

TECHNISCHER BERICHT  
**Fehlererkennung und -diagnose TABS**

für das EnOB-Verbundvorhaben

**BUiLD.DIGITIZED**

IoT und BIM für die Inbetriebnahme und den Betrieb  
von netzdienlichen Niedrigstenergiegebäuden

1.7.2020 – 30.6.2023

**MONITORING.digital**

FKZ: 03EN1021A

Hochschule Offenburg | Institut für Energiesystemtechnik  
Badstraße 24 | 77652 Offenburg

**INBETRIEBNAHME.digital**

FKZ: 03EN1021B

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Heidenhofstraße 2 | 79110 Freiburg

**EVALUATION.digital**

FKZ: 03EN1021D

Mondas GmbH  
Emmy-Noether-Str. 2 | 79110 Freiburg

**Luftqualität**

FKZ: 03EN1021F

Testo SE & Co. KGaA  
Celsiusstraße 2 | 79822 Titisee-Neustadt

**Anlagenplanung mit BIM**

FKZ: 03EN1021C

Konzmann Gebäudetechnik GmbH  
Niederwiesenstraße 34 | 78050 VS-Villingen

**Betriebsführung mit BIM**

FKZ: 03EN1021E

Maurer Energie- und Ingenieurleistungen GmbH & Co. KG  
Dr.-Kurt-Steim-Straße 7 | 78713 Schramberg-Sulgen

Autor dieses Berichtes:

Leroy Tomás, M.Sc.

Hochschule Offenburg | Institut für Energiesystemtechnik  
Badstraße 24 | 77652 Offenburg

leroy.tomas@hs-offenburg.de

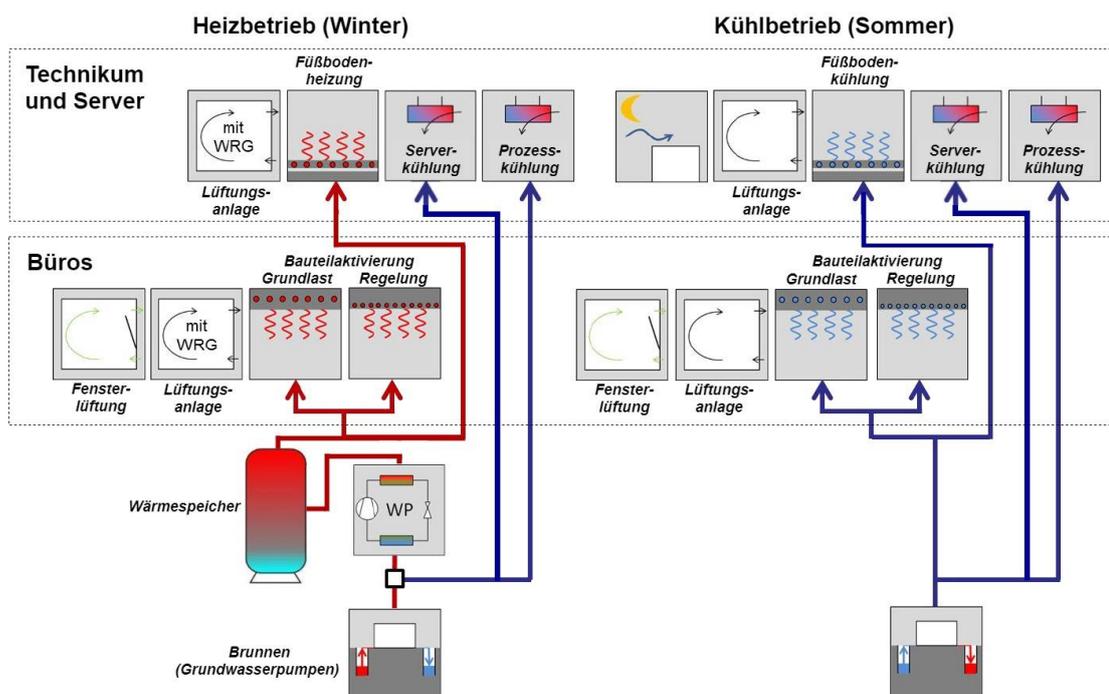
Offenburg, 24. Mai 2023

## Kurzfassung

Thermoaktive Bauteile tragen durch ihre innovative Funktionsweise zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Gebäuden bei und ermöglichen darüber hinaus ein angenehmes Raumklima. Gleichzeitig sind sie jedoch anfällig für Störungen und Fehlbetriebe. Das rechtzeitige Erkennen und Diagnostizieren von solchen Fehlern ist entscheidend, um ihre Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit aufrechtzuerhalten. Im vorliegenden Bericht wird gezeigt wie eine solche Fehlererkennung und -diagnose im RIZ Energie mit konventionellen Methoden stattgefunden hat. Somit dient dieser Bericht als Beispiel für die konventionelle oder „manuelle“ Fehlererkennung. Die Fehlererkennung fand hierbei durch Sichtung des Komfortdiagramms statt. Durch eine Analyse der Messdaten des gesamten Heizsystems wurde die Fehlerdiagnose durchgeführt. Schlussendlich gab es eine Handlungsempfehlung, die im realen Betrieb umgesetzt wurde. Die Ergebnisse dieser Fehlerbehebung werden in diesem Bericht ebenfalls kurz dargestellt.

## 1 Heiz- und Kühlbetrieb der TABS

Abbildung 1 zeigt in einem vereinfachten Schema die beiden Betriebsmodi des Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik-Systems des Gebäudes. Links ist das Schema für den Heizbetrieb im Winter und rechts das Schema für den Kühlbetrieb im Sommer abgebildet. In beiden Schemata wird ersichtlich, dass Server- und Prozesskühlung das ganze Jahr zur Verfügung stehen müssen. Der wesentliche Unterschied besteht in den TABS. Im Kühlbetrieb wird das Wasser direkt über einen Wärmetauscher zu den TABS gefördert, während es im Heizbetrieb über eine Wärmepumpe in den Wärmespeicher gelangt und von dort in die TABS fließt. Es wurden zwei unterschiedliche Lagen der Rohrregister in den Betondecken der Büros verbaut: Ein Rohrregister in Mittellage für die Bereitstellung der Grundlast, die nachts zum Einsatz kommt und ein Rohrregister in oberflächennaher Lage für die flexible Nachregelung, die tagsüber betrieben wird und.



