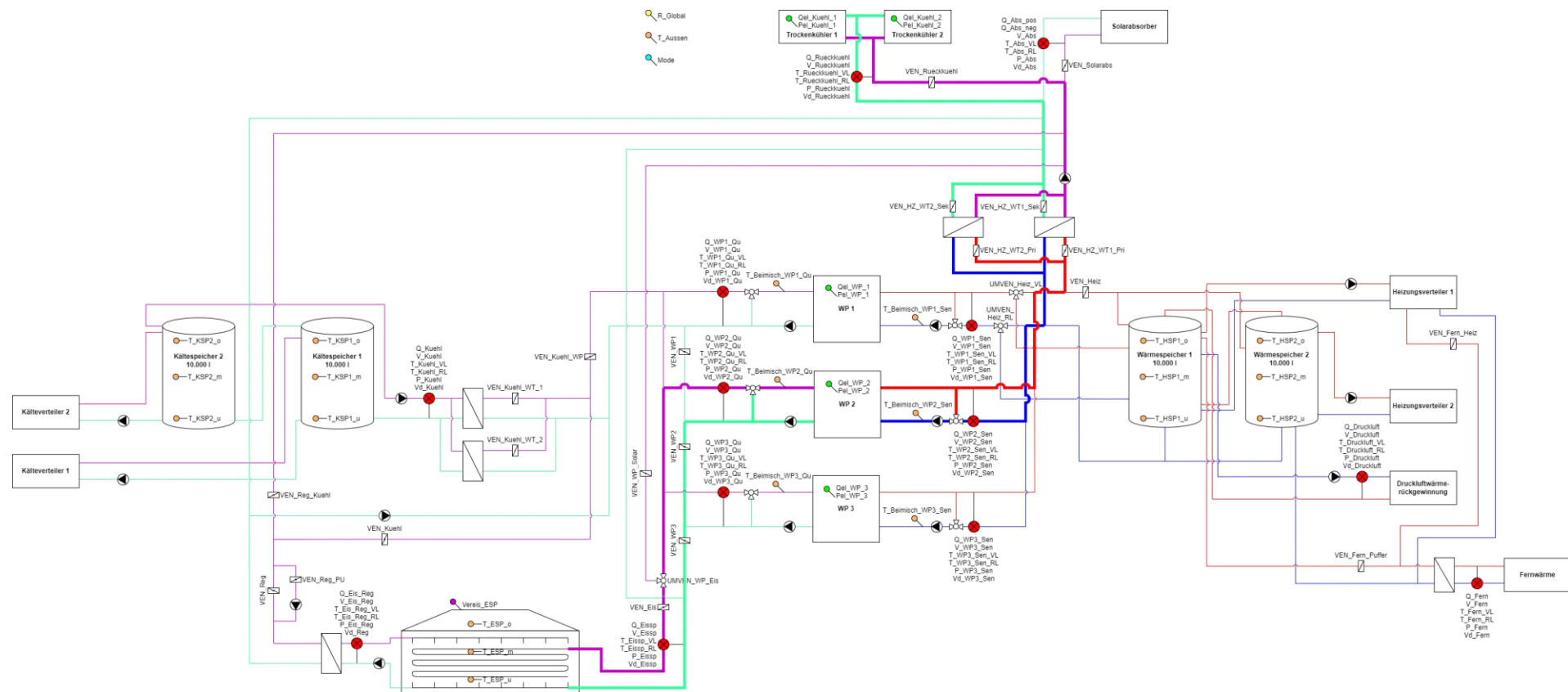


Abbildung 15: Betriebsmodus 7: Aktive Vorkühlung – Der Eisspeicher wird über die Wärmepumpen/Kältemaschinen abgekühlt. Die Abwärme wird über die Trockenkühler abgeführt.

Betriebsmodus 8: Natürliche Kühlung

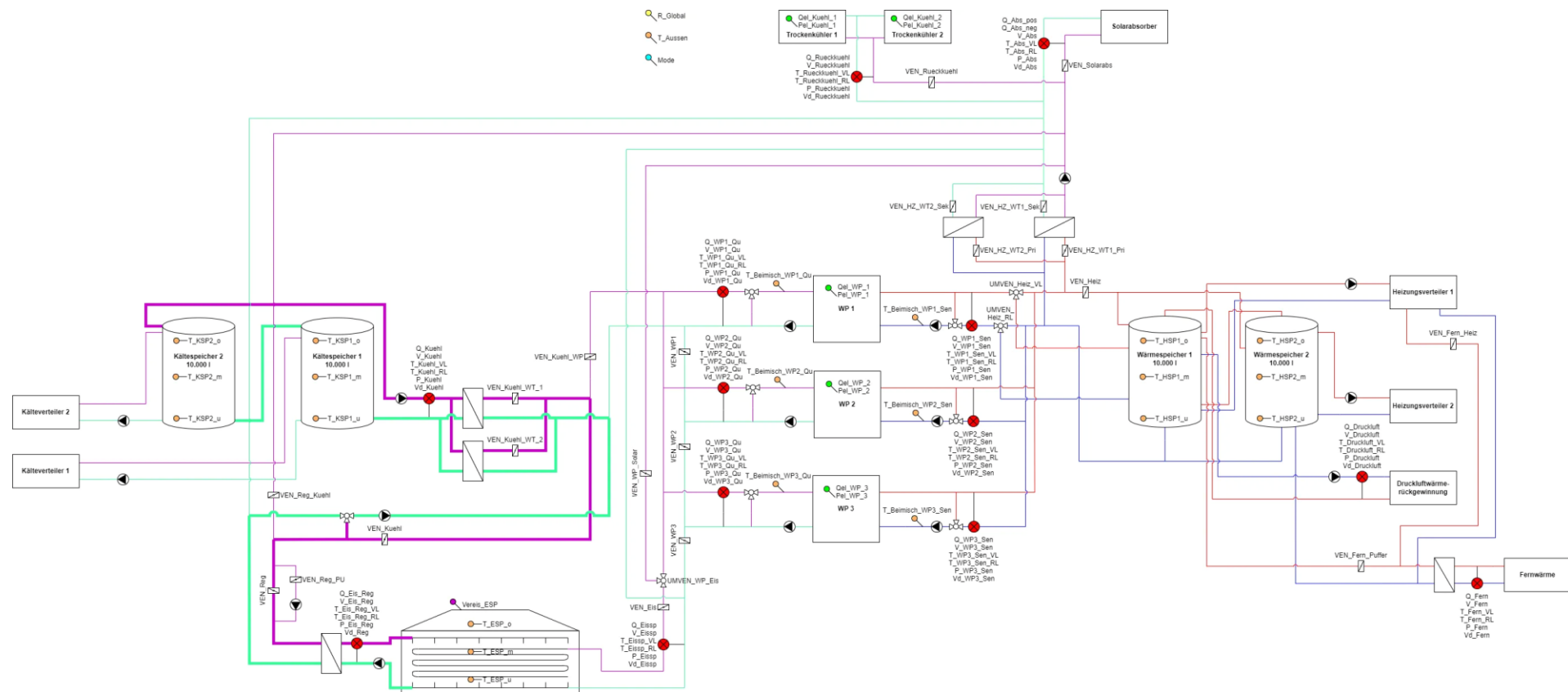


Abbildung 16: Betriebsmodus 8: Natürliche Kühlung (NC) – Der Kühlbedarf wird über den Eisspeicher bereitgestellt.

Betriebsmodus 9: Natürliche Kühlung mit Mischbetrieb

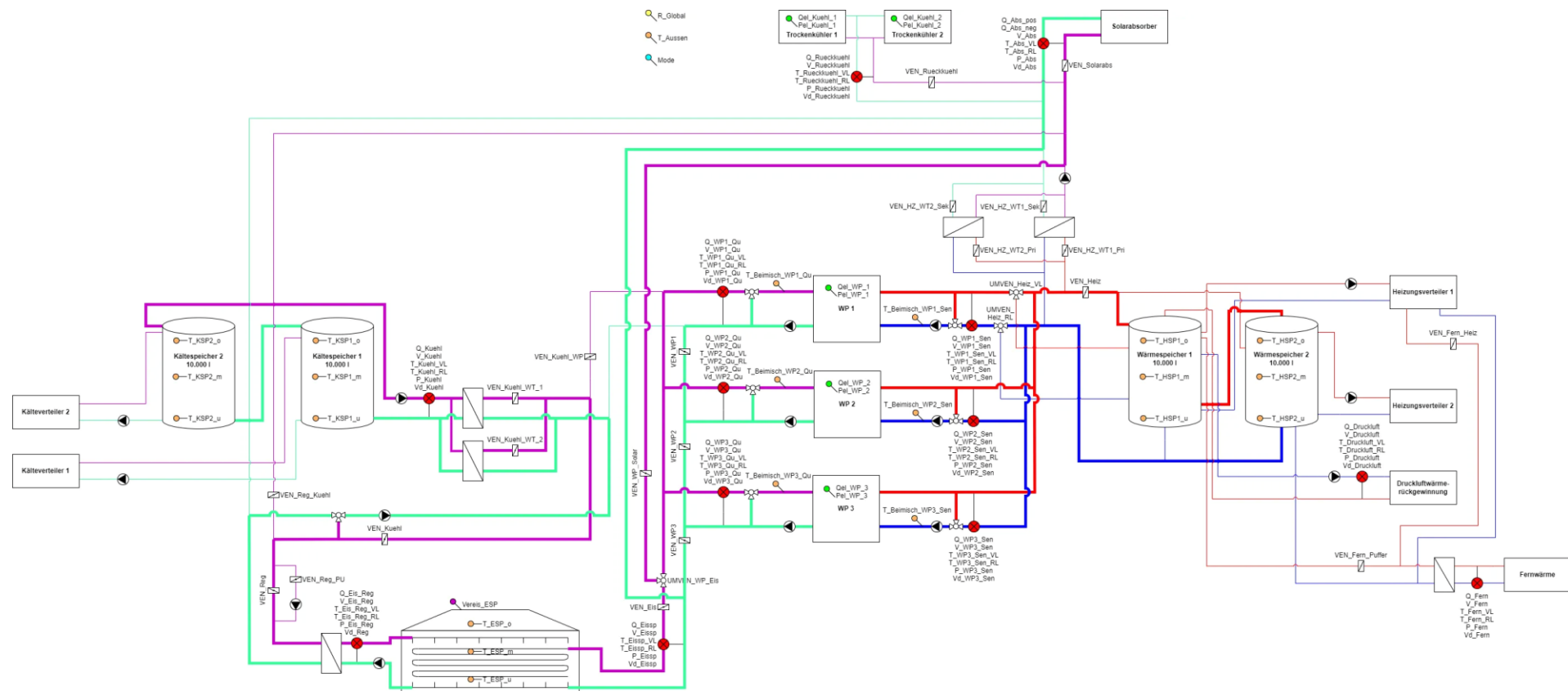


Abbildung 17: Betriebsmodus 9: Natürliche Kühlung mit Mischbetrieb – Der Kühlbedarf wird über den Eisspeicher bereitgestellt. Die Wärmepumpen liefern Heizwärme. Die Primärseitige Energie für die Wärmepumpen wird durch den Eisspeicher und die Solarabsorber bereitgestellt.

Betriebsmodus 10: Freie Kühlung (FC)

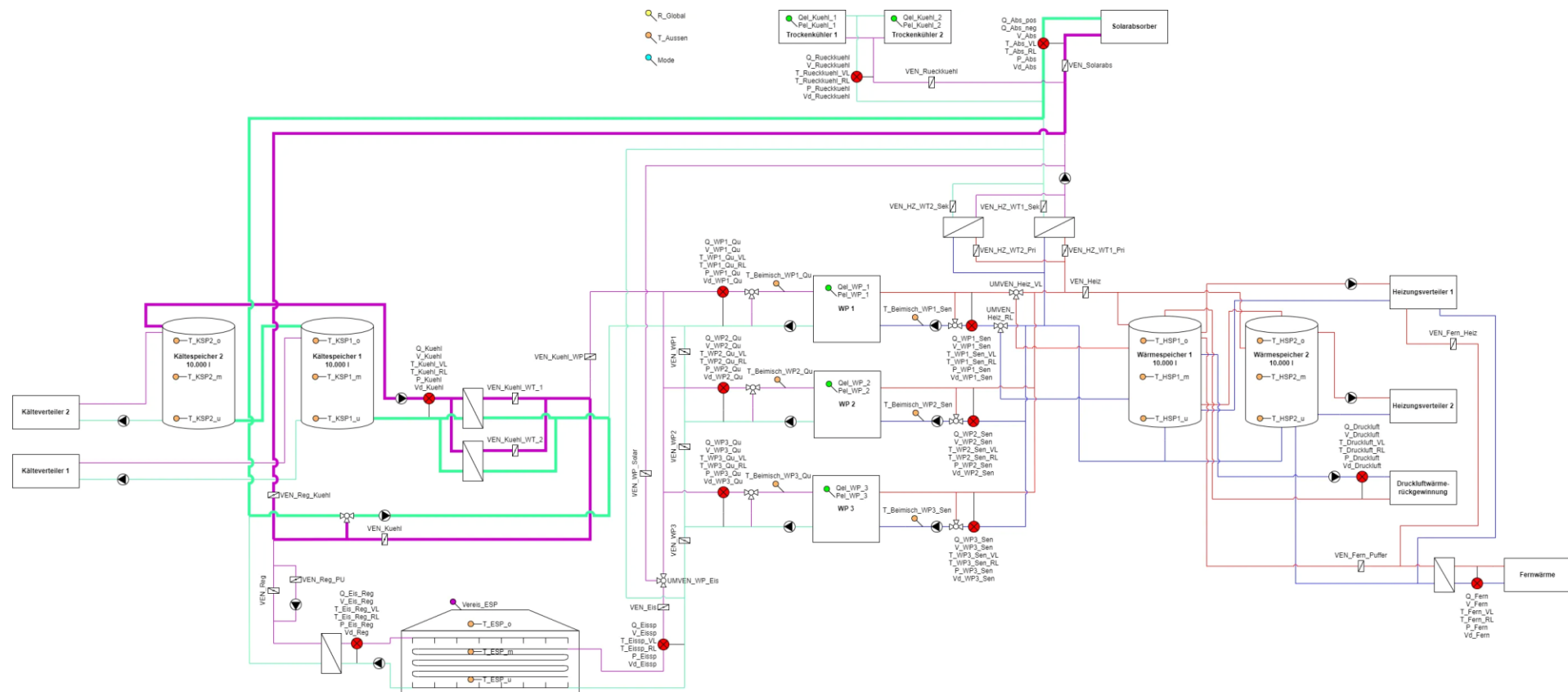


Abbildung 18: Betriebsmodus 10: Freie Kühlung (FC) – Der Kühlbedarf wird über die Solarabsorber bereitgestellt.

