



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

**Sanierung des denkmalgeschützten Generalvikariats Fulda
Intensiv- und Langzeitmonitoring des realisierten Projektes**

Abschlussbericht

April 2020

Fördermittelgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

AZ 29999/03

Auftraggeber

Bistum Fulda

Generalvikar Prälat Prof. Dr. Gerhard Stanke

Paulustor 5

36037 Fulda

Auftragnehmer

Technische Universität Kaiserslautern

Fachbereich Architektur, Fachgebiet Hauskybernetik

Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen

Dr.-Ing. Kamyar Nasrollahi

M.Sc. Mehrdad Khalatbari

B.Sc. Mozghan Shirani

Pfaffenbergstraße 95

67663 Kaiserslautern

Impressum und Copyright

TU Kaiserslautern
Fachbereich Architektur
Fachgebiet Hauskybernetik
Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen

1. Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	AZ 29999/03	Referat	Fördersumme	83.443€
----	--------------------	---------	-------------	----------------

Antragstitel Sanierung des denkmalgeschützten Generalvikariats Fulda – Intensiv- und Langzeitmonitoring des realisierten Projektes

Stichworte Luftkollektor, Wärmepumpe, Thermische Speicherung im Bunker

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
27.09.2016-31.02.2020	27.09.2016	31.02.2020	1

Zwischenberichte -

Bewilligungsempfänger	Bistum Fulda	Tel
	Bischöfliches Generalvikariat	Fax
	Generalvikar	Projektleitung
	Paulustor 5	TU Kaiserslautern
	36037 Fulda	Bearbeiter TU Kaiserslautern

Kooperationspartner Büro Barucco Pfeifer – Prof. Günter Pfeifer
Technische Universität Kaiserslautern, Prof. Dr.-Ing. Angèle Tersluisen

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Gebäude des Generalvikariats in der Paulusstraße 5 in Fulda wurde generalsaniert und am 31.10.2015 wieder eingeweiht. Das energetische Konzept, das während der Sanierung des Generalvikariats Fulda realisiert wurde, verbindet passive und aktive Komponenten zu einem komplexen gebäudetechnischen System. Mit Hilfe des Gebäudemonitorings, dessen Ergebnisse Gegenstand des vorliegenden Berichtes sind, soll untersucht werden, ob die Planungsziele auf Raum- und Systemebenen (Komfort und Effizienz) real erreicht werden konnten.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

1. Das Monitoring-Konzept wurde präzisiert und um weitere Messpunkte ergänzt.
2. Die zusätzliche Messtechnik wurde installiert.
3. Die Datenbenennung wurde einheitlich definiert und in die GLT übertragen. Messpunkte wurden im TGA-Plan verortet, Einheiten fixiert.
4. In einer ersten Messphase wurden Messdaten geprüft, plausibilisiert. Angaben der Gebäudedokumentation wurden hinterfragt.
5. Die Auswertung und Kommunikation der Messdaten erfolgte kontinuierlich.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

- Der Gesamt-Stromverbrauch betrug im Jahresmittel vor der Sanierung (Realverbrauch 2003-2013) durchschnittlich 109.635 kWh/a, nach der Sanierung (Realverbrauch 2016-2017) 185.229 kWh/a. Der Stromverbrauch ist um ca. 69% gestiegen. Hieraus resultiert ein durchschnittlicher Anstieg des Primärenergiebedarfes um 136.195 kWh/a durch die Sanierung.
- Der Gesamt-Gasverbrauch betrug im Jahresmittel vor der Sanierung im Realverbrauch von 2003-2013 durchschnittlich 517.028 kWh/a, nach der Sanierung im Realverbrauch 2016-2017, 209.130 kWh/a (wetterbereinigt gemäß DWD: von 523.169 kWh/a auf 225.829 kWh/a). Die Reduktion beträgt somit 59,55% (wetterbereinigt gemäß DWD 56,83%). Das entspricht einer durchschnittlichen Reduktion des Primärenergiebedarfes um 338.688 kWh/a (wetterbereinigt 327.074 kWh/a).
- Auf Grund der Sanierung reduzierte sich der Gesamt-Primärenergiebedarf real durchschnittlich um 199.218 kWh/a.
- Durch das Verschieben des Energieverbrauches von Gas auf Strom ist unter der Voraussetzung, dass sich die Primärenergie- und CO₂-Bilanz des deutschen Strommixes jährlich verbessert und idealer Weise in 2050 gegen null tendiert, eine ökologische Verbesserung der Energieversorgung erzielt worden.
- Die durchschnittliche Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe betrug im Messzeitraum 5,33, was durch die erhöhten verfügbaren Temperaturen auf der Quellseite zurück zu führen sein dürfte. Die pumpenspezifische Jahresarbeitszahl wird laut Produktdaten mit 4,4-4,5 bei üblichen Soletemperatures angegeben (dimplex, 2019), die reale liegt demnach in einem sehr effizienten Bereich. Die durchschnittliche Kollektor-Soletemperatur betrug im Messzeitraum 22,1 °C.
- Der als zweite Wärmequelle konzipierte Gaskessel stellt entgegen der Planungsziele real weiterhin die Hauptwärmequelle dar. Die Wärmepumpe, als Hauptwärmequelle konzipiert, unterstützt real den Gaskessel.
- Die Funktionalität der dezentralen Lüftungsgeräte konnte weder anhand des gemessenen CO₂-Profils, noch anhand der Temperatur- und Betriebszustandsprofile schlüssig dargestellt werden.
- Das reale, passiv vorhandene Nachtauskühlungspotenzial kann durch die dezentrale Belüftung nicht ausgeschöpft werden. Eine Temperaturabsenkung erfolgt trotz voller Ventilatorleistung über mehrere Stunden nur im geringen einstelligen Bereich. Die Fensterlüftung wäre effizienter.
- Der Bunker als Speicher von Übertemperaturen wird in 2,2 % der Zeit genutzt, der energetische Nutzen ist nicht belegbar. Da die Entladung der Luftkollektoren ausschließlich über den Kreislauf realisiert wird, kann er nicht ohne konstruktive Änderungen am Kollektor vorzunehmen, abgeschaltet werden. Der technische Aufwand, der für die Realisierung der Bunker-Speicherung erbracht wurde, ist für etwaige Folgeprojekte zu hinterfragen.

- Die Kollektortemperaturen betragen während der Kühlperiode des Auswertungszeitraums bis zu 103°C, die monatlichen Maximaltemperaturen liegen während der Kühlperiode durchgehend über 80°C.
- Die Wärmepumpe fordert, um Schäden durch thermische Spitzen auszuschließen, Temperaturspannen von -5°C bis 25°C bei einer max. Vorlauftemperatur von 58°C (Technische Daten SI 100TE Dimplex). Die vorhandenen Quelltemperaturen des Luftkollektors können auch während der Heizperiode nicht im vollen Umfang genutzt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Am 5.2.20 findet in Kaiserslautern ein Symposium mit dem Titel „Low-Tech oder High-Tech? Wie viel Technik braucht ein Haus?“ statt, bei dem die Ergebnisse des Projektes präsentiert werden. Im Rahmen der Low-Tech-Seminare der Architektenkammer werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert. Der Endbericht wird als PDF online verfügbar sein.

Fazit

Die Messergebnisse zeigen, dass durch das architektonische Konzept solare Gewinne im Luftkollektor sowie im Kastenfenster zur Verfügung stehen. Das gebäudetechnische Konzept kann diese Gewinne allerdings kaum nutzbar machen, auch, weil sie zu gering sind, um sie technisch, systemisch zu nutzen.

Die Wärmepumpe sollte den Hauptteil des Wärmebedarfes bereitstellen, real ist der Gaskessel weiterhin der erste Erzeuger.

Die dezentralen Lüftungsgeräte verbrauchen Strom und verursachen zwei Mal jährlich Wartungskosten. Sie gewährleisten die angestrebte Raumluftqualität – vorausgesetzt, die Ergebnisse aus dem mit CO₂-Sensoren ausgestatteten Raum sind auf die anderen Räume übertragbar - nicht. Es wird empfohlen, die Gründe hierfür messtechnisch zu belegen, alternativ auf reine Fensterlüftung umzustellen. Eine Energieeinsparung im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung wird auf Grund der Kastenfensterfunktion auch bei reiner Fensterlüftung real zu messen sein, die Verantwortung für die Raumluftqualität läge somit beim Nutzer, nicht bei der Technik. Toleranz und Zufriedenheit würden steigen (Anwendung des adaptiven, außenlufttemperaturabhängigen Komfortmodells).

Der Gasverbrauch sinkt durch die Sanierung auf Kosten des steigenden Stromverbrauches. Im Vergleich zum Stand vor der Gebäudesanierung fallen für den Bauherrn zusätzliche Kosten für Wartung und Instandhaltung an, zudem vergrößert sich der ökologische Fußabdruck durch Vergrößerung des CO₂-Ausstoßes im Betrieb, Stand heute. Beziffert man die Lebensdauer der zusätzlich verbauten technischen Komponenten mit 25 Jahren, zeigen die Messergebnisse, dass sie sich ökologisch wie ökonomisch nicht amortisieren können.

Die Auswertung verfügbarer Studien zur Entwicklung der CO₂-Bilanz des deutschen Strommixes verdeutlicht, dass die Verschiebung von der Gasverbrennung zur Stromnutzung langfristig sinnvoll ist. Das CO₂-Äquivalent für 1kWh Strom wird im Gegensatz zum CO₂-Äquivalent von Gas kontinuierlich gegen Null sinken. Im vorliegenden Fall schätzen die Autoren den technischen Aufwand jedoch als nicht zielführend ein. Trotz Einbau der Wärmepumpe bleibt Gas weiterhin die erste Wärmequelle.

Die Vielzahl an technischen Einzelkomponenten sowie Regelungsparametern führt im vorliegenden Fall zur enormen Komplexität des Gesamtsystems. Hieraus resultiert, dass das Verständnis der Planer für das System schwindet (was sich in der fehlenden bzw. widersprüchlichen Gebäudedokumentation äußert) und die Fehleranfälligkeit in der Abstimmung der Einzelkomponenten untereinander steigt (was sich in der Nicht-Umsetzung der Regelungsparameter äußert).

1. Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.....	1
2. Verzeichnis von Tabellen und Abbildungen.....	5
3. Zusammenfassung	7
4. Einleitung.....	8
4.1 Berichtszeitraum	8
4.2 Ziele.....	8
4.3 Datengrundlage.....	9
4.4 Energie-/ TGA- Konzept.....	9
4.4.1 Raumbetrachtung.....	9
4.4.2 Systembetrachtung.....	11
4.5 Messstellen	13
4.6 Steuerung TGA-System	15
4.6.1 Steuerung Solaranlage und Wärmepumpe.....	15
4.6.2 Betriebsart Kollektor-Pufferspeicher.....	16
4.6.3 Betriebsart Kollektor-Wärmepumpe.....	16
4.6.4 Betriebsart Bunker-Wärmepumpe.....	16
4.6.5 Kollektor-Bunker-Ladebetrieb.....	17
4.6.6 Kollektor-Bunker-Notkühlung	17
4.6.7 Bunker-Kollektor Entladebetrieb.....	17
4.7 Steuerung Lüftungsgeräte	17
4.7.1 Belüftung tags.....	18
4.7.2 Kühlung nachts	18
4.7.3 Kühlung tagsüber, wochentags	18
4.7.4 „Spülbetrieb“	18
4.7.5 Manuelle Gerätebedienung	18
4.7.6 Wochenendbetrieb.....	19
5. Hauptteil.....	20
5.1 Messdaten Raumbetrachtung	20
5.1.1 Temperaturen.....	20
5.1.2 Nachtauskühlung.....	21
5.1.3 Umsetzung der vorgegebenen Steuerung und Regelung.....	22
5.1.4 Stromverbrauch.....	23
5.1.5 CO2.....	24
5.1.6 Fazit Raumbetrachtung.....	25
5.2 Messdaten TGA-Betrachtung	28
5.2.1 Betriebsstunden / Kreisläufe.....	28
5.2.2 Bunker	35
5.2.3 Kollektor	38
5.2.4 Stromverbrauch Wärmepumpe	42
5.2.5 Gasverbrauch.....	43
5.2.6 Fazit Systembetrachtung.....	44
6. Fazit.....	44
7. Anlagen.....	46

2. Verzeichnis von Tabellen und Abbildungen

<i>Tabelle 1 Datengrundlage</i>	9
<i>Tabelle 2 Wirkungsweise des Wärmetauschers, wenn Bypass geschlossen</i>	11
<i>Tabelle 3 Messorte, -werte und -einheiten</i>	13
<i>Tabelle 4 BGV Fulda Betriebsarten Solarregelung (Quelle: Anlagenbeschreibung GOTTSCHILD)</i>	16
<i>Tabelle 5 Steuerung des Brüstungslüftungsgerätes, wochentags</i>	17
<i>Tabelle 6 Minimum, Maximum, Durchschnitt Stromverbrauch und Stromkosten von Oktober 2017 bis Oktober 2018</i>	23
<i>Tabelle 7 Durchschnittlicher Stromverbrauch und Stromkosten pro Monat</i>	24
<i>Tabelle 8 Betriebsstunden der unterschiedlichen Kreisläufe</i>	32
<i>Tabelle 9 Betriebsart Notkühlung und Ladebetrieb Kollektor-Pufferspeicher sind gleichzeitig im Betrieb</i>	34
<i>Tabelle 10 Bunker, Temperaturen, Betriebszustand, Luftkollektortemperatur, 04.08. – 06.08.2019</i>	36
<i>Tabelle 11 Gasverbrauch</i>	44
<i>Tabelle 12 Monitoring-Daten</i>	46
<i>Tabelle 13 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 105</i>	50
<i>Tabelle 14 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 208</i>	50
<i>Tabelle 15 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 223</i>	51
<i>Tabelle 16 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 231</i>	51
<i>Tabelle 17 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 241</i>	51
<i>Tabelle 18 Stromverbrauch und Stromkosten dezentrales Lüftungsgerät pro Monat, 10.2017 – 01.2019</i>	52
<i>Tabelle 19 durchschnittlicher Stromverbrauch und Stromkosten pro dezentrales Lüftungsgerät (Auswertung der in der Messung vertretenen Verbräuche)</i>	53
<i>Tabelle 20 Betriebsstunden der unterschiedlichen Kreisläufe Prozentual</i>	53
<i>Tabelle 21 Stundenzahl der Überhitzung von Kollektor</i>	54
<i>Tabelle 22 Kollektortemperatur, Einblasen Temperatur und Betonkerntemperatur</i>	55
<i>Tabelle 23 Stromverbrauch und erzeugte Wärme durch Wärmepumpe</i>	56
<i>Tabelle 24 Steuerung Solaranlage und Wärmepumpe</i>	58
<i>Abbildung 1 Funktionsschema Kastenfenster-Lüftungsgerät-System</i>	10
<i>Abbildung 2 Links - Luftkollektoren auf den Dachflächen</i>	12
<i>Abbildung 3 Rechts - Schema Luftkollektoren (Quelle: DBU-BGV Forschungsbericht)</i>	12
<i>Abbildung 4 Luftheizgerät im Bunker Abbildung 5: Temperaturmessfühler im Betonkern</i>	12
<i>Abbildung 6 Funktionsschema TGA-Konzept, Heizperiode</i>	13
<i>Abbildung 7 Funktionsschema TGA-Konzept, Heiz- und Kühlperiode, wenn Kollektortemperatur > 75°C</i>	13
<i>Abbildung 8 Steuerung des Brüstungslüftungsgerätes, wochenends</i>	19
<i>Abbildung 9 Raumlufttemperatur Raum 241, 01.07. - 03.07.2018</i>	21
<i>Abbildung 10 Auslastung Außenluft-, Fortluftventilator Raum 241, 01.07. - 03.07.2018</i>	21
<i>Abbildung 11 Raumkonditionen Raum 223, 01.10. - 05.10.2017</i>	22
<i>Abbildung 12 Stromverbrauch und Stromkosten, 10.2017 - 10.2018</i>	23
<i>Abbildung 13 CO₂-Wert und Stundenzahl über 1200 ppm Raum 421, 02.2018 – 01.2019</i>	25
<i>Abbildung 14 Natürliche Querlüftung (links, Luftverbund über den Flur); einseitige maschinelle Lüftung (rechts, kein Luftverbund über den Flur)</i>	27
<i>Abbildung 15 Betriebsart Kollektor direkt</i>	28
<i>Abbildung 16 Ladebetrieb Bunker</i>	29
<i>Abbildung 17 Betriebsart Wärmepumpe über Bunker (TGA-Planer)</i>	30
<i>Abbildung 18 Betriebsart Wärmepumpe über Kollektor</i>	31
<i>Abbildung 19 Betriebsstunden Kollektor-Bunker, 10.2017-01.2019</i>	33
<i>Abbildung 20 Betriebsstunden der Wärmepumpe und des zweiten Wärmeerzeugers, 10.2017 – 01.2019</i>	35

<i>Abbildung 21 Ladezustand Bunker, Temperaturen und Betriebszustand, 04.08. – 06.08.2019.....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 22 Ladezustand Bunker, Einblas- und Kollektortemperaturen, Betriebszustand, 04.08. – 06.08.2019</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 23 Entladezustand Bunker, Kerntemperaturen, Raumlufttemperaturen, Betriebszustand, 05.01. – 20.01.2019.....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 24 Detailauswertung Kollektortemperatur, 02.07. – 03.07.2018.....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 25 Detailauswertung verschiedener Betriebsarten des Kollektors, 02.07. - 03.07.2018.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 26 Unplausible Kollektortemperatur im Ost-Kollektor, 02.07.2018.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 27 Betriebsart vom Kollektor und Wärmepumpe, 02.07.2018.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 28 Kollektor Temperaturstundenzahl.....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 29 Stromverbrauch und erzeugte Wärmemenge der Wärmepumpe, 10.2017 – 01.2019.....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 30 Stromverbrauch der Wärmepumpe und Außentemperatur, 10.2017 – 01.2019.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 31 Gasverbrauch, 2003 - 2018.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 32 Auswertung CO2-Prognosen Strommix (Tersluisen, ee concept).....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 33 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 105 Süd.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 34 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum208 Süd-West.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 35 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 223 Nord-West.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 36 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 231 Nord.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 37 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 241 Nord-Ost.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 38 Stromverbrauch und Wärmeerzeugung der Wärmepumpe.....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 39 Schema Ausführungsplanung Heizung.....</i>	<i>57</i>

FÜR ALLE NICHT EXPLIZIT ABWEICHEND GEKENNZEICHNETEN FOTOS, TABELLEN, ZEICHNUNGEN UND ABBILDUNGEN LIEGEN DIE RECHTE BEIM AUTOR DES BERICHTES.