**Abbildung 1** Betriebsmodi des RIZ Energie: Heizbetrieb (links) und Kühlbetrieb (rechts).

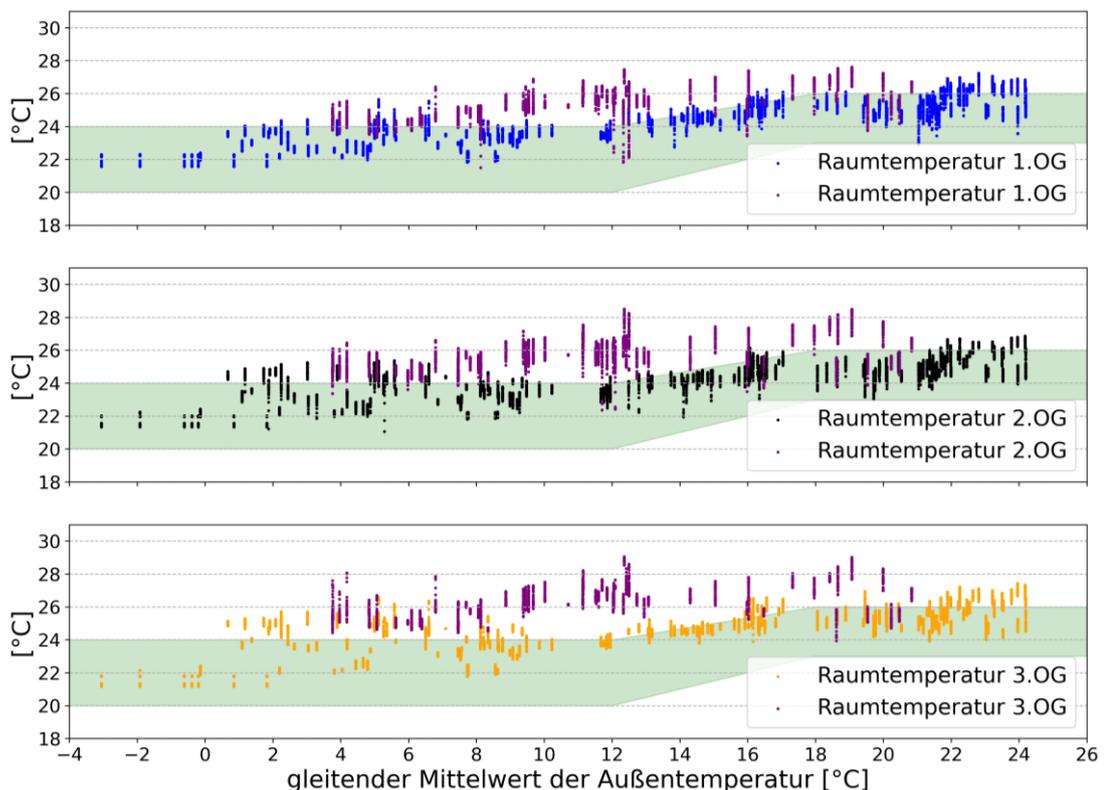
Die Vorlauftemperatur der TABS und damit die Raumtemperaturen werden mit einer außentemperaturgeführten Heiz- und Kühlregelung (Heiz- und Kühllkurven) gesteuert. Diese Kurven geben im Wesentlichen an, wie hoch die Vorlauftemperatur des TABS in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Außentemperatur sein soll. Diese Punkte müssen in der GLT des Gebäudes in Abhängigkeit von der Betriebsart (Heizen oder Kühlen) und Gebäudeteil (Büro oder Technikum) definiert werden. Im Wesentlichen steuern sie ein Mischventil im TABS-Kreislauf. Dieses Drei-Wege-Ventil regelt die Temperatur des Wassers, das aus dem Wärmespeicher (im Heizbetrieb) oder direkt aus dem Wärmetauscher der Grundwasserpumpen (im Kühlbetrieb) kommt, um die erforderliche Vorlauftemperatur im Kreislauf zu erreichen.

## 2 Fehlererkennung

In Abbildung 2 sind die Komfortdiagramme der drei Etagen des RIZ Energie dargestellt. Die Temperaturen der Übergangsmonate (März bis Mai) sind jeweils in violett dargestellt.

Diese Diagramme konnten zur Fehlererkennung verwendet werden, da die Auslegung des Kühl- und Heizungssystems nach den Grenzwerten des Komfortbereichs II der EN 16798 erfolgt ist. Somit sollten die Raumtemperaturen im Normalbetrieb innerhalb der Komfortgrenzen liegen. Es sind nur die Temperaturen innerhalb der Anwesenheitszeiten (Mo-Fr, 8-18 Uhr) dargestellt.

Um eine Fehlerdiagnose zu erstellen, wurde die gesamte Kette des Heizungssystems (TABS, Wärmespeicher und Wärmepumpe) und die Zeiträume, in denen diese extrem hohen Temperaturen auftraten, analysiert.



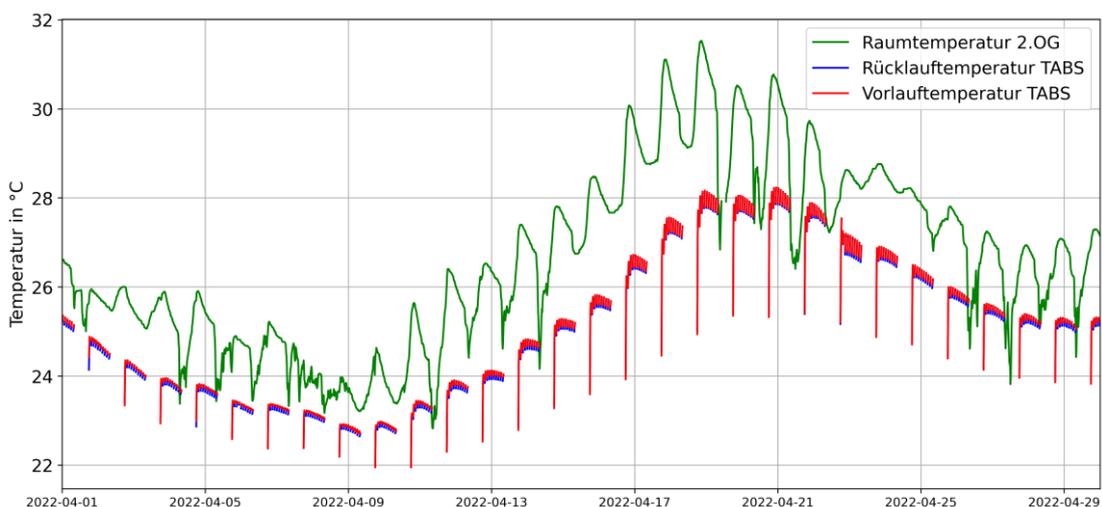
**Abbildung 2** Komfortauswertung nach DIN EN 15251 mit gemessenen Daten. Zeitraum: Januar bis Dezember 2022

### 3 Fehlerdiagnose

Bei der manuellen Fehlerdiagnose muss durch Einsicht von Messdaten, insbesondere der Zeitreihen, die Fehlerquelle ermittelt werden. In diesem Fall liegt ein Fehler vor, da die Raumtemperaturen außerhalb der Komfortgrenzen liegen.