Betriebsmodus 11: Free Cooling mit Heizbetrieb

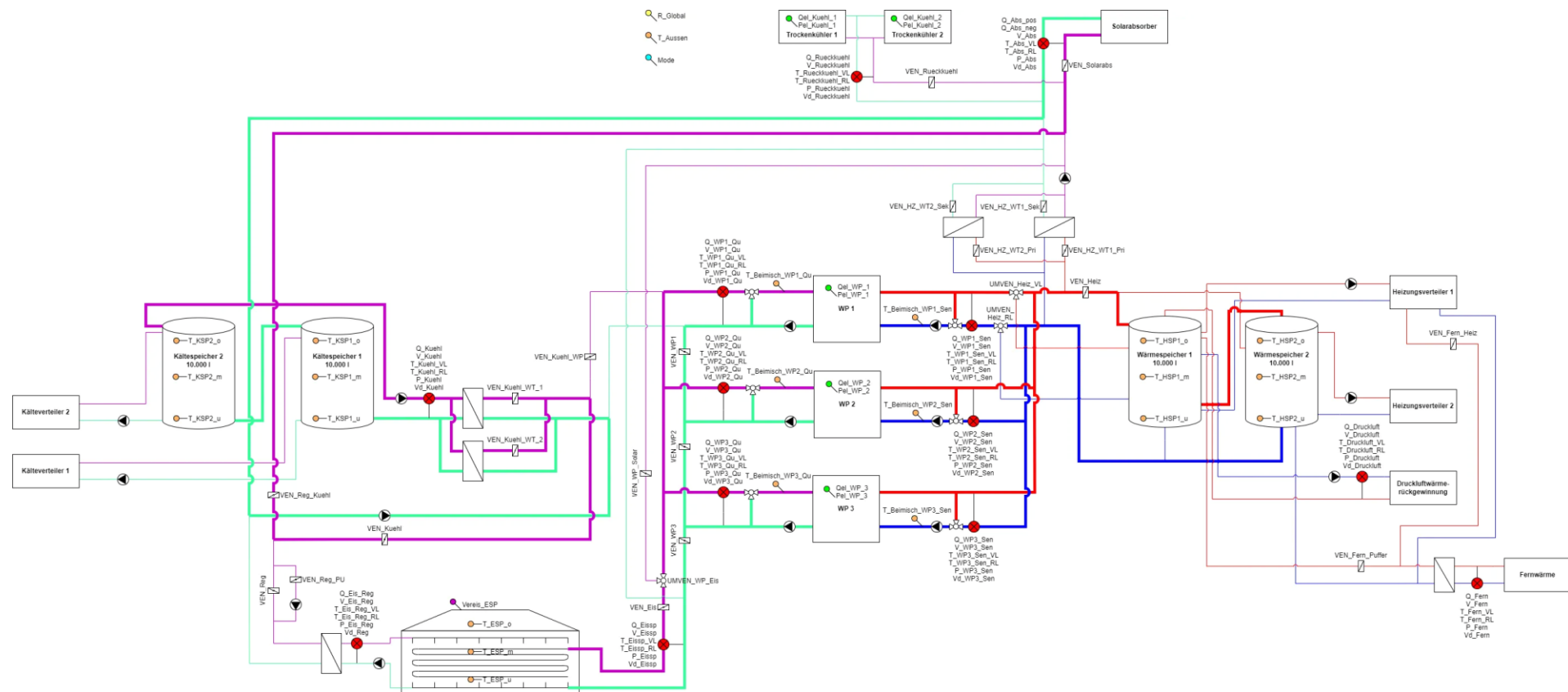


Abbildung 19: Betriebsmodus 11: Free Cooling mit Heizbetrieb – Der Kühlbedarf wird über die Solarabsorber bereitgestellt. Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Der Eisspeicher dient als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen.

Betriebsmodus 12: Aktive Kühlung (AC)

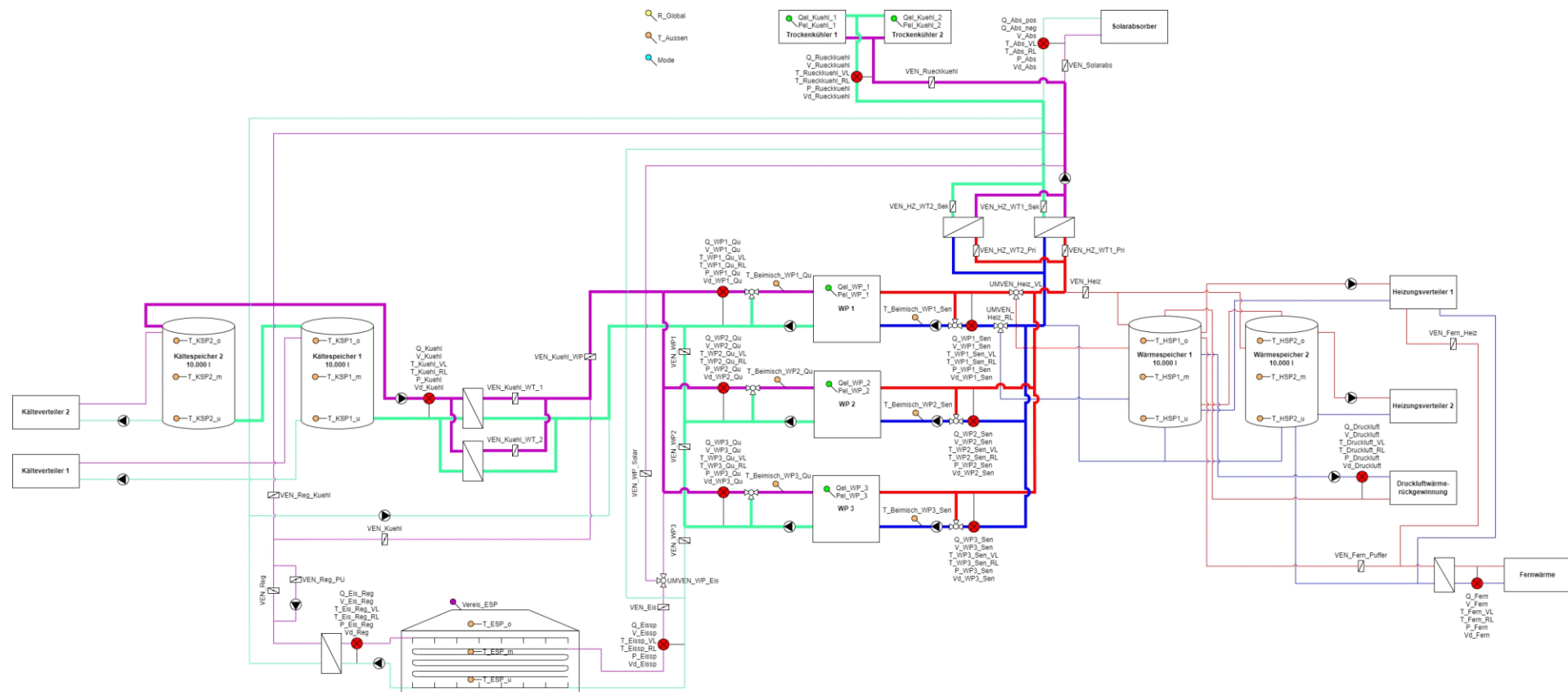


Abbildung 20: Betriebsmodus 12: Aktive Kühlung (AC) – Der Kühlbedarf wird über die Wärmepumpen/Kältemaschinen bereitgestellt. Die Abwärme wird über die Trockenkühler abgegeben.

Betriebsmodus 13: Aktive Kühlung mit Heizbetrieb (AC Dual)

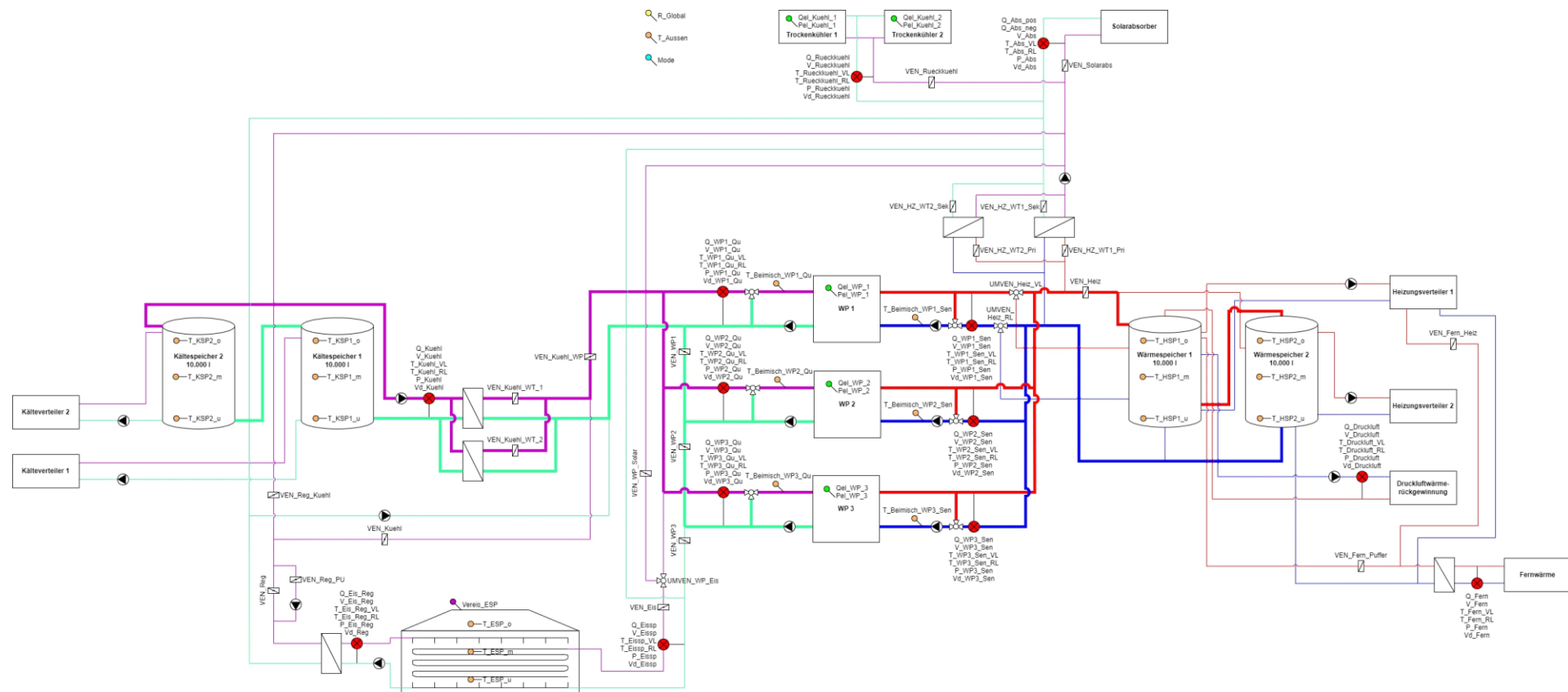


Abbildung 21: Betriebsmodus 13: Aktive Kühlung mit Heizbetrieb (AC Dual) – Der Kühlbedarf wird über die Wärmepumpen/Kältemaschinen bereitgestellt. Die Abwärme wird an die Wärmespeicher zu Heizzwecken abgegeben.

Betriebsmodus 16: Natürliche Kühlung mit Entzugsbetrieb

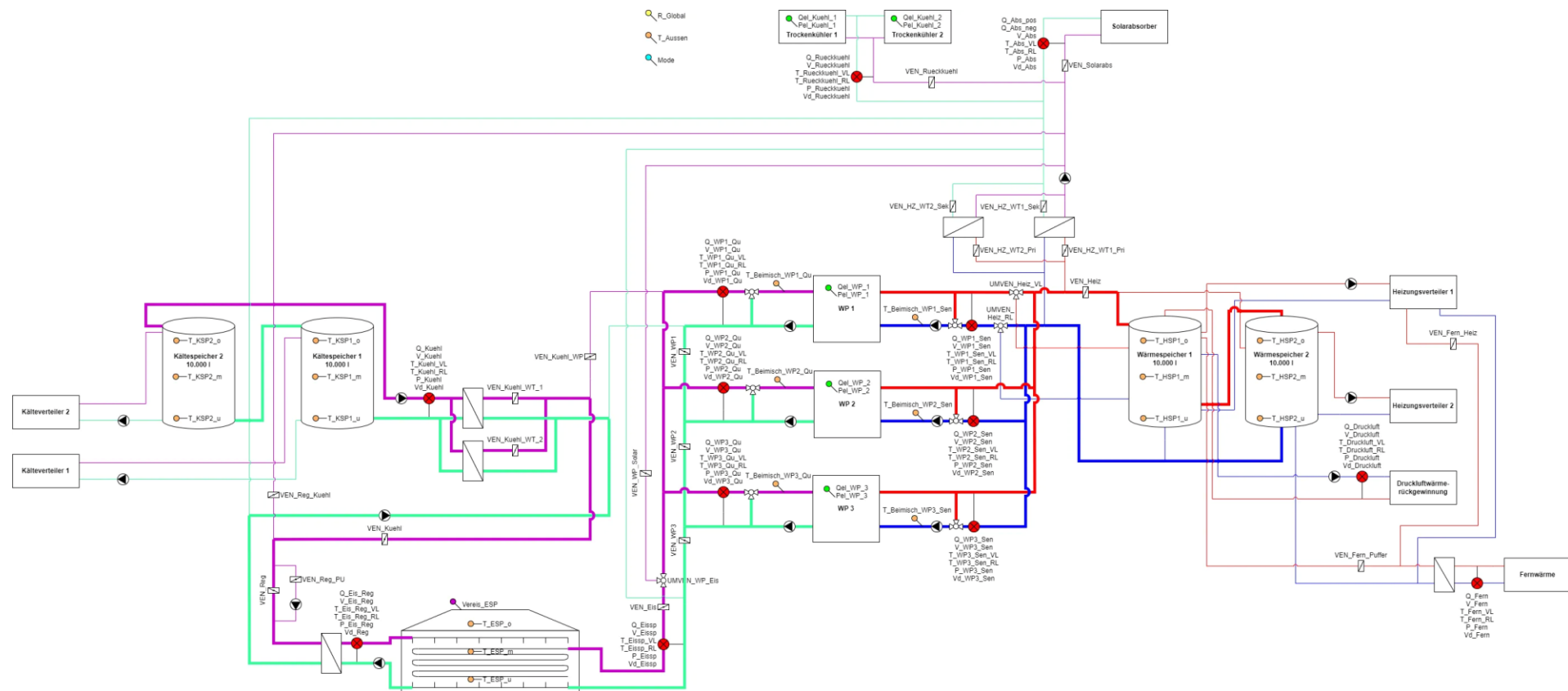


Abbildung 22: Betriebsmodus 16: Natürliche Kühlung mit Entzugsbetrieb – Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Der Eisspeicher dient als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen. Der Kühlbedarf wird über den Eisspeicher bereitgestellt.

Betriebsmodus 17: Natürliche Kühlung mit Absorberdirektbetrieb

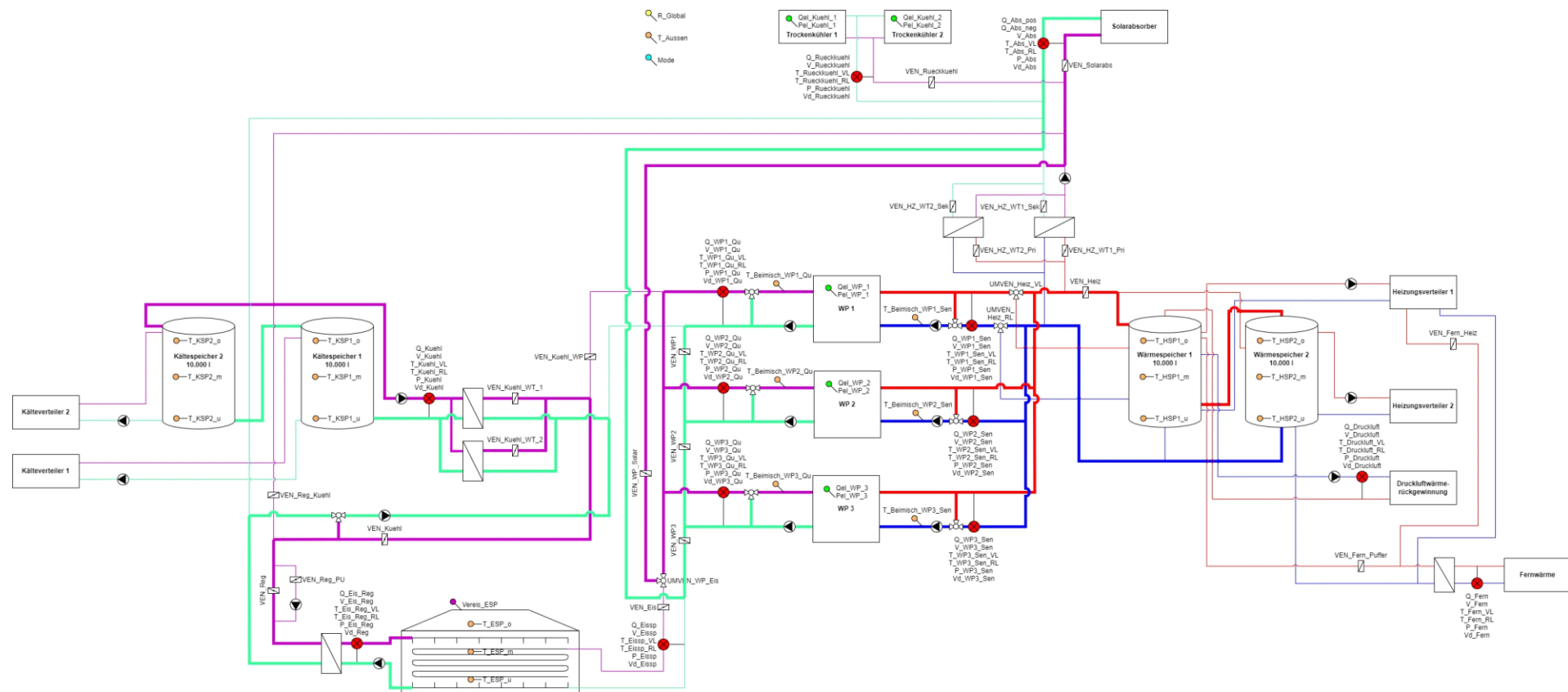


Abbildung 23: Betriebsmodus 17: Natürliche Kühlung mit Absorberdirektbetrieb – Die Wärmepumpen laufen im Heizbetrieb. Die Solarabsorber dienen als primärseitige Quelle für die Wärmepumpen. Der Kühlbedarf wird über den Eisspeicher bereitgestellt.