3. Zusammenfassung

Das energetische Konzept, das während der Sanierung des Generalvikariats Fulda realisiert wurde, verbindet passive und aktive Komponenten zu einem komplexen System. Zu den passiven Komponenten zählen die Luftkollektoren auf der Dachfläche, die solare Wärmeenergie für das Heizsystem liefern soll, sowie die Kastenfenster in den Büroräumen, die passive solare Gewinne in Form einer Zulufterwärmung bereitstellen sollen. Vier Kreisläufe werden vom Dach-Luftkollektor aus bedient: der Luftkollektor liefert Wärmeenergie in den Heizkreislauf, an die Wärmepumpe, an den thermischen Speicher oder liefert überschüssige Wärmeenergie an den ungenutzten, im Erdreich liegenden, fensterlosen Luftschutzbunker aus Beton, um sie temporär einzuspeichern.

Die Steuerung und Regelung der Kreisläufe ist von verschiedenen Wetter- und TGA-Parametern abhängig.

Jeder Büroraum weist mindestens zwei Kastenfenster auf. Ein Kastenfenster dient zur Vorerwärmung der Frischluft, die durch ein dezentrales Brüstungs-Lüftungsgerät unter dem zweiten Fenster in den Raum eingebracht wird. Das zweite Fenster dient als Fortluftkastenfenster, in das das Brüstungsgerät die Abluft des Raumes bläst, der Luftauslass für die Fortluft befindet sich, wie der Lufteinlass für die Frischluft, im oberen Bereich des Fensters.

Das Monitoring beinhaltet zwei Betrachtungsebenen:

- Raumbetrachtung: Bewertung von Lufttemperatur und CO₂ im Kontext der Lüfter-Betriebszustände sowie des Stromverbrauches
- Systembetrachtung: Bewertung des Gesamtverbrauches sowie der Funktionalität und Effizienz der gebäudetechnischen Einzelkomponenten.

Die Ergebnisse zeigen folgendes:

- Der Gesamt-Stromverbrauch betrug im Jahresmittel vor der Sanierung (Realverbrauch 2003-2013) durchschnittlich 109.635 kWh/a, nach der Sanierung (Realverbrauch 2016-2017) 185.229 kWh/a. Der Stromverbrauch ist um ca. 69% gestiegen. Hieraus resultiert ein durchschnittlicher Anstieg des Primärenergiebedarfes um 136.195 kWh/a durch die Sanierung.
- Der Gesamt-Gasverbrauch betrug im Jahresmittel vor der Sanierung im Realverbrauch von 2003-2013 durchschnittlich 517.028 kWh/a, nach der Sanierung im Realverbrauch 2016-2017, 209.130 kWh/a (wetterbereinigt gemäß DWD: von 523.169 kWh/a auf 225.829 kWh/a). Die Reduktion beträgt somit 59,55% (wetterbereinigt gemäß DWD 56,83%). Das entspricht einer durchschnittlichen Reduktion des Primärenergiebedarfes um 338.688 kWh/a (wetterbereinigt 327.074 kWh/a).
- Auf Grund der Sanierung reduzierte sich der Gesamt-Primärenergiebedarf real durchschnittlich um 199.218 kWh/a.
- Durch das Verschieben des Energieverbrauches von Gas auf Strom ist unter der Voraussetzung, dass sich die Primärenergie- und CO₂-Bilanz des deutschen Strommixes jährlich verbessert und idealer Weise in 2050 gegen null tendiert, eine ökologische Verbesserung der Energieversorgung erzielt worden.
- Die durchschnittliche Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe betrug im Messzeitraum 5,33, was durch die erhöhten verfügbaren Temperaturen auf der Quellseite zurück zu führen sein dürfte. Die pumpenspezifische Jahresarbeitszahl wird laut Produktdaten mit 4,4-4,5 bei üblichen Soletemperaturen angegeben (dimplex, 2019), die reale liegt demnach in einem

sehr effizienten Bereich. Die durchschnittliche Kollektor-Soletemperatur betrug im Messzeitraum 22,1 °C.

- Der als zweite Wärmequelle konzipierte Gaskessel stellt entgegen der Planungsziele real weiterhin die Hauptwärmequelle dar. Die Wärmepumpe, als Hauptwärmequelle konzipiert, unterstützt real den Gaskessel.
- Die Funktionalität der dezentralen Lüftungsgeräte konnte weder anhand des gemessenen CO₂-Profils, noch anhand der Temperatur- und Betriebszustandsprofile schlüssig dargestellt werden.
- Das reale, passiv vorhandene Nachtauskühlungspotenzial kann durch die dezentrale Belüftung nicht ausgeschöpft werden. Eine Temperaturabsenkung erfolgt trotz voller Ventilatorleistung über mehrere Stunden nur im geringen einstelligen Bereich. Die Fensterlüftung wäre effizienter.
- Der Bunker als Speicher von Übertemperaturen wird in 2,2 % der Zeit genutzt, der energetische Nutzen ist nicht belegbar. Da die Entladung der Luftkollektoren ausschließlich über den Kreislauf realisiert wird, kann er nicht ohne konstruktive Änderungen am Kollektor vorzunehmen, abgeschaltet werden. Der technische Aufwand, der für die Realisierung der Bunker-Speicherung erbracht wurde, ist für etwaige Folgeprojekte zu hinterfragen.
- Die Kollektortemperaturen betragen während der Kühlperiode des Auswertungszeitraums bis zu 103°C, die monatlichen Maximaltemperaturen liegen während der Kühlperiode durchgehend über 80°C.
- Die Wärmepumpe fordert, um Schäden durch thermische Spitzen auszuschließen, Temperaturspannen von -5°C bis 25°C bei einer max. Vorlauftemperatur von 58°C (Technische Daten SI 100TE Dimplex). Die vorhandenen Quelltemperaturen des Luftkollektors können auch während der Heizperiode nicht im vollen Umfang genutzt werden.

4. Einleitung

4.1 Berichtszeitraum

Der vorliegende Bericht stellt die Monitoring-Erkenntnisse aus dem Förderzeitraum vom 28.09.2016-27.09.2019 dar.

4.2 Ziele

Im Rahmen des Monitorings sollen einerseits die Raumkonditionen, andererseits die Effizienz des gebäudetechnischen Gesamtsystems abgebildet werden. Anforderungen sind:

- Raumbetrachtung: Nachweis der Einhaltung der Arbeitsstättenrichtlinie, Bewertung der Funktionalität und Effizienz der dezentralen Lüftungsgeräte
- System-Betrachtung: Nachweis der Reduktion des Endenergieverbrauches, explizit des Heizwärmeverbrauches durch die Sanierung.

4.3 Datengrundlage

Folgende Dokumente wurden bereitgestellt:

Tabelle 1 Datengrundlage

Dokumentsbezeichnung	Sachstand (Datum)
Energetische Sanierung des Verwaltungsgebäudes des Bischöflichen Generalvikariats Paulustor 5 36037 Fulda – Forschungsbericht [DBU_BGV_FBericht_3Ü.pdf / DBU-Abschlussbericht-AZ-29999.pdf]	Kein Datum
Datenblatt Wärmemengenzähler Celsius C5 IUF	14.07.2017
Anlagenbeschreibung GOTTSCHILD Allgemein Schaltschrankkomponenten / Anlagenkonzeption Beschreibung der Einzelraumregelung Beschreibung der Kollektorregelung	13.09.2017
Funktionsbeschreibung der Gebäudeautomation BALCK+PARTNER Beschreibung der Raumautomation Funktionsschema der Fassadenlüftungsgeräte	30.03.2017
Schema Ausführungsplanung Heizung	14.07.2017
Grundriss Ausführungsplanung MSR Erdgeschoss Grundriss Ausführungsplanung MSR Gartengeschoss Grundriss Ausführungsplanung MSR Obergeschoss	14.07.2017
Info-Tabelle Leistung & COP Wärmepumpe BLACK+PARTNER Wärmepumpe technische Daten und Bedienungsanleitung	21.07.2017
Datenblatt TROX-BRUESTUNGSLUEFTUNGSGERAET-FSL-B-ZAS	30.03.2017
Freigabezeichnung TROX-BRUESTUNGSLUEFTUNGSGERAET-FSL-B-ZAS	30.03.2017
Datenblatt TROX-BRUESTUNGSLUEFTUNGSGERAET-FSL-B-ZAB	06.12.2017
Datenblatt Kollektor-Stegplatte (AKRAPLAST)	14.01.2019
Monitoring-Daten	monatlich

Es liegt keine Gebäudedokumentation vor. Die zur Verfügung stehenden Einzel-Dokumente sind inhaltlich nicht konsistent: widersprüchliche Angaben sind sowohl innerhalb der Dokumente, als auch zwischen den Dokumenten zu finden. Relevante Angaben sind teils unplausibel oder fehlerhaft. Die folgend abgebildeten Funktionsweisen bzw. Steuerungs- und Regelungssystematiken wurden durch die TU Kaiserslautern erarbeitet: sie wurden aus den Messergebnissen abgeleitet, durch recherchiert sowie bei Projektbeteiligten mündlich wie schriftlich abgefragt.

4.4 Energie-/ TGA- Konzept

4.4.1 Raumbetrachtung

Die unter Denkmalschutz stehende Fassade wurde mit Maßnahmen ertüchtigt, die das ursprüngliche äußere Erscheinungsbild nur geringfügig beeinflussen sollten. Die Fassade wurde durch eine innen im Abstand von ca. 40cm vorgestellte zweite Fassadenschicht energetisch saniert. Inneres und äußeres Fenster jeder Achse wurden als Kastenfenster konstruiert, die Kastenfenster sind durch eine Laibung voneinander getrennt. Im Brüstungsbereich sind je nach Raumgröße ein bis drei dezentrale Lüftungsgeräte pro Raum verbaut, die die Räume mit Frischluft versorgen sollen.

Die Zuluft erfolgt über das Zuluftkastenfenster, das im oberen Fensterrahmen Zuluftöffnungen integriert hat. Durch Solarstrahlung wird die Zuluft vorerwärmt. Die Luft wird innerhalb des Lüftungsgerätes über einen Wärmetauscher an der Abluft des Raumes vorbeigeführt, und gelangt als Zuluft in den Raum. Die Abluft strömt durch das Abluftkastenfenster und gelangt als Fortluft im oberen Fensterrahmenbereich ins Freie.

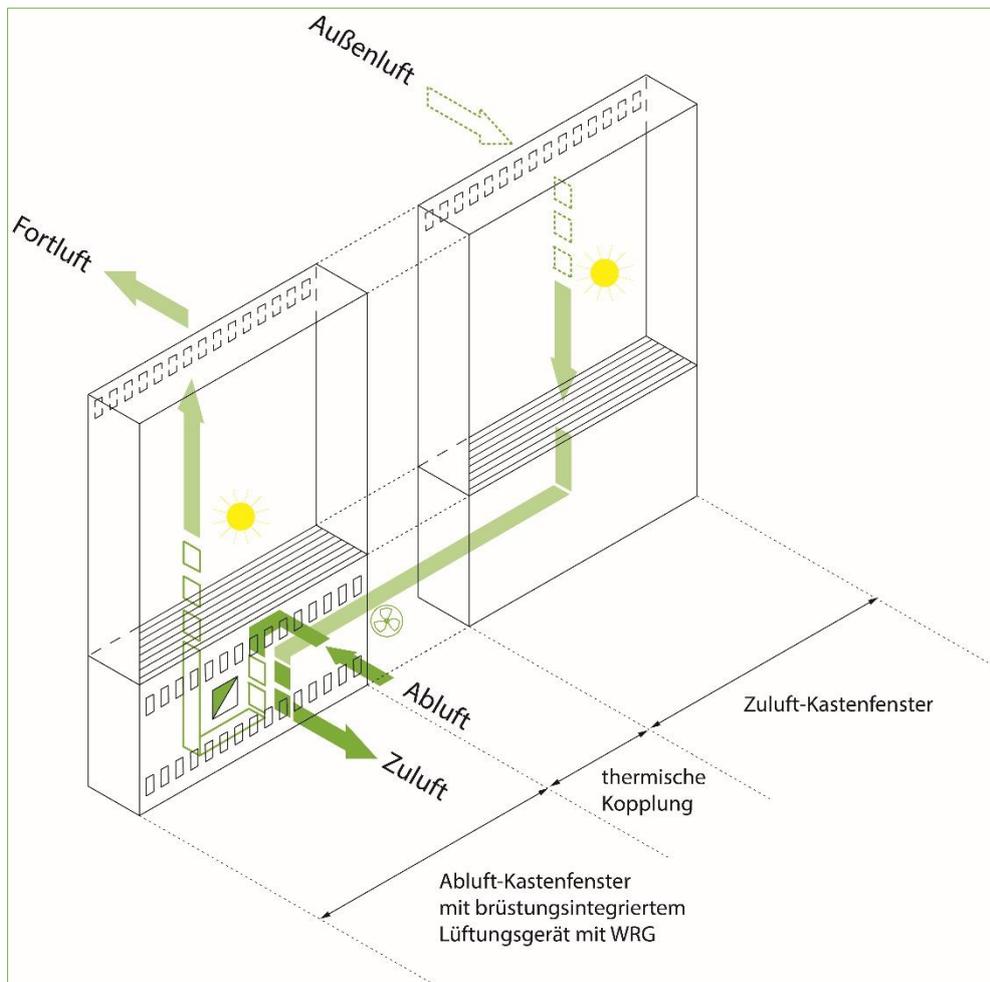


Abbildung 1 Funktionsschema Kastenfenster-Lüftungsgerät-System

Der Antrieb für das Belüftungssystem sitzt im Lüftungsgerät, so dass im Zuluftkastenfenster mit Unterdruck, im Abluftkastenfenster mit Überdruck zu rechnen ist. Das Lüftungsgerät wird durch thermischen Auftrieb im Abluftkastenfenster unterstützt, der Auftrieb im Zuluftkastenfenster arbeitet gegen die Lüfter-Richtung.

Der Wärmetauscher im Lüftungsgerät besitzt einen Bypass, der genutzt wird, wenn die relative Luftfeuchte im Kastenfenster 90% überschreitet oder wenn die freie Nachtkühlung, in der Anlagenbeschreibung als Außenluftbetrieb bezeichnet (AUL), aktiviert ist.

Folgende Situationen ergeben sich, wenn der Bypass geschlossen ist:

Tabelle 2 Wirkungsweise des Wärmetauschers, wenn Bypass geschlossen

Rahmenbedingungen				Wirkungsweise im Vergleich zur reinen Fensterlüftung	
Außenlufttemperatur	Kastenfenstertemperatur	Voraussetzung	Raumlufttemperatur	Zulufttemperatur	mögl. Kompensation
> Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	> Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur		> Solltemperatur	erhöht	
	= Raumlufttemperatur		> Solltemperatur	.	
	< Raumlufttemperatur		> Solltemperatur	reduziert	
< Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	> Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	> Solltemperatur	erhöht	
	= Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	> Solltemperatur	.	
	< Raumlufttemperatur		> Solltemperatur	reduziert	
> Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	= Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur		= Solltemperatur	erhöht	
	= Raumlufttemperatur		= Solltemperatur	.	
	< Raumlufttemperatur		= Solltemperatur	reduziert	Heizregister an
< Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	= Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	= Solltemperatur	erhöht	
	= Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	= Solltemperatur	.	
	< Raumlufttemperatur		= Solltemperatur	reduziert	Heizregister an
> Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	< Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur		< Solltemperatur	erhöht	
	= Raumlufttemperatur		< Solltemperatur	.	
	< Raumlufttemperatur		< Solltemperatur	reduziert	
< Raumlufttemperatur	>> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	< Solltemperatur	stark erhöht	
	> Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	< Solltemperatur	erhöht	(Heizregister an)
	= Raumlufttemperatur	Solarstrahlung	< Solltemperatur	.	Heizregister an
	< Raumlufttemperatur		< Solltemperatur	reduziert	Heizregister an

Die Effizienz des Systems ist von der jeweiligen Außenlufttemperatur, der solarstrahlungsbedingten Kastenfenstertemperatur, der Raumlufttemperatur sowie der Regelung von Lüftung und Heizung abhängig.

4.4.2 Systembetrachtung

Das Gesamtsystem besteht aus mehreren energetischen Kreisläufen. Ausgangspunkt sind glycoldurchströmte Luftkollektoren auf den Dachflächen mit einer Fläche von 484,2 m². Kollektorfläche im Süd ist 64,5 m², im Nord 85,56 m², im Ost 187 m² und im West 147,14 m². (Berechnet aus Quelle: DBU-BGV Forschungsbericht-Seite 48).



Abbildung 2 Links - Luftkollektoren auf den Dachflächen

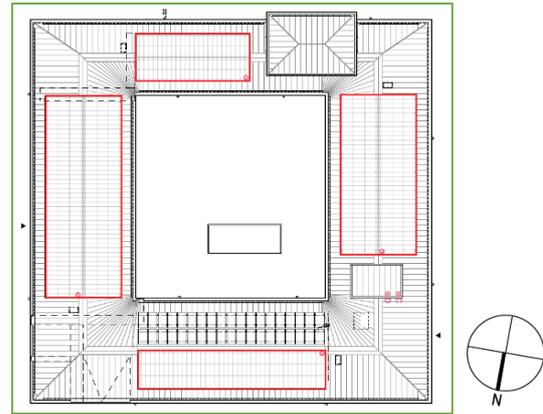


Abbildung 3 Rechts - Schema Luftkollektoren (Quelle: DBU-BGV Forschungsbericht)

Im Kreislauf, der mit höchster Priorität angesteuert wird, wird die Wärmeenergie der Luftkollektoren mittels Fluid direkt an das Heizsystem oder an die Wärmepumpe übergeben, die mit Stromeinsatz das Temperaturniveau weiter hebt und die Wärme an das Heizsystem übergibt. Alternativ werden die Pufferspeicher beladen.

Im Kreislauf mit der zweit höchsten Priorität wird die Wärmeenergie der Luftkollektoren mittels Fluid an ein Luftheizgerät im unterirdischen Bunker übergeben, das die Energie vom Fluid an die Bunker-Luft überträgt. Die Speichermasse der Bunkerwände soll so als saisonaler Speicher genutzt werden.



Abbildung 4 Luftheizgerät im Bunker



Abbildung 5: Temperaturmessfühler im Betonkern

Die Luftkollektoren weisen keine mechanische Entlüftung auf, eine notwendige Entladung der Anlage erfolgt ausschließlich über den Kreislauf Luftkollektor-Bunker.

Im Entladungskreislauf wird sowohl der Bunker, als auch der thermische Wasserspeicher nachts über die Luftkollektoren entladen. Die nächtliche Entladung des Wasserspeichers über die Kollektoren auf dem Dach ist in der Gebäudedokumentation nicht vermerkt.