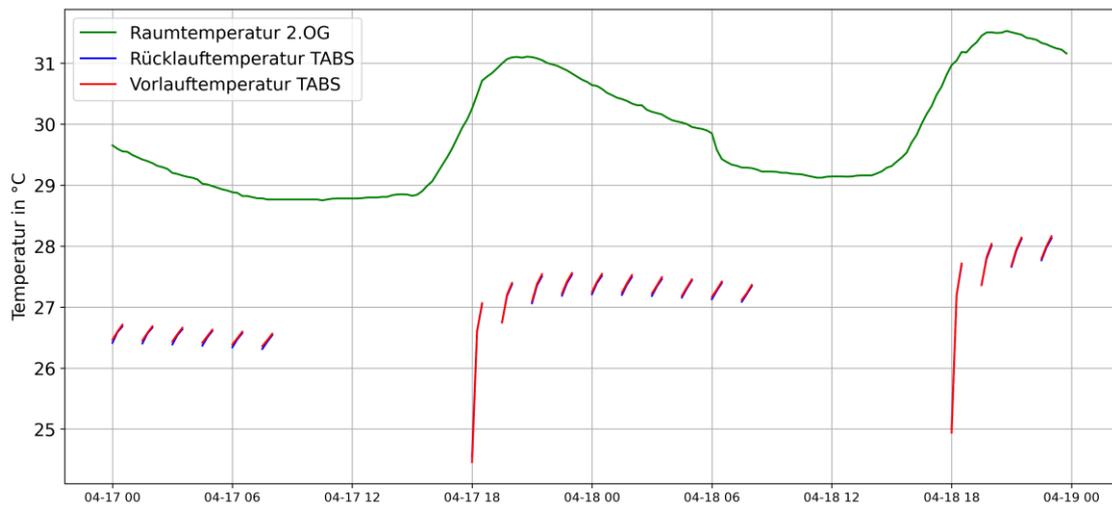
Im ersten Schritt wurden daher die Temperaturen im Übergabesystem, also die Vorlauftemperaturen der TABS, geprüft. Im Folgenden werden dabei die Messdaten im April 2022 als exemplarische Daten für den Übergangsbetrieb und die Messdaten im Dezember 2022 als exemplarische Daten für den Heizbetrieb herangezogen und verglichen. Abbildung 3 zeigt die Zeitreihen der Vor- und Rücklauftemperaturen und der Raumtemperatur im 2.OG für den Monat April. Beim Vergleich mit Abbildung 2 fällt auf, dass die Raumtemperaturen außergewöhnlich hoch sind und sich außerhalb des zu erwartenden Komfortbereichs von ca. 20-24°C befinden. Es kann noch keine Aussage darüber getroffen werden wann die Raumtemperaturen den Komfortbereich verlassen, da dazu der gleitende Mittelwert der Außentemperatur betrachtet werden muss.

Aus der Abbildung 3 geht weiterhin hervor, dass die Vor- und Rücklauftemperaturen sehr nah beieinander liegen und beide Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur liegen, obwohl der Gebäudebetrieb sich zu diesem Zeitpunkt im Heizbetrieb befand (wobei der Übergangsbetrieb im Wesentlichen dem Heizbetrieb entspricht, abgesehen von der Aktivierung des Sonnenschutzes). Die TABS-Temperaturen sind dabei zeitlich gefiltert und werden somit nur für die Zeiträume eingeblendet, in denen die entsprechende Umwälzpumpe aktiv war.



**Abbildung 3** Raumtemperatur im 2.OG und Vor- und Rücklauftemperatur der TABS im April 2022

Um weiterhin zu ergründen, warum die Vor- und Rücklauftemperaturen der TABS beinahe identisch sind, wird in Abbildung 4 eine Vergrößerung der Abbildung 3 betrachtet. Hier fällt auf, dass die TABS jeweils einen kurzen Zeitraum von 30 Minuten aktiv sind und anschließend ausgeschaltet werden. Dies geschieht ausschließlich im Nachtbetrieb (zwischen 18 und 8 Uhr) und wiederholt sich alle 60 Minuten. Diese Beobachtungen stimmen mit den Raumtemperaturregelungsparametern für die Bauteilaktivierung und Fußbodenheizung/-kühlung in den Bürobereichen gemäß der Funktionsbeschreibung überein. Hier wird definiert, dass die TABS im Nachtbetrieb ausgeschaltet werden sollen, wenn eine Temperaturspreizung von weniger als 1 K (zwischen Vor- und Rücklauftemperatur) erreicht wird. Im Anschluss soll eine Sperrzeit von 60 Minuten ablaufen bevor die Ventile der TABS wieder geöffnet werden. Nach jedem erneuten Öffnen soll mindestens eine Zeit von 30 Minuten verstreichen bevor die Ventile wieder geschlossen werden können. In Abbildung 4 ist genau dieses Ein- und Ausschaltverhalten zu beobachten. Hier sind die Betondecke und der Raum jedoch bereits auf einer so hohen Temperatur, dass durch die TABS keine Wärme mehr zugeführt werden kann. Aus diesem Grund gleichen sich die Vor- und Rücklauftemperatur.



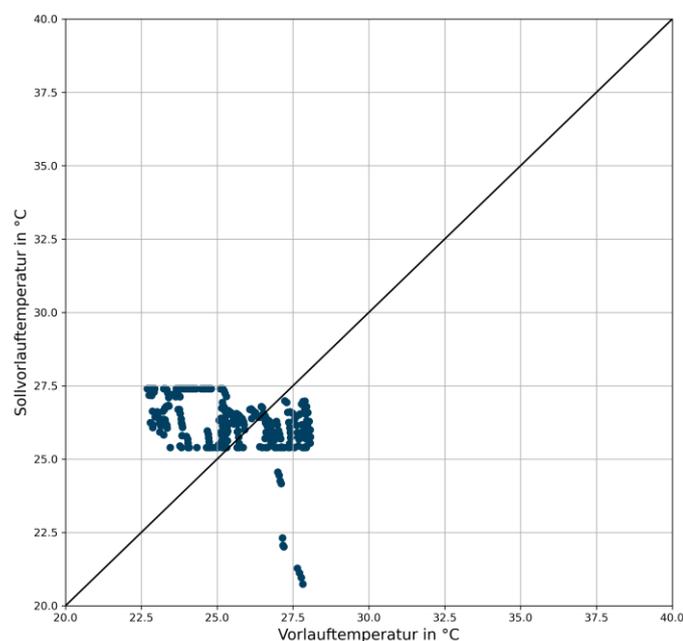
**Abbildung 4:** Zeitreihen des TABS Betriebs für 3 Tage

Es besteht der Verdacht, dass eine zu hohe Vorlauftemperatur die Ursache dafür war, dass eine derart hohe Raum- und Betontemperatur eintreffen konnte. Aus diesem Grund wurden im nächsten Schritt die Vorlauftemperatur und die Solltemperatur untersucht.