Sieben Wärme-/Kältemengenzähler, 3 Stromzähler, 32 Temperatursensoren, 13 Ventilstellungen, ein Drucksensor im solaren Primärkreis, ein Globalstrahlungssensor sowie ein Pegelstandsmesser bilden in diesem Projekt die gesamte messtechnische Bestückung.

Die Beschreibung der einzelnen Messpunkte ist nachfolgend zusammengefasst:

	Globalstrahlung in Kollektorebene	R_Global
	Außentemperatur	T_Aussen
Regeneration WMZ Nr. 8	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_Eis_Reg V_Eis_Reg T_Eis_Reg_VL T_Eis_Reg_RL P_Eis_Reg Vd_Reg
WP1 Soleseite WMZ 4	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_WP1_Qu V_WP1_Qu T_WP1_Qu_VL T_WP1_Qu_RL P_WP1_Qu Vd_WP1_Qu
WP2 Soleseite WMZ 5	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_WP2_Qu V_WP2_Qu T_WP2_Qu_VL T_WP2_Qu_RL P_WP2_Qu Vd_WP2_Qu
WP3 Soleseite WMZ 6	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_WP3_Qu V_WP3_Qu T_WP3_Qu_VL T_WP3_Qu_RL P_WP3_Qu Vd_WP3_Qu
WP1 Heizungsseite WMZ 1	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_WP1_Sen V_WP1_Sen T_WP1_Sen_VL T_WP1_Sen_RL P_WP1_Sen Vd_WP1_Sen
WP2 Heizungsseite WMZ 2	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_WP2_Sen V_WP2_Sen T_WP2_Sen_VL T_WP2_Sen_RL P_WP2_Sen Vd_WP2_Sen
WP3 Heizungsseite WMZ 3	Energie	Q_WP3_Sen

	Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	V_WP3_Sen T_WP3_Sen_VL T_WP3_Sen_RL P_WP3_Sen Vd_WP3_Sen
Eisspeicher WMZ 7	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_Eissp V_Eissp T_Eissp_VL T_Eissp_RL P_Eissp Vd_Eissp
Druckluftrückgewinnung Nr. 1 WMZ 9	Energie Volumen T-Vorlauf T-Rücklauf Leistung Durchfluss	Q_Druckluft V_Druckluft T_Druckluft_VL T_Druckluft_RL P_Druckluft Vd_Druckluft
V031	V 031	VEN_Reg_Kuehl
V030	V 030	VEN_Kuehl
V028	V 028	VEN_Kuehl_WT_1
V029	V 029	VEN_Kuehl_WT_2
V027	V 027	VEN_Kuehl_WP
V022	V 022	VEN_WP1
V023	V 023	VEN_WP2
V024	V 024	VEN_WP3
V025	V 025	VEN_WP_Solar
V060	V 060	UMVEN_WP_Eis
V026	V 026	VEN_Eis
V007	V 007	UMVEN_Heiz_VL
V008	V 008	UMVEN_Heiz_RL
V013	V 013	VEN_Heiz
V011	V 011	VEN_HZ_WT1_Pri
V012	V 012	VEN_HZ_WT2_Pri
V018	V 018	VEN_HZ_WT2_Sek
V019	V 019	VEN_HZ_WT1_Sek
V020	V 020	VEN_Rueckkuehl
V021	V 021	VEN_Solarabs
V032	V 032	VEN_Reg
V033	V 033	VEN_Reg_PU
Wärmepumpe 1	Energie	Qel_WP_1
	Leistung	Pel_WP_1
Wärmepumpe 2	Energie	Qel_WP_2
	Leistung	Pel_WP_2

Wärmepumpe 3	Energie	Qel_WP_3
	Leistung	Pel_WP_3
Rückkühler 1	Energie	Qel_Kuehl_1
	Leistung	Pel_Kuehl_1
Rückkühler 2	Energie	Qel_Kuehl_2
	Leistung	Pel_Kuehl_2
Temperatursensoren	Beimisch Temperatur WP1 Quelle	T_Beimisch_WP1_Qu
	Beimisch Temperatur WP2 Quelle	T_Beimisch_WP2_Qu
	Beimisch Temperatur WP3 Quelle	T_Beimisch_WP3_Qu
	Beimisch Temperatur WP1 Senke	T_Beimisch_WP1_Sen
	Beimisch Temperatur WP2 Senke	T_Beimisch_WP2_Sen
	Beimisch Temperatur WP3 Senke	T_Beimisch_WP3_Sen
	Pufferfühler KSP2_oben	T_KSP2_o
	Pufferfühler KSP2_mitte	T_KSP2_m
	Pufferfühler KSP2_unten	T_KSP2_u
	Pufferfühler KSP1_oben	T_KSP1_o
	Pufferfühler KSP1_mitte	T_KSP1_m
	Pufferfühler KSP1_unten	T_KSP1_u
	Pufferfühler HSP1_oben	T_HSP1_o
	Pufferfühler HSP1_mitte	T_HSP1_m
	Pufferfühler HSP1_unten	T_HSP1_u
	Pufferfühler HSP2_oben	T_HSP2_o
	Pufferfühler HSP2_mitte	T_HSP2_m
	Pufferfühler HSP2_unten	T_HSP2_u
	Pufferfühler ESP_oben	T_ESP_o
	Pufferfühler ESP_mitte	T_ESP_m
	Pufferfühler ESP_unten	T_ESP_u
	Vereisungsgrad Esp	Vereis_ESP
	Anlagen Mode	Mode
Solarluftkollektoren WMZ 11	Energie positiv	Q_Abs_pos
	Energie negativ	Q_Abs_neg
	Volumen	V_Abs
	T-Vorlauf	T_Abs_VL
	T-Rücklauf	T_Abs_RL
	Leistung	P_Abs
	Durchfluss	Vd_Abs
Rückkühler WMZ 12	Energie	Q_Rueckkuehl
	Volumen	V_Rueckkuehl
	T-Vorlauf	T_Rueckkuehl_VL
	T-Rücklauf	T_Rueckkuehl_RL
	Leistung	P_Rueckkuehl
	Durchfluss	Vd_Rueckkuehl
	Energie	Q_Druckluft_1

Druckluftwärmerückgewinnung 2 WMZ 9.1	Volumen	V_Druckluft_1
	T-Vorlauf	T_Druckluft_VL_1
	T-Rücklauf	T_Druckluft_RL_1
	Leistung	P_Druckluft_1
	Durchfluss	Vd_Druckluft_1

7.1.3 Energiebilanzen und Detailanalyse

Aufgrund der unterschiedlichen Betriebsweisen des Systems, Heizen und Kühlen mit verschiedenen Quellen und Senken, wurden für die jeweiligen Betriebszustände unterschiedliche Energiebilanzen erstellt. Für gewöhnlich werden die Energiebilanzen des Systems gesondert von der Detailanalyse behandelt. Der Einfachheit halber wurde sich dafür entschieden die Detailanalyse für den jeweiligen Betriebszustand gemeinsam mit der Energiebilanz abzuarbeiten.

Um einen Überblick über das Gesamtsystem zu vermitteln, wurde des Weiteren eine aggregierte Bilanz erstellt, welche im Anschluss zu den Betriebszuständen aufgeführt ist. Vorher gilt es aber die einzelnen Betriebszustände des Systems zu ermitteln.

Info: Da im System drei WP installiert sind, wird in der Detailanalyse bei den Vor- und Rücklauftemperaturen der Verdampfer und Kondensatoren die gewichtete Mitteltemperatur angegeben. Dazu werden die jeweiligen Temperaturen von Vor- und Rücklauf mit den dazugehörigen Volumenströmen der entsprechenden WP multipliziert und anschließend durch die Gesamtsumme der Volumenströme dividiert. Liegt an keiner der WP ein Volumenstrom vor wird lediglich das arithmetische Mittel der Temperaturen gebildet. Die Berechnung wird wie folgt abgebildet (Bsp.: Verdampfer-VL):

$$T_{Verd,VL,weight} = \begin{cases} \frac{T_{1,Verd,VL} * \dot{V}_{1,Verd} + T_{2,Verd,VL} * \dot{V}_{2,Verd} + T_{3,Verd,VL} * \dot{V}_{3,Verd}}{\sum_{i=1}^3 \dot{V}_{i,Verd}}, & \sum_{i=1}^3 \dot{V}_{i,Verd} > 0 \\ \frac{T_{1,Verd,VL} + T_{2,Verd,VL} + T_{3,Verd,VL}}{3}, & \sum_{i=1}^3 \dot{V}_{i,Verd} = 0 \end{cases}$$

Betriebszustände

Während der Monitoringperiode (Jun 24 – Mai 25) sind im Wesentlichen 4 Betriebszustände, welche energetisch relevant sind, aufgetreten. Diese sind Mode 2 (Heizen, Quelle Eisspeicher; grün), 3 (Heizen, Quelle Eis+Solar; violett) sowie Mode 12 (aktive Kühlung, hellblau) und 13 (Kühlen und Heizen; lachs). In Abbildung 24 ist die Verteilung der jeweiligen Betriebsmodi auf die Monate dargestellt.

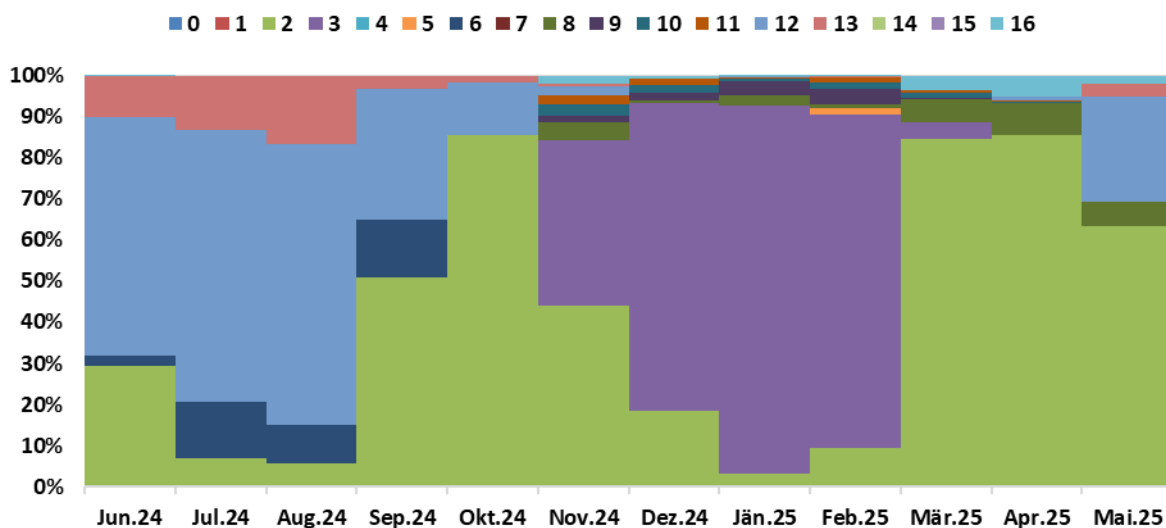


Abbildung 24: Häufigkeit der Betriebsmodi während des Monitoringperiode.

Im Folgenden werden nun diese vier Betriebszustände näher beleuchtet.

Mode 2 - Heizen (Quelle Eisspeicher)

Abbildung 25 zeigt die Energiebilanz des Betriebsmodus 2. Hierbei wird durch die Wärmepumpe Heizwärme erzeugt und als Verdampferquelle wird der Eisspeicher verwendet.

Im März und April 2025 kam es zu Aussetzern der Strommessung, weshalb diese in Abbildung 25 schraffiert dargestellt ist. Die Strommenge wurde hier idealisiert aus den Differenzen von Verdampfer und Kondensator rückgerechnet ($P_{el} = P_{Kond} - P_{Verd}$). Die Verdampferenergie hingegen, welche aus dem Eisspeicher kommt, ist ebenfalls teilweise schraffiert dargestellt und wurde mit „Verlusten“ bezeichnet. Da die Fluidtemperatur mit ca. 6°C deutlich unter der umgebenden Raumtemperatur liegt, handelt es sich dabei nicht um Verluste per se, sondern um Wärmeeinträge in das Rohrsystem. Die Wärmeeinträge zwischen Eisspeicher und Wärmepumpe sorgen dafür, dass im Betrieb jeweils unterschiedliche Wärmemengen zwischen Eisspeicherausgang und Verdampfereingang gemessen werden. Als Beispiel wird der Betriebspunkt 07.11.2024 um 18:24 angeführt.

	T_VL [°C]	T_RL [°C]	delta T [K]
WP-Verdampfer	6,42	5,42	1
Eisspeicher	6,36	5,98	0,38

Wie zu sehen, ist die gemessene Temperaturdifferenz am Verdampfer bei 1K und am Eisspeicher nur mehr 0,38K. Durch die gleichen Volumenströme aber die unterschiedlichen delta T errechnet sich dann auf der Verdampferseite der Wärmepumpe 100% Energie und an der Eisspeicherseite nur mehr 38%. Geschuldet der kleinen dT sind die Unterschiede enorm.

