TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik

Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

Forschungsbericht

Neubau eines Forschungsgewächshauses an der Universität Leipzig

Energiemonitoring - Management Summary - Anlage zum Verwendungsnachweis

Bauherr/Auftraggeber

Sächsisches Immobilien- und Baumanagement - Niederlassung Leipzig 2

Dienstleister

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung,
01062 Dresden (TUD)

Projektleiter (TUD)

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann
clemens.felsmann@tu-dresden.de

Bearbeiter (TUD)

Jens Kaiser
jens.kaiser@tu-dresden.de

Eingereicht am: 27. April 2023

Inhaltsverzeichnis

1. Management Summary 4
   - 1.1. Motivation, Projektziel und Arbeitspakete . . . 4
   - 1.2. Randbedingungen . . . 5
   - 1.3. Methodik . . . 6
   - 1.4. Ergebnis . . . 10
     - 1.4.1. Vergleich des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen . . . 10
     - 1.4.2. Kühlenergieverbrauch . . . 15
     - 1.4.3. Energieverbrauch für Heizzwecke . . . 15
     - 1.4.4. Elektro- und Hilfsenergieverbrauch für Gebäudeheizung und -kühlung 16
     - 1.4.5. Energieverbrauch für nutzungsspezifische Einrichtungen . . . 18
     - 1.4.6. Vergleich der Solarkollektortypen . . . 18
   - 1.5. Fazit und Ausblick . . . 20

2. Monitoring-System 21
   - 2.1. Datenpool . . . 21
   - 2.2. Betriebstagebuch . . . 22
   - 2.3. Monitoring-Dashboard . . . 22

3. Thermische Solaranlage 25
   - 3.1. Anlagenkonzept . . . 25
   - 3.2. Vergleich der Kollektortypen . . . 30
   - 3.3. Energetische Auswertungen - monatlich . . . 31

4. Kälteerzeugung, -speicherung und -nutzung 40
   - 4.1. Anlagenkonzept . . . 40
   - 4.2. Energetische Auswertungen - monatlich . . . 42
     - 4.2.1. Vorbemerkungen . . . 42
     - 4.2.2. Absorptionskältemaschine AKM . . . 42
     - 4.2.3. Kompressionskältemaschinen KWS2 . . . 43
     - 4.2.4. Trockenkühler an Kompressionskältemaschine KWS2 . . . 44
     - 4.2.5. Kompressionskältemaschinen KWS3 . . . 45
     - 4.2.6. Trockenkühler an Kompressionskältemaschine KWS3 . . . 46
     - 4.2.7. Hybridkühler . . . 47
     - 4.2.8. Freie Kühlung . . . 48
     - 4.2.9. Fernwärmestation für Kälteerzeugung . . . 48
     - 4.2.10. Kälteversorgung der Gewächshaus-Kabinen . . . 49
     - 4.2.11. Kältenutzung im VE-Wasser-System . . . 49

5. Wärmeerzeugung, -speicherung und -nutzung 50
5.1. Anlagenkonzept . . . 50
5.2. Energetische Auswertungen - monatlich . . . 52
5.2.1. Vorbemerkungen . . . 52
5.2.2. Fernwärmestation für Gewächshausheizung sekundär . . . 52
5.2.3. Ölkesselanlage . . . 52
5.2.4. Dosierwassererwärmung . . . 53

6. Elektroenergieversorgung und -nutzung 54
6.1. Anlagenkonzept . . . 54
6.2. Energetische Auswertungen - monatlich . . . 54

7. Gewächshaus-Kabinen 58
7.1. Vorbemerkungen . . . 58
7.2. Kabine 1 . . . 59
7.3. Kabine 2 . . . 67
7.4. Kabine 3 . . . 75
7.5. Kabine 4 . . . 83
7.6. Kabine 5 . . . 91
7.7. Kabine 6 . . . 99
7.8. Kabine 7 . . . 107
7.9. Kabine 8 . . . 115
7.10. Kabine 9 . . . 123
7.11. Kabine 10 . . . 131
7.12. Kabine 11 . . . 139
7.13. Kabine 12 . . . 147
7.14. Verbinder . . . 155
7.15. Arbeitsgang . . . 161
7.16. Schleuse . . . 167

A. Bereinigung der Messwerte 173
A.1. Zeitliche Bereinigung gemäß VDI 3807 Blatt 1 (2007:03) . . . 173
A.2. Leerstandsbereinigung . . . 173
A.2.1. Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Leerstand von Räumen . . . 173
A.3. Witterungsbereinigung . . . 175
A.3.1. Heizenergieverbrauch . . . 175
A.3.2. Kühlenergieverbrauch . . . 181
A.4. Berücksichtigung mehrerer verschiedener Nutzungsarten innerhalb einer Liegenschaft . . . 183
A.5. Andere Einflussgrößen . . . 183

1. Management Summary

1.1. Motivation, Projektziel und Arbeitspakete

Das Neubauprojekt des Forschungsgewächshauses des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung ist eingebettet in den Kontext einer nachhaltigen Steigerung der Energieeffizienz insbesondere im Gebäudebereich.

Das Sächsische Immobilien und Baumanagement, Niederlassung Leipzig 2 (SIB-L2) als Bauherr sowie das Planer-Team haben diese Intentionen aufgenommen und aus dieser ambitionierten planerischen Zielstellung ein anspruchsvolles Energie- und Anlagenkonzept entwickelt, dass unter Beachtung nutzungsspezifischer Besonderheiten konsequent alle am Standort verfügbaren regenerativen Energiequellen einbezieht, um eine nachhaltige Reduzierung des Energiebedarfs sowie der CO_2-Emissionen gegenüber vergleichbaren Objekten in einer ähnlichen Größenordnung und vergleichbaren Nutzungsanforderungen sicher zu stellen.

Das bauliche Konzept kombiniert eine thermisch hochwertig gedämmte Gebäudehülle mit Gewächshauskabinen, die mit einer Isolierverglasung sowie einer Kombination aus Sonnenschutzsystemen und Wärmeschirmen ausgestattet sind. Die Kälteerzeugung bzw. -versorgung wird über eine aus Vakuumröhrenkollektoren unterschiedlichen Typs bestehende thermische Solaranlage im Verein mit einer Absorptionskältemaschine sowie zwei Kompressionskältemaschinen und einem Fernwärmeanschluss realisiert. Die Raumheizung erfolgt über einen zweiten Fernwärmeanschluss. Sowohl solar- als auch kälteseitig ist außerdem jeweils eine Pufferspeicherkaskade zwischen Wärme-/Kälteerzeuger und -ab-nehmer vorhanden. Dieses Konzept unterscheidet sich somit deutlich von konventionellen Gewächshaus-Konfigurationen, die i. d. R ausschließlich Gas- bzw. Öl-Brennwertkessel sowie Kompressionskältemaschinen für die Wärme- und Kälteerzeugung einsetzen.

Die zum Einsatz kommende thermische Solarkollektoranlage besteht aus mehreren Kollektorfeldern, die wiederum aus Vakuumröhrenkollektoren unterschiedlicher Bauart bestehen. Neben bereits am Markt etablierten Kollektorröhren mit Trockenanbindung im Mediensammler wird die gleiche Anzahl der Röhren mit einer neuartigen Nassanbindung im Mediensammler verbaut, von denen sich der Hersteller konstruktiv bedingt eine höhere energetische Effizienz verspricht.

Mit Hilfe eines betriebsbegleitenden Monitorings sollen in einem ersten Schwerpunkt die Energieeinspareffekte und die daraus resultierende Reduzierung der CO_2-Emissionen des

errichteten Gebäudes im Vergleich mit einem in konventioneller Art ausgestatteten Referenzgebäude aufgezeigt werden.

Neben dem Vergleich energetischer Kennwerte für die Wärme- und Kälteerzeugung bzw. -nutzung im Gebäude soll daher in einem zweiten Schwerpunkt die Effizienz der Vakuumröhrenkollektoren mit Nass- sowie Trockenanbindung gegenüber gestellt werden.

Die Monitoring-Aktivitäten sind auf einen Zeitraum von fünf Jahren unmittelbar beginnend nach Fertigstellung der Bautätigkeiten bzw. Umbauarbeiten angelegt. Die Monitoring-Periode wurde vom Bauherrn für die Zeit vom 12.10.2018 bis zum 31.12.2023 festgelegt. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Monitorings aus den Jahren 2020 bis 2022 zusammen.

Die Arbeiten gliedert sich inhaltlich in drei Pakete (AP):

- AP1 - Vorbereitung des Monitorings,
- AP2 - Durchführung der wissenschaftlichen Begleitforschung bzw. des Monitorings,
- AP3 - Auswertung des Monitorings und die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Verstetigung der energieeffizienten Betriebsweise der Anlagentechnik.

Die Arbeitspakete AP1 und AP2 überlagerten sich zeitlich entgegen des Projektzeitplanes aufgrund von Umbauarbeiten an der Anlagentechnik um mehr als 12 Monate. Ferner überlagert sich die Bearbeitung der Arbeitspakete AP2 und AP3 zeitlich nahezu vollständig, da das Monitoring und dessen Auswertungen inhaltlich eng verbunden sind.

1.2. Randbedingungen

Zeitlich eingeschränkte thermische Konditionierung von Gewächshauskabinen

Eine zeitlich einschränkte thermische Konditionierung der Gewächshauskabinen entstand in den Jahren 2020 bis 2022 aufgrund der vorgenannten Umbauarbeiten an den Energiesystemen des Gebäudekomplexes sowie im Kontext forschungsorientierter Zielsetzungen, die dem Umfang des Bepflanzungsprogramms in den Gewächshauskabinen bestimmen. In Tabelle A.1 bis Tabelle A.3 sind die Zeitfenster in den Jahren 2020 bis 2022 ohne thermische Konditionierung für jede Kabine aufgelistet.

Zeitlich eingeschränkter Anlagenbetrieb

Aufgrund von Umbauarbeiten im Zusammenhang mit einem Austausch der Regelungstechnik der Gewächshauskabinen sowie an der solarthermischen Anlage mussten einige energetische Systeme sowohl auf der Wärmeerzeuger- als auch der Abnehmerseite über mehrere Monate außer Betrieb genommen werden, siehe Tabelle 1.1.

Zeitfenster mit eingeschränkten Anlagenbetrieb

Zeitfenster	Beschreibung
14.08.2020 – 24.02.2021	Umbau der Gewächshausregelungen, kein Produktivbetrieb der Kabinen
30.07.2021 – 08.04.2022	Umbau an Absorptionskältemaschine, Kälteerzeugung ausschließlich durch Kompressionskältemaschinen
24.09.2021 – 14.04.2022	Außerbetriebnahme der thermischen Solaranlage, Kälteerzeugung ausschließlich durch Kompressionskältemaschinen

Tabelle 1.1.: Zeitfenster mit eingeschränktem Anlagenbetrieb

Ferner kam es außerhalb der Umbauperioden in den Jahren 2020 bis 2022 vereinzelt zu vorübergehenden Ausfällen der Datenaufzeichnung bzw. Datenbereitstellung an relevanten

Datenpunkten. So liegen beispielsweise für das Jahr 2020 bis Februar 2021 keine Sollraumtemperaturen vor.

Modifikation an Teilen der Solarkollektoranlage

Im Juni 2022 wurde im Rahmen einer Vor-Ort-Begehung bekannt, dass im Zusammenhang von Wartungsarbeiten im 3. Quartal 2021 eine Änderung an der Ausrichtung eines Teils der Vakuumröhrenkollektoren mit Nassanbindung vorgenommen wurde, die ab diesem Zeitpunkt zu einer Reduzierung des Wärmeertrages der davon betroffenen Kollektormodule führte. In der Folge stand für den Betrieb der Absorptionskältemaschine eine verminderte Wärmemenge auf einem etwas niedrigeren Temperaturniveau zu Verfügung. Ferner wurde im Mai 2022 eine beschädigte Rückschlagklappe im Primärkreis der Solarkollektoren identifiziert, die zu einer Beeinträchtigung des Betriebes der Vakuumröhrenkollektoren und damit zur Senkung des solaren Wärmeertrages führte.

Fehler an Messeinrichtungen

Im Jahr 2022 wurde ein Fehler bei den Ausgabewerten einiger Kältemengenzähler festgestellt, dessen Aufklärung zum Zeitpunkt der Berichtserstellung durch den Bauherrn und den Anlagenerrichter betrieben wird.

Ein Vergleich der im Monitoring-System gemessenen Elektroenergie summiert über Hauptverbraucher und Unterverteilungen mit den Abrechnungsdaten des Elektroenergie-Versorgungsunternehmens zeigt auf, dass die gemessenen Werte über den Abrechnungswerten des Elektroenergie-Versorgungsunternehmens liegen. Die Klärung der Ursachen für diese Abweichung erfolgt gegenwärtig in enger Abstimmung mit dem Bauherrn. Der Fokus richtet sich hierbei auf die mit einer Wandlermessung ausgestatteten Elektrozähler sowie die Angaben in der Bestandsdokumentation.

Ferner sind die Temperaturmesseinrichtungen in den Gewächshauskabinen 11 und 12 langfristig ausgefallen. Der Bauherr bemüht sich intensiv um eine Wiederherstellung der Datenpunkte.

1.3. Methodik

Nachfolgend werden die wesentlichen Schritte zur Ermittlung des Jahresendenergie- und Primärenergieverbrauchs sowie der damit verbundenen CO_2-Emissionen und deren Einordnung im Vergleich zu den Annahmen und Berechnungen der Planung dargestellt.

Schritt 1 - Vergleichsgrundlage Simulationsuntersuchungen

Im Rahmen der Entwurfsplanung wurden der architektonische Gebäudeentwurf sowie das Energie- und das Nutzungskonzept in Simulationsmodelle für ein Referenzgebäude mit konventioneller baulicher Hülle und Standard-Anlagensystem sowie ein Alternativgebäude mit verbesserter thermischer Qualität der Gebäudehülle in Kombination mit dem innovativen Anlagenentwurf umgesetzt, siehe Tabelle 1.2. Ferner wurden in [13] drei Bepflanzungssituationen in den Kabinen durch die Festlegung von Tagesgängen für die Soll-Zustände der Raumtemperatur und der Raumluftfeuchte in Form von drei Anforderungsprofilen entwickelt, dessen Einhaltung wiederum den Jahres-Energiebedarf zur thermischen Konditionierung der Kabinen wesentlich beeinflusst, siehe Tabelle 1.3. Im weiteren Verlauf wurden die Kombinationen aus Gebäude-/Anlagen-modellen mit den Bepflanzungssituationen im Rahmen von Simulationsuntersuchungen mit dem Ziel, eine aus energetischer Sicht bestmögliche Anlagenkonfiguration zu identifizieren analysiert.

Simulationen - Energiesysteme der des Referenz- und Alternativgebäudes		
Bezeichnung	**Kürzel**	**Beschreibung**
Referenzgebäude	REFGEB	Beheizung mit Öl-Brennwertkessel, Kühlung mittels mehrerer Kompressionskältemaschinen und Trockenkühlern
Alternativgebäude	ATVGEB	Beheizung durch Fernwärme, Kühlung mittels freier Kühlung, zwei Kompressionskältemaschinen mit Trockenkühlern, einer Absorptionskältemaschine (beheizt durch Solar- und Fernwärme inkl. Pufferspeichern) mit Hybridkühler

Tabelle 1.2.: Gebäude-Energiesystem-Kombinationen der Simulationsuntersuchungen nach [13]

Simulationen - Nutzungsvariante der Gewächshauskabinen		
Bezeichnung	**Kürzel**	**Beschreibung**
Simulation Variante 1	V1	Ganzjährig gemischte Bepflanzung und Einhaltung der Kühltemperaturvorgaben
Simulation Variante 2	V2	Gemischte Bepflanzung in Winter sowie während der Übergangszeit, im Sommer ausschließlich hohe Raumtemperatur
Simulation Variante 3	V3	Ganzjährig hohe Raumtemperaturen für die Kühllastanforderung zulässig (25°C)

Tabelle 1.3.: Bepflanzungs- bzw. Nutzungsszenarien der Gewächshauskabinen als Grundlage der Simulationsuntersuchungen nach [13]

Die Ergebnisse der Simulationsuntersuchungen werden unter Berücksichtigung der im Rahmen der Simulationsrechnungen verwendeten Wetterdaten einer Witterungsbereinigung nach [1] unterzogen. Eine Leerstandsbereinigung nach [19] erfolgt nicht, davon auszugehen ist, dass im Rahmen der Simulationsuntersuchungen eine zeitlich ununterbrochen Nutzung Die Ergebnisse dieser Simulationsuntersuchungen bilden neben Benchmarks eine Vergleichsgrundlage für die im Rahmen des Monitorings gewonnenen Energieverbrauchsdaten. Es werden jeweils die zu jahresbezogenen Werten aggregierten Monitoring-Daten aus den Jahren 2020, 2021 und 2022 zu einem Mittelwert zusammengefasst, der für einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen des Referenz- und des Alternativgebäudes herangezogen wird.

Schritt 2 - Witterungsbereinigung des gemessenen und berechneten Energieverbrauchs

Im zweiten Schritt erfolgt eine Witterungsbereinigung der Messergebnisse gemäß [1], [23], [8] sowie [9] um die Vergleichbarkeit der in Jahresscheiben aufbereiteten Ergebnisse mit Benchmarks zu ermöglichen. Die in einschlägigen Normen beschriebene Witterungsbereinigung basiert jedoch auf der Annahme, dass die Innentemperatur während der Heizperiode bei einem konstanten Wert von 20°C und während der Kühlperiode bei einem Wert von z.B. 25°C liegt, was jedoch in den Kabinen des Forschungsgewächshauses aufgrund der wechselnden klimatischen Anforderungen nicht der Fall ist. Insofern bilden die normativen Vorgaben und Randbedingungen die Realität nur bedingt ab.

Der Berechnungsgang wird in Anhang A.3 dargestellt. In Tabelle A.4 werden die Grunddaten für die Witterungsbereinigung zusammengestellt. Die sich daraus ableitenden Korrekturfaktoren sind in Tabelle 1.4 sowie Tabelle 1.5 enthalten.

Witterungskorrektur – Heizen	**G20 Potsdam langjähriges Mittel TRY2011 Heizen**	**G20 Simulation Musterjahr Heizen**	**Korrekturfaktor Potsdam/ Simulation**	**G20 Leipzig Holzhausen Aktuelles Jahr Heizen**	**Korrekturfaktor Potsdam/ Leipzig**
	ti=20/thg=15	ti=20/thg=15		ti=20/thg=15	
	$G20_{m,Potsdam}$	$G20_{Simulation}$	$G20_{m,Potsdam}/G20_{Simulation}$	$G20_{Leipzig}$	$G20_{m,Potsdam}/G20_{Leipzig}$
Jahr	(K*h/a)	(K*d/a)	(-)	(K*d/a)	(-)
2020 (Schaltjahr)	3.667	3.584	1,023	3.060	1,198
2021		3.572	1,027	3.529	1,039
2022		3.572	1,027	3.125	1,173

Tabelle 1.4.: Witterungskorrekturfaktoren für den Heizwärmeverbrauch gemäß VDI 3807

Witterungskorrektur – Kühlen KGT – Kühlgradtage	KGT Potsdam Kühlen GTZ 2022 ti=20/tkg=18,3	KGT Simulation Musterjahr Kühlen	Korrektur-faktor Potsdam/ Simulation	KGT Leipzig Holzhausen Aktuelles Jahr Kühlen	Korrektur-faktor Potsdam/ Leipzig
Jahr	$KGT_{m,Potsdam}$	$KGT_{Simulation}$	$KGT_{m,Potsdam}$/ $KGT_{Simulation}$	$KGT_{Leipzig}$	$KGT_{m,Potsdam}$/ $KGT_{Leipzig}$
	(K*d/a)	(K*d/a)	(-)	(K*d/a)	(-)
2020 (Schaltjahr)	56	77	0,727	119	0,471
2021		77	0,727	65	0,862
2022		77	0,727	197	0,284

Tabelle 1.5.: Witterungskorrekturfaktoren für den Kühlenergieverbrauch gemäß VDI 3807

Schritt 3 - Berücksichtigung von Zeiträumen ohne thermische Konditionierung der Gewächshauskabinen (Leerstandsbereinigung)

Um die Zeiträume ohne thermische Konditionierung der Gewächshauskabinen bzw. deren zeitliche Auslastung in der Bewertung der Energieverbrauchsdaten zu berücksichtigen, werden nach der Witterungsbereinigung der Messdaten für jede Kabine die sogenannte Leerstandszeiten gemäß [19] ermittelt und zu jahresbezogenen Korrekturfaktoren aggregiert. Der Berechnungsgang zur Leerstandsbereinigung wird in Anhang A.2 skizziert. Die Zeiträume ohne thermische Konditionierung der Kabinen werden an gleicher Stelle in Tabellenform dargestellt. Diesem Ansatz folgend werden die in Tabelle 1.6 angegebenen Leerstandsfaktoren abgeleitet und zur Ermittlung des Jahresendenergieverbrauchs genutzt.

Leerstandsfaktoren					
	Trinkwasser-erwärmung	Strom	Kühlung, thermisch erzeugt	Heizung	Kühlung, elektrisch erzeugt (Annahme)
	Jeweils berücksichtigte Monate				
Jahr	Jan-Dez	Jan-Dez	Jan-Dez	Okt-Mrz	Apr-Sep
2020	0,435	0,435	0,435	0,276	0,112
2021	0,134	0,134	0,134	0,112	0,022
2022	0,043	0,043	0,043	0,013	0,030
Mittelwert	**0,204**	**0,204**	**0,204**	**0,134**	0,054
Summe	**0,612**	**0,612**	**0,612**	**0,401**	0,163

Tabelle 1.6.: Faktoren zur Leerstandsbereinigung gemäß [19]

Schritt 4 - Ermittlung des Primärenergieverbrauchs

Die Ergebnisse des Endenergieverbrauchs zur thermischen Konditionierung des Gebäudekomplexes bilden die Grundlage für die Ermittlung des Primärenergieverbrauchs. Hierfür werden die in Tabelle 1.7 zusammengestellten Daten zu Energieträger-spezifischen Primärenergiefaktoren herangezogen.

Primärenergiefaktoren nach Energieträger	PEF bzw. f_p	Jahr	Quelle
	(-)		
Solarenergie, thermisch	0,000	2020	(1)
Heizöl	1,100	2020	(1)
Fernwärme	0,300	2020	(6)
Elektroenergie	1,800	2020	(1)

Tabelle 1.7.: Übersicht der Energieträger-spezifischen Primärenergiefaktoren (Quellen: (1) - [27], (6) - [10])

Schritt 5 - Ermittlung der CO_2-Emissionen anhand des Primärenergieverbrauchs

Die Ergebnisse des Primärenergieverbrauchs zur thermischen Konditionierung des Gebäudekomplexes bilden die Grundlage für die Ermittlung der CO_2-Emissionen. Hierfür werden

die in Tabelle 1.8 zusammengestellten und fett hervorgehobenene Daten zu Energieträger-spezifischen Emissionen herangezogen. Die zusätzlich angegebenen Wert zu spezif. CO_2-Emissionen tragen einen informativen Charakter.

Emissionsfaktoren nach Energieträger	Emissionsfaktor (kg CO_2-Äquivalent/kWh)	Jahr	Quelle
Solarenergie, thermisch	**0,000**	2020	(1)
Heizöl	**0,310**	2020	(1)
Fernwärme	0,350	2020	(1)
Fernwärme	**0,154**	2015	(2)
Elektroenergie	0,560	2020	(1)
Elektroenergie (SWL Gesamtstromlieferung)	0,194	2020	(3)
Elektroenergie (SWL Gesamtstromlieferung)	**0,263**	2021	(5)
Elektroenergie (SWL Gesamtstromlieferung)	0,332	2022	(4)

Tabelle 1.8.: Übersicht der Energieträger-spezifischen CO_2-Emissionen
(Quellen: (1) - [27], (2) - [17], (3) - [24], (4) - [25], (5) - Mittelwert aus (3) und (4))

Schritt 6 - Vergleich von Monitoring- und Simulationsergebnissen

Der Vergleich zwischen dem Referenzgebäude mit den Bepflanzungsszenarien (Simulationsvarianten V1, V2 und V3) und dem Bestandsgebäude bezieht sich ausschließlich auf den Energieverbrauch für die Gebäudeheizung und -kühlung. Diese Energie kann durch Fernwärme, einen Öl-Brennwertkessel, Wärmeerträge der solarthermischen Anlage sowie Elektroenergie bereitgestellt werden. In den Vergleich fließt weiter die Hilfsenergie für den Betrieb der vorgenannten Systeme ein - soweit eine sinnvolle Zuordnung anhand der vorhandenen Messstellen möglich ist. Der Energieverbrauch für den Betrieb nutzungsspezifischer Anlagen, die nicht der thermischen Konditionierung der Räume dienen, werden ausgewertet, bleiben jedoch bei der energetischen Bewertung unberücksichtigt, da er sowohl im Referenz- als auch im Alternativ- sowie im Bestandsgebäude in gleicher bzw. ähnlicher Größenordnung anfällt. Eine Übersicht der vorhandenen Messstellen mit einer entsprechenden Zuordnung zeigt Tabelle 1.9.

Zuordnung des Elektroenergieverbrauchs sonstiger Verbraucher zu nutzungsspezifischen Anlagen und Hilfsenergie der HLKS-Systeme		
Messstelle Elektroenergie	**Bemerkung**	**Zuordnung**
UV EG	ohne weitere Differenzierung	nutzungspezif. Anlage
UV KG	Hochdruck-Nebelanlage, sonstige Abnehmer	nutzungspezif. Anlage
UV GWH Kabinen Assimilationsbelichtung	Assimilationsbelichtung GWH Kabinen 1-12	nutzungspezif. Anlage
UV Regelung GWH Kabinen	GLT GWH Kabinen 1-12 und Zugänge	Hilfsenergie HLKS
UV Medien-Steuerung + Laborlüftung	GLT HLKS, Laborlüftung	Hilfsenergie HLKS
UV Kleinverbraucher	Hebeanlagen, IT-Datenverteiler, Kühl-Gefrierkombinationen, Gefahrstoffschrank, Digestorium	nutzungspezif. Anlage

Tabelle 1.9.: Elektroenergie - Einteilung der Messstellen in nutzungsspezifische Abnehmer und Abnehmer von Hilfsenergie für die HLKS-Systeme

Für eine Identifikation von Ursachen, die zu Unterschieden zwischen den Simulationsergebnissen und den Monitoring-Daten führen, werden die im Zusammenhang mit den realisierten Bepflanzungssituationen vom Gebäudenutzer gewählten Sollraumtemperaturen in den Gewächshauskabinen für den Kühl- und Heizfall ausgewertet. Außerdem findet die Verfügbarkeit der Anlagen sowie die Nutzung bzw. der Leerstand der Gewächshauskabinen im Jahresverlauf bei der Bewertung in Form einer Leerstandsbereinigung nach [19] Beachtung.

Schritt 7 - Vergleich der Monitoring-Ergebnisse mit Benchmarks

Neben einer Gegenüberstellung der Monitoring-Ergebnisse der Jahre 2020 bis 2022 sowie

einem Vergleich mit den Simulationsergebnissen aus der Entwurfsphase des Projektes erfolgt eine Einordnung der gemessenen Werte mit Hilfe von Benchmarks gemäß VDI 3807 Blatt 2 [5].

Flächengewichtete Richt- und Mittelwerte für die Kombination aus Laborbereich und Gewächshauskabinen nach VDI 3807 Bl. 2 2014-11							
Gebäudeteil		Gewächshaus(kabinen)		Laborbereich im Massivbau		GWH + Labor	
Bauwerkszuordnung		711200		230000		711200 + 230000	
Beheizbare Bruttogeschossfläche BGF_E	(m^2)	426		318		743	
Beheizbare Bruttogeschossfläche BGF_i	(%)	57,3		42,7			
		Richtwert	Mittelwert	Richtwert	Mittelwert	Richtwert	Mittelwert
Heiz-/Kühl-/Elektroenergie für Heiz-/Kühlzwecke		158	272	118	128	141	210
Elektroenergie für forschungsspezif. Zwecke		3	8	22	58	11	29
Wasser für Gewächshaus-spezif. Zwecke		136	715	81	470	113	610

Tabelle 1.10.: Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Gewächshäusern und Laborgebäuden [5]

Schritt 8 - Bewertung der Solarkollektoren

Eine vergleichende Aussage zur Energieeffizienz der im Objekt eingesetzten Kollektortypen ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung aufgrund einer temporären Abschaltung des Systems, dem Defekt einer Komponente der hydraulischen Anbindung der Kollektorfelder sowie einer Modifikation der Ausrichtung eines Teils eines Kollektorfeldes erst am Ende der Monitoring-Phase möglich. Wesentliche Randbedingungen sowie eine graphische Auswertung der zwischen Dezember 2019 und April 2023 monatlich im Primärkreis gewonnenen Wärmeerträge der Solarthermieanlage werden in 3 vorgestellt.

Am Ende der Monitoring-Phase wird die Effizienz der Solarkollektoren sowohl durch eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der Simulationsuntersuchungen als auch anhand der für jeden Typ ermittelten Monitoring-Daten gemäß [2] sowie [3] bewertet.

1.4. Ergebnis

1.4.1. Vergleich des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen

Tabelle 1.11 stellt die Abschätzung der CO_2-Emissionen eines mit konventioneller Gebäudehülle und Anlagentechnik ausgestatteten Referenzgebäudes den Abschätzungen der CO_2-Emissionen des innovativen Alternativgebäude aus der Planungsphase den während des Monitoring ermittelten witterungs- und leerstandbereinigten CO_2-Emissionen des Bestandsgebäudes des IDIV gegenüber und weist die durch den Einsatz innovativer Technologien erzielten CO_2-Einsparungen unter Berücksichtigung realer Betriebs- und Nutzungsbedingungen aus.

Einsparung CO_2-Emissionen – witterungs- und leerstandsbereinigt				
		Referenzgebäude Simulation	Alternativgebäude Simulation	Bestandsgebäude IDIV Gewächshaus Monitoring
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Mittelwert der Jahre 2020 – 2022
Variante 1	($kg/CO_2\,a$)	226.278	55.686	-
Variante 2	($kg/CO_2\,a$)	223.384	55.258	-
Variante 3	($kg/CO_2\,a$)	219.350	54.365	-
Mittelwert Varianten 1 – 3	($kg/CO_2\,a$)	223.004	55.103	28.200
Einsparung gegenüber Referenzgebäude	($kg/CO_2\,a$)	-	167.901	194.784
Einsparung gegenüber Referenzgebäude, gerundet (Übertrag in Verwendungsnachweis)	**($kg/CO_2\,a$)**	-	**167.900**	**194.800**

Tabelle 1.11.: Übersicht zu CO_2-Emissionen und der CO_2-Reduktion im Bestandsgebäude des IDIV

Tabelle 1.12 zeigt eine Auswertung der jährlichen mittleren Werte für die Sollraum- und Raumtemperaturen sowie die Außentemperatur. Wie die Tabelle zeigt, liefert die Analyse

des Verlaufs der Sollraumtemperaturen für den Heizfall in den Gewächshauskabinen während der Jahre 2021 und 2022 Mittelwerte zwischen 17,3 und 19,0°C, die deutlich unter den Standardwert von 20°C liegen und damit tendenziell zu einer Verringerung des Heizenergiebedarfs im Vergleich zu den Simulationsvarianten führten. Im Gegensatz dazu liegt der Mittelwert der Sollraumtemperaturen über alle Gewächshauskabinen und -Zugänge für den Kühl-/Lüftungsfall zwischen 21,3 und 21,7°C, was im Vergleich zur Annahme in den Simulationsvarianten deutlich unterhalb von 25°C liegt und damit als Ursache für einen erhöhten Kühlenergiebedarf anzusehen ist.

Mittelwerte der Soll- und Ist-Temperatur ausgewählter Räume/Raumzonen

				Monitoring Bestandsgebäude			
		Datumsbereich	Tageszeitfenster	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
GWH Bereich (Kabinen und Zugänge)	Raumsolltemp. Lüftung	01.01.-31.12.	00-24 Uhr	nan	21,7	21,3	21,5
GWH Bereich (Kabinen und Zugänge)	Raumsolltemp. Heizung	01.01.-31.12.	00-24 Uhr	nan	19,0	17,3	18,2
GWH Bereich (Kabinen und Zugänge)	Raum-temperatur	01.01.-31.12.	00-24 Uhr	20,8	21,1	20,4	20,8
Datenraum F003 (DP 06/30)	Raum-temperatur	01.01.-31.12.	00-24 Uhr	17,5	22,1	23,7	21,1
Wetter	Außen-temperatur	01.01.-31.12.	00-24 Uhr	14,0	12,2	11,8	12,7

Tabelle 1.12.: Übersicht ausgewählter Mittelwerte von Soll- und Ist-Temperaturen in Räumen/Raumzonen sowie Mittelwerte der Außentemperatur in den Jahren 2020-2022 (Datumsfenster jeweils 01.01.-31.12., Zeitfenster jeweils 0-24 Uhr)

In Tabelle 1.13 bis Tabelle 1.15 werden die Monitoring-Ergebnisse jeweils den Ergebnissen der Simulationsvarianten V1 bis V3 sowohl für das Referenzgebäude als auch das Alternativgebäude gegenübergestellt. Der Vergleich für das realisierte Gebäude wird auf der Grundlage der Mittelwerte des für die Jahre 2020 bis 2022 über das Monitoring bestimmten Energieverbrauchs sowie der damit verbundenen CO_2-Emissionen geführt.

Der für die Simulationsvarianten mit Referenzgebäude ausgewiesene Elektroenergieverbrauch beinhaltet die Elektroenergie für die Kälteerzeugung ausschließlich durch Kompressionskältemaschinen. Der Betrag des Elektroenergieverbrauchs für die Simulationsvarianten mit Alternativgebäude sowie für das Bestandsgebäude setzt sich aus dem Verbrauch der Kompressionskältemaschinen inkl. zugehöriger Trockenkühler, der Verbrauch der Absorptionskältemaschine sowie dem Verbrauch des Hybridkühlers zusammen. Dieser Summe wird der Hilfsenergieverbrauch der Heizungs- und Klima-/Lüftungssysteme sowie der Regelungstechnik zugeschlagen, wohingegen der Elektroenergieverbrauch der Assimilationsbelichtung in den Gewächshauskabinen als nutzungsspezifische Ausstattung angesehen wird und in dieser Position nicht berücksichtigt ist.

Ferner ist aus Tabelle 1.13 ersichtlich, dass der Wärme- und Kühlenergieverbrauch des Bestandsgebäudes deutlich unter dem Verbrauch der Simulationsergebnisse des Referenzgebäudes für die Varianten V1, V2 und V3 liegt. Dies ist mit dem innovativen baulichen und anlagentechnischen Konzept sowie den bereits erwähnten Abweichungen der Sollraumtemperaturen für die Simulationsuntersuchungen und den tatsächlich gewählten Sollwerten zu begründen.

Aus den Wertegerüsten in Tabelle 1.14 sowie Tabelle 1.15 ist ersichtlich, dass mit dem gewählten innovativen Gebäude- und Anlagenkonzept im Mittel ca. 612.731 *kWh/a* weniger Primärenergie verbraucht und im Mittel ca. 195.000 *kg/a* CO_2 – *Äquiv*. weniger Emissionen

bezogen auf den Primärenergiebedarf emittiert wurden als mit einem energietechnisch konventionell ausgestatteten Referenzgebäude gleicher Größenordnung.

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking

	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring				
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert	Summe
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	556.296	373.743	255.161	143.783	94.330	164.425	493.274
Kühlenergie	(kWh/a)	225.116	162.615	32.290	36.912	13.628	27.610	82.830
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	77.274	81.156	35.141	67.020	28.534	43.565	130.695
Summe	(kWh/a)	858.686	617.514	322.592	247.714	136.493	235.600	-
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF,a)	**1.155**	**831**	**434**	**333**	**184**	**317**	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	819	589	308	236	130	225	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**550**	**396**	**207**	**159**	**87**	**151**	-

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking

	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring				
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert	Summe
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	546.899	364.492	255.161	143.783	94.330	164.425	493.274
Kühlenergie	(kWh/a)	101.815	77.699	32.290	36.912	13.628	27.610	82.830
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	77.929	81.154	35.141	67.020	28.534	43.565	130.695
Summe	(kWh/a)	726.643	523.345	322.592	247.714	136.493	235.600	-
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF,a)	**978**	**704**	**434**	**333**	**184**	**317**	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	693	499	308	236	130	225	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**466**	**335**	**207**	**159**	**87**	**151**	-

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking

	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring				
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert	Summe
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	536.616	344.709	255.161	143.783	94.330	164.425	493.274
Kühlenergie	(kWh/a)	62.175	24.758	32.290	36.912	13.628	27.610	82.830
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	76.815	81.199	35.141	67.020	28.534	43.565	130.695
Summe	(kWh/a)	675.606	450.666	322.592	247.714	136.493	235.600	-
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF,a)	**909**	**606**	**434**	**333**	**184**	**317**	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	645	430	308	236	130	225	-
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**433**	**289**	**207**	**159**	**87**	**151**	-

Tabelle 1.13.: Vergleich der Endenergie der Simulationsvarianten und des Monitorings inkl. Hilfsenergie sowie Witterungs- und Leerstandsbereinigung (oben: V1, mittig: V2, unten: V3)

Der Mittelwert der jährlichen CO_2-Emissionen bezogen auf den Primärenergiebedarf aller Simulationsvarianten des Alternativgebäudes liegt gemäß Tabelle 1.14 bei 55.102 *kg/a* CO_2 – Äquiv.. Er bildet den Ausgangs- bzw. Antragswert auf Seite 6 des Verwendungsnachweises nach VwV EFRE-EE vom 22.04.2015, Punkt 4, Kategorie V Pilotprojekte - Unterkategorie V.c. Als Ist-Wert wird der Mittelwert der jährlichen CO_2-Emissionen bezogen auf den Primärenergiebedarf für die Monitoring-Jahre 2020 bis 2022 ausgewiesen. Dieser liegt bei 28.220 *kg/a* CO_2 – Äquiv.. Somit kann unter Berücksichtigung der in den Jahren 2020 bis 2022 vorgefundenen Betriebs- und Nutzungssituation eine Verringerung der CO_2-Emissionen von im Durchschnitt 26.883 *kg/a* CO_2 – Äquiv. ermittelt werden.

Primärenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt / CO_2-Emissionen							
	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Primärenergie Heizen (Fernwärme)	(kWh/a)	0	112.123	76.548	43.135	28.299	49.327
Primärenergie Heizen (Heizöl)	(kWh/a)	611.925	0	0	0	0	0
Primärenergie Elektro (Kühlen + Hilfsenergie)	(kWh/a)	139.094	146.080	63.253	120.635	51.362	78.417
Primärenergie Summe	**(kWh/a)**	**751.019**	**258.203**	**139.802**	**163.770**	**79.661**	**127.744**
CO_2-Emissionen Heizen (Fernwärme)	(kg CO_2-Äq./a)	0	17.267	11.788	6.643	4.358	7.596
CO_2-Emissionen Heizen (Heizöl)	(kg CO_2-Äq./a)	189.697	0	0	0	0	0
CO_2-Emissionen Elektroenergie (Kühlen + Hilfsen.)	(kg CO_2-Äq./a)	36.582	38.419	16.636	31.727	13.508	20.624
CO_2-Emissionen Summe	(kg CO_2-Äq./a)	**226.278**	**55.686**	**28.424**	**38.370**	**17.866**	**28.220**

Primärenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt / CO_2-Emissionen							
	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Primärenergie Heizen (Fernwärme)	(kWh/a)	0	109.348	76.548	43.135	28.299	49.327
Primärenergie Heizen (Heizöl)	(kWh/a)	601.589	0	0	0	0	0
Primärenergie Elektro (Kühlen + Hilfsenergie)	(kWh/a)	140.272	146.078	63.253	120.635	51.362	78.417
Primärenergie Summe	**(kWh/a)**	**741.861**	**255.425**	**139.802**	**163.770**	**79.661**	**127.744**
CO_2-Emissionen Heizen (Fernwärme)	(kg CO_2-Äq./a)	0	16.840	11.788	6.643	4.358	7.596
CO_2-Emissionen Heizen (Heizöl)	(kg CO_2-Äq./a)	186.493	0	0	0	0	0
CO_2-Emissionen Elektroenergie (Kühlen + Hilfsen.)	(kg CO_2-Äq./a)	36.891	38.418	16.636	31.727	13.508	20.624
CO_2-Emissionen Summe	(kg CO_2-Äq./a)	**223.384**	**55.258**	**28.424**	**38.370**	**17.866**	**28.220**

Primärenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt / CO_2-Emissionen							
	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Primärenergie Heizen (Fernwärme)	(kWh/a)	0	103.413	76.548	43.135	28.299	49.327
Primärenergie Heizen (Heizöl)	(kWh/a)	590.278	0	0	0	0	0
Primärenergie Elektro (Kühlen + Hilfsenergie)	(kWh/a)	138.267	146.159	63.253	120.635	51.362	78.417
Primärenergie Summe	**(kWh/a)**	**728.545**	**249.571**	**139.802**	**163.770**	**79.661**	**127.744**
CO_2-Emissionen Heizen (Fernwärme)	(kg CO_2-Äq./a)	0	15.926	11.788	6.643	4.358	7.596
CO_2-Emissionen Heizen (Heizöl)	(kg CO_2-Äq./a)	182.986	0	0	0	0	0
CO_2-Emissionen Elektroenergie (Kühlen + Hilfsen.)	(kg CO_2-Äq./a)	36.364	38.440	16.636	31.727	13.508	20.624
CO_2-Emissionen Summe	(kg CO_2-Äq./a)	**219.350**	**54.365**	**28.424**	**38.370**	**17.866**	**28.220**

Tabelle 1.14.: Vergleich der Primärenergie der Simulationsvarianten und des Monitorings inkl. Hilfsenergie sowie Witterungs- und Leerstandsbereinigung (oben: Simulationsvariante V1, mittig: V2, unten: V3)

Tabelle 1.16 liefert eine Zusammenstellung der leerstands- und witterungsbereinigten Ergebnisse inkl. Gegenüberstellung mit Vergleichswerten für eine Kombination aus Gewächshaus und Laborgebäude gemäß VDI 3807 Bl. 2 für die Jahre 2020 bis 2022 sowie die Simulationsvarianten. Aufgrund der besonderen Charakteristiken des Gebäudekomplexes und der für ein Gewächshaus forschungsbedingt eher untypischen Nutzungsprofile werden die in VDI 3807 enthaltenen Benchmark-Bereiche allerdings nicht erreicht.

Reduktion der CO_2-Emissionen bezogen auf Simulation Variante 1 – Referenzgebäude							
	Einheit	Simulation		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Simulation Variante 1	(%)	0	75				
Simulation Variante 2	(%)	1	76	87	83	92	88
Simulation Variante 3	(%)	3	76				

Tabelle 1.15.: Übersicht zur Verringerung der CO_2-Emissionen im Vergleich zwischen Simulations- und Monitoring-Ergebnissen auf der Basis des jeweils ermittelten Primärenergieverbrauchs (Vergleichsbasis: Referenzgebäude, Simulation Variante 1

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking							
	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	556.296	373.743	255.161	143.783	94.330	164.425
Kühlenergie	(kWh/a)	225.116	162.615	32.290	36.912	13.628	27.610
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	77.274	81.156	35.141	67.020	28.534	43.565
Summe	(kWh/a)	858.686	617.514	322.592	247.714	136.493	235.600
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF$_i$a)	**1.155**	**831**	**434**	**333**	**184**	**317**
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	819	589	308	236	130	225
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**550**	**396**	**207**	**159**	**87**	**151**

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking							
	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	546.899	364.492	255.161	143.783	94.330	164.425
Kühlenergie	(kWh/a)	101.815	77.699	32.290	36.912	13.628	27.610
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	77.929	81.154	35.141	67.020	28.534	43.565
Summe	(kWh/a)	726.643	523.345	322.592	247.714	136.493	235.600
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF$_i$a)	**978**	**704**	**434**	**333**	**184**	**317**
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	693	499	308	236	130	225
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**466**	**335**	**207**	**159**	**87**	**151**

Endenergie – witterungs- und leerstandsbereinigt (kWh/a) – Summe Heizen, Kühlen, Elektroenergie (Kühlen), Hilfsenergie - Benchmarking							
	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022
Heizenergie	(kWh/a)	536.616	344.709	255.161	143.783	94.330	164.425
Kühlenergie	(kWh/a)	62.175	24.758	32.290	36.912	13.628	27.610
Elektroenergie (Kühlen) + Hilfsenergie	(kWh/a)	76.815	81.199	35.141	67.020	28.534	43.565
Summe	(kWh/a)	675.606	450.666	322.592	247.714	136.493	235.600
Summe, flächenspezifisch	(kWh/m²BGF$_i$a)	**909**	**606**	**434**	**333**	**184**	**317**
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Richtwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	(%)	645	430	308	236	130	225
Bewertung Ergebnis mit Bezug zu einem flächengewichteten Mittelwert nach VDI 3807 Blatt 2:2014-11	**(%)**	**433**	**289**	**207**	**159**	**87**	**151**

Tabelle 1.16.: Benchmarking mit Bezug der Simulations- und Monitoringergebnisse auf Richt- und Mittelwerte nach VDI 3807 Blatt 2 (oben: Simulationsvariante V1, mittig: V2, unten: V3)

1.4.2. Kühlenergieverbrauch

Tabelle 1.17 zeigt den gemessenen Endenergieaufwand für die Kühlung des Gebäudekomplexes nach der Witterungs- und Leerstandsbereinigung im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationsvarianten.

Der Mittelwert des Elektroenergieverbrauchs des Bestandsgebäudes ist ebenfalls geringer als im Referenzgebäude, überschreitet jedoch das Simulationsergebnis des Alternativgebäudes deutlich.

Endenergie Kühlen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{NGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	309.535	223.596	53.779	38.525	47.324	46.543
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	225.116	162.615	25.308	33.191	13.453	23.984
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	6.982	3.721	176	3.626
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**225.116**	**162.615**	**32.290**	**36.912**	**13.628**	**27.610**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$)	303	219	43	50	18	37
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$)	352	254	51	58	21	43

Endenergie Kühlen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{NGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	139.995	106.836	53.779	38.525	47.324	46.543
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	101.815	77.699	25.308	33.191	13.453	23.984
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	6.982	3.721	176	3.626
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**101.815**	**77.699**	**32.290**	**36.912**	**13.628**	**27.610**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$)	137	105	43	50	18	37
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$)	159	122	51	58	21	43

Endenergie Kühlen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{NGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	85.490	34.042	53.779	38.525	47.324	46.543
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	62.175	24.758	25.308	33.191	13.453	23.984
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	6.982	3.721	176	3.626
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**62.175**	**24.758**	**32.290**	**36.912**	**13.628**	**27.610**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$)	84	33	43	50	18	37
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$)	97	39	51	58	21	43

Tabelle 1.17.: Kühlenergieverbrauch - Vergleich der Ergebnisse von Monitoring und Simulationsvarianten - inkl. Witterungs- und Leerstandsbereinigung, mit Hilfsenergie (oben: V1, mittig: V2, unten: V3)

1.4.3. Energieverbrauch für Heizzwecke

Tabelle 1.18 zeigt den gemessenen Energieaufwand für die Beheizung des Gebäudekomplexes nach der Witterungs- und Leerstandsbereinigung im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationsvarianten. Die Auswertung in Tabelle 1.18 weist für das Bestandsgebäude gegenüber dem Referenzgebäude und dem Alternativgebäude einen deutlich niedrigeren Heizenergieverbrauch und damit eine signifikante Energieeinsparung aus.

Die deutliche Differenz zwischen den Monitoring- und den Simulationsergebnissen ist auf die niedrige mittlere Sollraumtemperatur in den Gewächshaus- und Laborbereichen für den Heizfall gegenüber den Annahmen im Simulationsmodell zurückzuführen. Besonders ist hier der besonders niedrige Heizenergieverbrauch im Jahr 2022 hervorzuheben, der möglicherweise im Zusammenhang mit den verstärkten Energiesparvorgaben der Bundesregierung steht.

Endenergie Heizen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	541.884	364.061	148.331	122.055	77.101	115.829
Korrekturfaktor Witterungbereinigung Heizen	(-)	1,027	1,027	1,198	1,039	1,173	1,137
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	556.296	373.743	177.755	126.828	90.473	131.685
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,435	0,134	0,043	0,204
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	77.407	16.955	3.857	32.739
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**556.296**	**373.743**	**255.161**	**143.783**	**94.330**	**164.425**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_i$a)	749	503	343	193	127	221
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_i$a)	871	585	399	225	148	257

Endenergie Heizen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	532.731	355.049	148.331	122.055	77.101	115.829
Korrekturfaktor Witterungbereinigung Heizen	(-)	1,027	1,027	1,198	1,039	1,173	1,137
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	546.899	364.492	177.755	126.828	90.473	131.685
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,435	0,134	0,043	0,204
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	77.407	16.955	3.857	32.739
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**546.899**	**364.492**	**255.161**	**143.783**	**94.330**	**164.425**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_i$a)	736	490	343	193	127	221
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_i$a)	856	570	399	225	148	257

Endenergie Heizen (thermisch) - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BGF}$a)

	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	522.714	335.779	148.331	122.055	77.101	115.829
Korrekturfaktor Witterungbereinigung Heizen	(-)	1,027	1,027	1,198	1,039	1,173	1,137
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	536.616	344.709	177.755	126.828	90.473	131.685
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,435	0,134	0,043	0,204
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	77.407	16.955	3.857	32.739
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**536.616**	**344.709**	**255.161**	**143.783**	**94.330**	**164.425**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_i$a)	722	464	343	193	127	221
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_i$a)	840	539	399	225	148	257

Tabelle 1.18.: Vergleich der Monitoring-Ergebnisse mit den Ergebnissen der Simulationsvarianten V1, V2 und V3 - inkl. Witterungs- und Leerstandsbereinigung, mit Hilfsenergie (oben: V1, mittig: V2, unten: V3)

1.4.4. Elektro- und Hilfsenergieverbrauch für Gebäudeheizung und -kühlung

Tabelle 1.19 stellt den Elektroenergieaufwand von Simulationsvarianten und Messungen nach der Witterungs- und Leerstandsbereinigung für den Betrieb der Kompressionskältemaschinen sowie zugehöriger Kühler inkl. Hilfsenergiebedarf für die Kühlung des Gebäudekomplexes gegenüber.
Wie Tabelle 1.20 zeigt am Beispiel der Simulationsvariante V1, dass keine Werte für den Hilfsenergieaufwand angegeben werden können. Die Klassifizierung der in Tabelle 1.20 als Hilfsenergie-relevant aggregierten Monitoring-Messwerte erfolgt aufgrund der Angaben in Planungsunterlagen, ist daher mit Unsicherheiten behaftet und bildet einen Kompromiss zum erforderlichen messtechnischen Aufwand für eine trennscharfe Zuordnung der Mess-

Endenergie Elektro (Kühlen) + Hilfsenergie - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BRI}$a)

	Einheit	Simulation Variante 1		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	106.252	111.589	58.527	69.948	99.085	75.853
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	77.274	81.156	27.542	60.263	28.166	38.657
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	7.599	6.757	368	4.908
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**77.274**	**81.156**	**35.141**	**67.020**	**28.534**	**43.565**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$a)	104	109	47	90	38	59
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$a)	121	127	55	105	45	68

Endenergie Elektro (Kühlen) + Hilfsenergie - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BRI}$a)

	Einheit	Simulation Variante 2		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	107.152	111.587	58.527	69.948	99.085	75.853
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	77.929	81.154	27.542	60.263	28.166	38.657
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	7.599	6.757	368	4.908
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**77.929**	**81.154**	**35.141**	**67.020**	**28.534**	**43.565**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$a)	105	109	47	90	38	59
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$a)	122	127	55	105	45	68

Endenergie Elektro (Kühlen) + Hilfsenergie - witterungs- und leerstandsbereinigt flächenspezifisch (kWh/m²$_{BRI}$a)

	Einheit	Simulation Variante 3		Monitoring			
Gebäude		Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			
Jahr		Musterjahr	Musterjahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	Mittelwert 2020-2022
Endenergie Berechnungs-/Messwert unbereinigt	(kWh/a)	105.621	111.649	58.527	69.948	99.085	75.853
Korrekturfaktor Witterungsbereinigung	(-)	0,727	0,727	0,471	0,862	0,284	0,539
Endenergie witterungsbereinigt	(kWh/a)	76.815	81.199	27.542	60.263	28.166	38.657
Leerstandsfaktor	(-)	0	0	0,276	0,112	0,013	0,134
Leerstandszuschlag	(kWh/a)	0	0	7.599	6.757	368	4.908
Endenergie witterungs- und leerstandsbereinigt	**(kWh/a)**	**76.815**	**81.199**	**35.141**	**67.020**	**28.534**	**43.565**
Flächenspezif. Ergebnis (Brutto-Fläche)	(kWh/m²BGF$_a$a)	103	109	47	90	38	59
Flächenspezif. Ergebnis (Netto-Fläche)	(kWh/m²NGF$_a$a)	120	127	55	105	45	68

Tabelle 1.19.: Elektroenergie zur Kühlung inkl. Hilfsenergie - Vergleich der Ergebnisse von Monitoring und Simulationsvarianten - inkl. Witterungs- und Leerstandsbereinigung, mit Hilfsenergie (oben: V1, mittig: V2, unten: V3)

werte bzw. Verbraucher, siehe hierzu auch Tabelle 1.9. Die Werte in Tabelle 1.20 zeigen beispielhaft, dass sich der Verbrauchswert den Jahren 2021 und 2022 mit dem Übergang in den Produktivbetrieb der Anlagen stabilisiert.

Elektroenergiebedarf Hilfsenergie HLSK (kWh/a) - nicht bereinigt

	Simulation Variante 1		Monitoring				
	Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert	Summe
Bilanzjahr	Modelljahr	Modelljahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	2020-2022
UV Regelung GWH Kabinen	k. A.	k. A.	20.821	38.553	38.537	32.637	97.911
UV Medien-Steuerung + Laborlüftung	k. A.	k. A.	48.585	62.645	63.434	58.221	174.664
Gesamt	-	-	**69.406**	**101.198**	**101.971**	**90.858**	

Tabelle 1.20.: Hilfsenergie - Monitoring-Ergebnisse

1.4.5. Energieverbrauch für nutzungsspezifische Einrichtungen

Nutzungsspezifische Einrichtungen bzw. Verbraucher stehen nicht im direkten Zusammenhang mit der thermischen Konditionierung des Gebäudes, sondern werden in einem Gewächshaus-spezifischen Kontext betrieben.

Elektroenergiebedarf nutzerspezifische Anlagen (kWh/a) – nicht bereinigt

	Simulation Variante 1		Monitoring				
	Referenzgebäude	Alternativgebäude	Bestandsgebäude			Mittelwert	Summe
Bilanzjahr	Modelljahr	Modelljahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	2020-2022
UV EG	k. A.	k. A.	22.383	22.604	36.587	27.191	81.574
UV KG	k. A.	k. A.	23.827	29.983	41.074	31.628	94.884
UV GWH Kabinen Assimilationsbelichtung	k. A.	k. A.	17.532	77.105	147.001	80.546	241.638
UV Kleinverbraucher	26.132	26.132	12.437	14.485	20.034	15.652	46.956
Gesamt	-	-	**76.179**	**144.177**	**244.696**	**155.017**	

Tabelle 1.21.: Elektroenergie - Nutzungsspezifische Einrichtungen

Die Simulationsuntersuchungen berücksichtigen in der energetischen Betrachtung den Elektroenergieverbrauch und die Wärmeabgabe von Kleinverbrauchern wie PCs und Laborgeräten im jeweiligen Aufstellraum. Außerdem wurde der Betrieb der Assimilationsbelichtung in den Simulationen berücksichtigt, wobei der hierfür erforderliche Energieaufwand nicht separat ausgewiesen wurde. Für die Auswertung der Monitoring-Daten wurden Messstellen identifiziert, die den Elektroenergieverbrauch von nutzungsspezifischen Anlagen erfassen, wobei auch hier eine Unsicherheit in der Differenzierung zwischen Verbrauchern mit Hilfsenergiecharakter und nutzungsspezifischen Verbrauchern besteht.

Die in Tabelle 1.21 enthaltenen Angaben tragen daher einen informativen Charakter. Hervorzuheben sind die Schwankungen des Energieverbrauchs für die Assimilationsbelichtung in den Jahreswerten, die in direktem Zusammenhang mit dem Bepflanzungsprogramm stehen und Auswirkungen auf den Kühlenergie- bzw. den Elektroenergieverbrauch haben, wenn keine solarthermischen Erträge für den Betrieb der Absorptionskältemaschine zur Verfügung stehen und die Kühlenergie durch den Betrieb von Kompressionskältemaschinen erzeugt wird.

1.4.6. Vergleich der Solarkollektortypen

Es werden Vakuumröhrenkollektoren der Typen *Heat-Pipe* und *Direct-Flow* der Fa. Narva in jeweils einem Kollektorkreis eingesetzt. Die Kollektoren werden in zwei Kollektorkreisen identischer Struktur organisiert. Die Kollektoren in den zwei Kollektorkreisen unterscheiden sich lediglich im Anbindetyp der Röhren innerhalb des Kollektors.

Im Strang 1 sind die Köpfe der einzelnen Röhren in der gegenwärtig üblichen Weise über eine Trockenanbindung mit dem im oberen Bereich des Kollektors vorhandenen Sammler verbunden. In Strang 2 hingegen erfolgt die Einbindung der Röhrenköpfe in den Sammler mittels einer neu entwickelten Nasseinbindung. Beide Kollektorkreise weisen gleichgroße Kollektorfelder mit einer 10°-Neigung sowohl mit Ost- als auch West-Richtung auf. Die Gesamtfläche jedes Kollektortyps beträgt jeweils 97,4 m². Das realisierte Anlagenkonzept soll in Kombination mit der Monitoring-Ausstattung einen Vergleich beider Anbindearten in Bezug auf die energetische Effizienz ermöglichen. Weitere Informationen sind in 3 enthalten. Eine erste Auswertung zum Vergleich beider Anbindearten zeigt Tabelle 1.23

Solarkollektoren Vakuumröhren	
Typ	Kollektorfläche (m²)
Trockenanbindung (SKF-T)	97,4
Nassanbindung (SKF-N)	97,4
Gesamtfläche (SKF)	**194,8**

Tabelle 1.22.: Übersicht der Solarkollektorflächen

Tabelle 1.23 stellt die Ergebnisse der Simulationsuntersuchung ersten Ergebnissen des Monitorings gegenüber, wobei ersichtlich ist, dass während der Betriebsjahre 2020 bis 2022 der tatsächlich realisierte Wärmeertrag deutlich unter dem Ertragswert, der durch eine Simulation berechnet wurde lag. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Simulationsrechnungen, die von einer durchgängigen Betriebsbereitschaft der Anlage ausgehen, beinhalten die Monitoring-Ergebnisse wie bereits im Abschnitt 1.2 angedeutet mehrmonatige Betriebsunterbrechungen und suboptimale regelungstechnische Einstellungen, die sich negativ auf den Jahreswärmeertrag der Solaranlage auswirken. Nach Korrektur der identifizierten Fehler und Optimierungen am Regelungskonzept ist im Produktivbetrieb eine Erhöhung des solaren Wärmeertrages zu erwarten.

Ein abschließender Vergleich der Energieeffizienz beider Kollektortypen liefert zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine ausreichend belastbaren Aussagen und erscheint erst am Ende der Projektlaufzeit möglich.

Solarkollektoren	**Wärmeertrag primärseitig (kWh/a)**					
	Simulation	**Monitoring**				Vergleich Mittelwert/ Simulation
	Modell	Bestandsanlage			Mittelwert	
Bilanzjahr	Modelljahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	(%)
Nassanbindung	35.575	25.853	17.316	17.469	20.213	57
Trockenanbindung	29.800	19.089	13.497	26.507	19.697	66
Gesamt	**65.375**	**44.942**	**30.813**	**43.975**	**39.910**	**61**

Tabelle 1.23.: Vergleich der Solarkollektorerträge aus der Simulationsuntersuchung und dem Monitoring ohne nachträgliche Korrektur der Messdaten oder Abschätzungen

Tabelle 1.24 zeigt die Ertragswerte mit Bezug zur Kollektorfläche.

Solarkollektoren	**Wärmeertrag primärseitig (kWh/m²$_{SKF}$a)**					
	Simulation	**Monitoring**				Vergleich Mittelwert/ Simulation
	Modell	Bestandsanlage			Mittelwert	
Bilanzjahr	Modelljahr	Jahr 2020	Jahr 2021	Jahr 2022	2020-2022	(%)
Nassanbindung	365	265	178	179	208	57
Trockenanbindung	306	196	139	272	202	66
Gesamt	**671**	**461**	**316**	**451**	**410**	**61**

Tabelle 1.24.: Vergleich der flächenspezifischen Solarkollektorerträge aus der Simulationsuntersuchung und dem Monitoring ohne Witterungskorrektur der Messdaten oder Abschätzungen zu Ertragsminderungen durch Betriebspausen

.

1.5. Fazit und Ausblick

Mit dem im Gewächshaus realisierten Anlagenkonzept konnte gegenüber dem Referenzgebäude eine deutliche Einsparung von Wärme- und Kühlenergie durch das Monitoring nachgewiesen werden. Umbaumaßnahmen, Defekte an Anlagenkomponenten, nachzujustierende Regelungseinstellungen sowie eine Umkehrung der Zuschaltfolge von Absorptionskältemaschine und Kompressionskältemaschinen gegenüber der Planungsintention haben jedoch zu einem erhöhten Elektroenergieverbrauch geführt.

Aus der Analyse des Betriebsregimes leiten sich für eine weitere Betriebsoptimierung folgende Ansatzpunkte ab:

- Korrektur der Fehlstellung der Kollektorröhren bzw. -absorberbleche
  Status: SIB initiiert Korrektur bei Anlagenerrichter, Abschluss der Arbeit bis Ende März 2023
- Erhöhung des Anteils der Absorptionskältemaschine an der Kälteerzeugung durch eine optimierte Nutzung der Solarerträge und des Fernwärmeanschlusses
  Status: in Abstimmung - Vorüberlegungen von SIB und TUD
- Prüfung des Betriebes der solar- und kälteseitigen Speicherkaskaden
  Status: wartend - Vorschlag zur temporären Ultraschall-basierten Volumenstrommessung durch TUD
- Klärung der Fehler an den Kältemengenzählern
  Stratus: in Bearbeitung - Mängelanzeige durch das SIB beim Anlagenerrichter
- Prüfung des Betriebsregimes der Laborlüftungsanlage
  Status: in Bearbeitung - SIB veranlasst Prüfung und ggf. Aktivierung eines Zeitprofils für den Ventilatorbetrieb zur Energieeinsparung
- Fehlerbehebung an ausgewählten Datenpunkten zur Messung der Raumtemperatur in den Gewächshauskabinen
  Status: in Bearbeitung

Durch die Bearbeitung der vorgenannten Punkte ist eine Verbesserung des Anlagenbetriebes, eine Erhöhung der Energieeffizienz und eine weitere Verringerung der CO_2-Emissionen gegenüber dem Referenzgebäude möglich.

Das betriebsbegleitende Monitoring zeigt, dass der effiziente Betrieb komplexer Anlagensystemen sowohl eine optimale regelungstechnische Abstimmung innerhalb der Teilsysteme als auch systemübergreifend erfordert und im Weiteren von einem angemessenen Instandhaltungskonzept profitiert.

2. Monitoring-System

2.1. Datenpool

Für die Durchführung und Unterstützung des Monitorings erscheint die strukturierte Sammlung und Aufbereitung aller relevanten Gebäude-bezogenen alphanumerischen und grafischen Informationen, die während des Planungs- und Bauprozesses sowie innerhalb der Nutzungsphase entstehen angebracht.
Zu diesem Zweck wurde im Vorbereitung auf die Monitoring-Phase ein projektspezifisches Internet-Portal erstellt, dass dem Monitoring-Team sowie weiteren interessierten Projektpartnern als Kommunikations-, Daten- und Visualisierungsplattform für die Sammlung, Bearbeitung und Auswertung von Informationen für die Dauer der Monitoring-Phase dient.
Der Datenpool, wird durch die TU Dresden auf IT-Ressourcen des Zentrums für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) gehostet und durch das Institut für Energietechnik (IET), Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (GEWV) administriert sowie gewartet. Durch die Gewerke-übergreifende Verknüpfung von Planungsergebnissen sowie Betriebs- und Monitoring-Daten entstehen vielfältige Auswerte- und Visualisierungsmöglichkeiten:

- Alphanumerische Beschreibung von Gebäuden / Etagen / Räumen / Raumausstattungen sowie Technischen Anlagen / Anlagenkomponenten / Monitoring-Datenpunkten
- Kontext-orientierte Integration von Planungsergebnissen in Form von CAD- und Office-Dateien
- Online-Betriebstagebuch
- Darstellung von Monitoring-Daten im Kontext zu baulichen und anlagentechnischen Objekten in Form interaktiver Dashboards
- Rollen-basierte Zugangsverwaltung

Wesentliche, für das Monitoring relevante gebäudetechnische Systeme und Subsysteme sind strukturiert im Datenpool erfasst, durch ausgewählte Eigenschaften charakterisiert, teilweise mit Planungsunterlagen angereichert und mit systemspezifischen Monitoring-Dashboards verknüpft, die Trenddarstellungen und Auswertungen zeigen.

Die integrierte Nutzerverwaltung des Datenpools bietet verschiedenen Nutzungsprofile, die den benannten Nutzern zugewiesen werden.

2.2. Betriebstagebuch

Im Monitoring-System werden zeitabhängige Betriebsdaten der vorhandenen Datenpunkte erfasst. Die Auswertung und Interpretation dieser Betriebsdaten soll durch die Erfassung zusätzlicher Informationen, die nicht im Monitoring-System automatisiert gewonnen bzw. erhoben werden können, unterstützt werden. Dazu wurde ein Online-Betriebstagebuch in das projektspezifische Web-Portal integriert und ausgewählten Projektbeteiligten mit der Bitte um Nutzung zur Verfügung gestellt.
Die Eintragungen im Betriebstagebuch können mit den im Datenpool gepflegten Datenstrukturen (Gebäude, Etagen, Räume, Raumausstattungen, technische Anlagen, Systemkomponenten, Datumsangaben, Unternehmen, Personen verknüpft werden, siehe Abbildung 2.1.

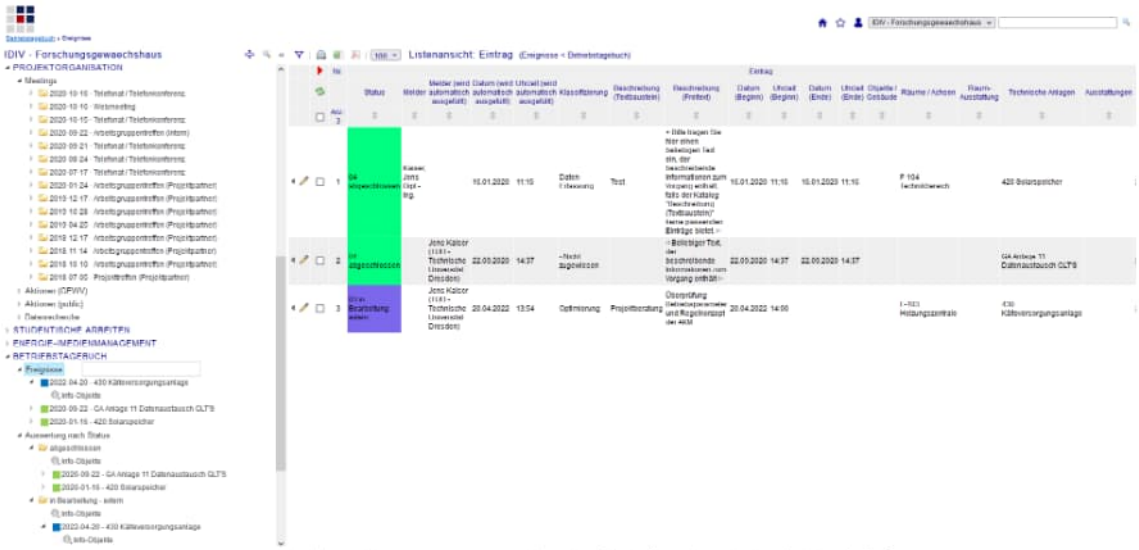


Abbildung 2.1.: Auszug aus dem Betriebstagebuch der Web-Plattform

2.3. Monitoring-Dashboard

Die während der Berichtsperiode gewonnenen Monitoring-Daten und Auswertungen sind über den dem Datenpool interessierten Projektpartnern zugänglich. Der Zugriff auf relevante Monitoring-Daten und -ergebnisse ist über den Datenpool möglich, der eine Inhaltsübersicht bietet und Verweise zu weiteren spezifischen themen- oder anlagen-spezifischen Monitoring-Dashboards enthält.

Die Betriebsdaten werden regelmäßig automatisiert aus der IT-Struktur der Universität Leipzig abgerufen, in die Monitoring-Plattform übertragen und für die Visualisierung aufbereitet. Abbildung 2.2 sowie Abbildung 2.3 zeigen beispielhaft kontextspezifische Dashboards für ausgewählte Anlagensysteme.

Abbildung 2.2.: Beispiel eines Monitoring-Dashboards für die Auswertung von Daten einer Gewächshaus-Kabine (Teilansicht)

Abbildung 2.3.: Beispiel eines Monitoring-Dashboards für die Auswertung des AKM-Betriebes (Teilansicht)

3. Thermische Solaranlage

3.1. Anlagenkonzept

Es werden *Heat-Pipe*- sowie *Direct-Flow*-Vakuumröhrenkollektoren der Fa. Narva in insgesamt zwei Kollektorkreisen eingesetzt. Dabei bilden 10 bis 30 Vakuumröhren jeweils ein Kollektormodul. Acht Kollektormodule werden zu einem Kollektorkreis verbunden. Es existieren insgesamt zwei Kollektorkreise. Die Module in den zwei Kollektorkreisen unterscheiden sich lediglich im Anbindetyp der Vakuumröhren innerhalb des Kollektors.