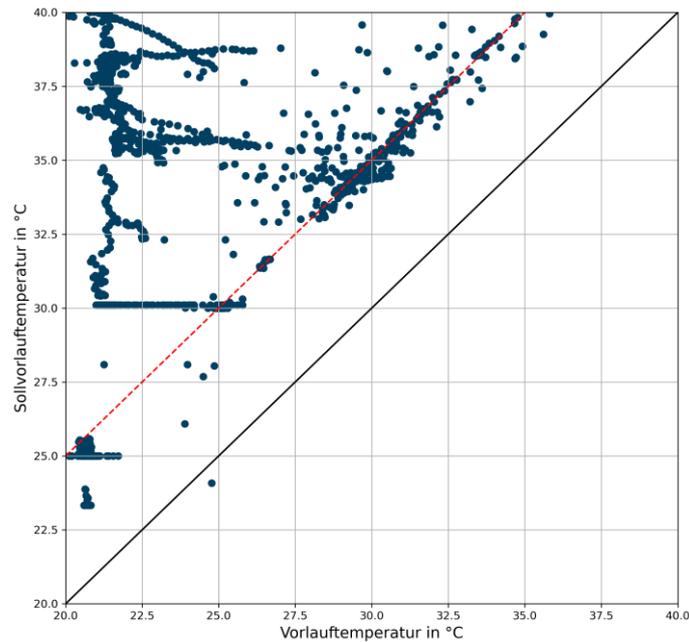
Im Rahmen der Untersuchung wurde primär geprüft, ob die Vorlauftemperatur der TABS mit der Solltemperatur übereinstimmt. Die grafische Darstellung mittels eines Streudiagramms (siehe Abbildung 5) zeigt, dass die Vorlauftemperatur nicht präzise der Solltemperatur entspricht, sondern häufig sowohl unterhalb als auch oberhalb dieser liegt.

Zum Vergleich wird der Monat Dezember in Abbildung 6 herangezogen. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Vorlauftemperatur konstant unterhalb der Solltemperatur liegt. Dabei liegt die Vorlauftemperatur häufig auf der eingezeichneten Diagonalen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Vorlauftemperatur in der Regel 5 K unterhalb der Solltemperatur liegt.

Bei weiterer Recherche stellte sich heraus, dass in der Regelungstechnik der GLT ein 5 K Offset zwischen Soll- und Vorlauftemperatur hinterlegt wurde wodurch der Versatz im Streudiagramm erklärt werden kann. Dies erklärt jedoch nicht die erhöhten Raumtemperaturen, da dieses Verhalten im Übergangsbetrieb (April) nicht beobachtet wurde und die Vorlauftemperaturen geringer und nicht höher sind als erwartet.

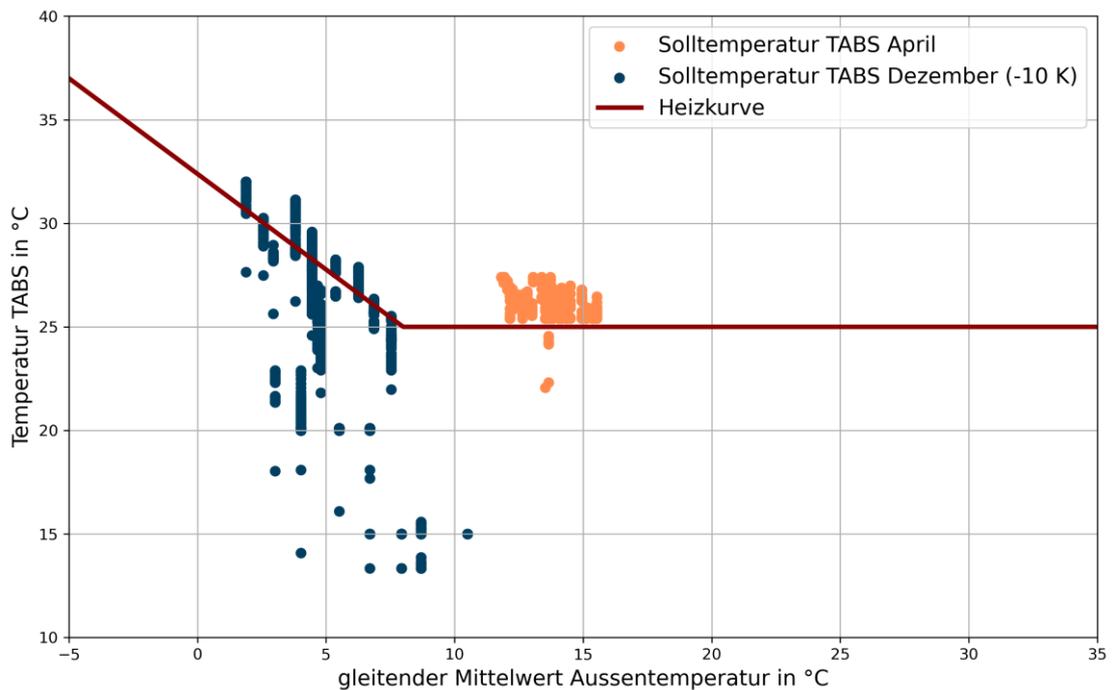


**Abbildung 5:** Gegenüberstellung von Solltemperatur und Vorlauftemperatur der TABS im April 2022



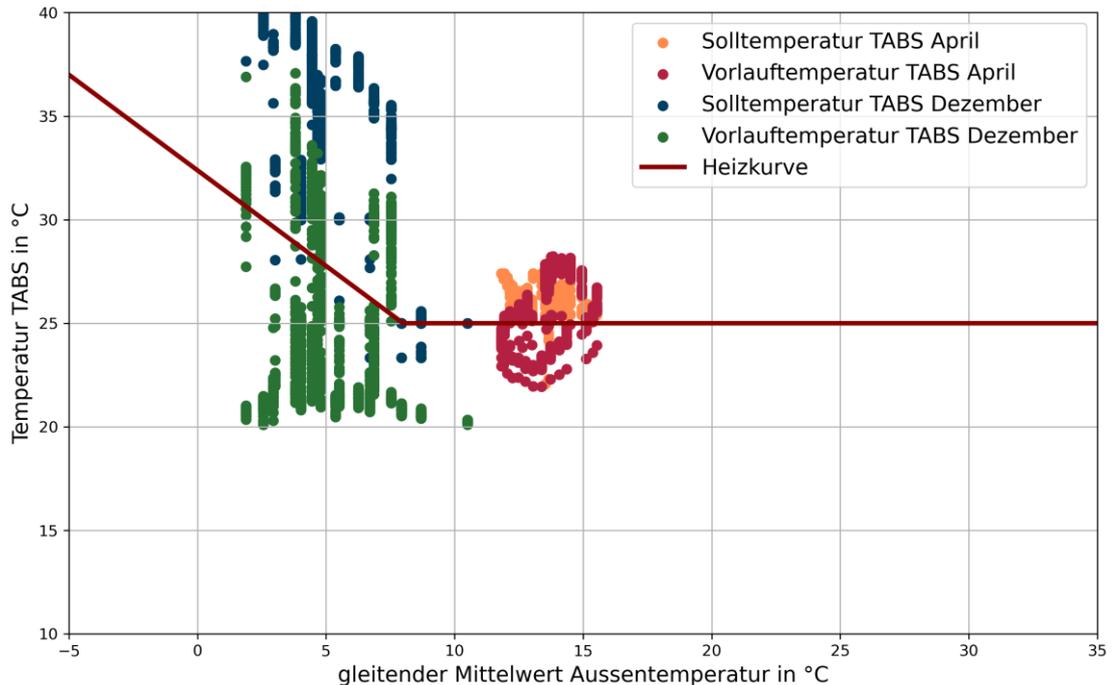
**Abbildung 6:** Gegenüberstellung von Solltemperatur und Vorlauftemperatur der TABS im Dezember 2022