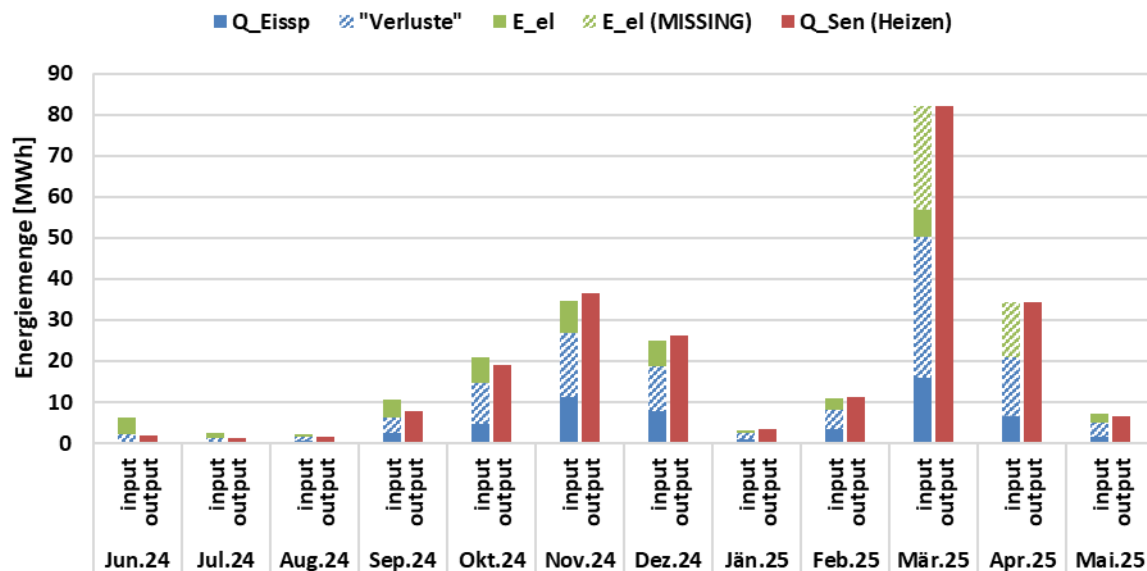


Abbildung 25: Energiebilanz Betriebsmodus 2.

In Abbildung 26 sind die Temperaturen und der Vereisungsgrad im Eisspeicher dargestellt. Der Wärmeentzug ist hier in den sinkenden Temperaturen bis 0°C und dem anschließend steigenden Vereisungsgrad nachzuvollziehen.

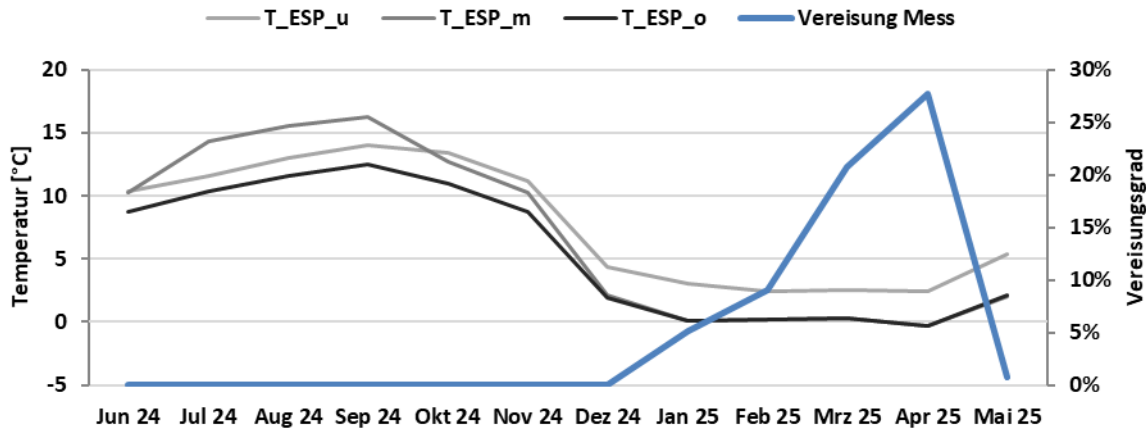


Abbildung 26: Vereisungsgrad und Temperaturen in im Eisspeicher (Monatsmittel).

Mode 3 - Heizen (Quelle Solar + Eisspeicher)

Abbildung 27 zeigt die Energiebilanz des Betriebsmodus 3. Hierbei handelt es sich um einen Heizbetrieb bei dem der Solar-Luft-Absorber als Quelle dient. Dieser Modus ist vorrangig in der Hochzeit der Heizperiode aktiv. Die Besonderheit bei diesem Modus ist, dass wenn die Vorlauftemperatur aus den Absorbern unter -5°C fällt, wird der Eisspeicher zugeschaltet, um die Verdampfertemperatur für die Wärmepumpe zu erhöhen. Auch hier ist zu vermerken, dass die Temperaturen zwischen Solar-Luft-Absorber und WP-Verdampfer (parallel zu den Eisspeichertemperaturen im Modus 2) durch Wärmegewinne in die Rohrleitung hinein, voneinander abweichen. Um in der Nomenklatur konsistent zu bleiben, wurden diese Wärmemengen ebenso mit der Endung „_Verluste“ bezeichnet, obwohl es sich effektiv um Wärmegewinne handelt.

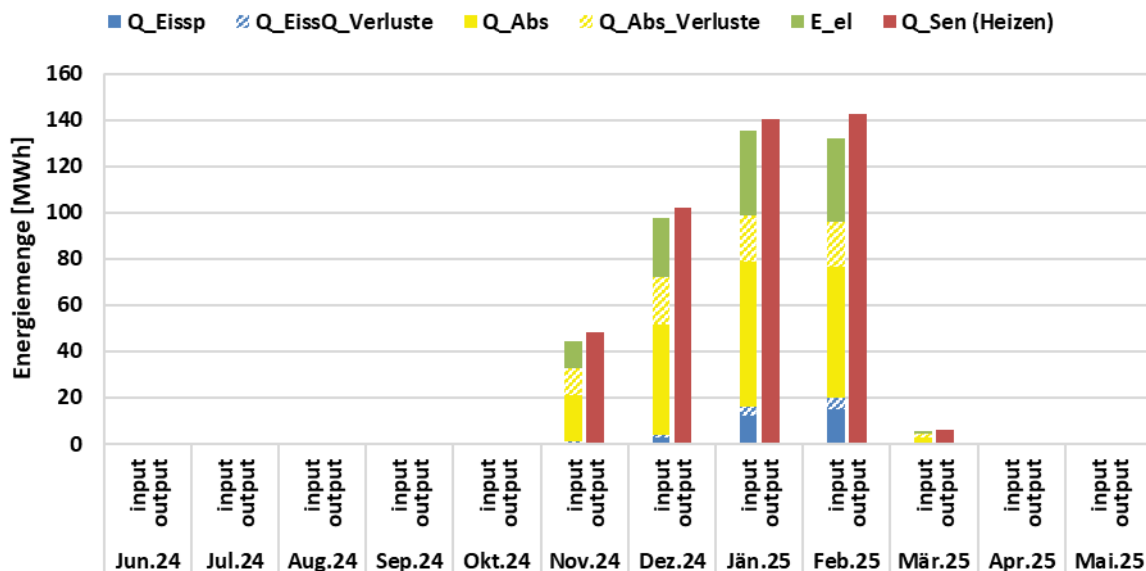


Abbildung 27: Energiebilanz Betriebsmodus 3.

In Abbildung 28 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen des Solar-Luft-WT, die gewichteten Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmepumpenverdampfer, sowie die Volumenströme des Solar-Luft-WT, durch den Eisspeicher und der Wärmepumpenverdampfer gezeigt. Ab einer Absorber-VL-Temperatur von -5°C wird begonnen zusätzlich Wärme aus dem Eisspeicher (auf 0°C) zu entziehen. Während des Betriebes kann die WP-VL-Temperatur damit um einige K gesteigert werden und hilft dabei die Arbeitszahl der WP zu verbessern.

Der Ausschnitt zeigt den Betrieb der ersten Tageshälfte des 14.01.2025. Hier wird die Vorlauftemperatur aus dem Absorber von -9°C mittels des Eisspeichers auf -7°C gehoben.

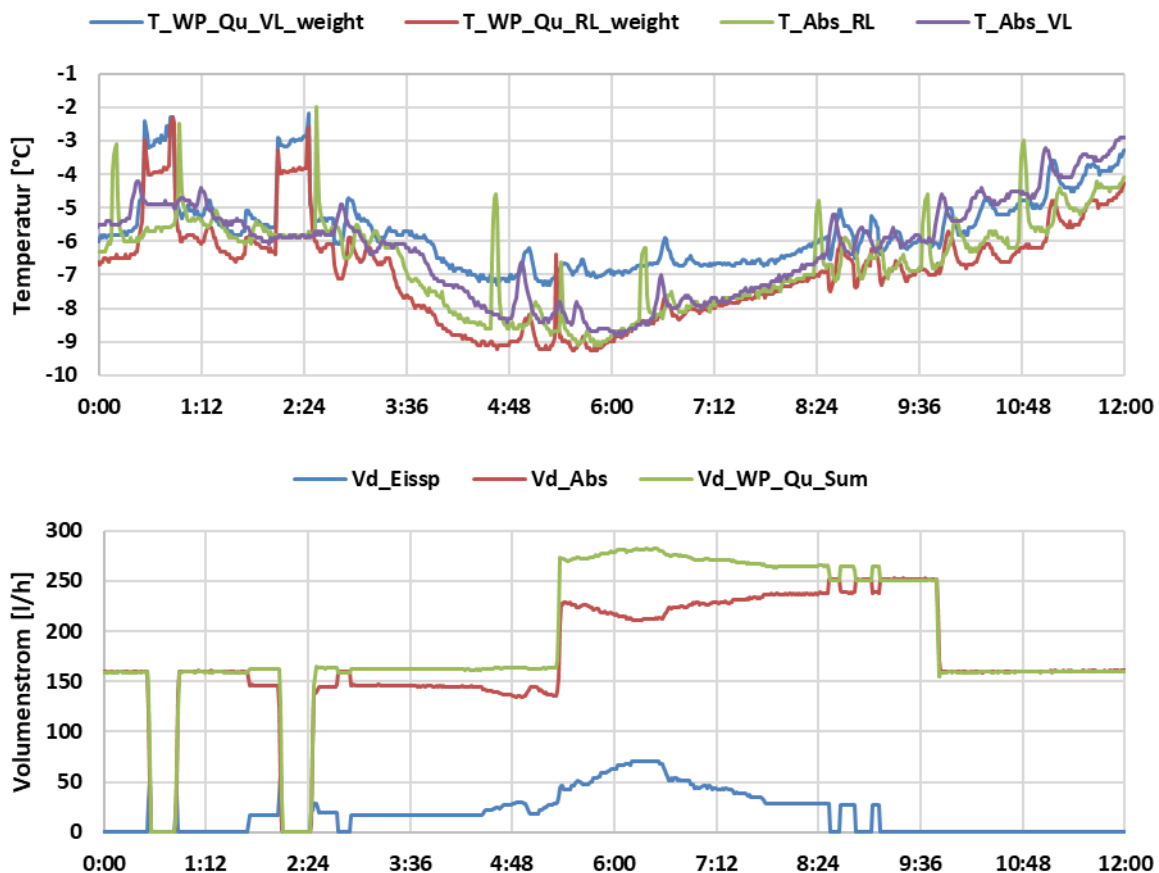


Abbildung 28: Oben: Vor- und Rücklauftemperaturen des Solar-Luft-WT und gewichtete VL-RL-Temperaturen der Wärmepumpenverdampfer. Unten: Volumenströme durch den Eisspeicher, Solar-Luft-WT und Wärmepumpenverdampfer. (Ausschnitt: 14.01.2025 00:00-12:00)

Aus den Abbildungen heraus lässt sich bereits ein Optimierungspotential ableiten: Zum einen kann die Grenztemperatur von -5°C heraufgesetzt werden und bereits bei höheren Vorlauftemperaturen (bspw. $T_{\text{Abs_VL}} = -2^{\circ}\text{C}$) begonnen werden, Wärme aus dem Eisspeicher zuzuführen. Des Weiteren kann der Volumenstrom durch den Eisspeicher erhöht werden, mit dem gleichen Effekt, mehr Wärme aus dem Eisspeicher zu entziehen und damit die Verdampfer-VL-Temperaturen für die WP zu erhöhen.

Der Vereisungsgrad des Eisspeichers liegt Ende März bei maximal 31% (vgl. Abbildung 26), es ist also durchaus noch mehr Kapazität im Eisspeicher vorhanden, welche derzeit noch ungenutzt ist. Ein weiterer Vorteil der Eisspeicherbeladung wäre, dass in der Übergangszeit, eventuell bis in den Sommer hinein, mehr Kälte im Speicher zur Verfügung steht, welche über Free-Cooling direkt genutzt werden kann und damit das WP-System nicht laufen muss.

Mode 12 - Kühlen (Senke Rückkühler)

Abbildung 29 zeigt die Energiebilanz des Betriebsmodus 12. In diesem Modus ist der „klassische“ Kühlfall aktiv, in dem keine Heizanforderung besteht und die beim Kühlprozess entstandene Abwärme über den Rückkühler am Dach an die Umgebung abgegeben wird. Wie zu erwarten, tritt dieser Fall vornehmlich in den Sommermonaten auf.

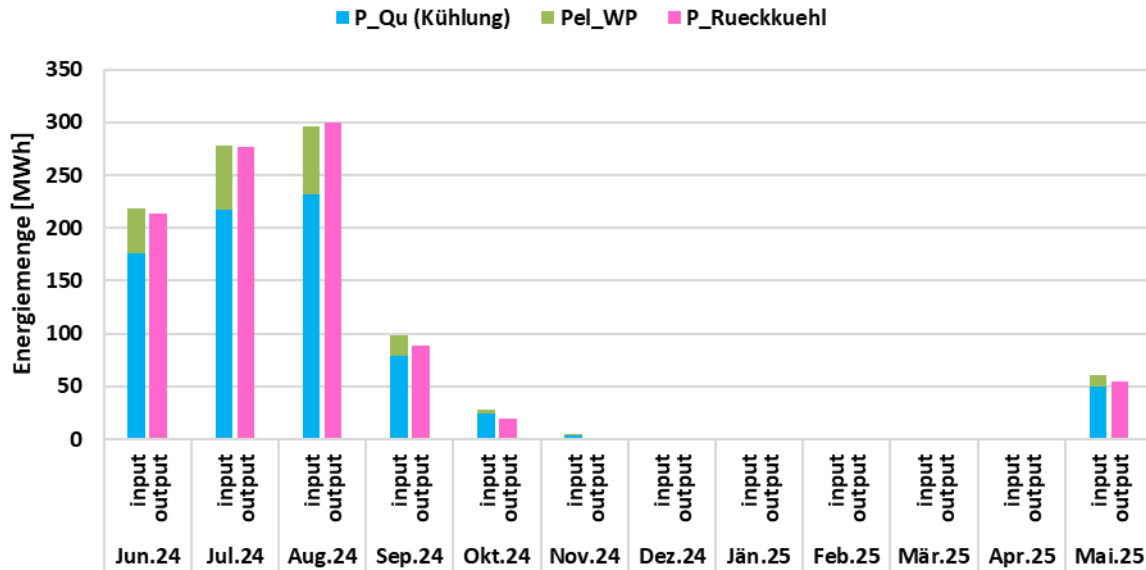
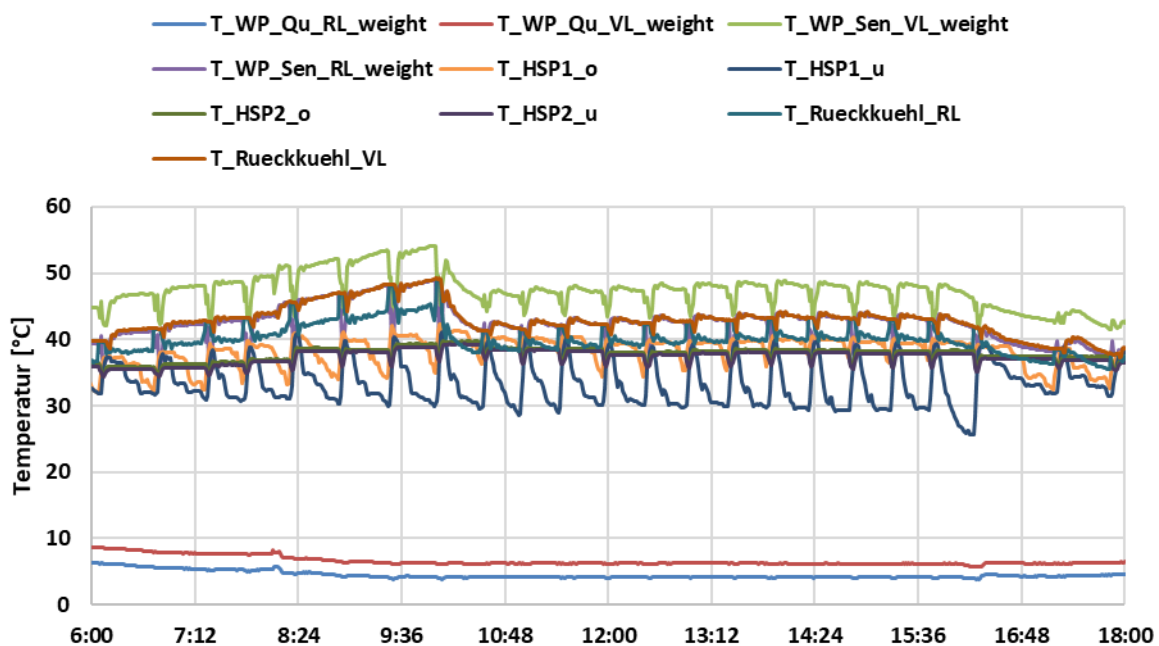


Abbildung 29: Energiebilanz Betriebsmodus 12.