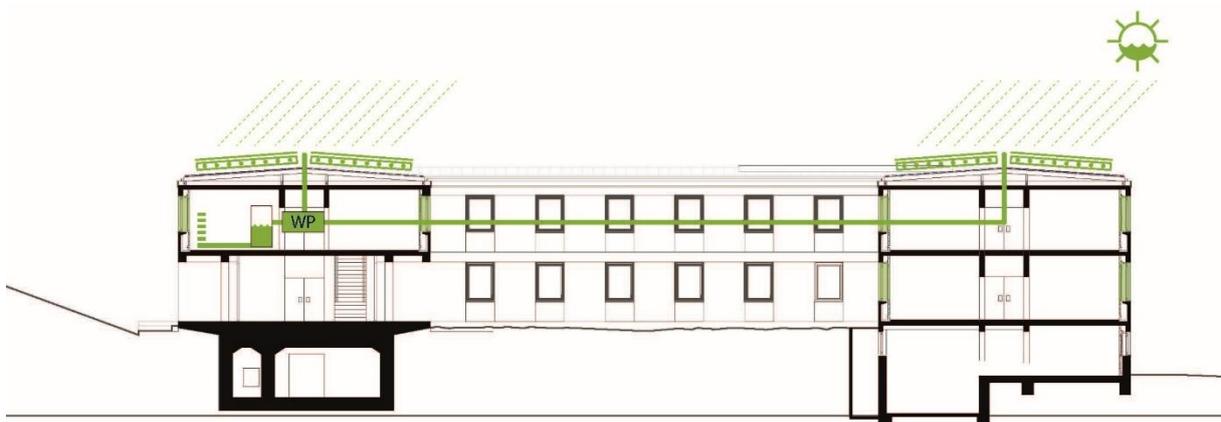


Abbildung 6 Funktionsschema TGA-Konzept, Heizperiode

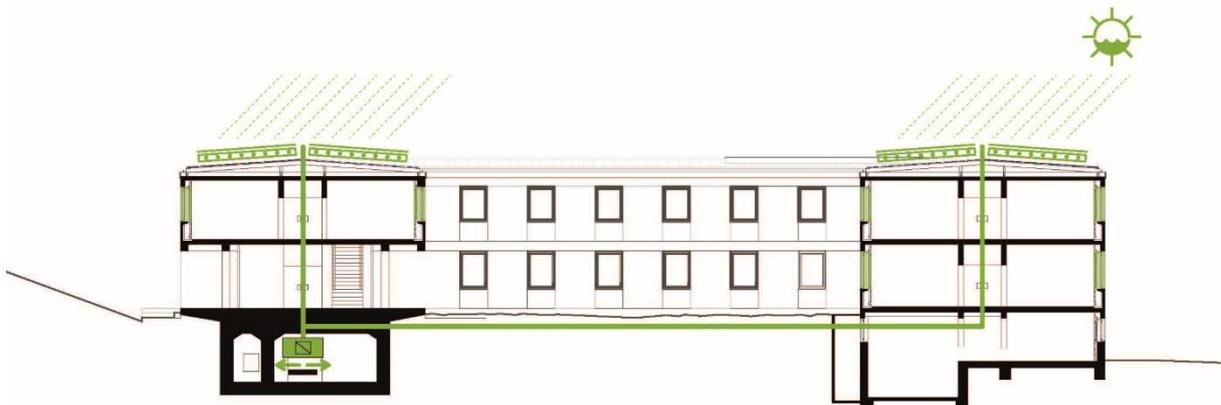


Abbildung 7 Funktionsschema TGA-Konzept, Heiz- und Kühlperiode, wenn Kollektortemperatur > 75°C

Das TGA-Schema (Balck&Partner) kann der Anlage, Abbildung 39 entnommen werden.

4.5 Messstellen

Als Messstellen wurden primär die bereits für die Gebäudeleittechnik vorhandenen Messstellen aufgeschaltet, es erfolgte die Nachinstallation von einigen wenigen Wärmemengenzählern. Folgende Messwerte stehen zur Auswertung zur Verfügung:

Tabelle 3 Messorte, -werte und -einheiten

Messort	Messwert	Einheit
Wetterstation	Außenlufttemperatur	°C
	Globalstrahlung	W/m ²
	Relative Feuchte	%
Raum 105	Fensterzwischenraum Temperatur	°C
	Relative Raumfeuchte	%
	Raumtemperatur	°C
	Auslastung des Außenluft-Ventilators	%
	Auslastung des Fortluft-Ventilators	%
	Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät	kWh

Raum 208	Fensterzwischenraum Temperatur	°C
	Relative Raumfeuchte	%
	Raumtemperatur	°C
	Auslastung des Außenluft-Ventilators	%
	Auslastung des Fortluft-Ventilators	%
	Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät	kWh
Raum 223	Fensterzwischenraum Temperatur	°C
	Relative Raumfeuchte	%
	Raumtemperatur	°C
	Auslastung des Außenluft-Ventilators	%
	Auslastung des Fortluft-Ventilators	%
	Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät	kWh
Raum 231	Fensterzwischenraum Temperatur	°C
	Relative Raumfeuchte	%
	Raumtemperatur	°C
	Auslastung des Außenluft-Ventilators	%
	Auslastung des Fortluft-Ventilators	%
	Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät	kWh
Raum 241	Fensterzwischenraum Temperatur	°C
	Relative Raumfeuchte	%
	Raumtemperatur	°C
	CO2	ppm
	Auslastung des Außenluft-Ventilators	%
	Auslastung des Fortluft-Ventilators	%
	Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	kWh
Wärmepumpe	Stromverbrauch	Wh
	Wärmemenge Kollektor zu Wärmepumpe	Wh
	Wärmemenge Wärmepumpe zu Wasserspeicher	Wh
	Vorlauftemperatur Wärmepumpe zu Wasserspeicher	°C
	Rücklauftemperatur Wasserspeicher zu Wärmepumpe	°C
Dachkollektor	Wärmemenge hinter den Kollektoren	Wh
	Vorlauftemperatur	°C
Bunker	Betonkerntemperatur Bunker Nord 10cm	°C
	Betonkerntemperatur Bunker Nord 5cm	°C
	Einblastemperatur Bunker Nord	°C
Garage	Wärmemenge	Wh
	Gasverbrauch	Wh

Betriebszustände	Betriebsstunden Verdichter 1	0-1
	Betriebsstunden Verdichter 2	0-1
	Betriebsstunden 2. Wärmeerzeuger	0-1
	Entladebetrieb aus Bunker	0-1
	Ladebetrieb in Bunker	0-1
	Kollektor Notkühlung	0-1
	Kollektor direkt auf Puffer	0-1
	Wärmepumpe über Bunker	0-1
	Wärmepumpe über Kollektor	0-1
	Anforderung Gaskessel	0-1

Die Auslastung der Ventilatoren mit 100% innerhalb der Betriebsbeschreibung sowie im Monitoring entspricht der Lüfterauslastung von 49% gemäß Herstellerangabe.

Mit Ausnahme des Raums 241, in dem die Lüftungssteuerung CO₂-geführt ist, wurden in allen Räumen VOC-Fühler verbaut. Da kein wissenschaftlich belastbarer Zusammenhang zwischen VOC und CO₂ besteht, wurden die VOC-Daten nicht ausgewertet.

Das Monitoring entspricht nicht den Anforderungen an ein energetisches Monitoring, eine Bewertung der Gesamteffizienz der Sanierung ist nur anhand der übermittelten Gesamtverbräuche möglich. Die Effizienz der Wärmepumpe kann bewertet werden. Die Behaglichkeit in den Büroräumen kann anhand der Raumlufttemperaturen näherungsweise bewertet werden.

4.6 Steuerung TGA-System

4.6.1 Steuerung Solaranlage und Wärmepumpe

Der Steuerung der verschiedenen Kreisläufe kommt eine besondere Bedeutung zu. Die Regelungs-Systematik muss bspw. verhindern, dass der Luftkollektor überhitzt, dass Wärmeenergie im Bunker eingelagert wird, wenn kein Heizbedarf vorliegt und die thermischen Speicher energetisch gesättigt sind. Sie muss dafür sorgen, dass die verfügbaren solaren Gewinne effektiv genutzt werden. Die folgende Tabelle stellt die durch die Firma Gottschild erstellte und nachträglich korrigierte, durch die TU Kaiserslautern durch neue Benennung der Kreisläufe vereinfachte Kollektorregelung mit den jeweiligen Betriebsarten, Abhängigkeiten und Schwellenwerten dar.

Tabelle 4 BGV Fulda Betriebsarten Solarregelung (Quelle: Anlagenbeschreibung GOTTSCILD)

	Betriebsarten					
	Kollektor-Pufferspeicher	Kollektor-Wärmepumpe	Bunker-Wärmepumpe	Kollektor-Bunker Ladebetrieb	Bunker-Kollektor Entladebetrieb	Kollektor-Bunker Notkühlung
Kollektor VL-Temperatur (T1)	Kollektor VL-Temperatur größer Pufferspeichertemperatur+8K → Betriebsart AN (Sobald Kollektor VL-Temperatur größer Puffertemperatur+2K → Betriebsart AUS)	<50°C	>15°C <50°C	> 50°C	<50°C	>75°C
Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen (T2)	> -3°C	> -3°C	> -3°C	Bunker-Raumlufttemperatur < Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	Bunker-Raumlufttemperatur > Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	> -3°C
Puffertemperatur (T3)	< 70°C	< 70°C	< 70°C	> 70°C	> 70°C	> 70°C
Bunker-Raumlufttemperatur (Süd) (T4)	-	Bunker-Raumlufttemperatur < Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	Bunker-Raumlufttemperatur > Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	Bunker-Raumlufttemperatur < Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	Bunker-Raumlufttemperatur > Mittelwert von drei Luftkollektortemperaturen wenn dT=5K	-
Kollektorpumpe	EIN	EIN	AUS	EIN	EIN	EIN
Pumpe Plattentaucher	EIN	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS
Umschaltventil	AB-A	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)
Wärmepumpe Freigabe	AUS	EIN	EIN	AUS	AUS	AUS
2xLüfter Bunker	AUS	AUS	EIN	EIN	EIN	EIN
Absperrventil Bunker	ZU	ZU	AUF	AUF	AUF	AUF

4.6.2 Betriebsart Kollektor-Pufferspeicher

Wenn die Temperatur im Kollektor > 50°C beträgt, soll die Wärme direkt für die Wärmeversorgung genutzt werden. Die im Luftkollektor generierte Wärme wird mittels Wärmetauscher vom Kollektor-Glycol-Kreislauf auf den Pufferspeicher übertragen.

4.6.3 Betriebsart Kollektor-Wärmepumpe

Beträgt die Temperatur im Kollektor mehr als -3°C, wird der Glycol-Kreislauf des Kollektors aktiviert. Bei Kollektortemperaturen < 50°C entzieht die Wärmepumpe dem Glycol-Kreislauf des Kollektors Energie, die auf ein höheres Energieniveau „gepumpt“ wird. Die durch die Pumpe bereitgestellte Wärme wird im Pufferspeicher gespeichert oder direkt in die Heizungsanlage eingespeist.

4.6.4 Betriebsart Bunker-Wärmepumpe

Kann die im Kollektor verfügbare Wärme nicht oder nicht im vollen Umfang zu Heizzwecken oder Warmwasserbereitung genutzt werden, wird die restliche Energiemenge zum Bunker transportiert. Ein Lüfterhitzer überträgt die Energie des Glycols auf die Luft, die in der Luft enthaltene Energie wiederum soll in den Betonwänden des Bunkers eingelagert werden, bis die wieder benötigt wird. Sobald die Temperatur im Kollektor niedriger ist, als die Bunker-Lufttemperatur, diese mehr als 15°C beträgt und ein Wärmebedarf vorliegt, soll die Energie der Bunkerluft durch den Lüfter, der nun als Kühlgerät arbeitet, wieder auf ein Fluid übertragen und der Wärmepumpe zur Verfügung gestellt werden.

4.6.5 Kollektor-Bunker-Ladebetrieb

Sobald die Kollektortemperatur größer als die Bunker-Lufttemperatur ist und gebäudeseits kein Wärmebedarf vorliegt, wird der Bunker beladen.

4.6.6 Kollektor-Bunker-Notkühlung

Die verbauten Polycarbonatplatten können laut Herstellerangaben einer Temperatur bis 120°C bestehen. Um das Einhalten der Maximaltemperatur zu gewährleisten, wurde eine Notkühlung integriert, die nicht über Entlüftungsklappen, sondern über den Glycol-Kreislauf realisiert wird. Betragen die Kollektortemperaturen mehr als 75°C und liegt gleichzeitig kein Wärmebedarf gebäudeseits vor, wird die Energie zur Temperaturreduktion in die Kollektoren im Bunker eingelagert.

4.6.7 Bunker-Kollektor Entladebetrieb

Ist die Bunker-Raumlufttemperatur um 5°C größer als die Kollektortemperatur, und die Kollektortemperatur ist geringer als 50°C, dann setzt sich der Glycol-Kreislauf aus Richtung Bunker in Richtung Kollektor in Gang, der Bunker entlädt über den Kollektor.

4.7 Steuerung Lüftungsgeräte

Die Brüstungslüftungsgeräte werden, ausgenommen lokaler und testbedingter Änderungen, wie folgt geregelt:

Tabelle 5 Steuerung des Brüstungslüftungsgerätes, wochentags

		Heizen		Kühlen		Lüften	
		0-24 Uhr	20-05 Uhr	06-18 Uhr	06-18 Uhr	05 -06 Uhr	
Werktags	Voraussetzungen	$T_{\text{raum}} < T_{\text{soll}} (=22^{\circ}\text{C})$ $22^{\circ}\text{C} < T_{\text{Zuluft}} < 40^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{soll-Nacht}}=19^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{raum}} > T_{\text{soll}} (=22^{\circ}\text{C})$ $12^{\circ}\text{C} < T_{\text{außen}} < 20^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{raum}} > T_{\text{soll}} + 4^{\circ}\text{C} (=26^{\circ}\text{C})$ $T_{\text{raum}} - T_{\text{außen}} > 5^{\circ}\text{C}$	VOC > 9% CO ₂ > 1200 ppm	-	
	Außenluft-ventilator	20% 35% 49%	100%	20% 35% 49%	20% 35% 49%	100%	
	Fortluft-ventilator	20% 35% 49%	100%	20% 35% 49%	20% 35% 49%	100%	
	Heizregister	AN	AUS	AUS	AN/AUS	AUS	
	WRG	Aktiv	Inaktiv	Inaktiv	Heizen: Aktiv Kühlen: Inaktiv	Inaktiv	
	WRG-Bypassklappe	ZU wenn rel. Luftfeuchte Fensterzwischenraum > 90% AUF	AUF	AUF	Heizen: ZU Kühlen: AUF wenn rel. Luftfeuchte Fensterzwischenraum > 90% AUF	AUF	

4.7.1 Belüftung tags

Wochentags zwischen 6 und 18 Uhr sollen die dezentralen Lüftungsgeräte dafür sorgen, die Raumlufttemperatur zwischen 22 und 26 °C sowie den VOC-Gehalt unter 9%, den CO₂-Gehalt unter 1200ppm zu halten. Bewegen sich die Werte außerhalb des Soll-Bereiches, werden Außenluft- und Fortluftventilator mit 20% (40% Monitoring), 35% (71% Monitoring) oder 49% (100% Monitoring) angesteuert. Das Kastenfenster dient der Vorerwärmung der Frischluft, über den im Lüftungsgerät integrierten Wärmetauscher wird die Energie der Fortluft zusätzlich auf die Zuluft übertragen.

„Mithilfe des Zuluftvolumenstroms und der Zulufttemperatur wird die Raumtemperatur auf dem eingestellten Sollwert (22°C Basissollwert) gehalten. Dabei wird die Zulufttemperatur zwischen 25 und 35 °C geregelt. Bei abfallender Temperatur wird der Luftvolumenstrom der Zuluft erhöht, sodass eine höhere Wärmeleistung in den Raum eingebracht wird. Bei Erreichen oder Überschreiten der [Soll]temperatur wird zuerst der Luftvolumenstrom auf ein Minimum reduziert und danach die Zulufttemperatur gesenkt“ (Günter Pfeifer / Christoph Kuhn Architekten / Schönherr + Juli Architekten / Balck + Partner Facility Engineering, S. 3).

4.7.2 Kühlung nachts

Die am Tag im Raum eingespeicherte Wärme soll nachts abgeführt werden. Liegt die Außenlufttemperatur nachts zwischen 20 und 5 Uhr zwischen 12°C und 20°C, und ist die Außenlufttemperatur um 2°C geringer als die Raumlufttemperatur, werden Außenluft- und Fortluftventilator mit 100% Leistung betrieben.

4.7.3 Kühlung tagsüber, wochentags

überschreitet die Raumlufttemperatur 26°C (=Sollwert+4°C), wird das Heizventil geschlossen. Ist gleichzeitig die Außenlufttemperatur um 5°C geringer als die Raumlufttemperatur, werden der Außenluft- und Fortluftventilator angefordert.

„Die Außenluftklappe, Fortluftklappen und die WRG-Bypassklappe werden geöffnet. Bei steigender Temperatur wird der Luftvolumenstrom der Zuluft und Fortluft erhöht, so dass mehr kühlere [] Luft in den Raum eingebracht wird.“ (Günter Pfeifer / Christoph Kuhn Architekten / Schönherr + Juli Architekten / Balck + Partner Facility Engineering, S. 3)

4.7.4 „Spülbetrieb“

„Zur Verbesserung der Luftqualität wurde ein Spülbetrieb integriert. Während des Spülbetriebes werden die Lüfter mit 100% im Außenluftbetrieb angefordert. Der Spülbetrieb findet täglich zwischen 05:00 Uhr und 6.00 Uhr statt und ist mittels eines.“ (Gottschild Automatisierungstechnik GmbH, 2017 S. 4)

4.7.5 Manuelle Gerätebedienung

„Am Raumbediengerät können fünf voreingestellte Stufen die automatisierten Profile übersteuern:

1. AUS (Stufe 1): Schaltet die Lüfter des Fensterwischengerätes aus
2. HAND 1 (Stufe 2): Schaltet die Lüfter [] [in den] Außenluftbetrieb auf Fixdrehzahl 20% ein
3. HAND 2 (Stufe 3): Schaltet die Lüfter [] [in den] Außenluftbetrieb auf Fixdrehzahl 35% ein
4. HAND 3 (Stufe 4): Schaltet die Lüfter [] [in den] Außenluftbetrieb auf Fixdrehzahl 49% ein

5. AUTO (Stufe 5): Schaltet die Lüfter [] [in den] Automatikbetrieb“ (Gottschild Automatisierungstechnik GmbH, 2017 S. 4)

4.7.6 Wochenendbetrieb

Am Wochenende sind die Lüfter tagsüber außer Betrieb, nachts erfolgt bei Bedarf das Nachtauskühlprogramm wie wochentags.