Nun wird daher geprüft, ob die Temperaturen der TABS auch der eingestellten Heizkurve entsprechen. Ist dies nicht der Fall liefert das eine mögliche Erklärung für die erhöhten Raumtemperaturen. Abbildung 7 zeigt die Heizkurve, die über dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur aufgetragen wird, in der Gegenüberstellung mit den Solltemperaturen für Dezember und April. Für den April ist zu erkennen, dass die Solltemperaturen sich im erwarteten Bereich der Heizkurve bewegen. Die Solltemperaturen im Dezember hingegen passen sich dem Verlauf der Heizkurve nur dann an, wenn mit einem Versatz von -10 K gerechnet wird. Wie an einigen wenigen Datenpunkten im Streudiagramm zu erkennen, ist gilt dies jedoch nicht für den konstanten Teil der Heizkurve (bei über 8 °C gleitendem Mittelwert der Außentemperatur).



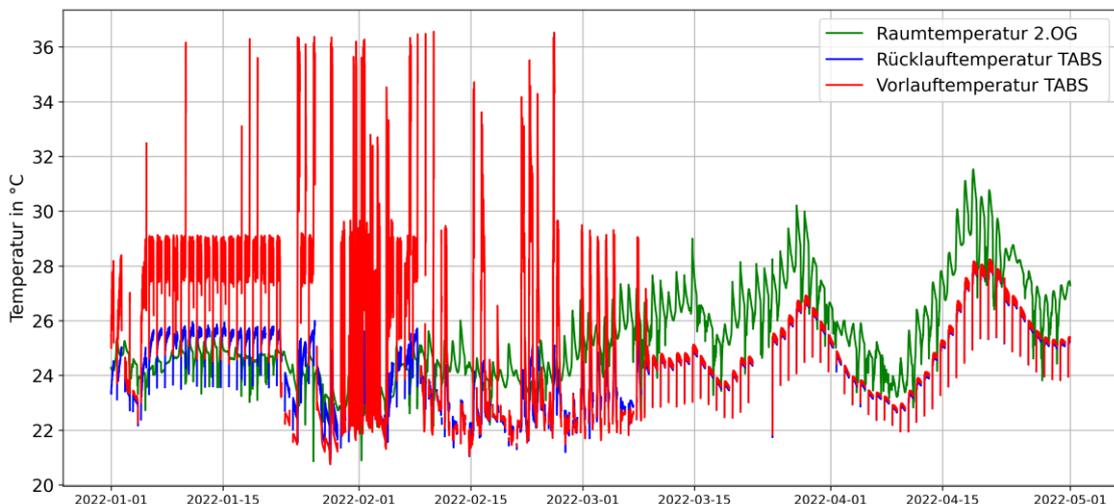
**Abbildung 7:** Solltemperaturen der TABS im Vergleich mit der eingestellten Heizkurve

Es können zusätzlich die entsprechenden Vorlauftemperaturen im Streudiagramm dargestellt werden. Dies wird in Abbildung 8 gezeigt. Bei der Gegenüberstellung aller Temperaturen wird deutlich, dass sich die Vorlauftemperaturen auch hier im Übergangsbetrieb (April) im erwarteten Bereich der Heizkurve bewegen, auch wenn es Schwankungen gibt. Im reinen Heizbetrieb (Dezember) hingegen fällt auf, dass die Vorlauftemperaturen 5 K unterhalb der Solltemperaturen und gleichzeitig 5 K oberhalb der Heizkurve liegen.



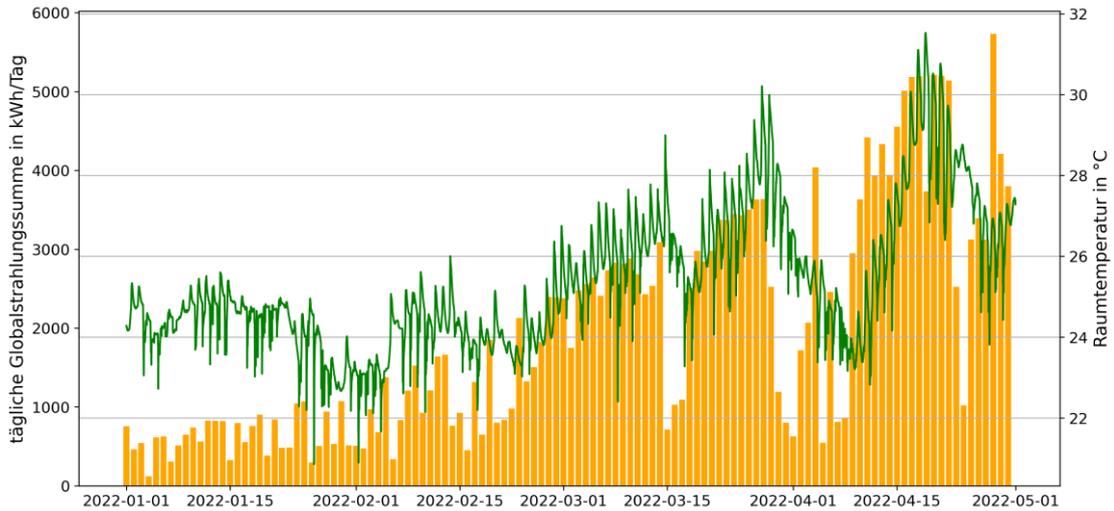
**Abbildung 8:** Soll- und Vorlauftemperaturen der TABS im Vergleich mit der eingestellten Heizkurve

Somit kann eine erhöhte Raumtemperatur zumindest in den Wintermonaten mit reinem Heizbetrieb erklärt werden. Ein erweiterter Blick auf die Zeitreihe der Raumtemperatur sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen (siehe Abbildung 9) zeigt, dass die Raumtemperatur über mehrere Monate stieg und so die Komfortgrenzen verletzte. Im März überstieg die Raumtemperatur durchgehend die Vorlauftemperatur der TABS, was im Heizfall niemals der Fall sein sollte.