Im Kollektorkreis 1 (Kollektormodule 1-8) sind die Köpfe der einzelnen Vakuumröhren in der gegenwärtig üblichen Weise über eine Trockenanbindung mit dem im oberen Bereich des Kollektors vorhandenen Sammler verbunden. Im Kollektorkreis 2 hingegen befinden sich ausschließlich Vakuumröhren, deren Röhrenköpfe in den Sammler mittels einer neu entwickelten Nasseinbindung integriert sind.

Das realisierte Anlagenkonzept soll einen Vergleich beider Anbindearten in Bezug auf die energetische Effizienz ermöglichen. Die hierfür erforderlichen Messdaten werden durch mehrere Temperatursensoren sowie Wärmemengenzähler erhoben.

In Abbildung 3.1 sowie Abbildung 3.2 werden wesentliche Merkmale der zu vergleichenden Anbindungen der Vakuumröhren benannt.

Kollektorfläche

Mit einer Anzahl von jeweils vier Modulen des Kollektortyps mit Nass- und Trockenanbindung sowohl mit Ost- als auch mit Westausrichtung und einer Modulfläche von $11,66\ m^2$ ergibt sich sowohl für das System mit Nass- als auch das System mit Trockenanbindung eine Modulgesamtfläche von $93,28\ m^2$.

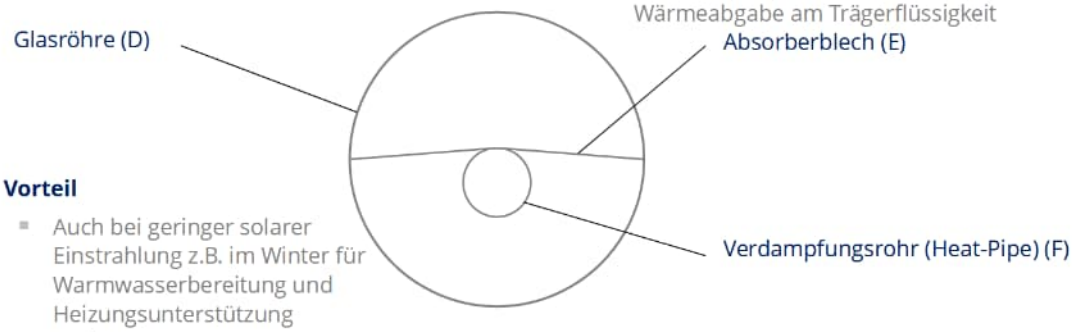
Ausrichtung und Neigung der Kollektorfelder

Die Ausrichtung der Kollektorfelder weicht aufgrund der Lage und Position des Gebäudes bzw. der Dachfläche um ca. 3° jeweils von der exakten Ost- bzw. Westrichtung ab, so dass die nach Osten orientierten Felder um 3° in Richtung Norden und die nach Westen orientierten Felder um den gleichen Betrag nach Süden gedreht sind, siehe Abbildung 3.3.

Die Kollektorfelder sind jeweils mit einer Neigung von 10° gegen die Ost- bzw. Westrichtung aufgeständert, siehe Abbildung 3.4. Die Verrohrung der Kollektormodule ist aus Abbildung 3.5 ersichtlich [21].

- **Konstruktionsprinzip**
  - Unter dem Absorberblech ist ein mit einer Flüssigkeit gefülltes Verdampfungsrohr (Heat-Pipe) angebracht.

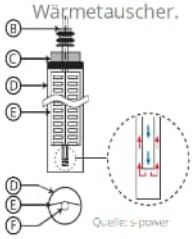
- **Wirkprinzip**
  - Verdampfung der Flüssigkeit durch Solarenergie
  - Kondensation im Wärmeübertrager am oberen Ende des Absorbers, dabei Wärmeabgabe am Trägerflüssigkeit



- **Vorteil**
  - Auch bei geringer solarer Einstrahlung z.B. im Winter für Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung geeignet

Abbildung 3.1.: Grundlagen sowie Vor- und Nachteile der Anbindetypen

- **STANDARD - Trocken-System-Anbindung**
  - Konstruktionsprinzip
    Trocken am Kopfende der Heat-Pipe
  - Vorteil
    Keine Entleerung notwendig.
  - Nachteil
    Etwas schlechterer Wärmeübergang am Wärmetauscher.



- **INNOVATION - Nass-System-Anbindung**
  - Konstruktionsprinzip
    Wärmeübertrager ragt direkt in das Sammelrohr hinein
  - Vorteil
    Bessere Wärmeübertragung an den Kollektorwärmetauscher.
  - Nachteil
    Beim Wechsel der Röhre muss die Solarflüssigkeit teilweise entleert werden.

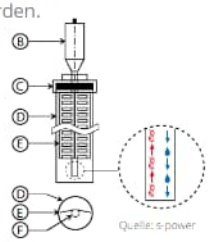


Abbildung 3.2.: Konstruktiver Vergleich von Nass- und Trockenanbindung der Vakuumröhre an den Kollektorsammler [12], [11]

Hydraulische Anbindung

Abbildung 3.7 zeigt eine schematische Darstellung der solarthermischen Anlage während der frühen Ausführungsplanung, wohingegen die Abbildung 3.8 das Anlagenschema der Bestandsdokumentation zeigt. Beide Schemata unterscheiden sich wesentlich in der Art der hydraulischen Verschaltung der Kollektorfelder.

Der erste Konzept sah eine Tichelmann-Anbindung der einzelnen Module des Kollektorfeldes vor. Durch diese Art der Modulverschaltung wird der Wärmeträger-Gesamtvolumenstrom eines Kollektortyps in jeweils identische Teilvolumenströme gesplittet und durch die Kollektorfelder geleitet. Diese Schaltung führt somit zu einem niedrigen Volumenstrom pro Kollektorfeld und damit zu einer identischen Wärmeträgertemperatur am Austritt aus den Modulen eines Anbindetyps, siehe Abbildung 3.7. Im Laufe des weiteren Planungsprozesses wurde diese Variante jedoch in eine Reihenschaltung der Kollektorfelder eines Anbindetyps verändert, bei der jedes Kollektorfeld mit dem Gesamtvolumenstrom innerhalb eines Kollektortyps beaufschlagt wird. Die Austrittstemperatur der in Reihe geschalteten Kollektorfelder unterscheiden sich damit. Die Austrittstemperatur des ersten in Reihe durchströmten Kollektorfeldes bildet somit die Eintrittstemperatur des nachgeschalteten Kollektorfeldes, siehe Abbildung 3.8.

Abbildung 3.3.: Solarthermischen Anlage - Lage und Ausrichtung des Gebäudes [22], (Map from OpenStreetMap)

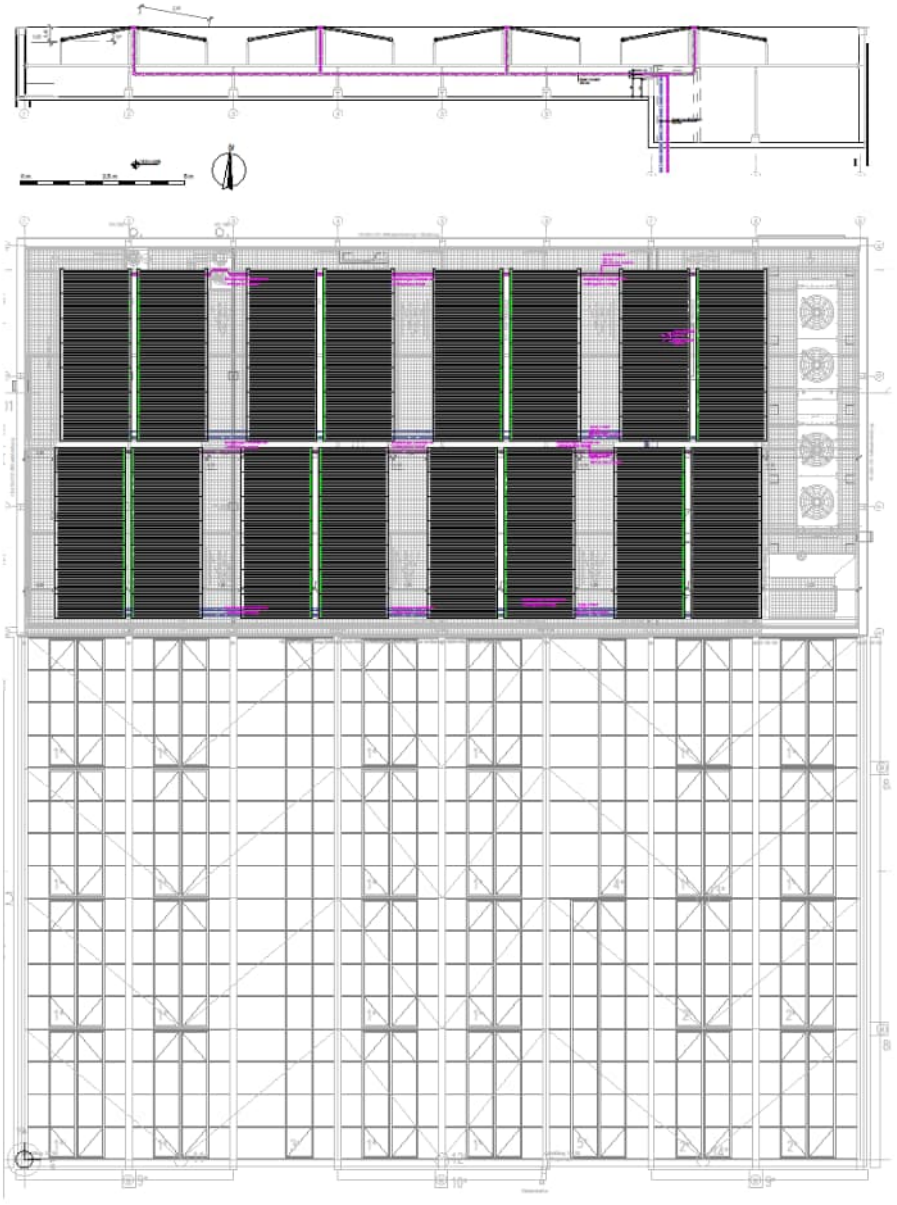


Abbildung 3.4.: Solarthermischen Anlage - Grundriss und Schnitt des Dachgeschosses inkl. Lage bzw. Position der Kollektorfelder [16]

Wärmeträgermedium im Primärkreis

Im Kollektor- bzw. Primärkreis wird in Planunterlagen als Wärmeträgermedium MEG35% angegeben. In der Bestandsdokumentation des Errichters AkoTEC wird die Solarflüssigkeit VT51hp (frostsicher bis -30°C, Wasseranteil 45%) als Wärmeträgermedium genannt. In [20] werden weiterführende Angaben zur Solarflüssigkeit gemacht.

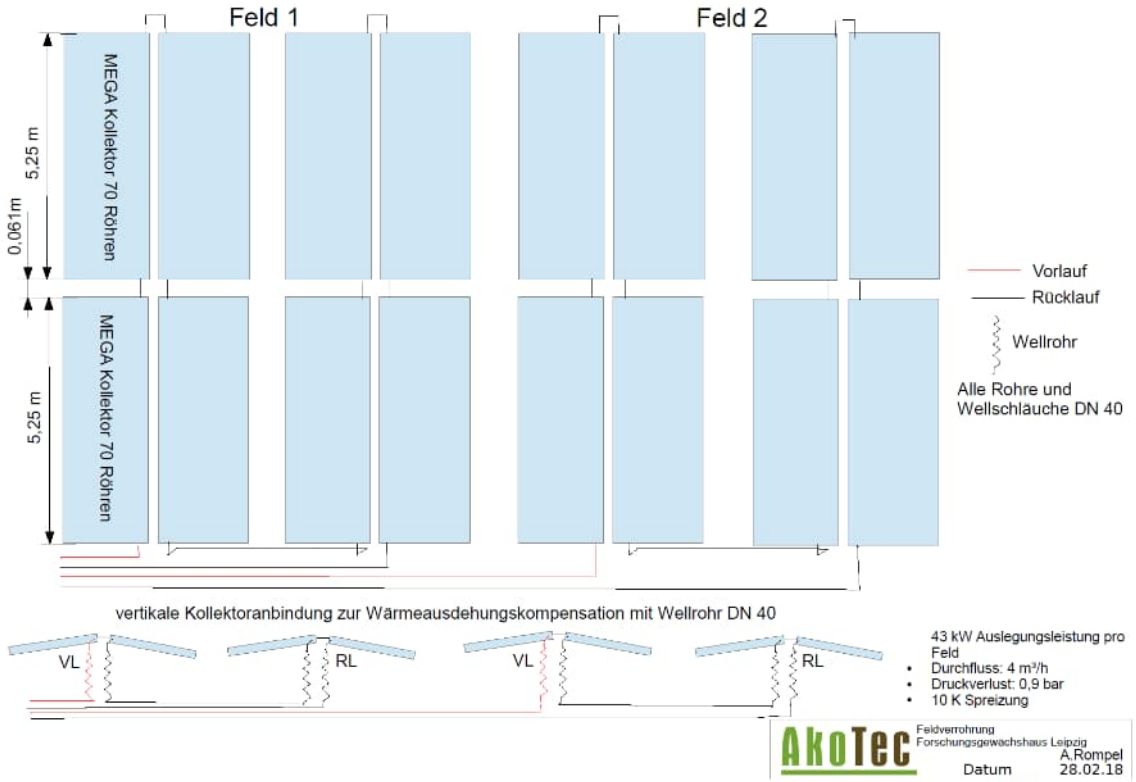


Abbildung 3.5.: Solarthermischen Anlage - Schema zur Verrohrung der Kollektormodule [21]

Abbildung 3.6 zeigt das Regelschema der solarthermischen Anlage zum Zeitpunkt der Ausführungsplanung, Ausschnitt aus [14].

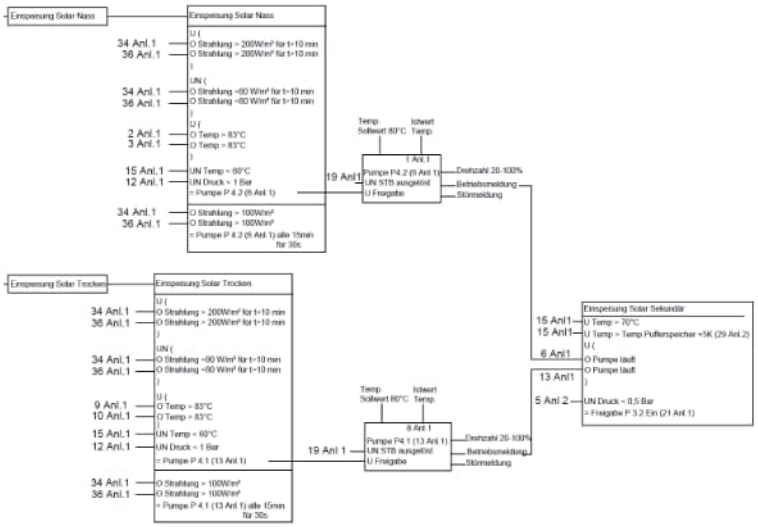


Abbildung 3.6.: Solarthermischen Anlage - Regelschema, Ausschnitt aus [14]

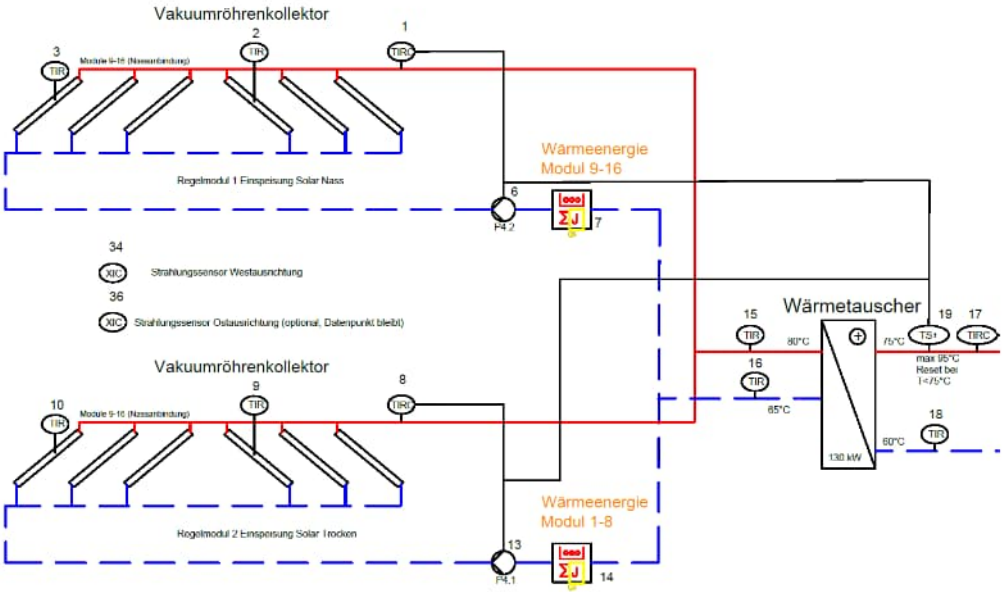


Abbildung 3.7.: Schematische Darstellung der solarthermischen Anlage - Ausschnitt Kollektorfeld (Ausführungsplanung), [15]

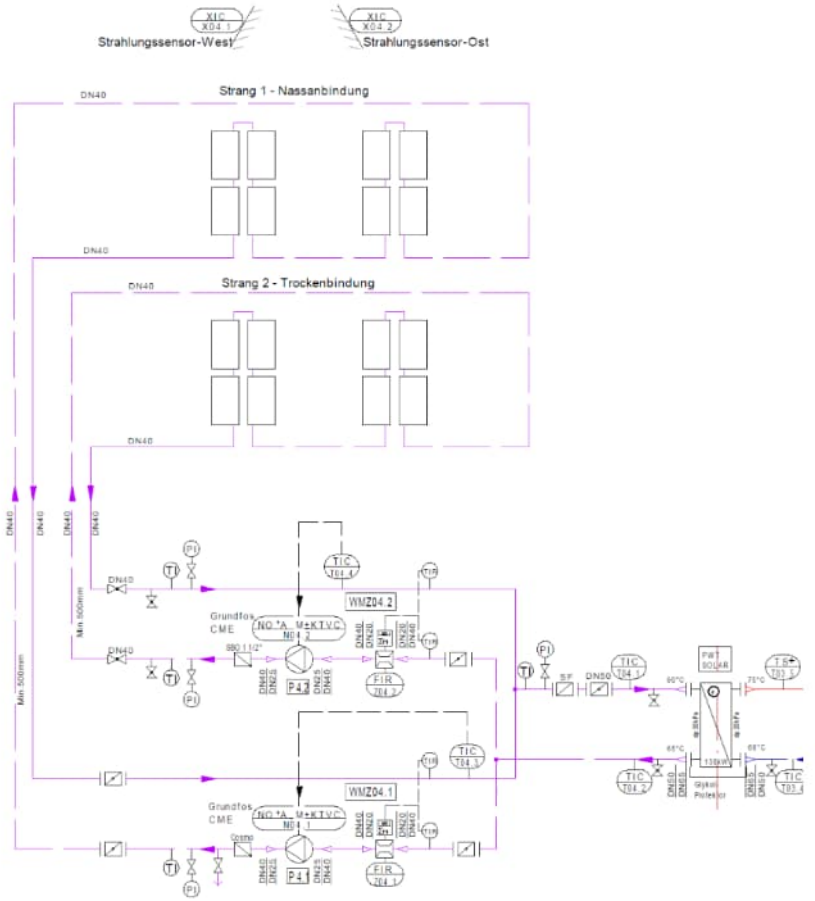


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung der solarthermischen Anlage - Ausschnitt Kollektorfeld (Bestandsdokumentation), [18]

3.2. Vergleich der Kollektortypen

Die zu vergleichenden Systeme mit Vakuumröhren in Nass- und Trockenanbindung bestehen jeweils aus folgenden Komponenten, siehe Abbildung 3.7 sowie Abbildung 3.8:

- ein Kollektorfeld bestehend aus acht Kollektormodulen a 70 Röhren in Reihenschaltung
- eine Umwälzpumpe
- ein Wärmemengenzähler
- jeweils ein Temperatursensor innerhalb des Kollektorfeldes an Modulen mit Ost- bzw. Westausrichtung
- Anschlussleitungen für Vor- und Rücklauf des Wärmeträgermediums
- Wärmeträgermedium

Die Kollektorkreise mit Trocken- bzw. Nasssystem unterscheiden sich in folgenden Punkten geringfügig:

- Länge der Anschlussleitungen für Vor- und Rücklauf zwischen Kollektoreintritt und -austritt und Wärmemengenzähler
- Position der Kollektorfelder in Bezug auf verschattungswirksame Umgebungsbebauung bzw. Baumbestand

Grundsätzlich wird der Wirkungsgrad eines Kollektors bzw. eines Kollektorfeldes durch eine Reihe von Randbedingungen beeinflusst, die nachfolgend benannt werden:

- Betriebsbedingungen des Systems/Betriebsweise der Anlage
  - Volumenstrom des Wärmeträgermediums
  - Rücklauftemperatur zum Kollektorfeld
  - Betriebszeitpunkt im Tages- und Jahresverlauf
  - Betriebsdauer im Tages- und Jahresverlauf
  - Anfahr- und Regelregime der Umwälzpumpe bzw. der Kollektoraustrittstemperatur
- Umweltbedingungen in der Installationsebene der Kollektorfelder während des Betriebes
  - Umgebungstemperatur
  - Windgeschwindigkeit
  - Solare Einstrahlung/Bewölkung
  - Einstrahlwinkel der Sonne auf die Vakuumröhre bzw. das in der Röhre befindliche Absorberblech
  - Niederschlagsereignisse, -form
  - Schnee- bzw. Hagelauflage
- Kollektorbezogene instandhaltungsrelevante Randbedingungen
  - Qualität der Wärmedämmung am Übergang der Vakuumröhren in den Kollektorsammler

- Qualität bzw. Verschleiß der äußeren Oberfläche der Vakuumröhren
- äußerer Verschmutzungsgrad der Vakuumröhren
- Verschmutzungsgrad der Reflektorfläche unterhalb der Vakuumröhren
- Ausrichtung des Absorberbleches innerhalb der Vakuumröhren bzw. der Vakuumröhren inkl. Absorberblech

• Systembezogene instandhaltungsrelevante Randbedingungen
- Zustand der Schmutzfänger in Kollektoranbinde- und -verbindungsleitungen
- Funktionsfähigkeit von Rückschlagklappen im Kollektoranbindeleitungen
- Verschleißzustand des Wärmeträgermediums

Die hier für einen Vergleich bewerteten Systeme wurden im Jahr 2018 errichtet und unterliegen einer turnusmäßigen Instandhaltung.

In Abbildung 3.9 werden die zwischen Dezember 2019 und April 2023 monatlich im Primärkreis gewonnenen Wärmeerträge der Solarthermieanlage vorgestellt. Die Abbildung zeigt, dass bis zum Monat Juli 2021 ein höherer Ertrags für das Kollektorfeld mit Nassanbindung realisiert wird. Ab August 2021 ist erkennbar, dass die Solarthermieerträge der Module mit Trockenanbindung über denen der Kollektoren mit Nassanbindung liegen. Die Ursachen für die Ertragsdifferenzen sind nicht eindeutig zu identifizieren und liegen möglicherweise in der veränderten Ausrichtung der Absorberbleche in Teilen der Module mit Nassanbindung ab August 2021, einem suboptimalen Regelregime während der täglichen Inbetriebnahme der Kollektoranlage sowie einer defekten Rückschlagklappe in einem der Kollektorkreise. Die Weiterführung des Monitorings bis zum Jahresende 2023 bietet die Möglichkeit, die energetischen Auswirkungen der im Juni 2022 verbesserten regelungstechnischen Einstellung der Anfahrsituation sowie einer funktionstüchtigen Rückschlagklappe und einer ab April 2023 korrigierten Ausrichtung der Kollektorbleche zu beobachten.

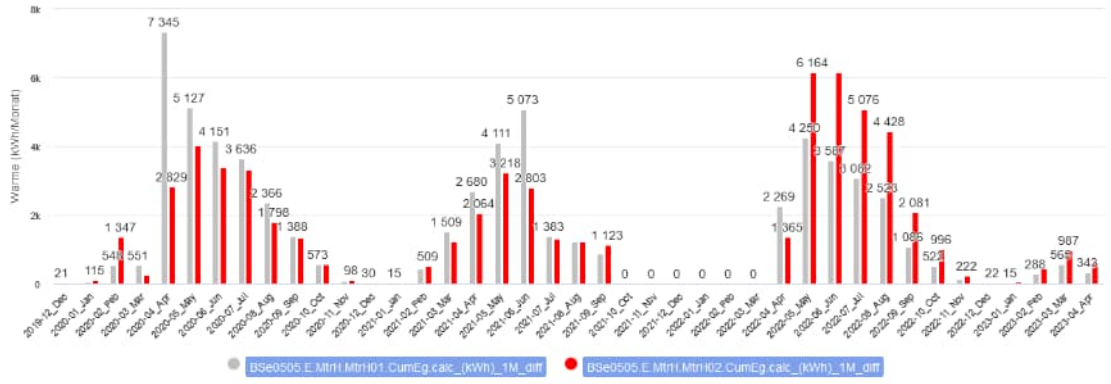


Abbildung 3.9.: Gegenüberstellung der monatliche Erträge für die Kollektorfelder mit Nass- sowie Trockenanbindung der Solarthermieanlage im Zeitraum Dezember 2019 bis April 2023

3.3. Energetische Auswertungen - monatlich

In Abbildung 3.10 sind die monatlich primär- und sekundärseitig kumulierten Wärmeerträge der Vakuumröhrenkollektoren mit Nass- und Trockenanbindung dargestellt.

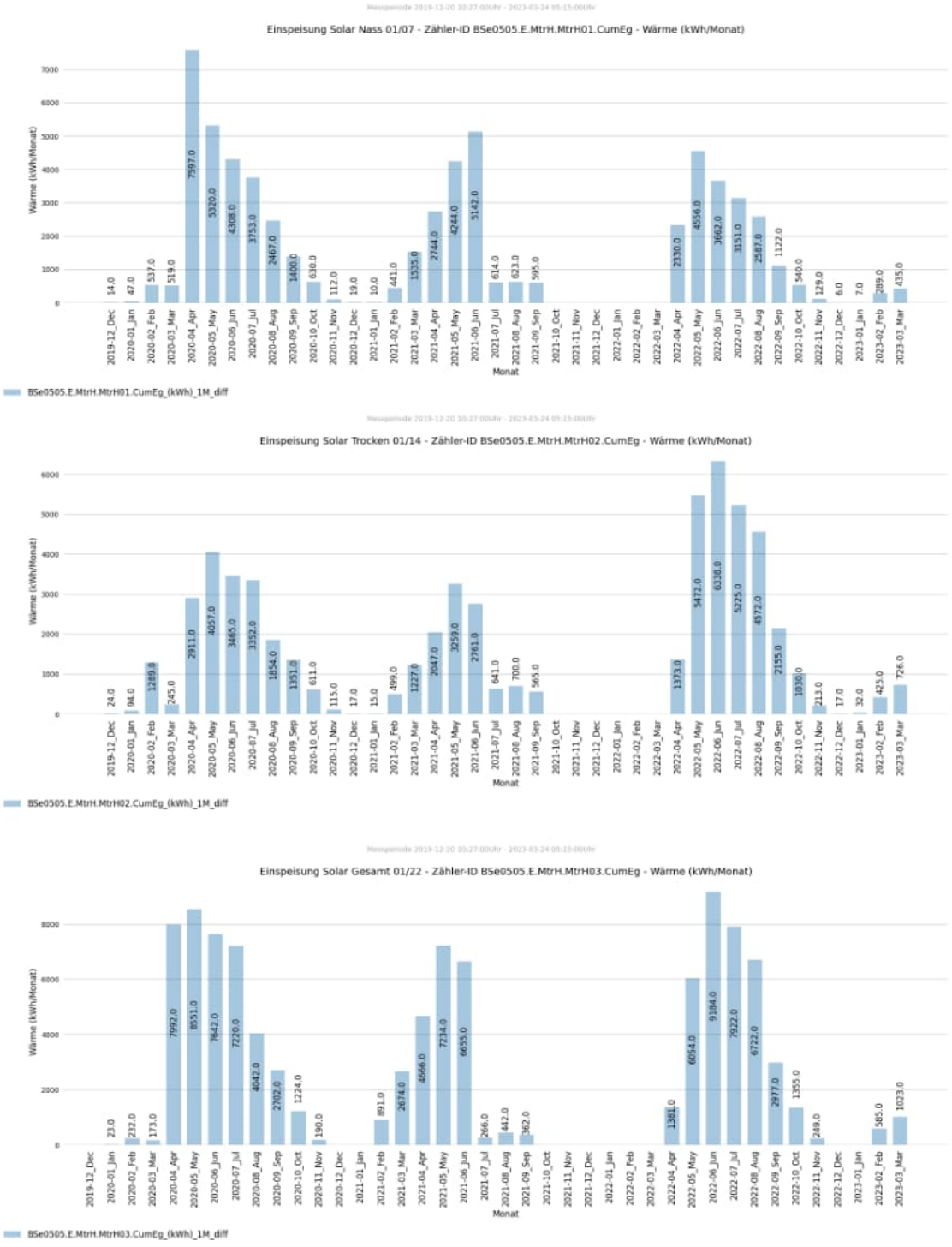


Abbildung 3.10.: Vakuumröhren Wärmeertrag primär nass (oben), trocken (mittig), gesamt sekundär (unten)

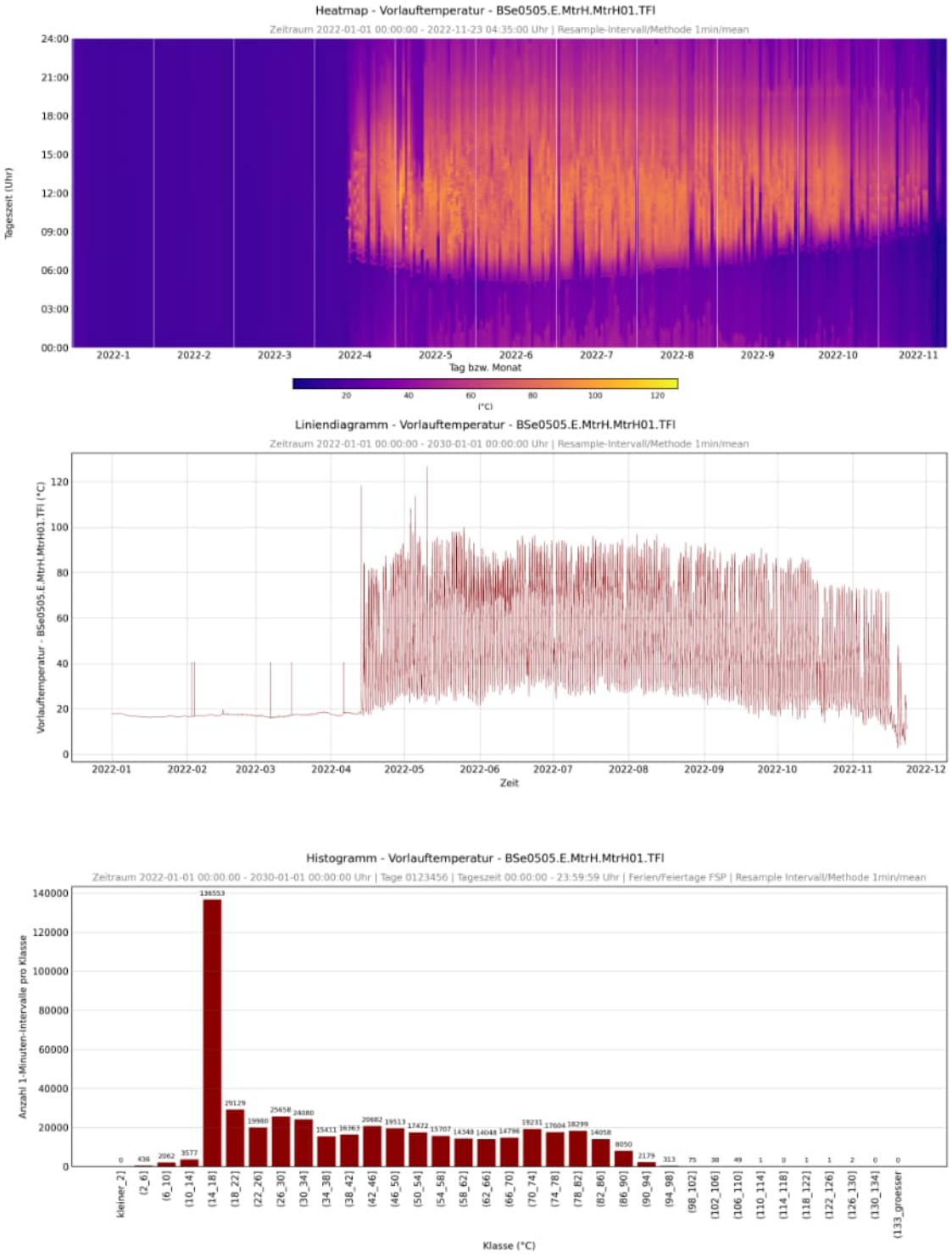


Abbildung 3.11.: Nassanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Heatmap (oben), Liniengrafik (mittig) und Histogramm (unten)

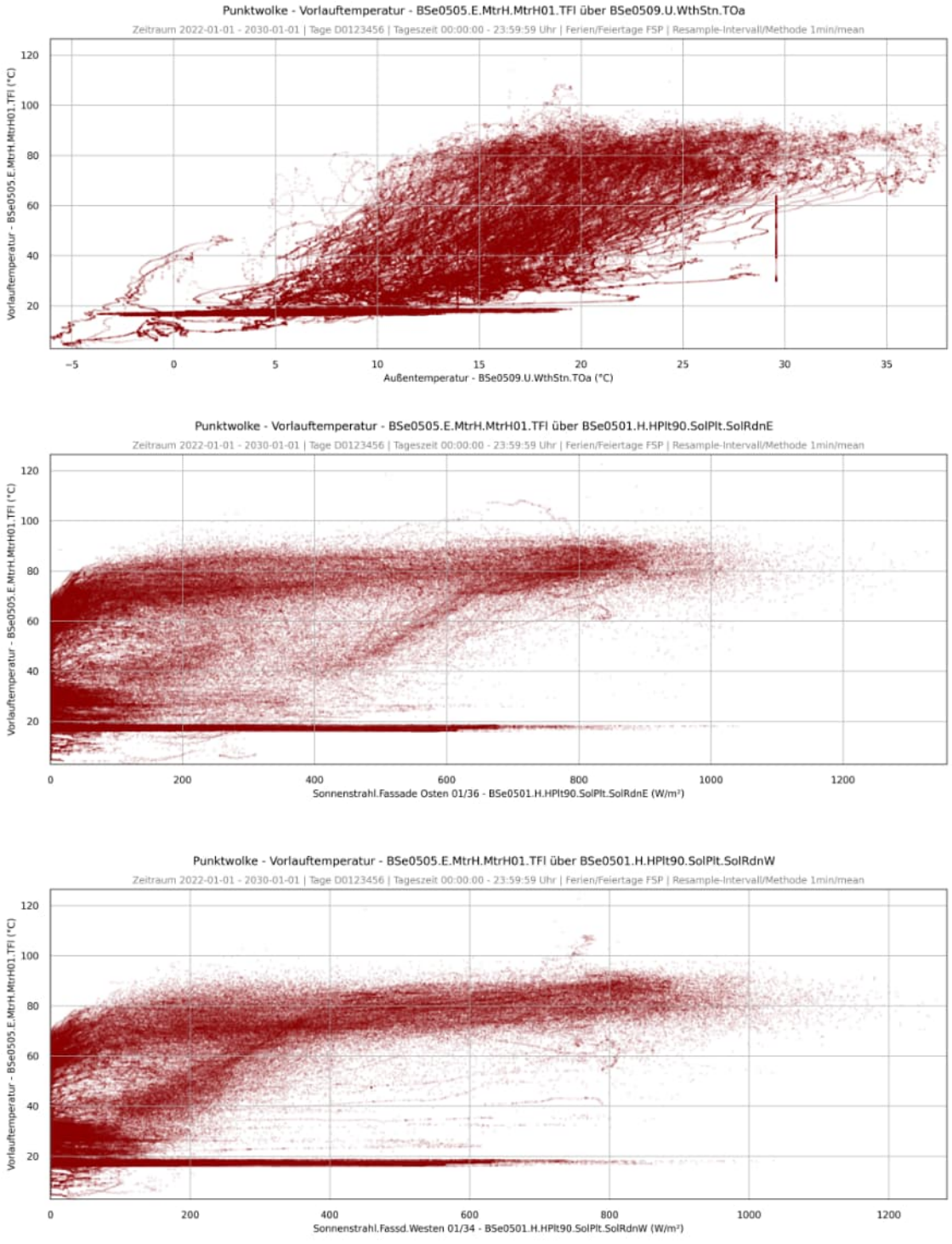


Abbildung 3.12.: Nassanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Punktwolke mit Bezug zur Außentemperatur (oben), solarer Einstrahlung Ost (mittig) und solarer Einstrahlung West (unten)

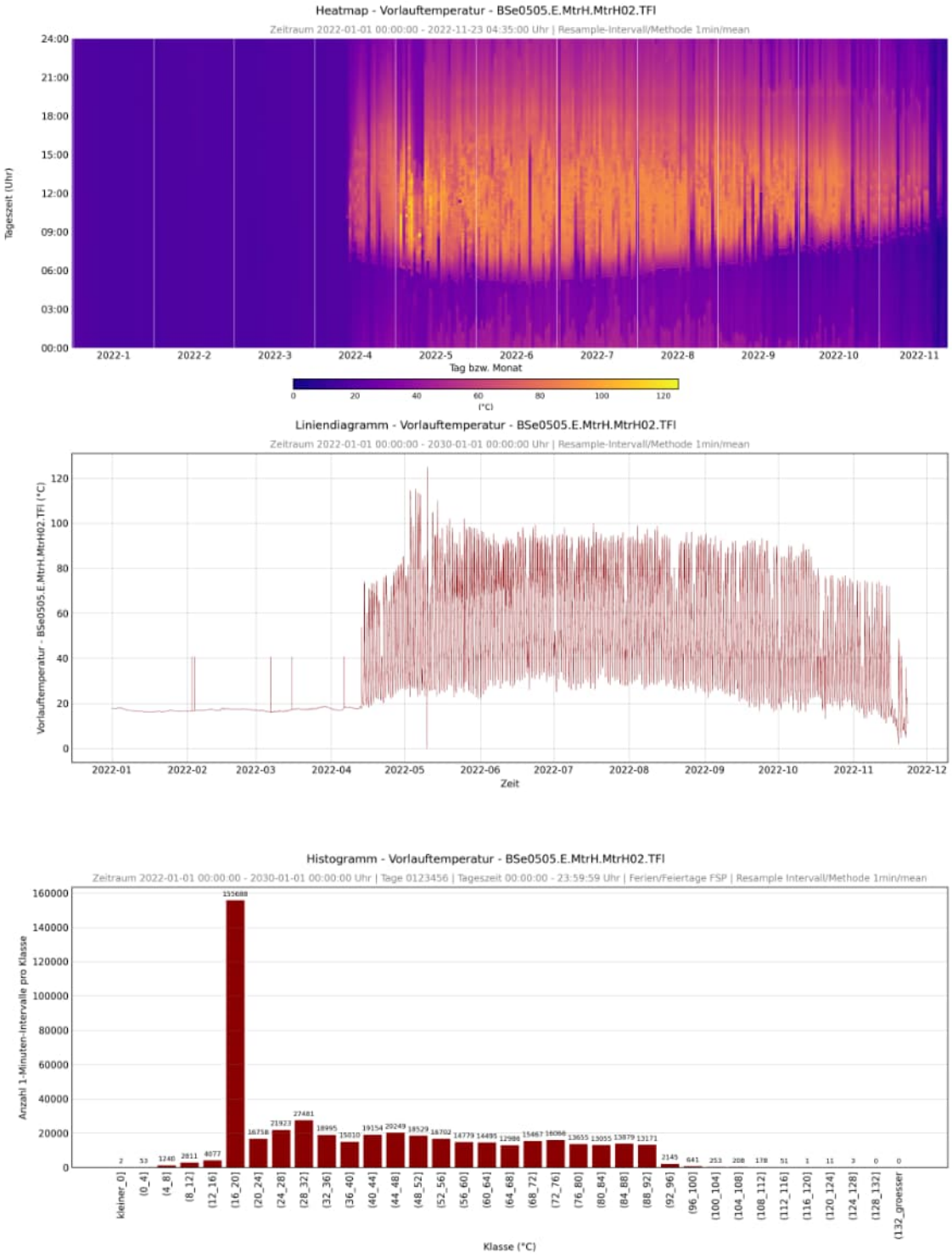


Abbildung 3.13.: Trockenanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Heatmap (oben), Liniengrafik (mittig) und Histogramm (unten)

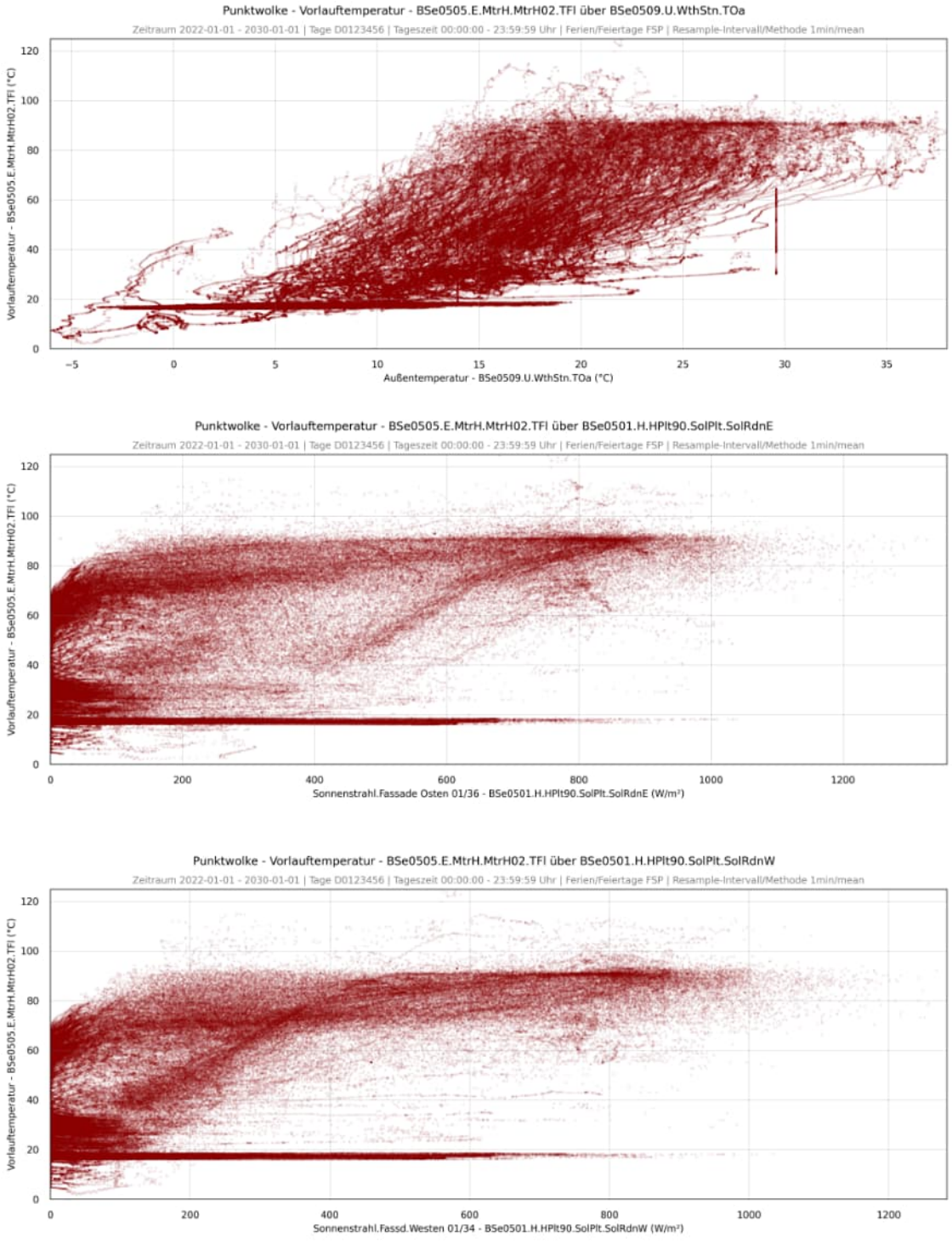


Abbildung 3.14.: Trockenanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Punktwolke mit Bezug zur Außentemperatur (oben), solarer Einstrahlung Ost (mittig) und solarer Einstrahlung West (unten)

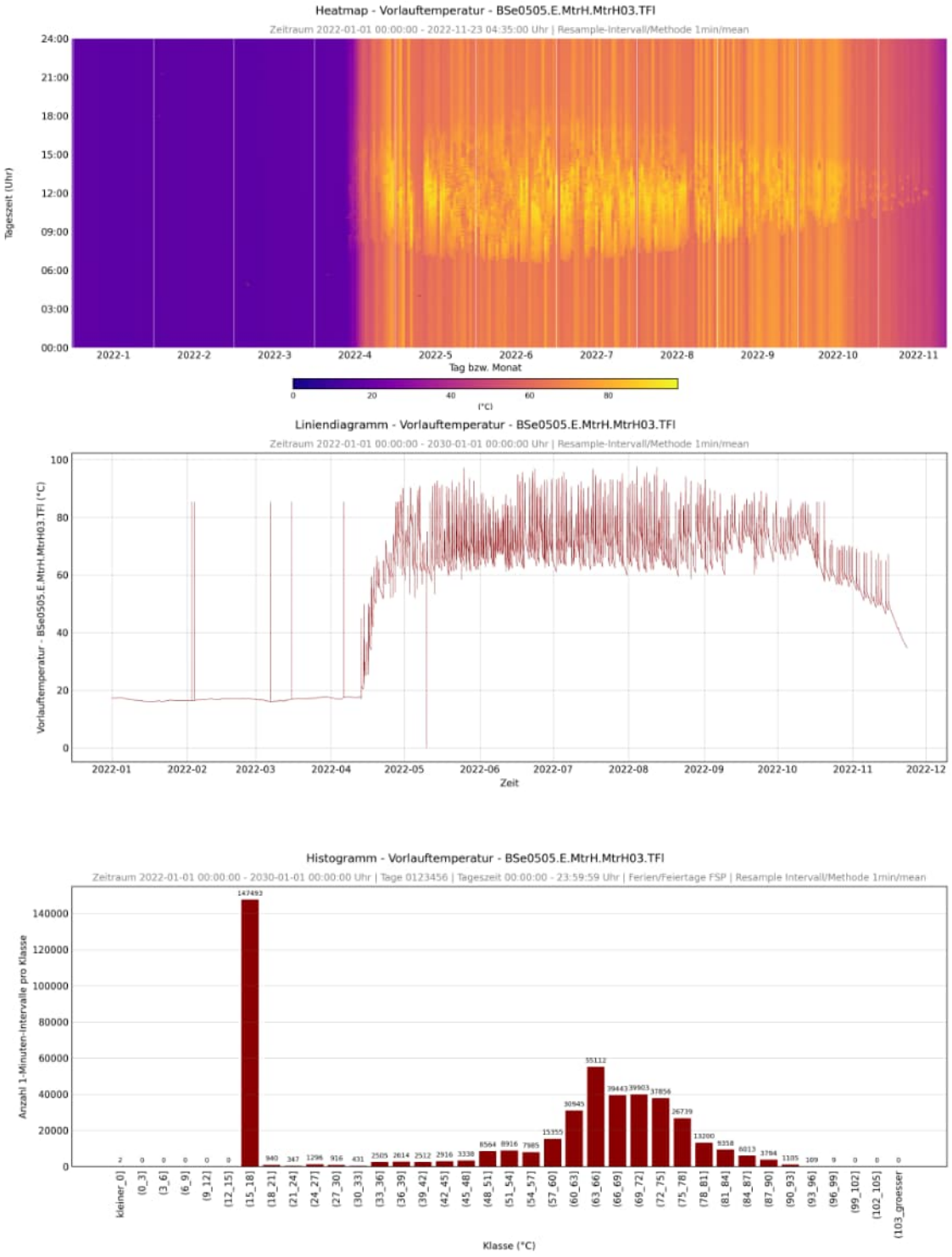


Abbildung 3.15.: Trockenanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Heatmap (oben), Liniengrafik (mittig) und Histogramm (unten)

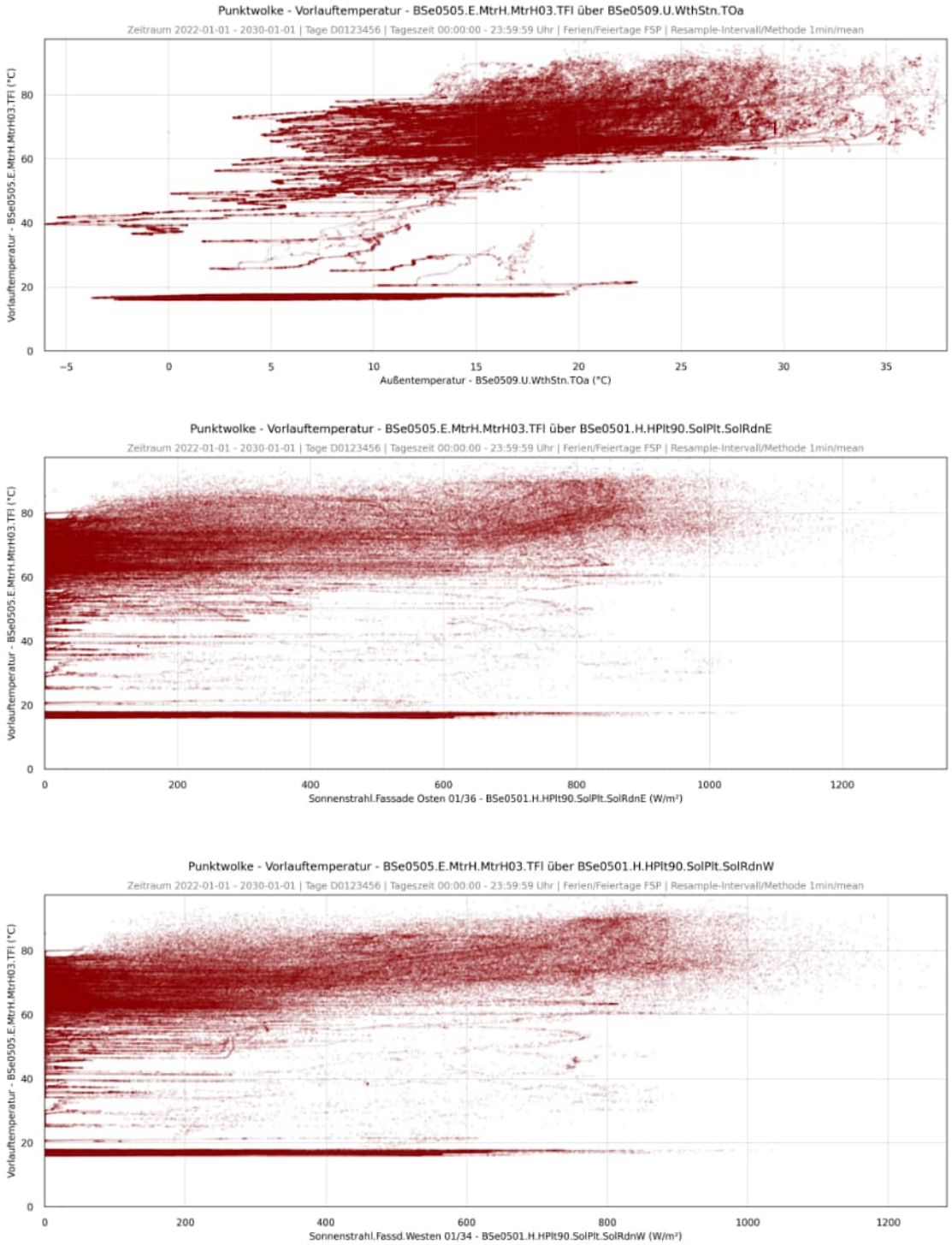


Abbildung 3.16.: Trockenanbindung - Primärseitige Vorlauftemperatur im Bilanzzeitraum als Punktwolke mit Bezug zur Außentemperatur (oben), solarer Einstrahlung Ost (mittig) und solarer Einstrahlung West (unten)

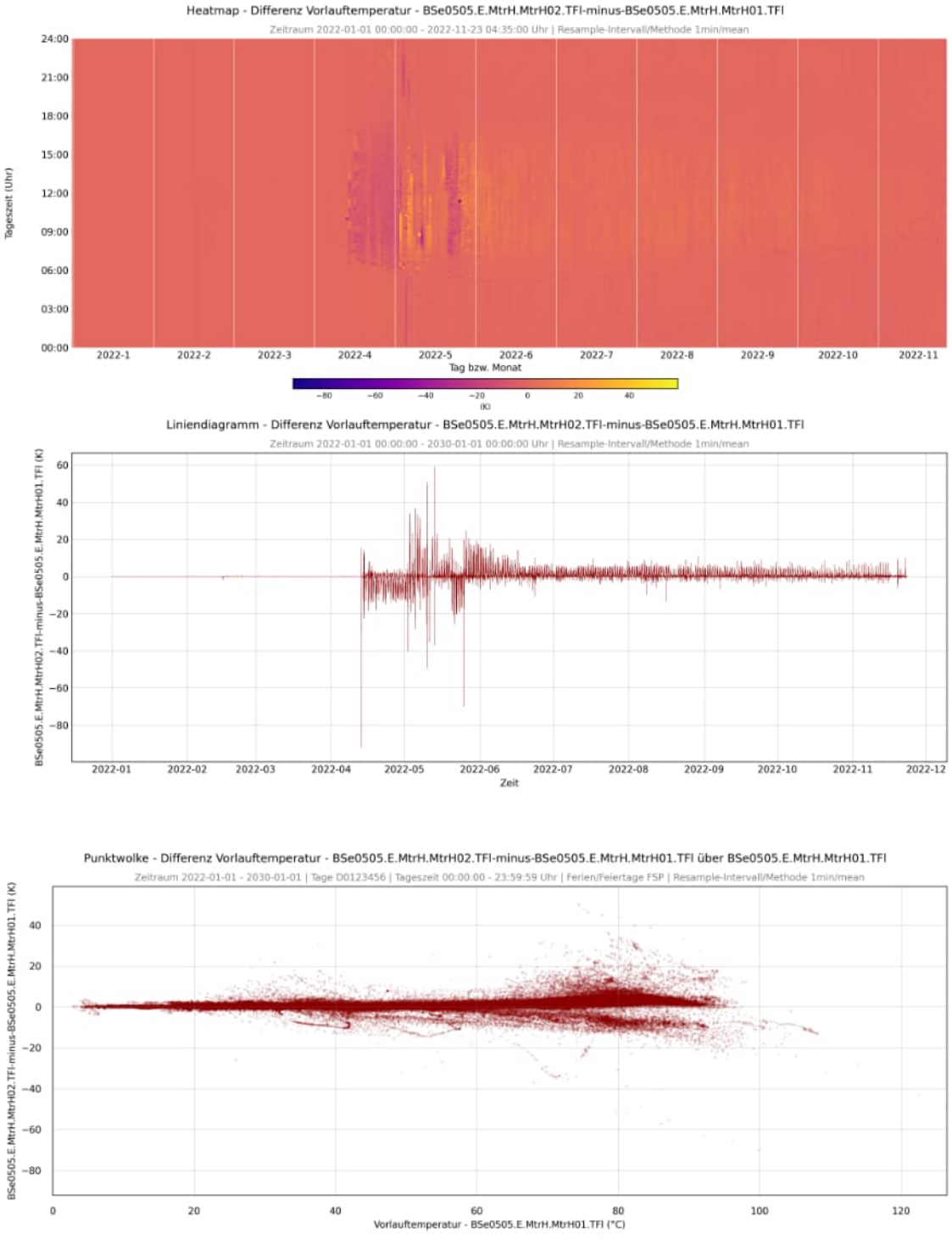


Abbildung 3.17.: Vergleich Trocken-/Nassanbindung primärseitig - Vorlauftemperaturen der Trocken- und Nassanbindung als Heatmap (oben), Liniengrafik (mittig) und Punktwolke (unten)

4. Kälteerzeugung, -speicherung und -nutzung

4.1. Anlagenkonzept

Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung des Kälteerzeugungs-, -speicher- und -verteilsystems.
Das Erzeugerportfolio des Kühlsystems wird aus folgenden Komponenten bzw. Teilsystemen gebildet:

- einem Wärmeübertrager für die Freie Kühlung mit einer Kühlleistung von 50 kW
- zwei baugleichen Kompressionskältemaschinen mit einer Kühlleistung von 75 kW pro Maschine, jeweils in Kombination mit einem Trockenkühler mit einer Rückkühlleistung von 103 kW
- einer Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von 75 kW
- einem Hybridkühler mit einer Rückkühlleistung von 100 kW für freie Kühlung und einer Rückkühlleistung von 195 kW im Hybridbetrieb

Weiter wird das Kältesystem durch fünf in Reihe geschaltete Pufferspeichern mit einem Volumen von je 2m³ und eine aus drei Umwälzpumpen bestehende Pumpengruppe zur Versorgung der Kälteverbraucher ergänzt.

Das Kältesystem ist ausgelegt für eine Temperaturpaarung von 8°C im Vorlauf und 14°C im Rücklauf.

Neben den Gewächshauskabinen werden drei Umluftkühler im Vorbereitungslabor, Auswertelabor und in einem Datenraum sowie ein Kälteregister in der Lüftungsanlage der Labore mit Kälteenergie versorgt.

Jeder der Erzeuger und Rückkühler sowie die zu den Verbrauchern führende zentrale Verteilungsleitung und jede der Gewächshauskabinen ist mit einem Kältezähler ausgestattet.

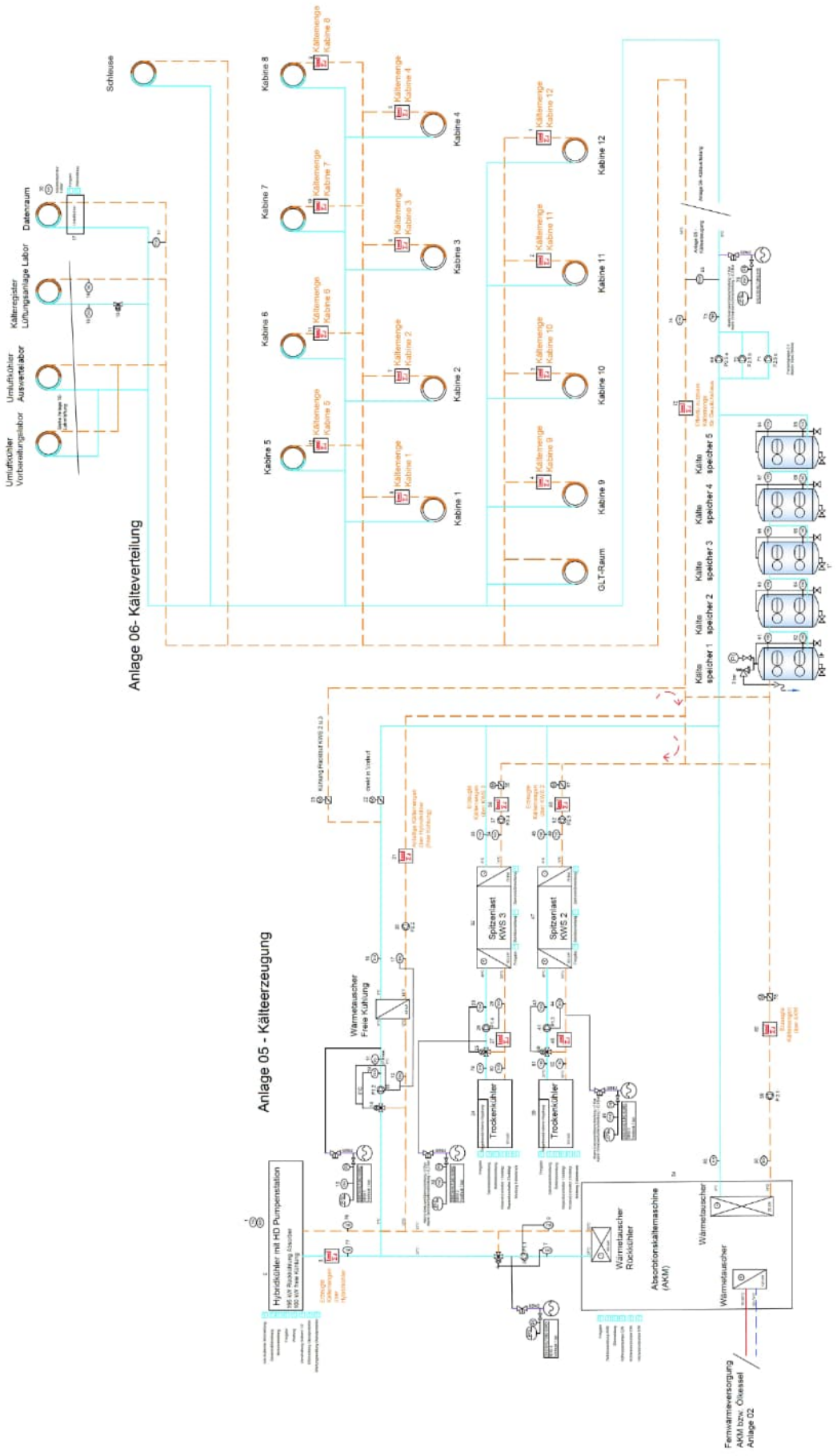


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung des Wärmeerzeugungs-, -speicher- und -verteilsystems

4.2. Energetische Auswertungen - monatlich

4.2.1. Vorbemerkungen

In den Säulendiagrammen werden jeweils monatsweise Auswertungen beginnend mit der erstmaligen Verfügbarkeit valider Messergebnisse am jeweiligen Datenpunkt durchgeführt. Die Werte für die am weitesten rechts befindliche Säule in den Diagrammen bildet aufgrund des gewählten Stichtages der Reporterstellung möglicherweise nicht die Verbrauchs- bzw. Ertrags-/Erzeugungssituation des gesamten Monats sondern ggf. nur einige Tage des angegebenen Monats ab.