In Abbildung 30 sind oben die Temperaturverläufe der WP-Quellen und Senken- Vor- und Rückläufe, des Rückkühlvor- und rücklaufs sowie die der Wärmespeicher 1&2 oben und unten dargestellt. Unten sind die Volumenströme des Rückkühlers als auch der WP Quell- und Senkenseite abgebildet. Im regulären Kühlbetrieb, in dem kein gleichzeitiger Heizbedarf besteht, wird die Abwärme aus dem Kühlprozess über den Rückkühler an die Umgebung abgegeben. Da der Wärmepumpenkreis und der Rückkühlkreis hydraulisch voneinander getrennt sind, sind in der unteren Abbildung parallel dazu unterschiedliche Volumenströme zu vermerken. Der Rückkühler senkt die Temperaturen um durchschnittlich 4K ab. Die Volumenströme im Rückkühler sehen über den Tag verteilt immer wieder kurzzeitige Einbrüche. Dies ist auf das Umschalten von Mode 12 auf Mode 13 zurückzuführen. Mode 13 wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben.



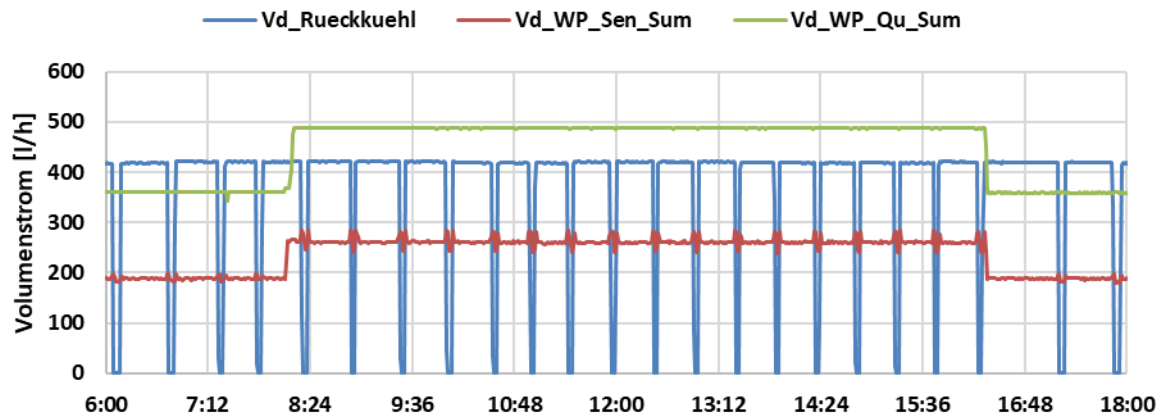


Abbildung 30: Oben: Temperaturverläufe der WP Quellen und Senken- Vor- und Rückläufe, des Rückkühlervor- und -rücklaufs, sowie der Wärmespeicher 1&2 oben und unten. Unten: Volumenströme des Rückkühlers, sowie der WP Quellen- und Senkenseite. (Ausschnitt: 12.08.2024 06:00-18:00)

Mode 13 – Parallelbetrieb (Heizen und Kühlen)

Abbildung 31 zeigt die Energiebilanz des Betriebsmodus 13. In diesem werden die Wärmepumpen im Dualbetrieb eingesetzt. Das heißt, dass sowohl die verdampferseitige Kühlleistung als auch die kondensatorseitige Wärmeleistung gleichzeitig im System verwendet werden. Fällt die Temperatur im Wärmespeicher (T_{HSP1_u}) unter 30°C wird die Abwärme an den Wärmespeicher geführt, bis dieser wieder 40°C erreicht. Daraufhin wird die Wärmeabgabe wieder über den Rückkühler abgegeben (vgl. Abbildung 30).

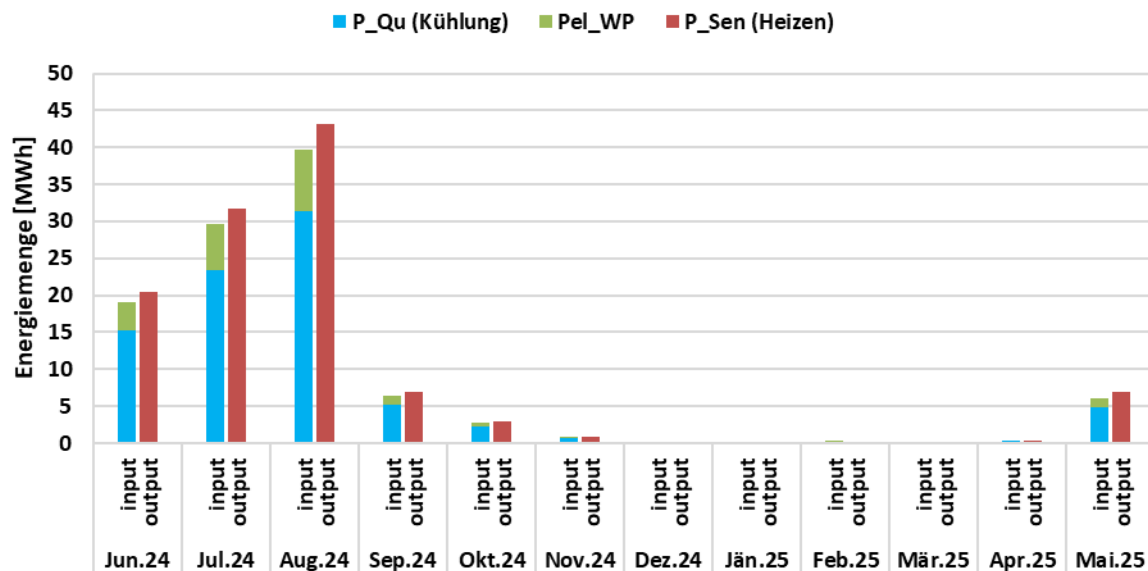


Abbildung 31: Energiebilanz Betriebsmodus 13.

Der Parallelbetrieb des Systems bietet dabei ein weiteres, wenn auch minimales Optimierungspotential. Es ist zu sehen, dass der Rücklauf der WP-Senkenseite (zu Tagesbeginn) teilweise um 5-6K über der Wärmespeichertemperaturen liegt. Hier würde sich die Möglichkeit ergeben, über eine genauere temperaturgeregelte Steuerung die Speichertemperaturen über die 40°C zu erhöhen, und damit leicht geringere Rücklauftemperaturen auf der WP-Senkenseite zu erreichen, was die Effizienz steigern würde.

Gesamtbilanz

Abbildung 32 zeigt die Gesamtbilanz des solaren Eisspeichersystems am Standort Anton Paar. Neben den monatlichen Energiesummen ist ebenfalls die Gesamtjahressumme (bezogen auf den Betrachtungszeitraum, rechts) abgebildet.

Die in diesem Zeitraum abgegebene Heizmenge liegt bei ca. 785MWh, die abgegeben Kühlmenge beläuft sich auf 867MWh. Dazu wurden insgesamt 417MWh Strom benötigt (378MWh davon gemessen, 39MWh rückgerechnet). Während des Betrachtungszeitraum waren die Betriebszustände Free-Cooling und solare Regeneration des Eisspeichers nicht aktiv. Da es sich um das erste Betriebsjahr der Gesamtanlage handelt, ist im nun eingeschwungenen Zustand zu erwarten, dass diese in Folge auftreten werden.

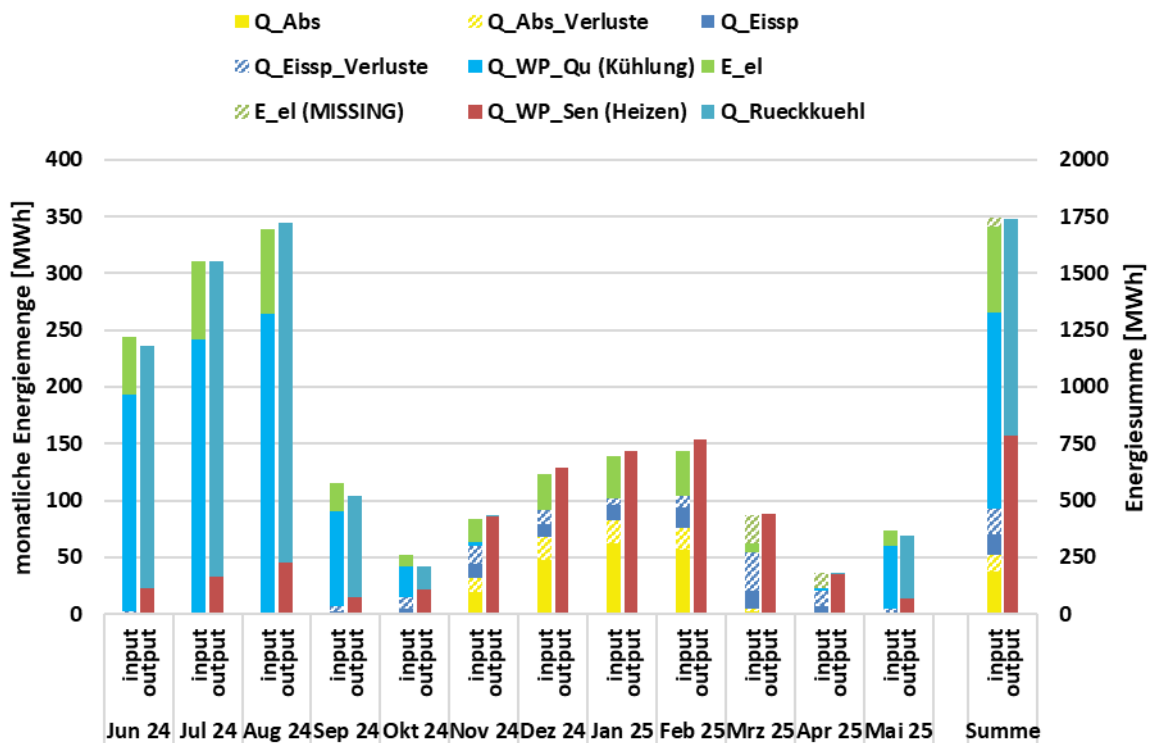


Abbildung 32: Gesamtbilanz des solaren Eisspeichersystems Anton Paar im Betrachtungszeitraum.

7.1.4 Vergleich Simulation – Messung

Solarertrag

Abbildung 33 zeigt die simulierten und gemessenen solaren Erträge des Solar-Luft-Absorbers am Standort Anton Paar. Es ist festzuhalten, dass die solaren Erträge bei ca. 40% der prognostizierten Energiemenge liegen. Dies hat eine Vielzahl von Gründen. Die Erträge des Absorbers sind stark von der Betriebsweise des Gesamtsystems abhängig. Ist der Wärmebedarf im System bspw. geringer als prognostiziert, kann der Absorber auch nur begrenzt Energie liefern, da allein der Bedarf nicht besteht. Des Weiteren ist beim Vergleich Simulation - Messung stets anzumerken, dass die Annahmen, die der Simulation zugrunde liegen, nur bedingt den realen Betrieb abdecken können. Zum einen ist die Komplexität einer Eisspeicheranlage sehr hoch und zum anderen ist eine detailgetreue Abbildung der Regelung in der Simulation im Vergleich zum tatsächlichen späteren Anlagenbetrieb schwer möglich. Generell ist festzuhalten, dass der Verlauf zumindest qualitativ wie zu erwarten ist und der wesentliche Ertrag während der Heizperiode anfällt.

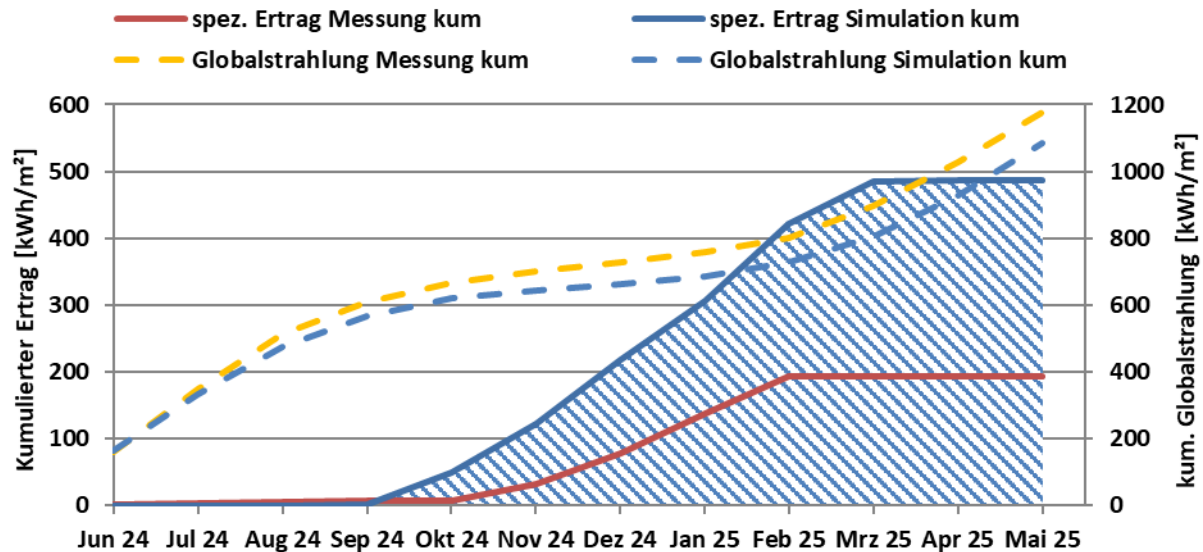


Abbildung 33: Vergleich der simulierten und gemessenen solaren Erträge des Solar-Luft-Absorbers.

Kühlbedarf

In Abbildung 34 sind die gemessenen und simulierten Kühlbedarfe dargestellt. Gegenüber der Prognose ist ein höherer Kühlbedarf im System angefallen. Besonders in den Sommermonaten zu Beginn der Messperiode ist ein deutlich stärkerer Anstieg zu verzeichnen. Die prognostizierten Kühlbedarfe in den Wintermonaten sind nicht aufgetreten. Dennoch ist auch hier der zu erwartende Verlauf nachzuvollziehen.