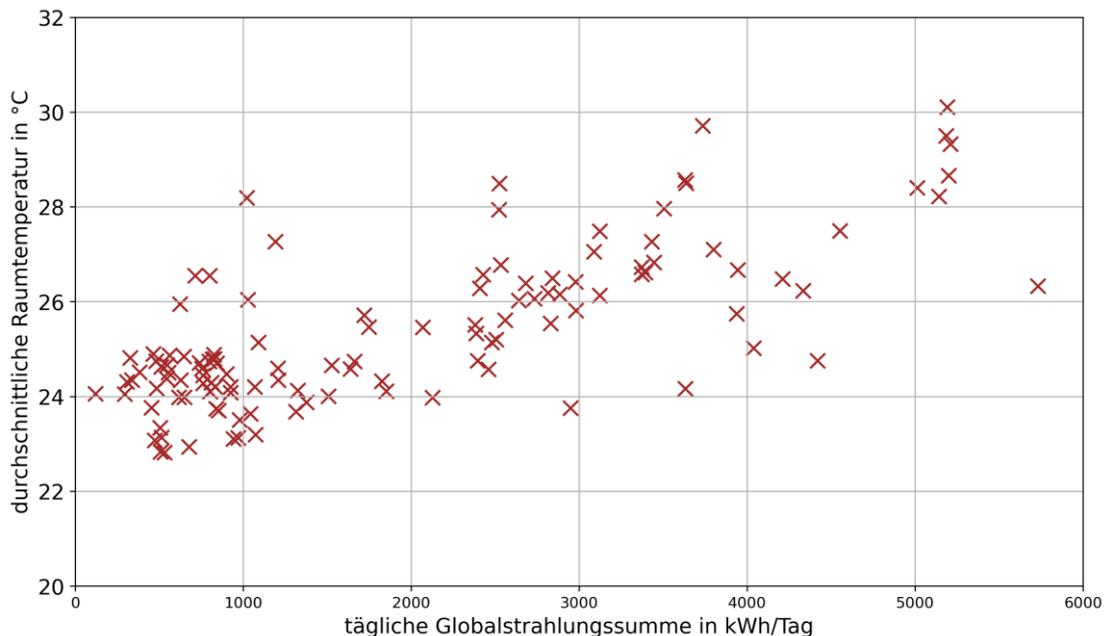
**Abbildung 9:** Zeitreihen der Raumtemperatur und der TABS-Temperaturen von Januar bis April 2022

Stellt man für denselben Zeitraum die Zeitreihe der Raumtemperatur und der Globalstrahlung gegenüber (siehe Abbildung 10) wird ersichtlich, dass der Temperaturanstieg mit der zunehmenden Globalstrahlung zusammenhängen könnte.



**Abbildung 10:** Zeitreihe der Raumtemperatur und Summe der täglichen Globalstrahlung von Januar bis April 2022

Dieser Zusammenhang wird noch deutlicher, wenn man die durchschnittliche Raumtemperatur und die tägliche Summe der Globalstrahlung in einem Streudiagramm direkt gegenüberstellt (siehe Abbildung 11). Hier erkennt man eindeutig eine positive Korrelation zwischen den beiden Größen. Im erwarteten Betrieb sollte die Raumtemperatur unabhängig von der Globalstrahlung konstant innerhalb der Komfortgrenzen liegen. Um das zu gewährleisten wird der Sonnenschutz durch Lamellenjalousien automatisiert gesteuert. Im nächsten Schritt soll daher der Betrieb der Jalousiensteuerung näher betrachtet werden.

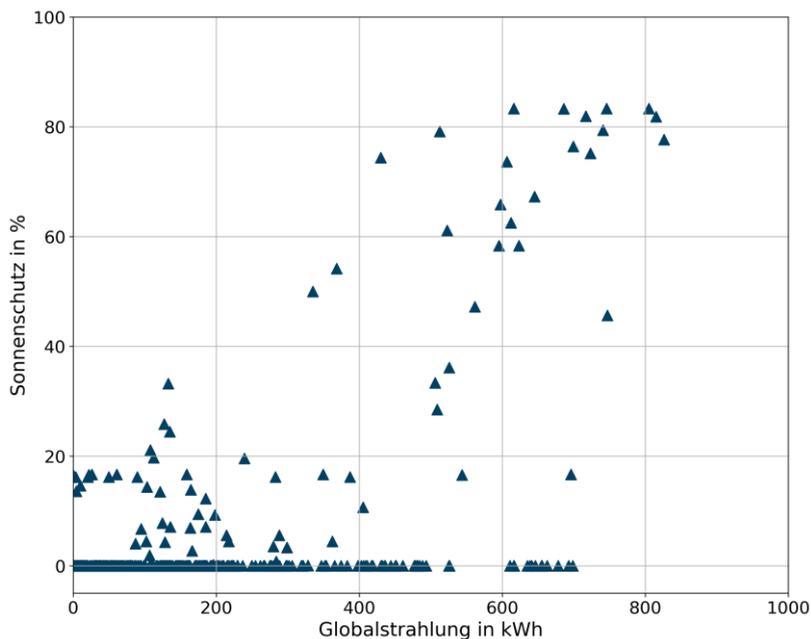


**Abbildung 11:** Streudiagramm der durchschnittlichen Raumtemperatur über der täglichen Globalstrahlungssumme von Januar bis April 2022

In der GLT wird für die Jalousiensteuerung ein fester Strahlungswert festgelegt ab dem die Jalousien automatisch heruntergefahren werden. Der dafür verwendete Strahlungswert wird von einem nach Westen ausgerichteten Sensor, da im RIZ nur an der Westfassade Jalousien vorhanden sind. Dabei wird zwischen zwei Werten für die Anwesenheits- und Abwesenheitszeiten differenziert. Die dafür festgelegten Schwellenwerte lauten wie folgt:

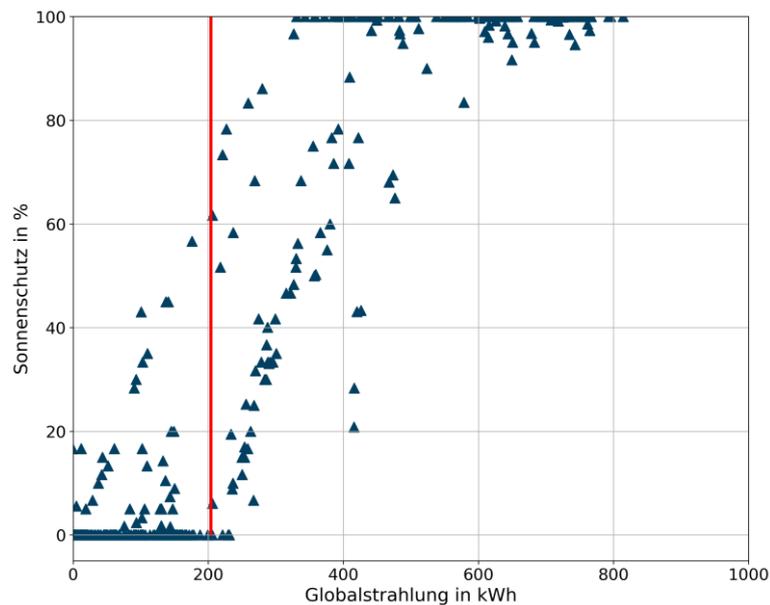
204.0 W/m<sup>2</sup>    Einschaltwert Strahlungsstärke bei Abwesenheit  
 304.0 W/m<sup>2</sup>    Einschaltwert Strahlungsstärke bei Anwesenheit

In *Abbildung 12* wird die Position des Sonnenschutzes über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2022 in einem Streudiagramm aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass in dem Zeitraum kein geregeltes Einschalten des Sonnenschutzes stattgefunden hat. Das ist dadurch zu erklären, dass der Übergangsbetrieb, der den Sonnenschutz erst aktiviert, manuell eingeschaltet wird und zu diesem Zeitpunkt das Gebäude sich folglich noch im reinen Heizbetrieb befand.