4.2.2. Absorptionskältemaschine AKM

In Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

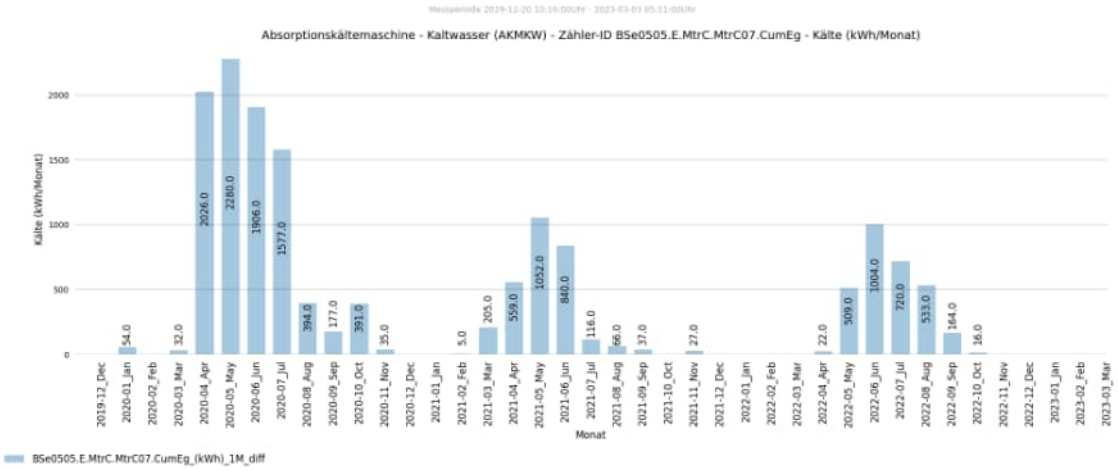


Abbildung 4.2.: Absorptionskältemaschine - Kaltwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC07.CumEg

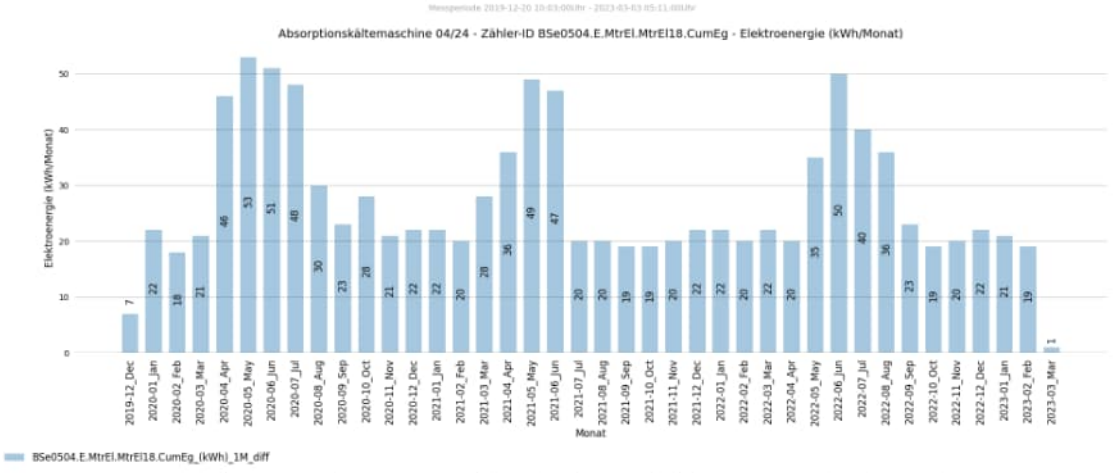


Abbildung 4.3.: Absorptionskältemaschine - Elektroenergie 04/24 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl18.CumEg

4.2.3. Kompressionskältemaschinen KWS2

In Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

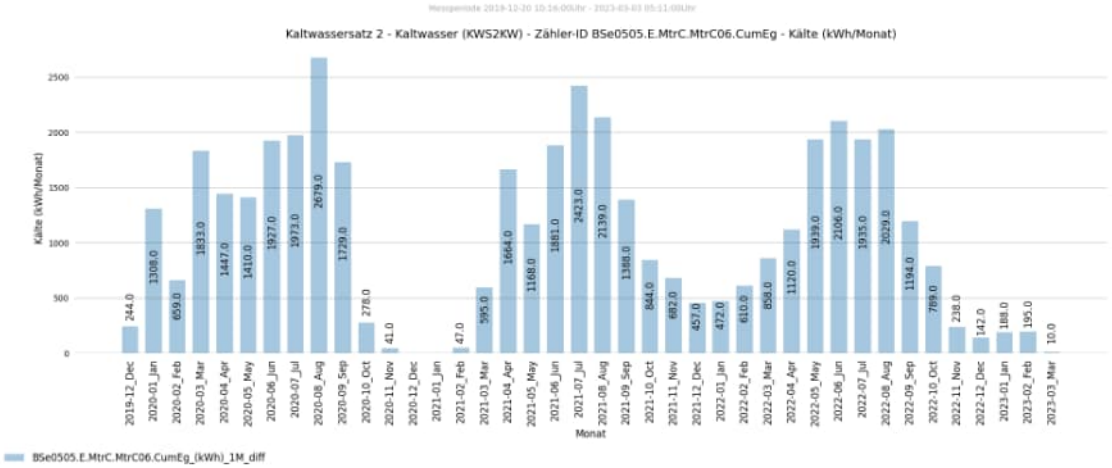


Abbildung 4.4.: Kompressionskältemaschinen 1 - Kaltwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC06.CumEg

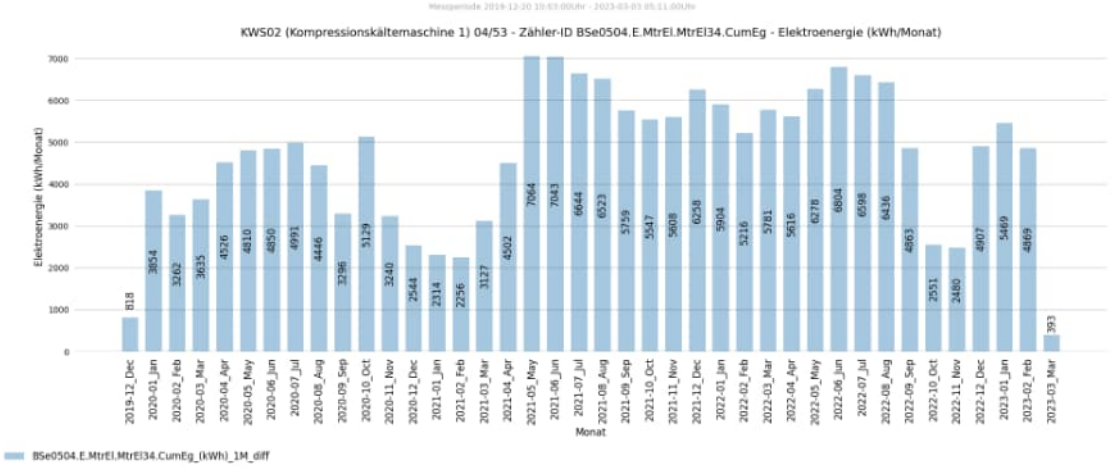


Abbildung 4.5.: Kompressionskältemaschinen 1 - Elektroenergie 04/53 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl34.CumEg

4.2.4. Trockenkühler an Kompressionskältemaschine KWS2

In Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

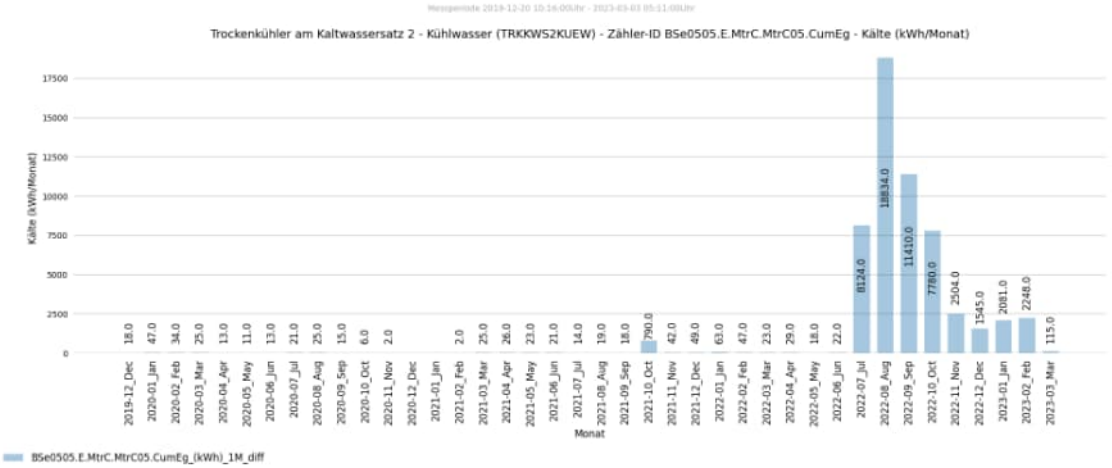


Abbildung 4.6.: Trockenkühler an Kompressionskältemaschinen 1 - Kühlwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC05.CumEg

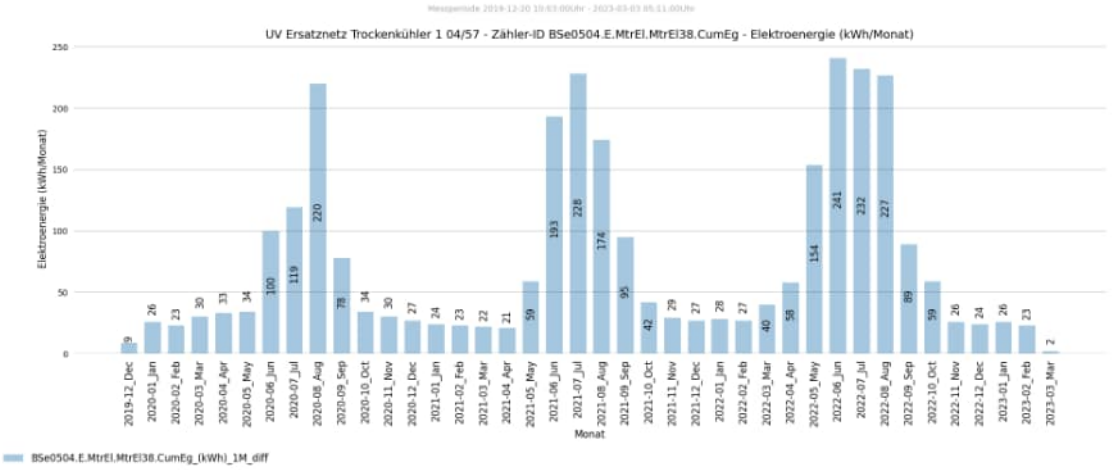


Abbildung 4.7.: Trockenkühler an Kompressionskältemaschinen 1 - Elektroenergie 04/57 - UV Ersatznetz - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl38.CumEg

4.2.5. Kompressionskältemaschinen KWS3

In Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

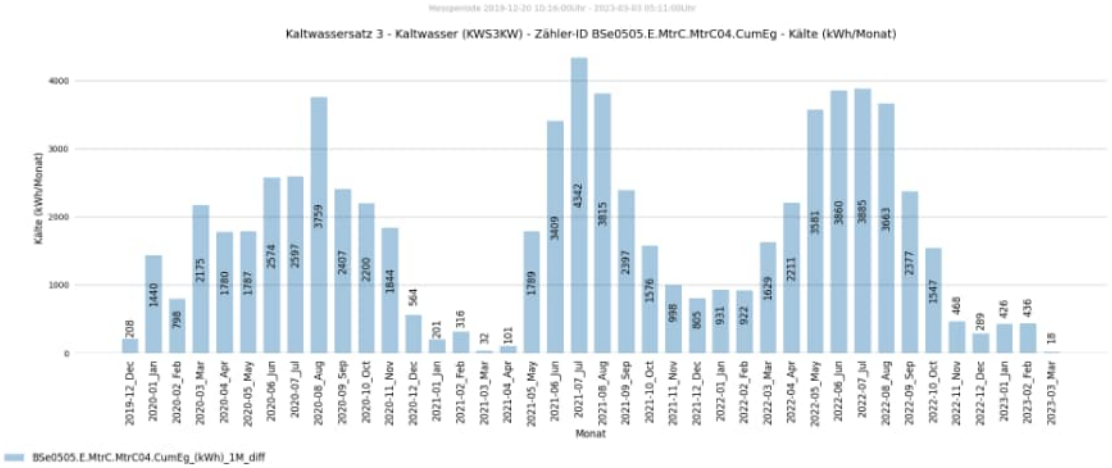


Abbildung 4.8.: Kompressionskältemaschinen 2 - Kaltwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC04.CumEg

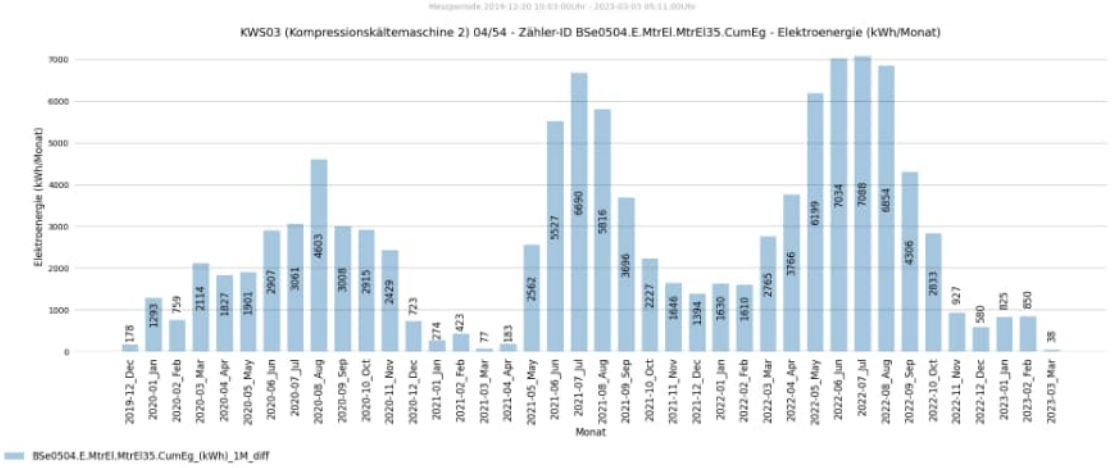


Abbildung 4.9.: Kompressionskältemaschinen 2 - Elektroenergie 04/54 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl35.CumEg

4.2.6. Trockenkühler an Kompressionskältemaschine KWS3

In Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

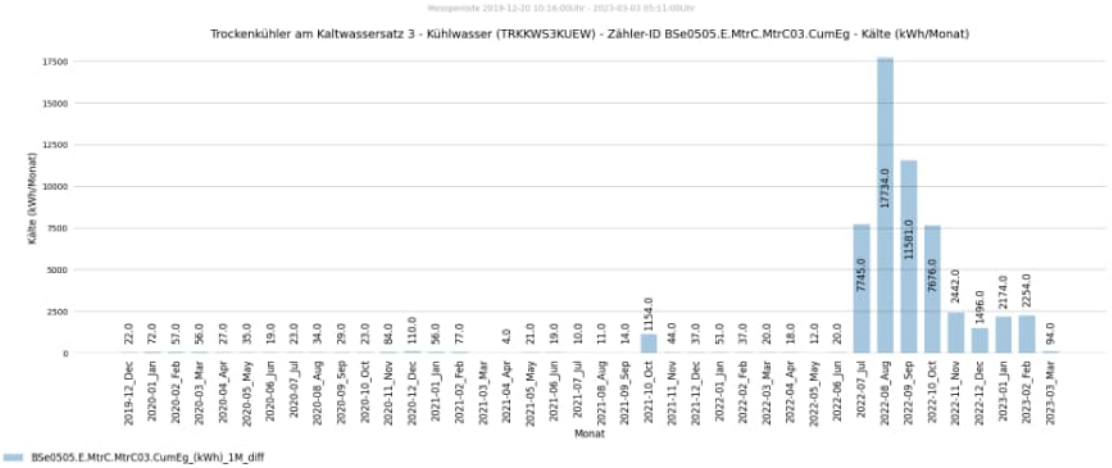


Abbildung 4.10.: Trockenkühler an Kompressionskältemaschinen 2 - Kühlwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC03.CumEg

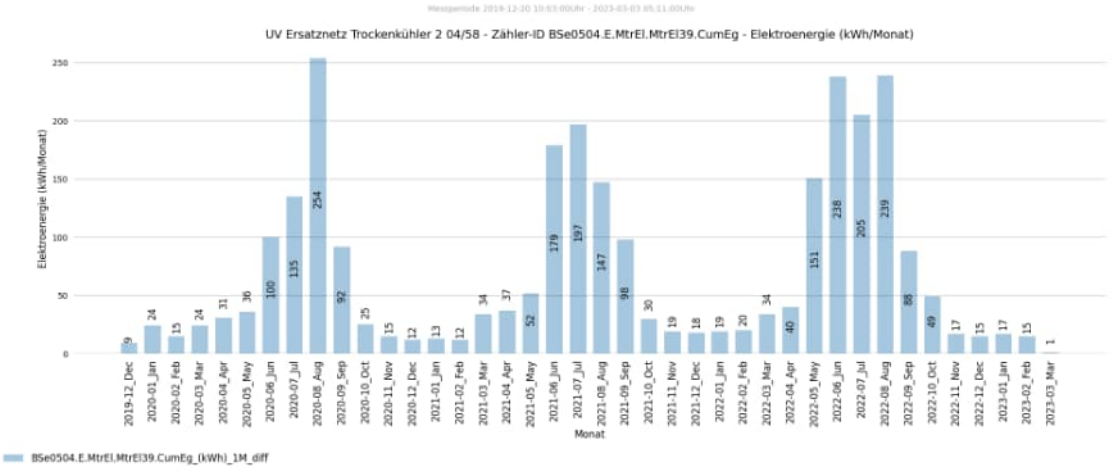


Abbildung 4.11.: Trockenkühler an Kompressionskältemaschinen 2 - Elektroenergie 04/58 - UV Ersatznetz - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl39.CumEg

4.2.7. Hybridkühler

In Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 sind die monatlich kumulierten Verbrauchswerte für Elektroenergie sowie die erzeugte Kälte für die Bilanzperiode dargestellt. Der Kältemengenzähler

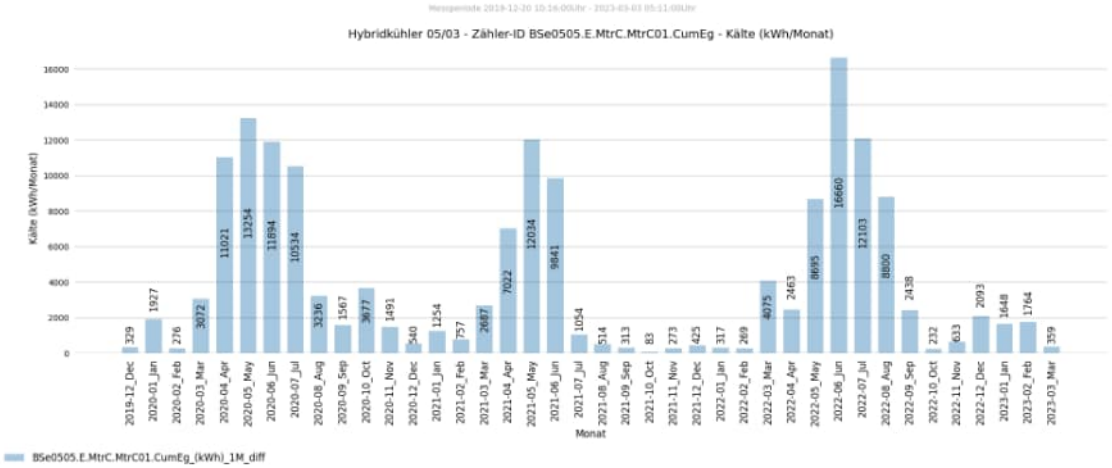


Abbildung 4.12.: Hybridkühler - Kälte 05/03 - BSe0505.E.MtrC.MtrC01.CumEg

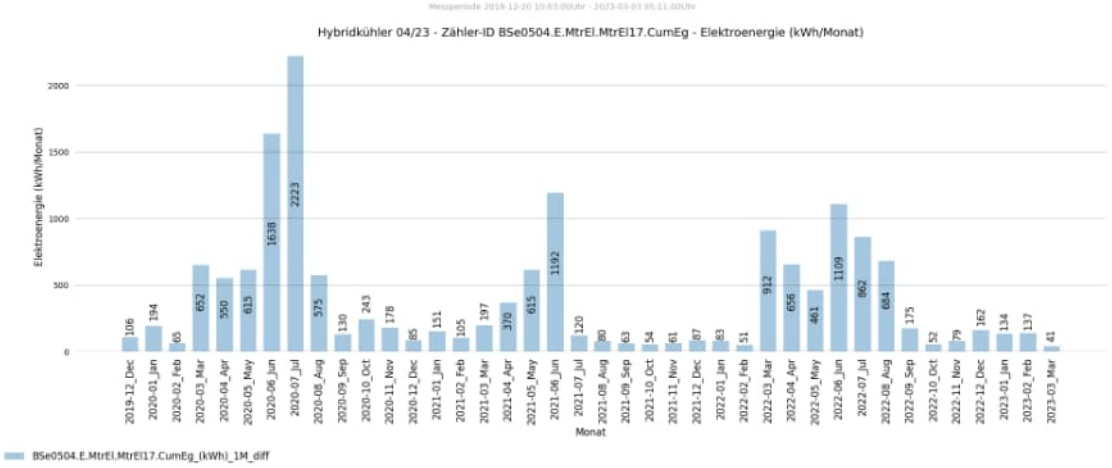


Abbildung 4.13.: Hybridkühler - Elektroenergie 04/23 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl17.CumEg

4.2.8. Freie Kühlung

In Abbildung 4.14 ist der monatlich kumulierte Wert der durch Nutzung von freier Kühlung erzeugte Kältemenge für die Bilanzperiode dargestellt.

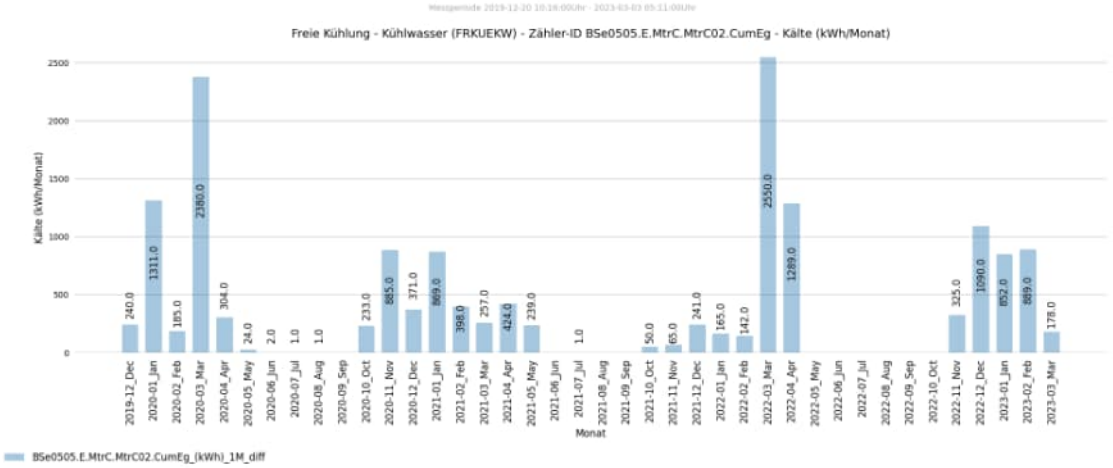


Abbildung 4.14.: Freie Kühlung - Kühlwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC02.CumEg

4.2.9. Fernwärmestation für Kälteerzeugung

In Abbildung 4.12 ist der monatlich kumulierte Wert für die zur Kälteerzeugung genutzte Fernwärme für die Bilanzperiode dargestellt.

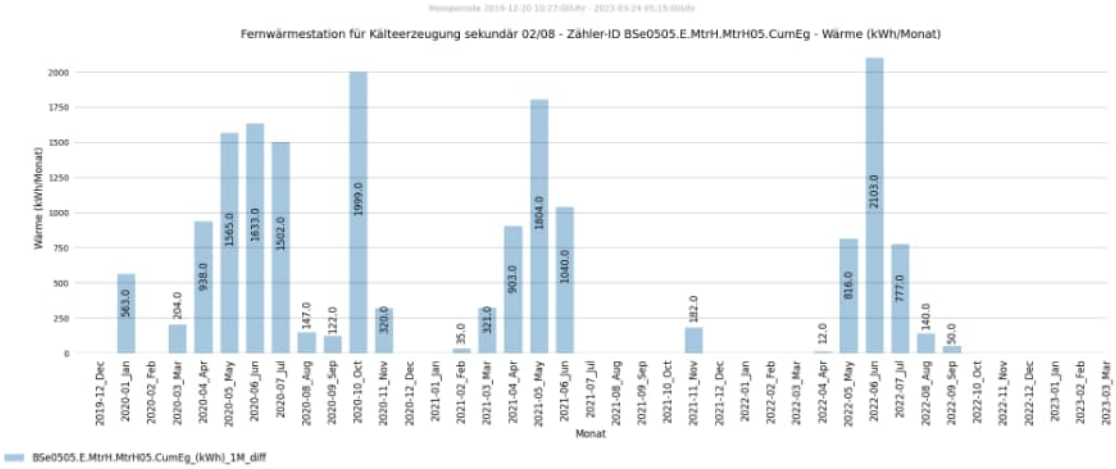


Abbildung 4.15.: Fernwärmestation für Kälteerzeugung sekundär - Wärme 02/08 - BSe0505.E.MtrH.MtrH05.CumEg

4.2.10. Kälteversorgung der Gewächshaus-Kabinen

In den Diagrammen der Abbildung 4.16 sind die Messwerte der Bilanzperiode monatsweise ausgewertet.

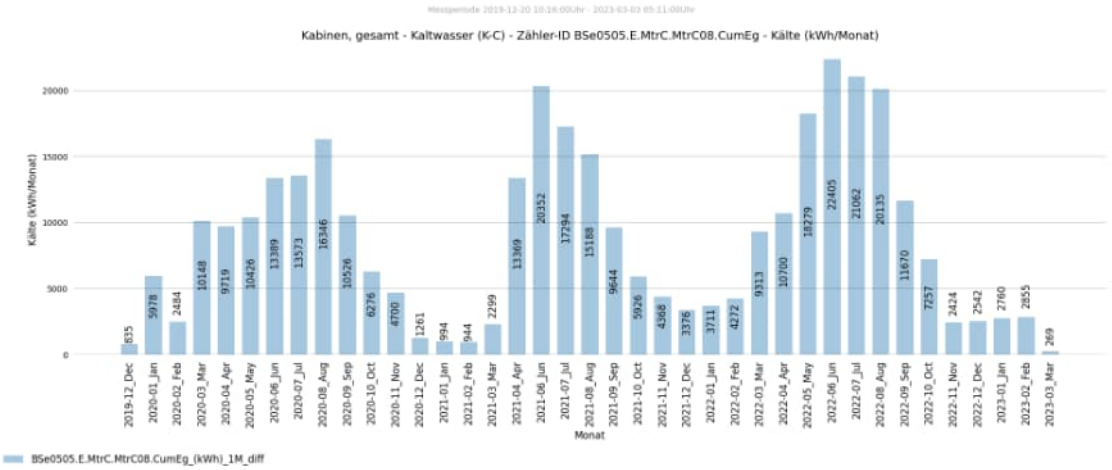


Abbildung 4.16.: Kälte - Kabinen, gesamt - Kaltwasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC08.CumEg

4.2.11. Kältenutzung im VE-Wasser-System

In den Diagrammen der Abbildung 4.17 sind die Messwerte der Bilanzperiode monatsweise ausgewertet.

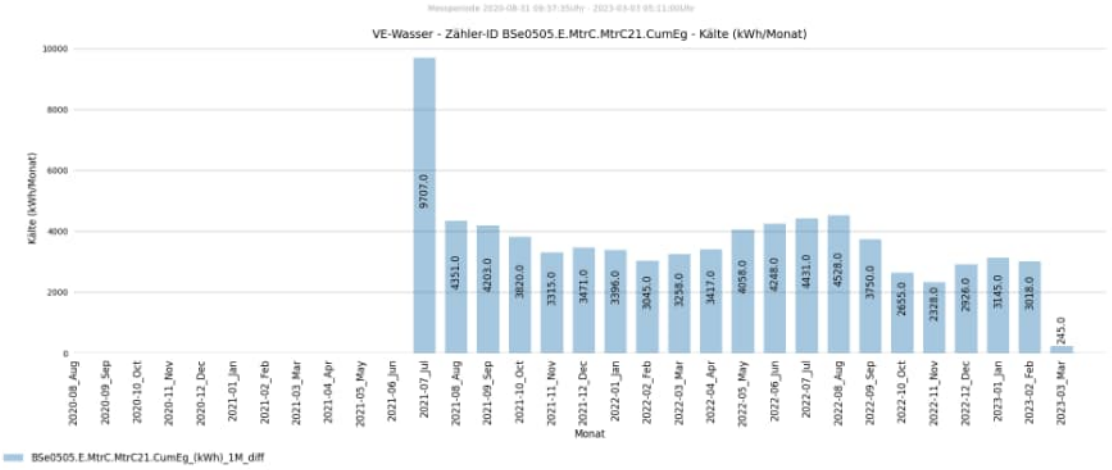


Abbildung 4.17.: Kälte - VE-Wasser - BSe0505.E.MtrC.MtrC21.CumEg

5. Wärmeerzeugung, -speicherung und -nutzung

5.1. Anlagenkonzept

Abbildung 5.1 zeigt eine schematische Darstellung des Wärmeerzeugungs-, -speicher- und -verteilsystems im Stadium der frühen Ausführungsplanung. Jeweils 50% der Vakuumröhrenkollektoren werden mit einer Nass- bzw. einer Trockenanbindung angeschlossen. Die Kollektoren jeweils einer Anschlussart sind jeweils parallel angeschlossen. Für die hydraulische Anbindung sowohl der Vakuumröhrenkollektoren mit Nass- als auch mit Trockenanbinung war zu diesem Zeitpunkt eine Tichelmann-Struktur vorgehsehen, die jedoch im weiteren Verlauf des Planungsprozesses Reihenschaltung umgewandelt wurde.

Die thermische Solaranlage besteht primärseitig aus zwei parallel geschalteten Kreisen mit Vakuumröhrenkollektoren, einem Wärmeübertrager sowie sekundärseitig aus fünf in Reihe geschalteten Pufferspeichern.

Die von den Vakuumröhrenkollektoren erzeugte Wärme wird über eine Absorptionskältemaschine für die Kühlung der Gewächshauskabinen genutzt. Als Backup-Systeme für die Versorgung der Heizungsseite der Absorptionskältemaschine sowie zur Beheizung der Kabinen und des restlichen Gebäudes dienen ferner ein Fernwärmeanschluss sowie ein Öl-Brennwertkessel.

Die Wärmeübergabe in den Gewächshauskabinen erfolgt über Ventilatorkonvektoren, die über eine Vierleitersystem angeschlossen sind.

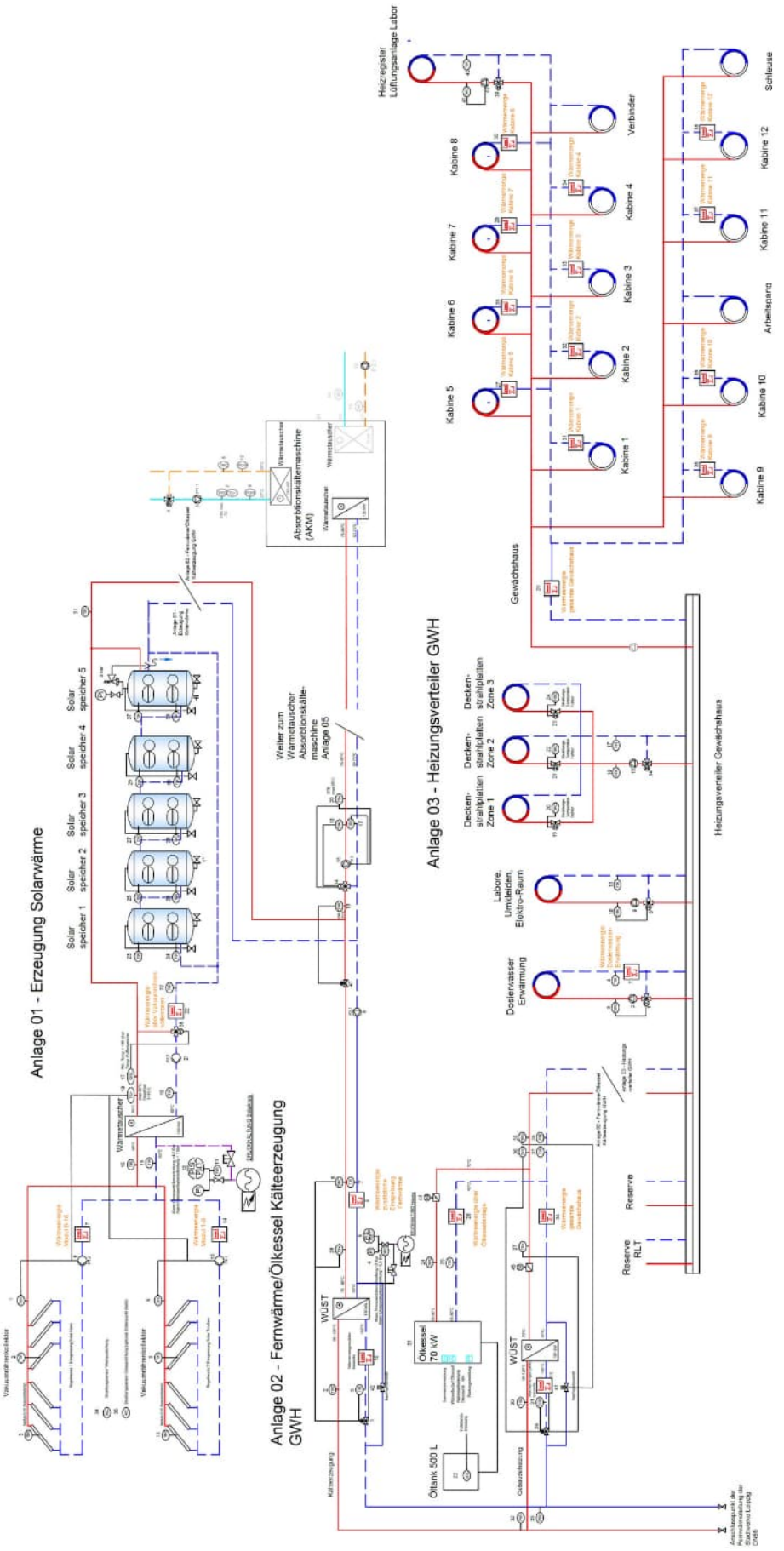


Abbildung 5.1.: Schematische Darstellung des Wärmeerzeugungs-, -speicher- und -verteilsystems

5.2. Energetische Auswertungen - monatlich

5.2.1. Vorbemerkungen

In den Säulendiagrammen werden jeweils monatsweise Auswertungen beginnend mit der erstmaligen Verfügbarkeit valider Messergebnisse am jeweiligen Datenpunkt durchgeführt. Die Werte für die am weitesten rechts befindliche Säule in den Diagrammen bildet aufgrund des gewählten Stichtages der Reporterstellung möglicherweise nicht die Verbrauchs- bzw. Ertrags-/Erzeugungssituation des gesamten Monats, sondern ggf. nur einige Tage des angegebenen Monats ab.

5.2.2. Fernwärmestation für Gewächshausheizung sekundär

In Abbildung 4.2 ist der monatlich kumulierte Wärmebeitrag der Fernwärmestation zur Beheizung des Gewächshauses für die Bilanzperiode dargestellt.

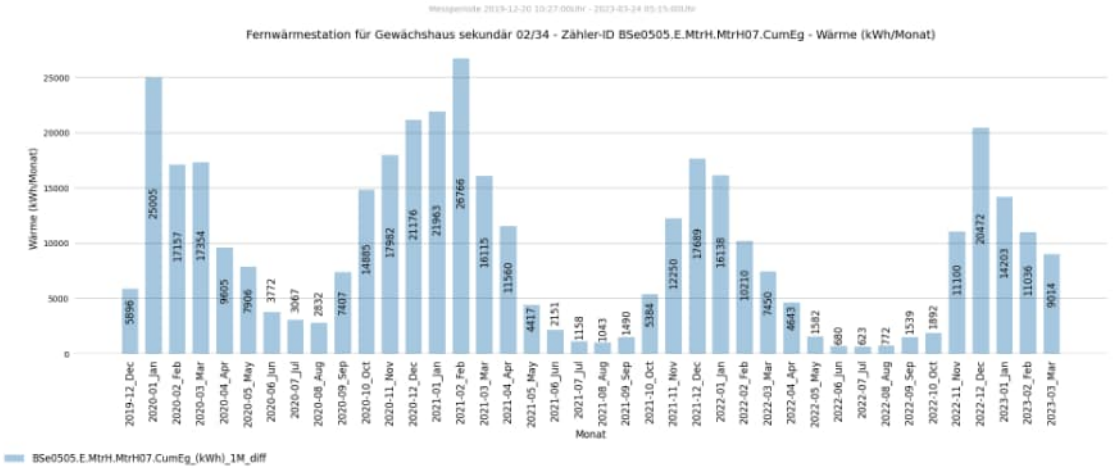


Abbildung 5.2.: Fernwärmestation für Gewächshaus sekundär - Wärme 02/34 - BSe0505.E.MtrH.MtrH07.CumEg

5.2.3. Ölkesselanlage

In Abbildung 5.3 ist der monatlich kumulierte Wärmebeitrag der Ölkesselanlage zur Beheizung des Gewächshauses für die Bilanzperiode dargestellt.

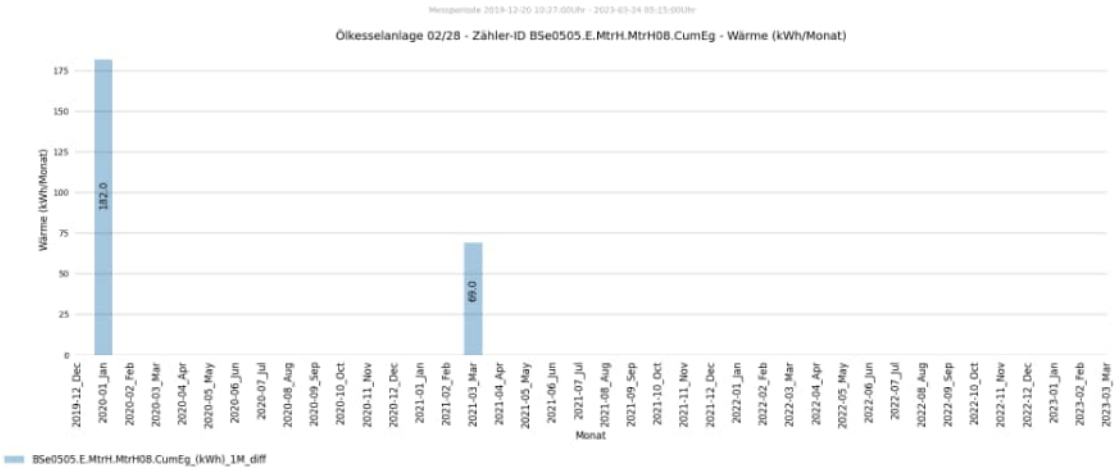


Abbildung 5.3.: Ölkesselanlage - Wärme - BSe0505.E.MtrH.MtrH07.CumEg

5.2.4. Dosierwassererwärmung

In Abbildung 5.4 ist die monatlich kumulierte Wärme zur Dosierwassererwärmung während der Bilanzperiode dargestellt.

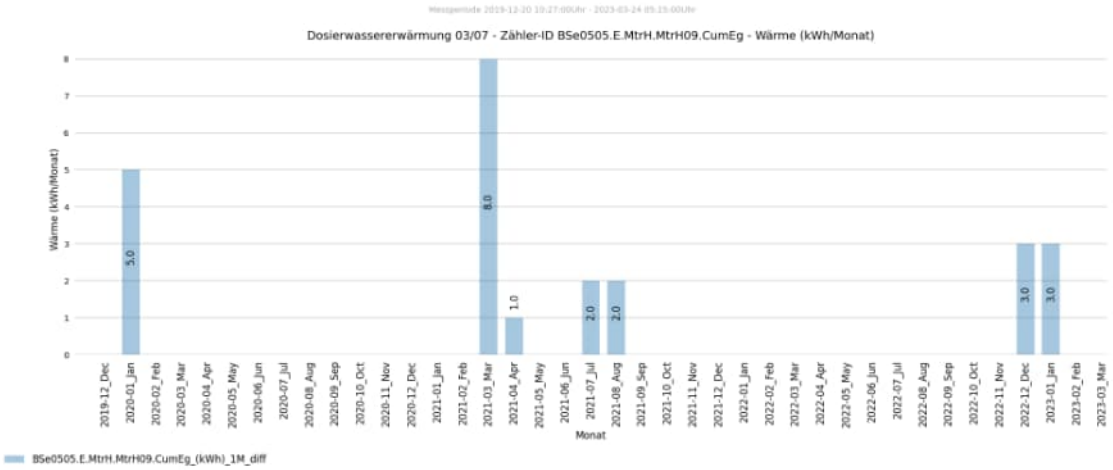


Abbildung 5.4.: Dosierwassererwärmung - Wärme 03/07 - BSe0505.E.MtrH.MtrH09.CumEg

6. Elektroenergieversorgung und -nutzung

6.1. Anlagenkonzept

Abbildung 6.2 zeigt eine schematische Darstellung des Elektroverteilsystems inkl. Netzersatzanlage bzw. Notstromversorgung sowie maßgeblicher Verbraucher und Unterverteilungen. Einige Elektroenergieabnehmer wie z.B. Elektro-Durchlaufwasserheizer an Wurzelwaschtischen am Abnehmerbereich NSHV/Gewächshaus sind jedoch nicht dargestellt. Deren Elektroenergieverbrauch wird nicht gesondert gemessen. Ferner sind an den Unterverteilungen Ërdgeschoss", "Kellergeschossßowie "Kleinverbraucher"nur ausgewählte Abnehmer in dieser Darstellung benannt. Weitere nicht benannte Abnehmer sind jedoch vorhanden.

6.2. Energetische Auswertungen - monatlich

Nachfolgend werden jeweils monatsweise Auswertungen beginnend mit der erstmaligen Verfügbarkeit valider Messergebnisse am jeweiligen Datenpunkt dargestellt. Die Werte für die am weitesten rechts befindliche Säule in den Diagrammen bildet aufgrund des gewählten Stichtages der Reporterstellung möglicherweise nicht die Verbrauchs- bzw. Ertrags-/ Erzeugungssituation des gesamten Monats sondern ggf. nur einige Tage des angegebenen Monats ab.

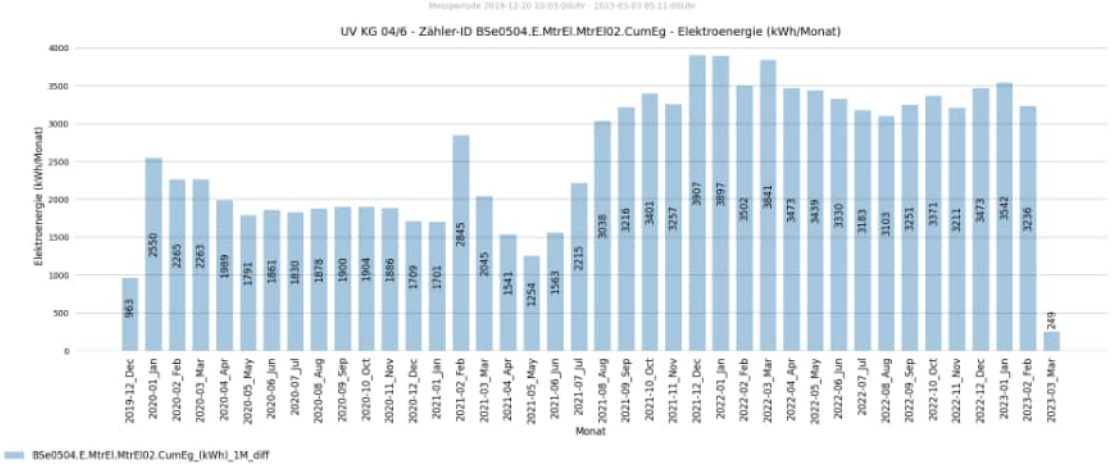


Abbildung 6.1.: Elektroenergie - UV KG 04/6 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl02.CumEg

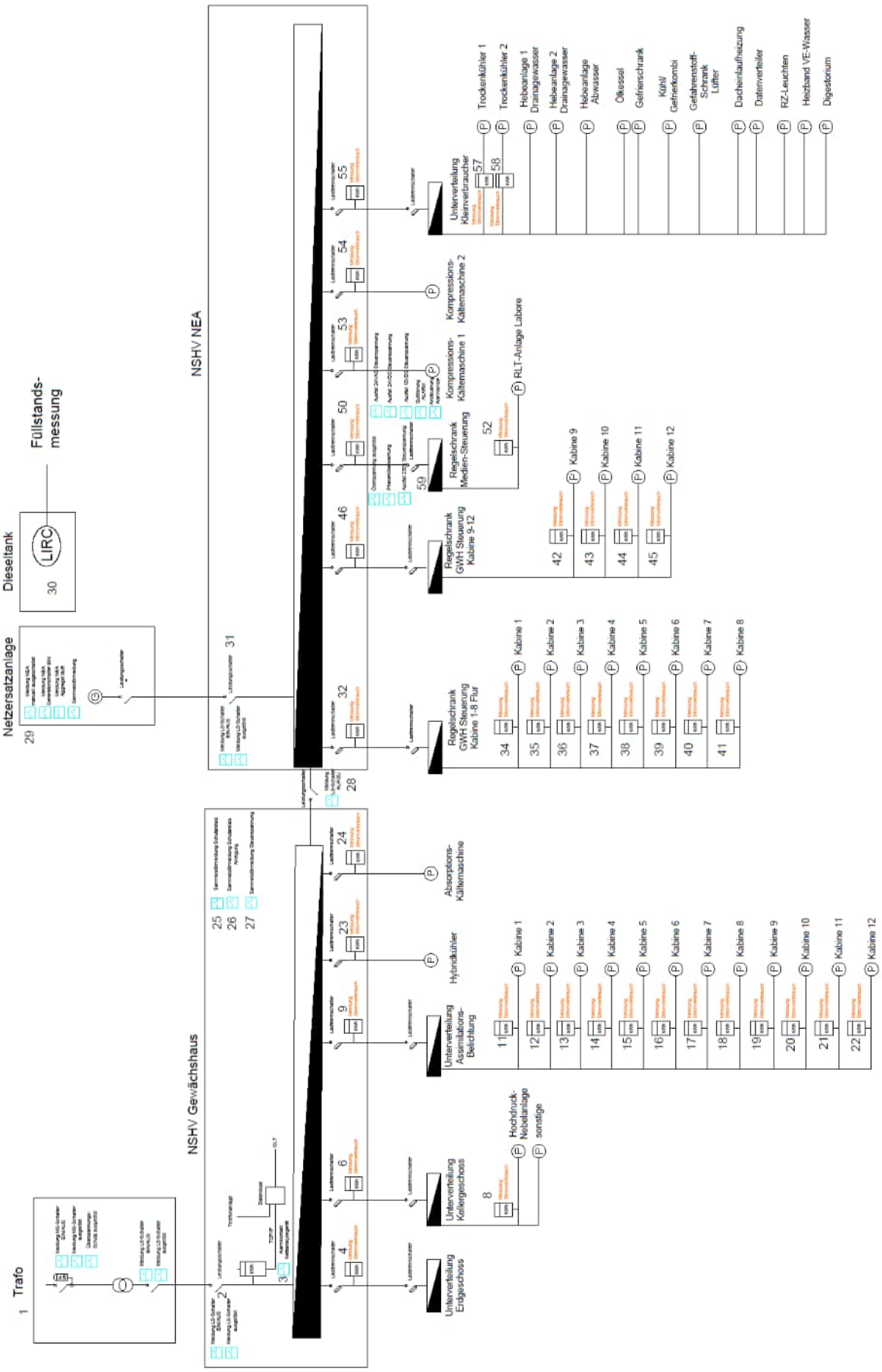


Abbildung 6.2.: Schematische Darstellung des Elektroverteilsystems inkl. Netzersatzanlage bzw. Notstromversorgung

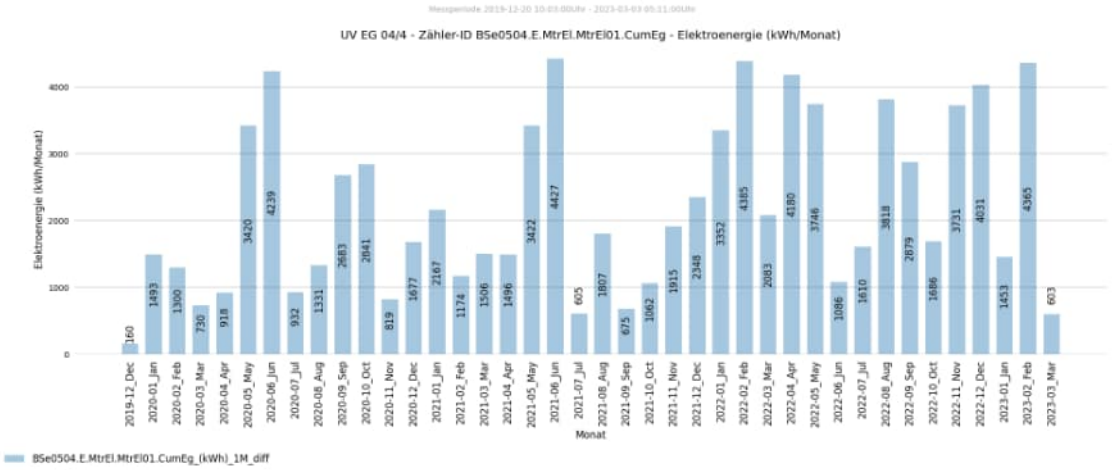


Abbildung 6.3.: Elektroenergie - UV EG 04/4 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl01.CumEg

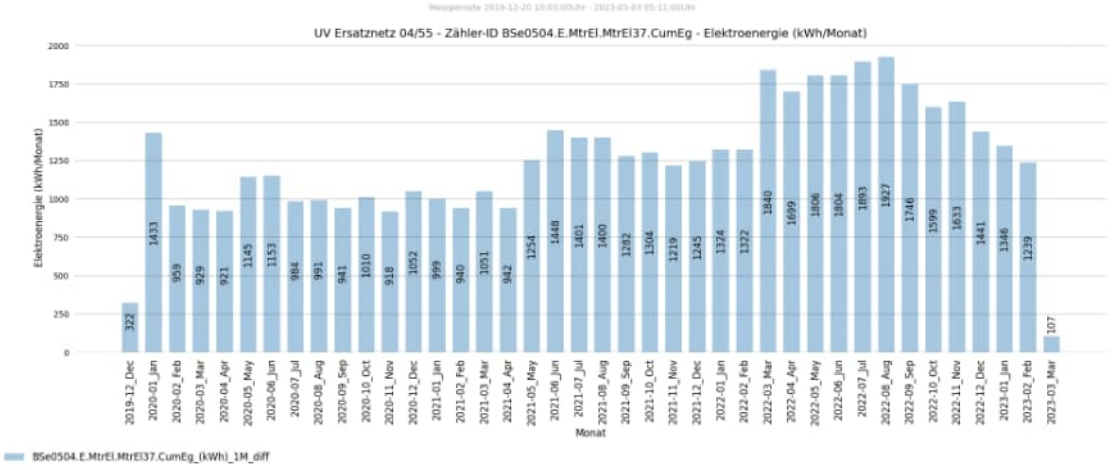


Abbildung 6.4.: Elektroenergie - UV Ersatznetz 04/55 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl37.CumEg

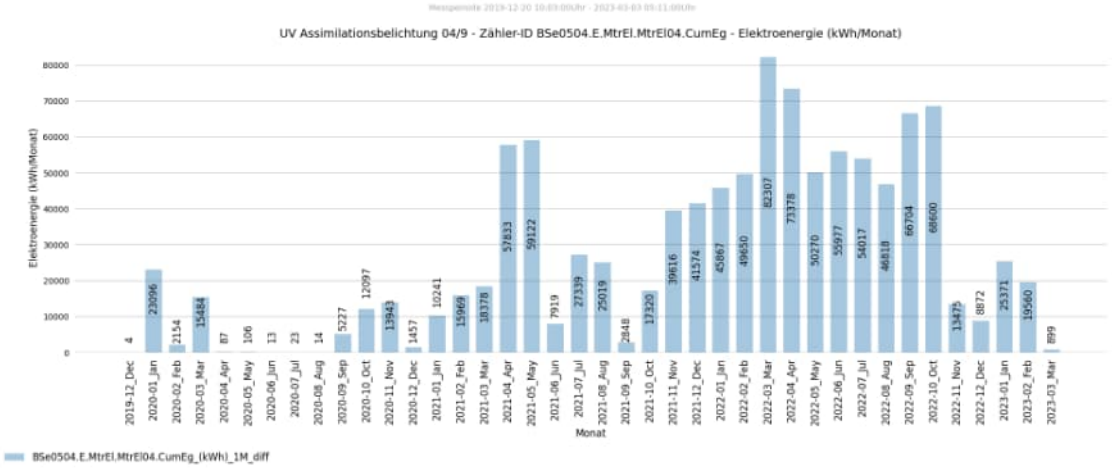


Abbildung 6.5.: Elektroenergie - UV Assimilationsbelichtung 04/9 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl04.CumEg, Hinweis: Prüfung des Wandlerfaktors erforderlich

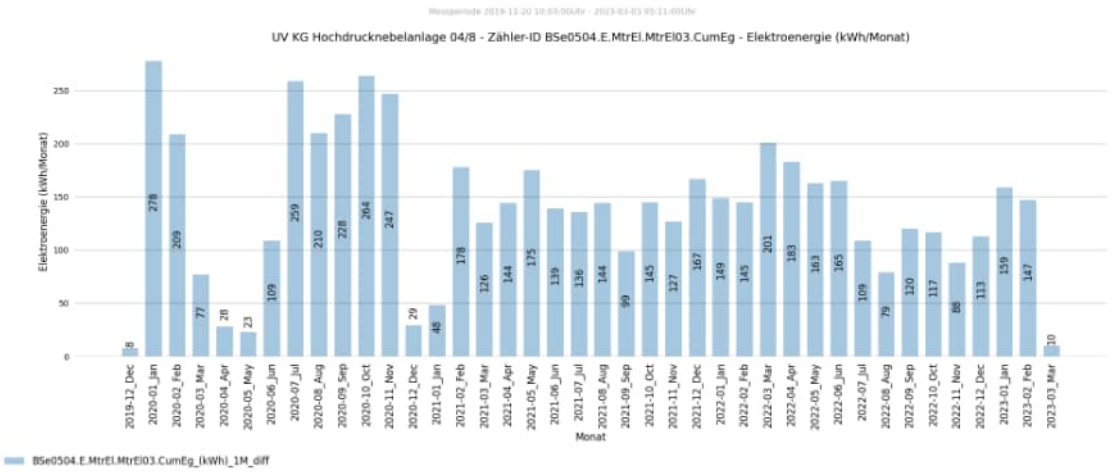


Abbildung 6.6.: Elektroenergie - UV KG Hochdrucknebelanlage 04/8 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl03.CumEg

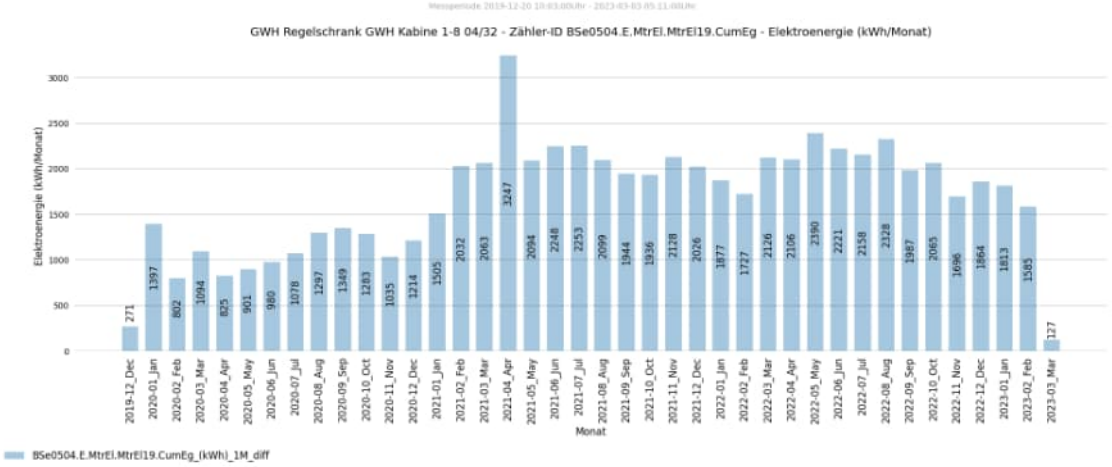


Abbildung 6.7.: Elektroenergie - GWH Regelschrank GWH Kabine 1-8 04/32 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl19.CumEg

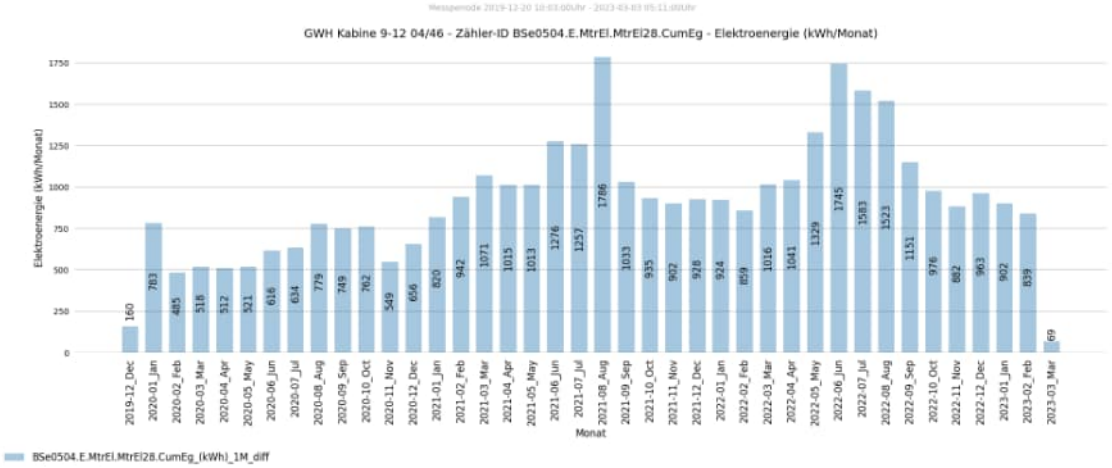


Abbildung 6.8.: Elektroenergie - GWH Kabine 9-12 04/46 - BSe0504.E.MtrEl.MtrEl28.CumEg

7. Gewächshaus-Kabinen

7.1. Vorbemerkungen

Pro Kabine werden folgende Betriebsgrößen ausgewertet:

- Raumtemperatur Sollwert Heizung
- Raumtemperatur Sollwert Lüftung/Kühlung
- Raumtemperatur
- Differenz zwischen der Raumtemperatur und der Sollraumtemperatur im Heizfall
- Differenz zwischen der Raumtemperatur und der Sollraumtemperatur im Lüftungs-/Kühlfall

Text und Grafiken folgen.

Randbedingungen für die Auswertung:

Filterung Datums-/Zeitbereich	
Startzeitpunkt	2022-01-01 00:00:00 Uhr
Endzeitpunkt	2022-11-23 04:37:00 Uhr
Tageszeit Start	00:00:00 Uhr
Tageszeit Ende	23:59:59 Uhr
Ferien/Feiertage	inkl./inkl.
Wochentage	0123456 0-Mo 6-So x-exkl.
Methodik	
Maskierung mit	-
Resample-Periode	1min
Resample-Methode	mean
Fillna-Methode	ffill
Fillna-Limit	0

Tabelle 7.1.: Statistische Auswertung - Allgemeine Randbedingungen

7.2. Kabine 1

Abbildung 7.1 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 1.

Abbildung 7.1.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 1

Abbildung 7.3 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 1 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.4 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.5 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.2 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469718 Minuten
Mittelwert	°C	20.04
Median	°C	19.71
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 31.0 / 31.0
Standardabw.	K	3.36
Varianz	K	11.31
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	14.82 / 26.3 / 11.48
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	17.55 / 21.91 / 4.36

Tabelle 7.2.: Kabine 1 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0506.U.F017.HGrp.TR

Abbildung 7.2 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 17 und 22°C lag, wobei während eines Betriebszeitraumes von ca. einer Stunde ein Minimalwert zwischen 12 und 13°C registriert wurde. In der Bilanzperiode wurden über 190 Minuten hinweg Maximalwerte zwischen 30 und 31°C gemessen, siehe Abbildung 7.2.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.6 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.7 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

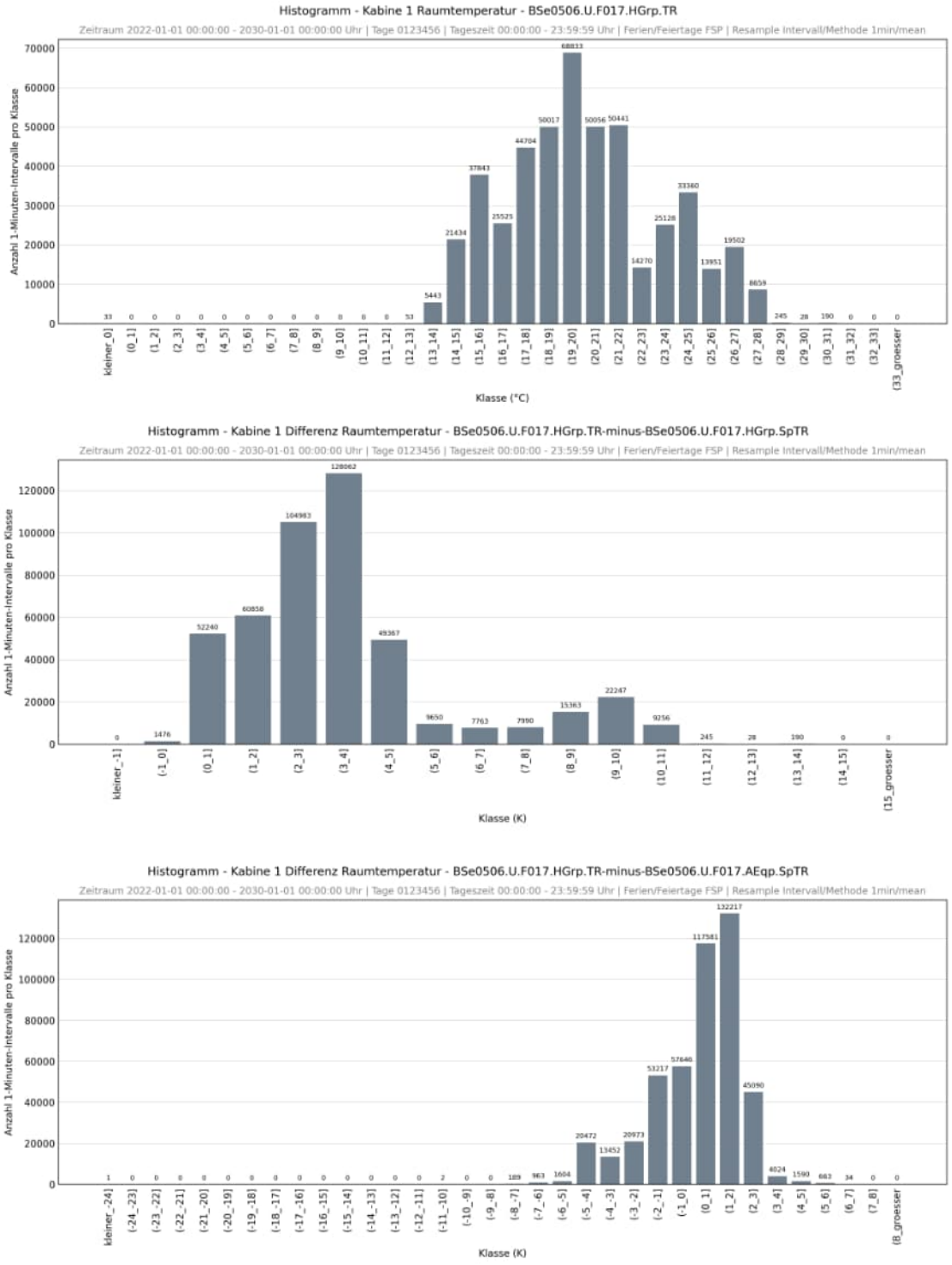


Abbildung 7.2.: Kabine 1 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

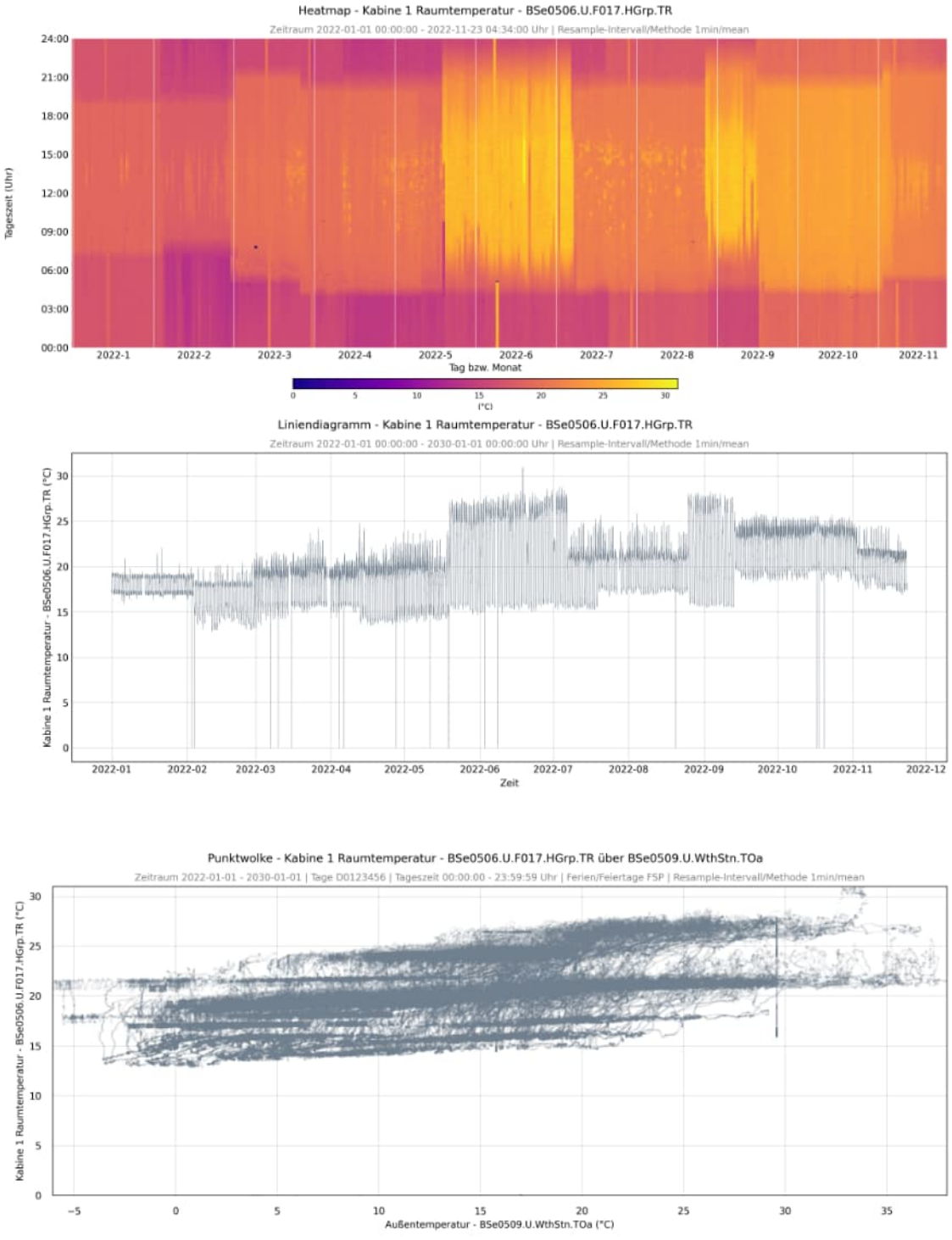


Abbildung 7.3.: Kabine 1 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

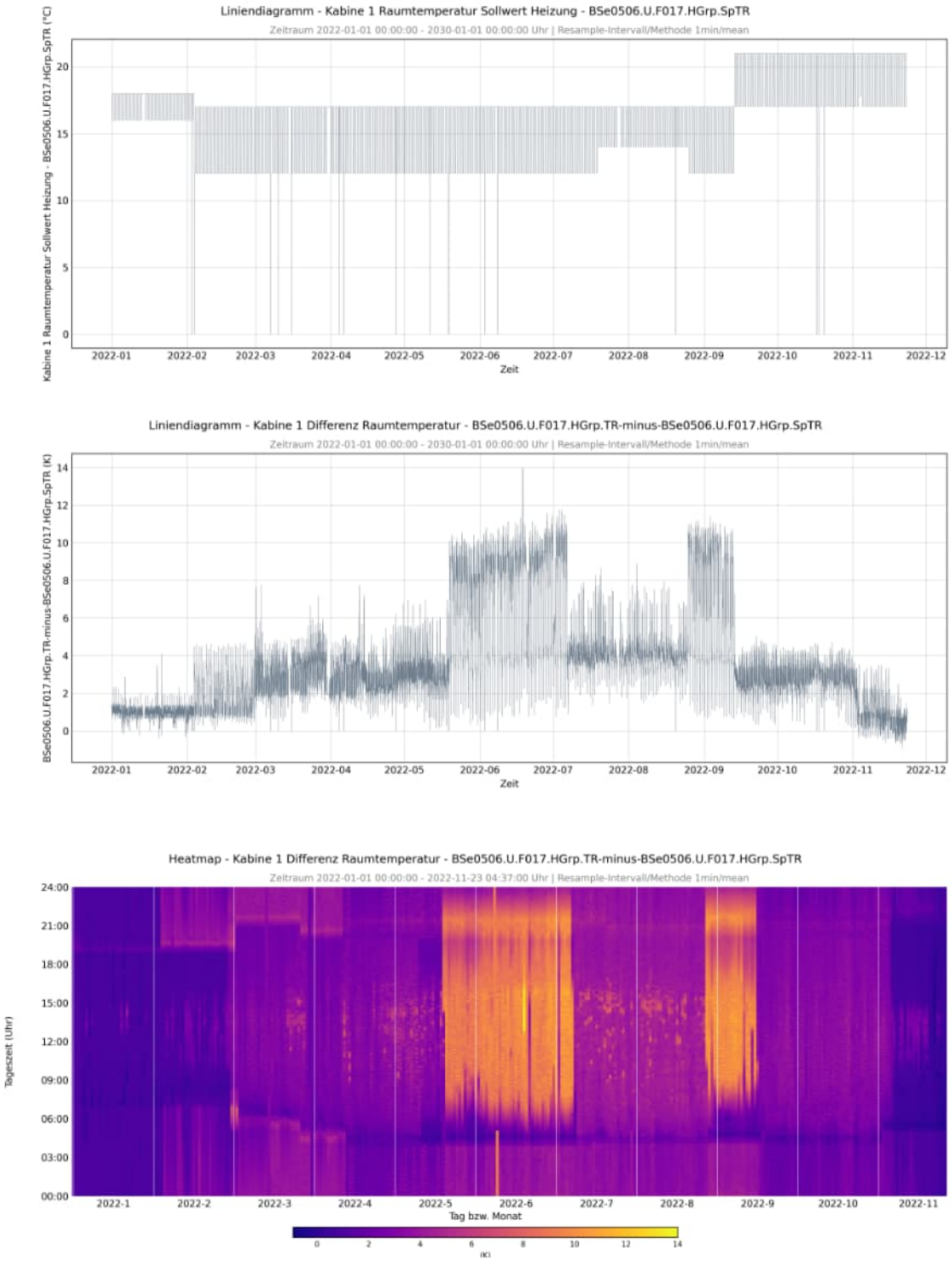


Abbildung 7.4.: Kabine 1 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

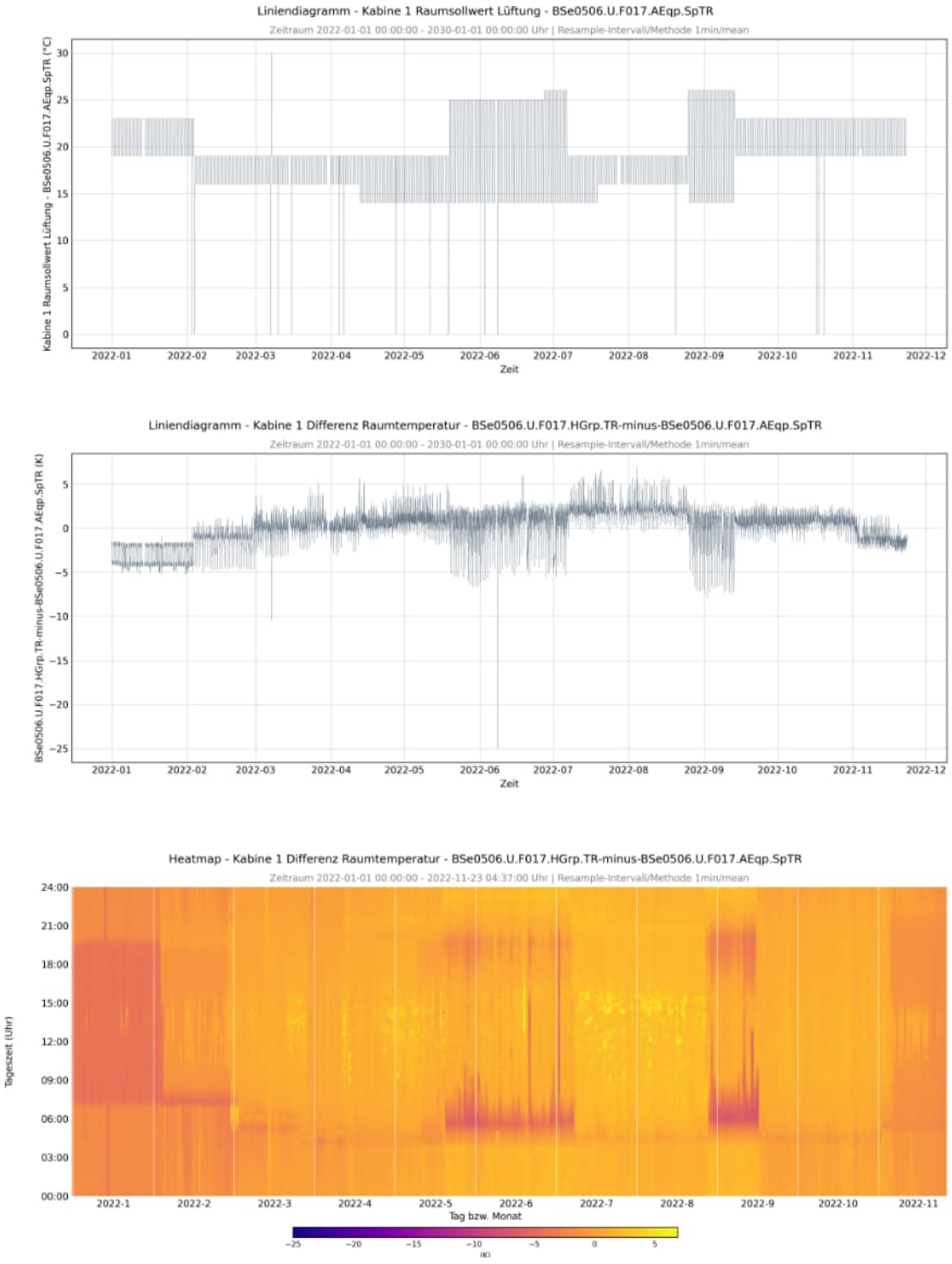


Abbildung 7.5.: Kabine 1 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

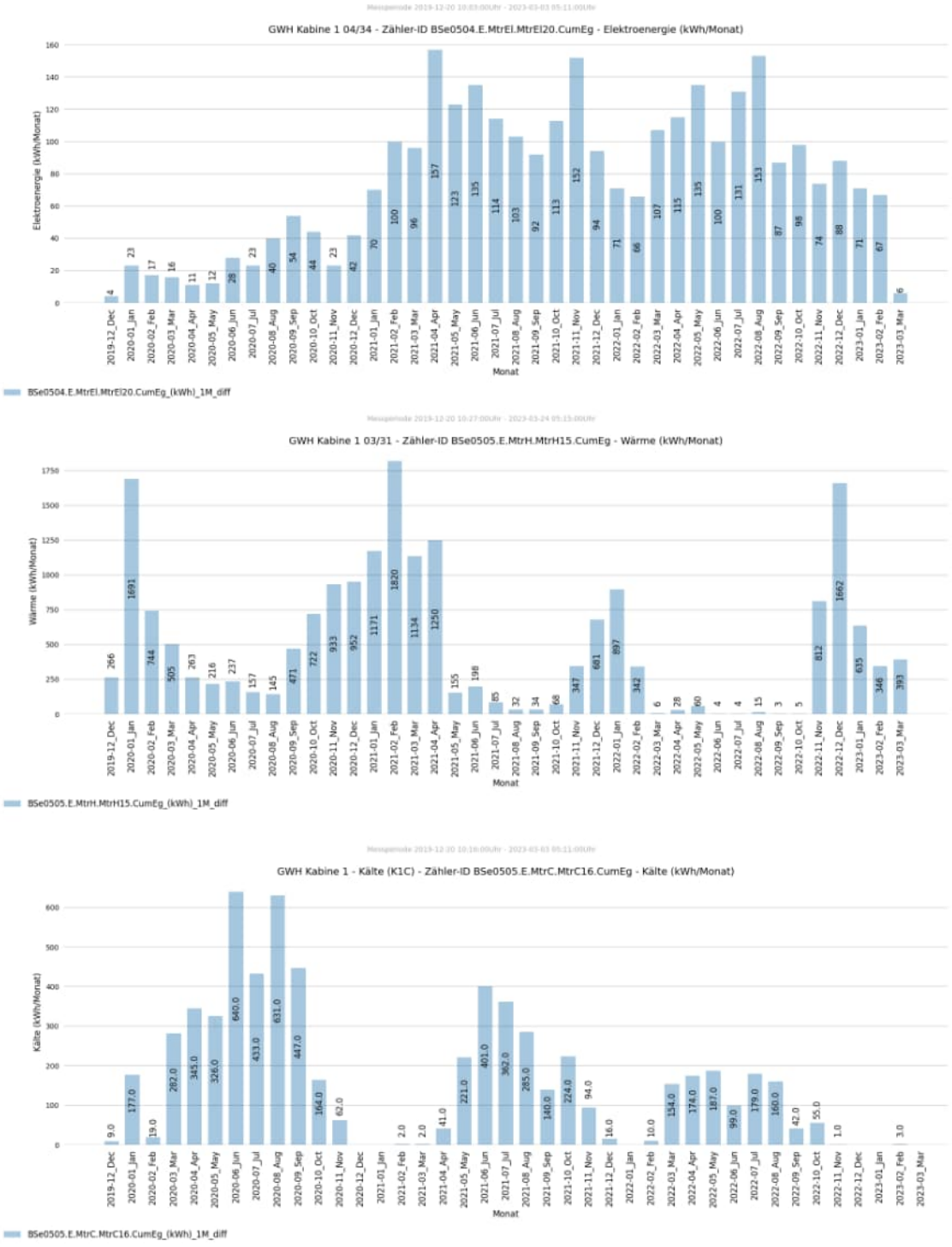


Abbildung 7.6.: Kabine 1 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

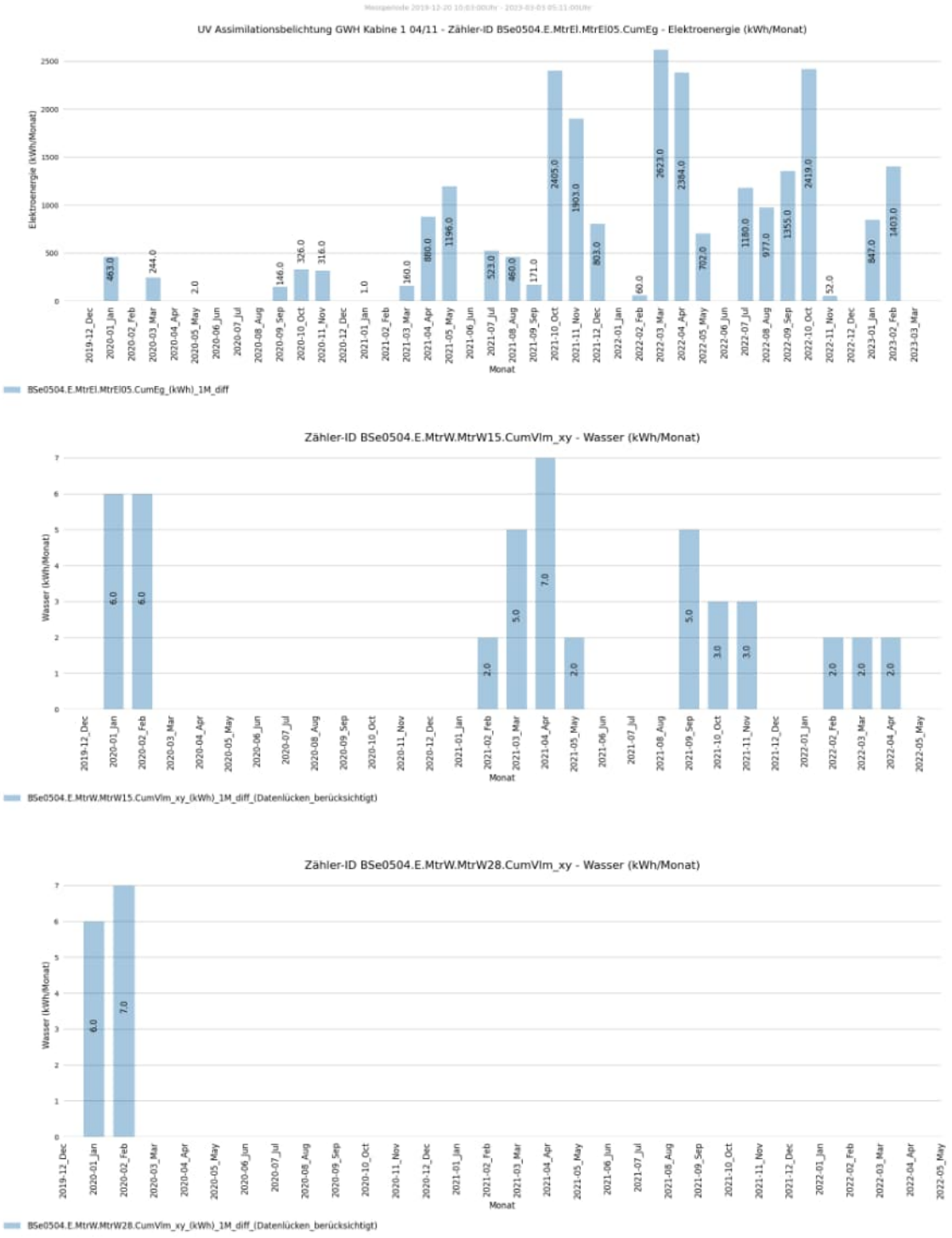


Abbildung 7.7.: Kabine 1 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.3. Kabine 2

Abbildung 7.8 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 2.