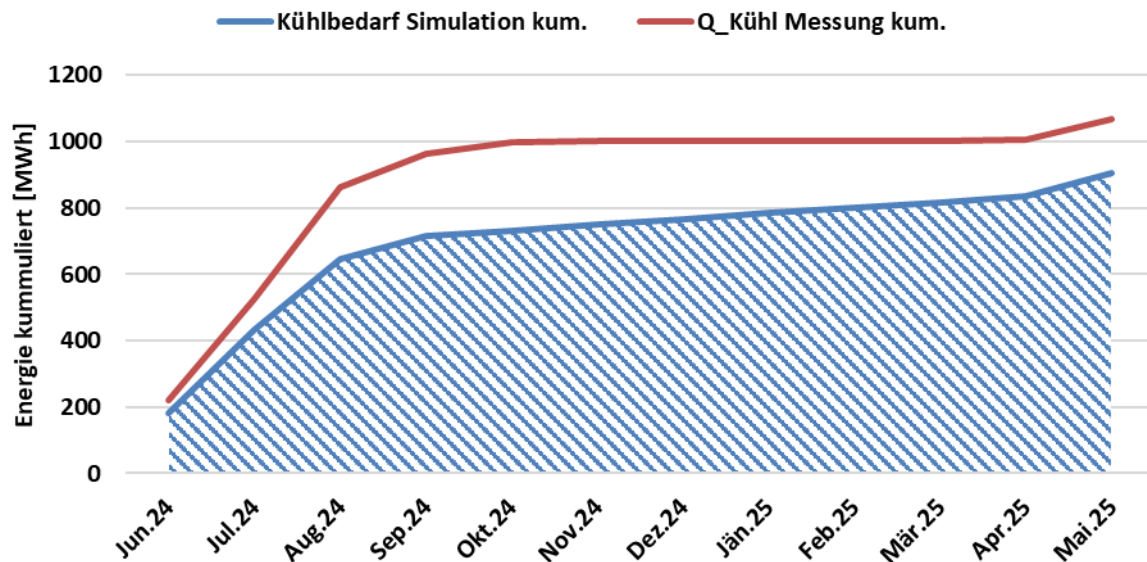


Abbildung 34: Vergleich der simulierten und gemessenen Kühlbedarfe des Gesamtsystems.

Heizbedarf

Abbildung 35 zeigt die simulierten und gemessenen Heizbedarfe im System. Da nicht nur die Wärmepumpen in das Wärmeabgabesystem liefern, sondern auch die Abwärme von zwei Druckluftkompressoren, wurden diese der Vollständigkeit halber mit dargestellt. Gerade in der Heizsaison ist ein doch deutlich geringerer Bedarf an Wärme aufgetreten als

angenommen. Ebenso zum Kühlbedarf ist der Verlauf wie zu erwarten, in den Wintermonaten steigend und in den Sommermonaten recht flach, um keine Heiz- aber die Warmwasserbedarfe zu erfüllen.

Differenzen zwischen Simulation und Messung sind auf die, unter dem Abschnitt „Solarerträge“, beschriebenen Faktoren zurückzuführen.

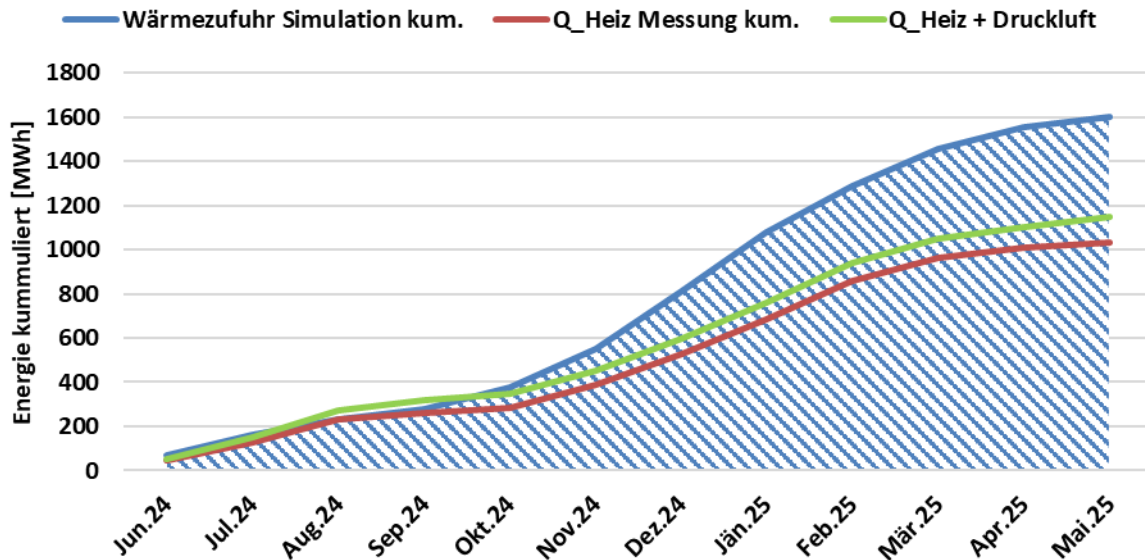


Abbildung 35: Vergleich der simulierten und gemessenen Heizbedarfe des Gesamtsystems.

7.1.5 Optimierungspotentiale und Status Quo

Der untersuchte Anlagenteil fügt sich in ein bestehendes, größeres, standortumgreifendes HVAC-System ein. Um eine größere Auslastung des solaren Eisspeichersystems zu erreichen und das Speicherpotential des Eisspeichers vollumfänglich nutzen zu können, wurde die Umschaltgrenztemperatur beim Heizbetrieb mit Solar und Eisspeicher identifiziert. Wird diese angehoben (von -5°C auf bspw. -2°C), dass der Eisspeicher früher zum Einsatz kommt und zum Ende der Heizsaison potenziell einen höheren Vereisungsgrad aufweist, kann der Anlagenbetrieb noch effizienter gestaltet werden. Des Weiteren bieten auch die Kapazitäten der Wärmespeicher weiteres Potential günstige Betriebspunkte länger ausnutzen zu können.

Der Anlagenbetrieb kann als hochgradig stabil bezeichnet werden. Auch wenn die gemessenen Erträge und Bedarfe nicht mit denen der Prognosen übereinstimmen ist festzuhalten, dass das System einen durchwegs reibungsfreien Betrieb aufwies. Zusammenfassend sei erwähnt, dass das Hydraulikkonzept der Anlage „Anton Paar“ einen hohen Komplexitätsgrad aufweist. Daher ist eine genaue und regelmäßige Analyse des Anlagenbetriebs einerseits sehr aufwendig, aber andererseits dringend zu empfehlen, um einen möglichst effizienten Betrieb langfristig sicherzustellen.

7.2 Trocknungsanlage Kutschera, OÖ

7.2.1 Allgemeine Anlagenbeschreibung

<u>Projektname:</u>	solare Trocknungsanlage Kutschera, OÖ,
<u>Adresse:</u>	Mitterdörfel 24, 4362 Bad Kreuzen
<u>Art der Anwendung:</u>	Solare Prozesswärme, Heutrocknung mit Flachrost und Steinspeicher
<u>Jahr der Förderzusage:</u>	2021
<u>Wärmeverbraucher:</u>	Heutrocknung
<u>Bruttokollektorfläche:</u>	114,5 m ² (56 Stk.) Luftkollektoren CONA Entwicklungs- u. Handels-gesm.b.H; CCS+
<u>Aperturfläche:</u>	107,5 m ²
<u>Neigung:</u>	18° am Dach des Ziegenstalls
<u>Azimet-Ausrichtung:</u>	200° (20° von Süden in Richtung Westen)
<u>Energiespeichervolumen:</u>	Steinspeicher mit ca. 70m ³ Schotter (8,9m x 4,3m x 1,85m)
<u>Nachheizungssystem:</u>	-
<u>Solarer Deckungsgrad:</u>	100% (da keine Nachheizung eingebunden)
<u>Spezifischer Solarertrag:</u>	587 kWh/m ² a (Messung bezogen auf Aperturfläche)
<u>Projektstatus:</u>	Monitoringperiode beendet im Juni 2025
<u>Zuständigkeit Begleitforschung:</u>	FHOÖ F&E GmbH

Bei der gegenständlichen Anlage handelt es sich um eine solare Trocknungsanlage zur Heutrocknung (lose oder in Form von Heuballen), welche 2023 errichtet wurde. Um die Jahresnutzung der Anlage zu erhöhen, sollte die Anlage außerhalb der Heuerntezeit noch zur Trocknung von Getreide und Hackgut verwendet werden. Zur Energiegewinnung kommen abgedeckte Luftkollektoren mit einer Gesamtbruttokollektorfläche von 114,5 m² der Fa. Cona zum Einsatz. Die Gesamtkollektorfläche ist als eine große Solarflächen in Richtung Südwest am Dach des Ziegenstalls errichtet (siehe Abbildung 36). Mittels eines Solarluftventilators wird die Außenluft über das Luftkanalsystem der Kollektoranlage angesaugt und dabei erwärmt. Über eine Mischkammer wird solar erwärmte Luft entweder direkt dem Trocknungsprozess oder, falls zu dieser Zeit kein Trocknungsprozess im Gange, einem ca. 70m³ großen Steinspeicher direkt zugeführt. Die überschüssige Solarenergie kann im Speicher zwischengespeichert werden. Somit kann eine weitgehend kontinuierliche Trocknung (auch in den Nachtstunden) gewährleistet werden. Die solare Trocknungsanlage ist ohne Nachheizung ausgeführt. Der solare Deckungsanteil ergibt sich somit zu 100%.



Abbildung 36 südwestliches Luftkollektorfeld mit insgesamt 114,5 m² und ein Teil der 17 kWp PV-Anlage am Ziegenstall (Quelle: Rudolf Kutschera)

7.2.2 Luftführungs- und Messkonzept

Das gesamte Wärmeversorgungssystem der Trocknungsanlage Kutschera ist als Blockschaltbild in Abbildung 37 dargestellt.

Es sind mehrere Betriebsmodi möglich:

Direkte solare Trocknung: In diesem Modus wird die solar erwärmte Luft direkt von den Kollektoren über die Mischkammer dem Flachrost zur Trocknung zugeführt.

Der Solarventilator (V1) (bis 12.000 m³/h) wird dabei immer bei voller Leistung (50Hz) betrieben werden.

Je nach Klappenstellung fördert dieser die solar erwärmte Luft in die Mischkammer oder in den Steinspeicher. Wird die Energie des Steinspeichers benötigt, wird die Trocknungsluft (Außenluft) über den Steinspeicher geführt, dort erwärmt und mit Hilfe des Speicherentladeventilators (V3) (bis 8.000 m³/h) in die Mischkammer gefördert.

Der Trocknungsventilator (V2) (bis 24.000 m³/h) drückt die warme Luft aus der Mischkammer durch den Flachrost in das darüber gelagerte Trockengut (vorrangig loses Heu). Spezielle Kiemenpaneele sorgen dafür, dass die warme Luft gleichmäßig über eine Fläche von 48m² über den Flachrost verteilt wird.

Je nach geplanten oder durchzuführenden Trocknungsvorhaben, Speicherladezustand und Trockengut (Art, Menge und Feuchtegehalt) wird ein bestimmtes Programm für die Solaranlage (in Mischkammer oder Steinspeicher) und Trockenprogramm ausgewählt.

Folgende Automatik-Programme stehen für den Betrieb der Solaranlage zur Verfügung:

- Solare Trocknung (A.ST)

Hier wird die Solarenergie direkt und unmittelbar für die Trocknung genutzt. Sobald die Kollektoren die eingestellte Temperaturdifferenz erreichen, schaltet der Solarventilator ein. Wird die eingestellte Temperaturdifferenz unterschritten, schalten die Ventilatoren wieder ab. Der Speicher wird nicht genutzt.

- Solar zu Speicher (A.SS)

Dieses Programm ist vorgesehen, um den Speicher für die bevorstehende Ernte rechtzeitig zu laden. Die Ladedauer ist abhängig von der Solarstrahlung, der Größe der Solaranlage und der Größe des Speichers. Sowohl die Temperaturen als auch der Ladezustand in der jeweiligen Speicherzone ist am Display der Regelung ersichtlich.

- Solar zu Speicher + Überschussnutzung (A.SS+)

Dieses Programm dient ebenfalls der Speicherladung. Zusätzlich wird dabei aber die Überschussenergie (Bypass) genutzt. Jene, solar erwärmte Luft, welche die gewünschte Mindesttemperatur für den Steinspeicher nicht erreicht, wird hier direkt in die Mischkammer geleitet und steht für die Trocknung zur Verfügung. Dieses Programm wird verwendet, wenn man in absehbarer Zeit eine Ernte einbringen möchte und dafür der Speicher bereits geladen werden soll, jedoch noch ein anderes Trockengut fertig getrocknet werden muss.

Weiters stehen folgende Automatik-Programme für den Betrieb der Trocknung zur Verfügung:

- Programm A.SI: Direkte Trocknung aus der Solaranlage und eine Intervallbelüftung, wenn keine Solarenergie zur Verfügung steht. Dieses Programm wird insbesondere bei der unmittelbaren Trocknung von Hackgut genutzt.
- Das Programm (A.SIS) verbindet die Trocknung, Intervallbelüftung und Speichernutzung. Immer wenn ein Intervallfenster aktiv ist, öffnet die Speicherentladeklappe und es startet der Entladeventilator. Die Geschwindigkeit des Entladeventilators (V3) wird automatisch drehzahl geregelt. Damit wird ein Sollwert im Mischraum angestrebt. Dieses Programm ist für jene Trocknungen vorgesehen, bei denen man aktiv den aufgeladenen Speicher nutzen möchte.
- Das Programm A.ÜI steuert die Trocknung mit Nutzung der Überschussenergie, wenn gleichzeitig der Speicher geladen wird. Dieses Programm ist speziell in Kombination des Solarprogrammes SS+ zu sehen. Wenn keine Solarenergie verfügbar ist, schaltet automatisch die Anlage in Intervallmodus.

Für die Intervallbelüftung kann sowohl die Pausenzeit als auch die jeweilige Laufzeit des Trocknungsventilators (V2) eingestellt werden.