**Abbildung 12:** Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffnete und 100 % vollständig geschlossene Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2022

Zum Vergleich wird in *Abbildung 13* dasselbe Streudiagramm für den August 2022, also im Kühlbetrieb, dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass bei Übersteigen des Schwellenwerts die Jalousien geschlossen werden, wie das beim aktivierten Sonnenschutz zu erwarten ist. Es gibt nur wenige Datenpunkte, bei denen ersichtlich ist, dass die Jalousien auch bei knapp über 204 W/m<sup>2</sup> vollständig geöffnet waren. Das ist einerseits durch den höheren Schwellenwert in den Abwesenheitszeiten und andererseits durch die Tatsache zu erklären, dass die Benutzer den Sonnenschutz selbstständig steuern können.



**Abbildung 13:** Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffneten und 100 % vollständig geschlossenen Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im August 2022 und Schwellenwert für die Jalousiensteuerung in Anwesenheitszeiten (in rot)

Somit steht der mangelnde Sonnenschutz in der Übergangszeit 2022 als wesentliche Ursache für die erhöhten Raumtemperaturen fest. Hinzu kommt ebenfalls die Tatsache, dass die Vorlauftemperaturen um +5 K höher waren als sie von der Heizkurve gegeben sind. Diese beiden Effekte führten zur kontinuierlichen Erwärmung der Innenräume, bis hin zu einem Punkt in dem die Wärme aufgrund der erheblichen Speichermasse des Gebäudes nicht mehr ausreichend entweichen konnte.

Der mangelnde Sonnenschutz kann darauf zurückgeführt werden, dass das Gebäude sich im betrachteten Zeitraum noch im Heizbetrieb also nicht im Übergangsbetrieb befand. Somit wurde konstant geheizt, ohne dass die erheblichen solaren Gewinne, die bereits im Frühjahr beobachtet werden, von dem automatisierten Sonnenschutz abgefangen werden konnten. Das Umschalten von Heizbetrieb in den Übergangsbetrieb im richtigen Moment ist in der Gebäudetechnik keine unbekanntes Thema. Diese Fehleranalyse ist ein eindeutiges Beispiel dafür, warum das frühzeitige Umschalten für den Gebäudebetrieb wichtig ist.

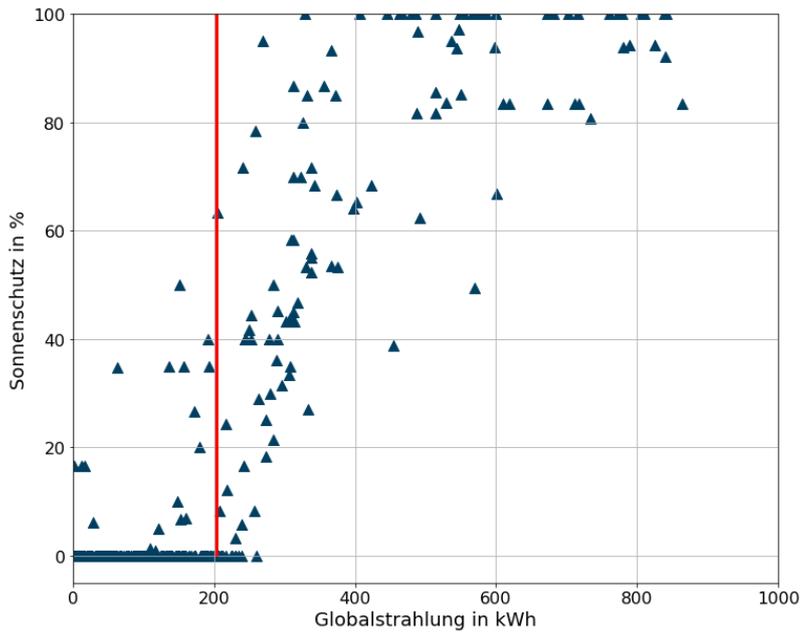
Die Handlungsempfehlung lautet in diesem Fall nach der nächsten Heizperiode rechtzeitig in den Übergangsbetrieb umzuschalten. Dabei können Wettervorhersagen und Messdaten genutzt werden, um die Globalstrahlung und somit die potentiellen solaren Wärmegevinne zu überwachen. Ebenfalls sollte die Vorlauftemperaturermittlung in der GLT überarbeitet werden. So kann gewährleistet werden, dass die TABS nur mit den benötigten Vorlauftemperaturen gespeist werden, was sowohl eine Energieeinsparung als auch einen verbesserten Komfort zur Frage haben sollte.

#### 4 Optimierter Übergangsbetrieb

Die Handlungsempfehlung konnte im darauffolgenden Jahr, also im Frühjahr 2023 umgesetzt werden. Im Folgenden werden die Monate April 2022 und April 2023 verglichen, um zu veranschaulichen, wie die Fehlerbehebung zu einem erhöhten thermischen Komfort geführt hat.

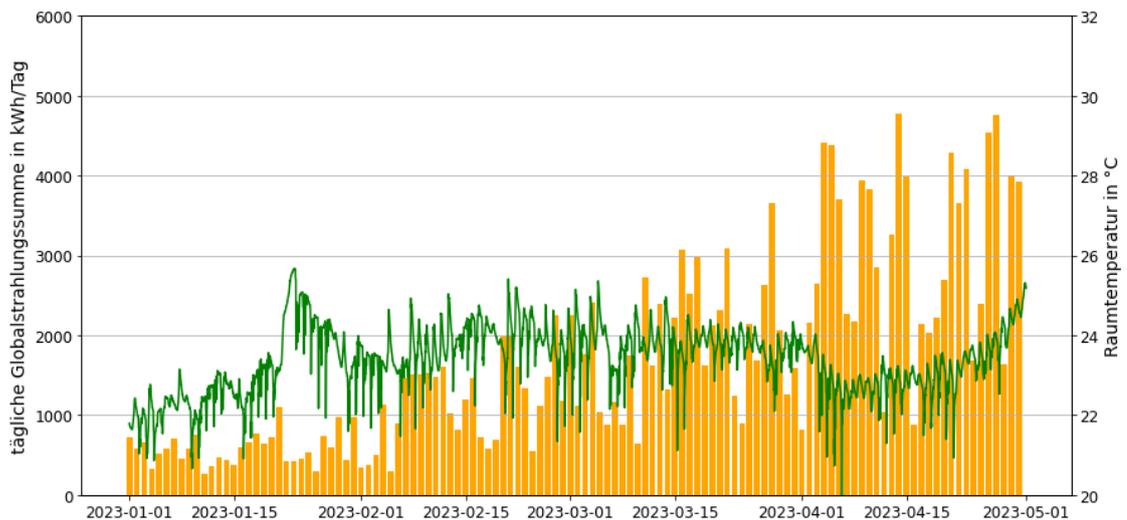
Zunächst wurde am 16.03.23 vom Heizbetrieb in den Übergangsbetrieb umgestellt. Zuvor wurden diejenigen Bausteine in der GLT-Programmierung entfernt, die für die 5K-Offsets in der Sollwertfindung der TABS Regelung gesorgt haben. Nun kann ausgewertet werden wie sich diese Maßnahmen auf den Gebäudebetrieb in der Übergangszeit ausgewirkt haben.