Abbildung 7.8.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 2

Abbildung 7.10 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 2 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.11 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.12 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.3 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469718 Minuten
Mittelwert	°C	20.38
Median	°C	19.68
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 31.04 / 31.04
Standardabw.	K	4.03
Varianz	K	16.23
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	14.13 / 27.29 / 13.16
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	17.32 / 23.91 / 6.59

Tabelle 7.3.: Kabine 2 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0506.U.F018.HGrp.TR

Abbildung 7.9 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode vor allem im Bereich zwischen 17 und 24°C lag. Ferner wurden während eines Zeitraumes von ca. zwölf Stunden Werte zwischen 12 und 13°C registriert. In der Bilanzperiode wurden über 146 Minuten hinweg Werte von über 30°C bei einem Maximalwert von 31,0°C gemessen, siehe Abbildung 7.9.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.13 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.14 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

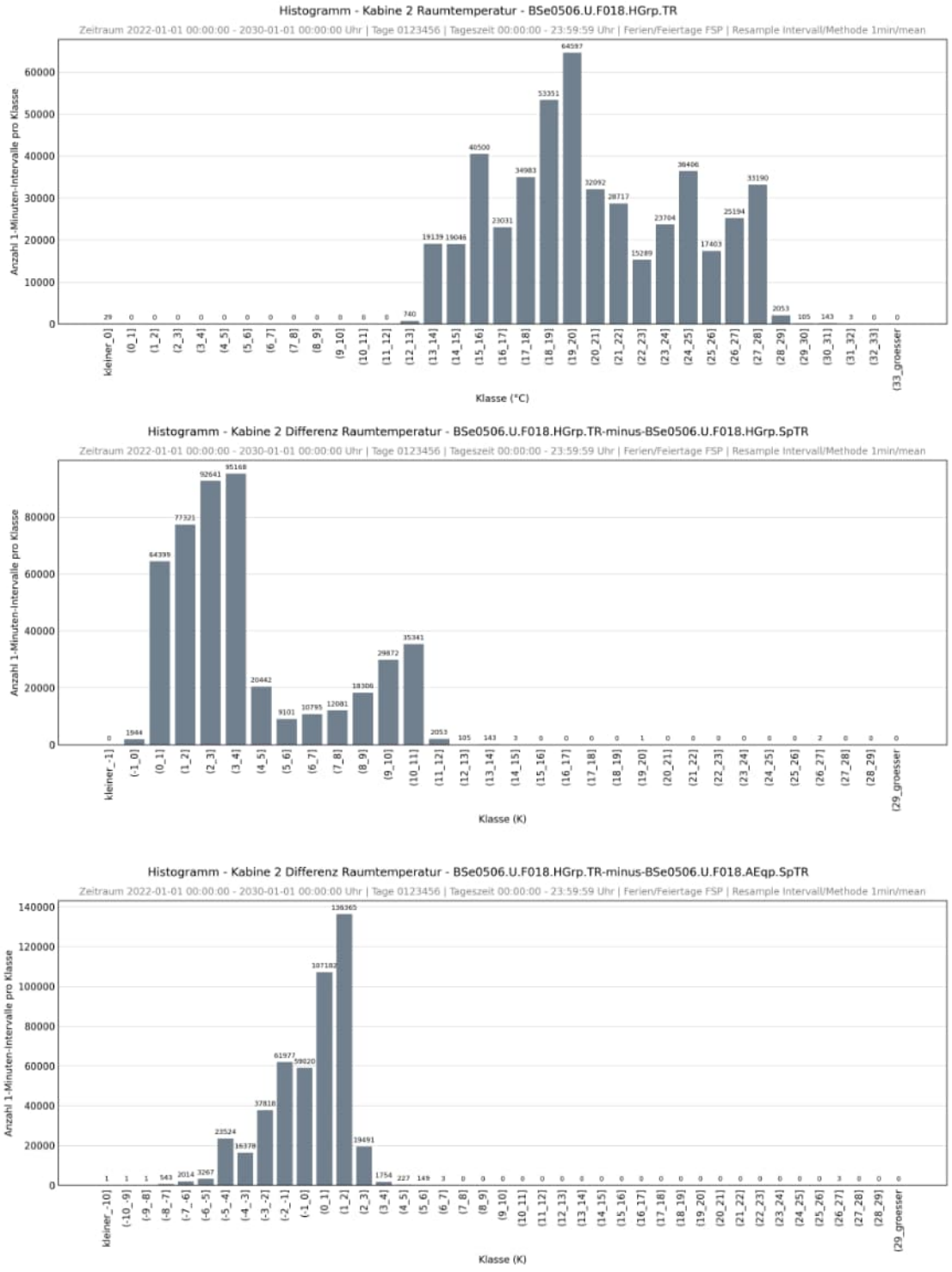


Abbildung 7.9.: Kabine 2 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

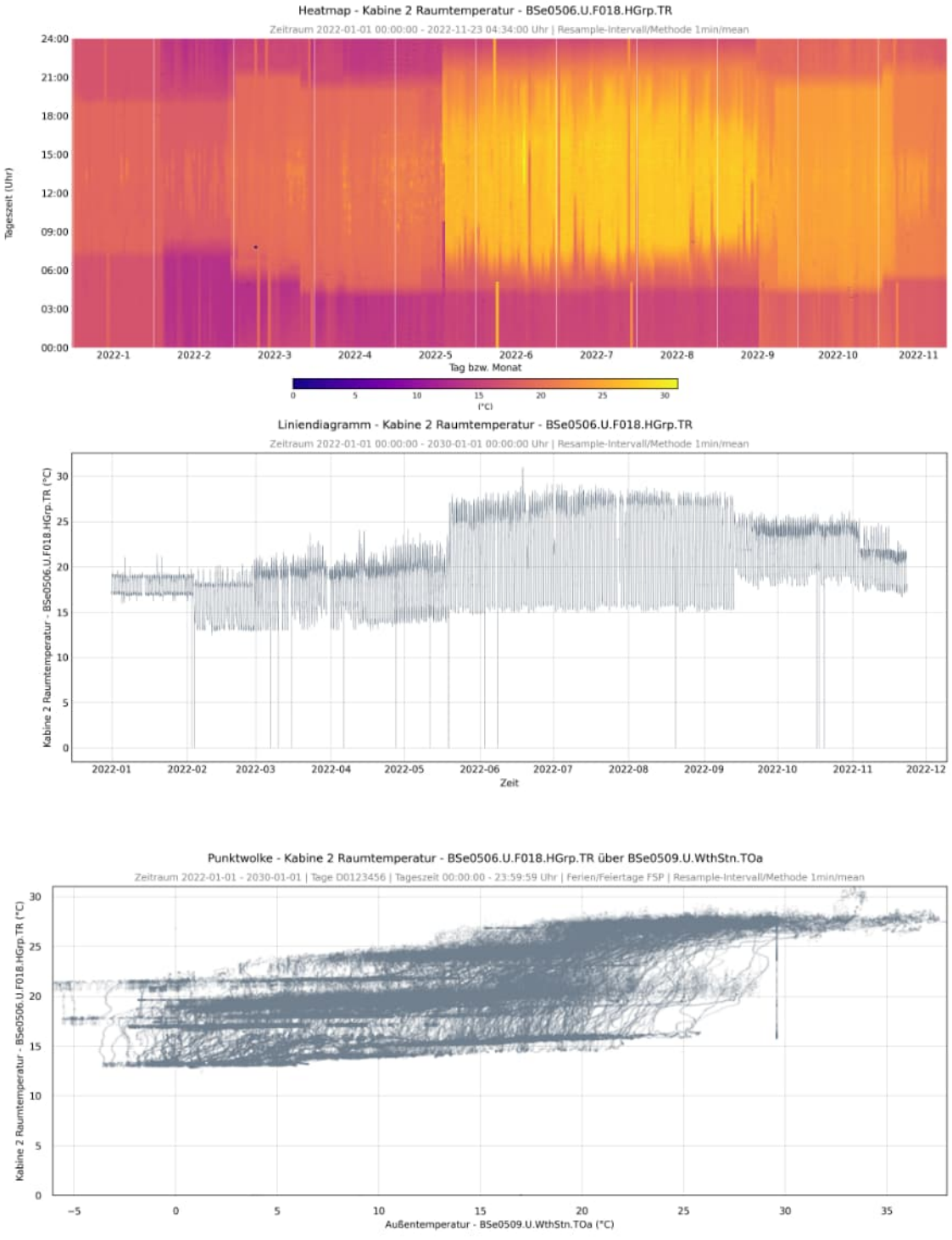


Abbildung 7.10.: Kabine 2 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

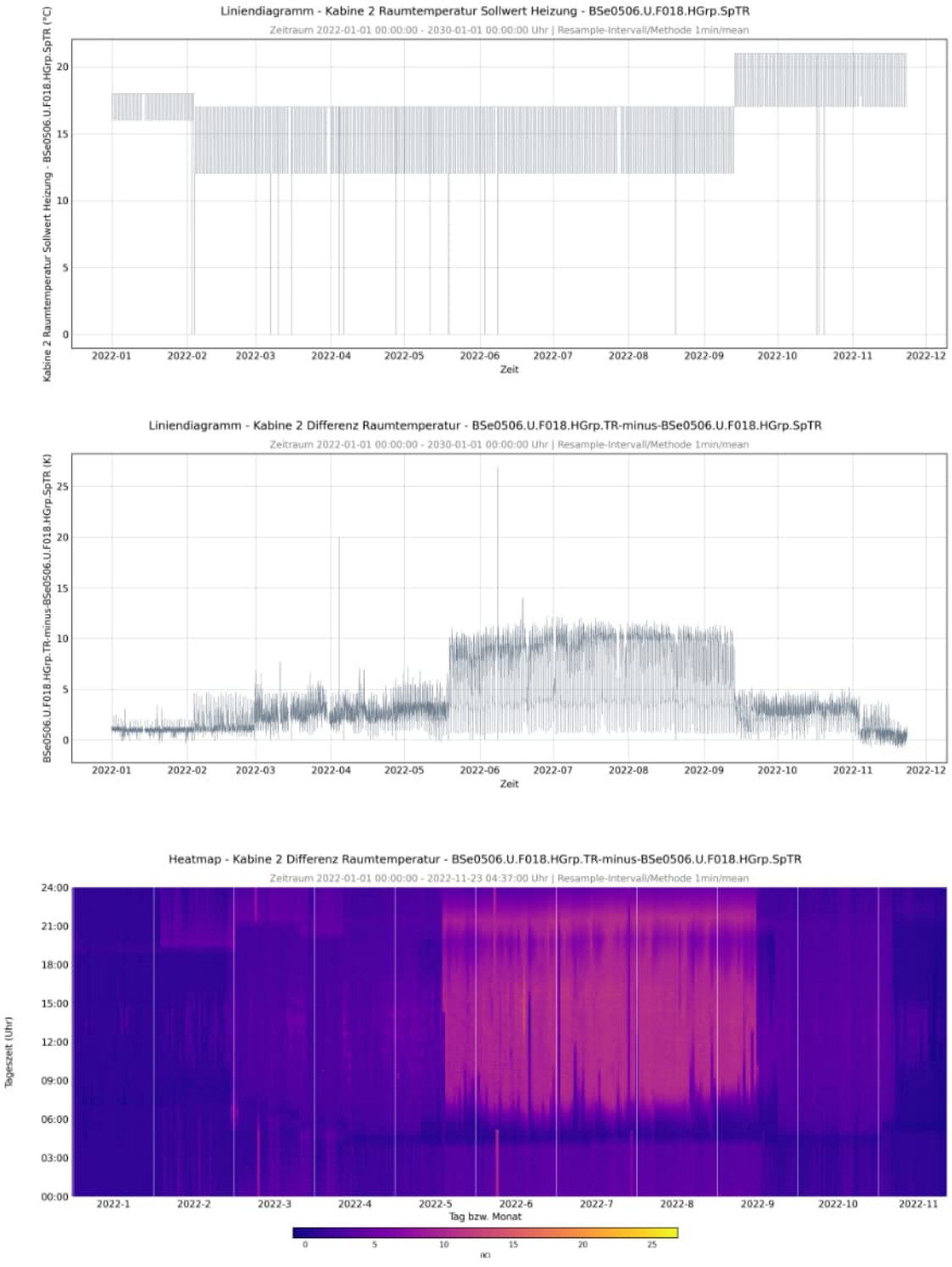


Abbildung 7.11.: Kabine 2 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

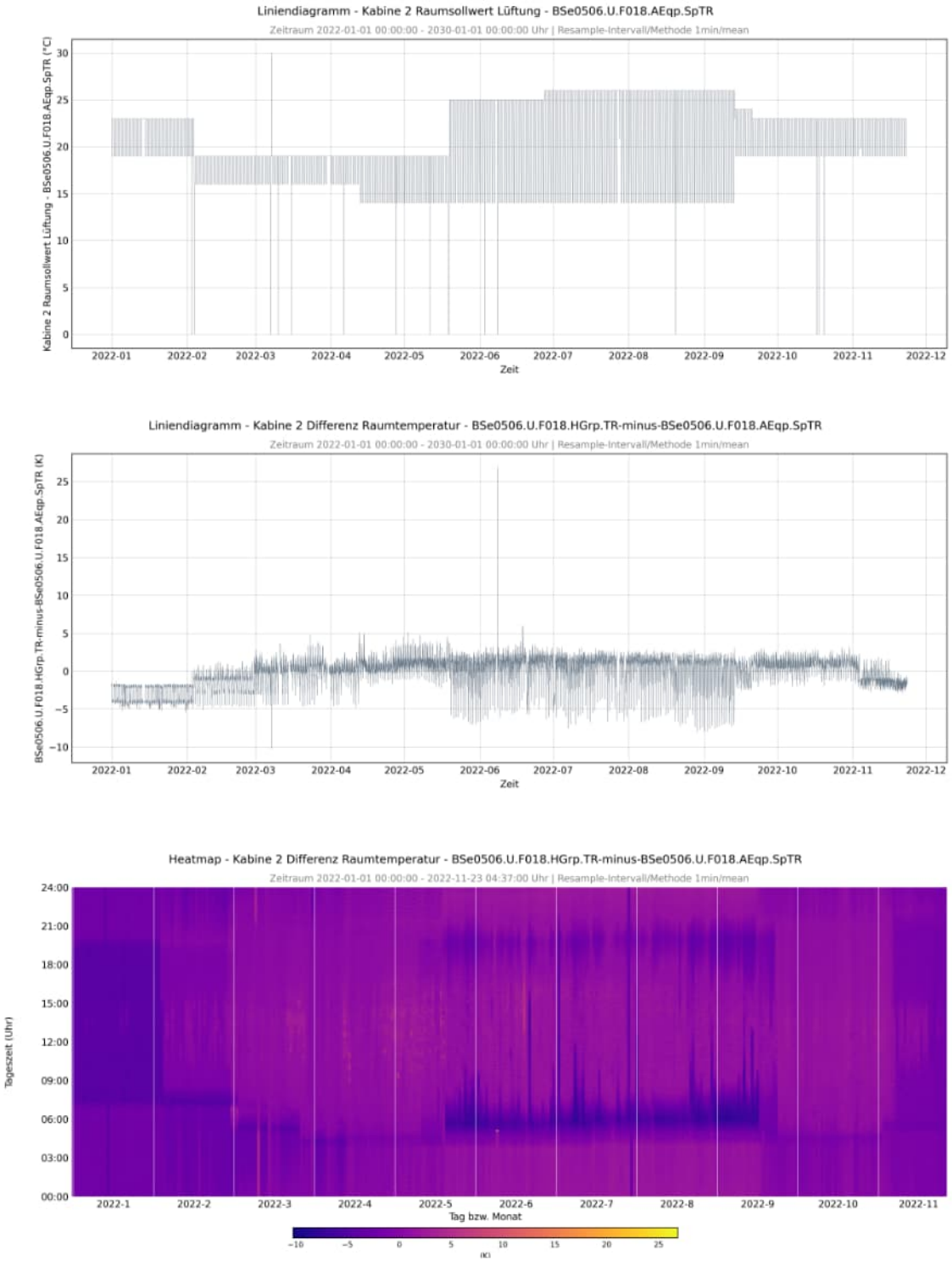


Abbildung 7.12.: Kabine 2 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

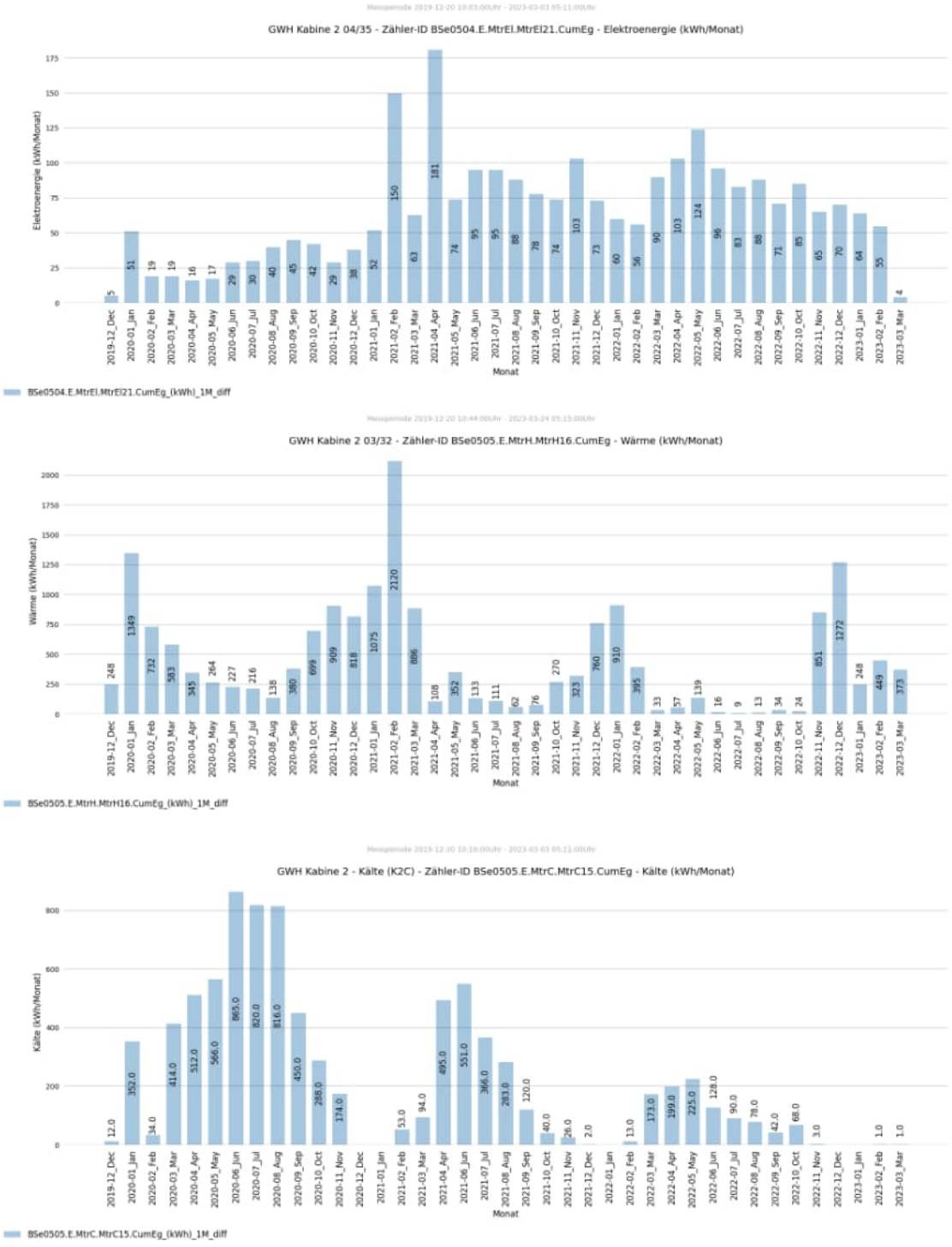


Abbildung 7.13.: Kabine 2 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

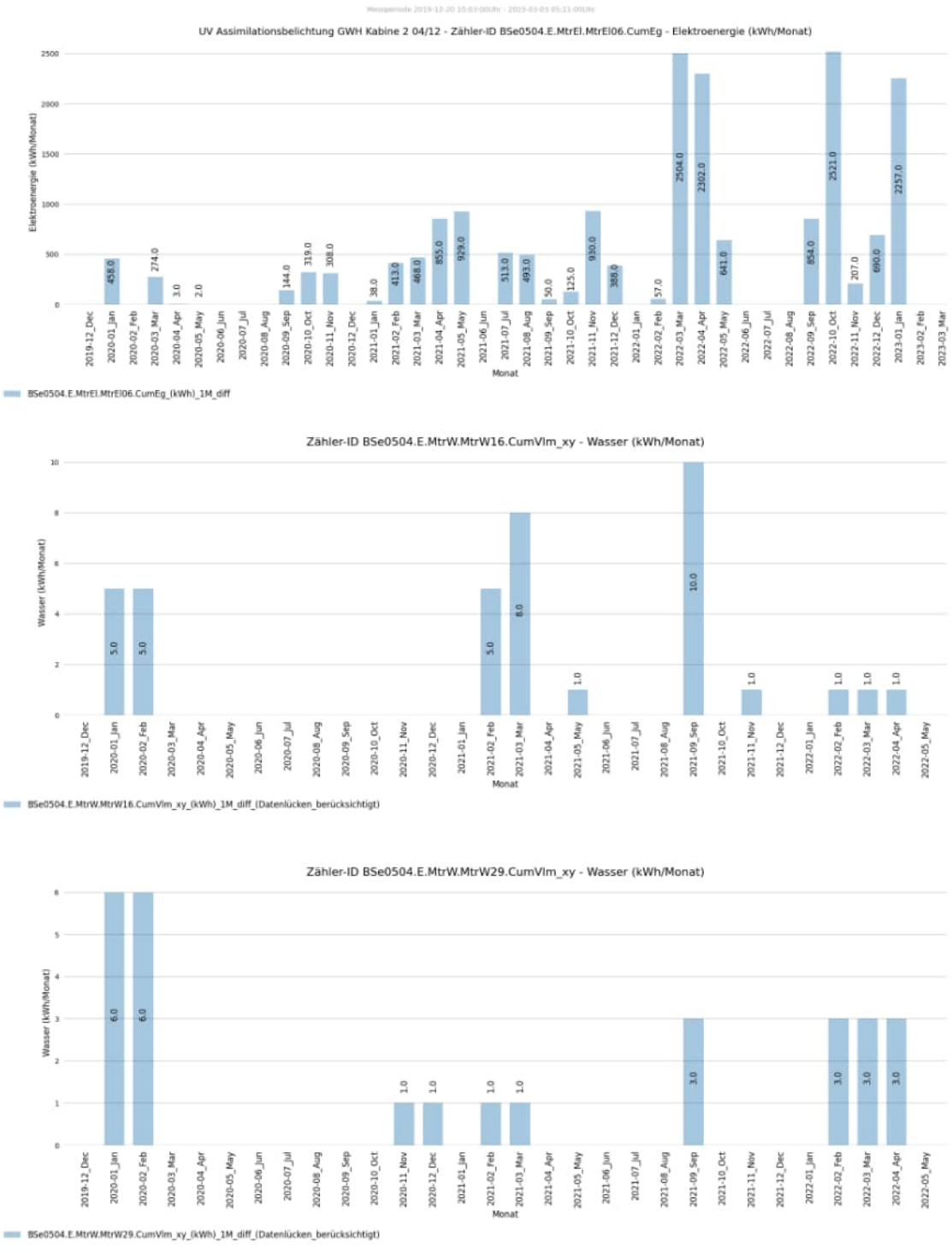


Abbildung 7.14.: Kabine 2 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.4. Kabine 3

Abbildung 7.15 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 3.

Abbildung 7.15.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 3

Abbildung 7.17 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 3 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.18 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.19 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.4 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469718 Minuten
Mittelwert	°C	21.07
Median	°C	20.37
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 31.14 / 31.14
Standardabw.	K	4.13
Varianz	K	17.07
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	14.36 / 27.29 / 12.93
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.08 / 25.42 / 7.34

Tabelle 7.4.: Kabine 3 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0506.U.F019.HGrp.TR

Abbildung 7.16 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 17 und 25°C lag. Ferner wurden während eines Zeitraumes von ca. zwölf Stunden Werte zwischen 12 und 13°C registriert. In der Bilanzperiode wurden über 125 Minuten hinweg Werte von über 30°C bei einem Maximalwert von ca. 31°C gemessen, siehe Abbildung 7.16.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.18 und Abbildung 7.19 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.20 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.21 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

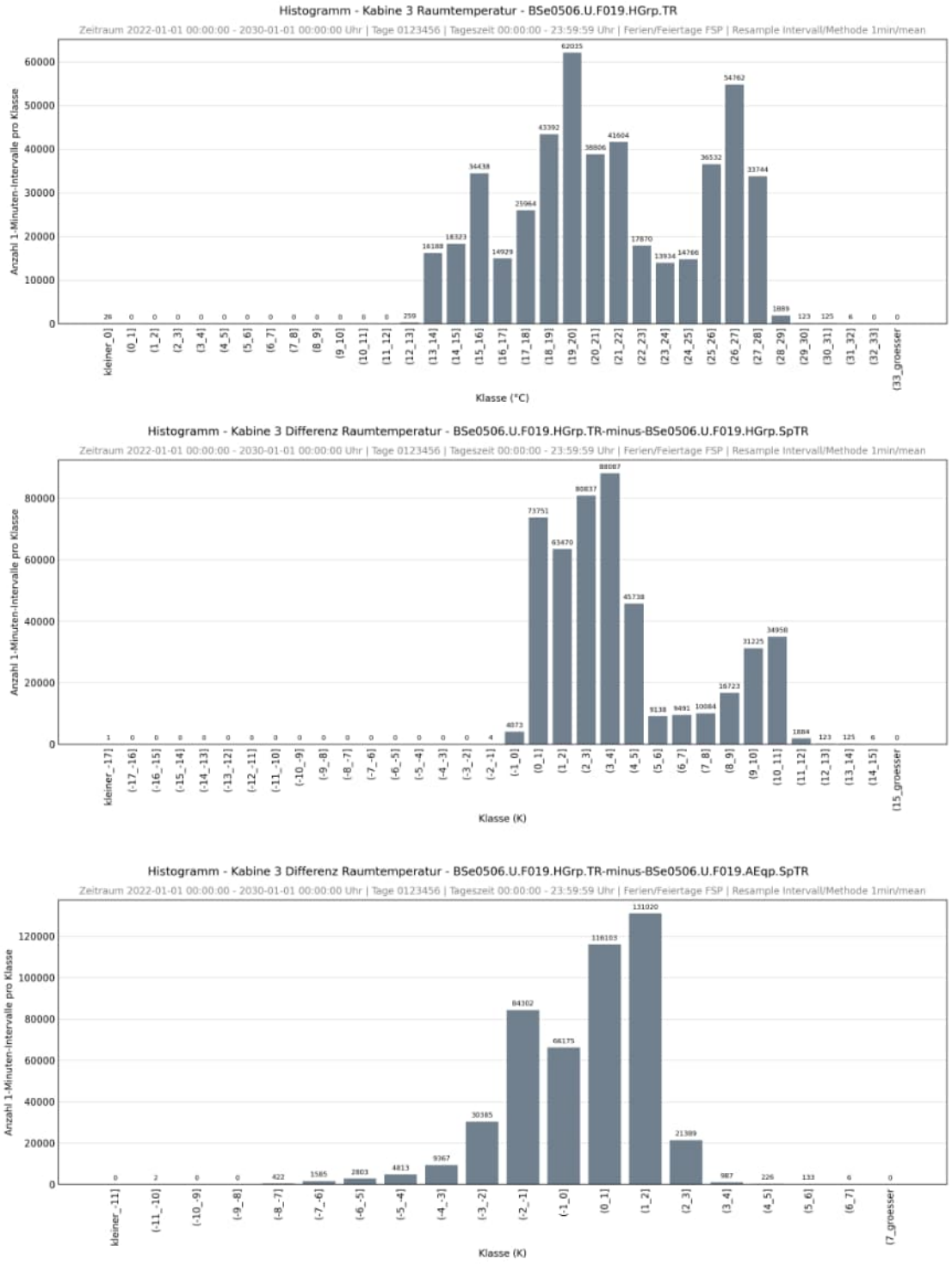


Abbildung 7.16.: Kabine 3 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

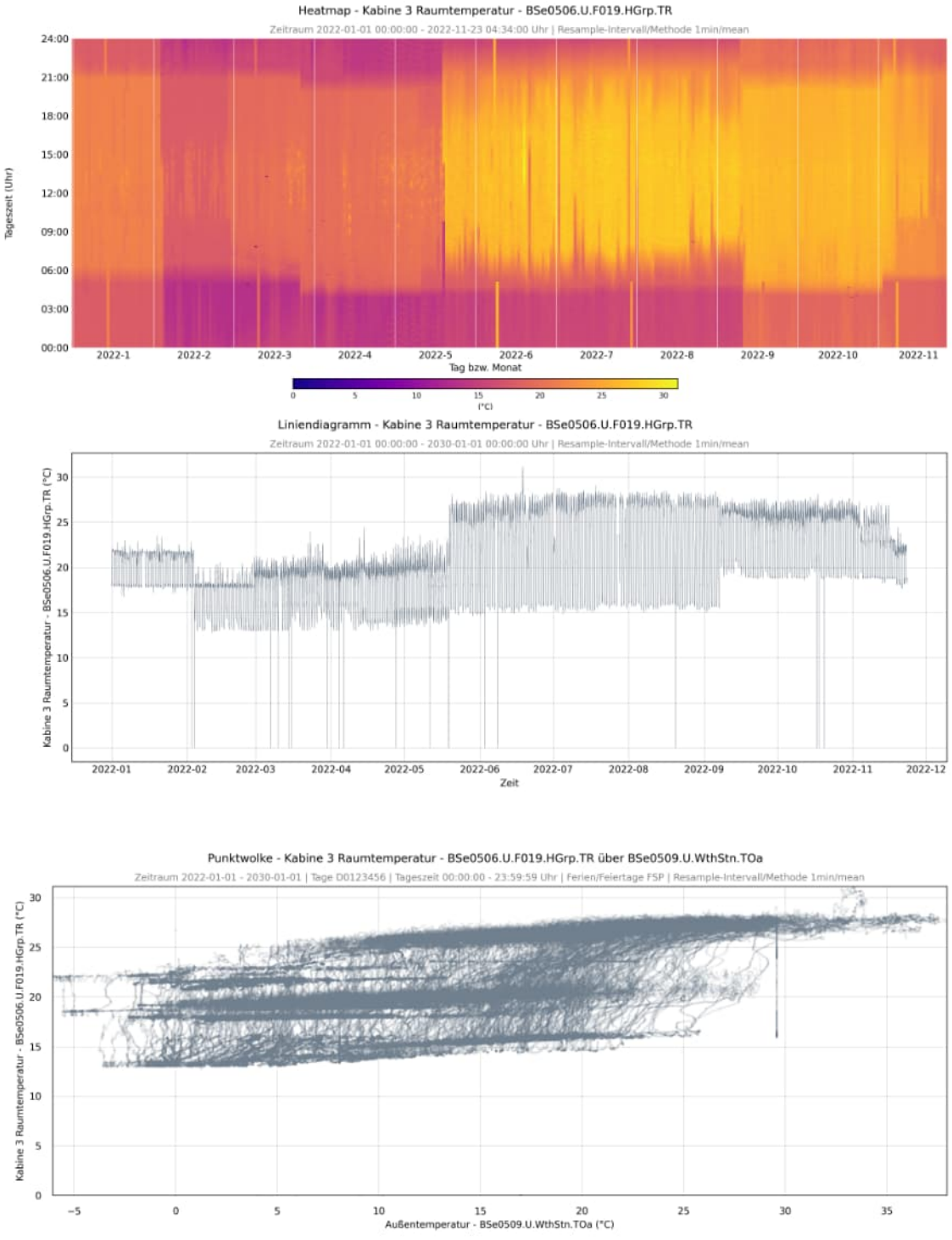


Abbildung 7.17.: Kabine 3 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

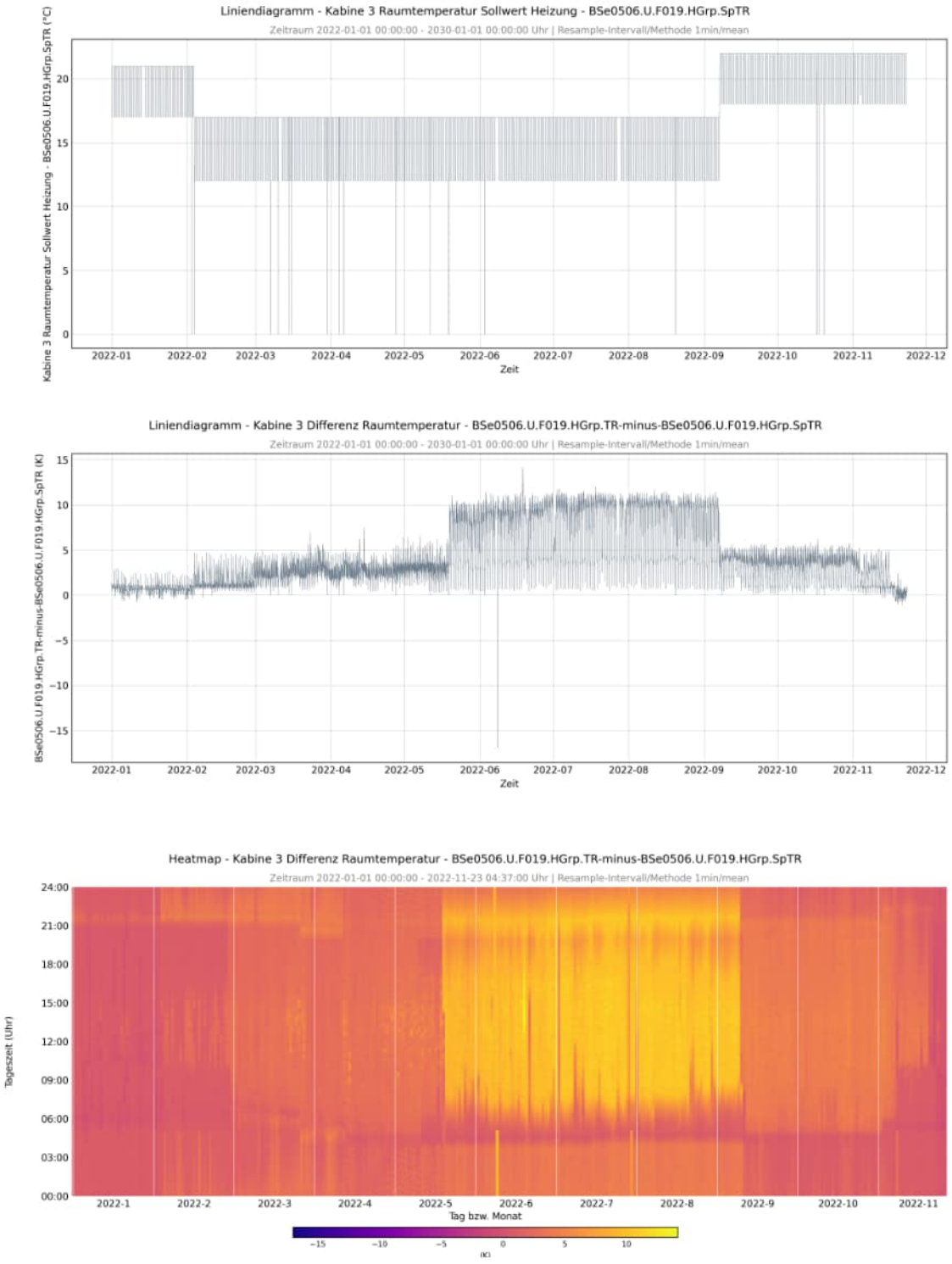


Abbildung 7.18.: Kabine 3 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

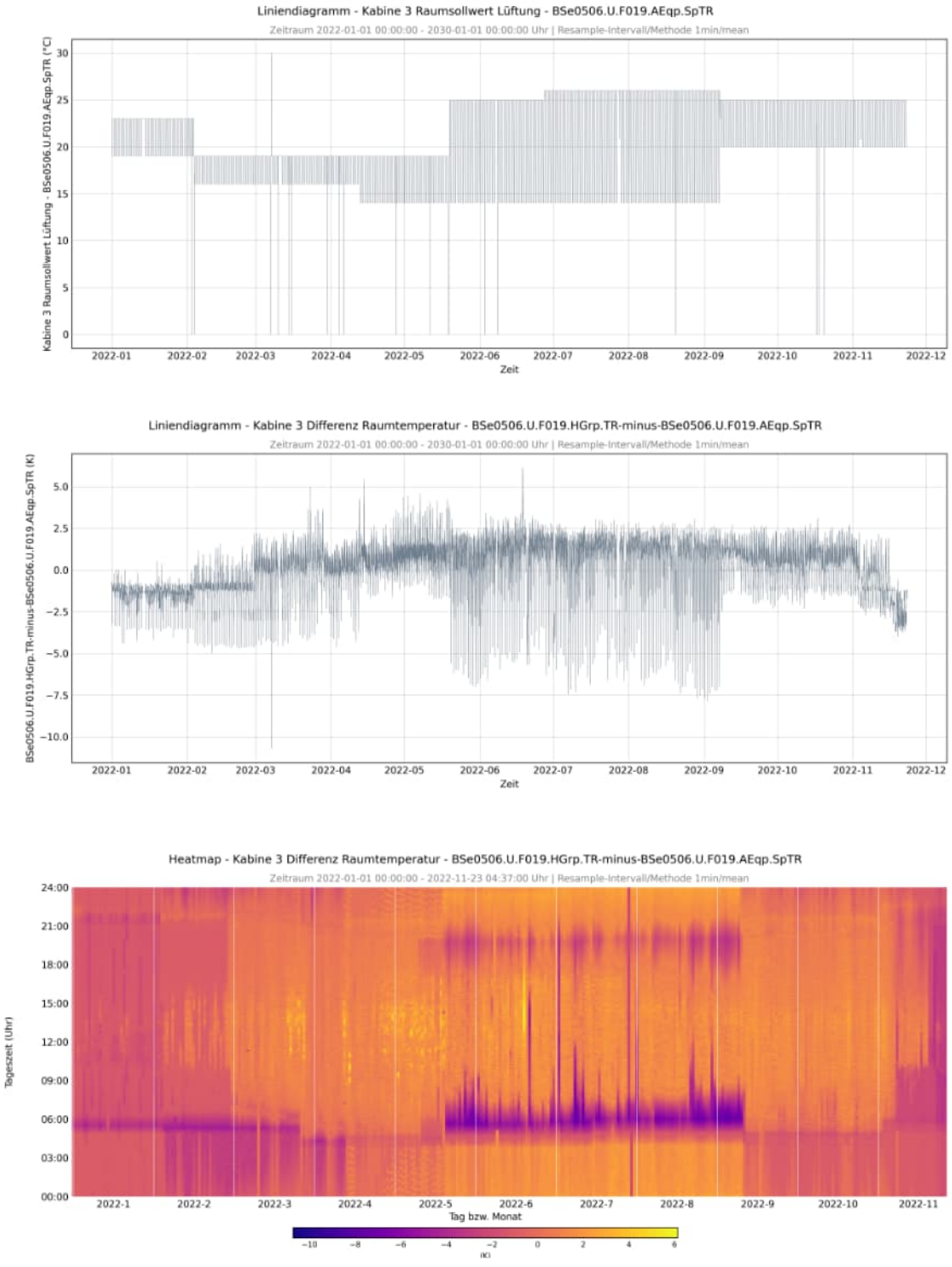


Abbildung 7.19.: Kabine 3 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

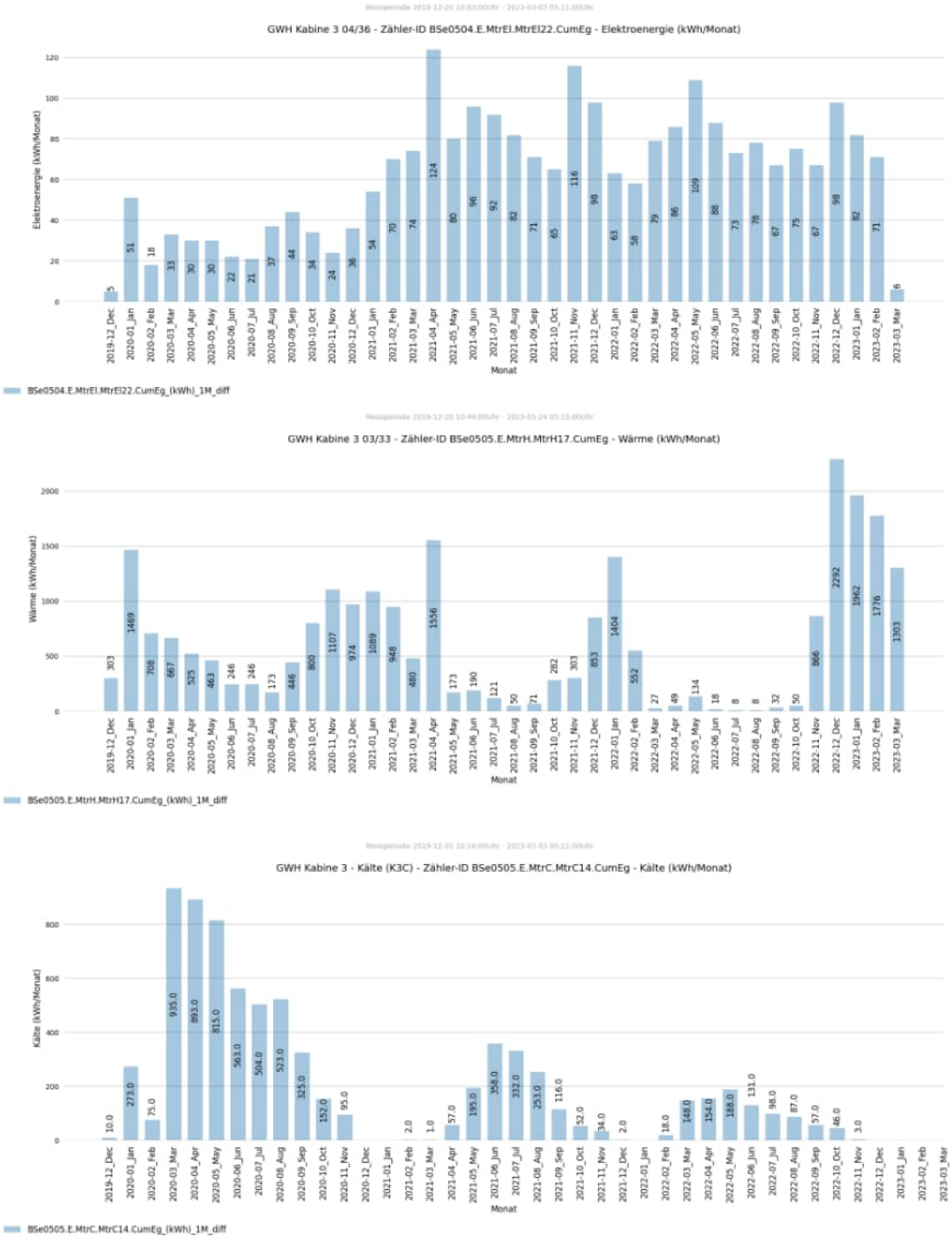


Abbildung 7.20.: Kabine 3 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

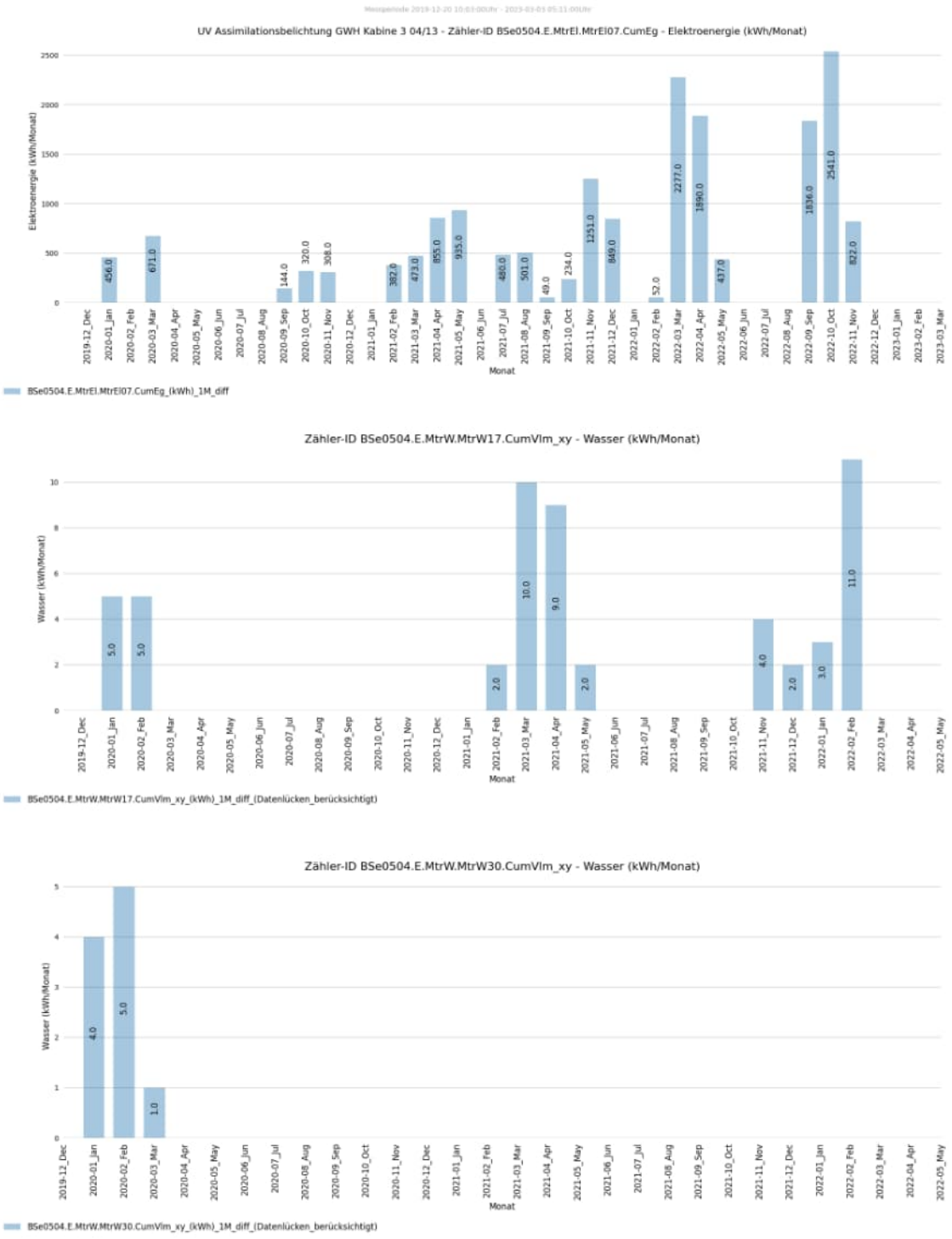


Abbildung 7.21.: Kabine 3 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.5. Kabine 4

Abbildung 7.22 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 4.

Abbildung 7.22.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 4

Abbildung 7.24 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 4 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.25 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.26 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.5 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469718 Minuten
Mittelwert	°C	20.17
Median	°C	19.77
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 32.13 / 32.13
Standardabw.	K	4.23
Varianz	K	17.89
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	13.55 / 27.15 / 13.6
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	16.97 / 23.01 / 6.04

Tabelle 7.5.: Kabine 4 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0506.U.F020.HGrp.TR

Abbildung 7.23 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 17 und 22°C lag. Ferner wurden während eines Betriebszeitraumes von 313 Minuten Werte zwischen 11 und 12°C registriert. In der Bilanzperiode wurden über 105 Minuten hinweg Werte von über 31°C bei einem Maximalwert von ca. 32,1°C gemessen, siehe Abbildung 7.23.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.25 und Abbildung 7.26 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.27 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.28 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

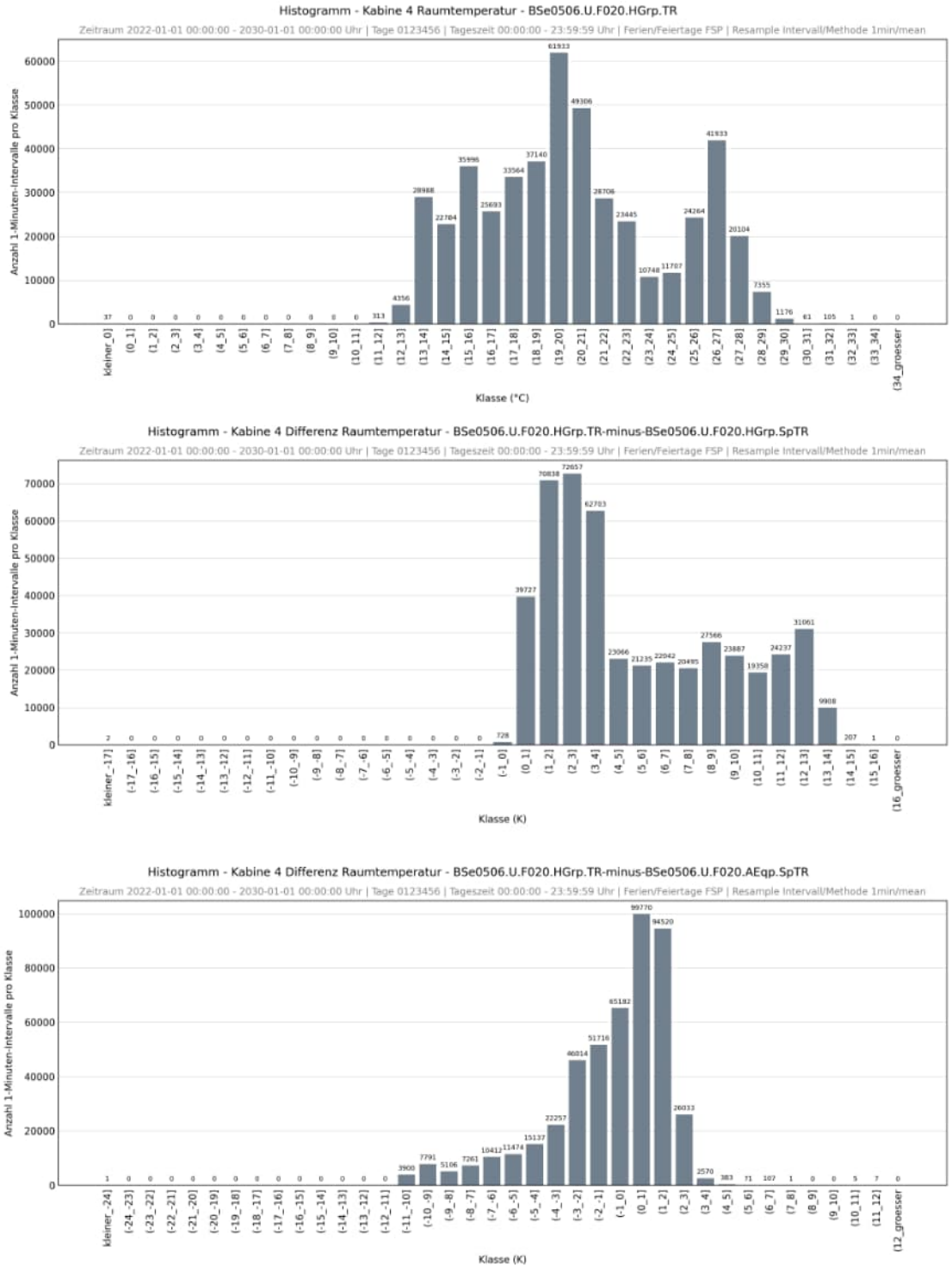


Abbildung 7.23.: Kabine 4 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

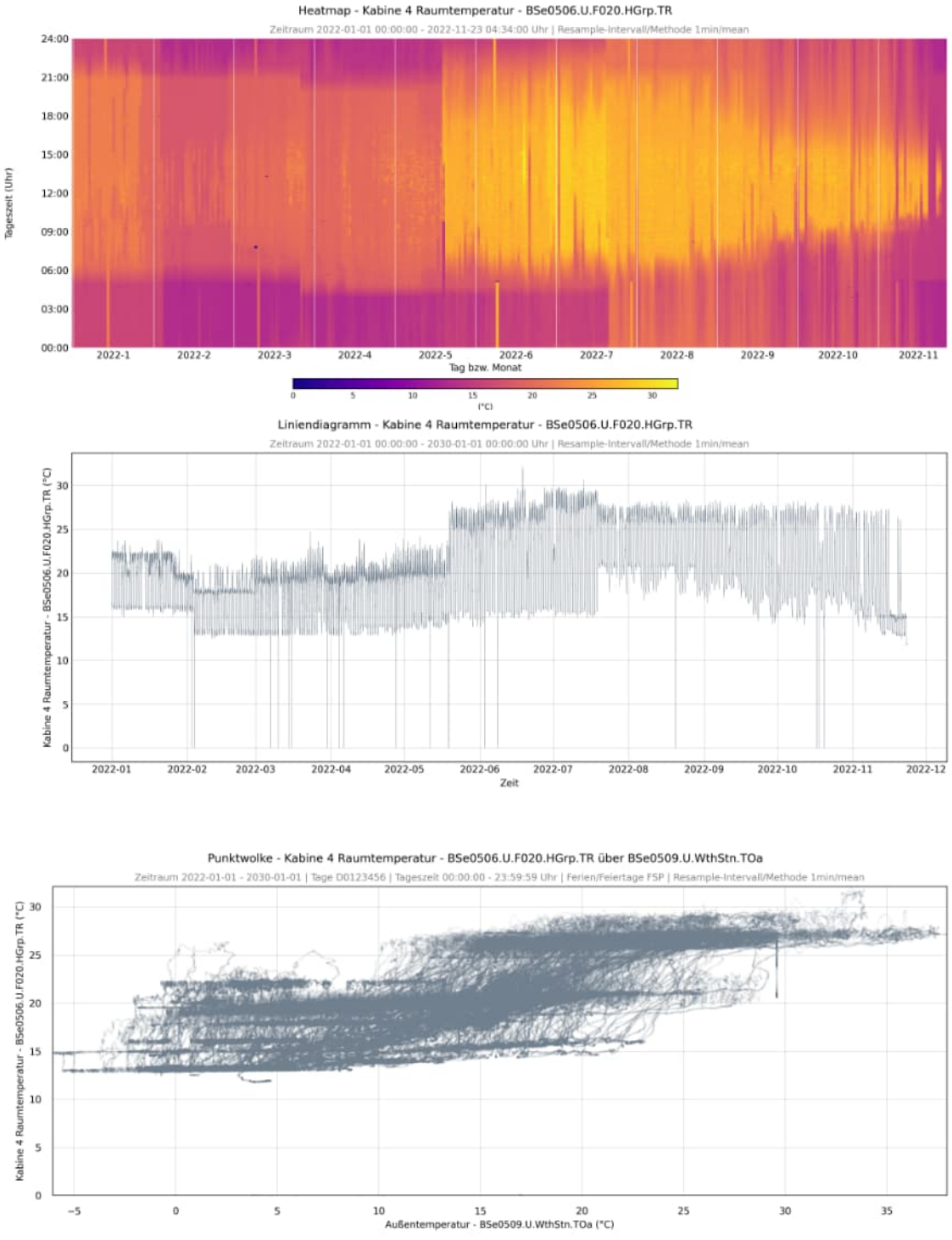


Abbildung 7.24.: Kabine 4 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

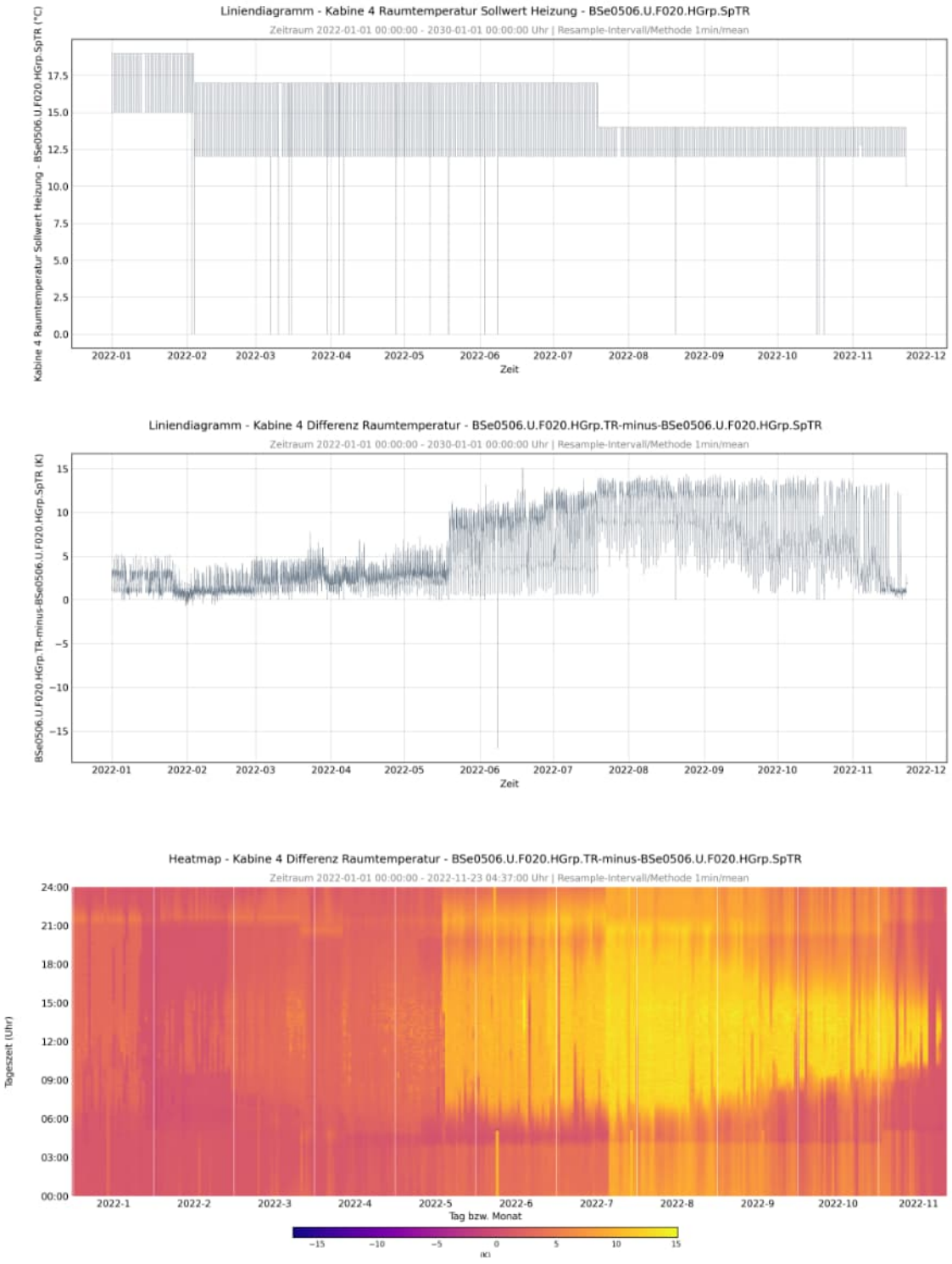


Abbildung 7.25.: Kabine 4 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

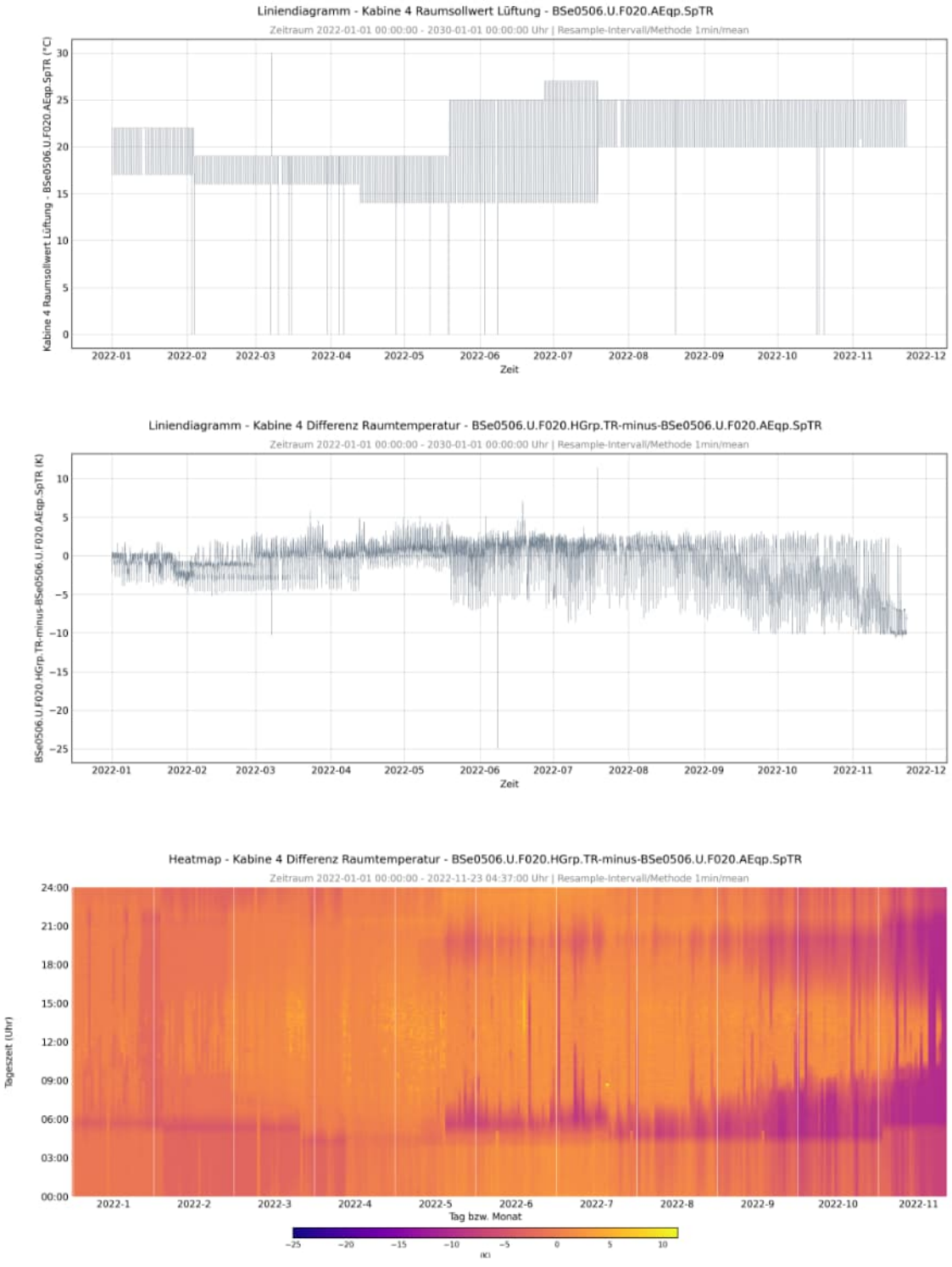


Abbildung 7.26.: Kabine 4 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

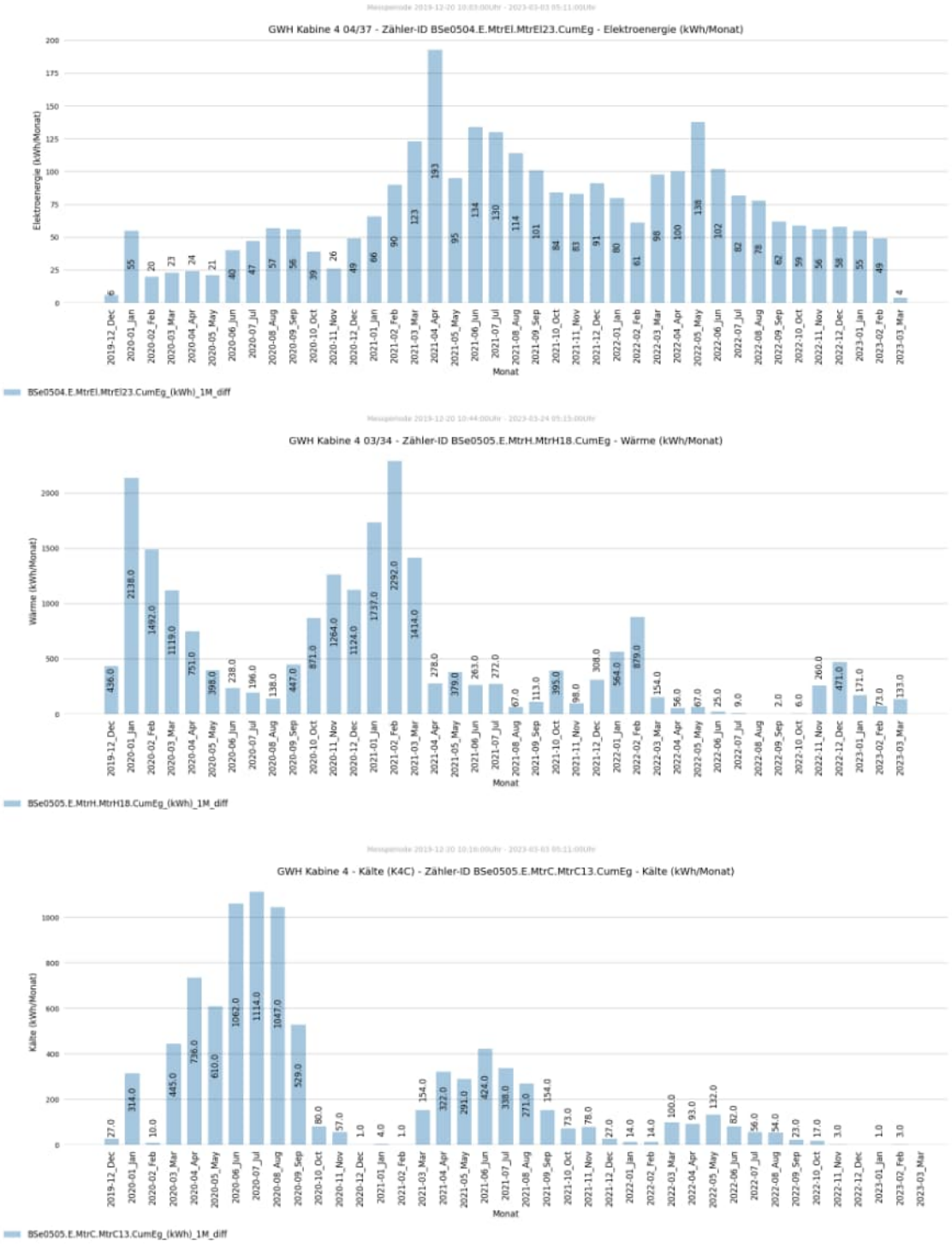


Abbildung 7.27.: Kabine 4 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

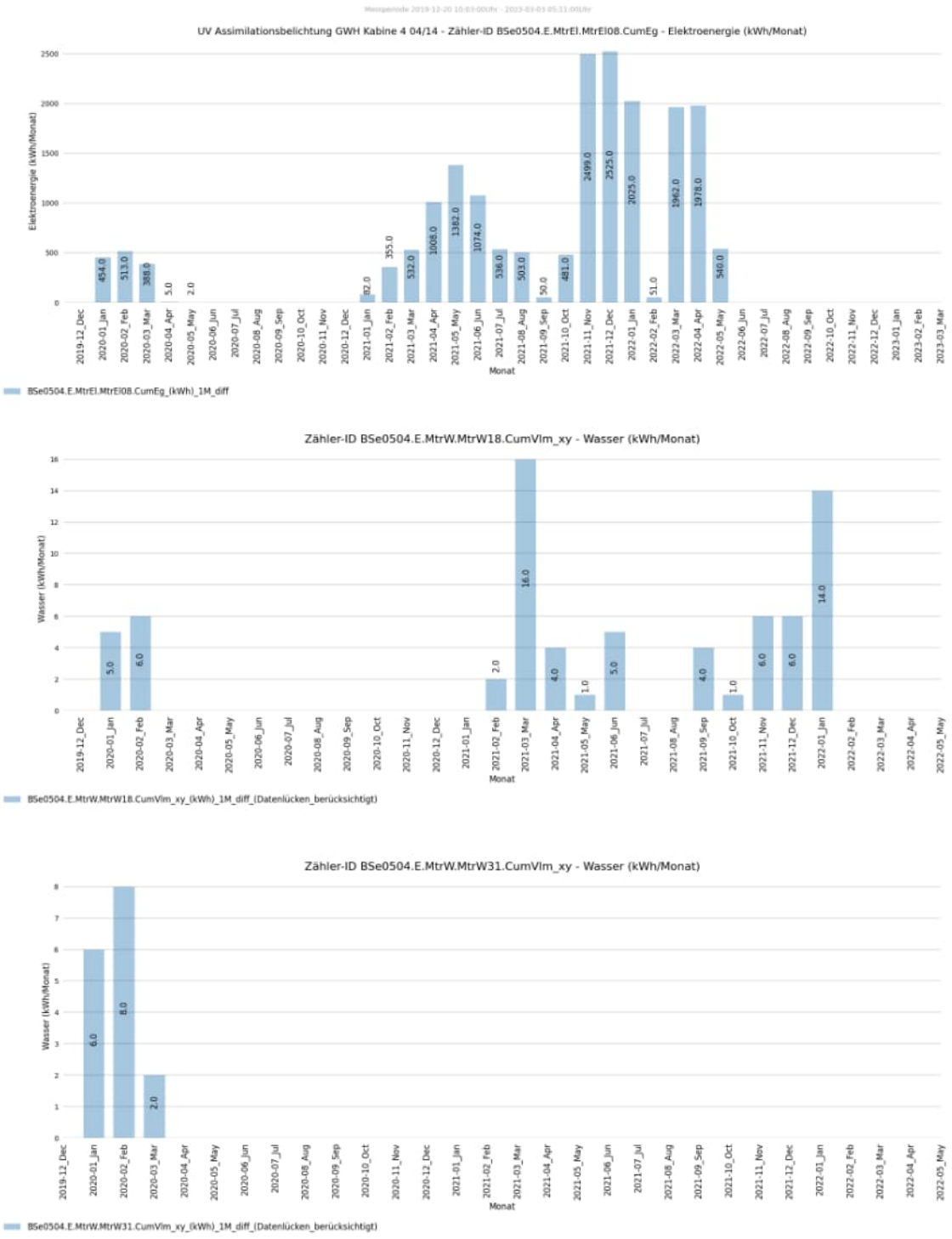


Abbildung 7.28.: Kabine 4 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.6. Kabine 5

Abbildung 7.29 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 5.