Das Messkonzept umfasst:

Globalstrahlung:

- 1 x Globalstrahlungssensor in Kollektorebene

T/rH:

- 1 x Außen
- 1 x Beimisch
- 1 x Trocknungsluft (nach Mischkammer)
- 1 x Luft Speicherentladung
- 1 x Hand-Stabkombisensor zur Messung des Trocknungsgutes (temporäre Messung)

T- Sensoren:

- 1 x Kollektortemperatursensor
- 1 x Solarlufttemperatursensor vor dem Solarluftventilator (V1)
- Luft Speicheraustritt gegen Umgebung bei Speicher Be- und Entladung
- 4 x Temperatur Steinspeicher

Differenzdrucksensor:

- 1 x Kollektorfeld
- 1 x Trocknungsluft (nach Mischkammer)
- 1 x Speicher Be- und Entladung

Stromzähler (Leistung und kumulierte Energiemenge)

- 1 x Solarventilator (V1)
- 1 x Trocknungsventilator (V2) (nach Mischkammer)
- 1 x Speicherentladeventilators (V3)

Klappenstellungen:

- 1 x K1 Solarluft zum Steinspeicher
- 1 x K2 Solarluft zur Mischkammer
- 1 x K3 Luft aus Steinspeicher

K1 zu und K2 offen = solare Direkttrocknung

K1 offen und K2 zu und K3 zu = solare Beladung des Steinspeichers

K1 zu und K2 zu und K3 offen = Trocknung über den Steinspeicher

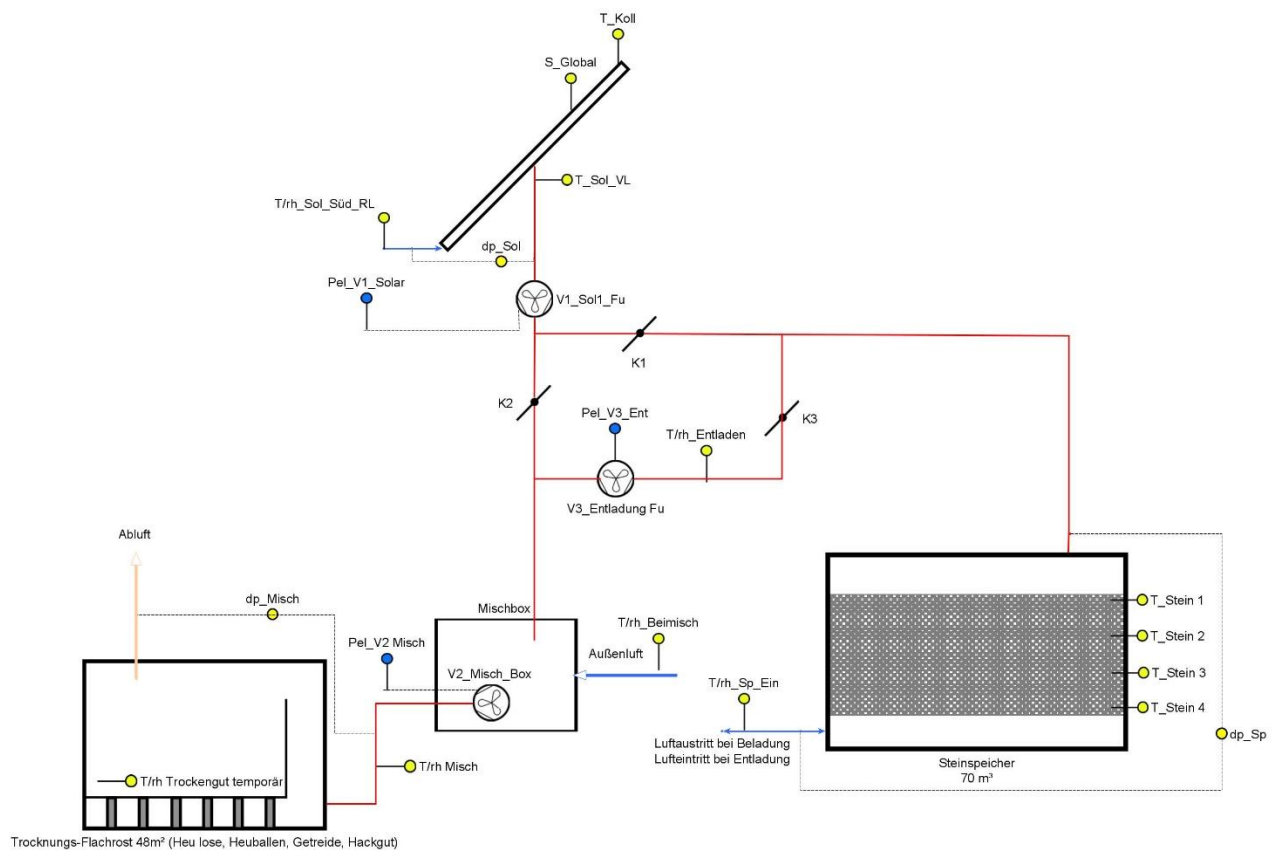


Abbildung 37 Hydraulik- und Messkonzept zum Projekt „Solare Trocknungsanlage Kutschera“

7.2.3 Energie- und Massenbilanz

Abbildung 38 stellt die Input-Output-Analyse der Anlage „Kutschera“ dar. Auf der Inputseite wird der Ertrag aus dem Solarfeld und die Speicherbeladung dargestellt. Die Differenz zwischen Ertrag und Speicherbeladung ist die direkte Nutzung des solaren Ertrages zur Trocknung und die auftretenden Verluste. Auf der Outputseite ist die Wärmemenge zur Trocknung des losen Heus und die dafür verwendete Wärmemenge aus dem Steinspeicher dargestellt. Klar zu erkennen ist, dass die Wärmemenge aus dem Speicher nur einen geringfügigen Beitrag zur Trocknung leistet. Ergänzend ist zu erwähnen, dass sowohl die Mischbox, als auch die Trocknungskammer (siehe dazu Abbildung 40) nicht luftdicht sind.

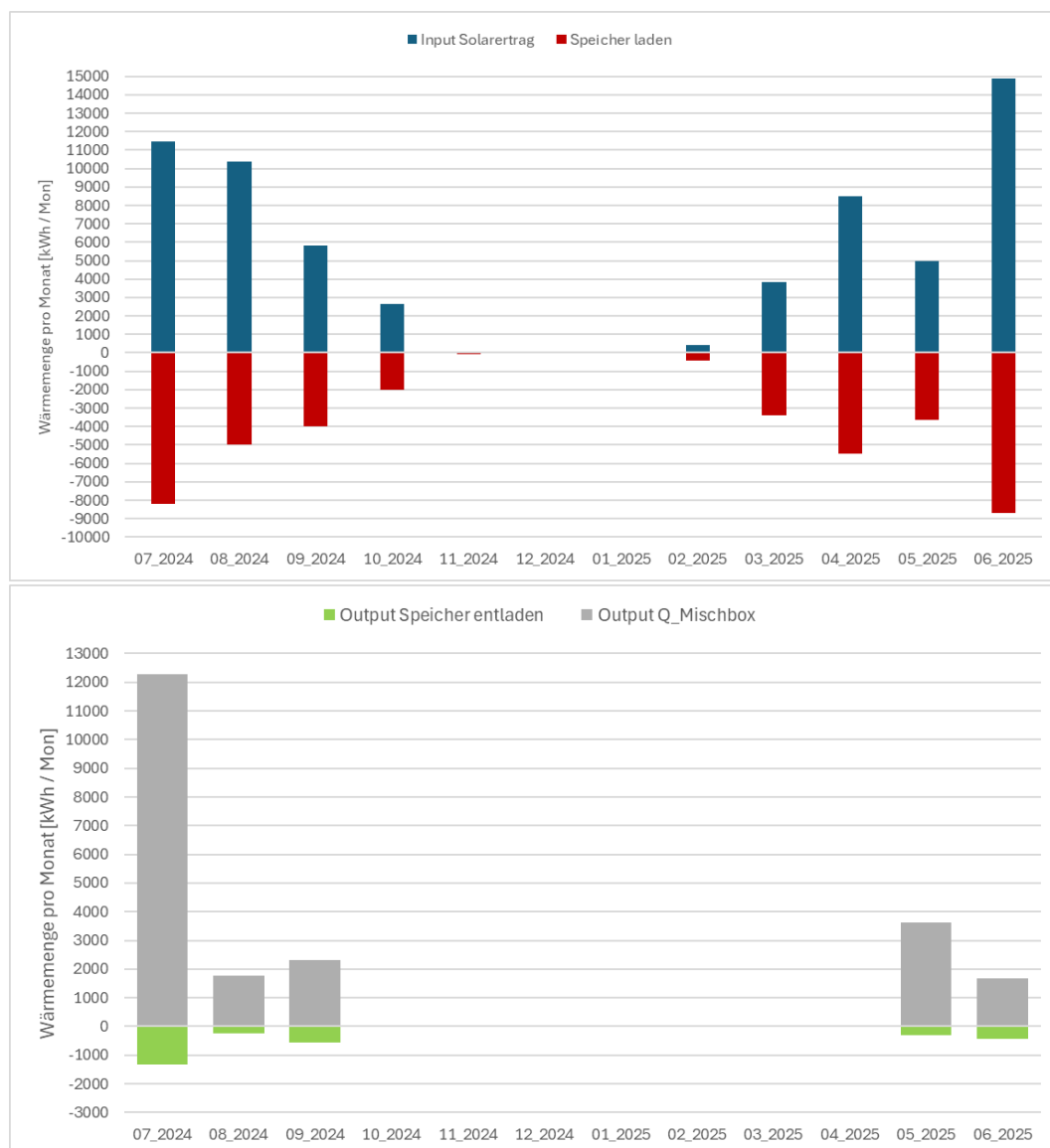


Abbildung 38 Energiebilanz der Anlage „Kutschera“

Eingebrachtes, loses Heu und ausgetriebene Wassermasse während der Monitoringphase:

In Tabelle 2 sind die eingebrachten Mengen an losem Heu pro Monat dargestellt.

Tabelle 2 eingebrachte Mengen an losem Heu pro Monat

07_2024	120,0
08_2024	30,0
09_2024	40,0
10_2024	0,0
11_2024	0,0
12_2024	0,0
01_2025	0,0
02_2025	0,0
03_2025	0,0
04_2025	0,0
05_2025	190,0
06_2025	212,0

Die Abbildung 39 zeigt das Wasser in Tonnen pro Monat welches während des Trocknungsprozesses, ausgetrieben wurde. Berechnet wurden die Wassermenge aus Messwerten der relativen Luftfeuchtigkeit im Trocknungsgut vor der Trocknung (nach Einbringung) und nach der Trocknung (vor Austragung). Über den Betrachtungszeitraum wurden ca. 1,7 Tonnen Wasser ausgetrieben.

Abbildung 39 ausgetriebenes Wasser [to]

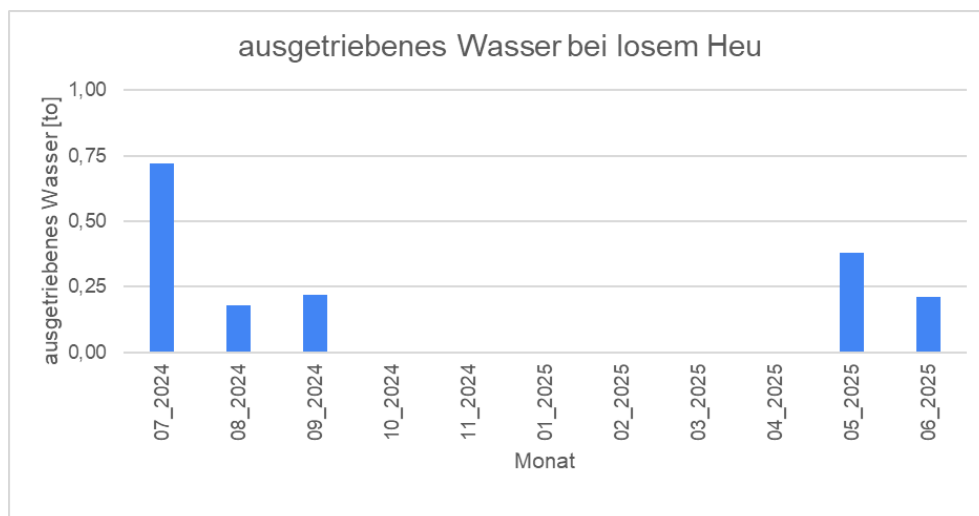


Abbildung 39 ausgetriebenes Wasser [to]

Abbildung 40 zeigt den befahrbaren Trocknungsflachrost mit einer 48m² großen Flachrostfläche. Es ist keine Vorrichtung fix montiert, um das Heu zu wenden.



Abbildung 40 Trockenkammer mit Flachrost „Kutschera“ (Quelle FHOÖ und Rudolf Kutschera)

Abbildung 41 zeigt den Zugang zum 70m³ großen Steinspeicher inkl. vier Temperatursensoren zur Ermittlung der Speichertemperaturen an unterschiedlichen Höhen. Diese Temperatursensoren werden verwendet, um den Landezustand des Steinspeichers zu bestimmen.



Abbildung 41 Steinspeicher inkl. Temperatursensoren (Quelle: Rudolf Kutschera)

7.2.4 Vergleich Simulation - Messwerte

Abbildung 42 gibt einen Überblick über die, bei der Einreichung angegebenen Simulationsergebnisse als auch die im Monitoringzeitraum ermittelten Messwerte. Verglichen werden

im Rahmen des einjährigen Anlagenmonitorings die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen für den spezifischen Solarertrag betreffend die Anlage „Kutschera“. Laut der Anlagensimulation des Betreibers zum Zeitpunkt der Fördereinreichung wird ein Jahressolarertrag von 718 kWh/(m²a) bezogen auf die Aperturfläche bei einer Jahressumme der Einstrahlung von 1.250 kWh/m² erwartet. Der gemessene Solarertrag lag mit 587 kWh/(m²a) etwa 18% unter dem erwarteten Wert, obwohl die Einstrahlung mit 1324 kWh/m² etwas über der Prognose lag. Eine mögliche Erklärung dafür ist eine geringere Auslastung der Anlage gegenüber der Planung. Ursprünglich sollte die Anlage, außerhalb der Heuerntezeit, auch zur Trocknung von Getreide und Hackgut eingesetzt werden. Dies war jedoch nicht der Fall.

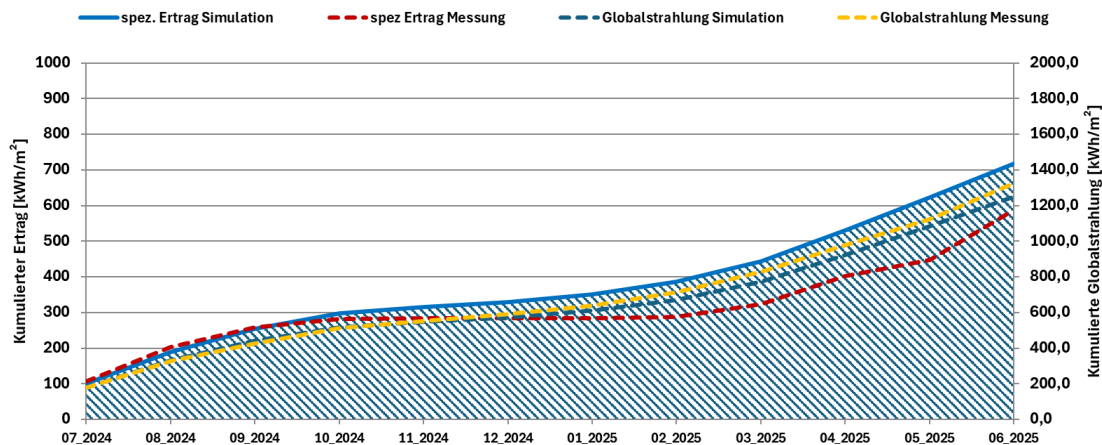


Abbildung 42 Prognostizierter und gemessener Verlauf des spezifischen Solarertrags und der Globalstrahlung in Kollektorebene für die Anlage „Kutschera“

Da es keine Nachheizung gibt, entspricht der Verbrauch dem solaren Ertrag und die solare Deckung liegt immer bei 100 %. Daher werden Verbrauch und solare Deckung nicht in gesonderten Diagrammen dargestellt.

7.2.5 Detailanalyse und Optimierungspotential

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

Die Anlage hat aufgrund der drei Klappen und der zwei Ventilatoren eine höhere Zahl an Freiheitsgraden bzw. möglichen Betriebsmodi. Zur Vereinfachung wurde auf wenige Betriebsmodi erzeuger- und verbraucherseitig aggregiert. Im Folgenden werden die Modi sowie ihr Auftreten während der Messperiode dargestellt.

Erzeuger

Modus	Zustand
E0	kein Erzeuger in Betrieb
E1	direkte Solartrocknung
E2	Speicher laden
E3	Speicher entladen

E4	Solar belädt Speicher, Abluft für Trocknung
E5	direkte Solartrocknung und Speicher laden

In *Abbildung 44* ist die Auswertung der Laufzeiten der Erzeugermodi über den Monitoringzeitraum dargestellt. Speicherentladung und die direkte Solartrocknung traten in den Monaten Mai bis September auf. Die Speicherbeladung erfolgt hingegen das ganze Jahr über. *Abbildung 44* zeigt den prozentuellen Anteil der Erzeugermodi an der Gesamtlaufzeit. Deutlich zu erkennen ist, dass die Anlage die überwiegende Zeit (81,2%) stillsteht. Der vorherrschend aktive Modus ist „E2 Speicher laden“ mit (14,3%).