Abbildung 8 Steuerung des Brüstungslüftungsgerätes, wochenends

		Heizen	Kühlen		Lüften	
		0-24 Uhr	20-05 Uhr	06-18 Uhr	06-18 Uhr	05 -06 Uhr
Wochenends	Voraussetzungen	-	-	-	-	-
	Außenluft-ventilator	0%	0%	0%	0%	100%
	Fortluft-ventilator	0%	0%	0%	0%	100%
	Heiz-register	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS
	WRG	Aktiv	Inaktiv	Inaktiv	Heizen: Aktiv Kühlen: Inaktiv	Inaktiv
	WRG-Bypassklappe	ZU wenn rel. Luftfeuchte Fensterzwischenraum > 90% AUF	AUF	AUF	Heizen: ZU Kühlen: AUF wenn rel. Luftfeuchte Fensterzwischenraum > 90% AUF	AUF

5. Hauptteil

5.1 Messdaten Raumbetrachtung

5.1.1 Temperaturen

Die uns vorliegenden Messdaten zur Kondition der Büroräume vom Oktober 2017 bis Januar 2019 zeigen folgendes:

- Die Außenlufttemperaturen liegen minimal bei $-11,7\text{ °C}$ im Februar, im Mittel bei $5,4\text{ °C}$ während der Heizperiode und $18,4\text{ °C}$ während der Kühlperiode und maximal bei $35,4\text{ °C}$ im Juli.
- Die Innenraumtemperaturen liegen minimal bei 16 °C im Februar 2018 im Raum 105 (Süd), maximal bei $31,2\text{ °C}$ im Juli im Raum 208 (Süd-West) und im August im Raum 241 (Nord-Ost). Die Minimal- und Maximaltemperaturen liegen außerhalb des Soll-Bereiches, die Temperierung bzw. Auskühlung der Räume wird nicht durchgehend gewährleistet.

Der Mittelwert der Innenraumtemperaturen für alle Räume während der Heizperiode liegt bei $22,5\text{ °C}$, und während der Kühlperiode bei $25,0\text{ °C}$. Der Mittelwert der Temperaturunterschiede zwischen Raumluft- und Außenlufttemperatur liegt bei $16,7\text{ °C}$ während der Heizperiode und $6,6\text{ °C}$ während der Kühlperiode. Die Mittelwerte bewegen sich im Sollbereich, die Raumlufttemperaturen während der Kühlperiode sind tendenziell zu hoch.

- Die Kastenfenstertemperaturen liegen minimal bei $6,5\text{ °C}$ im Januar 2019 im Raum 241 (Nord-Ost), hier sind die beiden Ventilatoren –Außenluftventilator und Fortluftventilator– allerdings nur für kurze Zeit und nur einmal im Januar mit 49% im Betrieb. Die maximalen Kastenfenstertemperaturen betragen $36,1\text{ °C}$ im April im Raum 208 (Süd-West). Der Temperaturunterschied zur Außenluft beträgt im Durchschnitt $11,7\text{ °C}$ während der Heizperiode und $4,1\text{ °C}$ während der Kühlperiode. Der maximale Temperaturunterschied in der Heizperiode wurde am 20. Januar 2019 im Raum 241 gemessen, er liegt bei $38,9\text{ °C}$. Es liegt demnach ein solares Potenzial vor.
- Alle Räume weisen während der Kühlperiode Raumlufttemperaturen über 26 °C auf.

Der Raum 241 mit Nord-Ost-Ausrichtung weist mit 551 Stunden im Juli, 484 Stunden im August und 1544 Stunden während der gesamten Kühlperiode; Raum 208 mit Süd-West-Ausrichtung mit 569 Stunden im Juli, 503 Stunden im August und 1566 während der gesamten Kühlperiode in Summe die längsten Überwärmungsdauern mit Temperaturen über 26 °C auf.

Im Juli wurden im Raum 241 Temperaturen $> 29\text{ °C}$ in 75 Stunden, im August in 207 Stunden gemessen. Im Raum 208 wurden im Juli Raumlufttemperaturen $> 29\text{ °C}$ in 130 Stunden, im August in 191 Stunden aufgezeichnet.

Die Messergebnisse sind der Anlage **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und Tabelle 13 bis Tabelle 17 zu entnehmen.

5.1.2 Nachtauskühlung

Das Nachtauskühlungspotenzial kann in den durch das Monitoring beobachteten Räumen gebäudetechnisch nicht genutzt werden. Bei 100% Lüfterleistung senken sich die Raumlufttemperaturen nur geringfügig, im folgenden Beispiel um ca. 2°C, obgleich das Auskühlpotenzial wesentlich höher, bei 15°C liegt.

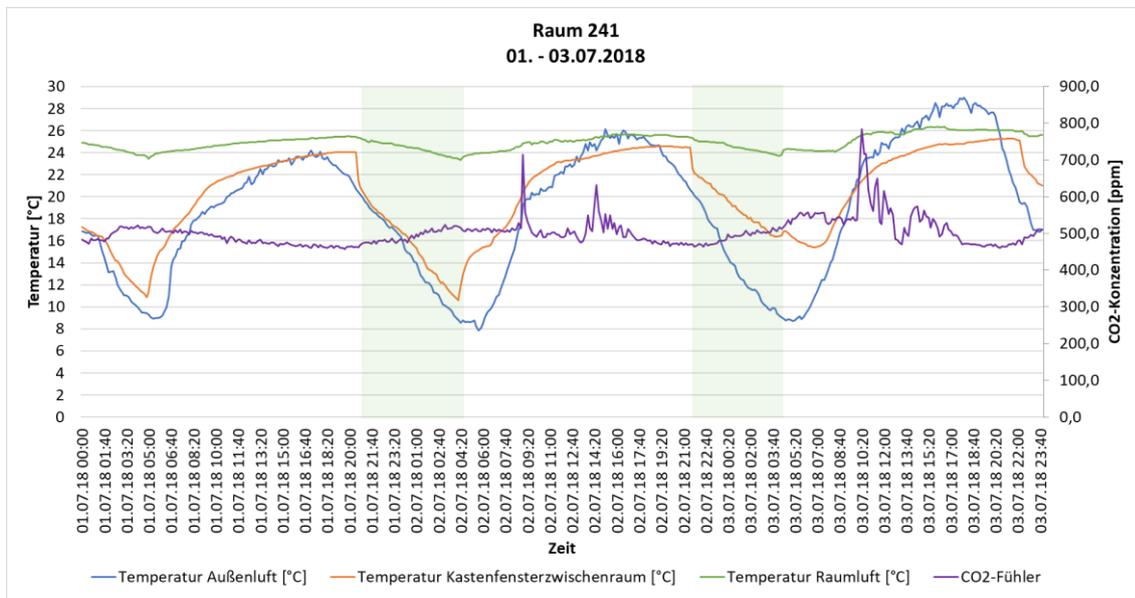


Abbildung 9 Raumlufttemperatur Raum 241, 01.07. - 03.07.2018

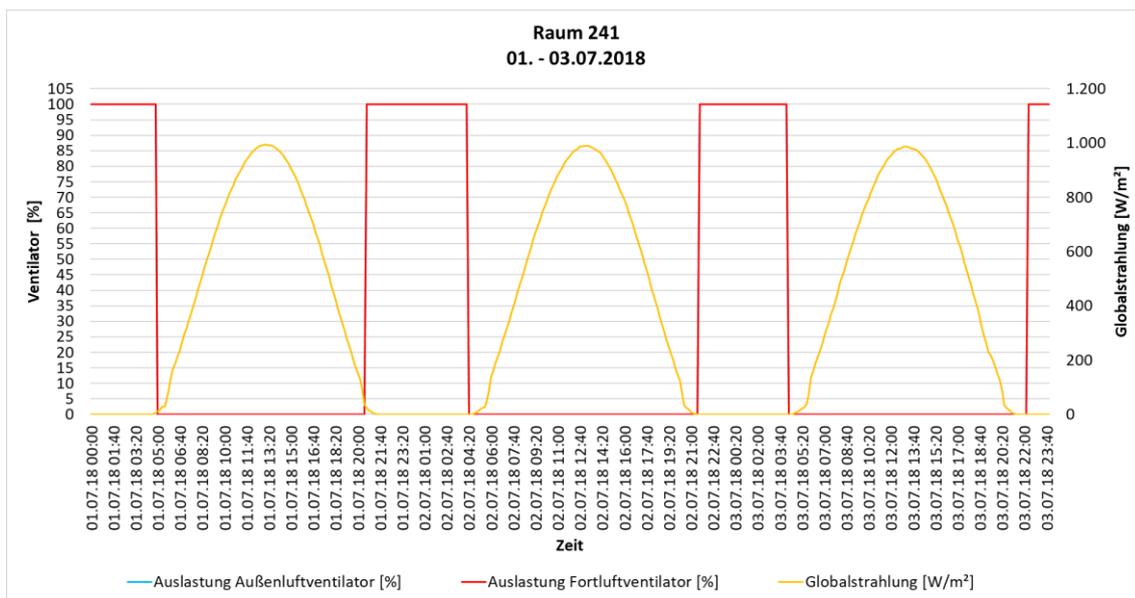


Abbildung 10 Auslastung Außenluft-, Fortluftventilator Raum 241, 01.07. - 03.07.2018

Der Einfluss der Speichermasse ist zu erkennen, sobald der Lüfter nicht mehr in Betrieb ist: der Anstieg der Raumlufttemperaturkurve durch Entladung der Speichermasse beträgt in dem Moment bis zu 0,5°C.

5.1.3 Umsetzung der vorgegebenen Steuerung und Regelung

Die Regelung, die durch die TGA-Planung vorgegeben wurde, kann anhand der Messwerte in verschiedenen Messzeiträumen nicht nachgewiesen werden.

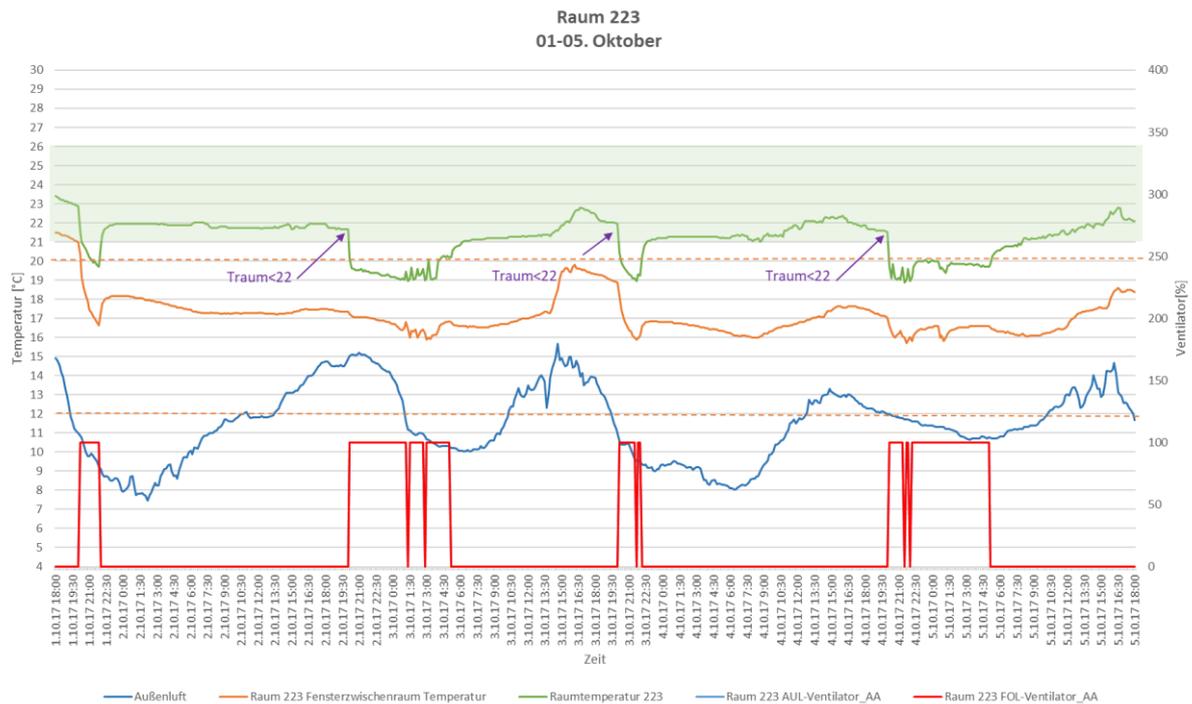


Abbildung 11 Raumkonditionen Raum 223, 01.10. - 05.10.2017

Der Messzeitraum 1.10.-5.10.17 zeigt für Raum 223 bspw., dass die Lüfter ein EIN-Signal erhalten, obwohl die Randbedingungen für die Nachtauskühlung bzw. den Lüftereinsatz nicht gegeben sind. Solche Zeiträume finden sich mehrfach während der gesamten Monitoring-Laufzeit. Die Ursache kann in der fehlerhaften GLT-Speisung liegen, kann allerdings auch durch manuelle Übersteuerung im Raum entstehen.

- Es wird empfohlen, die in der GLT hinterlegte Regelung kritisch zu prüfen.

5.1.4 Stromverbrauch

Der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte ist während der Kühlperiode größer als während der Heizperiode.

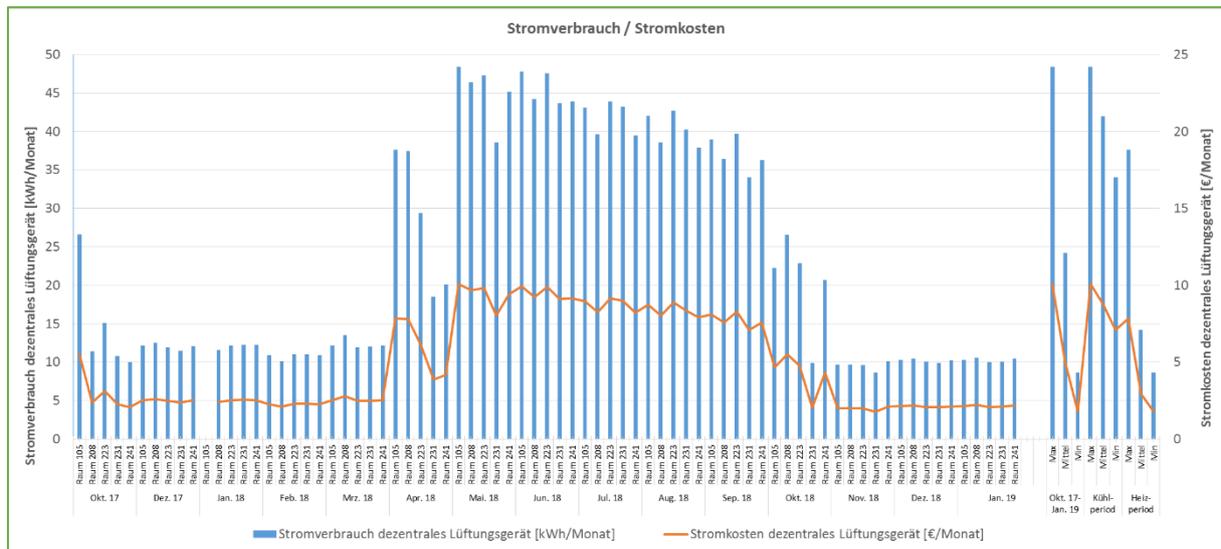


Abbildung 12 Stromverbrauch und Stromkosten, 10.2017 - 10.2018

Der Stromverbrauch des Lüftungsgerätes ist im Raum 105 (Süd) mit dem durchschnittlichen Stromverbrauch von 26,59 kWh/Monat am höchsten. Der Raum 105 wies im Mai, während der Mittelwert der Außenlufttemperatur bei 16,2 °C lag, einen maximalen Stromverbrauch auf.

Der Raum 231 (Nord) wies mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 20,97 kWh/Monat den geringsten Verbrauch im Vergleich mit den anderen Räumen auf.

Tabelle 6 Minimum, Maximum, Durchschnitt Stromverbrauch und Stromkosten von Oktober 2017 bis Oktober 2018

	Max		Mittel		Min	
	Verbrauch [kWh/Monat]	Kosten [€/Monat]	Verbrauch [kWh/Monat]	Kosten [€/Monat]	Verbrauch [kWh/Monat]	Kosten [€/Monat]
Raum 105	48.41	10.08	26.59	5.54	9.67	2.01
Raum 208	46.37	9.66	23.95	4.99	9.67	2.01
Raum 223	47.56	9.91	24.35	5.07	9.64	2.01
Raum 231	43.68	9.10	20.97	4.37	8.63	1.80
Raum 241	45.16	9.41	22.12	4.61	10.02	2.09

Der Mittelwert des Stromverbrauchs für alle Räume zeigt, dass der maximale Stromverbrauch im Mai mit 45,15 kWh/Monat und im Juni mit 45,43 kWh/Monat zu verzeichnen ist. Dieser Verbrauch entspricht 9,41 € im Mai und 9,46 € im Juni.

Tabelle 7 Durchschnittlicher Stromverbrauch und Stromkosten pro Monat

	Mittlerer Verbrauch [kWh/Monat]	Mittlere Kosten [€/Monat]
Oktober 17	14.79	3.08
Dezember 17	12.04	2.51
Januar 18	12.05	2.51
Februar 18	10.81	2.25
März 18	12.34	2.57
April 18	28.64	5.97
Mai 18	45.15	9.41
Juni 18	45.43	9.46
Juli 18	41.87	8.72
August 18	40.30	8.39
September 18	37.08	7.72
Oktober 18	20.46	4.26
November 18	9.55	1.99
Dezember 18	10.19	2.12
Januar 19	10.29	2.14

Der Gesamt-Stromverbrauch der im Monitoring erfassten Lüftungsgeräte betrug im Zeitraum Oktober 2017 bis Ende Januar 2019 (ein Monat Datenausfall) circa 1743 kWh, das entspricht ca. 363€ für fünf Räume.

Die detaillierte Darstellung der Stromverbräuche der dezentralen Lüftungsgeräte ist in der Anlage Tabelle 18 dargestellt.

- Es wird empfohlen, während der Kühlperiode auf reine Fensterlüftung umzustellen.

5.1.5 CO₂

CO₂-Werte werden ausschließlich in Raum 421 aufgezeichnet, in allen anderen Büroräumen sind VOC-Fühler verbaut. Da es keinen interpretierbaren Zusammenhang zwischen VOC und CO₂ gibt, wurden im Rahmen des Monitorings ausschließlich die CO₂-Messdaten betrachtet. Die Jahresauswertung der CO₂-Daten zeigt folgendes Bild.