Abbildung 7.29.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 5

Abbildung 7.31 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 5 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.32 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.33 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.6 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		329699 Minuten
Mittelwert	°C	22.56
Median	°C	24.14
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.14 / 30.14
Standardabw.	K	2.95
Varianz	K	8.71
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	17.97 / 25.72 / 7.75
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.82 / 24.96 / 6.14

Tabelle 7.6.: Kabine 5 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0507.U.F022.HGrp.TR

Abbildung 7.30 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 20 und 26°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 17 und 18°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 409 Stunden registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 15 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,1°C gemessen, siehe Abbildung 7.30.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.32 und Abbildung 7.33 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.34 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.35 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

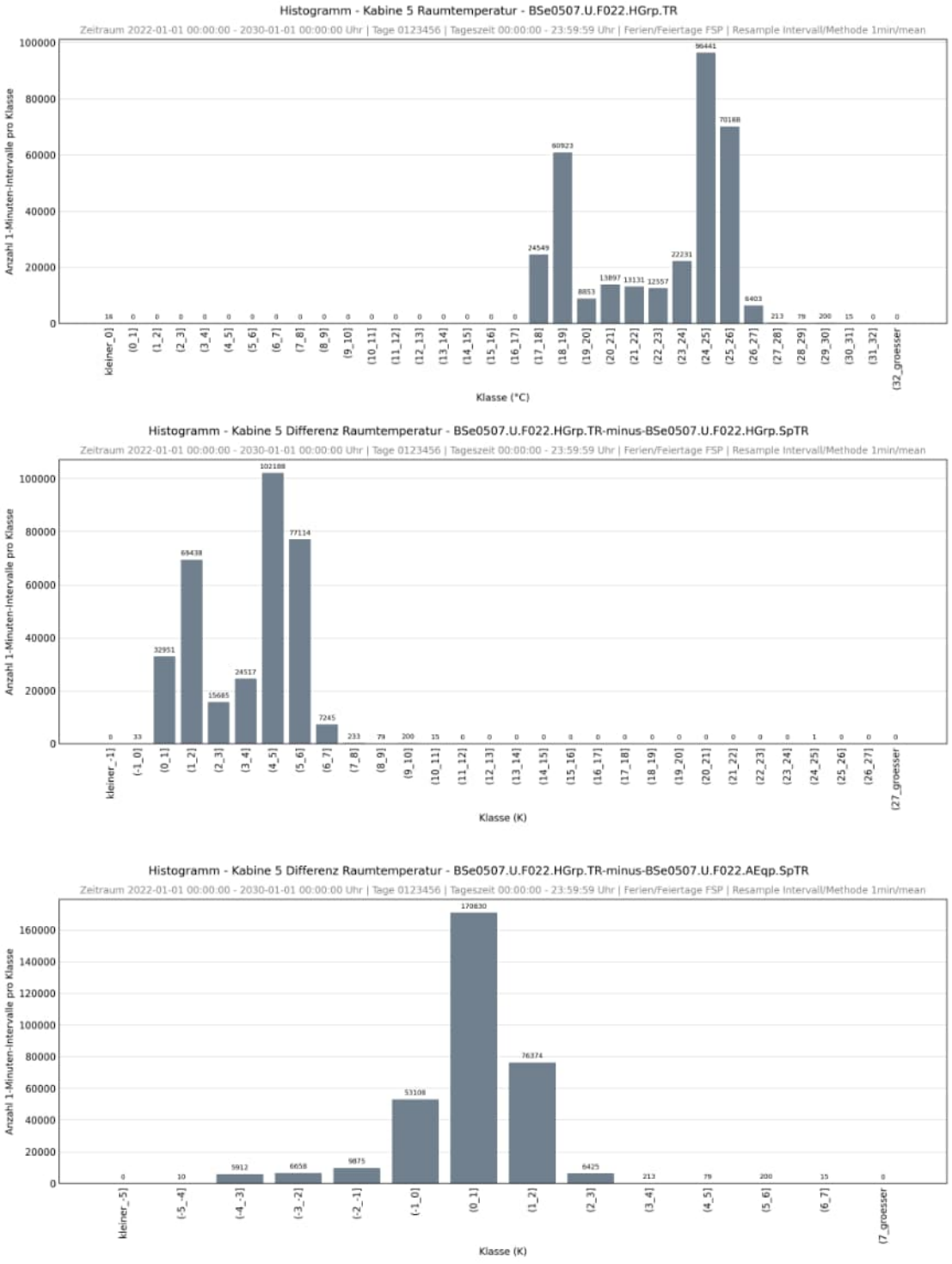


Abbildung 7.30.: Kabine 5 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

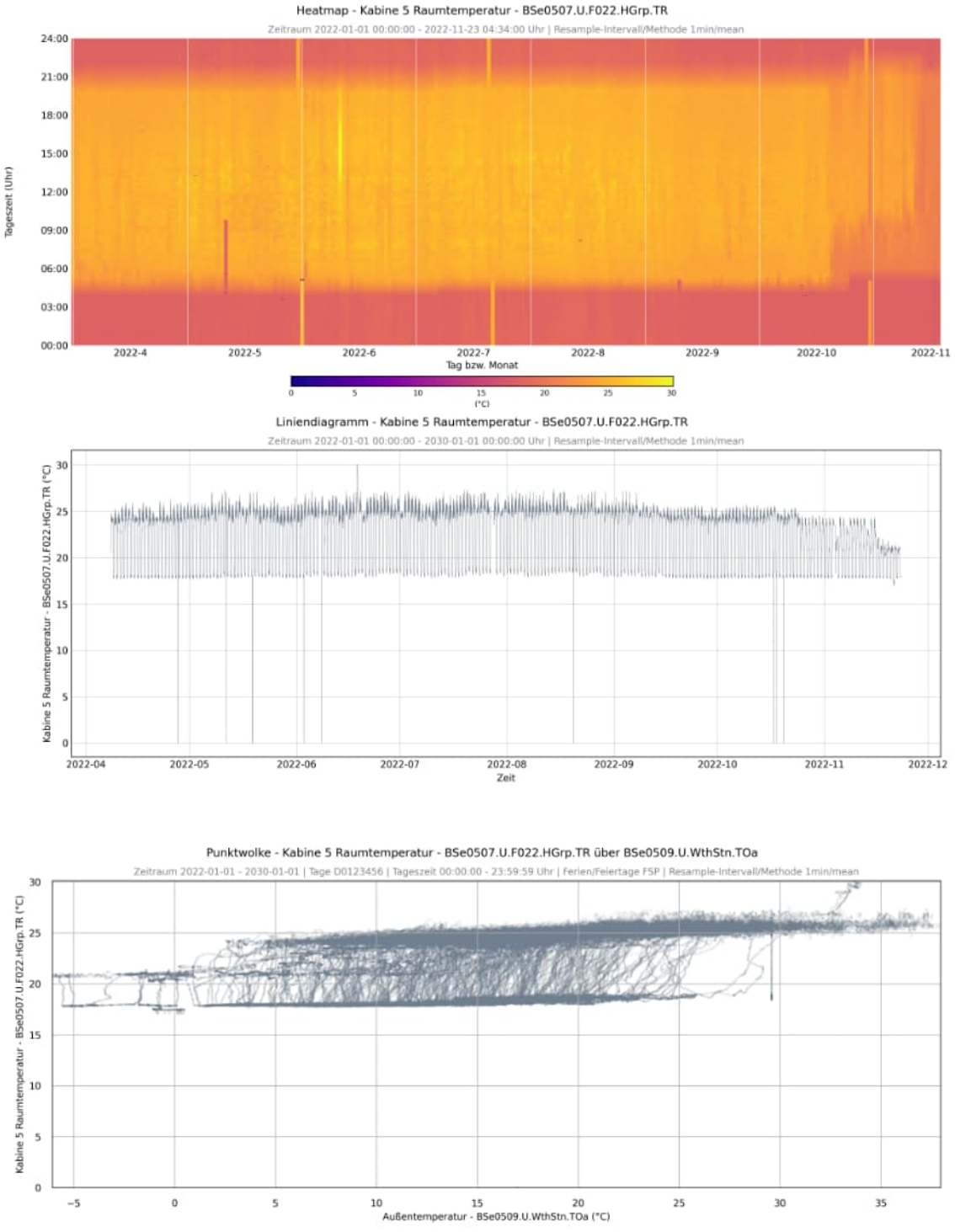


Abbildung 7.31.: Kabine 5 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

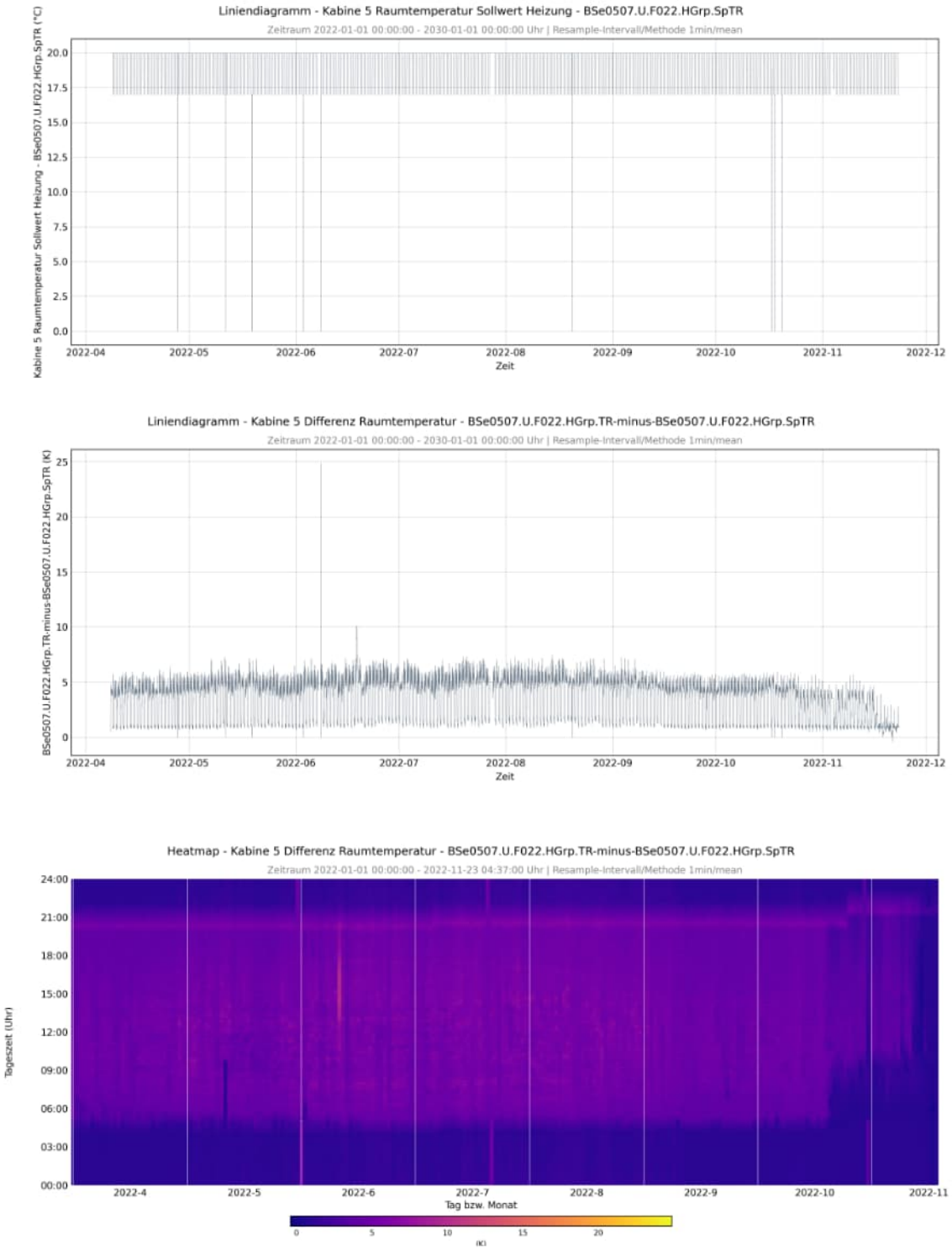


Abbildung 7.32.: Kabine 5 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

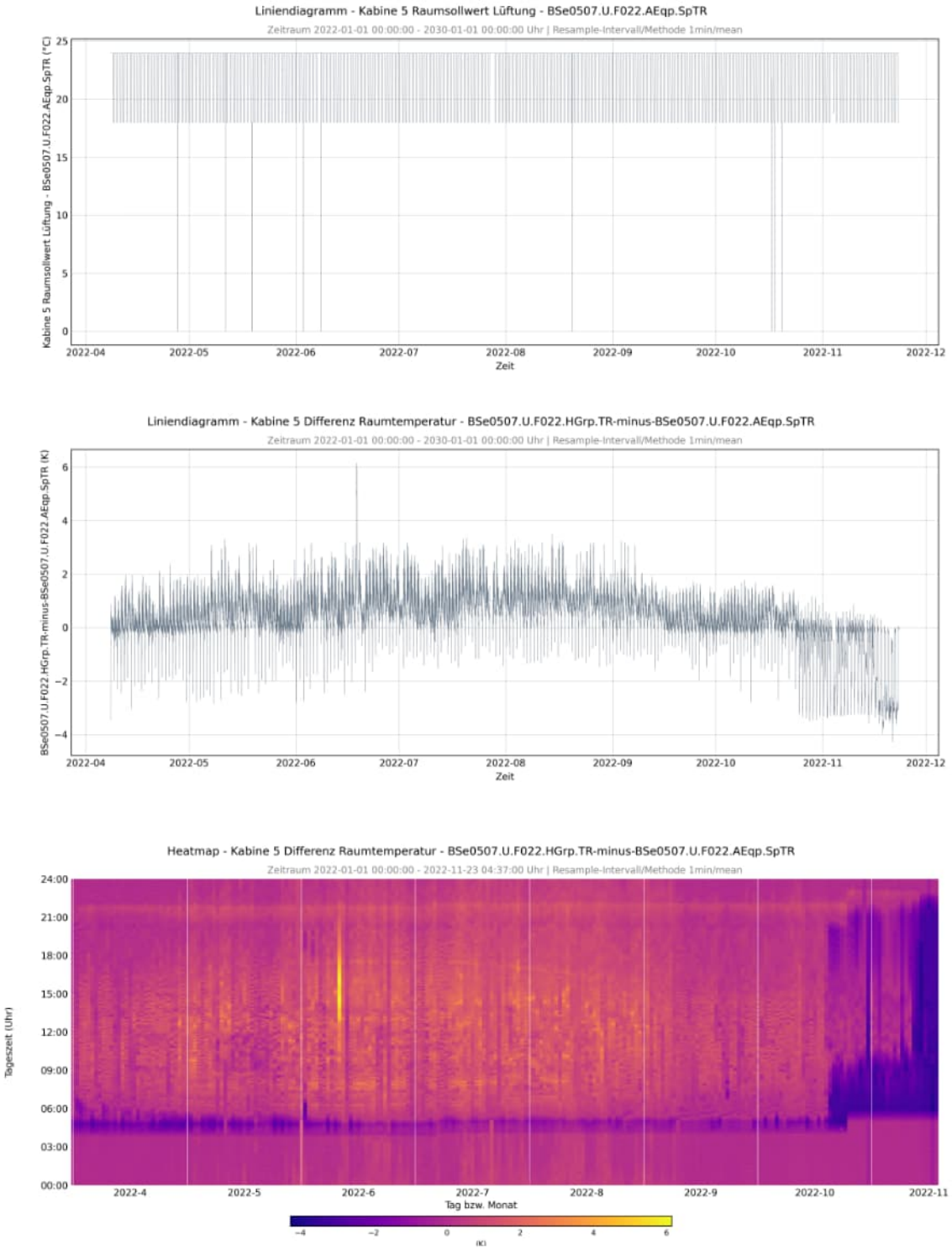


Abbildung 7.33.: Kabine 5 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

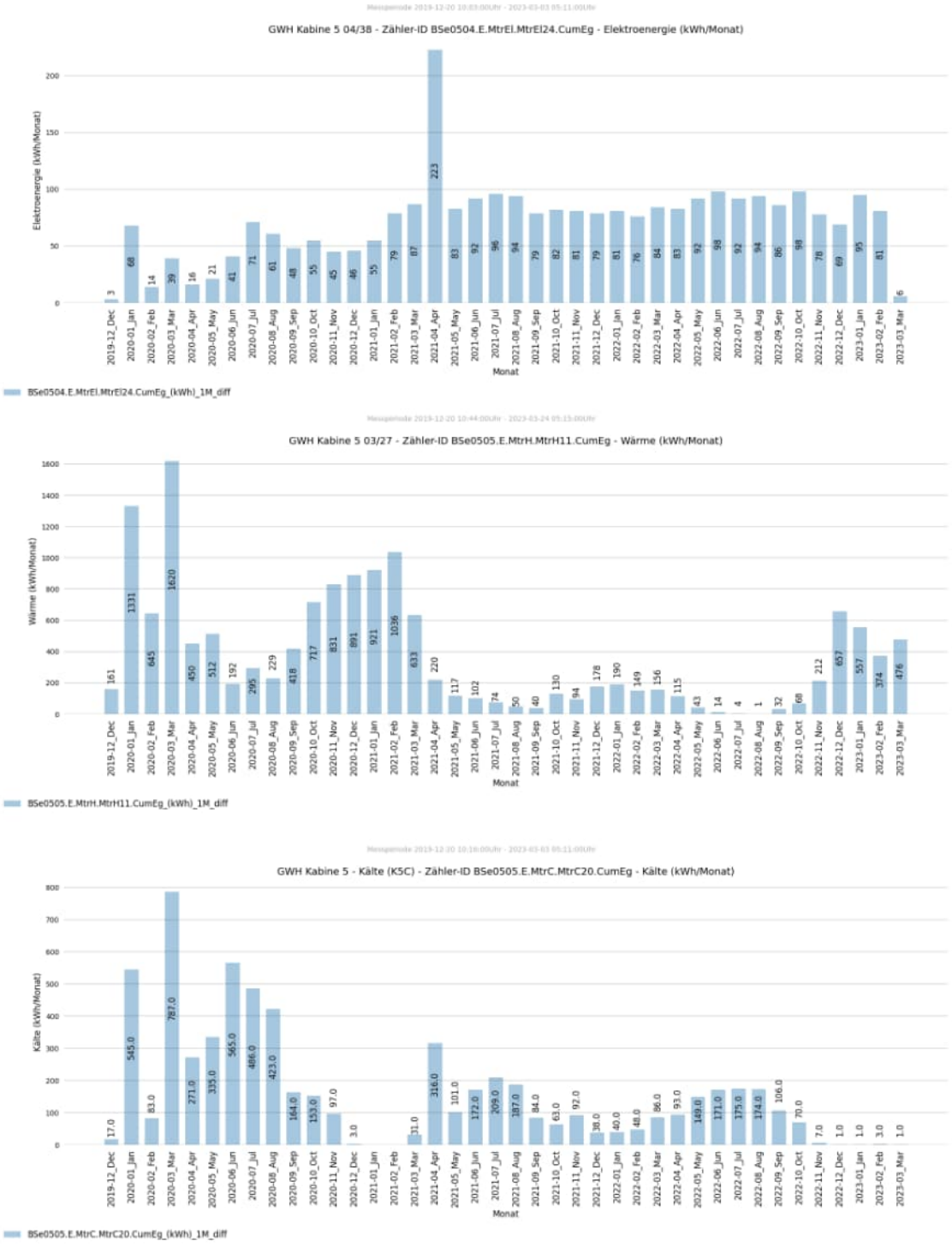


Abbildung 7.34.: Kabine 5 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

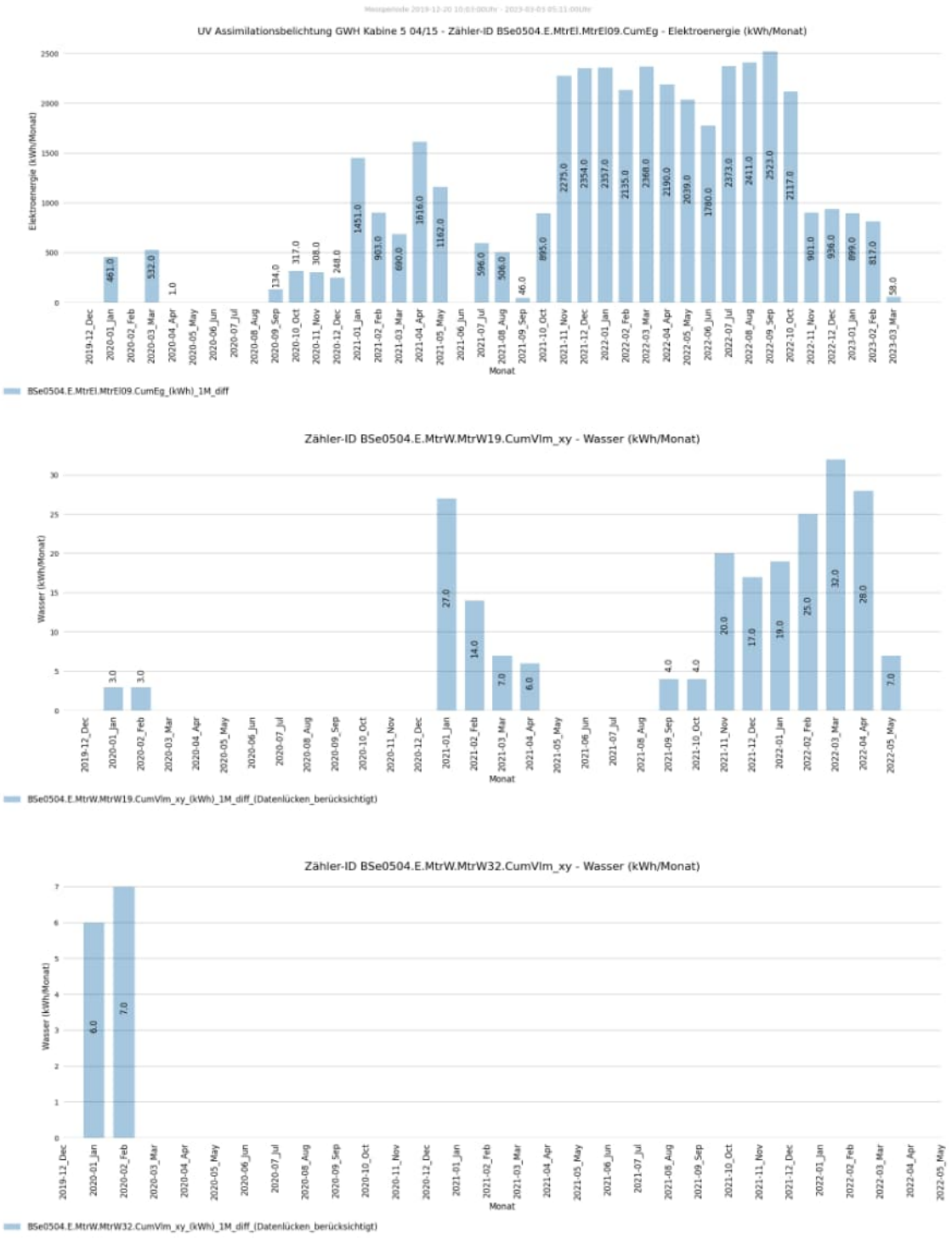


Abbildung 7.35.: Kabine 5 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.7. Kabine 6

Abbildung 7.36 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 6.

Abbildung 7.36.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 6

Abbildung 7.38 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 6 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.39 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.40 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.7 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469718 Minuten
Mittelwert	°C	22.13
Median	°C	23.94
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.64 / 30.64
Standardabw.	K	3.05
Varianz	K	9.28
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	17.56 / 25.44 / 7.88
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.57 / 24.74 / 6.17

Tabelle 7.7.: Kabine 6 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0507.U.F023.HGrp.TR

Abbildung 7.37 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 22 und 26°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 15 und 16°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 266 Minuten registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 221 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,6°C gemessen, siehe Abbildung 7.37.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.39 und Abbildung 7.40 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.41 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.42 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

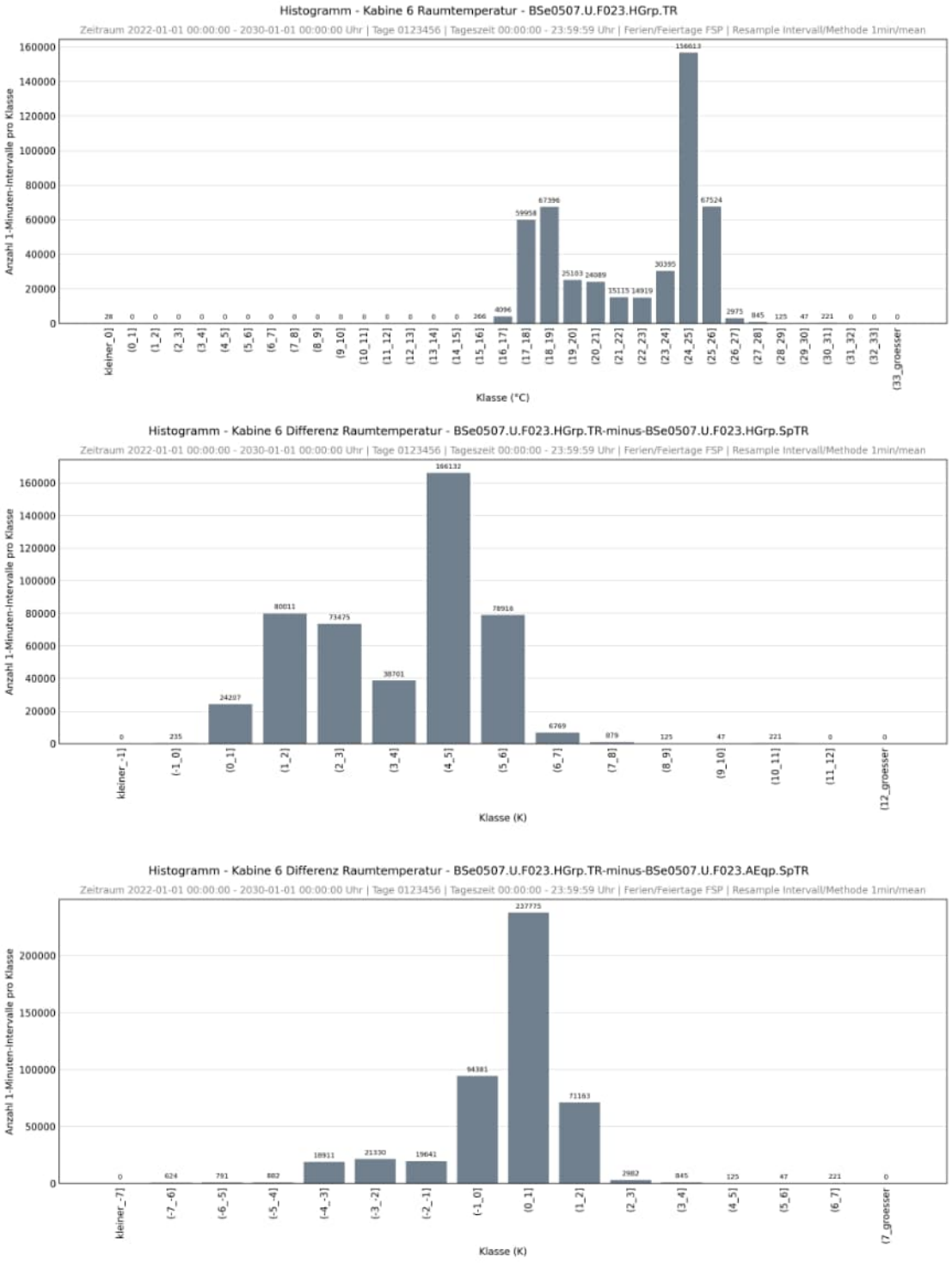


Abbildung 7.37.: Kabine 6 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

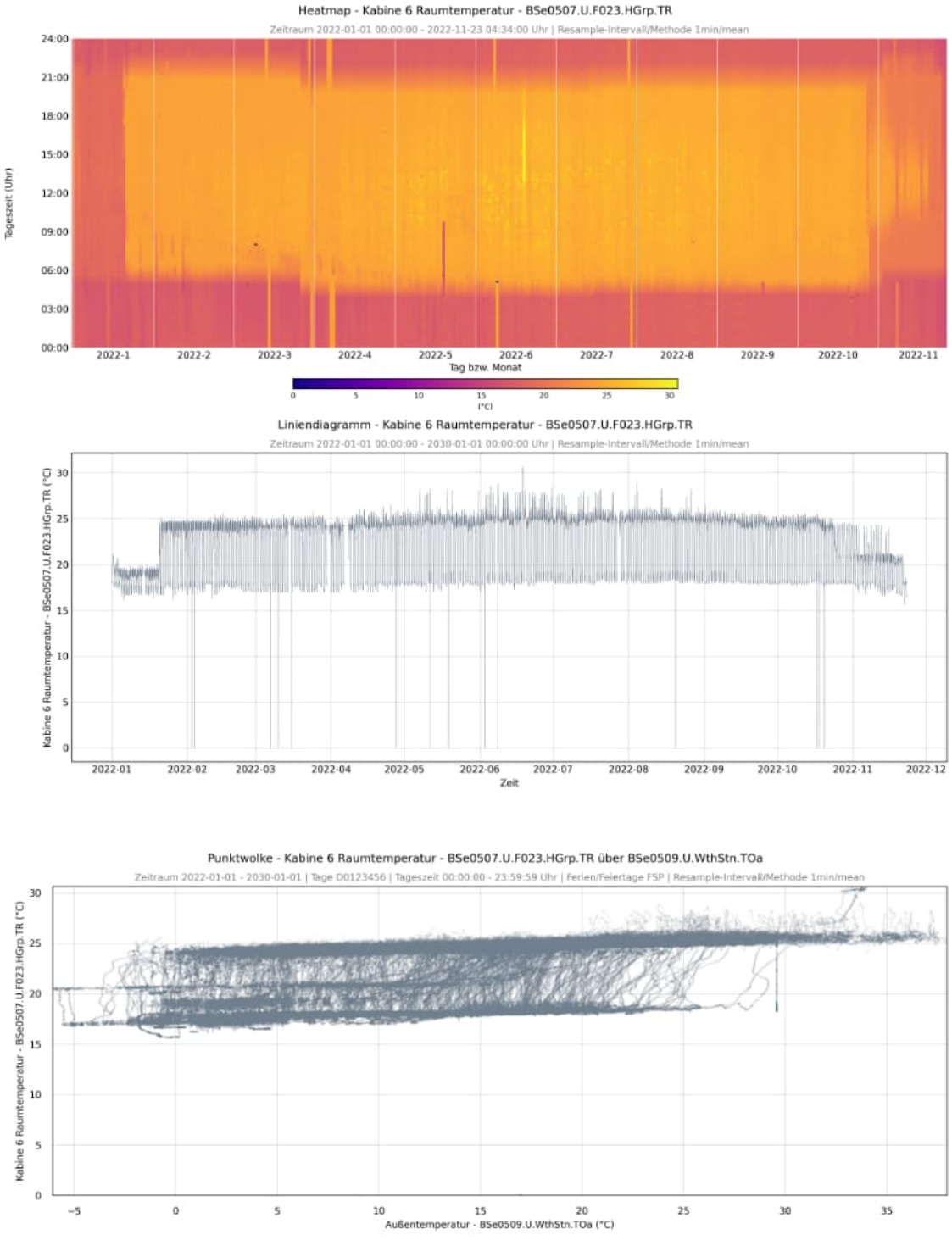


Abbildung 7.38.: Kabine 6 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

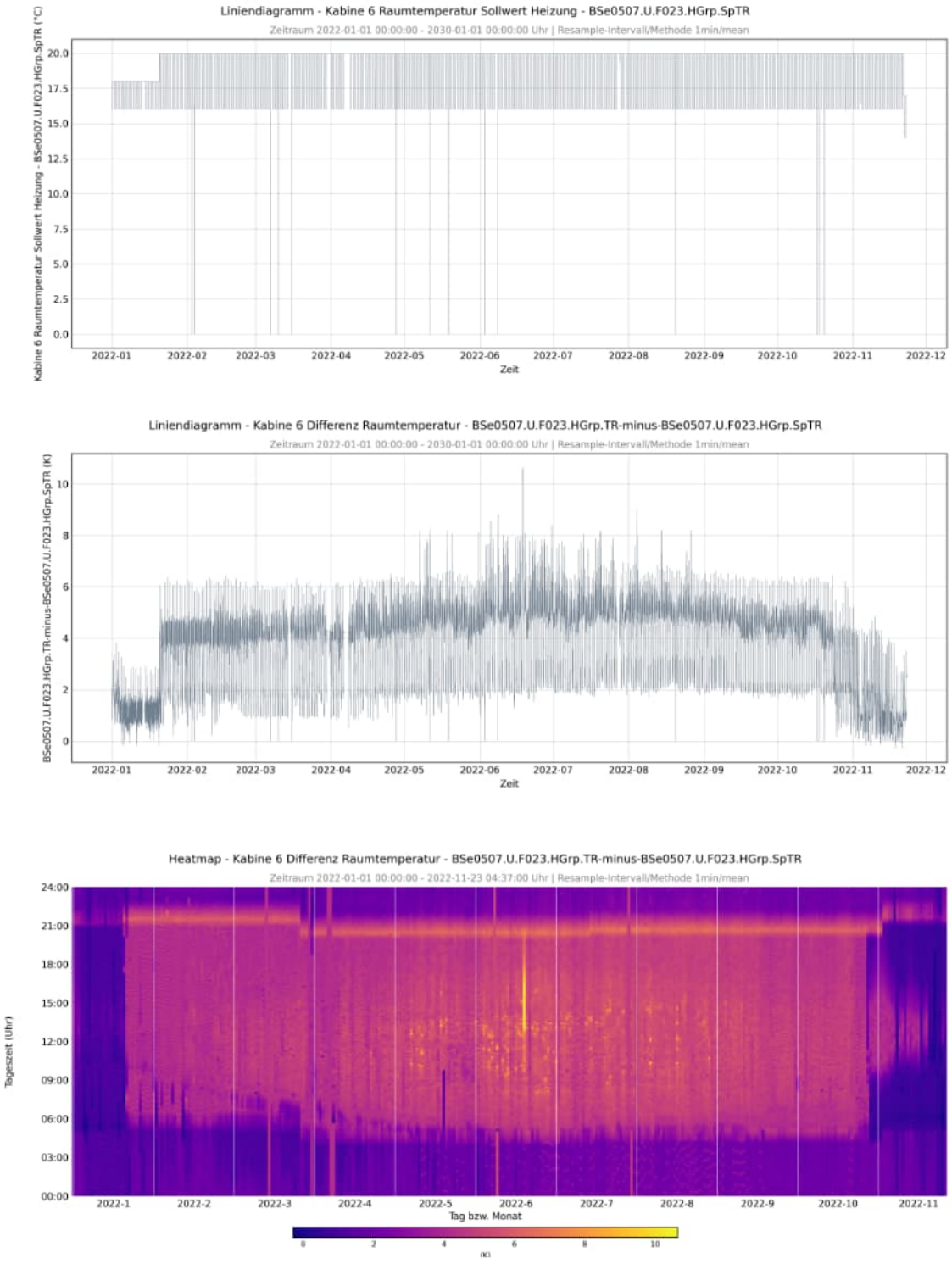


Abbildung 7.39.: Kabine 6 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

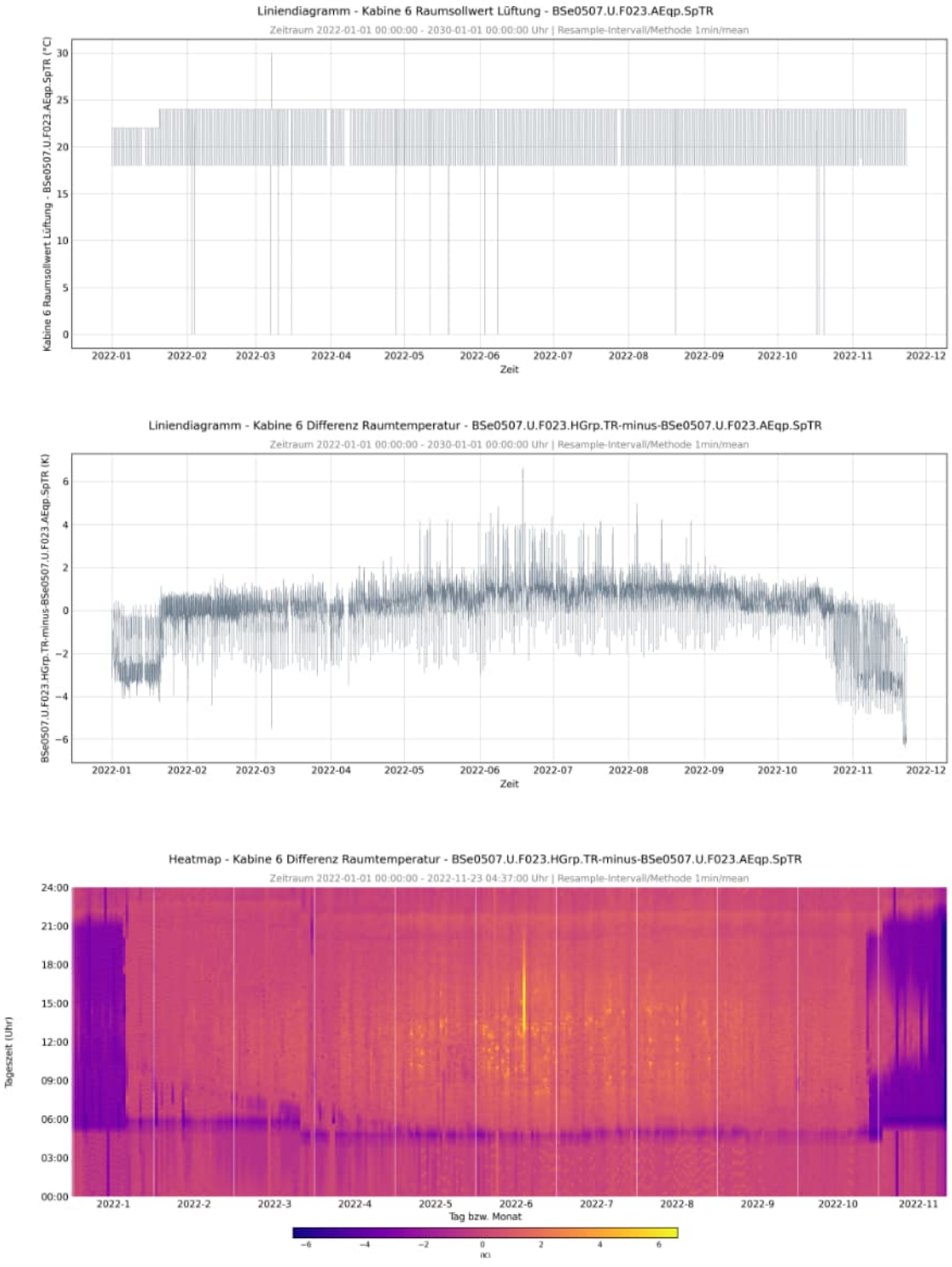


Abbildung 7.40.: Kabine 6 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

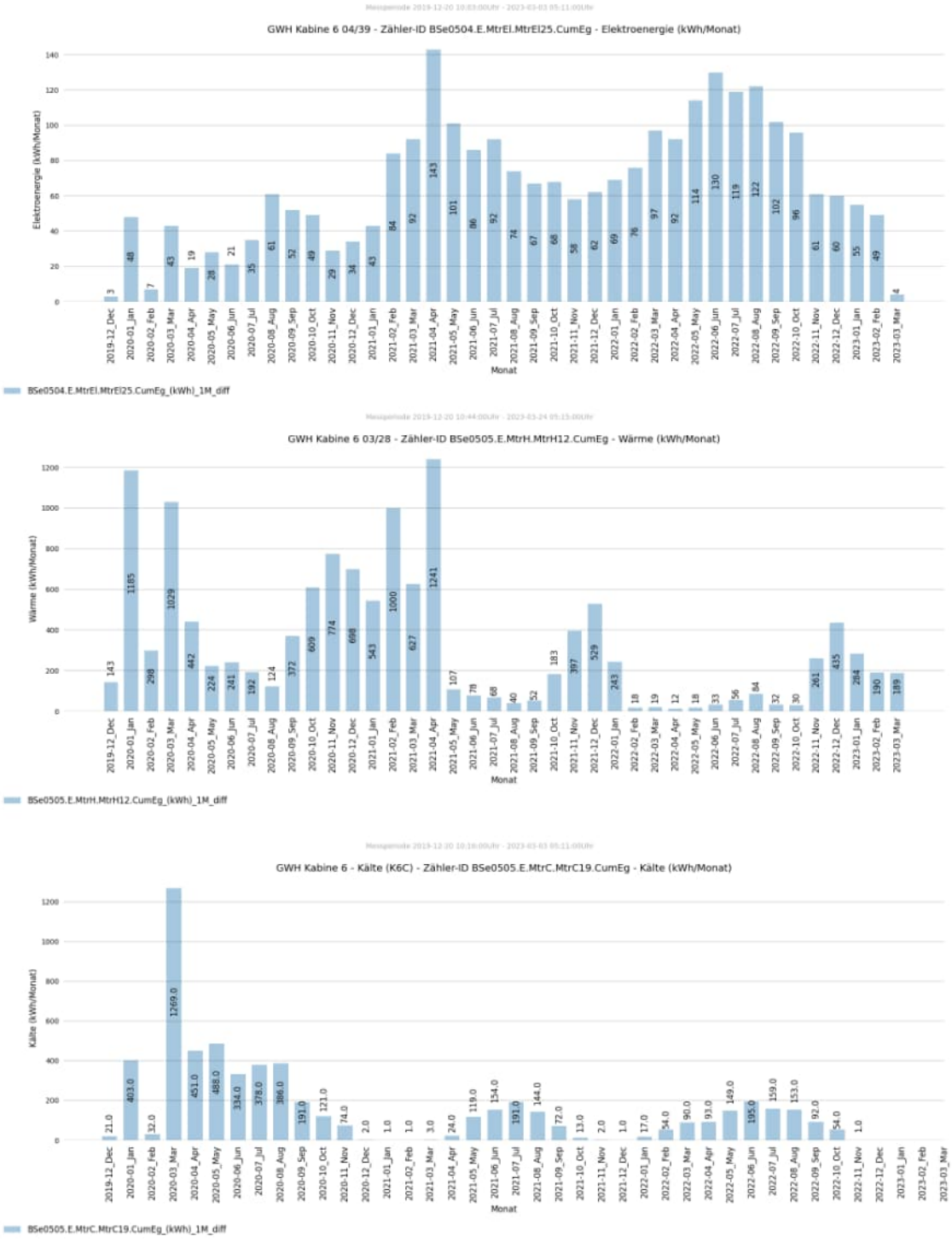


Abbildung 7.41.: Kabine 6 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

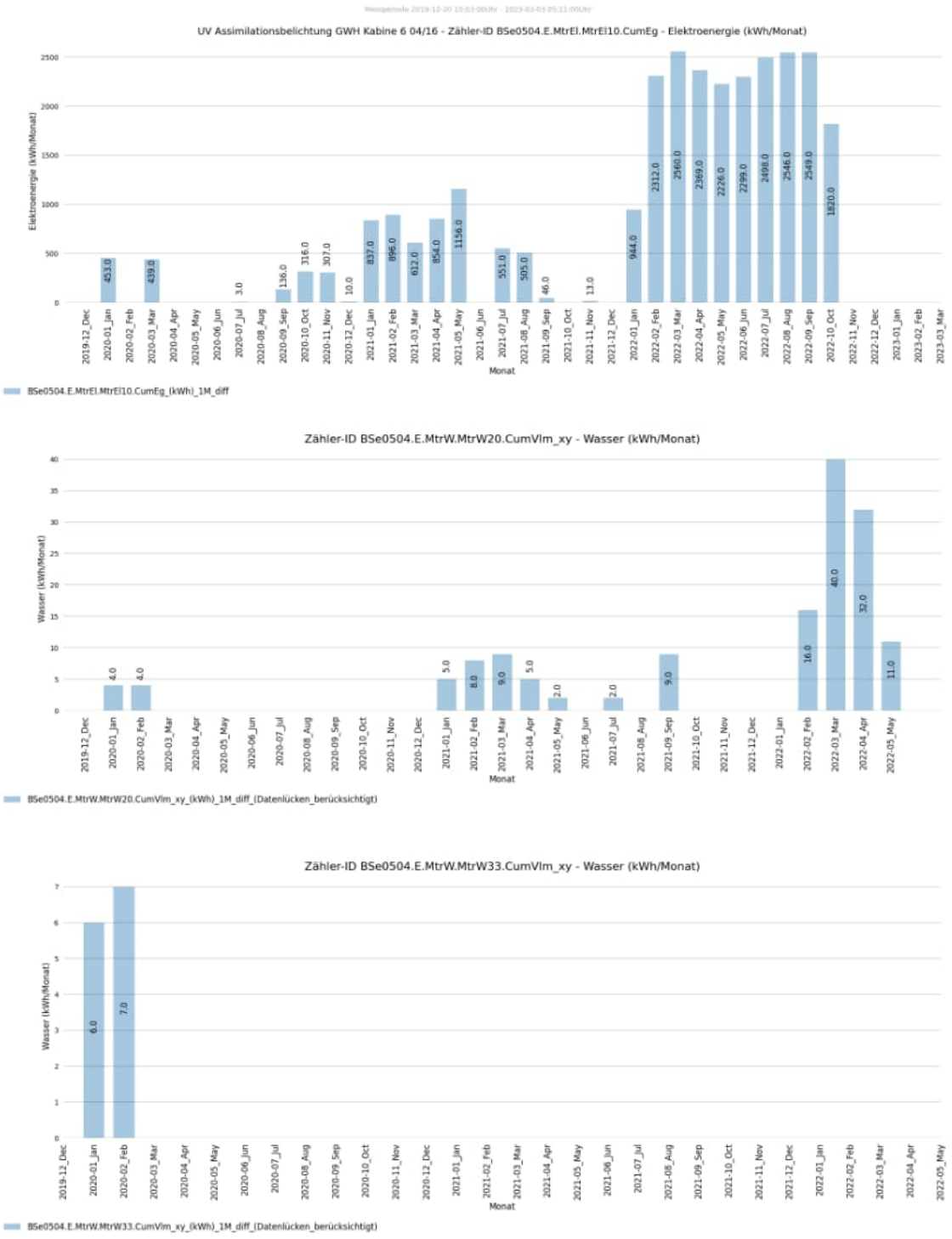


Abbildung 7.42.: Kabine 6 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.8. Kabine 7

Abbildung 7.43 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 7.

Abbildung 7.43.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 7

Abbildung 7.45 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 7 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.46 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.47 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.8 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	23.4
Median	°C	24.14
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.83 / 30.83
Standardabw.	K	2.94
Varianz	K	8.62
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	18.58 / 27.17 / 8.59
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	20.54 / 26.02 / 5.48

Tabelle 7.8.: Kabine 7 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0507.U.F024.HGrp.TR

Abbildung 7.44 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 20 und 27°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 17 und 18°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 80 Stunden registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 219 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,8°C gemessen, siehe Abbildung 7.44.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.46 und Abbildung 7.47 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.48 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.49 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

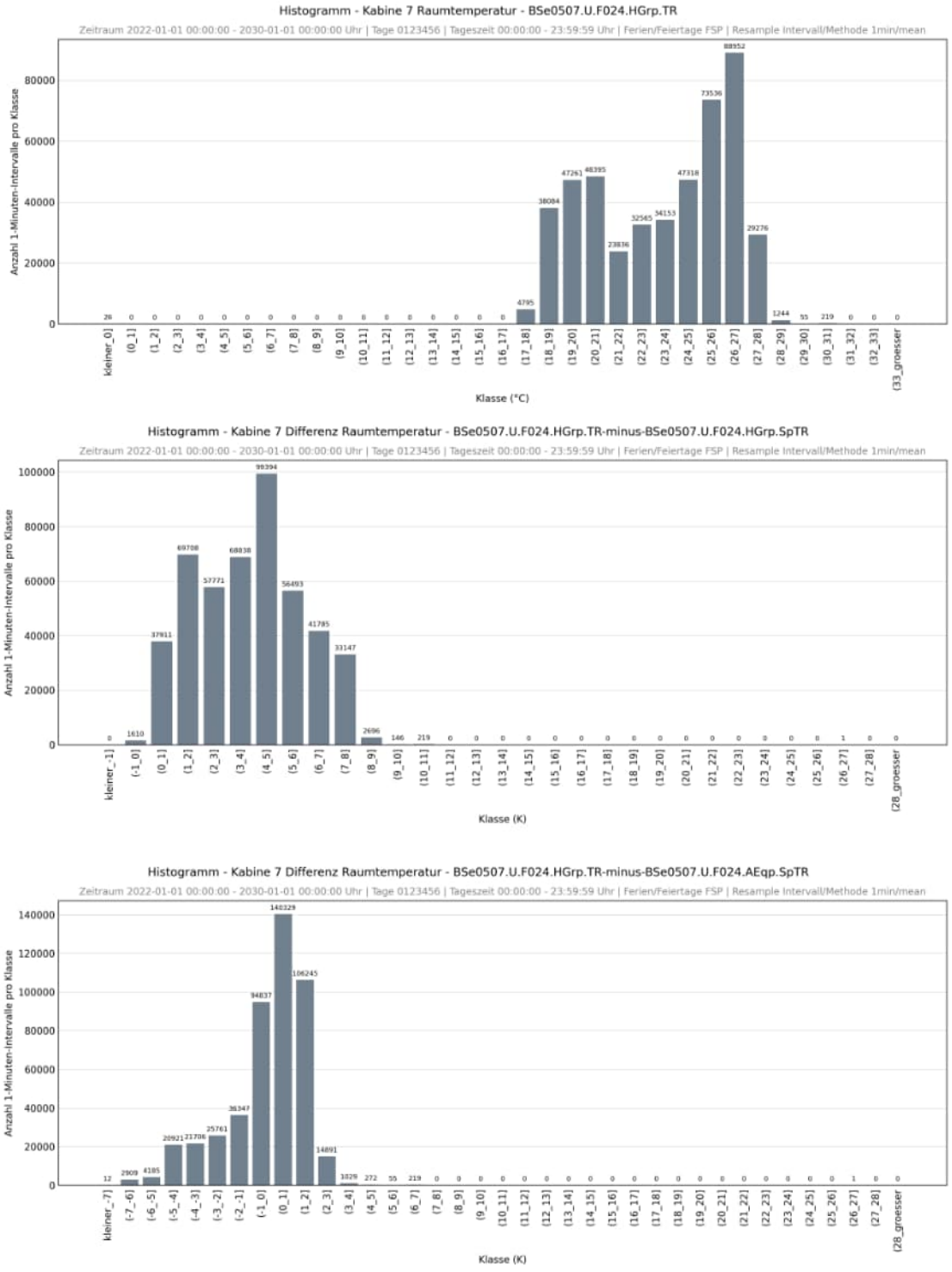


Abbildung 7.44.: Kabine 7 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

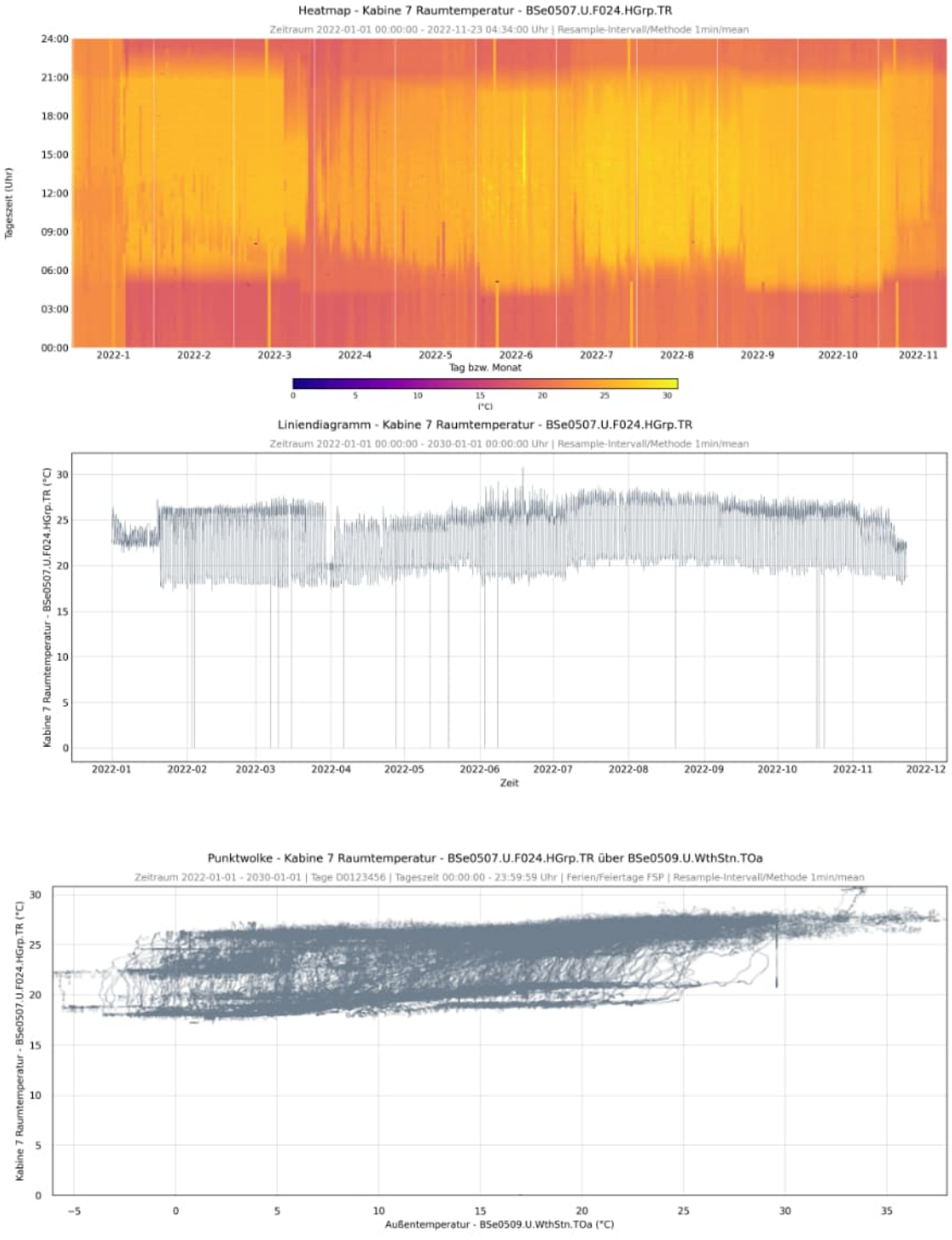


Abbildung 7.45.: Kabine 7 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

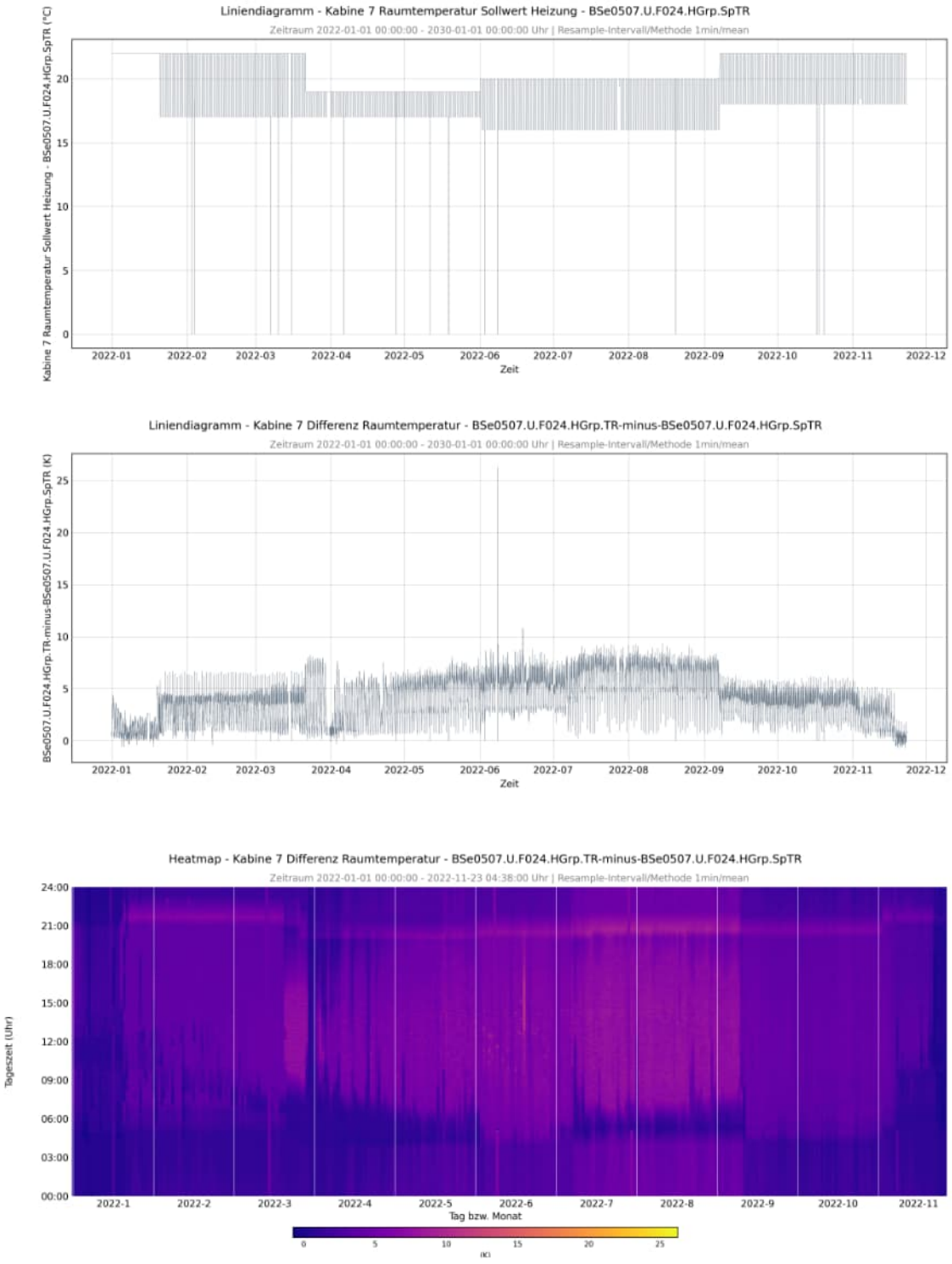


Abbildung 7.46.: Kabine 7 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

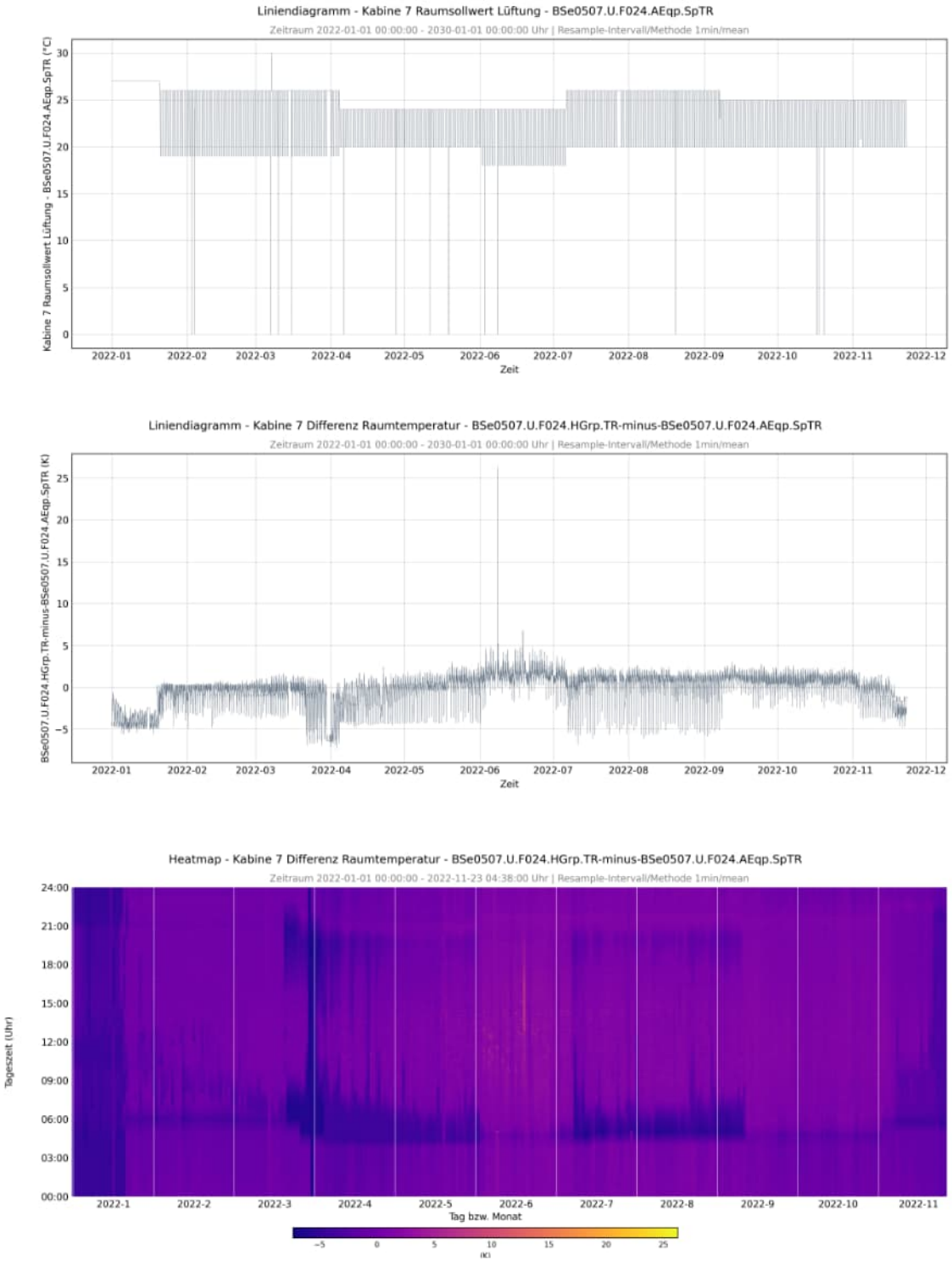


Abbildung 7.47.: Kabine 7 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

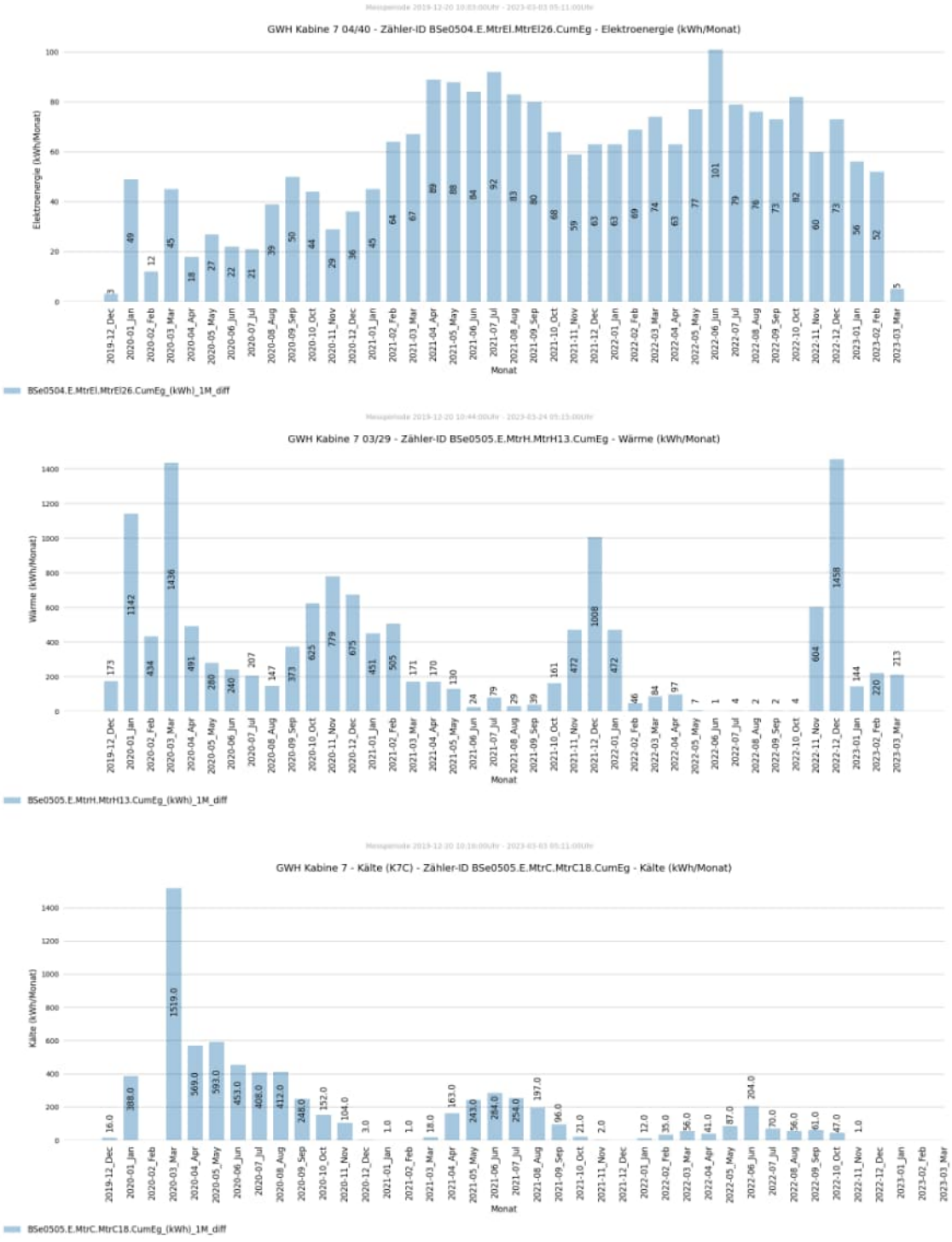


Abbildung 7.48.: Kabine 7 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

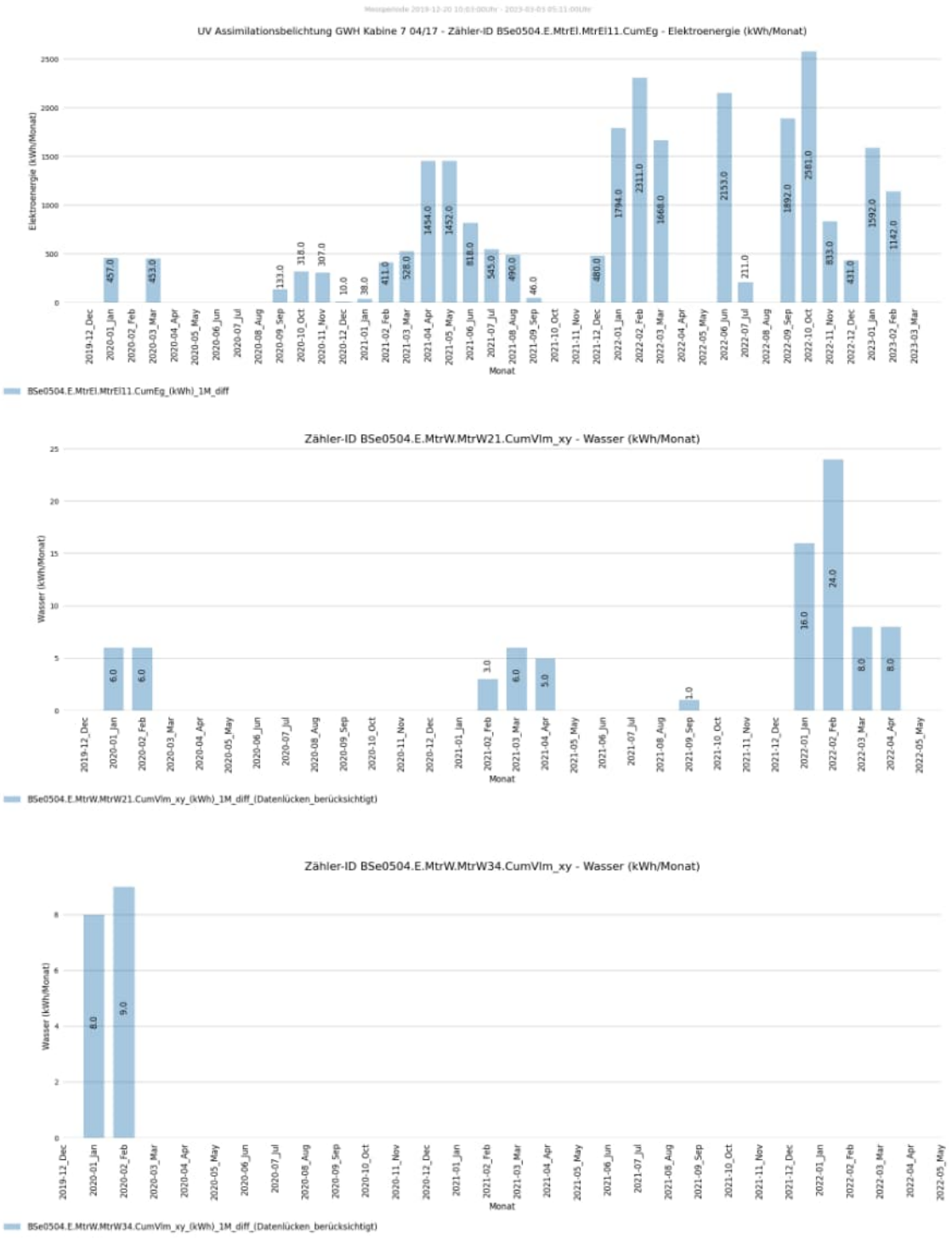


Abbildung 7.49.: Kabine 7 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.9. Kabine 8

Abbildung 7.50 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 8.