Das rechtzeitige Einschalten des Übergangsbetriebs hat eine Aktivierung des automatisierten Sonnenschutzes zur Folge. Wie *Abbildung 14* zeigt reagiert der Sonnenschutz auf die erhöhte Globalstrahlung an der Westfassade und schließt rechtzeitig (vgl. *Abbildung 12*).

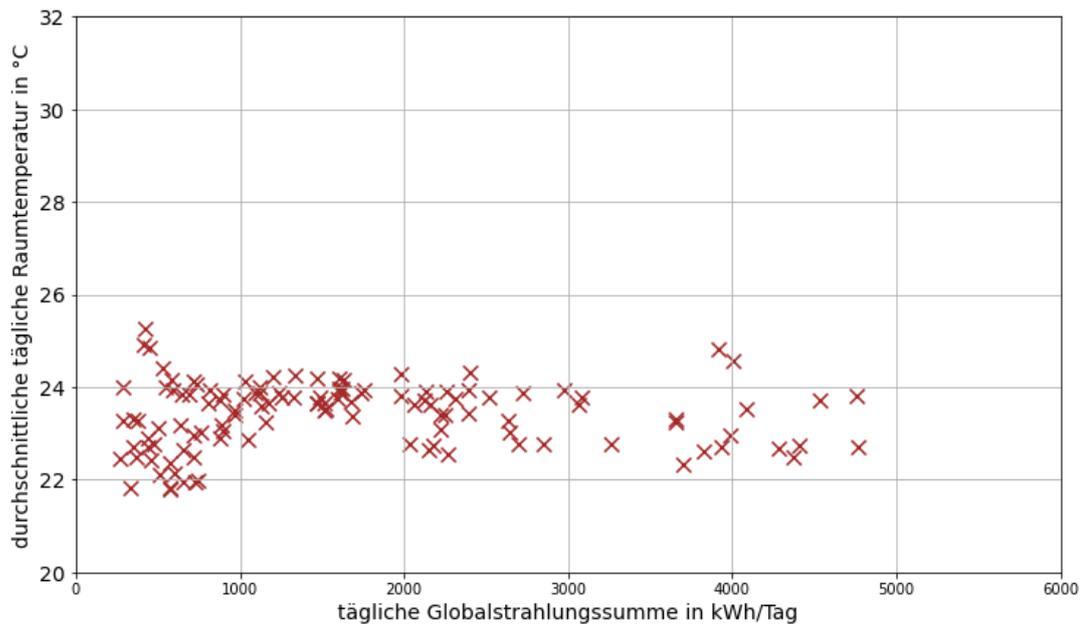


**Abbildung 14:** Position des Sonnenschutzes (0 % entspricht vollständig geöffneten und 100 % vollständig geschlossenen Jalousien) über der Globalstrahlung an der Westfassade im April 2023 und Schwellenwert für die Jalousiensteuerung in Anwesenheitszeiten (in rot)

Folglich wirkt sich das auch positiv auf die Raumtemperaturen im Gebäude aus. Wie *Abbildung 15* und *Abbildung 16* zeigen bleibt die Raumtemperatur, unabhängig von der Globalstrahlungssumme, innerhalb des Komfortbereichs (vgl. *Abbildung 10* und *Abbildung 11*).

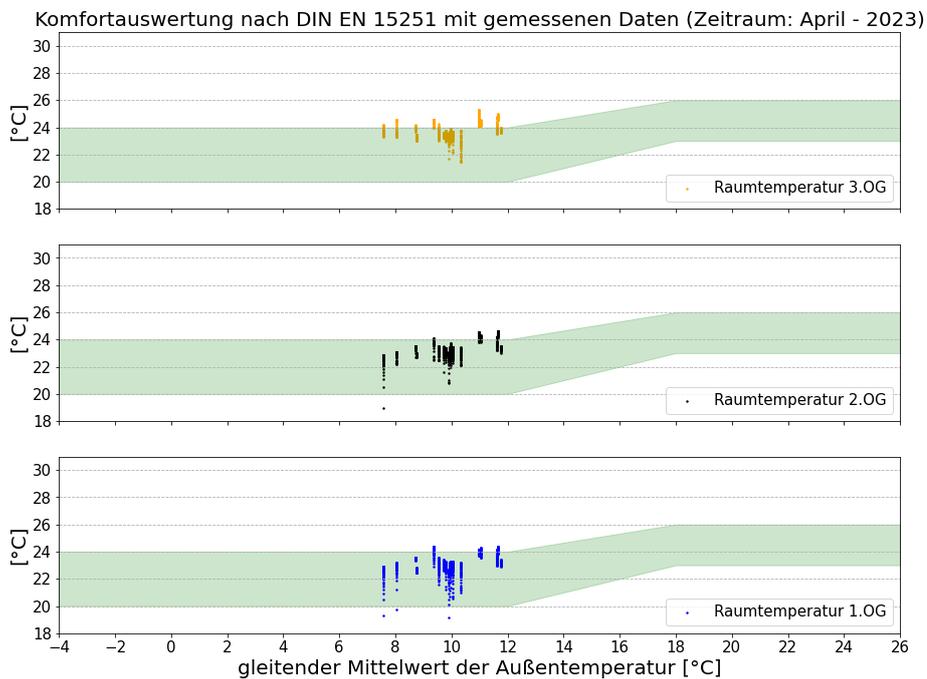


**Abbildung 15:** Zeitreihe der Raumtemperatur und Summe der täglichen Globalstrahlung von Januar bis April 2023



**Abbildung 16:** Streudiagramm der durchschnittlichen Raumtemperatur über der täglichen Globalstrahlungssumme von Januar bis April 2023

Schlussendlich ist im Komfortdiagramm für den April 2023 (siehe ) deutlich zu erkennen, dass durch die umgesetzten Fehlerbehebungsmaßnahmen ein Übergangsbetrieb innerhalb des Komfortbereichs erreicht wurde (vgl. *Abbildung 2*).



**Abbildung 17:** Komfortauswertung nach DIN EN 15251 mit gemessenen Daten. Zeitraum: April 2023