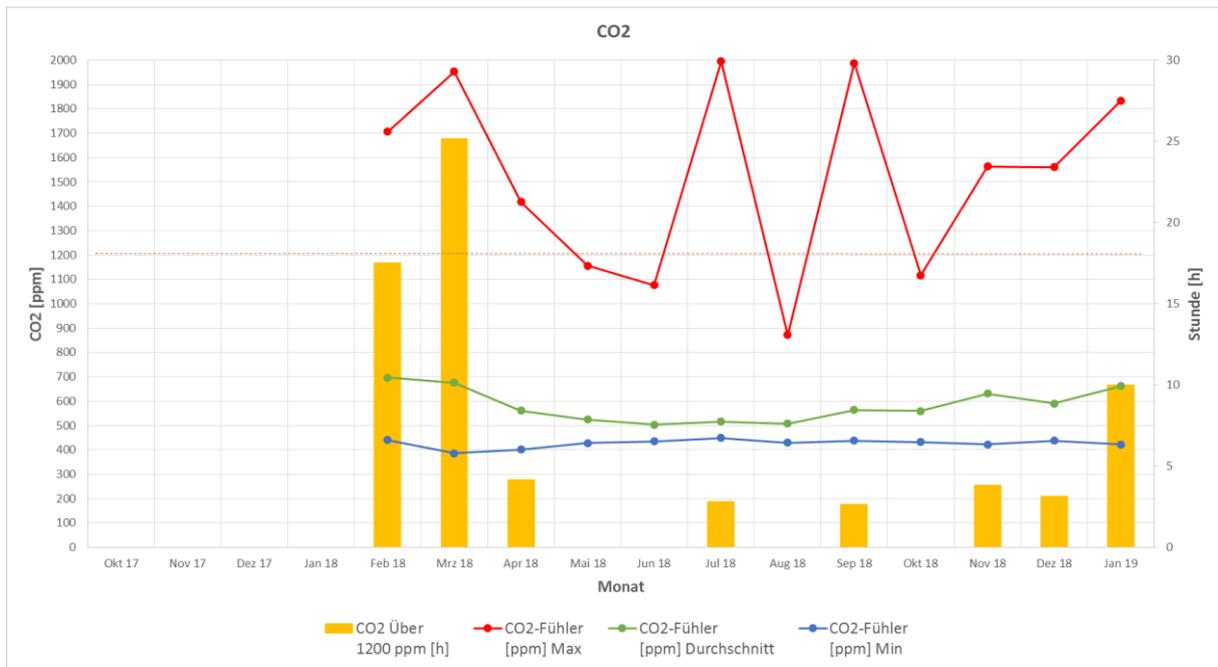


Abbildung 13 CO₂-Wert und Stundenzahl über 1200 ppm Raum 421, 02.2018 – 01.2019

Die Maximal-Werte reichen an 2000ppm heran, während der Heizperiode ist die Stundenzahl mit Werten über 1200ppm am höchsten. Im März wurden über 25h CO₂-Werte über 1200ppm aufgezeichnet. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlinie ausschließlich mit Hilfe der dezentralen Lüftung nur unzureichend erfüllt werden, da im Raum 421 zusätzlich die regelmäßige manuelle Fensterlüftung durchgeführt wird. Die Ergebnisse bezüglich der Raumluftqualität dürften ohne Fensterlüftung nochmals schlechter ausfallen.

- Es wird empfohlen, alle Räume des GVF mit CO₂-Sensoren auszustatten, temporär zusätzliche mobile CO₂-Messungen am Arbeitsplatz durchzuführen, um die Funktionalität der dezentralen Lüftungsgeräte raumweise bewerten zu können.

5.1.6 Fazit Raumbetrachtung

Die Ergebnisse zeigen, dass das Nachtauskühlpotenzial durch die dezentralen Lüftungsgeräte nicht genutzt werden kann. Zudem ist ersichtlich, dass die Raumluftqualität trotz Lüfterbetriebs Mängel aufweist. Während der Monitoringphase wurde durch die TU Kaiserslautern empfohlen, bestimmte Versuche durchzuführen, mit Hilfe derer die Gründe für die Fehlfunktionen gefunden werden und der Betrieb optimiert werden könnte. Der TGA-Planer, Balck&Partner, führte im Kontext der Empfehlungen eigene Versuche überwiegend in Räumen durch, die durch das Monitoring nicht beobachtet wurden. Die Versuche und resultierenden Anpassungen der GLT-Anforderungen haben zu keiner Verbesserung der Messergebnisse im vorliegenden Monitoring geführt.

Aus den Messergebnissen heraus kann festgestellt werden, dass die dezentralen Lüftungsgeräte nicht die positiven Effekte aufweisen, wie geplant war. Auch wenn die Gründe hierfür sind nicht direkt ableitbar. Auf Basis der Messergebnisse, verschiedener Telefonate mit TROX, dem Hersteller der Mess-Technik sowie den an der Planung beteiligten Fachingenieure kommen aus Sicht der TU Kaiserslautern folgende Gründe in Frage:

1. Die Luftmenge, die in den Raum eingebracht wird, reicht real nicht aus, um einen angemessenen Luftwechsel zu erzeugen. Das TROX-Gerät weist unter Maximalbetrieb einen Volumenstrom von 120 m³/h auf, was einem 3-fachen Luftwechsel entspricht. Das real eingebrachte Luftvolumen kann anhand der vorliegenden Messdaten nicht nachgewiesen werden.

2. Da die Zu- und Abluftöffnungen im verbauten Brüstungsgerät räumlich nah beieinander angeordnet sind, kann der Zuluftstrom raumseits bei geringen Einwurfgeschwindigkeiten in den Abluftstrom geraten. Die Versuche von Balck@Partner haben dies zum Teil bestätigt.

3. Da das Brüstungsgerät durch eine Abdeckplatte raumseits verdeckt ist, könnte ein Kurzschluss zwischen Zu- und Abluft hinter dem Gerät und vor der Platte erfolgen. Da Dichtungsmaßnahmen erfolgt sind, kann, eine gewissenhafte Prüfung vorausgesetzt, davon ausgegangen werden, dass keine Mischung hinter der Abdeckung erfolgt.

4. Die Kastenfenster, die unter einem hohen Unter- bzw. Überdruck stehen dürften, weisen Undichtigkeiten auf, so dass sich Abluft mit der Zuluft mischen kann. Die Versuche von Balck@Partner haben dies zum Teil bestätigt. Es stellt sich die Frage, wie dicht Bauteile ausgeführt werden müssen, um den entstehenden Druckdifferenzen stand halten zu können.

5. Die Folienklappen schließen auf Grund der Druckverhältnisse bzw. der Einbauweise, statt zu öffnen.

6. Die Zuluft- und Abluftöffnungen weisen nicht die vom Hersteller der Lüftungsgeräte geforderte Mindestfläche auf. Folgende Flächen wurden aus Plänen sowie Aufmaß aufgenommen:

- Blende zwischen Raumluft und Brüstungsgerät (IST: 0,06m², SOLL 0,08m²; ABWEICHUNG -25%)
- Zuluftöffnung Gerät (IST: 0,085m²; SOLL: 0,08m²; ABWEICHUNG: +6%)
- Lochblech im Kastenfensterzwischenraum (IST: 0,0214m²; SOLL: 0,025m²; ABWEICHUNG: -14%)
- Öffnungen in den äußeren Fenstern (IST: 0,0125m², SOLL 0,025m²; ABWEICHUNG -50%)
- Insektenschutzgitter (IST: 0,00675m²; SOLL: 0,025m²; ABWEICHUNG: -73%)
- Raffstore-Kasten.

Die Werte zeigen, dass die mit einfachen Mitteln nachweisbaren Mindestöffnungsflächen teils erheblich unterschritten wurden. Dies hat gemäß Telefonat mit TROX in der Regel die Folge, dass der Strombedarf der Geräte steigt, jedoch nicht, dass zu geringe Luftmengen ins System eingebracht werden. Es folgt daraus, dass sich der Druck in den Kastenfenstern erhöht. Die EPDM-Folienklappe, die sich zusätzlich im Schichtaufbau am äußeren Fenster befindet, muss zusätzlich bewertet werden.

- Es wird empfohlen, eine detaillierte Bestandsaufnahme durchzuführen und den Bestand hinsichtlich der Funktionalität zu bewerten.

Gespräche mit dem TGA-Planer ergaben, dass der Versuchsraum, der in der ersten Phase des Forschungsprojektes realisiert und messtechnisch erfasst wurde, einen abweichenden Fensteraufbau aufwies. Bspw. wiesen die Öffnungen im Fensterrahmen andere Geometrien auf, zudem wurde für die Versuche keine Folienklappe eingebaut.

- Die Ergebnisse der Vormessungen am Musterraum sind nicht auf das realisierte Projekt übertragbar, da der Musterraum von der später realisierten Sanierung in wesentlichen Punkten abweicht. Die Abweichungen wurden nicht dokumentiert, mutmaßlich in der Wirkungsweise auch nicht bewertet.

6. Die Messfühler hängen ggf. an einer ungünstigen Stelle oder weisen eine zu hohe Messgenauigkeit auf. Die Prüfung der Produktdatenblätter ergab eine gute Messgenauigkeit aller Geräte. Die CO₂-/VOC-Fühler sind zwischen den Kastenfenstern an der raumluftzugewandten Fassade, der Raumfühler für Temperatur neben der Tür an der Flurwand positioniert. Der CO₂-/VOC-Fühler kann unter Umständen im Zuluftstrom hängen und so zu geringe Werte übermitteln, der Temperaturfühler könnte zu weit von der Nutzungszone entfernt positioniert sein, so dass er Temperaturänderungen zu spät oder gar nicht registriert. Telefonate mit den Herstellern ergaben, dass die Positionierung im Raum üblich sei. Eine mobile Messung am Schreibtisch der Nutzer könnte belastbare Vergleichswerte liefern.

7. Die dezentralen Lüftungsgeräte sowie die annähernd luftdichte Ausführung der Fassade führen dazu, dass die Büroräume belüftungstechnisch abgeschlossene Systeme bilden (vgl. Abbildung 14 Natürliche Querlüftung (links, Luftverbund über den Flur); einseitige maschinelle Lüftung (rechts, kein Luftverbund über den Flur). Bei Nutzung der rein passiven Belüftung ergäbe sich wetterabhängig ein Unter- oder Überdruck an den Fassaden, bei geöffneten Fenstern wäre eine Querlüftung über die Undichtigkeiten der Flurtüren möglich. Dies wird durch die maschinelle Lüftung in Kombination mit der Dichtigkeit der Gebäudehülle aufgehoben.

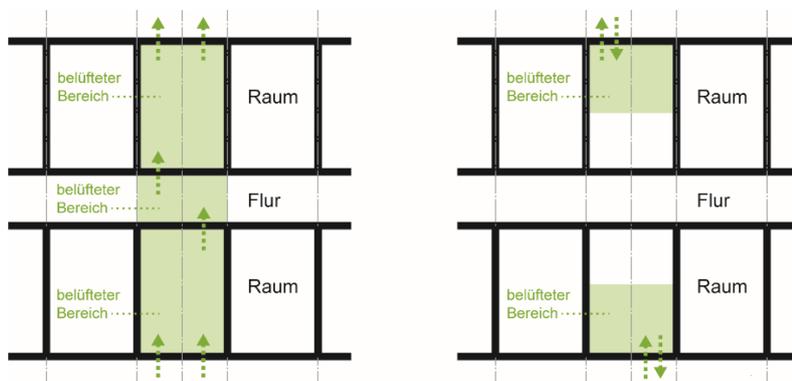


Abbildung 14 Natürliche Querlüftung (links, Luftverbund über den Flur); einseitige maschinelle Lüftung (rechts, kein Luftverbund über den Flur)

- Um die möglichen Ursachen nachzuweisen, sind zusätzliche, GLT- und planerunabhängige Messungen notwendig.

Während der Monitoringphase wurden Mängel hinsichtlich der Mindest-Raumlufttemperaturen vornehmlich während der Heizperiode, der Maximal-Raumlufttemperaturen vornehmlich während der Kühlperiode sowie des CO₂-Gehaltes aufgezeigt. Mögliche Lösungswege wurden präsentiert und diskutiert. Eine Mängelbehebung konnte durch Messdaten bislang nicht belegt werden.