Abbildung 7.50.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 8

Abbildung 7.52 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 8 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.53 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.54 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.9 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	20.58
Median	°C	20.15
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.45 / 30.45
Standardabw.	K	3.91
Varianz	K	15.29
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	15.15 / 25.78 / 10.63
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	16.8 / 24.64 / 7.84

Tabelle 7.9.: Kabine 8 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0507.U.F025.HGrp.TR

Abbildung 7.51 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 18 und 26°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 12 und 13°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 17,5 Stunden registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 14 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,5°C gemessen, siehe Abbildung 7.51.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.53 und Abbildung 7.54 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.55 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.56 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

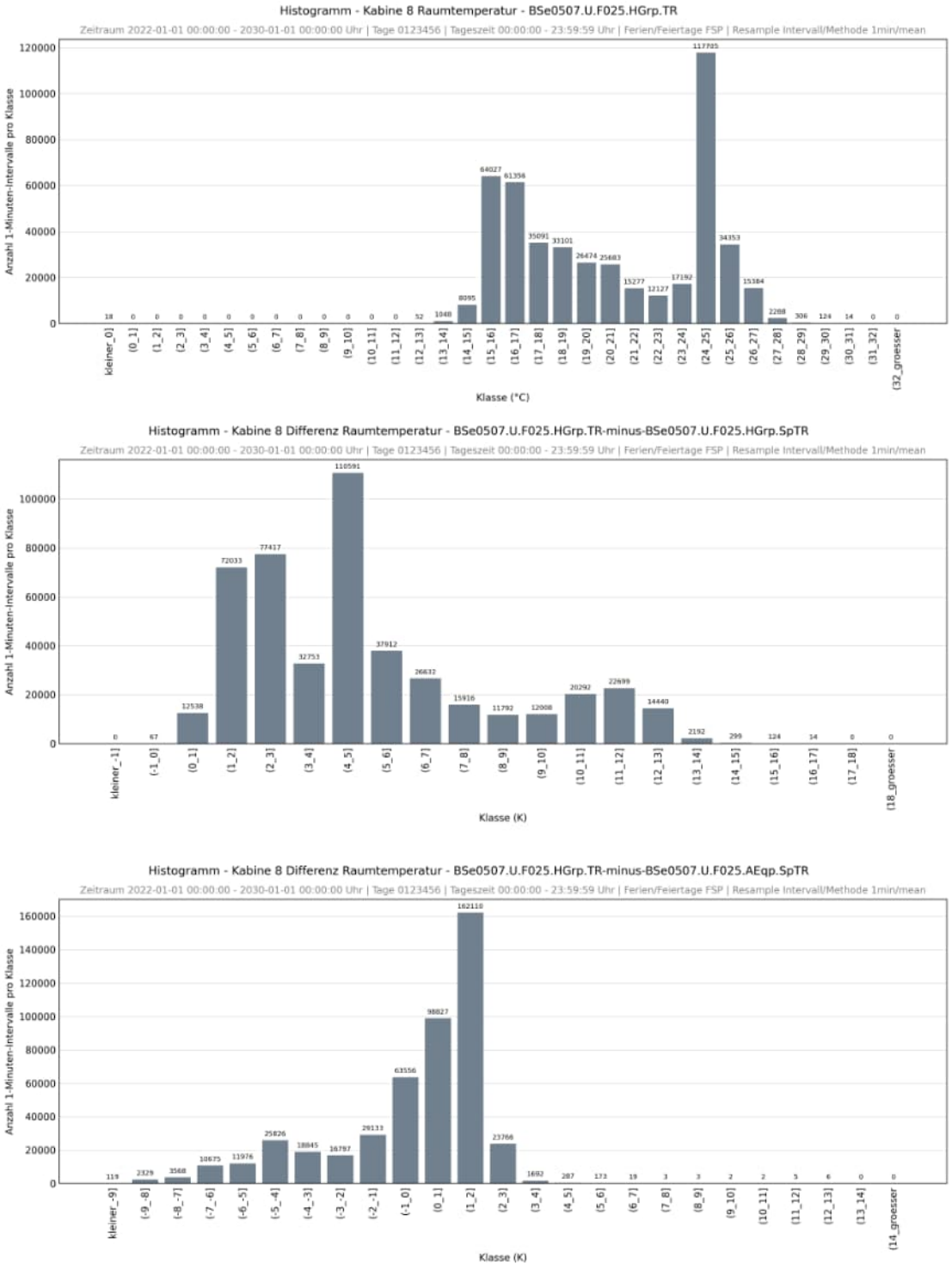


Abbildung 7.51.: Kabine 8 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

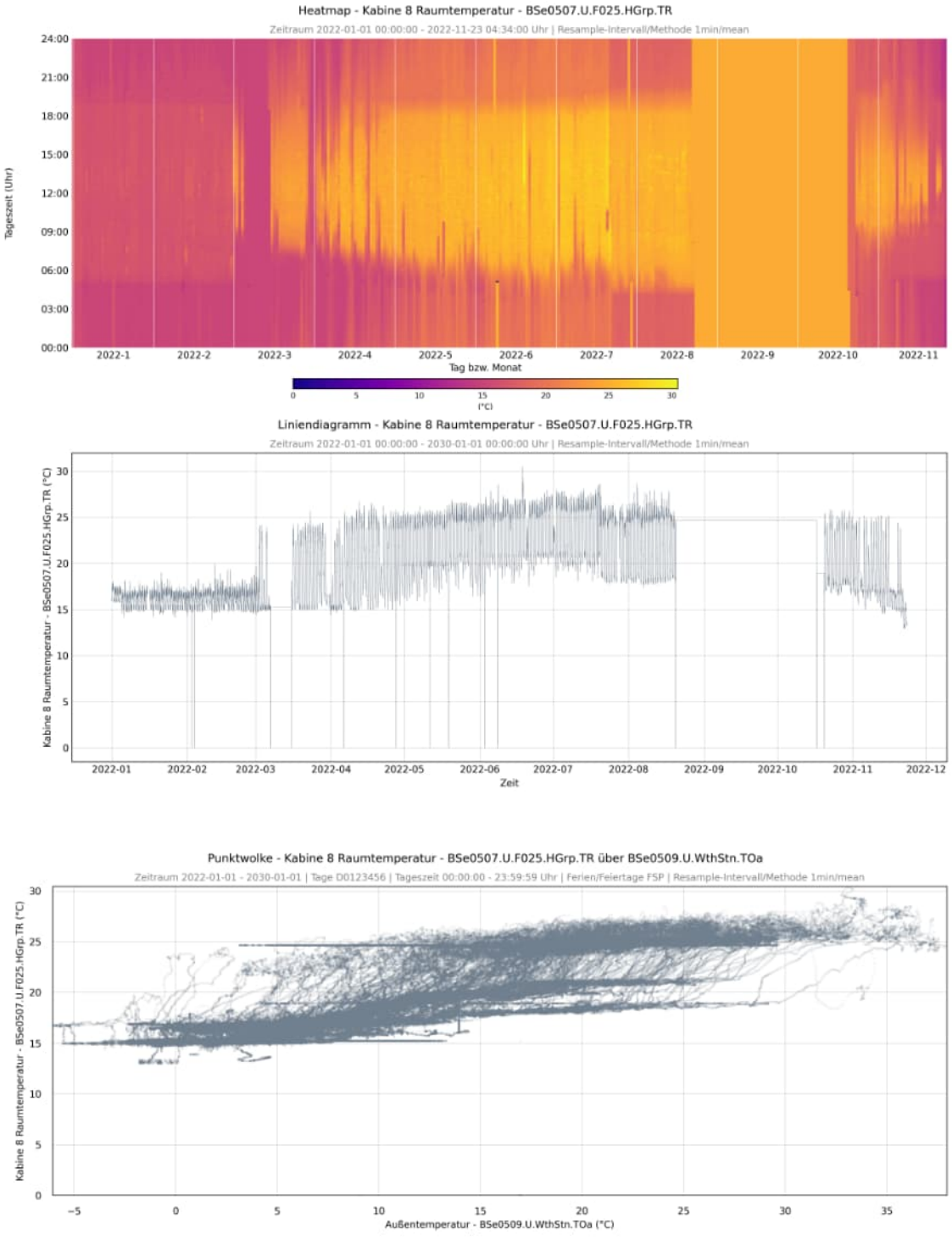


Abbildung 7.52.: Kabine 8 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

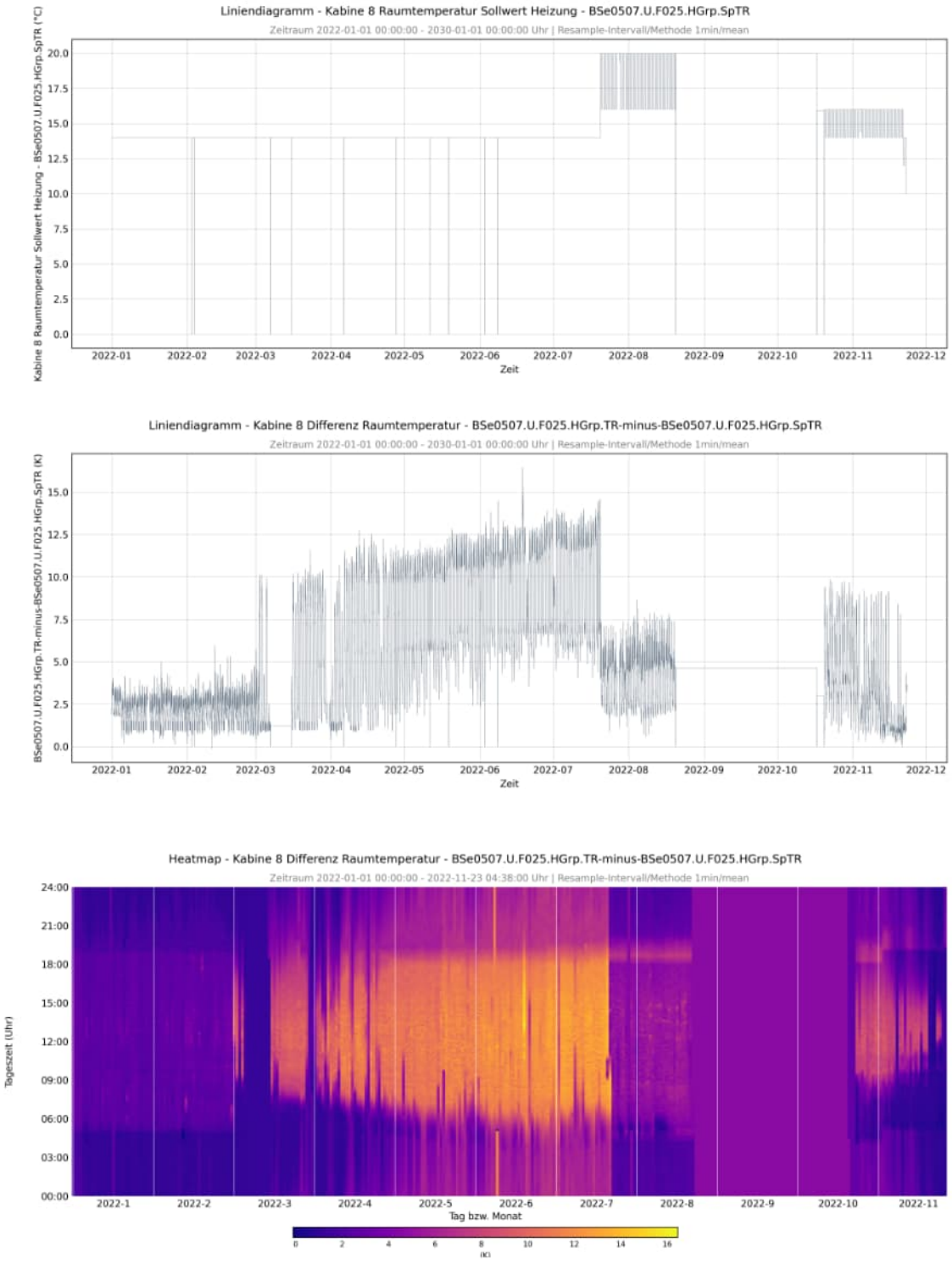


Abbildung 7.53.: Kabine 8 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

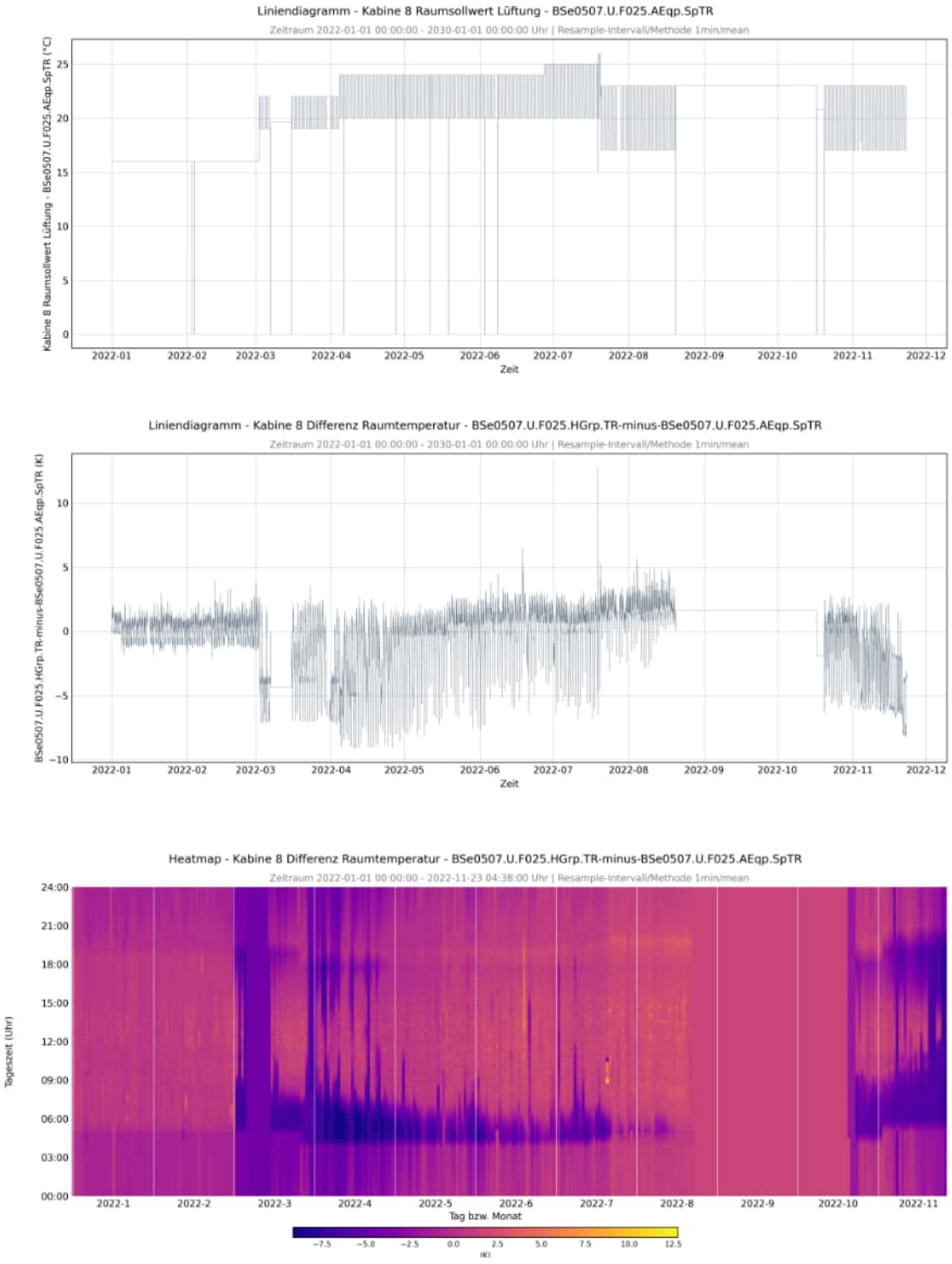


Abbildung 7.54.: Kabine 8 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

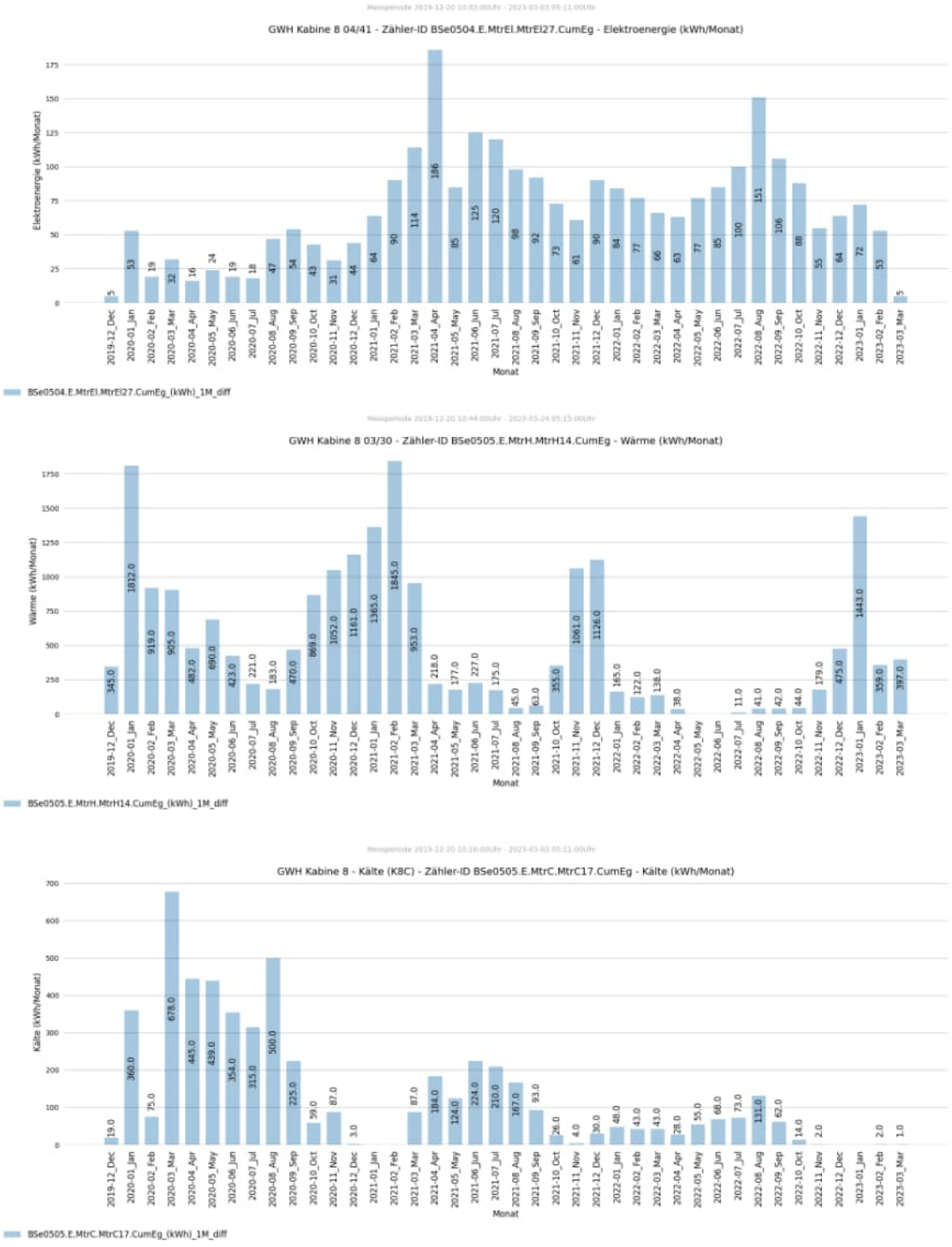


Abbildung 7.55.: Kabine 8 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

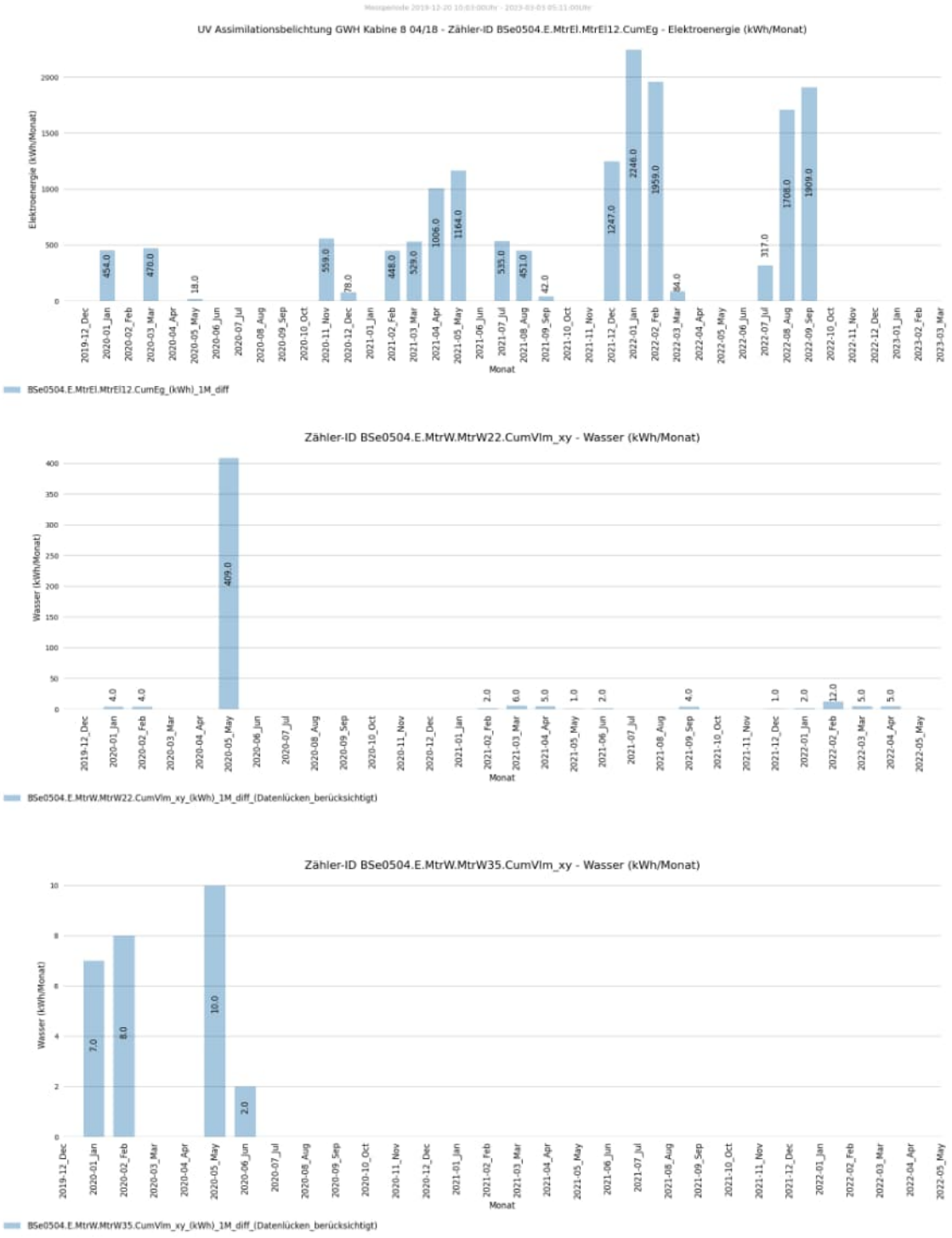


Abbildung 7.56.: Kabine 8 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.10. Kabine 9

Abbildung 7.57 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 9.

Abbildung 7.57.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 9

Abbildung 7.59 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 9 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.60 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.61 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.10 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	19.65
Median	°C	20.05
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.05 / 30.05
Standardabw.	K	4.02
Varianz	K	16.2
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	14.8 / 25.03 / 10.23
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	17.88 / 21.87 / 3.99

Tabelle 7.10.: Kabine 9 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0508.U.F029.HGrp.TR

Abbildung 7.58 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 18 und 25°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 12 und 13°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 8,2 Stunden registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 6 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,0°C gemessen, siehe Abbildung 7.58.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.60 und Abbildung 7.61 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.62 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.63 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

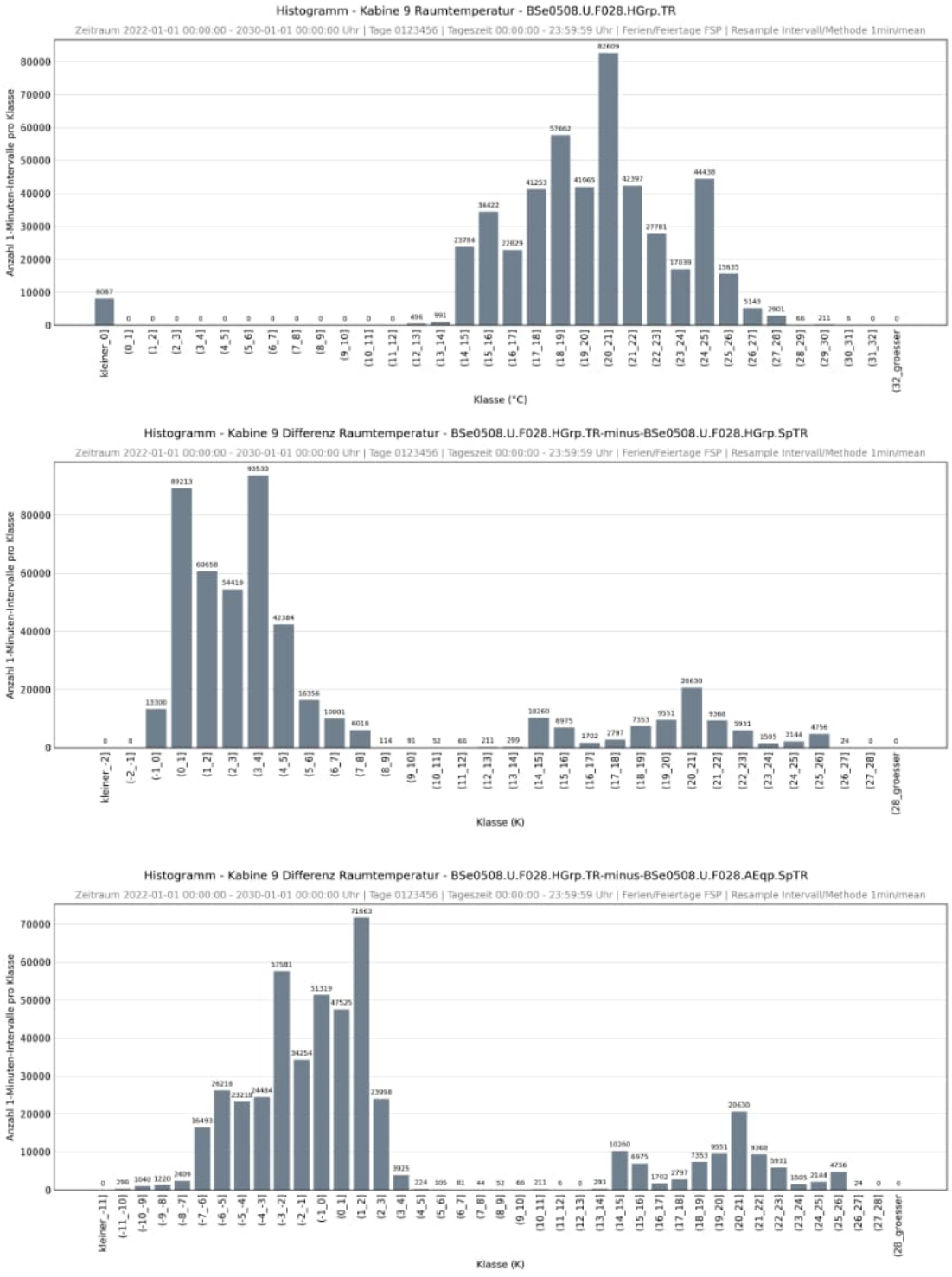


Abbildung 7.58.: Kabine 9 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

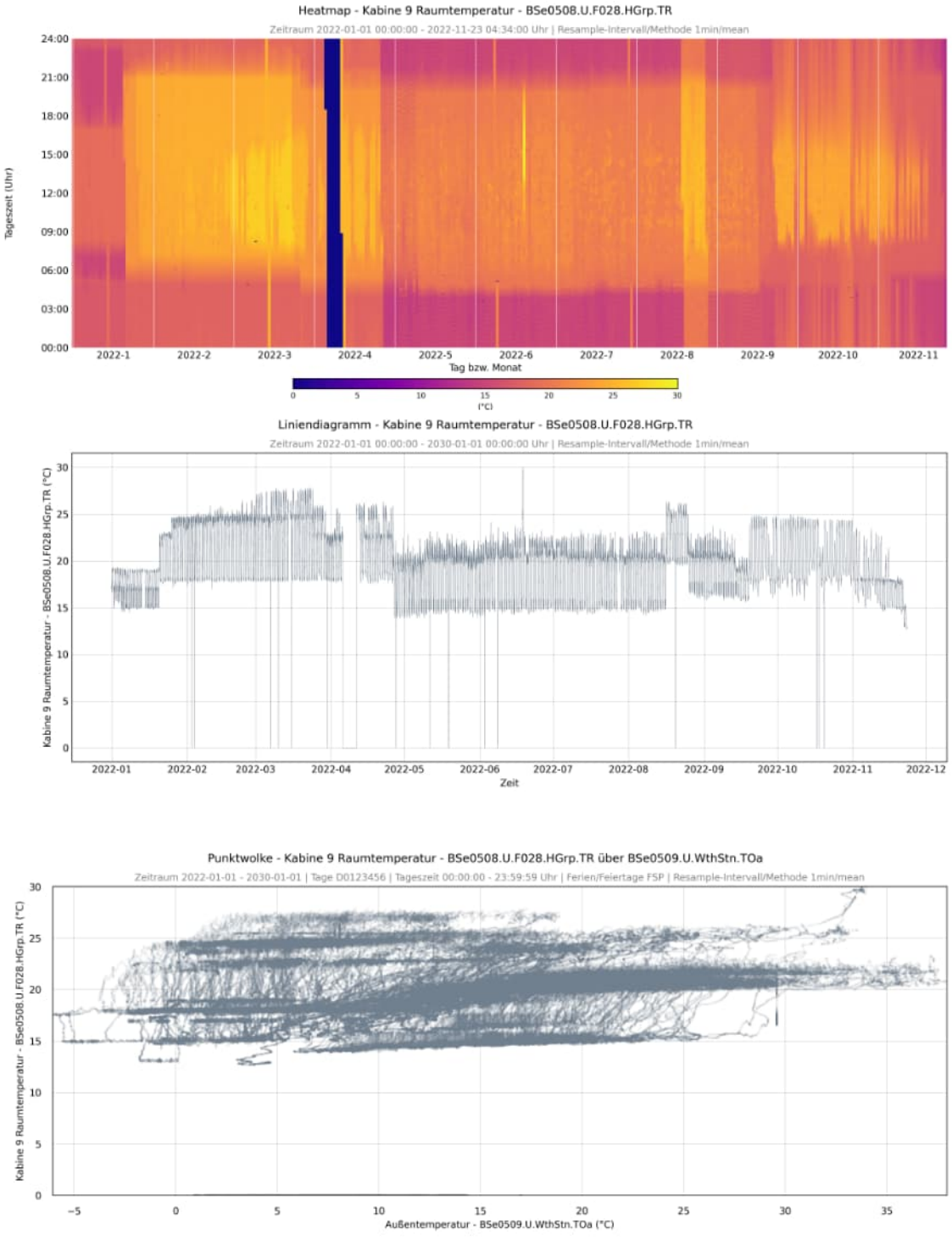


Abbildung 7.59.: Kabine 9 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

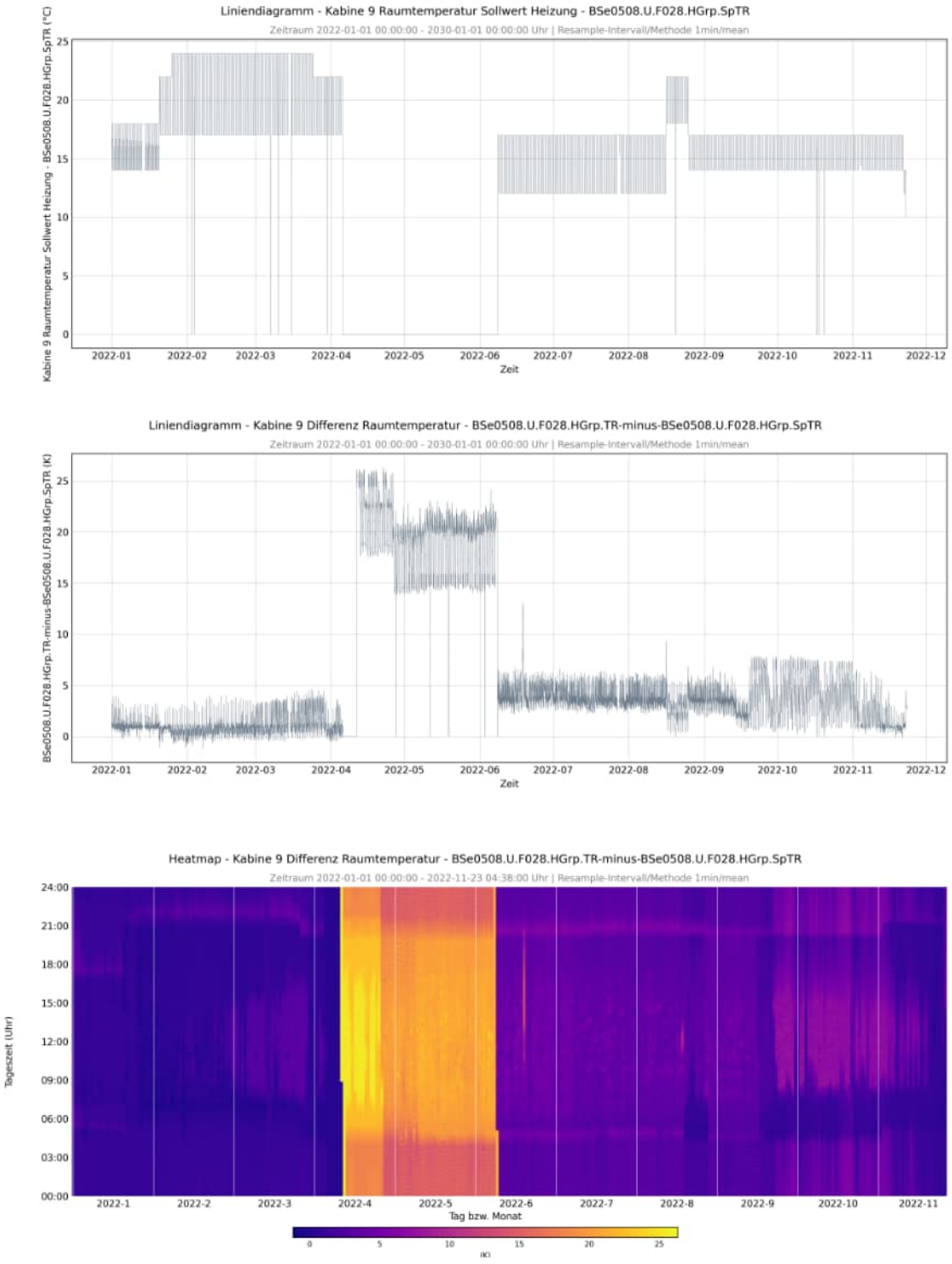


Abbildung 7.60.: Kabine 9 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

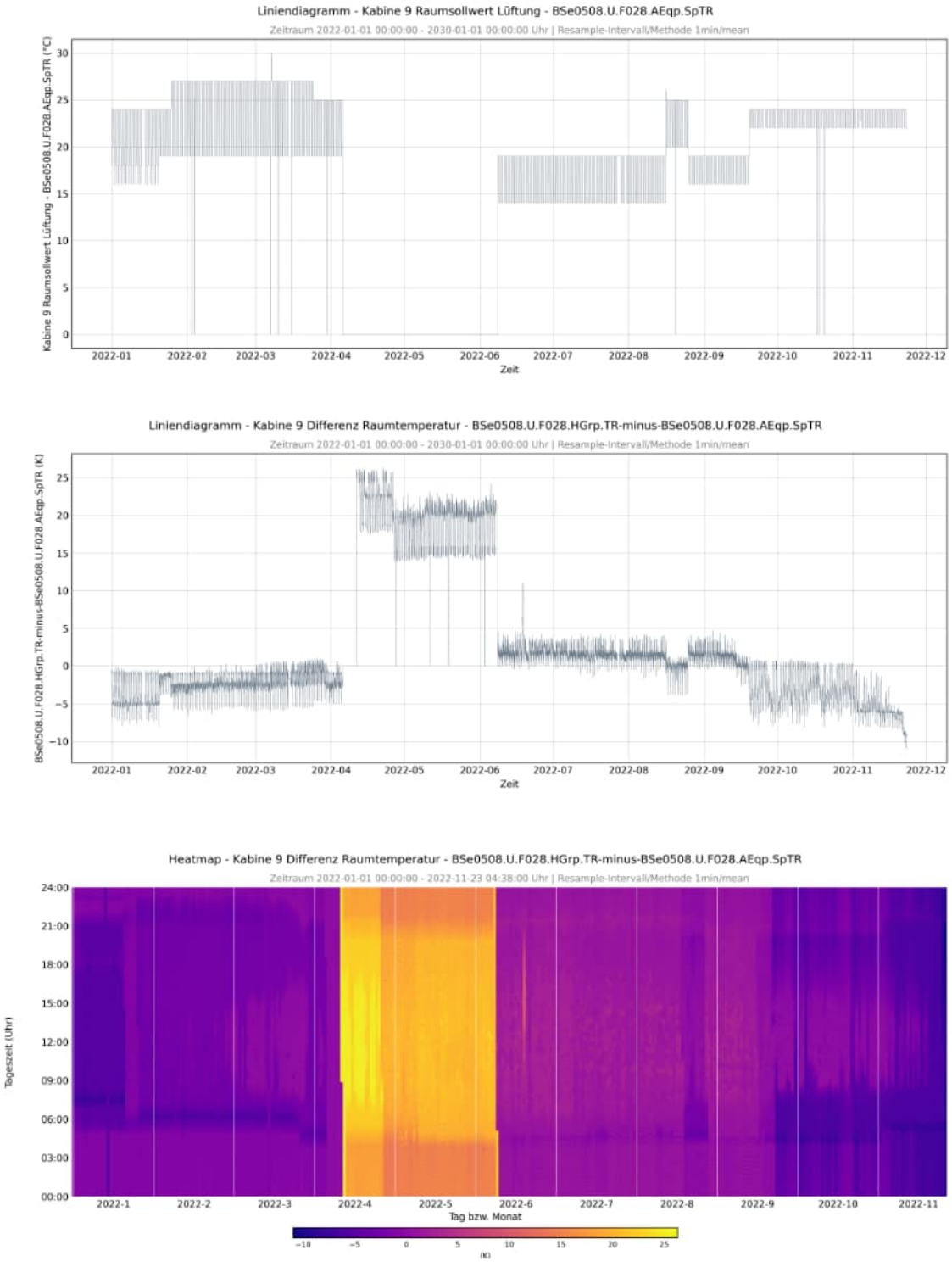


Abbildung 7.61.: Kabine 9 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

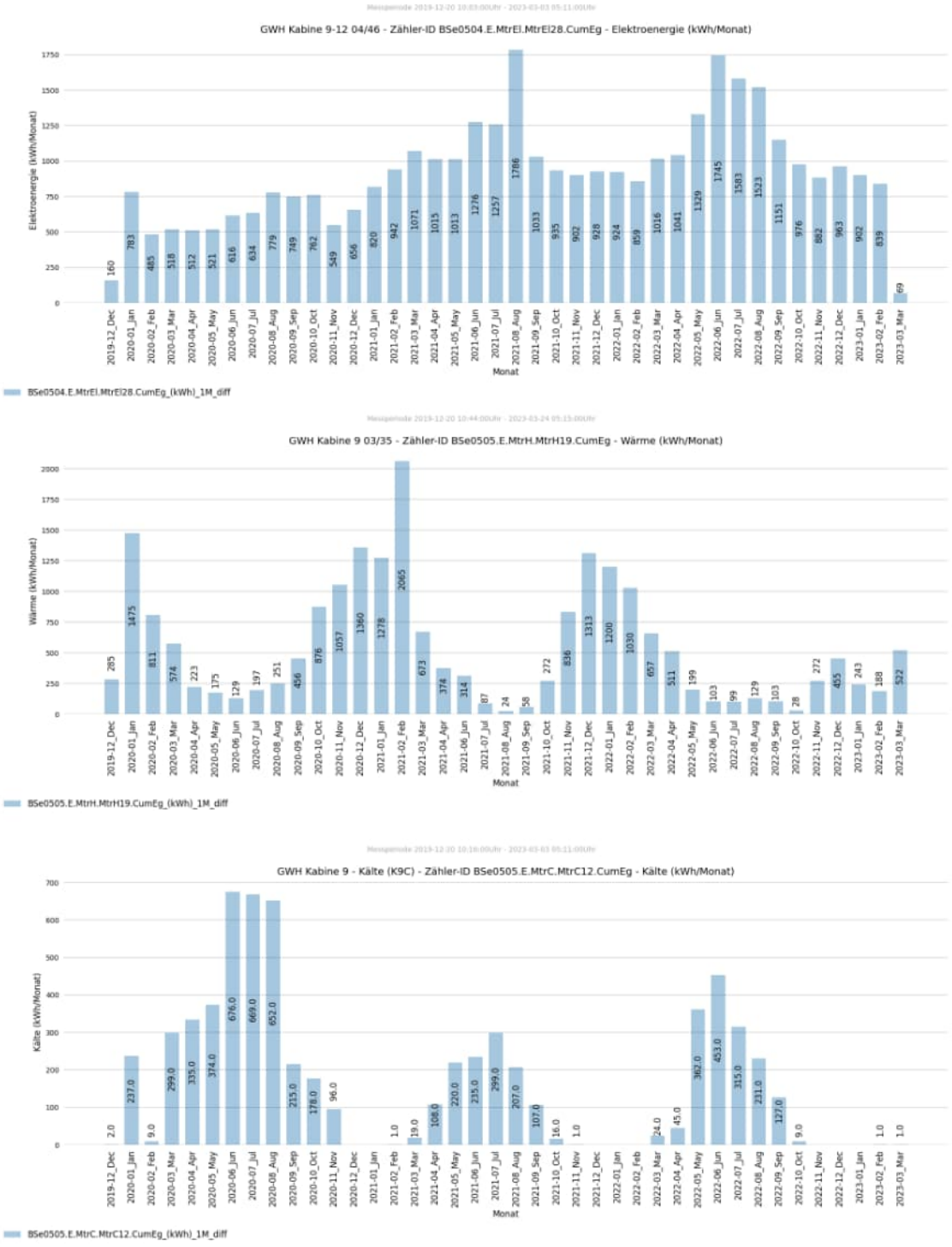


Abbildung 7.62.: Kabine 9 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

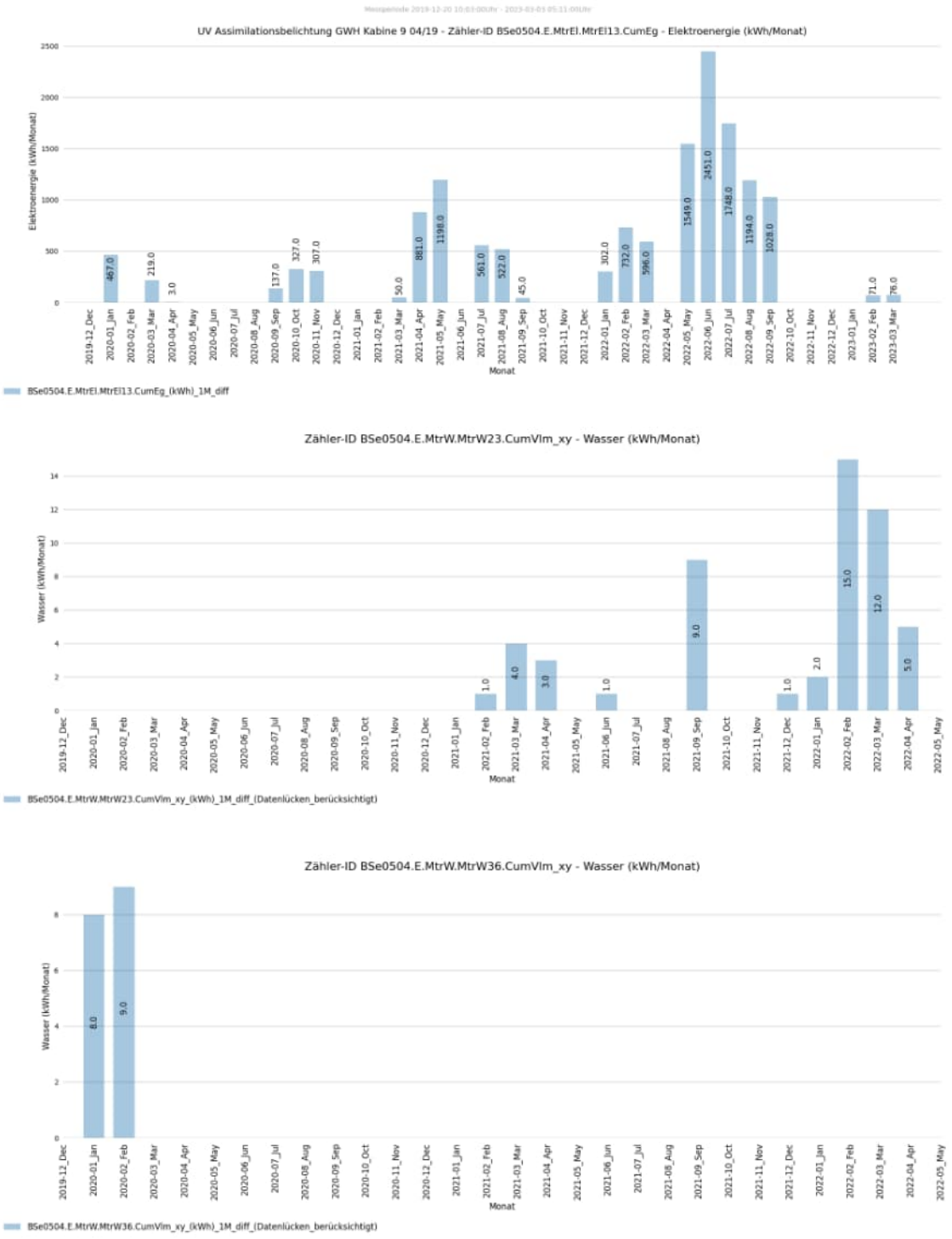


Abbildung 7.63.: Kabine 9 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.11. Kabine 10

Abbildung 7.64 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 10.

Abbildung 7.64.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 10

Abbildung 7.66 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 10 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.67 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.68 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.11 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	20.15
Median	°C	19.99
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 30.87 / 30.87
Standardabw.	K	2.93
Varianz	K	8.57
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	15.19 / 24.94 / 9.75
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.12 / 22.11 / 3.99

Tabelle 7.11.: Kabine 10 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0508.U.F029.HGrp.TR

Abbildung 7.65 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-

Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 20 und 25°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 12 und 13°C wurden während eines Betriebszeitraumes von 12 Minuten registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 172 Minuten hinweg Werte von über 30°C mit einem Maximalwert bei 30,9°C gemessen, siehe Abbildung 7.65.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.67 und Abbildung 7.68 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.69 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.70 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

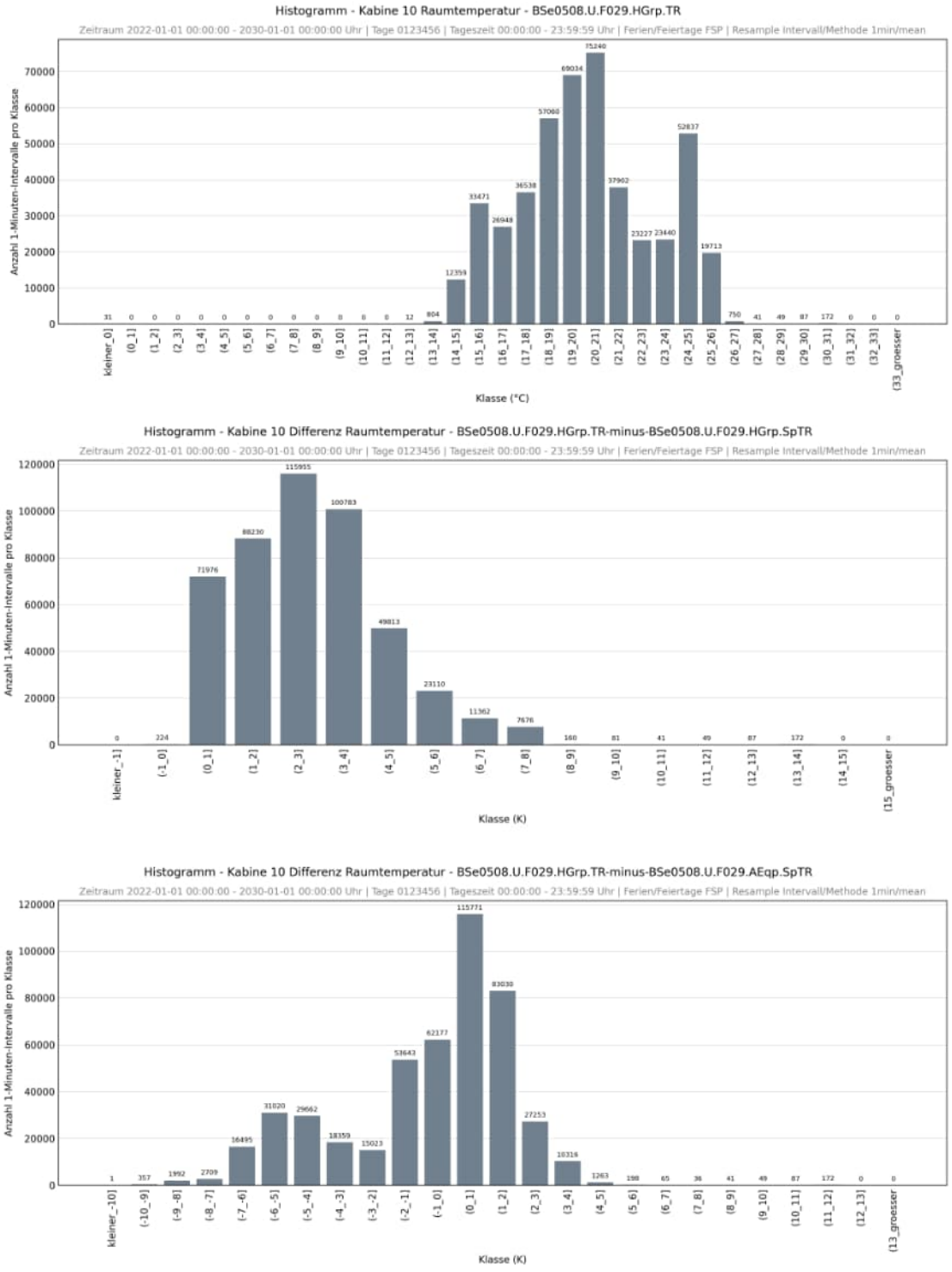


Abbildung 7.65.: Kabine 10 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

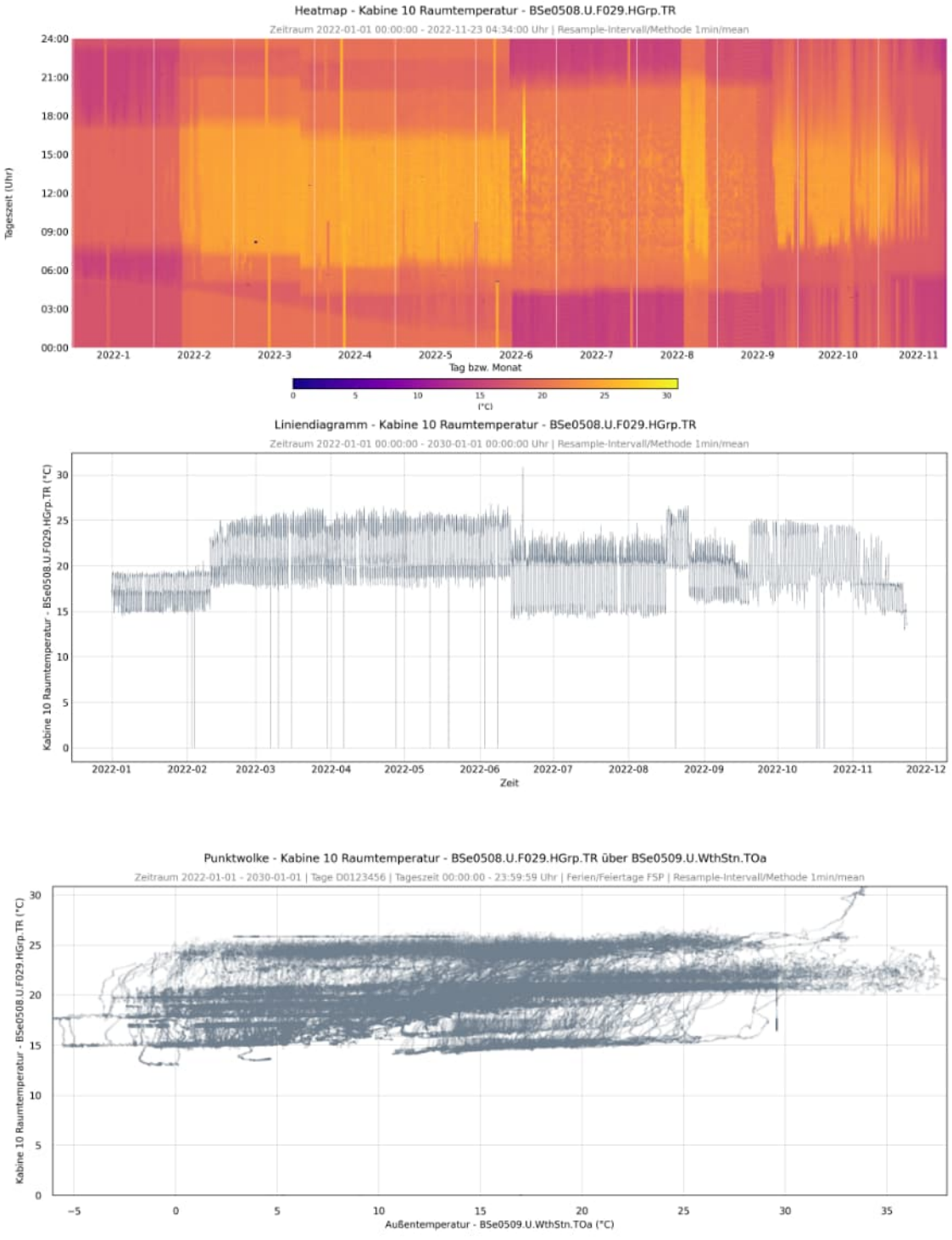


Abbildung 7.66.: Kabine 10 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

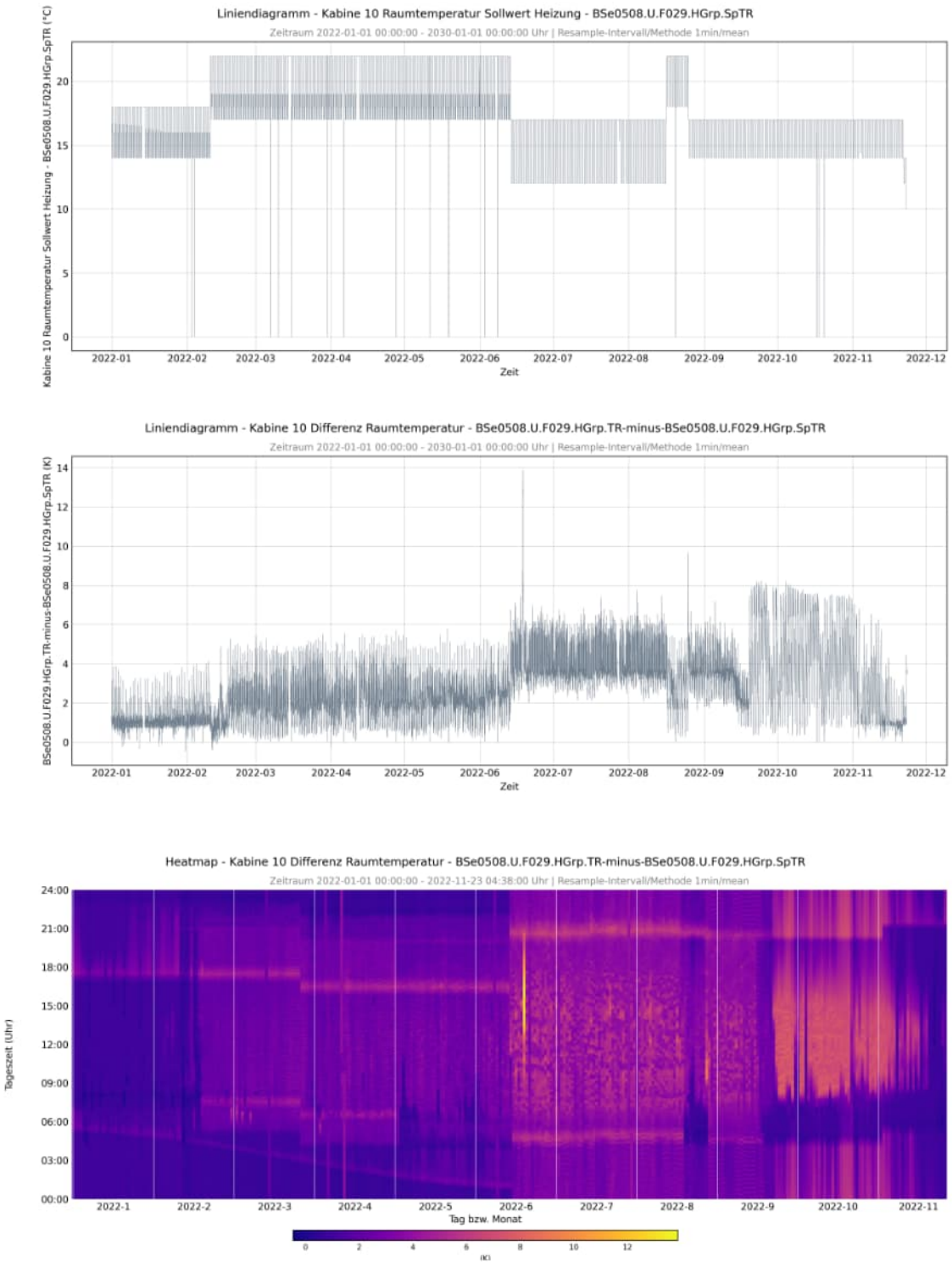


Abbildung 7.67.: Kabine 10 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

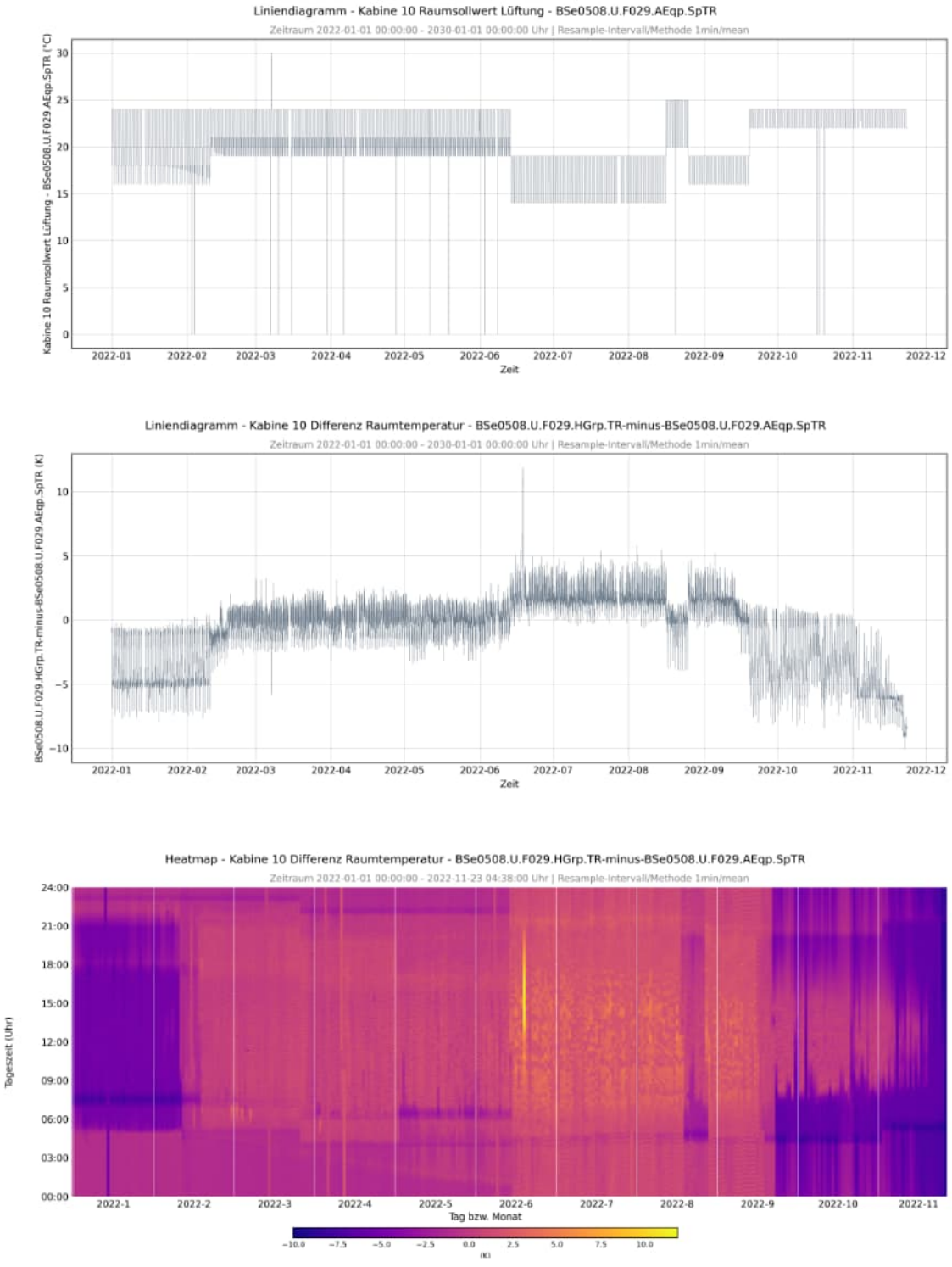


Abbildung 7.68.: Kabine 10 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

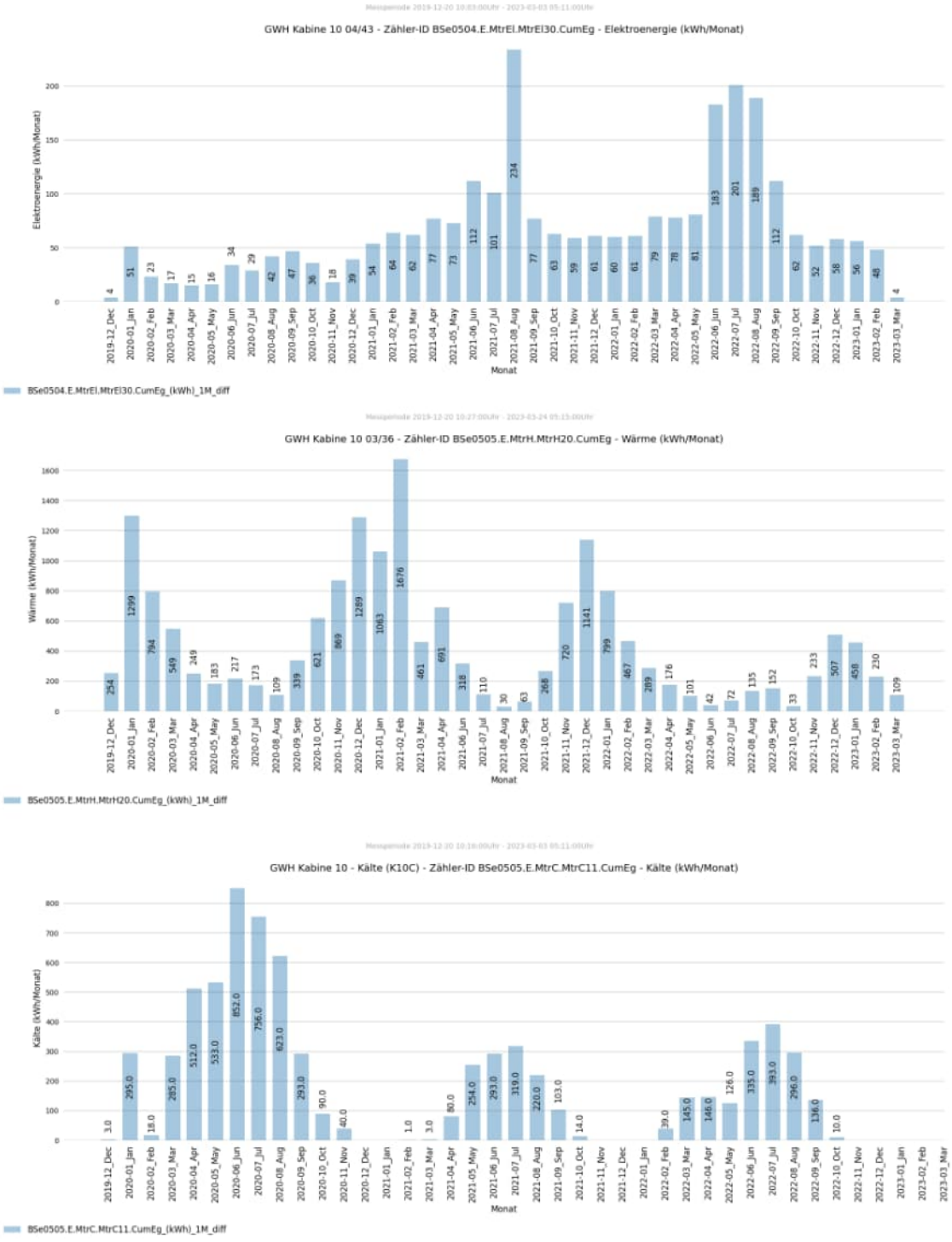


Abbildung 7.69.: Kabine 10 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

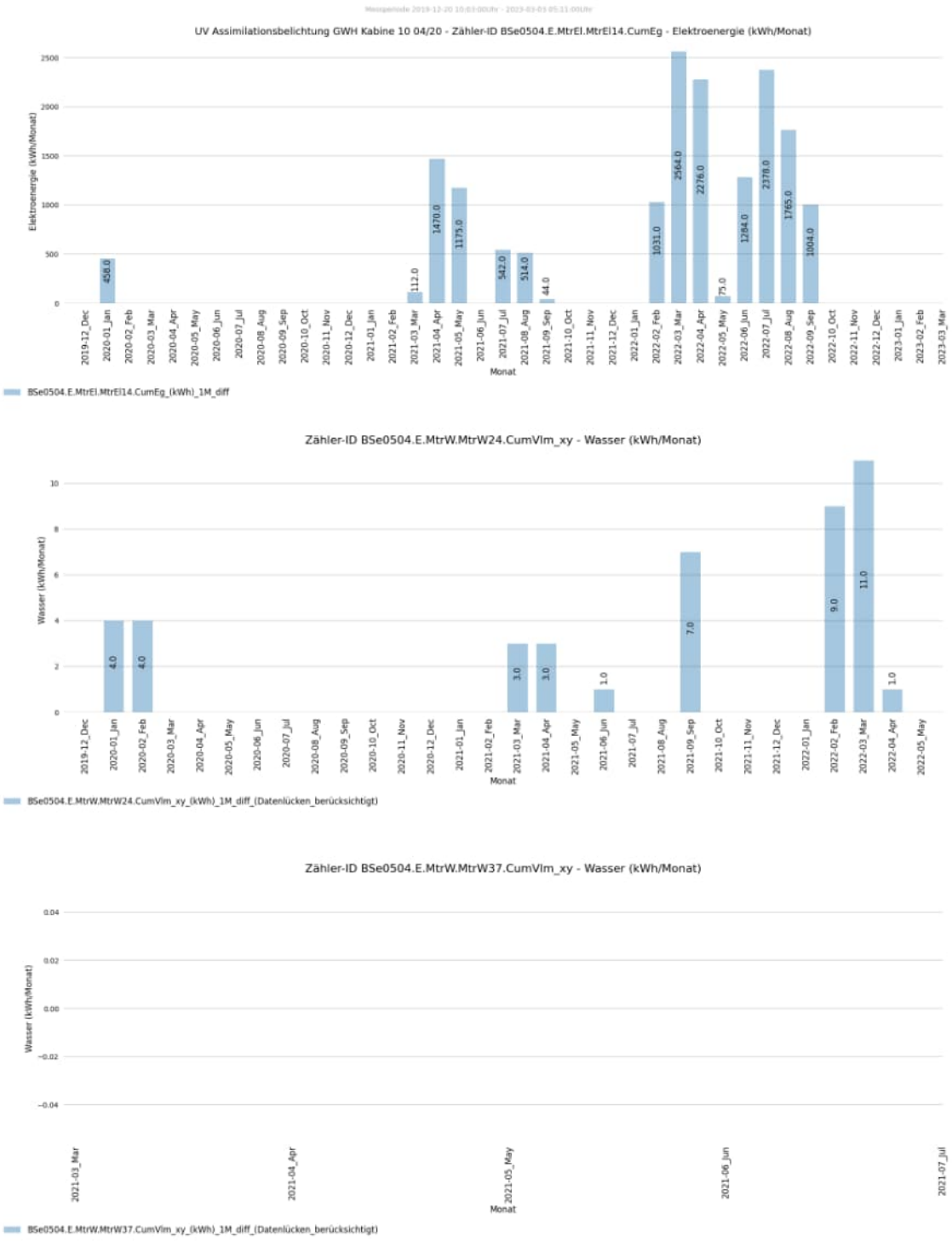


Abbildung 7.70.: Kabine 10 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.12. Kabine 11

Abbildung 7.71 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 11.