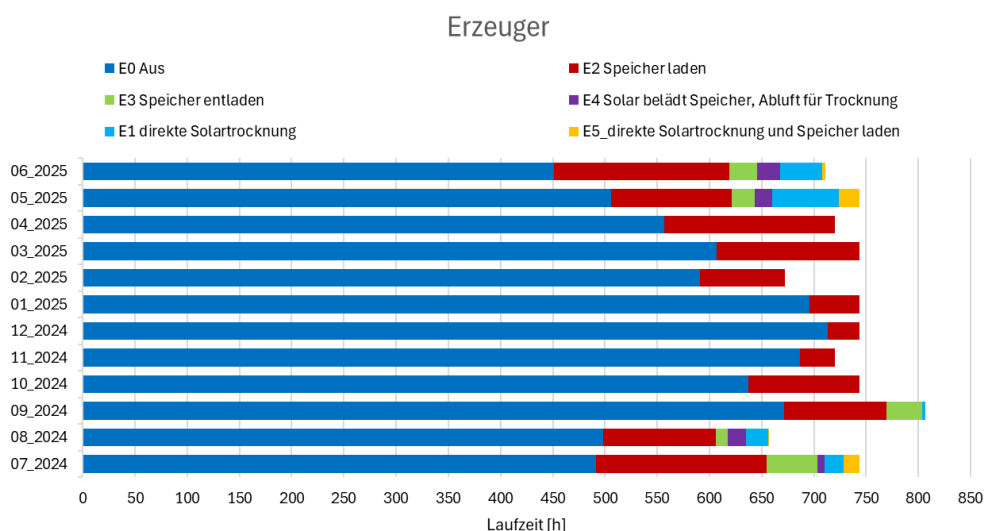


Abbildung 43 Laufzeiten der Erzeugermodi pro Monat in Stunden

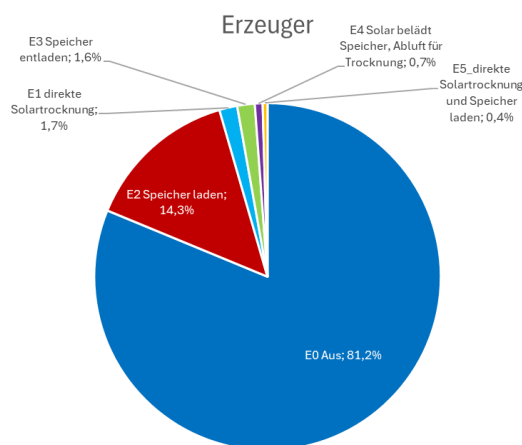


Abbildung 44 Prozentueller Anteil der einzelnen Erzeugermodi

Verbraucher

Modus	Zustand
V0	kein Verbraucher in Betrieb (V2 aus)
V1	Trocknung mit Mischluft

In *Abbildung 45* ist die Auswertung der Laufzeiten der Verbrauchermodi über den Monitoringzeitraum dargestellt.

Abbildung 46 zeigt den prozentuellen Anteil der Verbrauchermodi an der Gesamtlaufzeit. Deutlich zu erkennen ist, dass die überwiegende Zeit (95,5%) nicht getrocknet wird. Der aktive Modus ist „V1 Trocknung mittels Mischluft“ aus der Mischbox (4,5%).

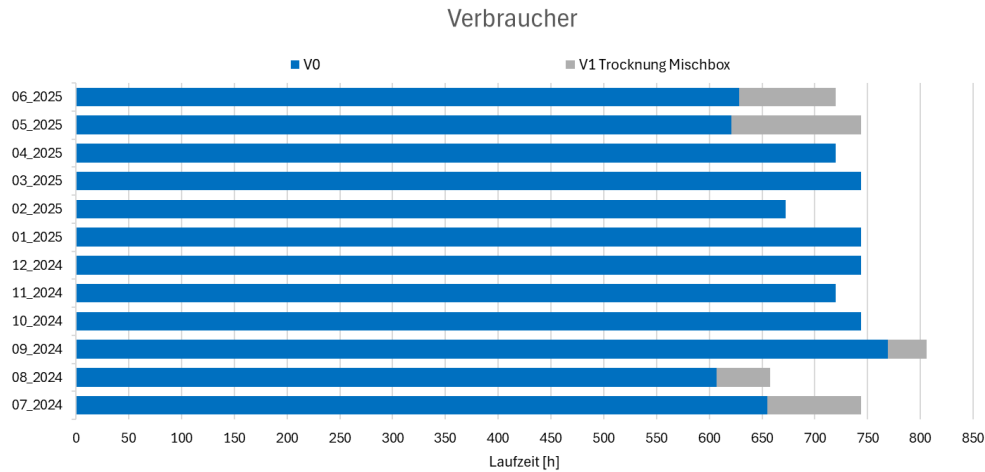


Abbildung 45 Laufzeiten der Verbrauchermodi pro Monat in Stunden

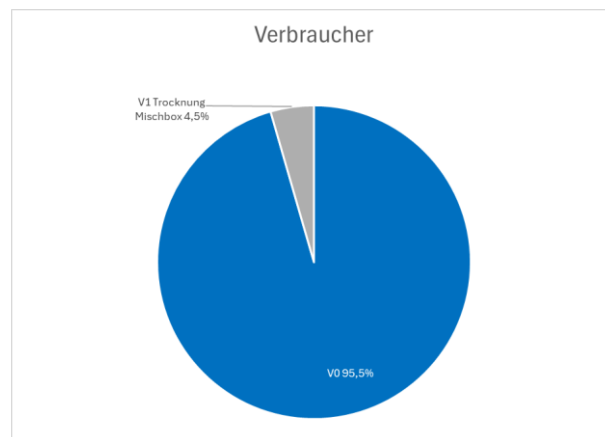


Abbildung 46 Prozentueller Anteil der einzelnen Erzeugermodi

Im Folgenden werden die primär vorherrschenden Modi genauer analysiert.

Be- und Entladung des Steinspeichers:

Modus E2 – solare Speicherbeladung und Modus E3 – Speicher entladen

In Abbildung 47 ist die Beladung des Steinspeichers bei Schönwetter ab 04.09.2024 zu erkennen. Die oberste Speichertemperatur steigt bis zu maximal 67°C. Diese hohe Speichertemperatur kann nur gehalten werden, wenn ständig solar erwärmte Luft nachgeladen wird. Ab 12.09.2024 sinkt aufgrund der schlechteren Witterung und somit der

fehlenden Nachladung die Speichertemperatur auf ca. 46°C. Erst am Morgen des 14.09.2024 erfolgt die Anforderung zur Trocknung über den Steinspeicher.



Abbildung 47 Beispielhafter Verlauf von Temperaturen, solare Einstrahlung, Kollektortemperatur und Steinspeichertemperaturen sowie Erzeugermodi (4.9. – 16.9.2024)

Ist der Steinspeicher auf ca. 60°C voll durchgeladen (07.09. und 08.09. 2025) so entspricht dies einer Speicherkapazität von ca. 1000 kWh, bezogen auf einem Delta T von 40K (20°C auf 60°C).

In der nachstehenden Abbildung 48 sind die beiden Tage der Speicherentladung näher dargestellt. Zu erkennen ist, dass zu Beginn der Entladung die Temperatur T_Stein4 gleich zu Beginn der Entladung stark abfällt, wobei anfangs die anderen Speicherschichten von dieser Temperaturabnahme noch nicht betroffen sind. Erst nach ca. 8h Energieentnahme sinkt auch T_Stein3. Erst nach 14h sinkt dann auch die Temperatur T_Stein2. Die Temperatur T_Stein1 bleibt über 41h auf konstant hohem Niveau. Obwohl die Klappen K1 und K2 bei der Entladung des Steinspeichers geschlossen sind, sind bei den Speicherentladezyklen geringfügige Auswirkungen auf die Kollektortemperatur zu erkennen. Eine mögliche Ursache dafür könnten Sogwirkungen, ausgehend von V3 sein, welche einen Luftvolumenstrom durch die Kollektorfläche bewirken.

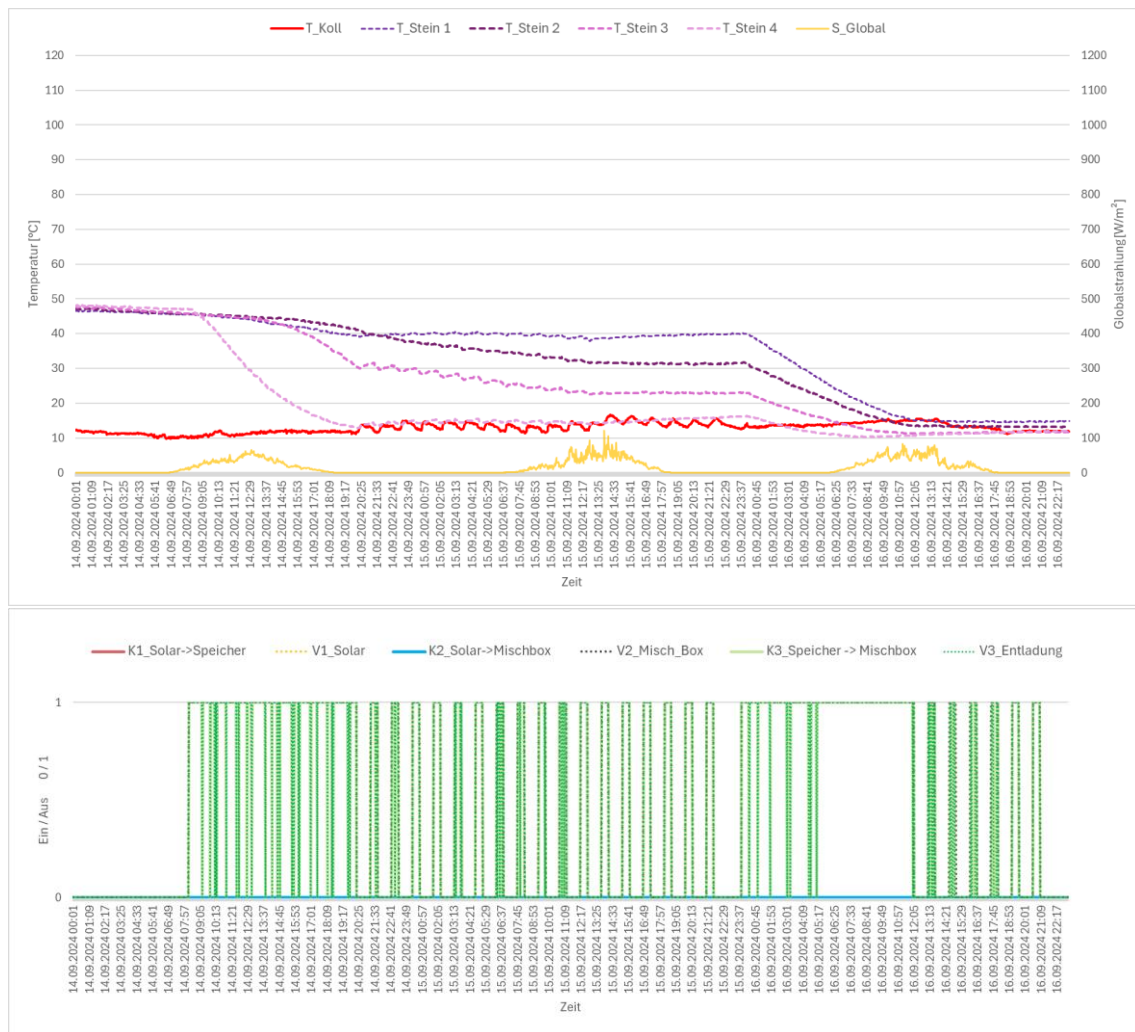


Abbildung 48 Beispielhafter Verlauf von Temperaturen, solare Einstrahlung, Kollektortemperatur und Steinspeichertemperaturen sowie Erzeugermodi (14.9. – 16.9.2024)

Die Ventilatorlaufzeiten und die dazugehörigen Klappenstellungen sind gut aufeinander abgestimmt. Der Betrieb ist in Ordnung und muss nicht optimiert werden.

Optimierung der Betriebsführung:

Um Stromkosten zu sparen, sollte in den Monaten, in denen sicher keine Trocknung erfolgt (Wintermonate), die solare Beladung des Steinspeichers gestoppt bzw. die Anlage abgeschaltet werden. Die Beladung des Steinspeichers sollte demnach erst im April wieder gestartet werden.

7.2.6 Anlagen Status Quo

Der Betrieb der Anlage kann als sehr stabil bezeichnet werden. Der solare Ertrag liegt im Betrachtungszeitraum rund 18% unter dem erwarteten Wert, obwohl die Einstrahlung knapp über der Prognose lag. Eine mögliche Erklärung dafür ist eine geringere Auslastung der Anlage gegenüber der Planung. Ein weiterer Aspekt ist, dass der Steinspeicher nur selten für Trocknungszwecke entladen wird. Wird die Anlage in den Wintermonaten stillgelegt, würde sich der erwirtschaftete Solarertrag weiter reduzieren. Um die

Stromkosten für den Solarventilator in dieser Zeit einzusparen, wird dies aber dennoch empfohlen.

Der Wechselbetrieb Be- und Entladung des Steinspeichers funktioniert in den Monaten Mai bis September. Bei weitgehender Beladung kann der Steinspeicher zumindest 14 Stunden Trocknungsbetrieb bereitstellen.

Von den theoretisch möglichen Betriebsmodi traten auf der Erzeugerseite hauptsächlich die Beladung des Speichers (14%) und zu geringen Teilen (2%) die direkte Solartrocknung und die Speicherentladung auf. Zum überwiegenden Teil (81%) steht die Anlage hingegen still.

Vereinzelte kam es zu unerwünschten Betriebsmodi, die aber im Vergleich mit der Laufzeit der sinnvollen Betriebsmodi vernachlässigbar sind. Allerdings sollten diese aus Ressourcengründen nach Möglichkeit vermieden werden.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das System stabil funktioniert und über den Betrachtungszeitraum rund 1,7 Tonnen Wasser aus dem eingebrachten losen Heu ausgetrieben werden konnte.

8 Literaturverzeichnis

Fink et al., 2021:

Christian Fink, Waldemar Wagner: Leitfaden zum Monitoringkonzept im Rahmen des Begleitforschungsprogramms zur Förderaktion des Klima- und Energiefonds "Solarthermie - solare Großanlagen"; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2021

Fink et al., 2015:

Christian Fink, Samuel Knabl, Roman Stelzer, Bernd Windholz: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2010“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2015

Fink et al., 2016:

Christian Fink, Samuel Knabl, Roman Stelzer, Bernd Windholz: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2011“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2016

Fink et al., 2019a:

Christian Fink, Samuel Knabl, Roman Stelzer, Bernd Windholz: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2012“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2019

Fink et al., 2019b:

Christian Fink, Samuel Knabl, Roman Stelzer, Bernd Windholz: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2013“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2019

Fink et al., 2022:

Christian Fink, Samuel Knabl, Jakob Binder, Veronika Hierzer, Marnoch Hamilton-Jones, Walter Becke, Reinhard Pertschy, Franz Helminger, Max Blöchle, Thomas Natiesta: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2014“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2022

Fink et al., 2023a:

Christian Fink, Walter Becke, Veronika Hierzer, Michael Reisenbichler, Reinhard Pertschy, Franz Helminger, Max Blöchle, Thomas Natiesta: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2015“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2023

Fink et al., 2023b:

Christian Fink, Walter Becke, Veronika Hierzer, Lorenz Leppin, Reinhard Pertschy, Franz Helminger, Max Blöchle, Thomas Natiesta: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2016“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2023

Fink et al., 2024a:

Christian Fink, Walter Becke, Peter Gruber, Roland Kerschenbauer: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2017“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2024

Fink et al., 2024b:

Christian Fink, Walter Becke, Lorenz Leppin, Peter Gruber, Roland Kerschenbauer: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2018“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2024

Fink et al., 2025:

Christian Fink, Walter Becke, Lorenz Leppin, Peter Gruber, Roland Kerschenbauer: Endbericht zum Projekt „Wissenschaftliche Begleitforschung zum Förderprogramm Solarthermie-Solare Großanlagen 2019“; AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich, 2025