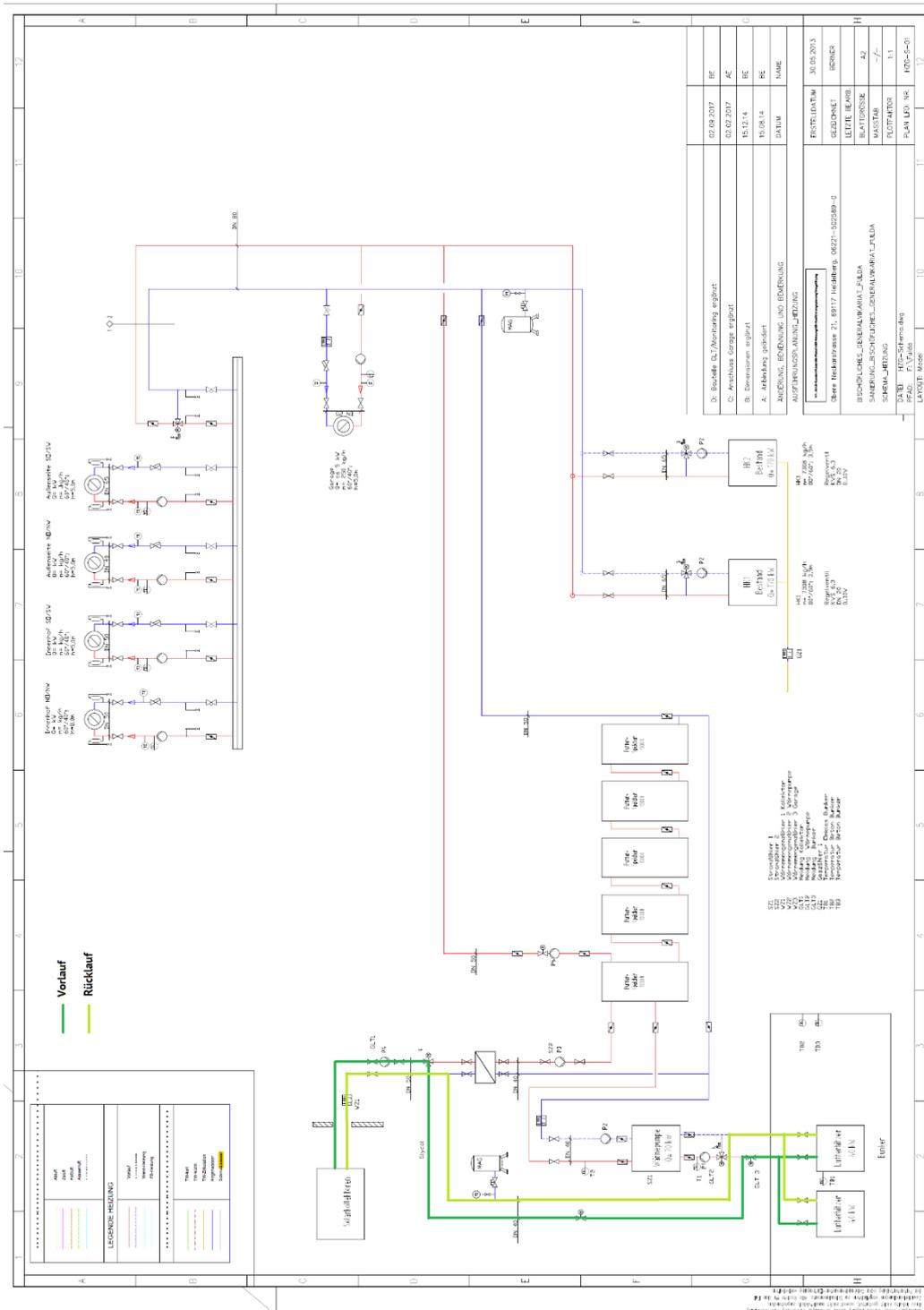


Abbildung 16 Ladebetrieb Bunker

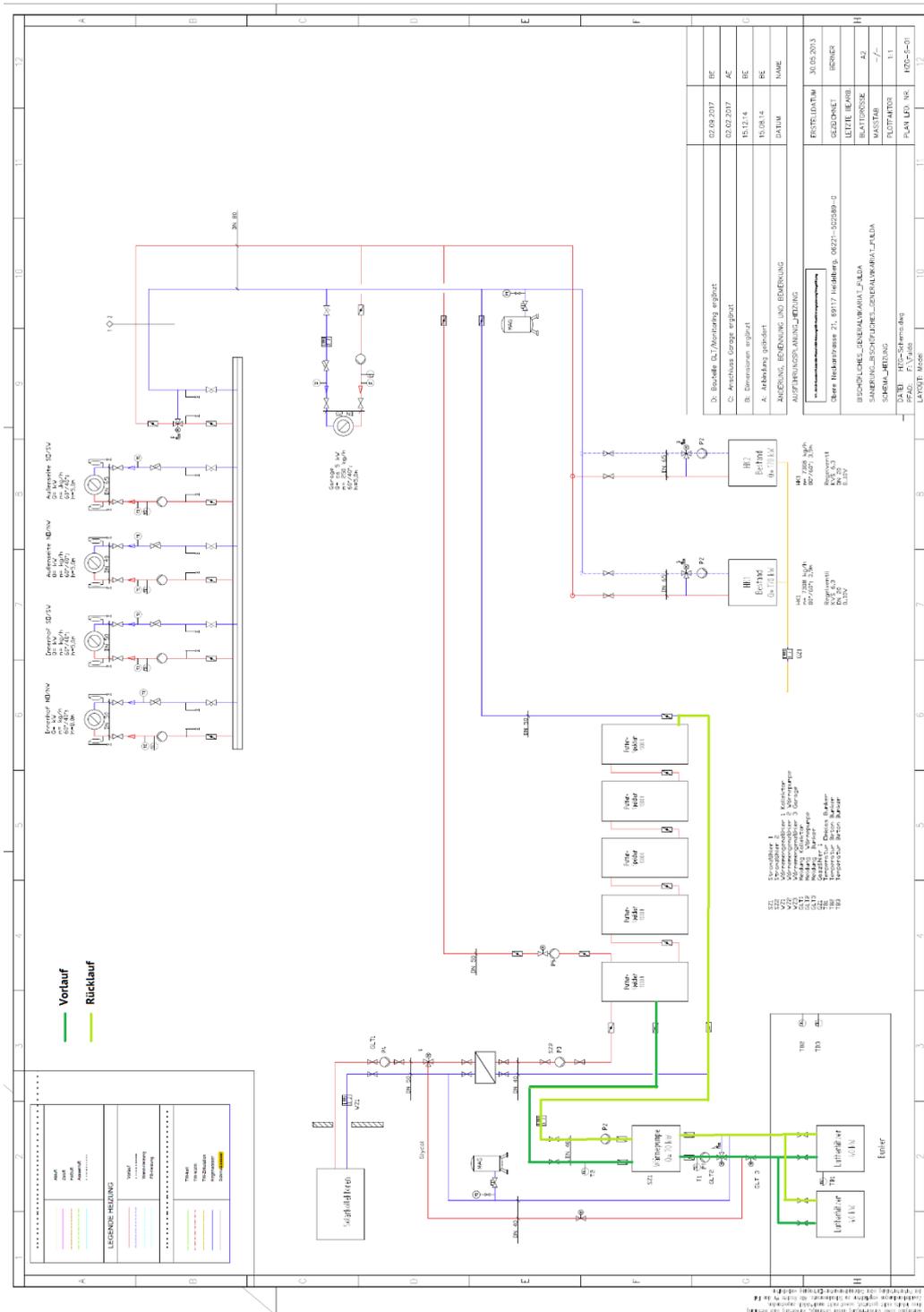
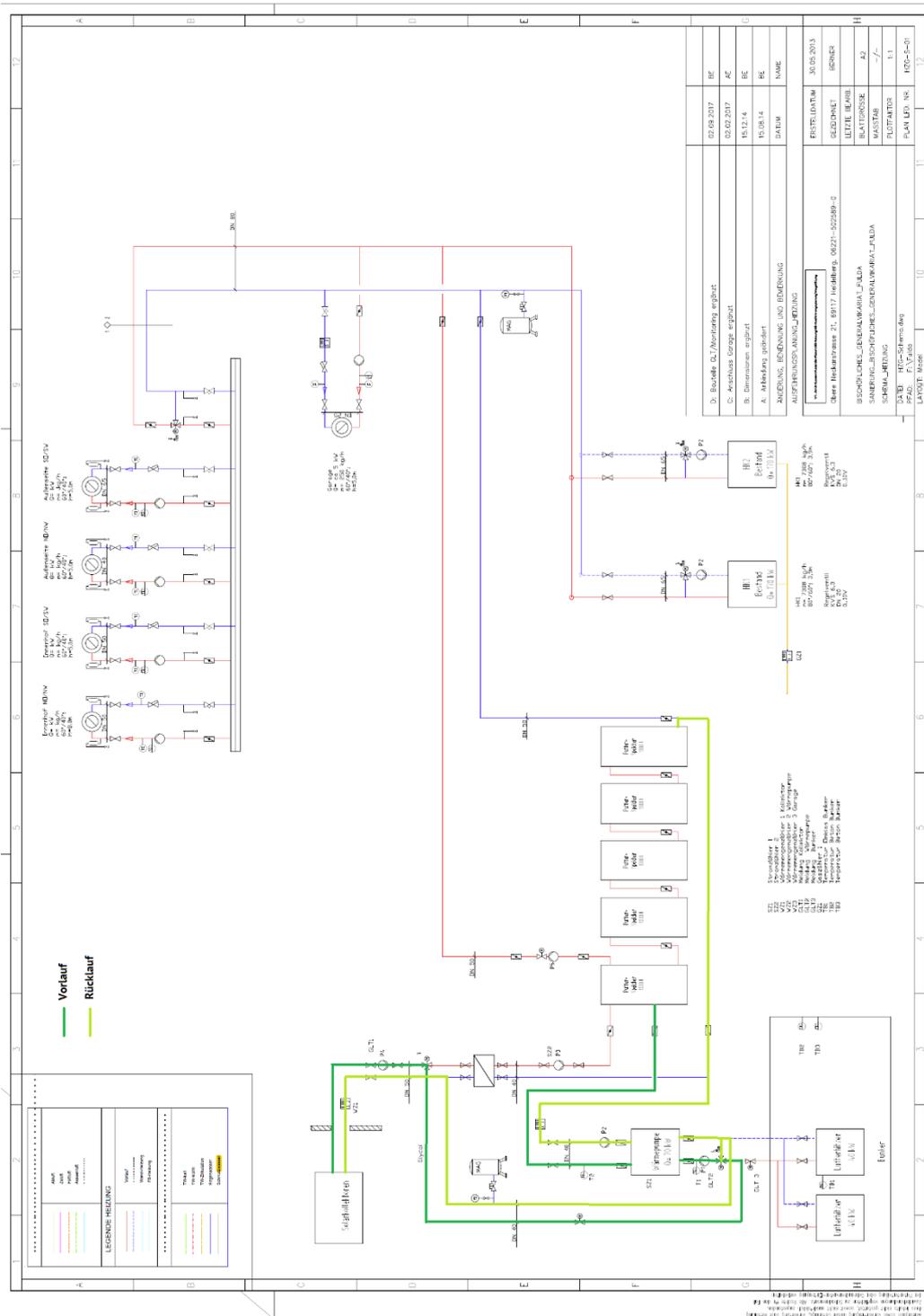


Abbildung 17 Betriebsart Wärmepumpe über Bunker (TGA-Planer)



Für jeden der Kreisläufe wurden verschiedene Sensoren installiert, um die Betriebsstunden der Kreisläufe zu untersuchen. Tabelle 7 stellt die detaillierten Betriebsstunden aller Kreisläufe von Oktober 2017-Januar 2019 dar.

Tabelle 8 Betriebsstunden der unterschiedlichen Kreisläufe

Datenquelle	berechnet	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring
	Betriebsstunden Wärmepumpe Verdichter 1&2	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Bunker-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Bunker	Betriebsart Entladebetrieb Bunker-Kollektor	Betriebsart Notkühlung Kollektor-Bunker	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Pufferspeicher	Betriebsstunden 2. Waermeerzeuger (Kessel)
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Oktober 2017	215.8	207.6	455.8	0.0	0.0	0.0	0.0	163.0
November 2017	-	-	-	-	-	-	-	-
Dezember 2017	274.3	0.0	711.0	0.0	0.0	0.0	0.0	471.0
Januar 2018	298.5	90.9	652.9	0.0	0.0	0.0	0.0	416.0
Februar 2018	122.3	140.7	445.2	0.0	0.0	0.0	0.0	561.0
März 2018	224.2	445.4	232.1	0.0	0.0	0.0	0.0	367.0
April 2018	180.3	662.8	0.0	0.0	0.0	0.0	47.8	111.0
Mai 2018	79.2	581.3	0.0	0.0	0.0	2.9	112.3	68.0
Juni 2018	24.7	576.0	0.0	8.3	0.0	19.6	86.6	83.0
Juli 2018	4.2	515.9	0.0	81.1	0.0	65.7	123.1	22.0
August 2018	30.5	581.2	8.8	102.8	0.0	15.5	47.8	414.0
September 2018	672.3	665.7	23.7	0.0	0.0	0.0	4.7	117.0
Oktober 2018	704.7	442.4	266.8	0.0	0.0	0.0	0.0	336.0
November 2018	71.5	0.0	704.5	0.0	0.0	0.0	0.0	66.0
Dezember 2018	0.0	0.0	727.8	0.0	0.0	0.0	0.0	82.0
Januar 2019	0.0	0.0	686.9	0.0	0.0	0.0	0.0	201.0
Summe	2902.5	4909.9	4915.5	192.2	0.0	103.7	422.3	3478.0

Während der Kühlperiode wird geheizt. Die Werte der Betriebsstunden des Verdichters und der Wärmepumpe zeigen zudem im September und Oktober 2018 unplausibel hohe Werte, sie wurden daher in Folge nicht berücksichtigt. Die Wärmepumpe war 17,4 % der Zeit des Jahres im Betrieb. Während der Heizperiode lief sie mehr über den Bunker, während der Kühlperiode mehr über den Kollektor. Die Betriebsstunden Ladebetrieb in Bunker zeigen, dass nur im Juni, Juli, August der Bunker beladen wurde. Die Frage, wie die Wärmepumpe über den Bunker in der Heizperiode gespeist wird, wenn der Bunker vorher nicht beladen wurde, konnte nicht geklärt werden. Die Betriebsarten-Signale sind nicht plausibel interpretierbar.

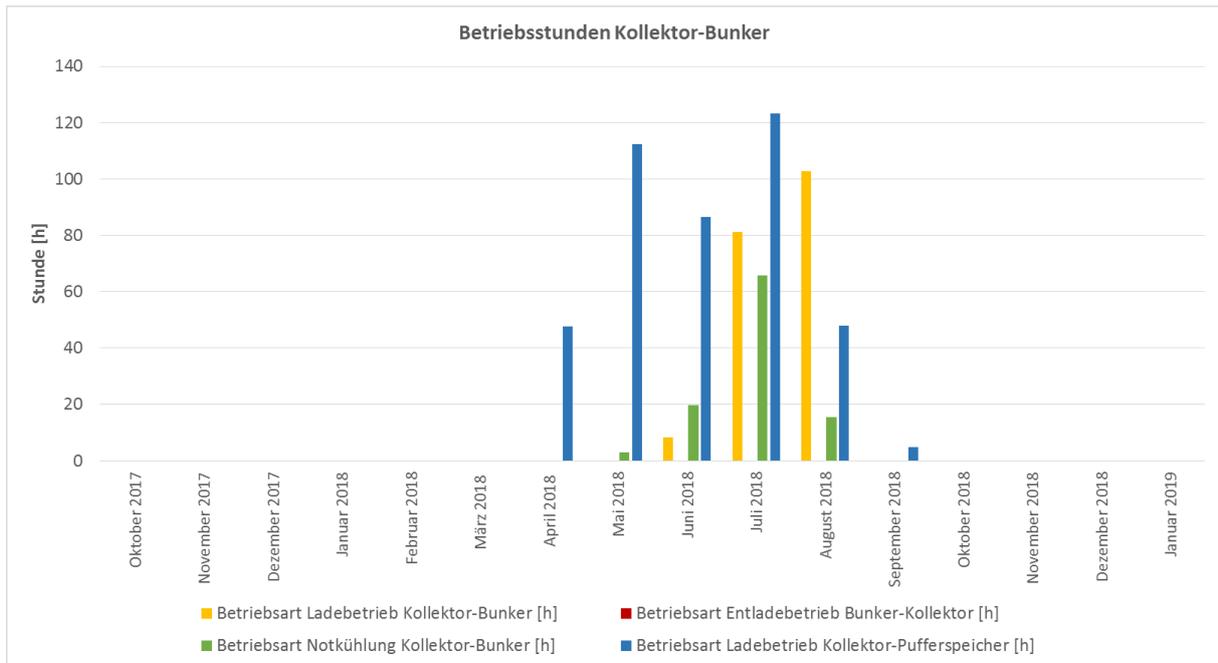


Abbildung 19 Betriebsstunden Kollektor-Bunker, 10.2017-01.2019

Gemäß der Betriebsarten-Solarregelungstabelle (Firma Gottschild) soll bei einer Kollektortemperatur von mehr als 75 °C, und einer Pufferspeichertemperatur von mehr als 70 °C die überschüssige Wärme in den Bunker geblasen werden. Die Pumpen-Plattentaucher stehen dann auf AUS. Das heißt, dass keine Wärme zum Pufferspeicher fließt. Die Messdaten zeigen allerdings zeitweise etwas anderes. Im Juli wurde bspw. Wärme in den Bunker geblasen und gleichzeitig der Pufferspeicher beladen. Gemäß Solarregelung muss in dieser Betriebsart der Pufferspeicher weniger als 70°C aufweisen, und die Pumpen-Plattentaucher auf EIN stehen.

Tabelle 9 Betriebsart Notkühlung und Ladebetrieb Kollektor-Pufferspeicher sind gleichzeitig im Betrieb

	Globalstrahlung	Temperatur Außenluft	Temperatur Solar Ost	Temperatur Solar Sued	Temperatur Solar West	Temperatur unter Dach	Mittelwert 3x Kollektor	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Bunker-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Bunker	Betriebsart Entladebetrieb Bunker-Kollektor	Betriebsart Notkühlung Kollektor-Bunker	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Pufferspeicher
18.07.18 12:00	992.9	24.5	71.7	88.6	95.1	39.7	85.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
18.07.18 12:10	991.4	24.5	72.8	88.1	96.2	40.3	85.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
18.07.18 12:20	980.8	24.3	73.9	86.9	97.5	40.9	86.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
18.07.18 12:30	982.0	24.8	75.0	86.4	98.1	41.6	86.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0
18.07.18 12:40	900.9	25.0	75.8	87.1	98.4	42.0	87.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 12:50	961.5	25.9	72.5	85.3	97.2	42.5	85.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:00	953.7	25.6	74.1	85.2	97.6	42.8	85.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:10	953.0	25.4	75.4	85.3	98.0	43.0	86.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:20	940.3	26.1	76.4	85.5	98.2	43.6	86.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:30	940.8	25.2	77.4	86.1	98.9	44.1	87.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:40	929.4	25.9	78.3	86.9	99.0	44.7	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 13:50	916.8	25.9	78.9	86.9	98.7	44.8	88.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:00	904.5	25.7	79.6	86.9	98.5	45.4	88.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:10	897.1	26.5	80.0	86.2	97.9	45.9	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:20	885.3	26.2	80.4	87.2	97.9	46.0	88.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:30	863.5	26.1	80.7	88.2	97.0	46.1	88.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:40	848.9	26.8	81.0	88.6	96.2	46.8	88.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 14:50	832.9	26.4	81.2	88.6	95.7	46.8	88.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:00	813.9	26.4	81.3	88.9	94.3	46.9	88.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:10	791.8	26.6	81.3	89.4	93.4	47.5	88.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:20	770.7	27.0	81.2	89.4	92.0	47.3	87.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:30	747.5	26.8	81.0	89.6	90.8	47.6	87.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:40	725.4	26.6	80.9	88.7	89.0	47.5	86.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 15:50	697.0	27.1	80.5	87.7	86.2	47.7	84.8	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:00	673.4	27.3	80.1	86.4	84.4	47.6	83.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:10	650.6	27.0	79.6	85.3	82.4	47.5	82.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:20	618.8	27.5	79.1	84.1	81.0	47.6	81.4	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:30	589.1	27.4	78.4	81.8	79.6	47.4	79.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:40	559.5	27.1	77.7	80.1	77.9	47.2	78.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 16:50	533.4	26.9	76.9	77.4	76.3	47.3	76.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 17:00	502.7	26.8	76.0	75.4	74.6	47.3	75.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 17:10	469.9	27.0	74.9	73.4	72.6	47.1	73.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 17:20	447.4	26.8	73.9	71.4	70.8	46.7	72.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
18.07.18 17:30	421.8	26.9	72.8	68.9	68.8	46.4	70.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.0
18.07.18 17:40	388.5	27.0	71.6	65.9	66.8	46.5	68.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

Die Messungen zeigen, dass der zweite Wärmeerzeuger (Kessel) mit 39,6% des Jahres gleichzeitig mit der Wärmepumpe im Betrieb ist. Im Februar mit der durchschnittlichen Außenlufttemperatur von ca. -2 °C war die Wärmepumpe 18,2 % des ganzen Monats, der Wärmeerzeuger (Kessel) 83,5 % in Betrieb. Insgesamt war der zweite Wärmeerzeuger von Oktober 2017 bis Januar 2019 ca. 3478 Stunden (39,6% des Jahres) in Betrieb. Folgendes Diagramm zeigt, dass die Messwerte des Wärmemengenzählers mit den aufgezeichneten Betriebsstunden der Verdichter (außer September und Oktober 2018) übereinstimmen.

- Nach der Sanierung wird der zweite Wärmeerzeuger (Kessel) als Hauptwärmequelle genutzt.

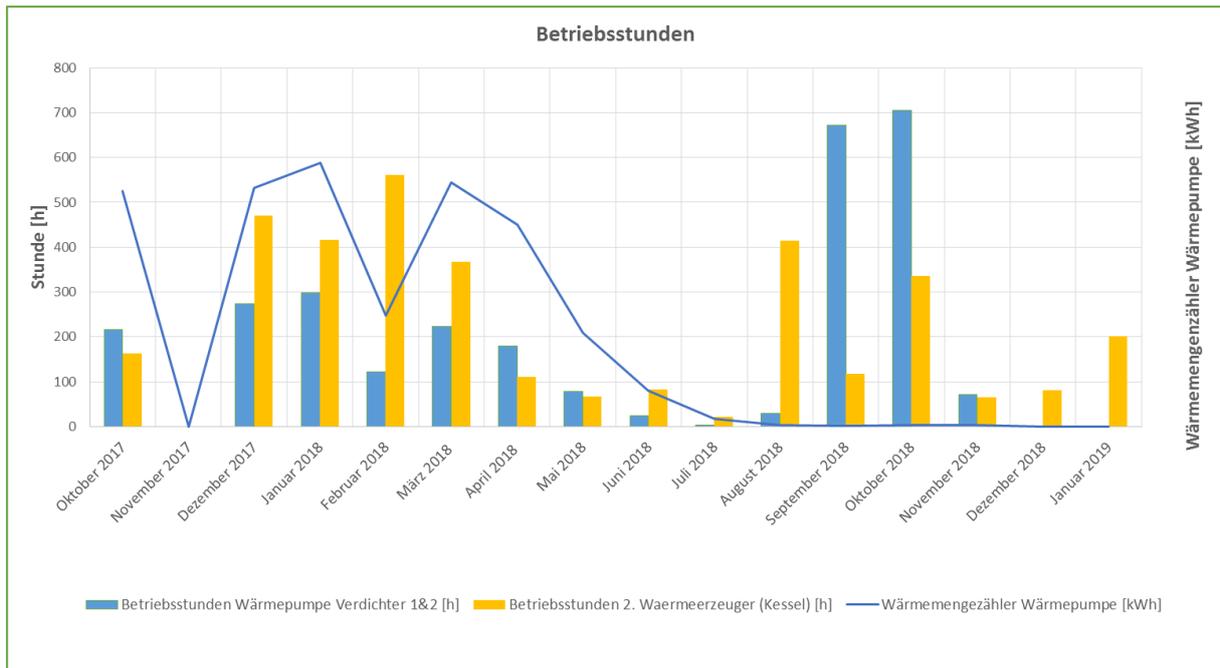


Abbildung 20 Betriebsstunden der Wärmepumpe und des zweiten Wärmeerzeugers, 10.2017 – 01.2019

Die Wärmepumpe wird ab 5°C nicht mehr genutzt. Die signalgebende Temperatur wird auf dem Dach unter dem Blechdach eines der Dachaufbauten gemessen, was nach Einschätzung der TU Kaiserslautern nicht den optimalen Signalgeber darstellt. Die Temperatur sollte zum einen an die geringste der Kollektortemperaturen gekoppelt werden, zum anderen sollte die Temperaturschwelle nach unten korrigiert werden, um die Betriebszeiten zu maximieren.