Abbildung 7.71.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 11

Abbildung 7.73 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 11 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.74 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.75 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.12 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	5.06
Median	°C	0.0
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 24.56 / 24.56
Standardabw.	K	8.45
Varianz	K	71.45
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	0.0 / 23.15 / 23.15
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	0.0 / 15.43 / 15.43

Tabelle 7.12.: Kabine 11 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0508.U.F030.HGrp.TR

Für diese Kabine lagen innerhalb der Bilanzperiode aufgrund von Umstellungen im IT-System

zur Datenübertragung zwischen dem Forschungsgewächshaus und der zentralen Gebäudeleittechnik der Universität Leipzig valide Werte lediglich zwischen dem 01.01.2022 und dem 15.03.2022 vor. Daher ist eine nachfolgende Bewertung der thermischen Situation in der Kabine nur eingeschränkt aussagekräftig.
Abbildung 7.72 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 15 und 20°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 14 und 15°C wurden während eines Betriebszeitraumes von ca. 17 Stunden registriert. Während des Auswertezeitraumes wurden über 368 Stunden hinweg Werte von über 24°C mit einem Maximalwert bei 24,6°C gemessen, siehe Abbildung 7.72.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.74 und Abbildung 7.75 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.76 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.77 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

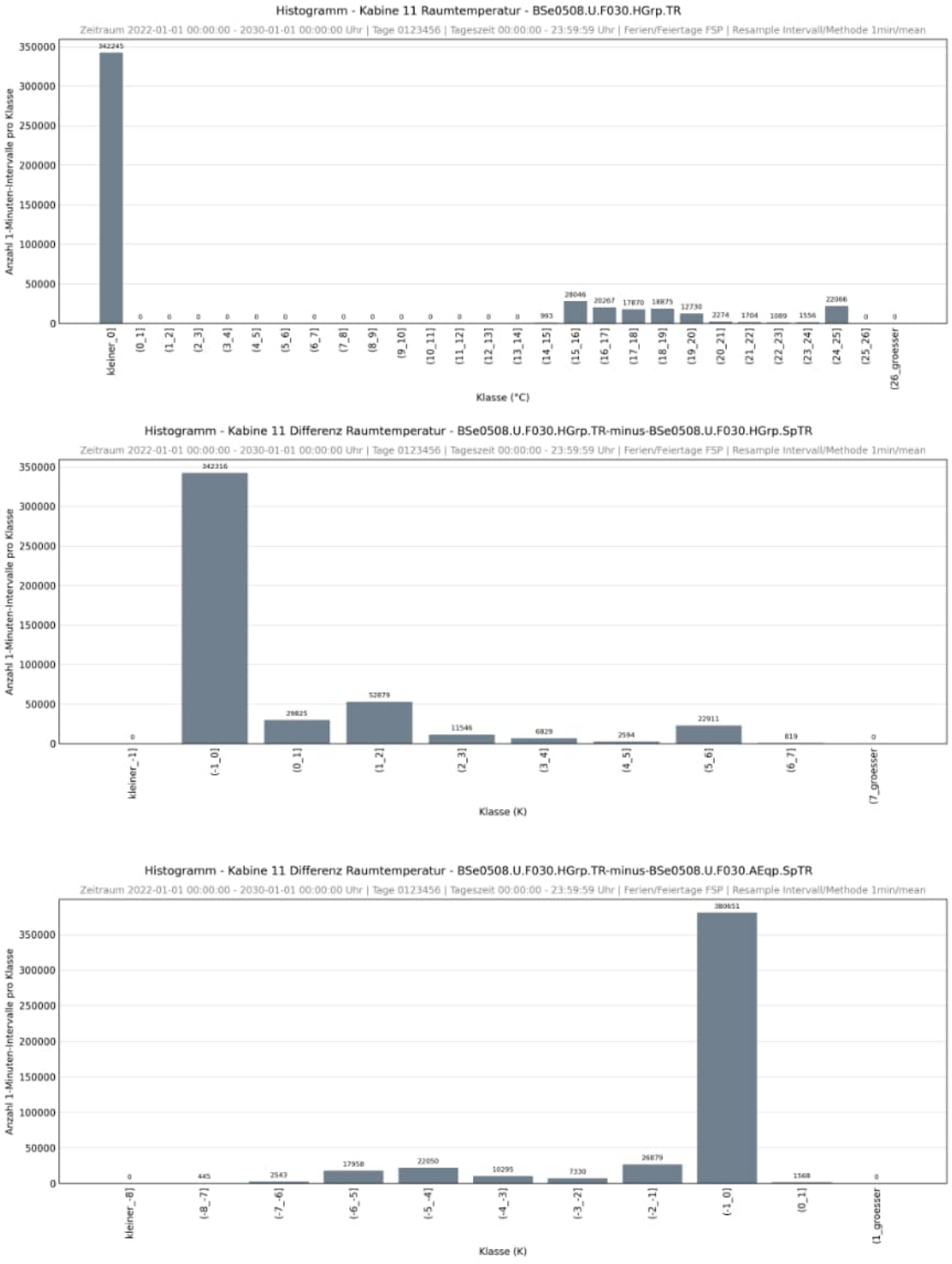


Abbildung 7.72.: Kabine 11 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

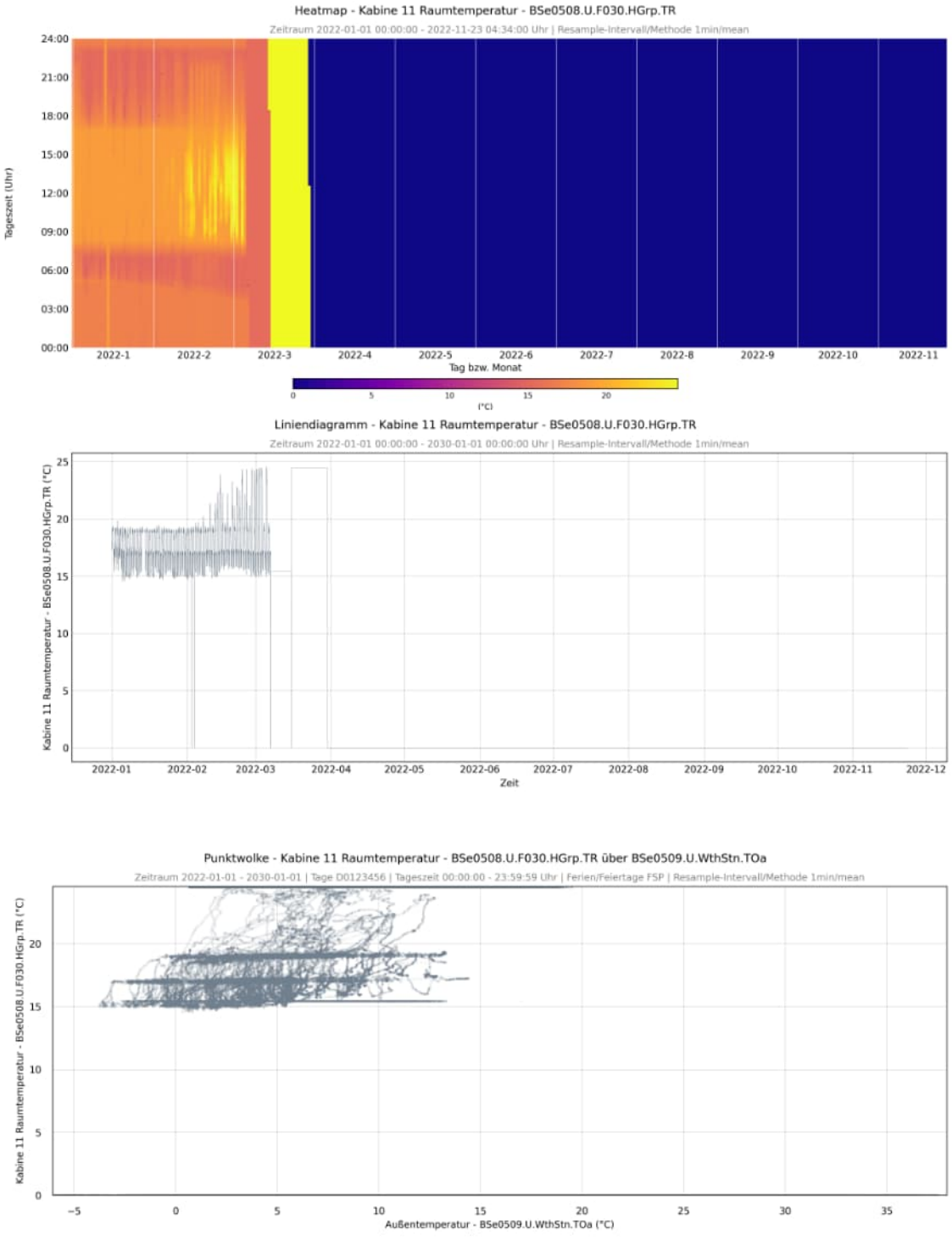


Abbildung 7.73.: Kabine 11 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

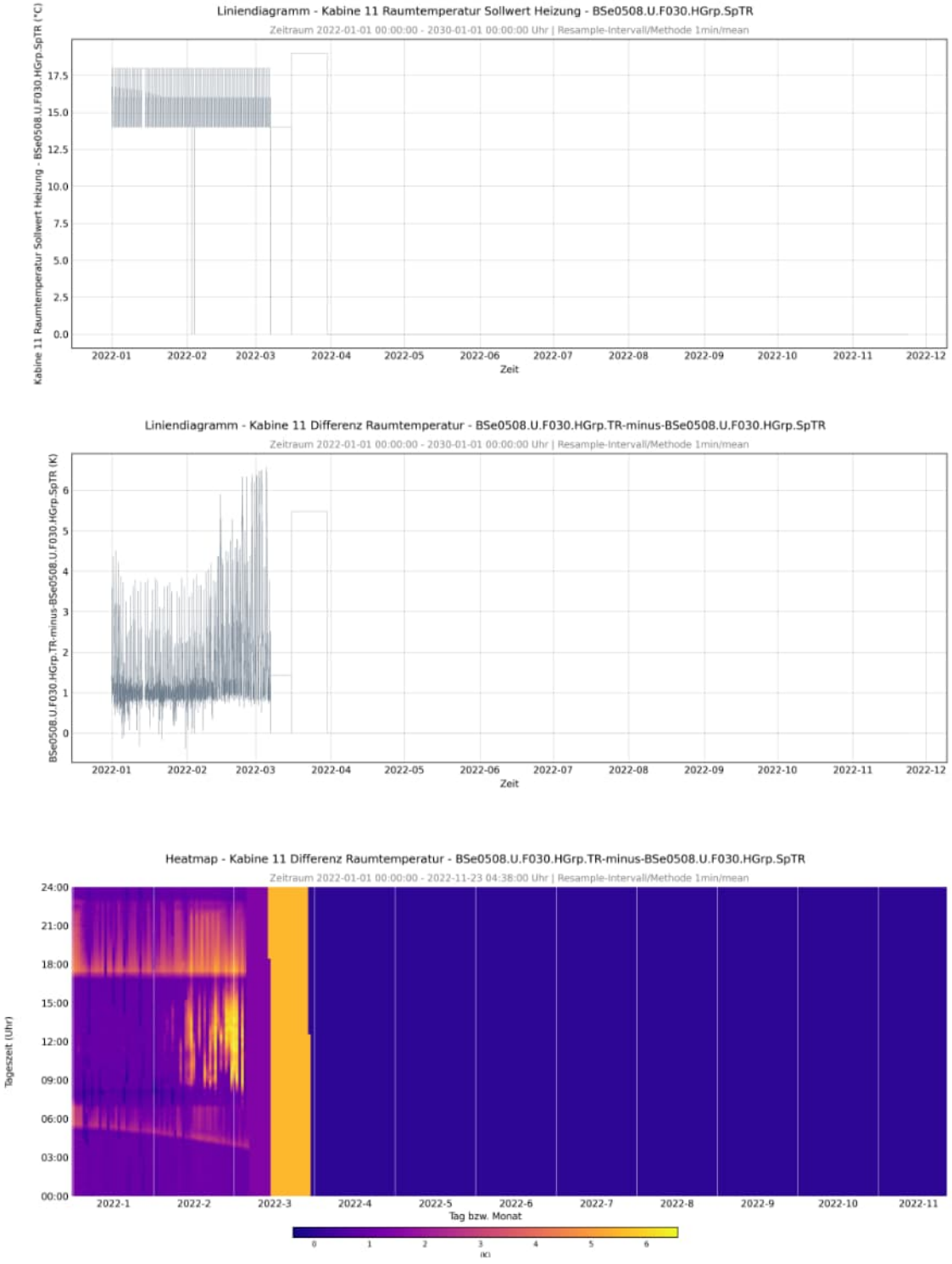


Abbildung 7.74.: Kabine 11 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

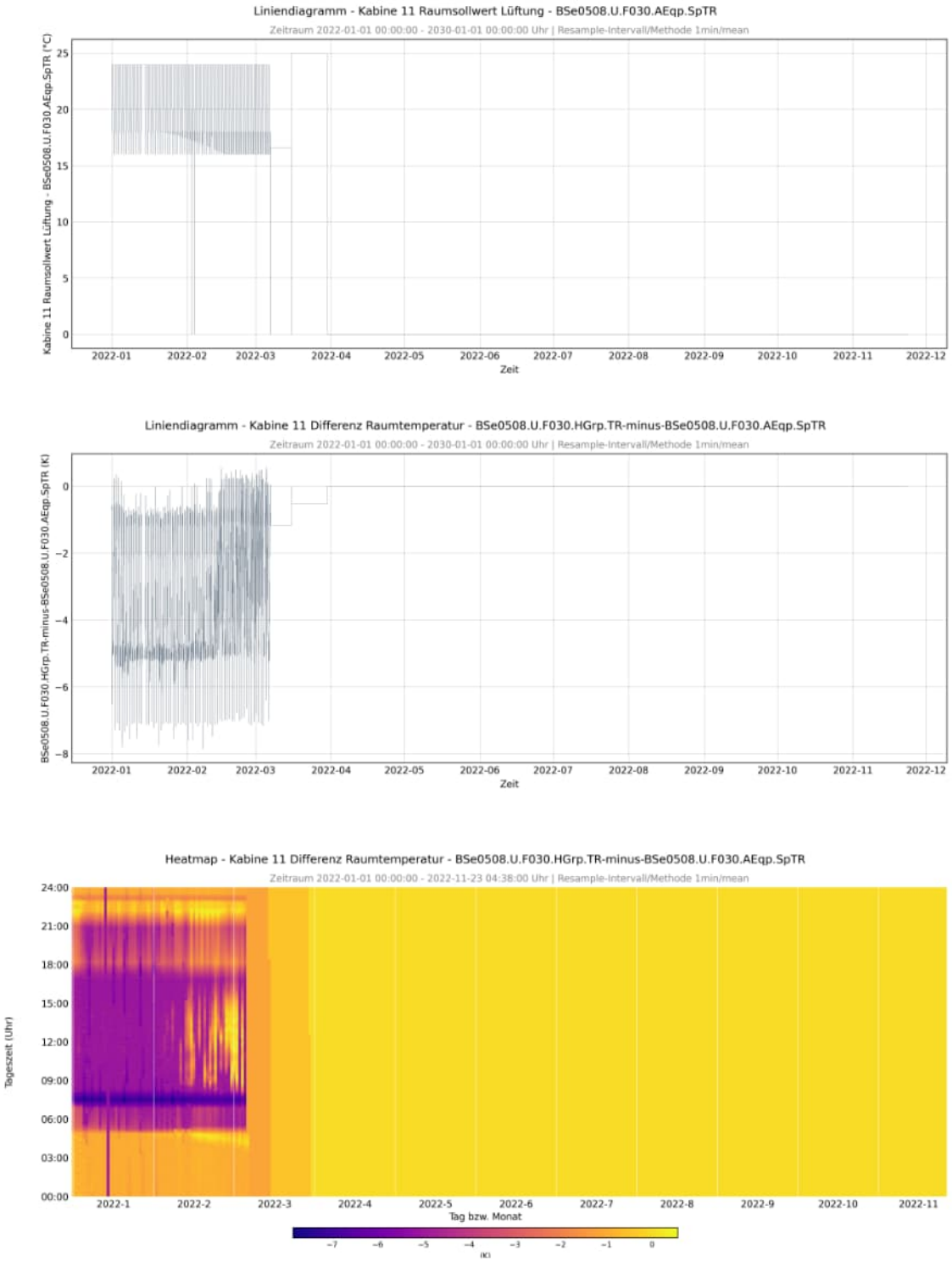


Abbildung 7.75.: Kabine 11 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

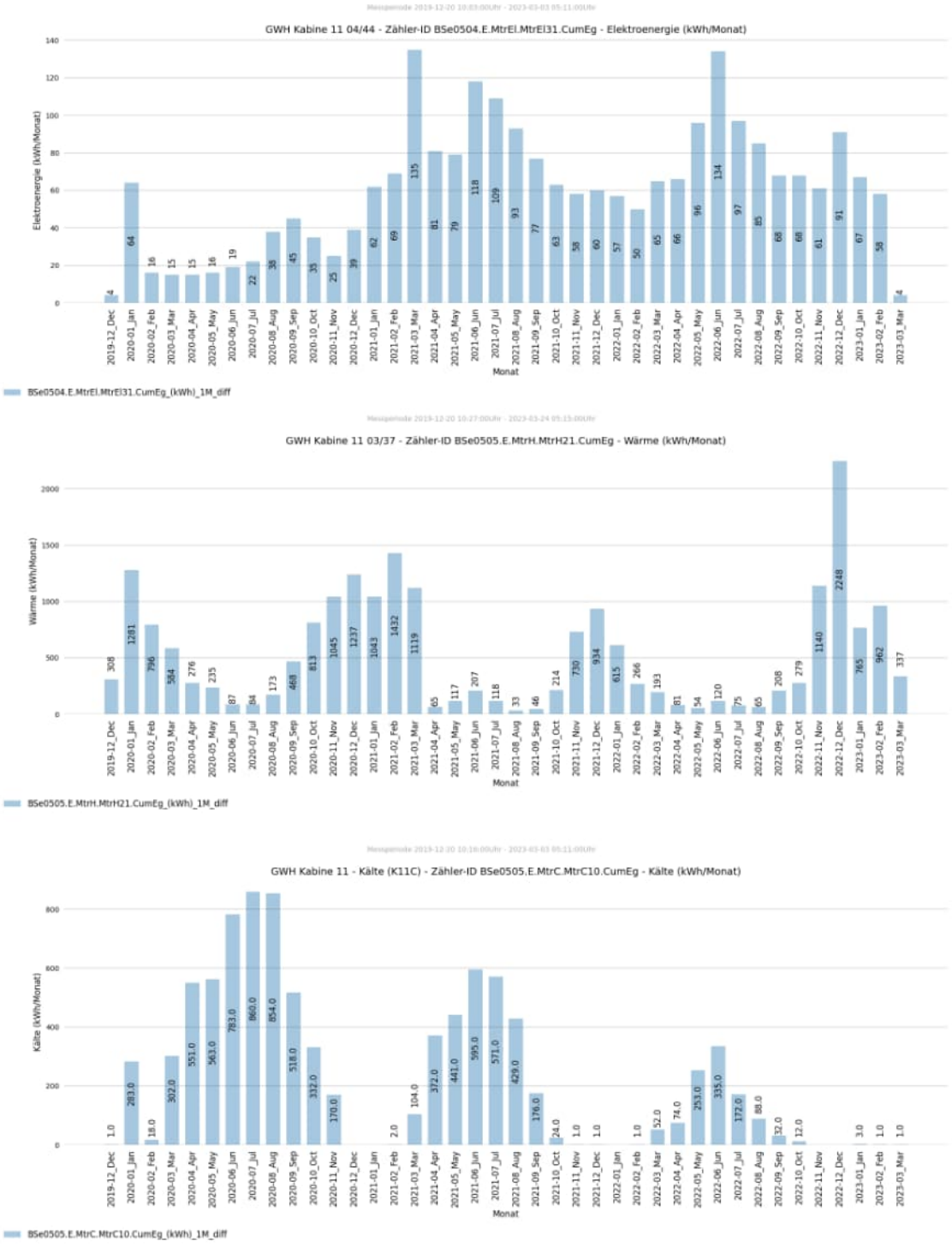


Abbildung 7.76.: Kabine 11 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

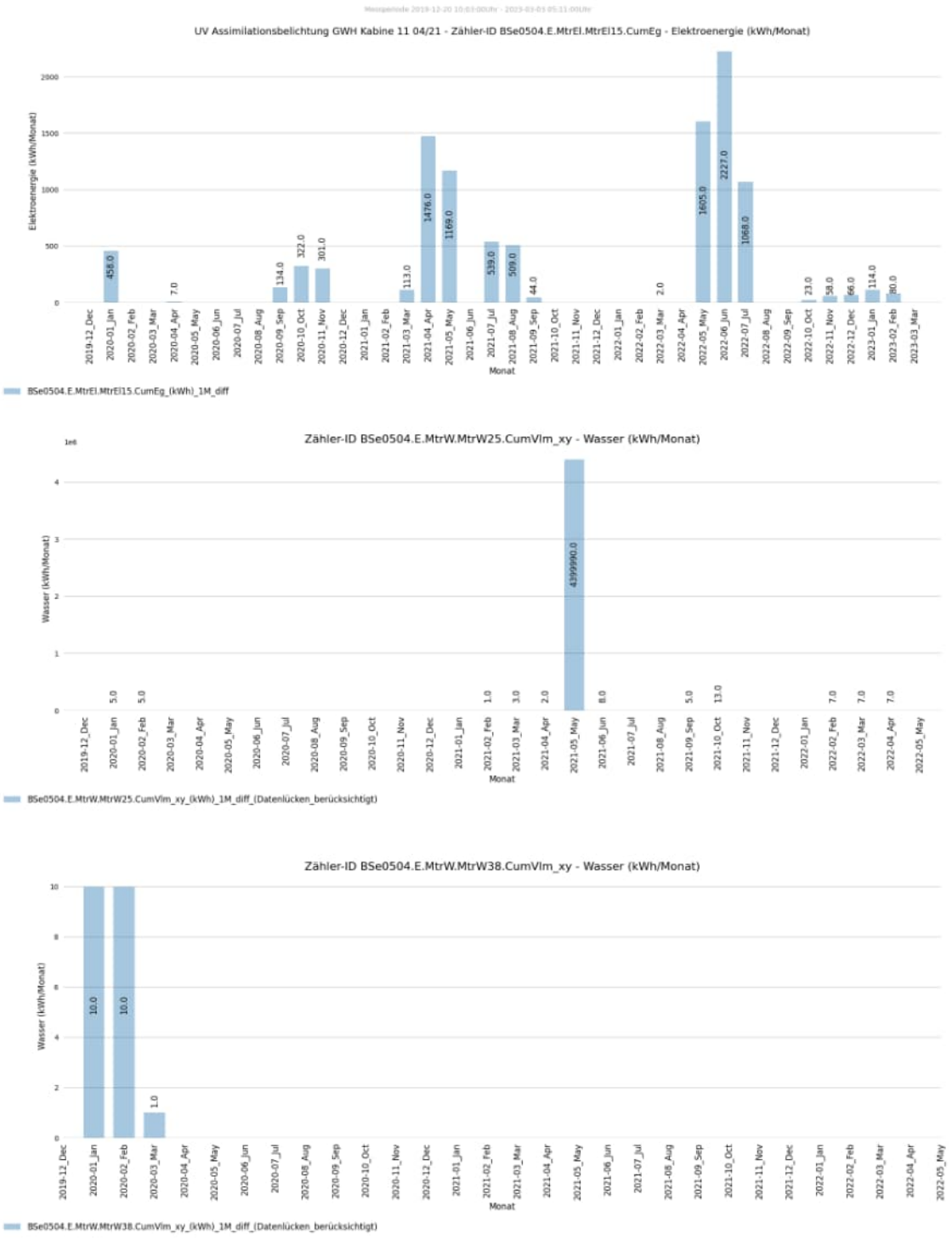


Abbildung 7.77.: Kabine 11 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.13. Kabine 12

Abbildung 7.78 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung von Kabine 12.

Abbildung 7.78.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung von Kabine 12

Abbildung 7.80 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in Kabine 12 in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.81 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.82 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.13 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.

Ergebnisse		
Wertemenge		469719 Minuten
Mittelwert	°C	5.05
Median	°C	0.0
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 23.41 / 23.41
Standardabw.	K	8.34
Varianz	K	69.53
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	0.0 / 19.83 / 19.83
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	0.0 / 15.06 / 15.06

Tabelle 7.13.: Kabine 12 - Statistik zur Raumtemperatur - BSe0508.U.F031.HGrp.TR

Wie für Kabine 12 bereits angemerkt, lagen für diese Kabine innerhalb der Bilanzperiode

aufgrund von Umstellungen im IT-System zur Datenübertragung zwischen dem Forschungsgewächshaus und der zentralen Gebäudeleittechnik der Universität Leipzig valide Werte lediglich zwischen dem 01.01.2022 und dem 15.03.2022 vor. Daher ist eine nachfolgende Bewertung der thermischen Situation in der Kabine nur eingeschränkt aussagekräftig.
Abbildung 7.79 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 14 und 23°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 13 und 14°C wurden während eines Zeitraumes von von 10 Minuten erreicht. Während des Betriebszeitraumes wurden über 148 Minuten hinweg Werte von über 23°C bei einem Maximalwert von ca. 23,4°C gemessen, siehe Abbildung 7.79.

Die Raumtemperatur der Kabine wird in der Bilanzperiode durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.81 und Abbildung 7.82 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

In den Diagrammen der Abbildung 7.83 sind die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie exkl. Assimilationsbelichtung, Wärme sowie Kälte monatsweise ausgewertet. Abbildung 7.84 zeigt die Verbrauchswerte der Bilanzperiode für Elektroenergie zum Betrieb der Assimilationsbelichtung sowie die Volumina für Gießwasser und Dosierwasser monatsweise aggregiert.

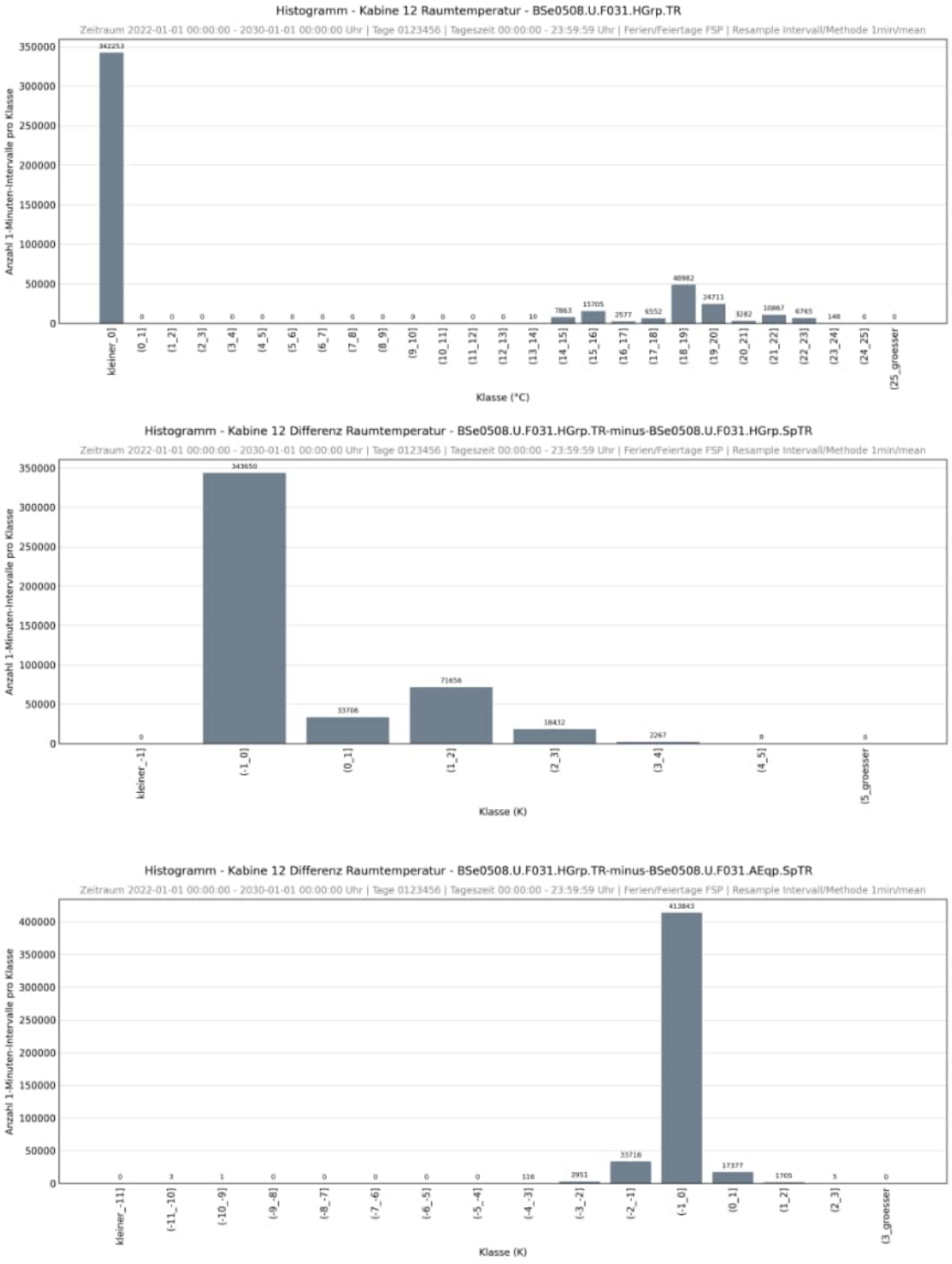


Abbildung 7.79.: Kabine 12 - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

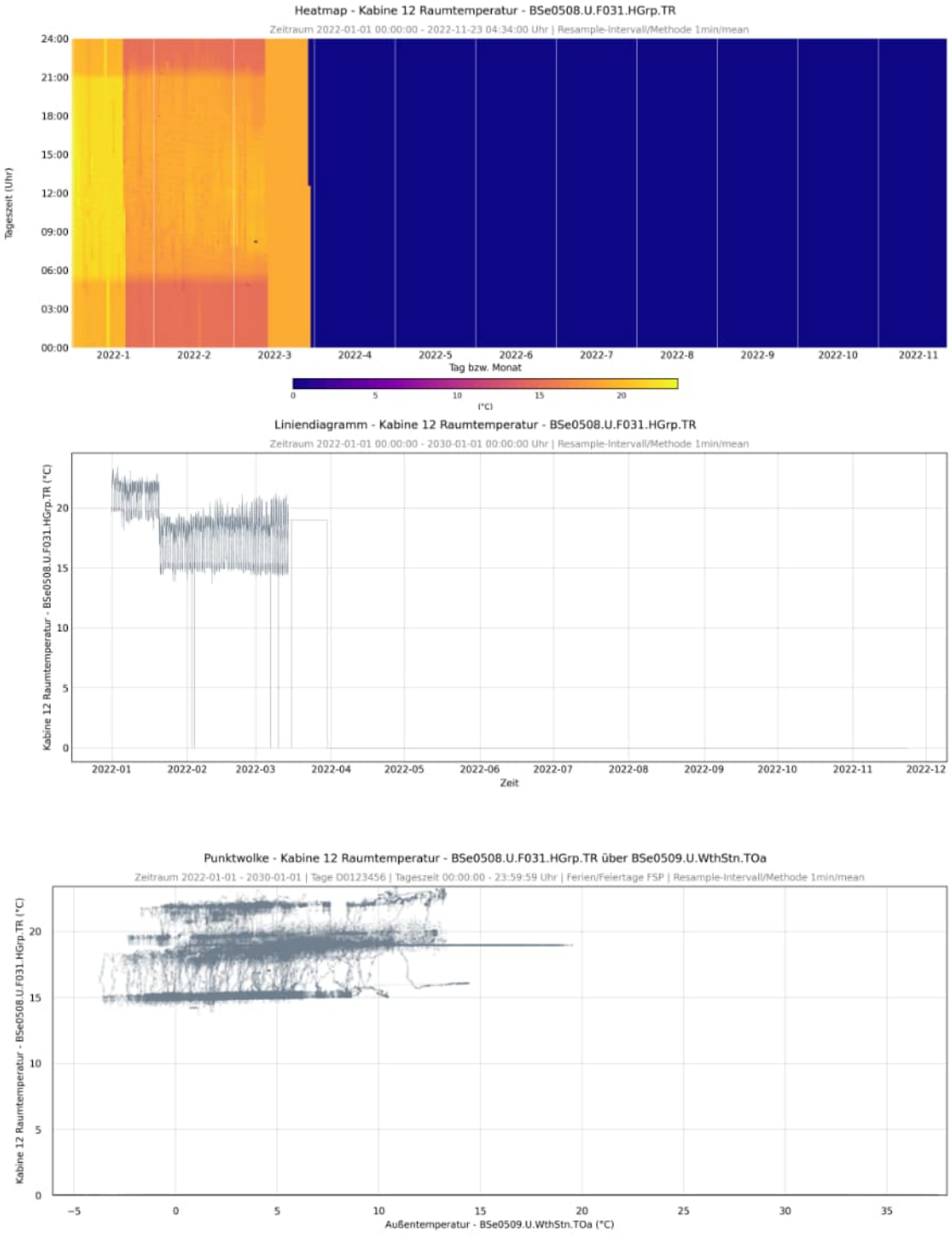


Abbildung 7.80.: Kabine 12 - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

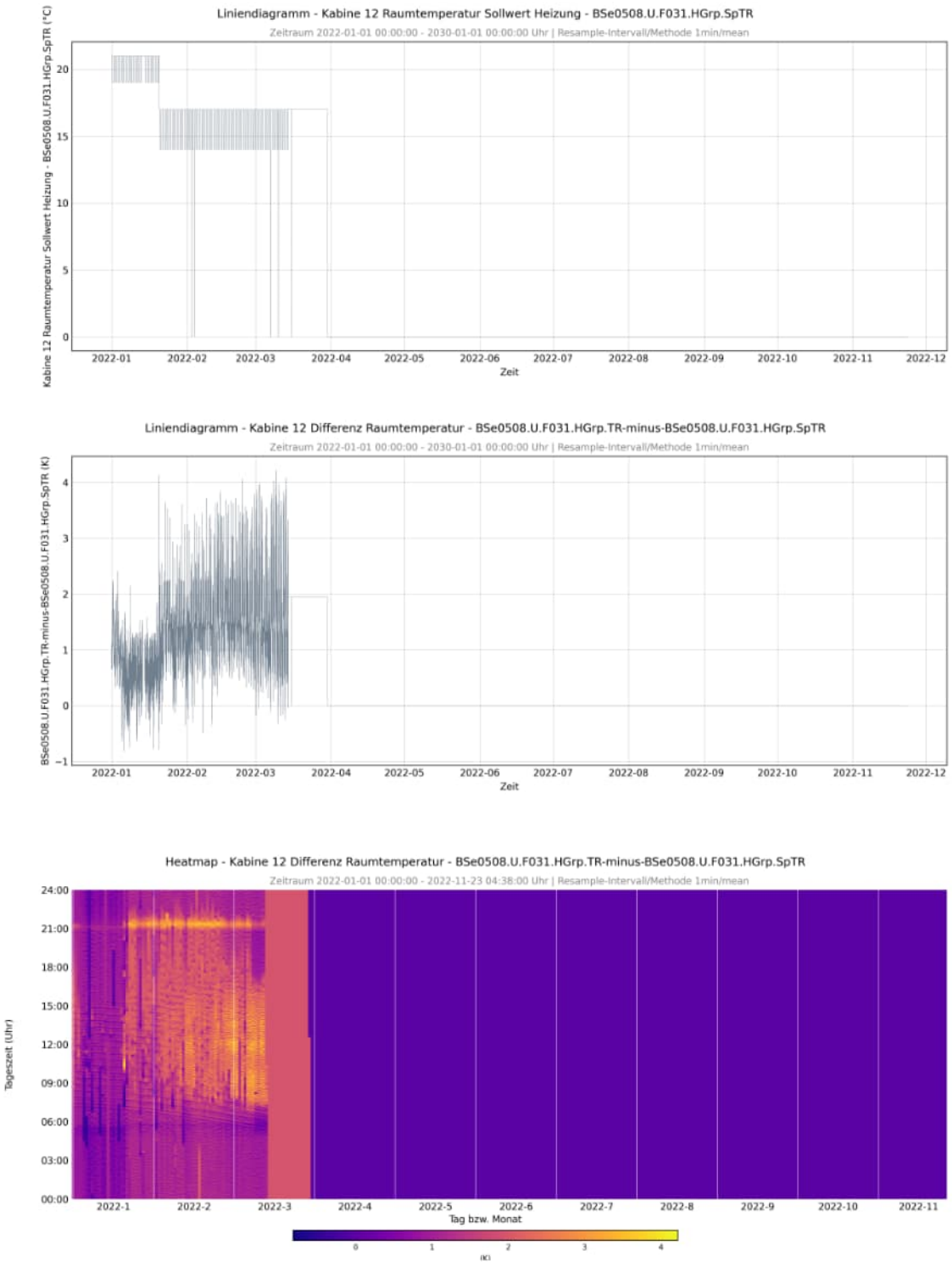


Abbildung 7.81.: Kabine 12 - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

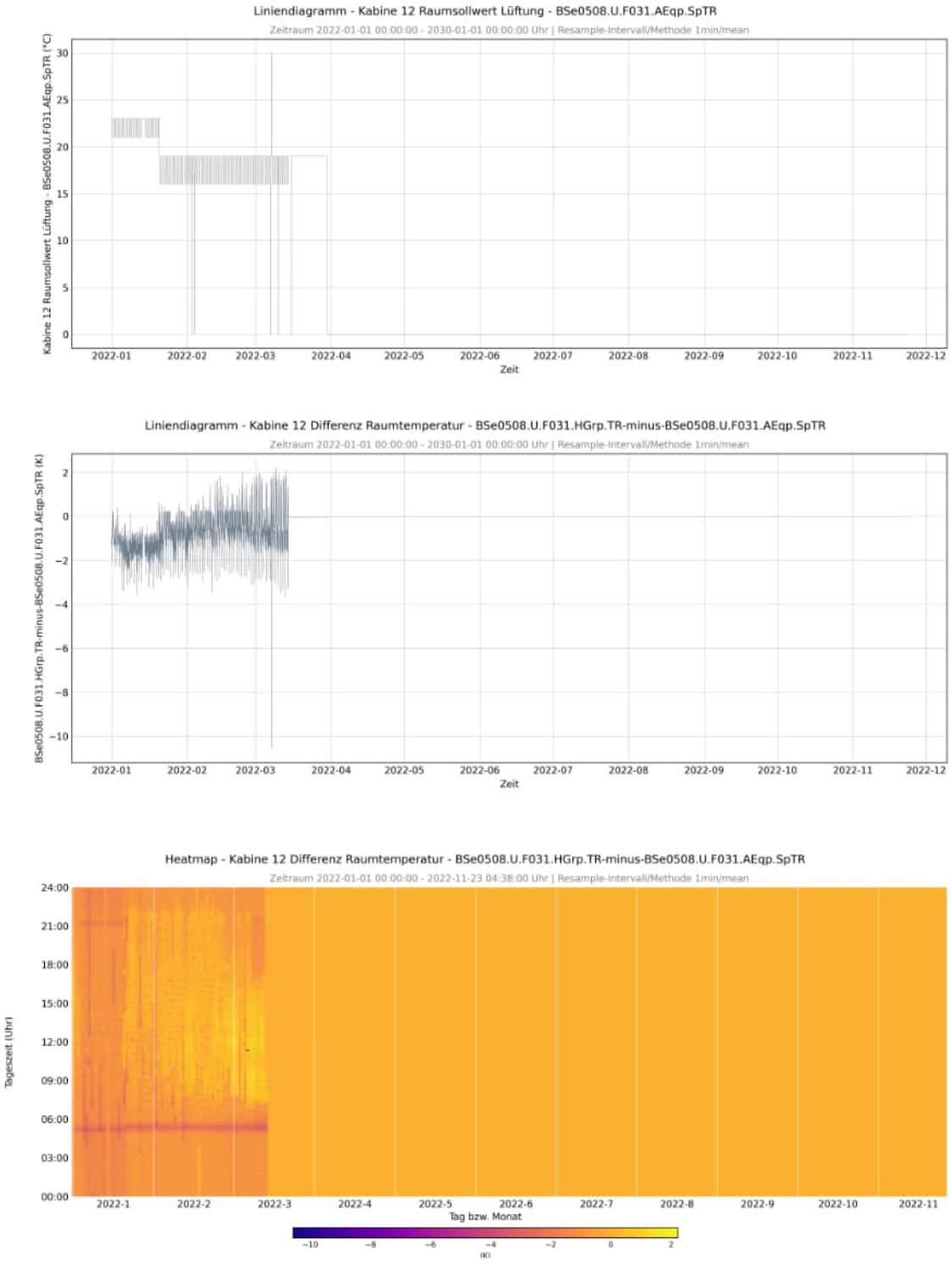


Abbildung 7.82.: Kabine 12 - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

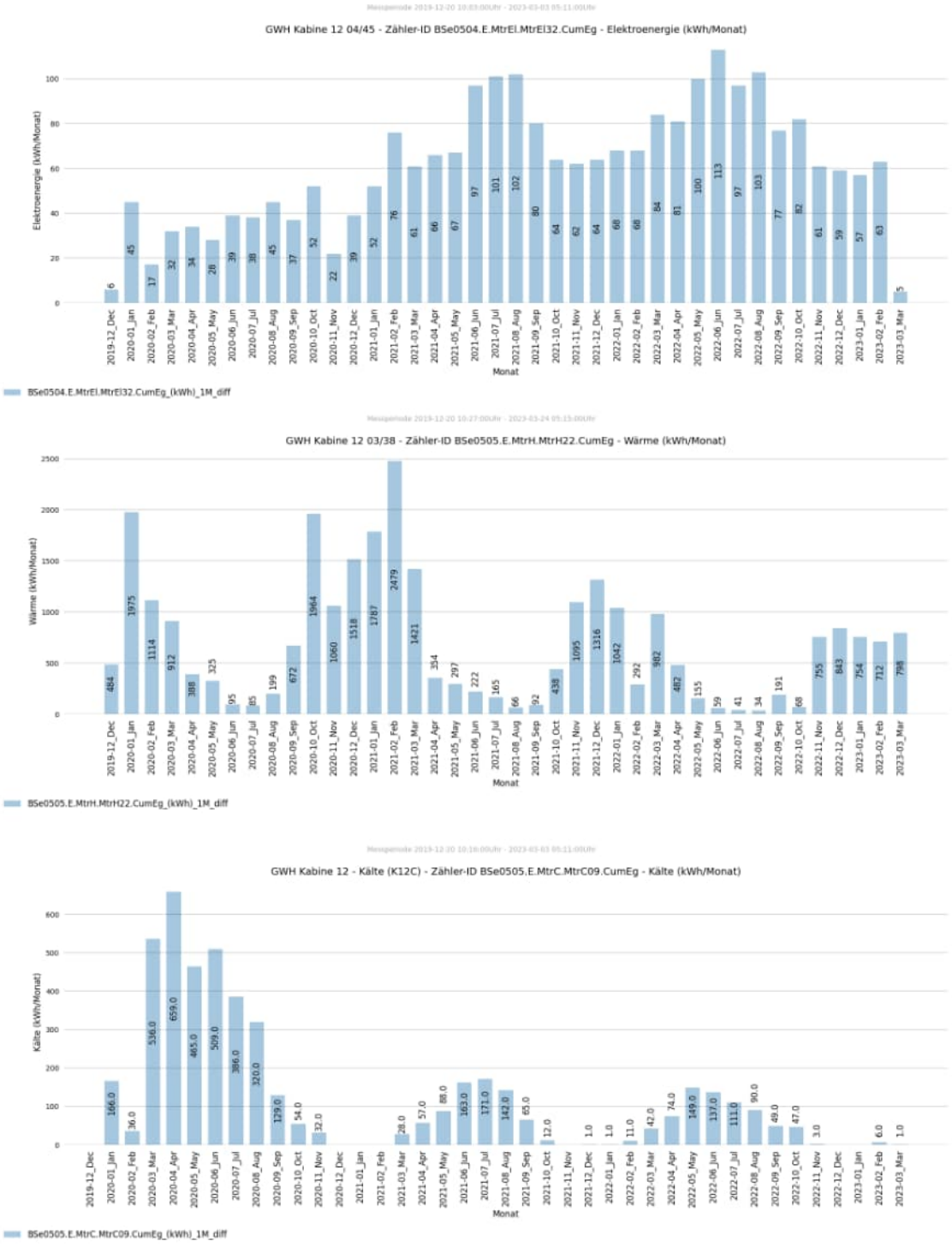


Abbildung 7.83.: Kabine 12 - Elektroenergie, sonstiges (oben), Wärme (mittig) und Kälte (unten)

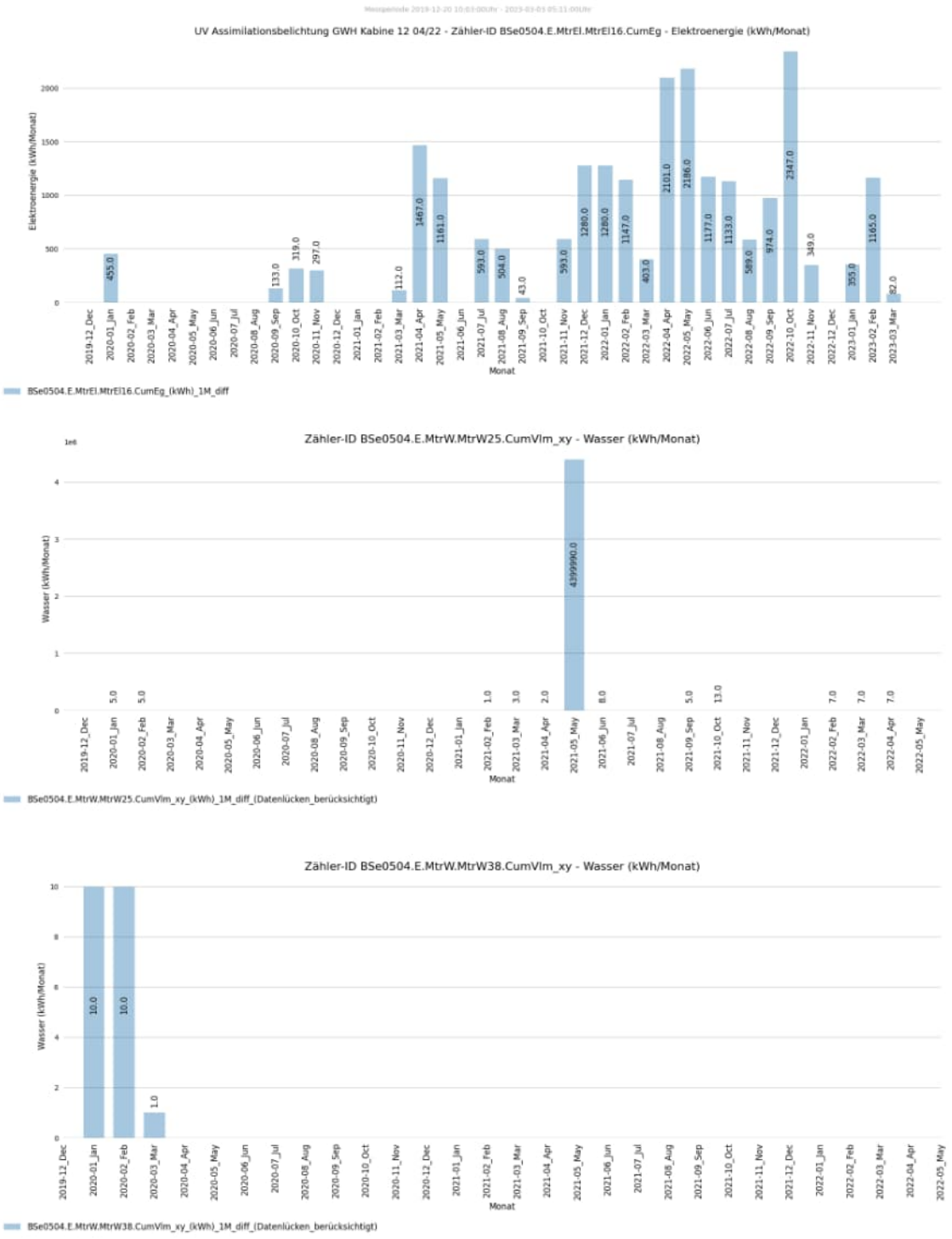


Abbildung 7.84.: Kabine 12 - Elektroenergie Assimilationsbelichtung (oben) sowie Volumen für Gießwasser (mittig) und Dosierwasser (unten)

7.14. Verbinder

Abbildung 7.85 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung des Verbindungsganges bzw. Verbinders.

Abbildung 7.85.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung des Verbindungsganges bzw. Verbinders

Abbildung 7.87 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur im Verbinder in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.88 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.89 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.14 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.
Abbildung 7.86 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 17 und 22°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 14 und 16°C wurden während eines Zeitraumes von ca. 15 Stunden erreicht. Während des Analysezeitraumes wurden über 290 Minuten hinweg Werte von über 24°C bei einem Maximalwert von ca. 23,4°C gemessen, siehe Abbildung 7.86.

Ergebnisse		
Wertemenge		469715 Minuten
Mittelwert	°C	21.23
Median	°C	20.42
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 47.2 / 47.2
Standardabw.	K	3.59
Varianz	K	12.85
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	17.12 / 28.65 / 11.53
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.34 / 23.21 / 4.87

Tabelle 7.14.: Statistik - Verbinder Raumtemperatur - BSe0509.U.F021.HGrp.TR

Die Raumtemperatur des Verbinders wird innerhalb der Bilanzperiode indirekt durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.88 und Abbildung 7.89 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

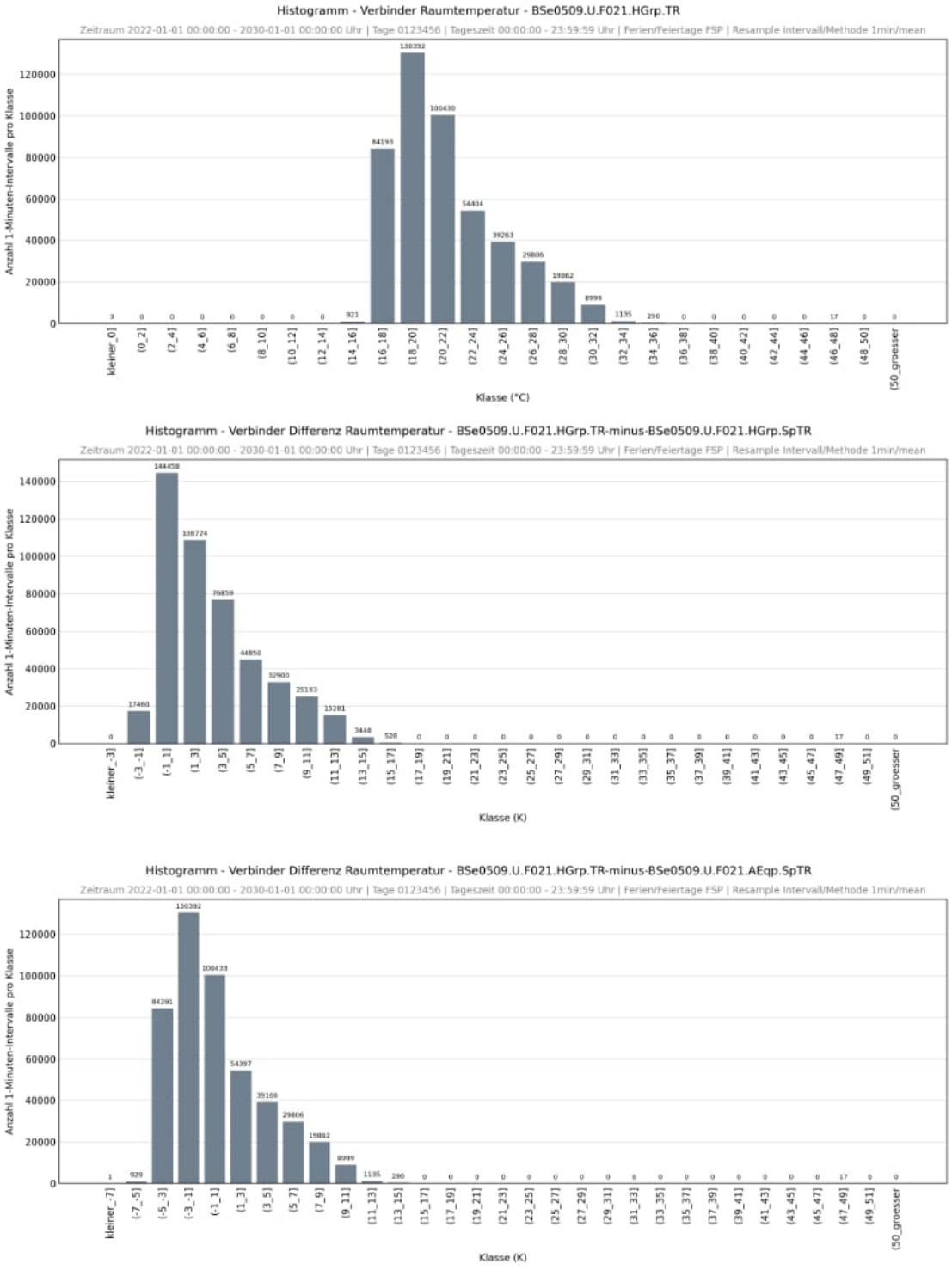


Abbildung 7.86.: Verbindungsgang - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

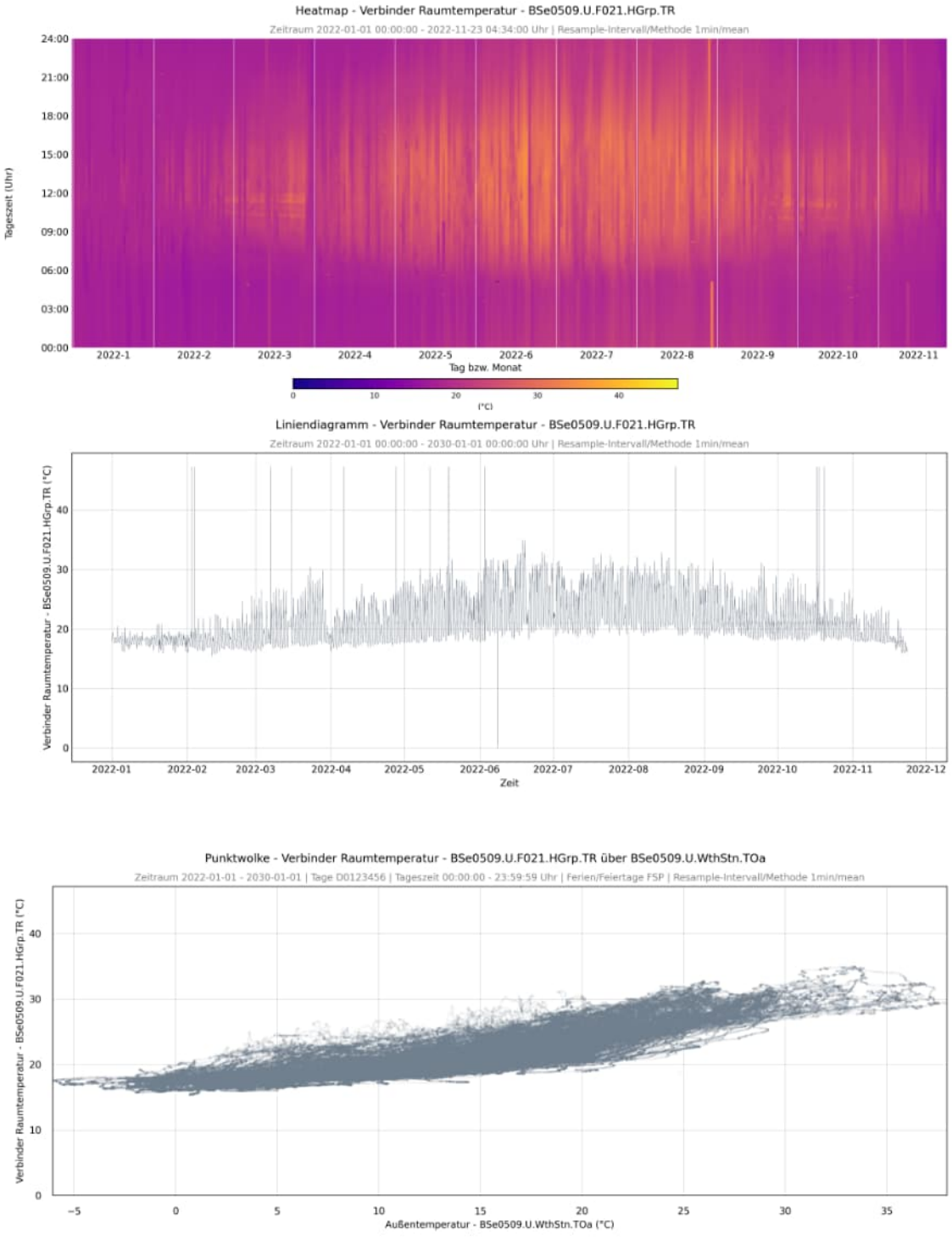


Abbildung 7.87.: Verbindungsgang - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

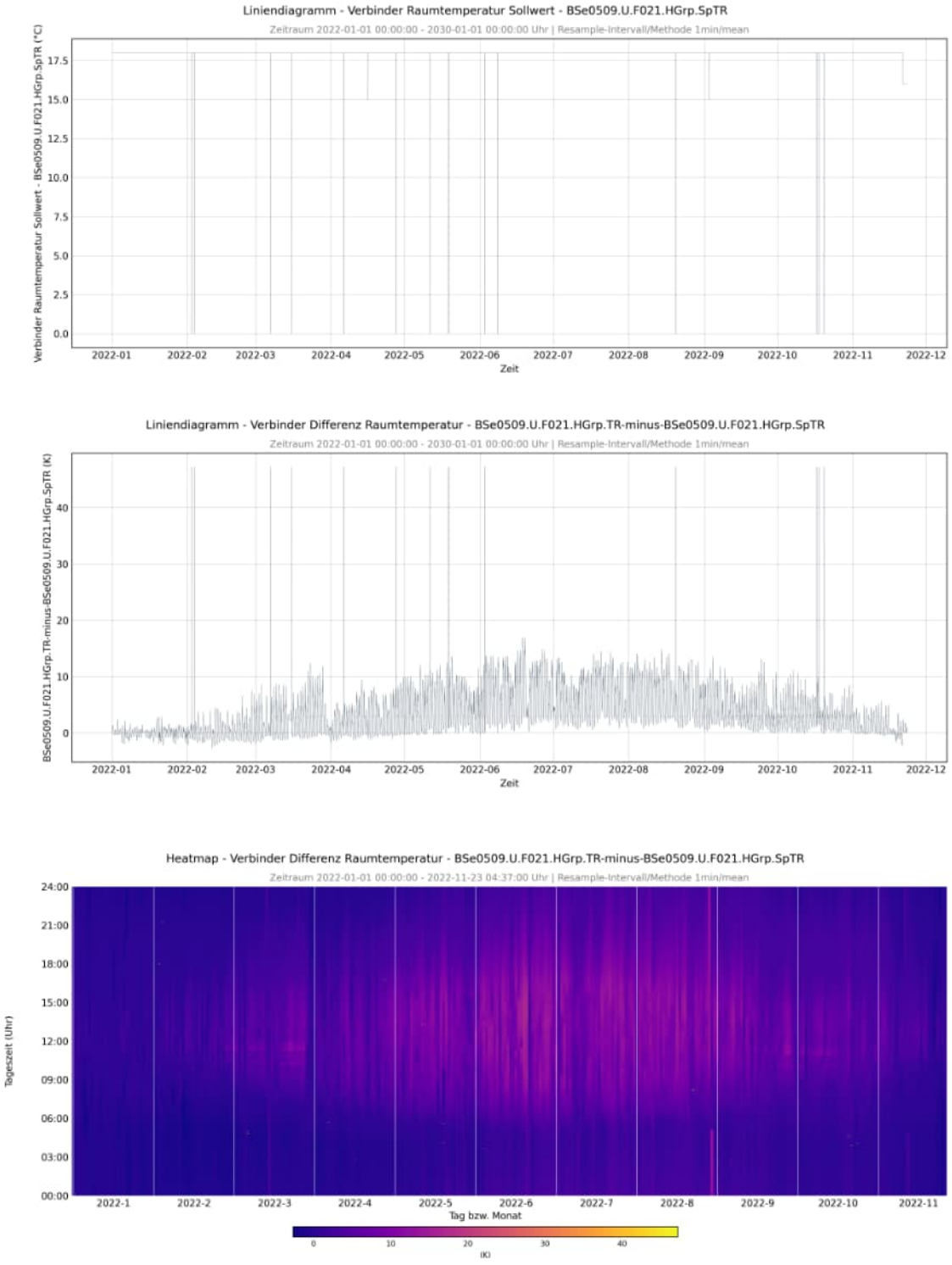


Abbildung 7.88.: Verbindungsgang - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

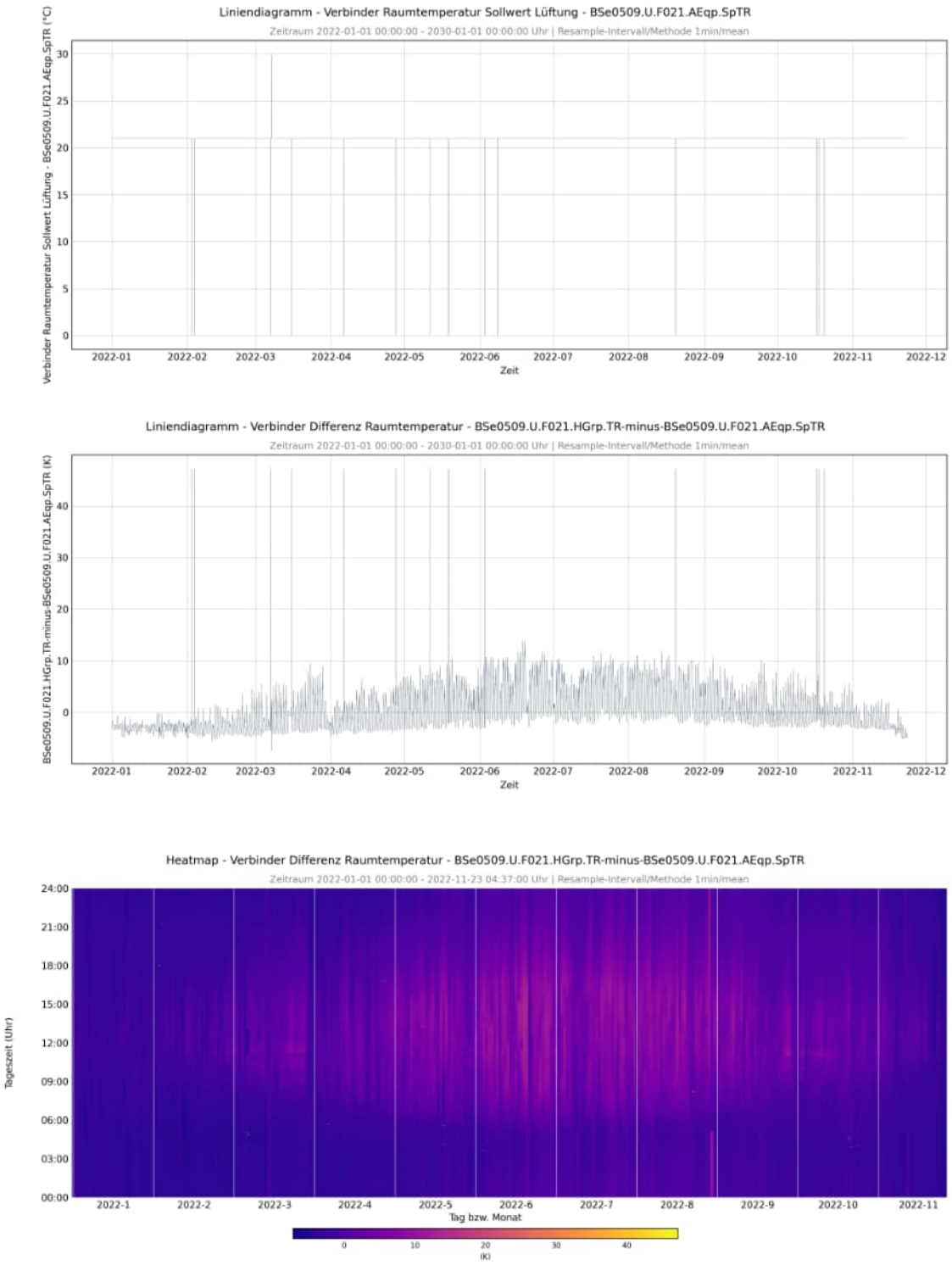


Abbildung 7.89.: Verbindungsgang - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

7.15. Arbeitsgang

Abbildung 7.90 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung des Arbeitsganges.