5.2.2 Bunker

Die Qualität bzw. Effizienz der saisonalen Wärmespeicherung im Bunker kann durch die zur Verfügung stehenden Messdaten nicht nachgewiesen werden, da weder Wärmemengezähler verbaut noch alle notwendigen Betriebszustände bzw. Hilfsenergieverbräuche separat aufgezeichnet wurden. Die Detailbetrachtung der Kühlperiode zeigt jedoch Folgendes:

- Die theoretisch berechnete Wärmeeindringtiefe von Beton beträgt betongütespezifisch 14-17 cm bei einem Speicherzyklus von 24h. Die gemessenen Temperaturen in 5cm und 10cm Tiefe bestätigen, dass die Eindringtiefe > 10cm ist. Während des beginnenden Speichervorganges weichen die 5cm- und 10cm-Temperaturen nominal noch voneinander ab (vgl. Abbildung 21 Ladezustand Bunker, Temperaturen und Betriebszustand / Tabelle 10 Bunker, Temperaturen, Betriebszustand, Luftkollektortemperatur), gleichen sich im ungestörten Verlauf jedoch wieder an. Die Temperatur in 10cm Tiefe liegt während der Beladens unter, im restlichen Zeitraum über der Temperatur in 5cm Tiefe. Dies lässt darauf schließen, dass die Betonmasse jenseits der 10cm sowie das angrenzende Erdreich Energie aufnimmt und temporär speichert.
- Vor dem Ladevorgang sind die gemessenen Kerntemperaturen nahezu konstant, erhöhen sich durch den Ladevorgang um bis zu 3K und sinken innerhalb von 24h ohne weitere Energiezufuhr auf den Ursprungszustand +max.1K, nach 2,5 Tagen ohne Energiezufuhr auf annähernd den Ursprungszustand ab (vgl. Abbildung 21 Ladezustand Bunker, Temperaturen und Betriebszustand / Tabelle 10 Bunker, Temperaturen, Betriebszustand,

Luftkollektortemperatur) ab. Die Wärmeenergie wird auf Grund der Temperaturdifferenz zum Erdreich ins Erdreich abgeleitet und steht dem Raum nicht mehr zur Verfügung.

- Die Betonkerntemperaturen betragen während des Jahreszyklus 2018 durchschnittlich 19,5°C (5cm) und 19,3°C (10cm). Die Einblastemperatur, die Rückschlüsse auf die Raumlufttemperatur gibt, betrug im Jahresmittel 21,5°C.
- Die Signale zum Betriebszustand entsprechen weder dem gemessenen Temperaturverlauf, noch den Regelungs-Sollwerten, die realen Betriebszeiten sind demnach geringer, als aus der Betriebszeitenauswertung hervorgeht. Der Kreislauf Luftkollektor-Bunker soll bei durchschnittlichen Luftkollektortemperaturen > 50°C schalten, was an den Temperaturkurven auch ablesbar ist. Das Betriebs-Signal schaltet um Stunden verzögert auf AUS (vgl. Abbildung 21 Ladezustand Bunker, Temperaturen und Betriebszustand).

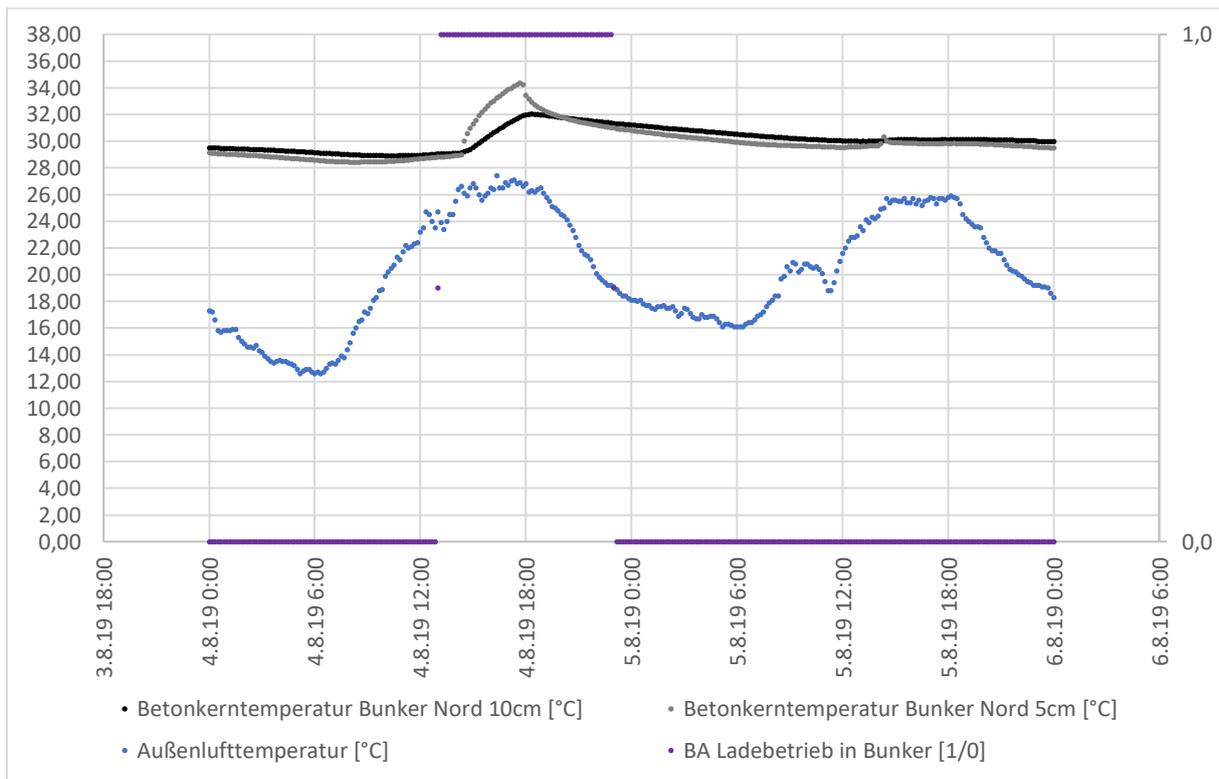


Abbildung 21 Ladezustand Bunker, Temperaturen und Betriebszustand, 04.08. – 06.08.2019

Tabelle 10 Bunker, Temperaturen, Betriebszustand, Luftkollektortemperatur, 04.08. – 06.08.2019

	Betonkern- temperatur Bunker 10cm [°C]	Betonkern- temperatur Bunker 5cm [°C]	Einblas- temperatur Bunker Nord [°C]	Außenluft- temperatur [°C]	Luftkollektor- temperatur Mittelwert [°C]	BA Ladebetrieb Bunker [1/0]
4.8.19 12:50	29,02	28,78	35,96	23,50	66,37	0
4.8.19 13:00	29,03	28,79	35,76	24,70	67,36	1
4.8.19 13:10	29,04	28,80	35,78	23,90	66,63	1
4.8.19 22:50	31,37	31,02	33,80	19,20	38,43	1
4.8.19 23:00	31,34	30,99	33,63	19,10	37,99	1
4.8.19 23:10	31,29	30,91	33,43	18,90	37,40	0
5.8.19 23:10	29,98	29,52	31,77	19,20	34,43	0
6.8.19 23:10	29,06	28,64	30,18	18,10	30,43	0

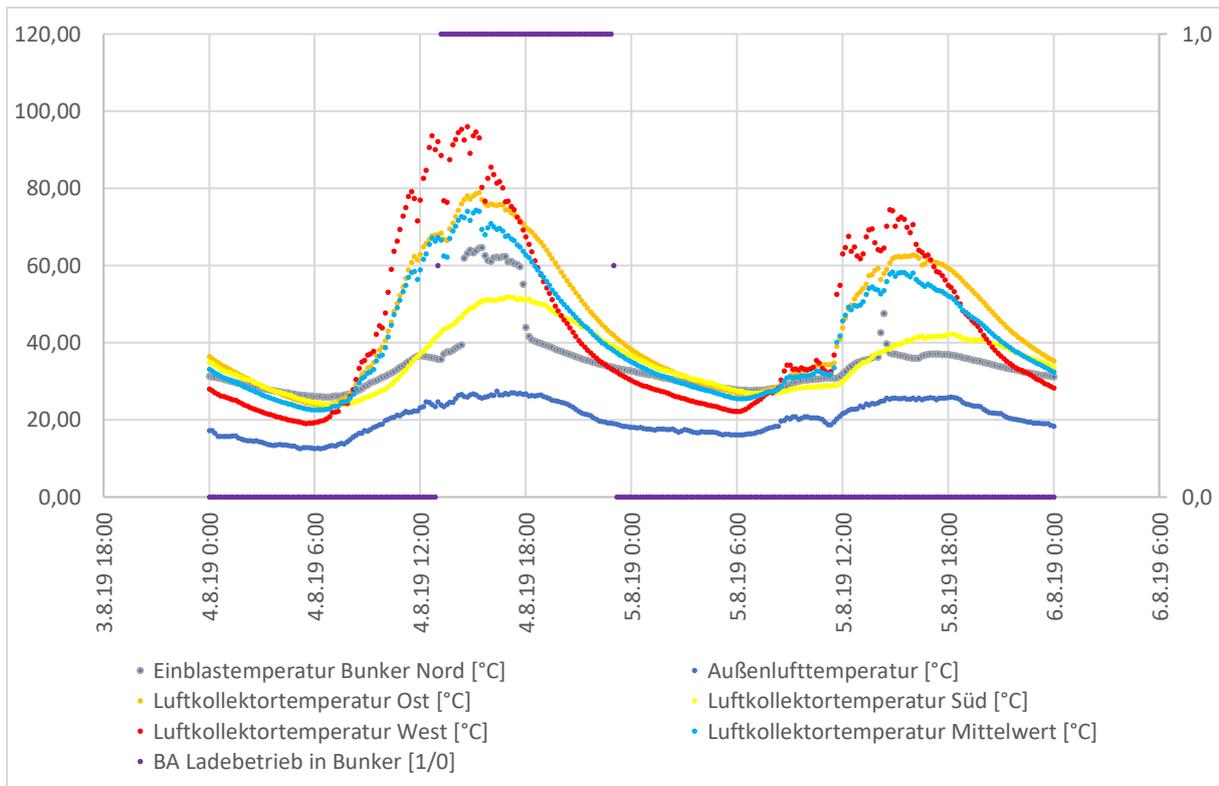


Abbildung 22 Ladezustand Bunker, Einblas- und Kollektortemperaturen, Betriebszustand, 04.08. – 06.08.2019

Beim Entladen des Bunkers zeigt sich Folgendes:

- Bei annähernd durchlaufendem Bunker-Wärmepumpen-Betriebs-Zustandssignal zeigt sich eine Änderung der Betonkerntemperaturen in 5cm Tiefe von 19,4°C auf 18,8°C innerhalb von 16 Tagen, eine Energiezufuhr in den Raum erfolgt in der Zeit nicht. Ein Abrufen von Energie aus der Bunker­masse scheint zu erfolgen, die Energiemenge kann jedoch nicht messtechnisch beziffert werden.
- Die 5cm-Temperatur ist während der Entladezeiten geringer als die 10cm-Temperatur, was die vorherige Aussage bestätigt.
- Die Raumlufttemperatur, abgeleitet aus der Einblastemperatur, sinkt annähernd parallel zur Betonkerntemperatur. Der Energieentzug ist demnach eher gering.

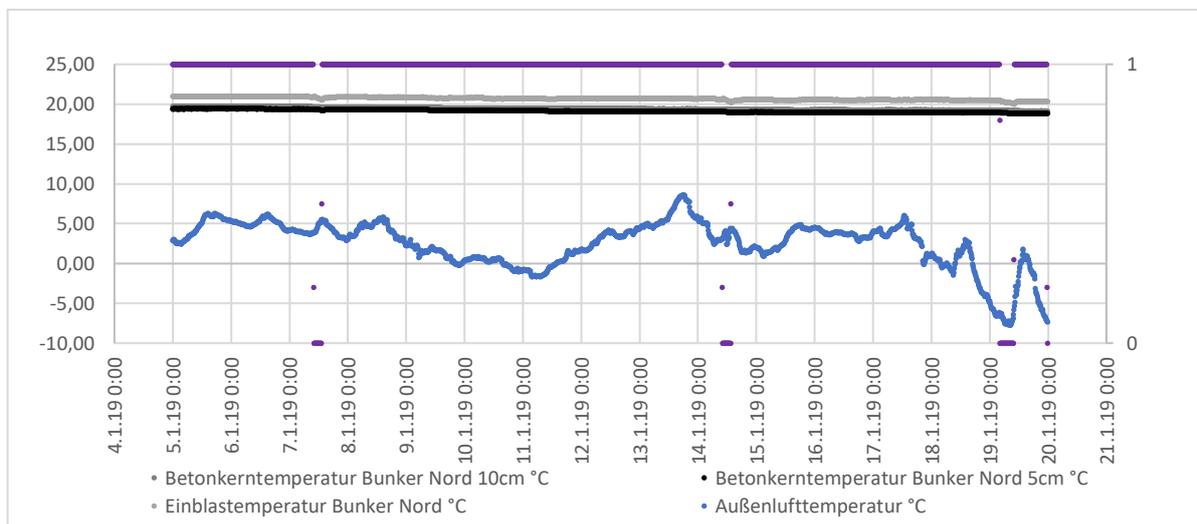


Abbildung 23 Entladezustand Bunker, Kerntemperaturen, Raumlufttemperaturen, Betriebszustand, 05.01. – 20.01.2019

- Eine Bewertung der Effizienz des Bunker-Betriebes ist anhand der Messdaten nicht eindeutig möglich. Die bauphysikalische Interpretation der Daten lässt jedoch die Vermutung zu, dass der Energieentzug aus dem Bunker während der Heizperiode eher gering ist.

5.2.3 Kollektor

Die Messdaten der Kollektortemperaturen zeigen verschiedene Auffälligkeiten. Generell ist festzuhalten, dass die für den Luftkollektor verbauten Polycarbonatplatten laut Hersteller für Temperaturen $< 120^{\circ}\text{C}$ ausgelegt sind. Die 120°C werden in keinem Messschritt erreicht. Am 02. Juli 2018 nimmt um 13:30 Uhr die Kollektortemperatur ca. um 64°C ab. Zu diesem Zeitpunkt findet ein Wechsel der Betriebsarten von „BA Kollektor direkt auf Puffer“ zu „BA WP über Kollektor“ statt. Ab ca. 18:30 Uhr erhöht sich die Kollektortemperatur ständig und misst am 3. Juli um 2:00 Uhr nachts ca. 96°C , obwohl es keinerlei Strahlung gibt. Im Telefonat mit Back&Partner wurde darauf hingewiesen, dass es ein Entladebetrieb für den Thermischen Speicher existiert, der nicht benötigte Wärme im Speicher an den Kollektor abgibt, um eine erneute Wärmeaufnahme tagsüber zu gewährleisten. Mit dem Entladebetrieb kann der abrupte Temperaturabfall nicht erklärt werden, der Temperaturanstieg während der Nachtstunden hingegen schon. Es dürfte ein Datenausfall vorliegen, der zum Abriss und in Folge zur Verschiebung der Kurven bei durchlaufendem Zeitstempel geführt hat.

- Der telefonisch beschriebene Entladebetrieb ist in keinem für das Monitoring vorliegenden Dokument dargestellt und kann anhand der Messdaten nicht nachgewiesen werden.

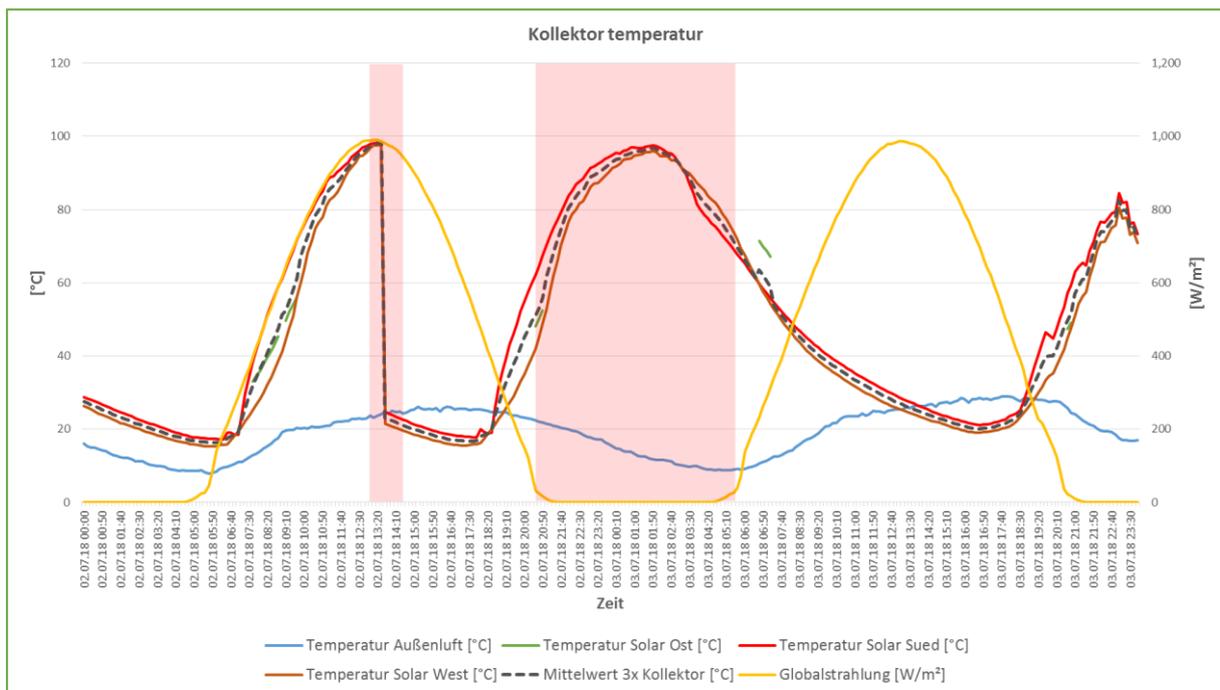


Abbildung 24 Detailauswertung Kollektortemperatur, 02.07. – 03.07.2018

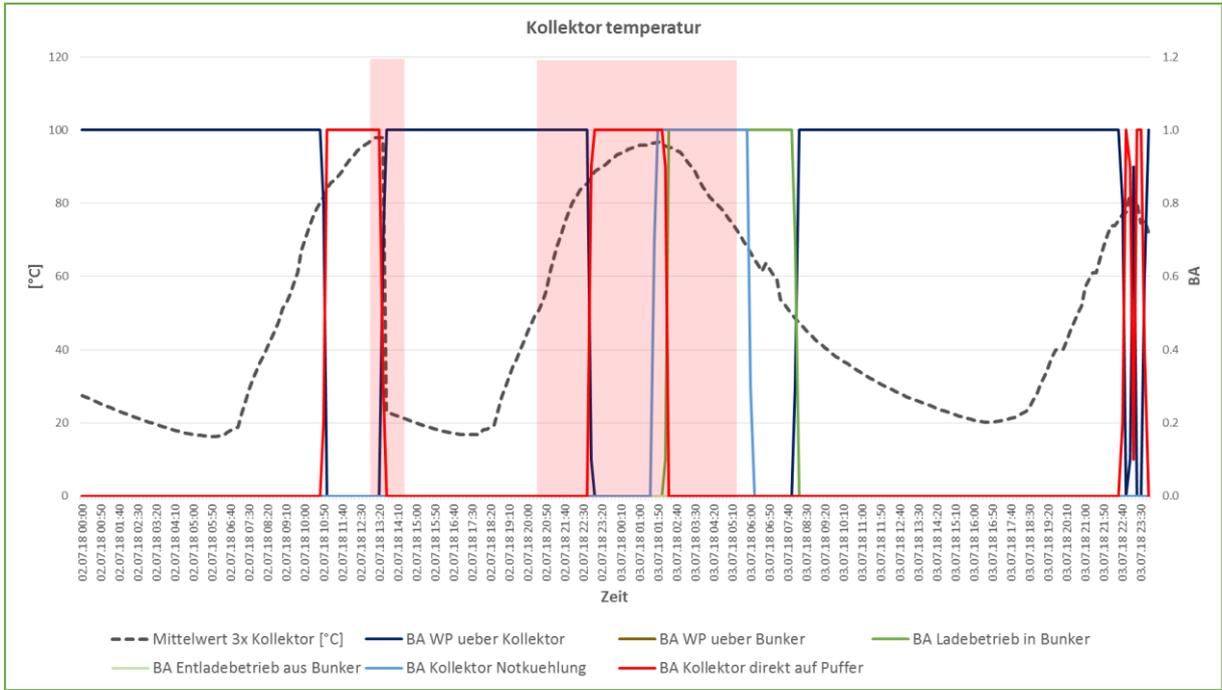


Abbildung 25 Detailauswertung verschiedener Betriebsarten des Kollektors, 02.07. - 03.07.2018