Abbildung 7.90.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung des Arbeitsganges

Abbildung 7.92 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur im Arbeitsgang in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.93 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.94 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.15 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.
Abbildung 7.91 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 18 und 24°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 14 und 16°C wurden während eines Zeitraumes von ca. 162 Minuten erreicht. Während des Analysezeitraumes wurden über 37 Minuten hinweg Werte von über 38°C bei einem Maximalwert von ca. 38,7°C gemessen, siehe Abbildung 7.91.

Ergebnisse		
Wertemenge		469715 Minuten
Mittelwert	°C	22.02
Median	°C	21.73
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 38.66 / 38.66
Standardabw.	K	3.65
Varianz	K	13.33
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	17.9 / 29.63 / 11.73
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	18.97 / 22.87 / 3.9

Tabelle 7.15.: Statistik - Arbeitsgang Raumtemperatur - BSe0509.U.F026.HGrp.TR

Die Raumtemperatur des Arbeitsganges wird innerhalb der Bilanzperiode indirekt durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.93 und Abbildung 7.94 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

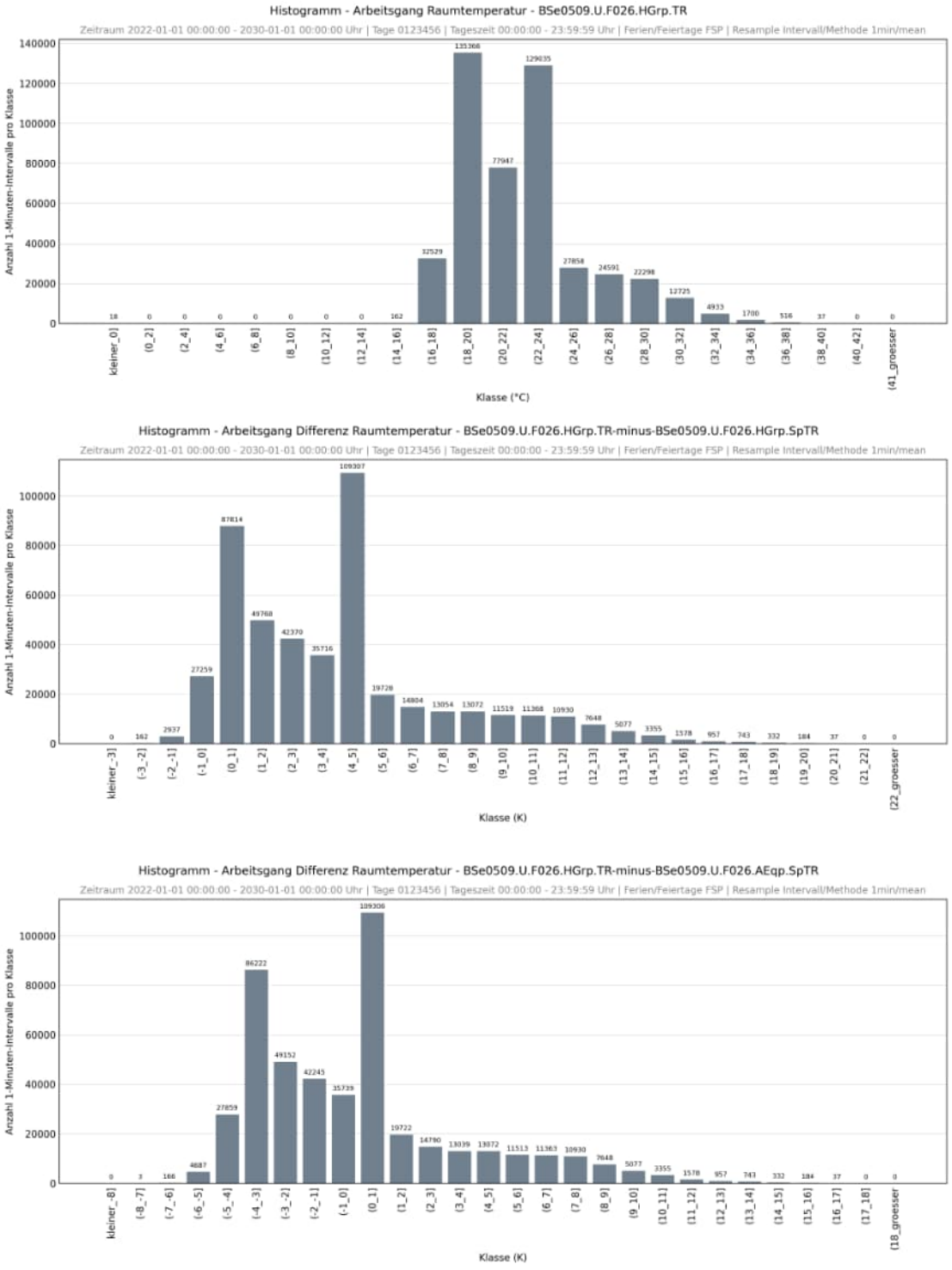


Abbildung 7.91.: Arbeitsgang - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

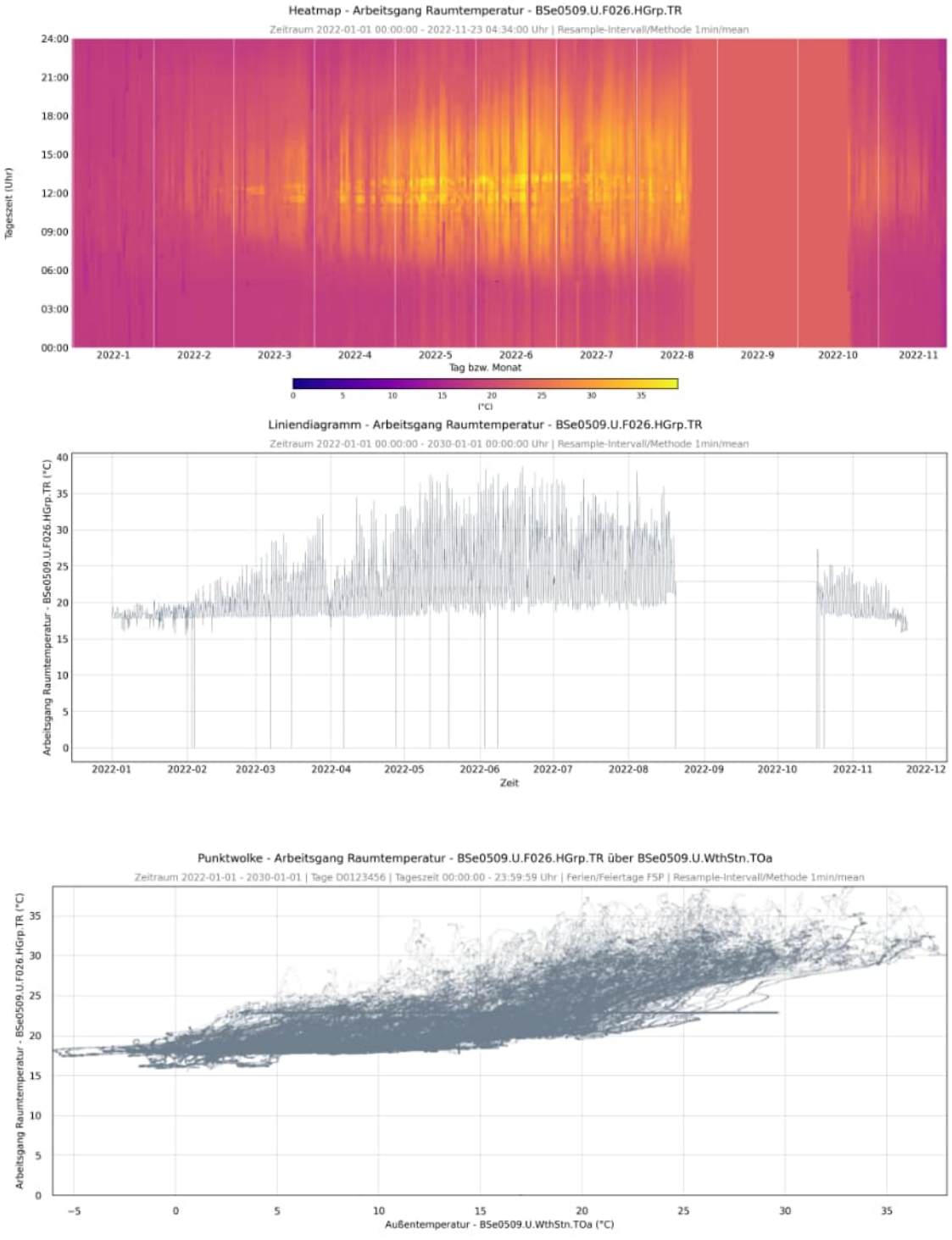


Abbildung 7.92.: Arbeitsgang - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

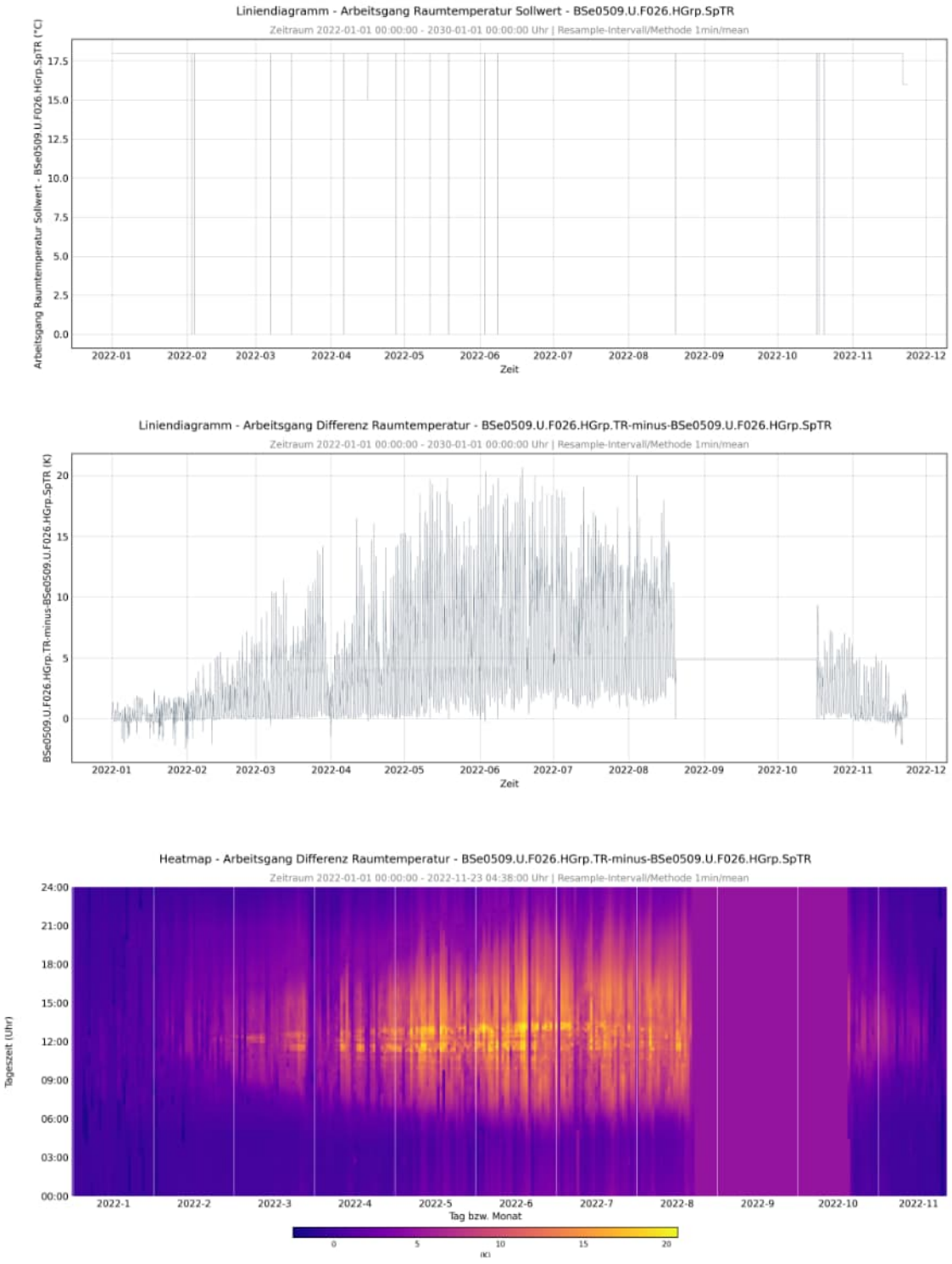


Abbildung 7.93.: Arbeitsgang - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

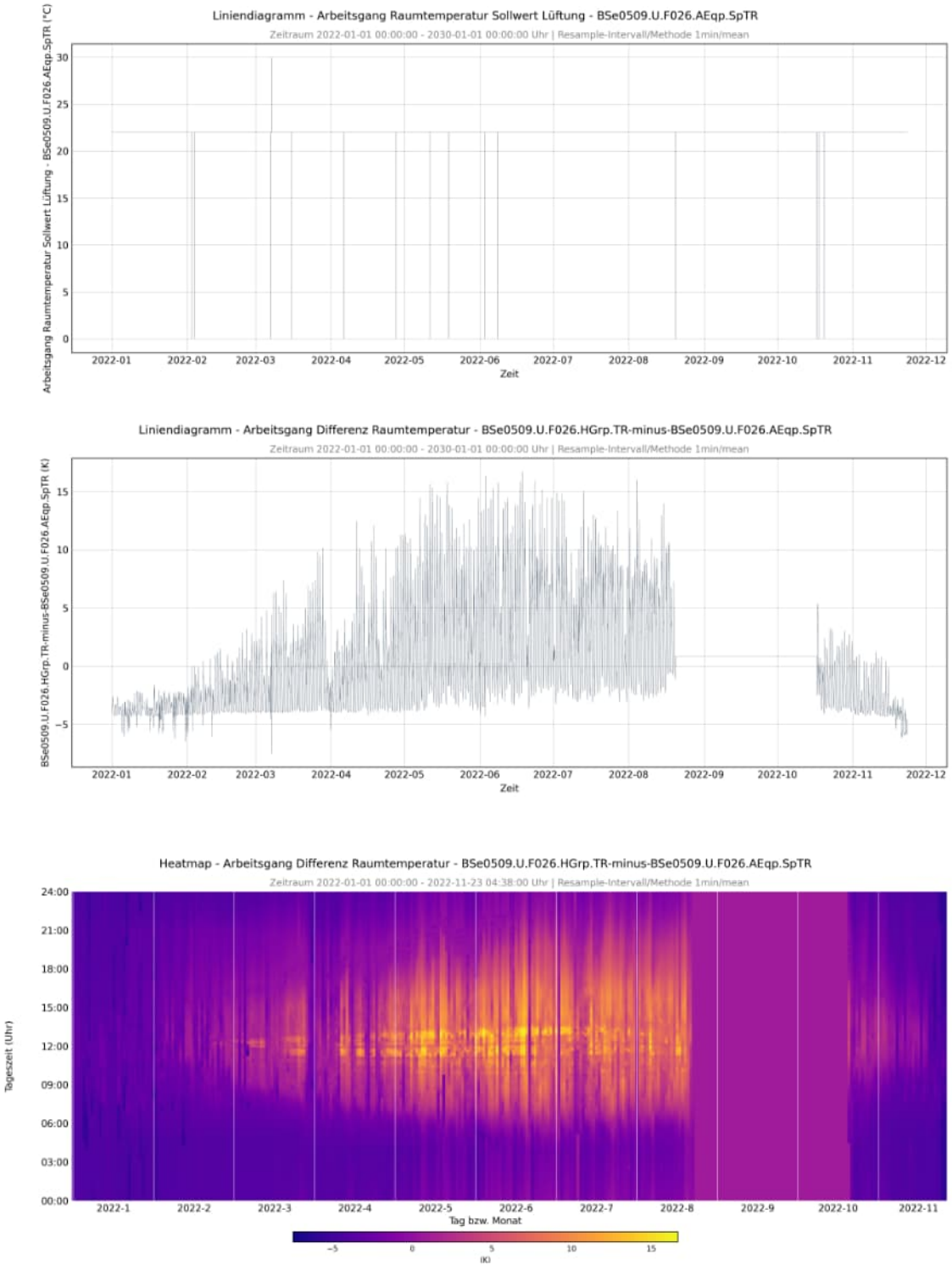


Abbildung 7.94.: Arbeitsgang - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

7.16. Schleuse

Abbildung 7.95 zeigt den Grundriss des Erdgeschosses des Forschungsgewächshauses mit Hervorhebung der Schleuse.

Abbildung 7.95.: Grundriss Erdgeschoss mit Hervorhebung der Schleuse

Abbildung 7.97 zeigt eine Auswertung für den Verlauf der Raumtemperatur in der Schleuse in Form einer Heatmap-Darstellung (oben), eines Liniendiagramms (mittig) sowie im Zusammenhang mit der Außentemperatur als Punktwolke.

In Abbildung 7.98 wird die Sollraumtemperatur für den Heizfall unabhängig (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten) ausgewertet.

Abbildung 7.99 zeigt eine Auswertung der Sollraumtemperatur für den Lüftungs- bzw. Kühlbetrieb.

Für die Raumtemperatur werden die in Tabelle 7.16 aufgeführten Werte aus dem Kurvenverlauf ermittelt.
Abbildung 7.96 zeigt für den Verlauf der Raumtemperatur eine Auswertung in Histogramm-Form. Daraus ist ersichtlich, dass die Raumtemperatur innerhalb der Bilanzperiode mehrheitlich im Bereich zwischen 21 und 26°C lag. Die niedrigsten Werte zwischen 18 und 19°C wurden während eines Zeitraumes von ca. 31 Minuten erreicht. Während des Analysezeitraumes wurden über 204 Minuten hinweg Werte von über 32°C bei einem Maximalwert von ca. 32,8°C gemessen, siehe Abbildung 7.96.

Ergebnisse		
Wertemenge		469715 Minuten
Mittelwert	°C	23.08
Median	°C	21.83
Min / Max / Diff	°C bzw. K	0.0 / 32.84 / 32.84
Standardabw.	K	2.2
Varianz	K	4.86
Q0.05/0.95/IQR	°C bzw. K	21.45 / 28.26 / 6.81
Q0.25/0.75/IQR	°C bzw. K	21.64 / 23.97 / 2.33

Tabelle 7.16.: Statistik - Schleuse Raumtemperatur - BSe0509.U.F027.HGrp.TR

Die Raumtemperatur der Schleuse wird innerhalb der Bilanzperiode indirekt durch die im Gewächshaus stattfindenden wissenschaftlichen Experimente sowie im geringen Maße durch den Betrieb zur Einregulierung des Anlagensystems bestimmt. Aus Abbildung 7.98 und Abbildung 7.99 sind die damit verbundenen wechselnden Einstellungen der Sollraumtemperaturen für den Heiz- und Lüftungs-/Kühlfall deutlich zu erkennen.

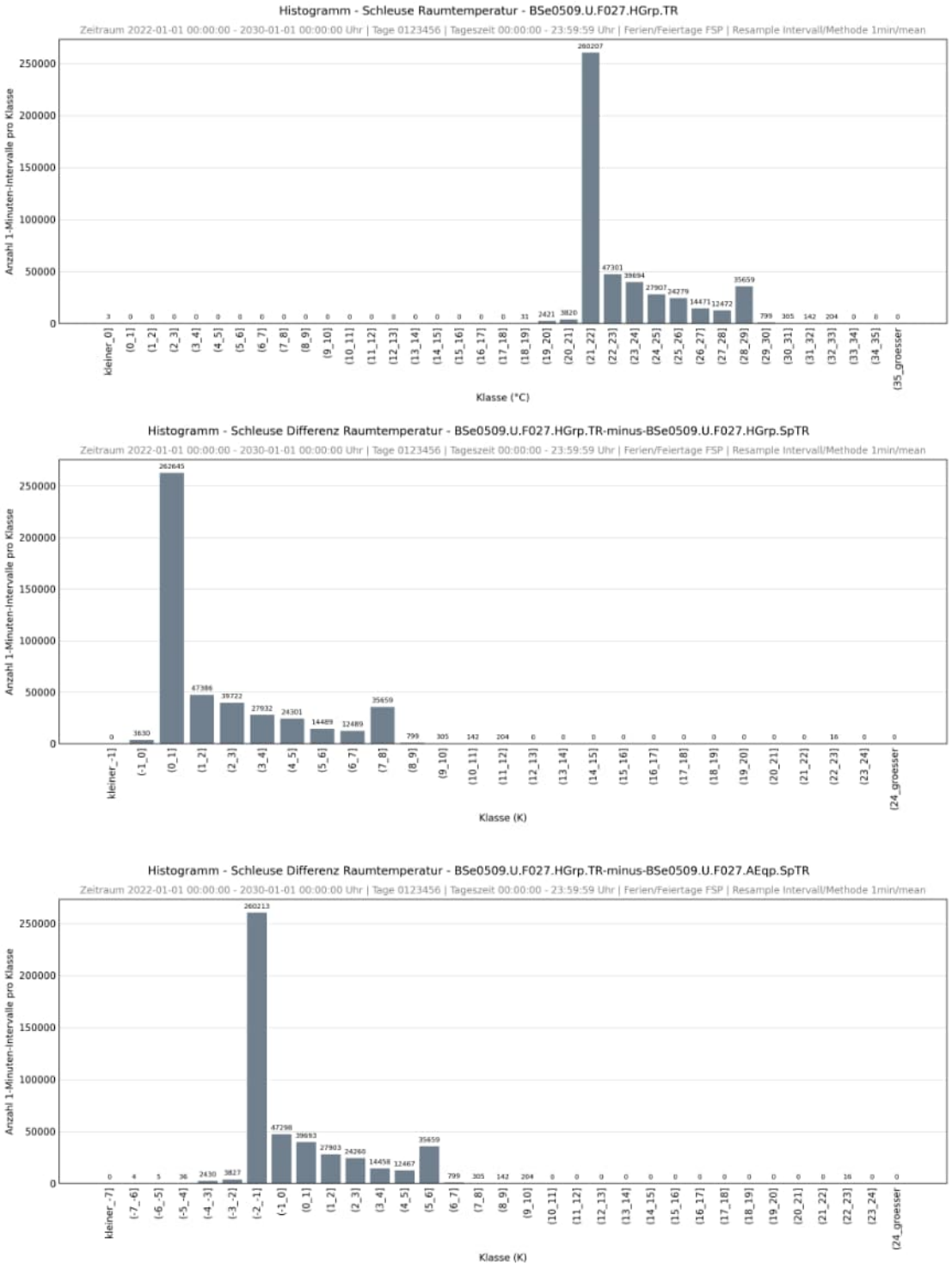


Abbildung 7.96.: Schleuse - Histogramm der Raumtemperatur (oben) sowie der Differenzen zwischen Raumtemperatur und Sollraumtemperatur im Heizfall (mittig) und im Lüftungs-/Kühlfall (unten)

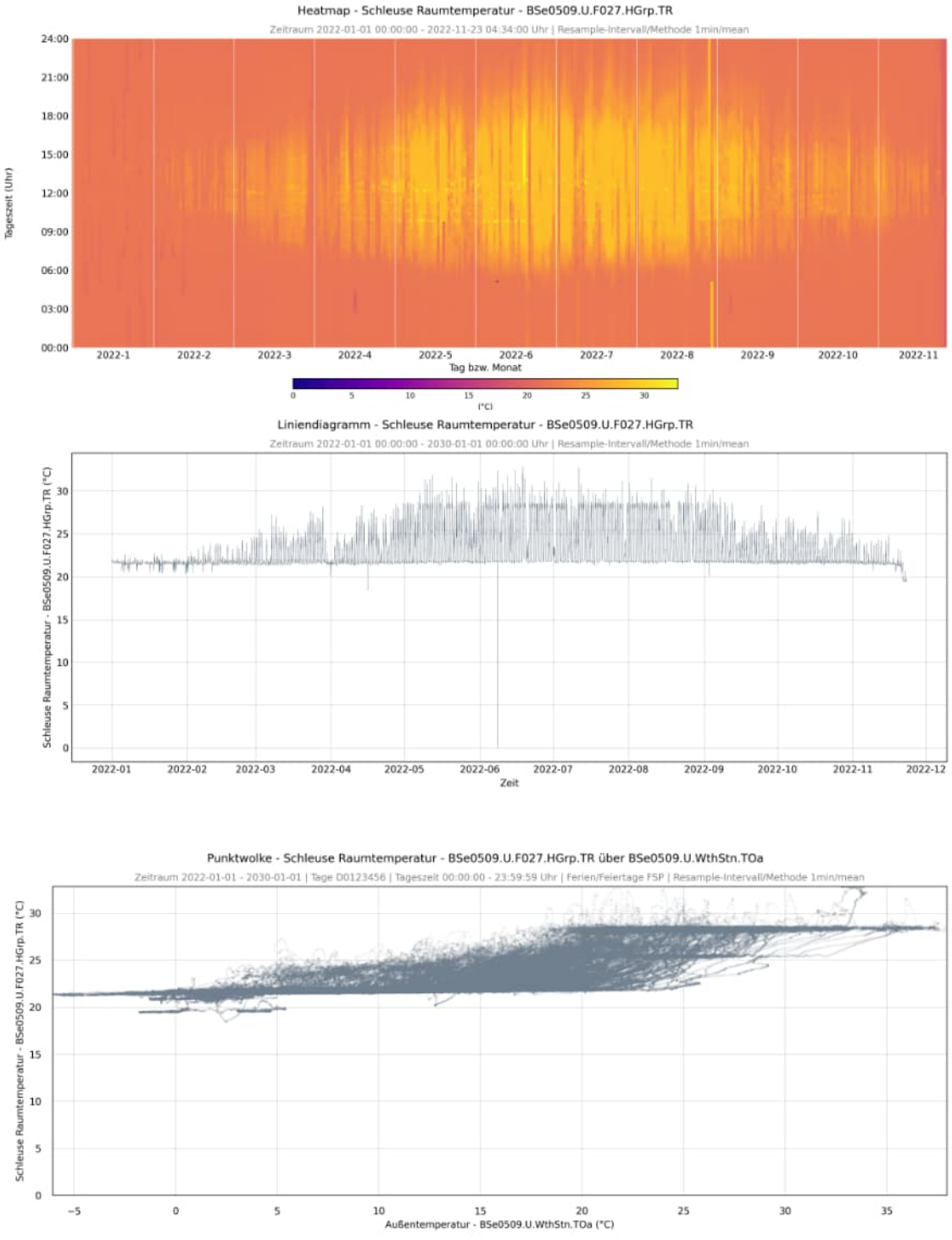


Abbildung 7.97.: Schleuse - Verlauf der Raumtemperatur als Heatmap (oben), Liniendiagramm (mittig) sowie als Punktwolke über der Außentemperatur (unten)

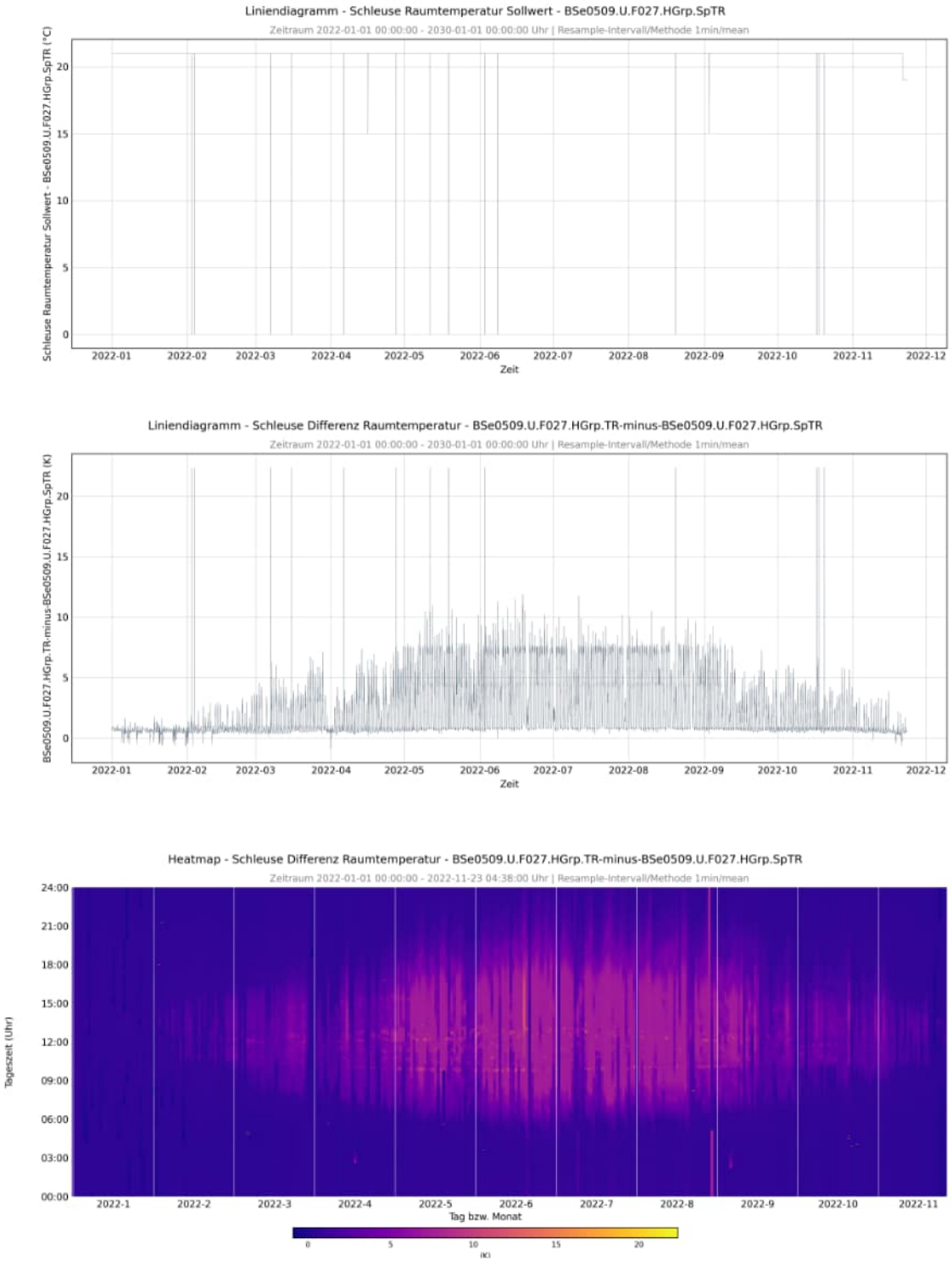


Abbildung 7.98.: Schleuse - Soll-Raumtemperatur Heizen (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

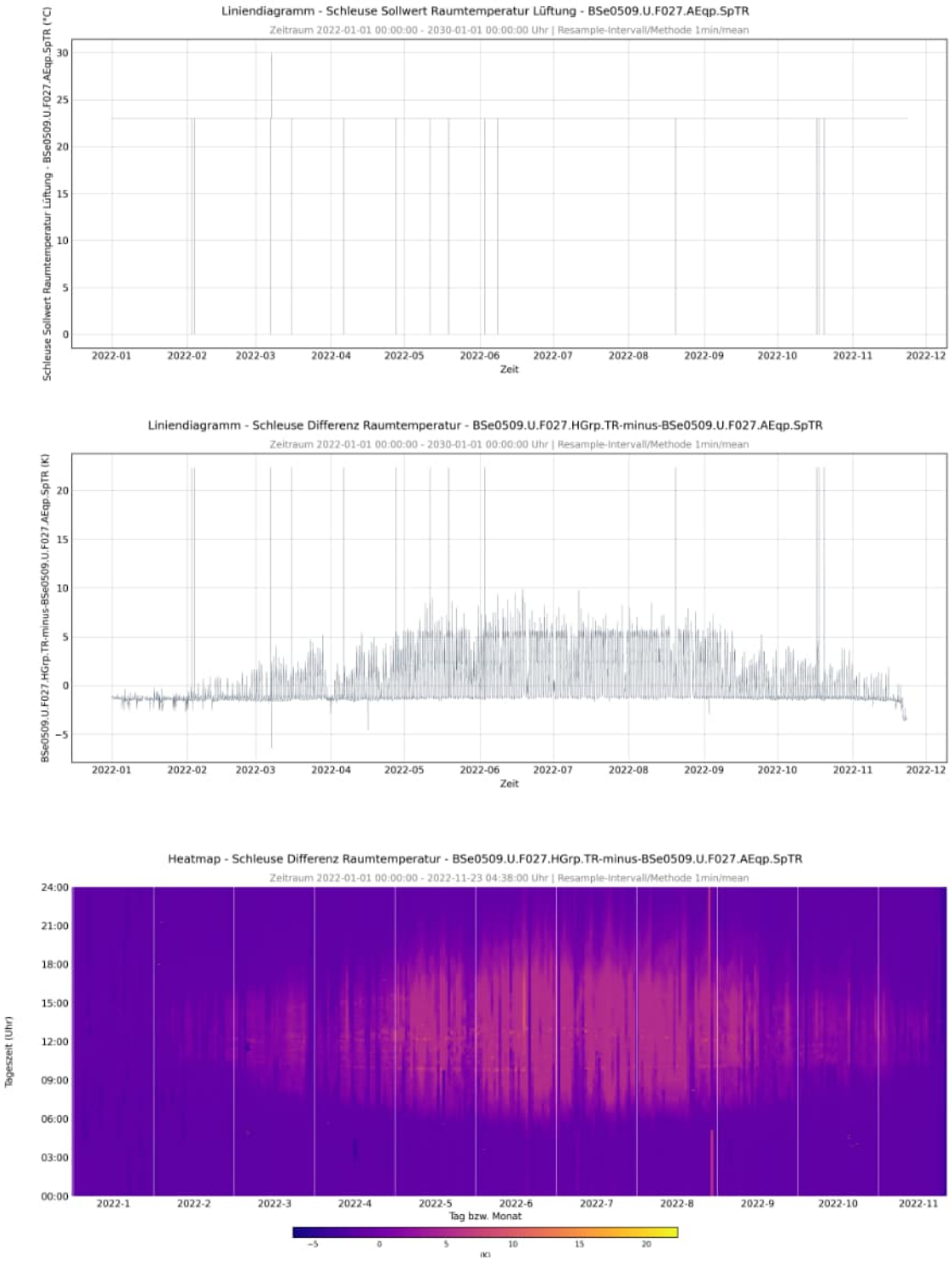


Abbildung 7.99.: Schleuse - Soll-Raumtemperatur Lüftung (oben) sowie als Differenz zur Raumtemperatur (mittig und unten)

A. Bereinigung der Messwerte

A.1. Zeitliche Bereinigung gemäß VDI 3807 Blatt 1 (2007:03)

In [1] wird der Bezug der Messwerte für den außentemperaturunabhängigen (Wärme-)Verbrauch als auch für Strom und Wasser auf ein Jahr bzw. 12 Monate hergestellt. Daraus leitet sich die Notwendigkeit einer zeitlichen Bereinigung ab.
Randbedingungen für die Berechnung:

- Anwendung des Verfahrens bei gleichmäßig über das Jahr verteiltem Verbrauch
- Abweichung im Wasserverbrauch bei Grünflächenbewässerung im Sommer
- Abweichung im Stromverbrauch bei Gebäudeklimatisierung im Sommer
- Bezugsfläche ist die Summe aller beheizbaren (bzw. thermisch konditionierbaren) Bruttogrundflächen eines Gebäudes BGF_E

$$E_V = E_{Vg} \cdot \frac{365}{z_V} \tag{A.1}$$

mit:

E_V	bereinigter Energieverbrauch	kWh/a
E_{Vg}	gemessener Energieverbrauch	kWh/a
z_V	Anzahl der Tage, an denen der Energieverbrauch gemessen wurde	–

A.2. Leerstandsbereinigung

A.2.1. Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Leerstand von Räumen

Die Nutzung der Gewächshauskabinen erfolgt nicht kontinuierlich sondern folgt den Anforderungen der projektorientierten Forschungsarbeit, so dass im Jahresverlauf für einzelne Gewächshauskabinen Zeitfenster ohne Bepflanzung und folglich ohne thermische Konditionierung entstehen. Im Gegensatz dazu werden die Räume des Massivbaus ununterbrochen genutzt. Gemäß den Vorgaben in [19] wird die Berechnung von Leerstandsfaktoren für jede Kabine erforderlich.

Randbedingungen für die Berechnung von Leerstandsfaktoren:

- ein Leerstand ist zu berücksichtigen, wenn der Leerstandsfaktor gilt: $f_{leer} \geq 0{,}05\%$
- der Leerstandsfaktor ist mit einer Toleranz von $\pm$ 10% zu ermitteln.
- eine Leerstandsbereinigung erfolgt nach der Witterungsbereinigung
- die Berechnung erfolgt separat für den Energieverbrauch von:
  - (Raum-)Heizung, zentraler Warmwasserbereitung, thermisch erzeugter Kälte
  - Strom aus Leerstandsfaktor f_{leer}, Zuschlagfaktor Heizung sowie aus dem witterungsbereinigten Energieverbrauch Heizung und zentrale Warmwasserbereitung und Strom
- für eine Leerstandsbereinigung von Strom-, Warmwasser- und thermisch erzeugtem Kühlenergieverbrauch sind ganzjährig sämtliche Leerstandszeiten zu berücksichtigten
- eine Leerstandsbereinigung des Heizenergieverbrauchs erfolgt unter Beachtung der Leerstände in den Monaten Oktober bis März
- i. d. R. erfolgt die Ermittlung der Leerstandsfaktoren getrennt für die jeweiligen Energieverbräuche

Berechnungsgleichungen:

$$e_{vhb,12mth} = \frac{E_{Vhb,Zeitraum}}{A_{NGF}} \cdot \frac{12}{n_{mth}} \tag{A.2}$$

$$f_{(e_{vhb,12mth})} = -0{,}0083\left(\frac{m^2 \cdot a}{kWh}\right) \cdot e_{Vbh,12mth} + 1{,}3982 \tag{A.3}$$

mit Bereichsgrenzen: (A.4)

$$f_{(e_{vhb,12mth})} = \begin{cases} 0{,}25 \leq f_{(e_{vhb,12mth})} \leq 1{,}0 \\ \text{wenn} \quad f_{(e_{vhb,12mth})} \leq 0{,}25 \rightarrow f_{(e_{vhb,12mth})} = 0{,}25 \\ \text{wenn} \quad f_{(e_{vhb,12mth})} \geq 1{,}00 \rightarrow f_{(e_{vhb,12mth})} = 1{,}00 \end{cases} \tag{A.5}$$

$$f_{leer} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{A_{leer,i}}{A_{NGF}} \cdot \frac{t_{leer,i}}{t_{gesamt}}\right) \tag{A.6}$$

$$\Delta E_{Vh} = f_{(e_{vhb,12mth})} \cdot f_{leer} \cdot E_{Vhb,leer} \tag{A.7}$$

$$\Delta E_{VWW} = f_{leer} \cdot E_{VWW,leer} \tag{A.8}$$

$$\Delta E_{VK} = f_{leer} \cdot E_{VK,leer} \tag{A.9}$$

$$\Delta E_{VS} = f_{leer} \cdot E_{VS,leer} \tag{A.10}$$

mit:

f_{leer}	Leerstandsfaktor	–
$A_{leer,i}$	Leerstand einer Teilfläche i	m^2
A_{NGF}	Energiebezugsfläche, basierend auf NGF	m^2
$t_{leer,i}$	Leerstand einer Teilfläche i	m^2
t_{gesamt}	zusammenhängender Zeitraum zur Ermittlung der Verbrauchswerte in Monaten ($\geq$ 36 Monate)	*Monate*
ΔE_{Vh}	Leerstandszuschlag für den Energieverbrauchsanteil für Heizung	*kWh*
$e_{vhb,12mth}$	witterungsbereinigter Energieverbrauchsanteil für Heizung von mind. 36 Monaten bei längerem Leerstand bezogen auf die Energiebezugsfläche und einen Zeitraum von 12 Monaten	$^{kWh}/_{(m^2 \cdot a)}$
$f_{(e_{vhb,12mth})}$	Zuschlagsfaktor für Heizung	–
$E_{Vhb,Zeitraum}$	witterungsbereinigter Energieverbrauchsanteil für Heizung von mind. 36 Monaten	*kWh*
n_{mth}	Anzahl der Monate des Zeitraumes, $n \geq 36$	*Monate*
$E_{Vhb,leer}$	witterungsbereinigter Energieverbrauchsanteil für Heizungen bei längerem Leerstand	*kWh*
E_{VWW}	Leerstandszuschlag für den Energieverbrauchsanteil für zentrale Warmwasserbereitung	*kWh*
E_{VK}	Leerstandszuschlag für den Energieverbrauchsanteil für thermisch erzeugte Kühlung	*kWh*
E_{VS}	Leerstandszuschlag für den Energieverbrauchsanteil für Strom	*kWh*
$E_{VWW,leer}$	Energieverbrauchsanteil für zentrale Warmwasserbereitung bei längerem Leerstand	*kWh*
$E_{VK,leer}$	Energieverbrauchsanteil für thermisch erzeugte Kühlung bei längerem Leerstand	*kWh*
$E_{VS,leer}$	Energieverbrauchsanteil für Strom bei längerem Leerstand	*kWh*

A.3. Witterungsbereinigung

A.3.1. Heizenergieverbrauch

Vorbemerkungen

In [19] wird für die Witterungsbereinigung des Heizenergieverbrauchs im Kontext der Ausstellung von Energieausweisen für Nichtwohngebäude auf der Basis von Energieverbrauchswerten die Nutzung von Klimafaktoren beschrieben. In Gegensatz dazu stellt [1] auf eine Witterungskorrektur auf der Grundlage von Heiz- und Kühlgradtagen ab. In Tabelle A.4 werden die zur Witterungsbereinigung verwendeten Grunddaten zusammengefasst.

GWH-Kabinen				2020	Nicht-Nutzung				
NGF gesamt	(m²)	1.004	NGF (m²)	Beginn	Ende	Anzahl Tage (-)	Beginn	Ende	Anzahl Tage (-)
EG	F017	GWH Kabine 1	25,10	01.01.2020	02.05.2020	122	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F018	GWH Kabine 2	25,10	14.01.2020	02.05.2020	109	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F019	GWH Kabine 3	25,10	01.01.2020	02.05.2020	122	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F020	GWH Kabine 4	26,66	01.01.2020	04.05.2020	124	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F021	GWH Verbinder	44,81	01.01.2020	04.05.2020	124	10.12.2020	31.12.2020	21
EG	F022	GWH Kabine 5	25,10	01.01.2020	04.05.2020	124	01.12.2020	31.12.2020	30
EG	F023	GWH Kabine 6	25,10	01.01.2020	04.05.2020	124	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F024	GWH Kabine 7	25,10	01.01.2020	03.05.2020	123	03.07.2020	31.12.2020	181
EG	F025	GWH Kabine 8	26,66	01.01.2020	03.05.2020	123	02.07.2020	31.12.2020	182
EG	F026	GWH Arbeitsgang	21,82	01.01.2020	03.05.2020	123	03.12.2020	31.12.2020	28
EG	F027	GWH Schleuse	22,57	01.01.2020	04.05.2020	124	01.12.2020	31.12.2020	30
EG	F028	GWH Kabine 9	25,10	01.01.2020	03.05.2020	123	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F029	GWH Kabine 10	25,10	01.01.2020	04.05.2020	124	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F030	GWH Kabine 11	25,10	01.01.2020	03.05.2020	123	14.08.2020	31.12.2020	139
EG	F031	GWH Kabine 12	26,66	01.01.2020	03.05.2020	123	14.08.2020	31.12.2020	139

Tabelle A.1.: Leerstand der Kabinen im Jahr 2020 abgeleitet aus Monitoring-Datenpunkten

GWH-Kabinen				2021	Nicht-Nutzung				
NGF gesamt	(m²)	1.004	NGF (m²)	Beginn	Ende	Anzahl Tage (-)	Beginn	Ende	Anzahl Tage (-)
EG	F017	GWH Kabine 1	25,10	01.01.2021	24.02.2021	54			0
EG	F018	GWH Kabine 2	25,10	01.01.2021	24.02.2021	54			0
EG	F019	GWH Kabine 3	25,10	01.01.2021	24.02.2021	54			0
EG	F020	GWH Kabine 4	26,66	01.01.2021	24.02.2021	54			0
EG	F021	GWH Verbinder	44,81	01.01.2021	24.02.2021	54			0
EG	F022	GWH Kabine 5	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60	30.07.2021	31.12.2021	154
EG	F023	GWH Kabine 6	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60			0
EG	F024	GWH Kabine 7	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60			0
EG	F025	GWH Kabine 8	26,66	01.01.2021	02.03.2021	60			0
EG	F026	GWH Arbeitsgang	21,82	01.01.2021	28.03.2021	86	01.06.2021	24.08.2021	84
EG	F027	GWH Schleuse	22,57	01.01.2021	26.02.2021	56	02.03.2021	08.03.2021	6
EG	F028	GWH Kabine 9	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60			0
EG	F029	GWH Kabine 10	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60	04.03.2021	23.03.2021	19
EG	F030	GWH Kabine 11	25,10	01.01.2021	02.03.2021	60			0
EG	F031	GWH Kabine 12	26,66	01.01.2021	02.03.2021	60	31.07.2021	24.09.2021	55

Tabelle A.2.: Leerstand der Kabinen im Jahr 2021 abgeleitet aus Monitoring-Datenpunkten

GWH-Kabinen				2022	Nicht-Nutzung				
NGF gesamt	(m²)	639	NGF	Beginn	Ende	Anzahl Tage	Beginn	Ende	Anzahl Tage
			(m²)			(-)			(-)
EG	F017	GWH Kabine 1	25,10			0			0
EG	F018	GWH Kabine 2	25,10			0			0
EG	F019	GWH Kabine 3	25,10			0			0
EG	F020	GWH Kabine 4	26,66			0			0
EG	F021	GWH Verbinder	44,81			0			0
EG	F022	GWH Kabine 5	25,10	01.01.2022	08.04.2022	97			0
EG	F023	GWH Kabine 6	25,10			0			0
EG	F024	GWH Kabine 7	25,10	20.08.2022	17.10.2022	58			0
EG	F025	GWH Kabine 8	26,66			0			0
EG	F026	GWH Arbeitsgang	21,82	04.06.2022	17.10.2022	135			0
EG	F027	GWH Schleuse	22,57			0			0
EG	F028	GWH Kabine 9	25,10	05.04.2022	07.06.2022	63			0
EG	F029	GWH Kabine 10	25,10			0			0
EG	F030	GWH Kabine 11	25,10			0			0
EG	F031	GWH Kabine 12	26,66	10.04.2022	06.06.2022	57			0

Tabelle A.3.: Leerstand der Kabinen im Jahr 2022 abgeleitet aus Monitoring-Datenpunkten

Grunddaten zur Außentemperaturbereinigung nach VDI 3807 Bl. 1 2013-07

Kennwert	Formel-zeichen	Einheit	Wert
Innentemperatur	t_i	(°C)	20
Tagesmitteltemperatur	t_m	(°C)	[12, 15]
Referenz-Standort Außentemperaturkorrektur	-	-	Potsdam
Heizgradtage mittleres Jahr/langjähriges Mittel für t_i = 20°C / t_m = 15°C	G20	(K*h/a)	3.667
Heizgradtage mittleres Jahr/langjähriges Mittel für t_i = 15°C / t_m = 15°C	G15	(K*h/a)	
Objekt-Standort	-		Leipzig
Anzahl Heiztage für t_i = 20°C / t_m = 15°C	z_{Hm}	(-)	274,4
Gradtage für t_i = 20°C / t_m = 15°C	$G20_m$	(K*h/a)	3.898
mittlere Außentemperatur im Jahr	t_{Hm}	(°C)	5,8
Klimazone	-	(-)	4
DWD-Station	-	(-)	Leipzig Holzhausen
DWD-Referenzstation	-	(-)	Potsdam

Quelle: VDI 3807 Bl 1 2013-07, Anhang A – Klimatische Daten und Gradtage
Zeitraum 1950-1970 nach Gleichung 10
VDI 3807 mit Verweis auf Berechnung der Gradtage nach DIN 4710 Bl. 2

Tabelle A.4.: Grunddaten der Witterungsbereinigung gemäß VDI 3807 Bl. 1 in [1]

Witterungsbereinigung gemäß den Regelungen der Bundesministerien für Wirtschaft und Energie sowie des Innern, für Bau und Heimat aus dem Jahr 2021

In [19] wird zur Witterungsbereinigung des Heizenergieverbrauchs folgender Berechnungsweg skizziert:

$$E_{Vhb,Zeitraum} = E_{Vh,Zeitraum} \cdot f_{Klima} \tag{A.11}$$

$$f_{Klima} = \frac{G_{TRY,\ Potsdam}}{G_{akt.\ Jahr,\ Standort}} \tag{A.12}$$

$$mit:$$

$$G_{TRY,\ Potsdam} = 3666,8\ {}^{K*d}/_{a} \tag{A.13}$$

mit:

$E_{Vhb,Zeitraum}$	außentemperaturabhängiger Energieverbrauch für Heizzwecke, witterungsbereinigt	${}^{kWh}/_{a}$
$E_{Vh,Zeitraum}$	außentemperaturabhängiger Energieverbrauch für Heizzwecke, min. 36 Monate	${}^{kWh}/_{a}$
f_{Klima}	arithmetischer Mittelwert Postleitzahl-orientierter Klimafaktoren des Bilanzzeitraumes	–
$G_{TRY_{2011},\ Potsdam}$	Jahresgradtage des Testreferenzjahres TRY (Ausgabe 2011) für den Standort Potsdam	$= 3666,8\ {}^{K*d}/_{a}$
$G_{akt.\ Jahr,\ Standort}$	Jahresgradtage des aktuellen Jahres für den Objekt-Standort	${}^{K*d}/_{a}$

Witterungsbereinigung gemäß VDI 3807 Blatt 1 (2013-06) im Verein mit VDI 4710 Blatt 2 (2007-05)

In [4] wird angemerkt, dass das in dieser Norm beschriebene Verfahren der Gradtagermittlung für Wohn- und Bürogebäude anwendbar ist. Bei abweichenden Randbedingungen bzgl. der Gebäudenutzung und der damit einhergehenden veränderten Anforderungen an die thermische Konditionierung der Innenräume kann das Verfahren entsprechend modifiziert werden.

In [1] werden folgende Randbedingungen für eine Witterungsbereinigung von Energieverbrauchsdaten für den Heizfall genannt:

- Außentemperaturbereinigung des Heizenergieverbrauchs erfolgt über Gradtage
- Gradtage werden nach VDI 4710 Blatt 2 bestimmt
- ein Gradtag G ist die Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur von $20°C$ und dem Tagesmittel der Außentemperatur
- bei der Gradtag-Ermittlung werde nur Tage mit einer Tagesmitteltemperazur von $\leq 15°C$ berücksichtigt
- Dauer des Betrachtungszeitraumes i.d.R. 12 Monate
- Bereinigung des Energieverbrauchs für Kühlung durch Ermittlung der Enthalpie und Lüftungsgradstunden

- bei Nutzung von Teilkennwerten kann Bereinigung auf Nutzenergieebene erfolgen
- bei automatischer Datenerfassung wird das Tagesmittel der Außentemperatur als Mittelwert der 24 Stundenwerte berechnet
- bei Einzelablesungen werde die Temperaturmessungen um 07:30 Uhr, 14:30 Uhr und 21:30 Uhr (MEZ) herangezogen
- mit Gradtagen und den mittleren Gradtagen ist der Vergleich des Heizenergieverbrauchs von Gebäuden an unterschiedlichen Orten und Zeiträume möglich
- der Vergleich von Heizenergieverbräuchen von Gebäuden am gleichen Ort kann auf mittlere Gradtage dieses Ortes bezogen werden,
- der Bezug auf örtliche Gradtage empfiehlt sich, wenn Energieverbräuche für Budgetierung verwendet werden
- für Vergleich und Bereinigung sind die Gradtage der Wetterstation zu verwenden, die den betrachteten Gebäuden am nächsten liegen (Gradtage und Tagesmitteltemperaturen von Webseiten des DWD)
- bei Vergleich von Gebäuden an unterschiedlichen Orten soll seit 2013 auf Mittelwerte von Potsdam (Jahresgradtage = 3667 $^{(K \cdot d)}/_{a}$, Bezug zu TRY 2011) (früher Würzburg, Jahresgradtage = 3883$^{(K \cdot d)}/_{a}$) bezogen werden
- Bezugsfläche ist die Summe aller beheizbaren (bzw. thermisch konditionierbaren) Bruttogrundflächen eines Gebäudes BGF_E

Berechnungsgleichungen:

Tagesmittel der Außentemperatur

$$t_{m,d} = \begin{cases} \frac{t_{07:30Uhr} + t_{14:30Uhr} + 2 \cdot t_{21:30Uhr}}{4} & \text{drei Einzelmessungen} \\ \frac{\sum_{i=0}^{23} t_{m,i}}{24} & \text{autom. Messung} \end{cases} \tag{A.14}$$

Gradtage

$$G_i = \begin{cases} 0 & \text{für } T_{base} \geq T_{avg} \quad \text{mit} \quad T_{avg} = 15°C \\ (20°C - t_{m,i}) & \text{für } T_{base} \leq T_{avg} \end{cases} \tag{A.15}$$

Anwendung

$$HDD \quad \text{bzw.} \quad G_z = \sum_{i=1}^{z} (20°C - t_{m,i}) \tag{A.16}$$

$$E_{Vg} = Q_{VgH} + Q_{VgP} \tag{A.17}$$

$$Q_{VH} = Q_{VgH} \cdot \frac{G_m}{G} \tag{A.18}$$

$$Q_{VT} = Q_{VH} + Q_{VP} \tag{A.19}$$

mit:

	E_{Vg}	aus gemessener Energiemenge errechneter Energieverbrauch für den Betrachtungszeitraum	kWh
	Q_{VgH}	außentemperaturabhängiger Energieverbrauch für Heizzwecke	kWh
	Q_{VgP}	außentemperaturunabhängiger Anteil (Prozesswärme)	kWh
	Q_{VH}	bereinigter Heizenergieverbrauch	kWh/a
	G	Gradtage für den Betrachtungszeitraum	$K \cdot d$
	G_m	langjähriges Mittel der Jahresgradtage	$(K \cdot d)/a$
	Q_{VT}	bereinigter Energieverbrauch für Raumheizung und Prozesswärme	kWh/a
	Q_{VP}	bereinigter Energieverbrauch für Prozesswärme	kWh/a
	$t_{m,d}$	Tagesmittel der Außentemperatur eines Heiztages ($t_{m,d} < 15°C$)	$°C$
	$t_{m,i}$	Tagesmittel der Außentemperatur einer Stunde eines Heiztages	$°C$
	T_{base}	Base- oder Schwellentemperatur	$°C$
	T_{avg}	Tagesmittel der Außentemperatur	$°C$
	z	Zahl der Tage im Auswertezeitraum mit $t_m < 15°C$	
	G_a	Summe der (Heiz-)Gradtage über ein Kalenderjahr	$(K \cdot d)/a$
bzw.	HDD	Heating Degree Days	

Ermittlung der Heizgradtage nach SPINONI

Die Ermittlung von Heizgradtagen (Heating Degree Days, *HDD*) erfolgt nach SPINONI gemäß [23] sowie [8] in der nachfolgend beschriebenen Form, wobei die Heizgradtage in dieser Definition im Zeitfenster von Januar bis einschließlich März sowie von Oktober bis einschließlich Dezember gezählt werden. In dieser Berechnungsvorschrift werden das Tagesminimum, das Tagesmaximum und die hieraus abgeleitete arithmetische Tagesmitteltemperatur berücksichtigt.

Die Wahl von T_{base} beeinflusst das Ergebnis wesentlich und kann z.B. abhängig von der geographischen Region bzw. deren Klima oder dem Zweck der Analyse gewählt werden. In [23] wird für die Wahl von T_{base} ein Ansatz des Wetterdienstes des Vereinigten Königreiches gewählt, wonach sich $T_{base} = 15,5°C$ aus dem arithmetischen Mittelwert der für mittlere europäische Breitengrade geltenden mittleren Außentemperatur der Winterperiode von $9°C$ und der Außentemperatur während der Tageslicht-Phase von $19 - 21°C$, ab deren Unterschreitung üblicherweise die Beheizung von Gebäuden in Betrieb genommen wird. Als Tageslichtphase wird die Zeit zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang bezeichnet. Für den Standort Leipzig können aus den Angaben von [26] für die Tageslichtphase des Winterhalbjahres von Oktober bis März Mittelwerte für Beginn und Ende mit 7:43 Uhr bzw. 18:15 Uhr abgeleitet werden.

Basis- bzw. Schwellentemperatur

$$T_{base} = T_{avg,daytime,heating_{start}} - \frac{\Delta T_{avg,Oct-Mar}}{2} \tag{A.20}$$

$$= 20°C - \frac{9K}{2} = 15,5°C \tag{A.21}$$

Tagesmittel der Außentemperatur

$$T_{avg} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \tag{A.22}$$

Heizgradtage

$$HDD_i = \begin{cases} T_{base} - T_{avg} & \text{für durchgängig kalte Tage mit } T_{max} \leq T_{base} \\ \frac{T_{base}-T_{min}}{2} - \frac{T_{max}-T_{base}}{4} & \text{für überwiegend kalte Tage mit } T_{avg} \leq T_{base} < T_{max} \\ \frac{T_{base}-T_{min}}{4} & \text{für überwiegend warme Tage mit } T_{min} < T_{base} < T_{avg} \\ 0 & \text{für durchgängig warme Tage mit } T_{min} \geq T_{base} \end{cases} \tag{A.23}$$

$$HDD = \sum_{i=1}^{d_a} HDD_i \tag{A.24}$$

mit:

d_a	Anzahl der Tage pro Jahr	$= \begin{cases} 183 & \text{Normaljahr} \\ 184 & \text{Schaltjahr} \end{cases}$
HDD	Summe der Heizgradtage (Heating Degree Days) über ein Kalenderjahr	$(K \cdot d)/a$
T_{base}	Basis- bzw. Schwellentemperatur	$= 15,5°C$
T_{max}	Tagesmaximum der der Außenlufttemperatur	$°C$
T_{avg}	Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur	$°C$
T_{min}	Tagesminimum der Außenlufttemperatur	$°C$
$\Delta T_{avg,Oct-Mar}$	Differenz zwischen T_{max} und T_{min} an einem typischen Tag von Oktober bis März für mittlere europäische Breitengrade	$= 9K$
$T_{avg,daytime,start_{heating}}$	Außentemperatur während der Tageslicht-Phase, bei deren Unterschreitung der Heizbetrieb in Gebäuden beginnt	$= 19 - 21°C$

A.3.2. Kühlenergieverbrauch

Vorbemerkungen

Die Kühlgradtage (Cooling Degree Days, *CDD*) repräsentieren gemäß der Definition in [8] die Jahressumme der täglichen Kühlgrade. Die in [9] dargestellt Berechnung folgt einem in [23] sowie [8] beschriebenen Vorschlag von SPINONI, der eine Wichtung des Maßes der

Überschreitung der Innentemperatur durch die Außentemperatur gemäß Gleichung A.29 sowie Gleichung A.28 vorsieht.

Ermittlung der Kühlgradtage nach SPINONI

Die Ermittlung von Kühlgradtagen (Cooling Degree Days, *CDD*) erfolgt nach SPINONI gemäß [23] sowie [8] in der nachfolgend beschriebenen Form, wobei die Kühlgradtage in dieser Definition im Zeitfenster von April bis einschließlich September gezählt werden.

Basis- bzw. Schwellentemperatur

$$T_{base} = T_{avg,daytime,start,cool} - \frac{\Delta T_{avg,Apr-Sep}}{2} \tag{A.25}$$

$$= 29°C - \frac{14K}{2} = 22,0°C \tag{A.26}$$

Tagesmittel der Außenlufttemperatur

$$T_{avg} = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \tag{A.27}$$

Kühlgradtage

$$CDD_i = \begin{cases} 0 & \text{für durchgängig kalte Tage mit } T_{base} \geq T_{max} \\ \frac{T_{max}-T_{base}}{4} & \text{für überweigend kalte Tage mit } T_{avg} \leq T_{base} < T_{max} \\ \frac{T_{max}-T_{base}}{2} - \frac{T_{base}-T_{min}}{4} & \text{für überweigend warme Tage mit } T_{min} \leq T_{base} < T_{avg} \\ T_{avg} - T_{base} & \text{für durchgängig warme Tage mit } T_{base} \leq T_{min} \end{cases} \tag{A.28}$$

$$CDD = \sum_{i=1}^{d_a} CDD_i \tag{A.29}$$

mit:

d_a	Anzahl der Tage pro Jahr	$= \begin{cases} 182 & \text{Normaljahr} \\ 182 & \text{Schaltjahr} \end{cases}$
CDD	Summe der Kühlgradtage (Cooling Degree Days) über ein Kalenderjahr	$(K \cdot d)/a$
T_{base}	Basis- bzw. Schwellenwert der Temperatur	$= 22°C$
T_{max}	Tagesmaximum der Außenlufttemperatur	$°C$
T_{avg}	Tagesmittelwert der der Außenlufttemperatur	$°C$
T_{min}	Tagesminimum der der Außenlufttemperatur	$°C$
$\Delta T_{avg,Apr-Sep}$	Differenz zwischen T_{max} und T_{min} an einem typischen Tag von April bis September für mittlere europäische Breitengrade	$= 14K$
$T_{avg,daytime,start,cool}$	Außentemperatur während der Tageslicht-Phase, bei deren Überschreitung der Kühlbetrieb in Gebäuden beginnt	$= 28 - 30°C$

A.4. Berücksichtigung mehrerer verschiedener Nutzungsarten innerhalb einer Liegenschaft

Der Gewächshausbau vereint die zwei Nutzungsbereiche Gewächshaus (Glasbau) sowie Laborbereich (Massivbau). Einige Energieverbräuche der energietechnischen Anlagen und Systeme werden nicht getrennt erfasst, so dass unter Beachtung der in [19] beschriebenen Regelungen für die Ermittlung von Energiekennwerten im Kontext der Ausstellung von Energieausweisen für den Gebäudebestand Vergleichswerte für Wärme und Strom nach folgender Berechnungsvorschrift zu ermitteln sind.

$$e_{Vergl,h} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \cdot e_{Vergl,h,i} \cdot A_{NGF,i}}{A_{NGF}} \tag{A.30}$$

$$e_{Vergl,s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \cdot e_{Vergl,s,i} \cdot A_{NGF,i}}{A_{NGF}} \tag{A.31}$$

mit:

$e_{Vergl,h}$	Vergleichswert Wärme für den gesamten Gebäudekomplex	$kWh/(m^2 \cdot a)$
$e_{Vergl,s}$	Vergleichswert Strom für den gesamten Gebäudekomplex	$kWh/(m^2 \cdot a)$
$e_{Vergl,h,i}$	Vergleichswert Wärme für die Gebäudekategorie i	$kWh/(m^2 \cdot a)$
$e_{Vergl,s,i}$	Vergleichswert Strom für die Gebäudekategorie i	$kWh/(m^2 \cdot a)$
$A_{NGF,i}$	Teilfläche i der Energiebezugsfläche, basierend auf NGF	m^2
A_{NGF}	Energiebezugsfläche, basierend auf NGF	m^2
$t_{leer,i}$	Leerstand einer Teilfläche i	m^2

A.5. Andere Einflussgrößen

In [1] wird weiter auf andere Einflussgrößen auf den Energieverbrauch hingewiesen, die nicht durch Korrekturfaktoren erfasst werden:

- Nutzung
- Nutzerverhalten
- technische Ausstattung
- baulicher Wärmeschutz

Für die Berücksichtigung dieser Einflussgrößen wird auf [6] sowie [7] verwiesen.

Literatur

[1] VDI 3807 Blatt 1:2007-03. *Energie- und Wasserberbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 1 - Grundlagen*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2007 (siehe S. 7, 173, 175, 177, 178, 183).

[2] DIN EN 12975:2022-06. *Sonnenkollektoren - Allgemeine Anforderungen*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Juni 2022 (siehe S. 10).

[3] VDI 2169:2012-10. *Funktionskontrolle und Ertragsbewertung bei solarthermischen Anlagen*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2012 (siehe S. 10).

[4] VDI 4710 Blatt 2:2007-07. *Meteorologische Daten in der technischen Gebäudeausrüstung: Blatt 2 - Gradtage*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Juli 2007 (siehe S. 178).

[5] VDI 3807 Blatt 2:2014-11. *Energie- und Wasserberbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 2 - Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2014 (siehe S. 10).

[6] VDI 3807 Blatt 3:2015-11. *Energie- und Wasserberbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 3 - Teilkennwerte Wasser*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Nov. 2011 (siehe S. 183).

[7] VDI 3807 Blatt 5:2014-11. *Energie- und Wasserberbrauchskennwerte für Gebäude: Blatt 5 - Teilkennwerte thermische Energie*. Norm. Berlin: Verein Deutscher Ingenieure, Okt. 2014 (siehe S. 183).

[8] Spinoni J. et. al. „Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100". In: *International Journal of Climatology* 38 (2018). DOI: 10.1002/joc.5362, S. 191–208 (siehe S. 7, 180–182).

[9] Stefan v. Andrian-Werburg. *Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie: BAU-I-3 - Indikator-Factsheets zum Handlungsfeld Bauwesen - Kühlgradtage*. Dessau, Juli 30.07.2019 (siehe S. 7, 181).

[10] Technische Universität Dresden. *Zertifikat zum Primärenergiefaktor des Fernwärmenetzes der Stadtwerke Leipzig GmbH*. online `https://files.l.de/lde-typo3/Leipziger/Stadtwerke/Dokumente/Waerme-Komfort/Produktinformationen/LSW_Zertifikat_Primaerenergiefaktor_GEG_2020.pdf`. Dresden, 1.06.2020 (siehe S. 8).

[11] s-power Entwicklungs-& Vertriebs GmbH. *Technisches Datenblatt - Direct Flow*. Meppen, 2011 (siehe S. 26).

[12] s-power Entwicklungs-& Vertriebs GmbH. *Technisches Datenblatt - Heat Pipe*. Meppen, 2013 (siehe S. 26).

[13] EA Systems Dresden GmbH. *Abschlussbericht - Simulation Anlagenkonzept und Monitoringkonzept – IDIV-Gewächshaus*. Dresden, 17.03.2015 (siehe S. 6, 7).

[14] GEFOMA GmbH. *Schema Energiesysteme - Ausführungsplanung*. Großbeeren, 24.11.2017 (siehe S. 28).

[15] GEFOMA GmbH. *Schematische Darstellung der solarthermischen Anlage - Ausschnitt Kollektorfeld (Ausführungsplanung)*. Großbeeren, 2017 (siehe S. 29).

[16] GEFOMA GmbH. *Solarthermischen Anlage - Grundriss und Schnitt des Dachgeschosses inkl. Lage bzw. Position der Kollektorfelder*. Großbeeren, 2017 (siehe S. 27).

[17] Stadtwerke Leipzig GmbH. *100 Jahre Fernwärme aus Leipzig für Leipzig - Sonderveröffentlichung der Stadtwerke Leipzig zum Jubiläum*. online https://www.yumpu.com/de/document/view/21959946/sonderbeilage-100-jahre-fernwarme-stadtwerke-leipzig-gmbh. 2013 (siehe S. 9).

[18] Zimmer & Hälbig GmbH. *Bestandsdokumentation zum Neubau des Forschungsgewächshauses IDIV an der Universität Leipzig - Schematische Darstellung der solarthermischen Anlage - Ausschnitt Kollektorfeld*. Leipzig, 2018 (siehe S. 29).

[19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/Bundesministerium des Innern für Bau und Heimat. *Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand*. Techn. Ber. Berlin, 2021 (siehe S. 7–9, 173, 175, 178, 183).

[20] AKOTEC Produktionsgesellschaft mbH. *Datenblatt Solarflüssigkeit VT51 hp*. Angermünde, 6.2017 (siehe S. 28).

[21] AKOTEC Produktionsgesellschaft mbH. *Zeichnung MEGA-Kollektor 70 Röhren Uni Leipzig*. Angermünde, 17.07.2017 (siehe S. 25, 28).

[22] OpenStreetMap Foundation (OSM). *Kartenausschnitt Linnestraße 1, Leipzig, Deutschland - Map Data from OpenstreetMap*. online openstreetmap.org/search?query=Linnestra\T1\sse1Leipzig#map=19/51,32921/12,39236. 18.11.2022 (siehe S. 27).

[23] Spinoni J.; Vogt J. V.; Barbosa P. „European degree-day climatologies and trends for the period 1951 to 2011". In: *International Journal of Climatology* 35 (2015). DOI: 10.1002/joc.3959, S. 25–36 (siehe S. 7, 180–182).

[24] Leipziger Stadtwerke. *Stromkennzeichnung für Stromlieferungen im Jahr 2019ff. der Leipziger Stadtwerke*. online https://files.l.de/lde-typo3/Leipziger/Stadtwerke/Dokumente/Strom_Gas/LSW_Stromkennzeichnung.pdf. 1.11.2020 (siehe S. 9).

[25] Leipziger Stadtwerke. *Stromkennzeichnung für Stromlieferungen im Jahr 2021ff. der Leipziger Stadtwerke*. online https://files.l.de/lde-typo3/Leipziger/Stadtwerke/Dokumente/Strom_Gas/LSW_Stromkennzeichnung.pdf. 1.11.2022 (siehe S. 9).

[26] Time und Date AS. *Leipzig. Sachsen, Deutschland - Sonnenaufgang und Sonnenuntergang April 2023*. online https://www.timeanddate.de/sonne/deutschland/leipzig?month=4&year=2023. Stavanger, 20.03.2023 (siehe S. 180).

[27] Bundesanzeiger Verlag. *Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze*. online https://www.bgbl.de. 13.08.2020 (siehe S. 8, 9).