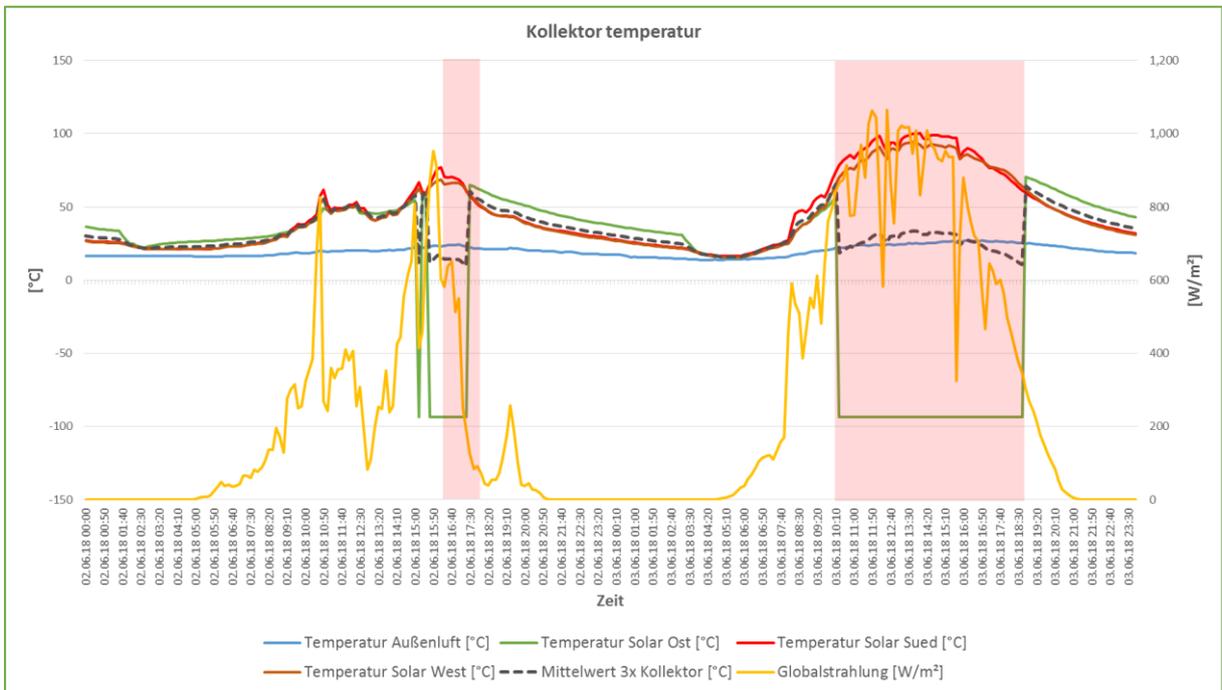


Abbildung 26 Unplausible Kollektortemperatur im Ost-Kollektor, 02.07.2018

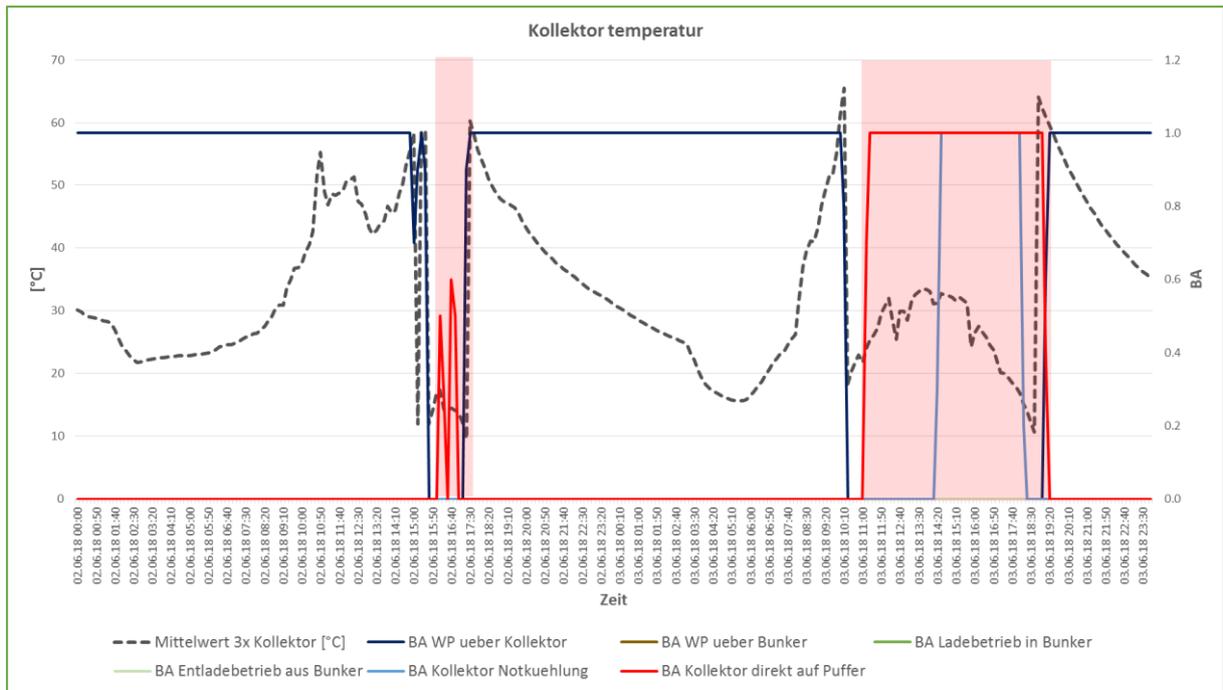


Abbildung 27 Betriebsart vom Kollektor und Wärmepumpe, 02.07.2018

Die maximalen Kollektortemperaturen betragen im Juli durchgehend über 90 °C, im Mai, Juni, Juli an einigen Tagen knapp über 100, jedoch stets weniger als 120°C. Die Stabilität der chemischen Struktur des Polycarbonats ist gemäß Hersteller gewährleistet.

- Es wird empfohlen, die visuelle Alterung der Polycarbonatplatten jährlich zu dokumentieren.

Kollektor Überhitzung

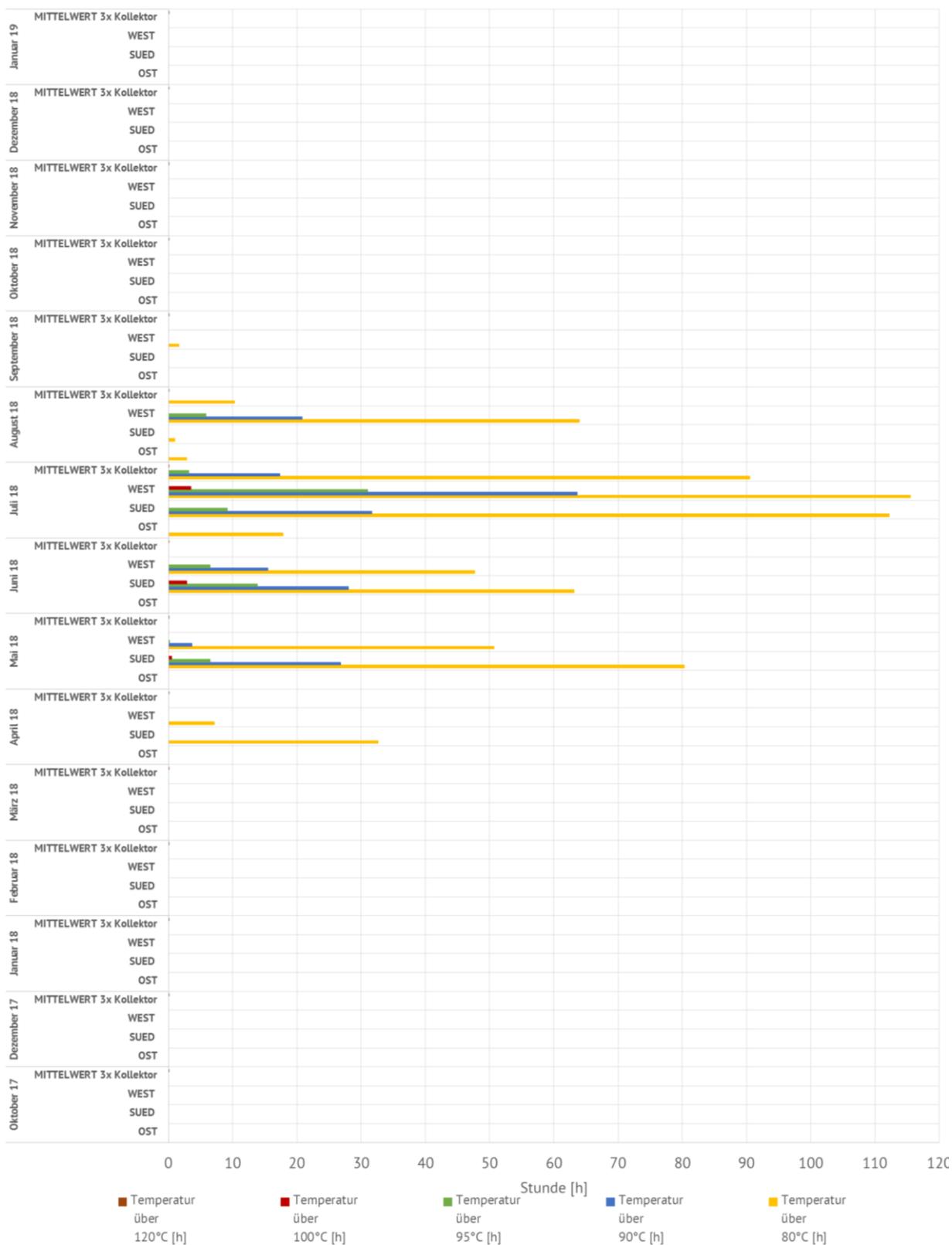


Abbildung 28 Kollektor Temperaturstundenzahl

5.2.4 Stromverbrauch Wärmepumpe

Der Stromverbrauch der Wärmepumpe betrug im Zeitraum Oktober 2017 – Januar 2019 insgesamt 601,1 kWh. Die Wärmepumpe konnte 3203,7 kWh Wärme erzeugen. Dies entspricht einer JAZ von 5,33. Der maximale Stromverbrauch bzw. die maximale Wärmeerzeugung der Wärmepumpe betrug im Januar 2018 106,24 kWh Stromverbrauch bei einer Wärmeerzeugung von 588 kWh, was einer maximalen Arbeitszahl von 5,53 entspricht. Die Jahresarbeitszahl liegt demnach in einem sehr effizienten Bereich.

Diese Auswertung wurde mit der Annahme durchgeführt, dass entgegen der Übermittlung der Messwerte durch die Firma Gottschild die Einheit des Wärmemengenzählers kJ/h ist, da nur so plausible Werte entstehen. Die Annahme konnte nicht abschließend bestätigt werden.

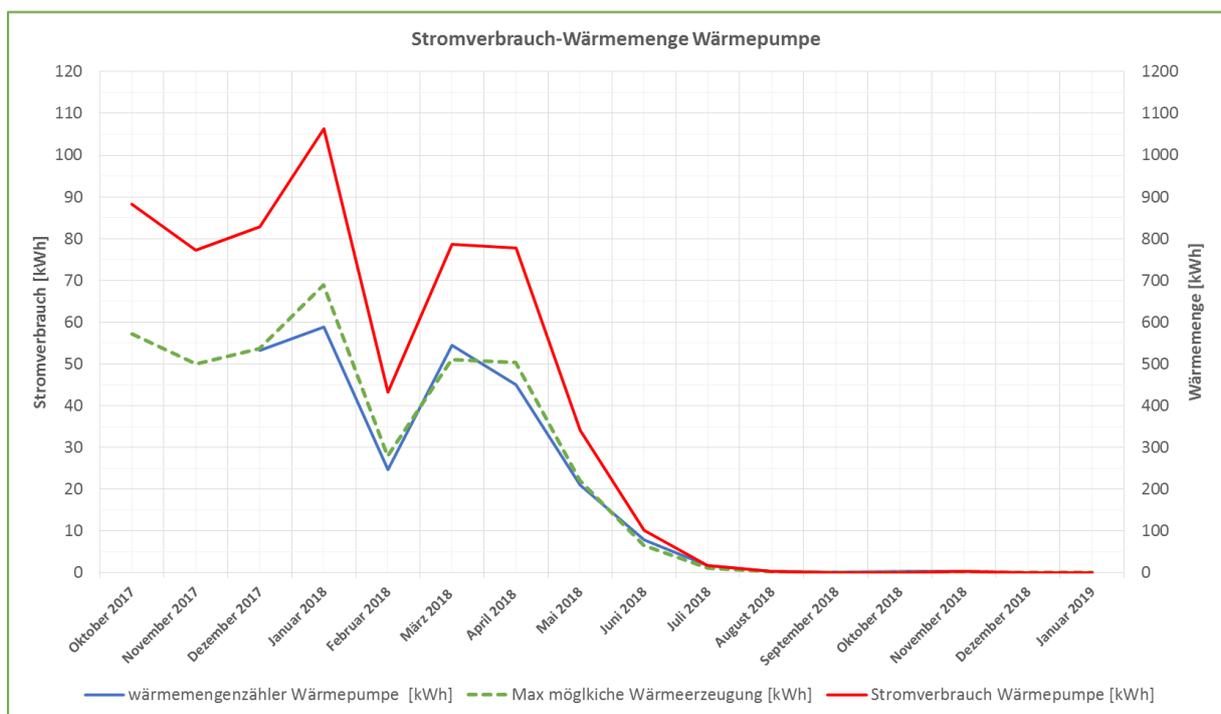


Abbildung 29 Stromverbrauch und erzeugte Wärmemenge der Wärmepumpe, 10.2017 – 01.2019

Interessant ist das Verhalten der Wärmepumpe im Februar 2018, als die mittlere Außentemperatur bei -2°C lag. Die Wärmepumpe ist während des Februars weniger als während der anderen Monate der Heizperiode im Betrieb, ein großer Teil der Wärmeerzeugung wurde durch den Kessel gedeckt. Gemäß TGA-Konzept sollte dies andersherum sein.

- Es wird empfohlen, die Betriebszeiten der Wärmepumpe durch Anpassung der Temperaturgrenzen bzw. Änderung der Temperaturbezüge zu optimieren.

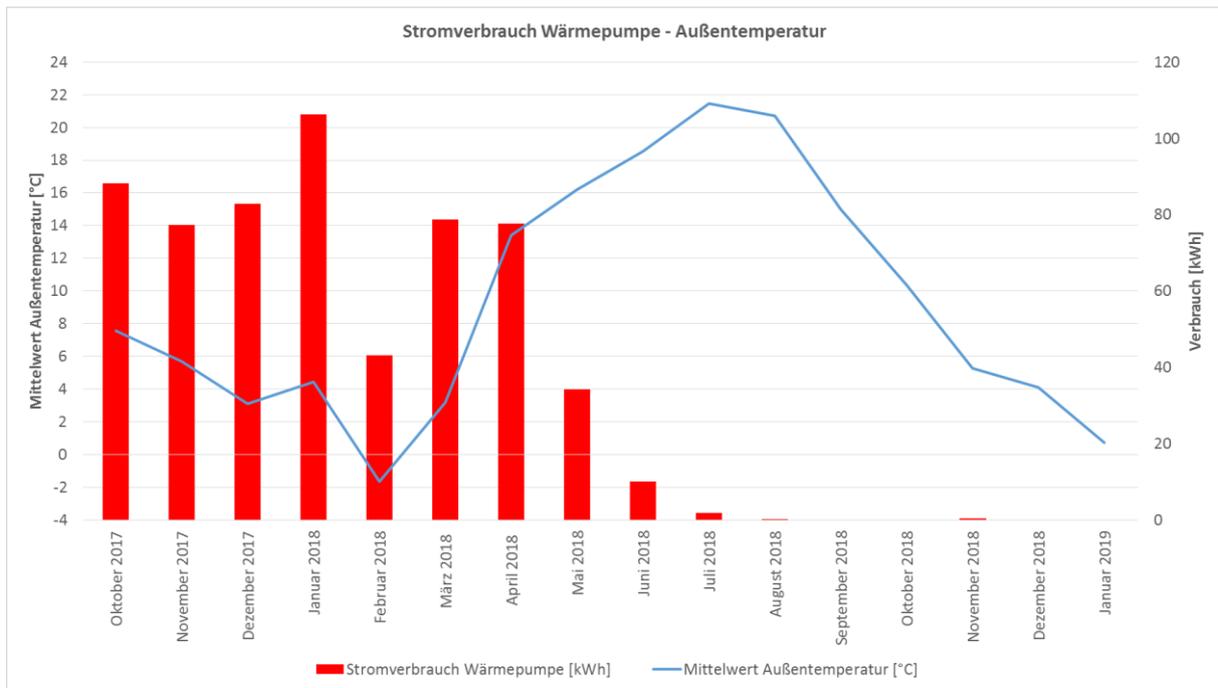


Abbildung 30 Stromverbrauch der Wärmepumpe und Außentemperatur, 10.2017 – 01.2019

5.2.5 Gasverbrauch

Der Gasverbrauch liegt in Form von durch das EVU abgerechneten Gasmengen von 2003-2018 sowie Ablesedaten von 08.2018-02.2019 vor. Der reale Gasverbrauch gemäß Abrechnung stellt sich wie folgt dar.

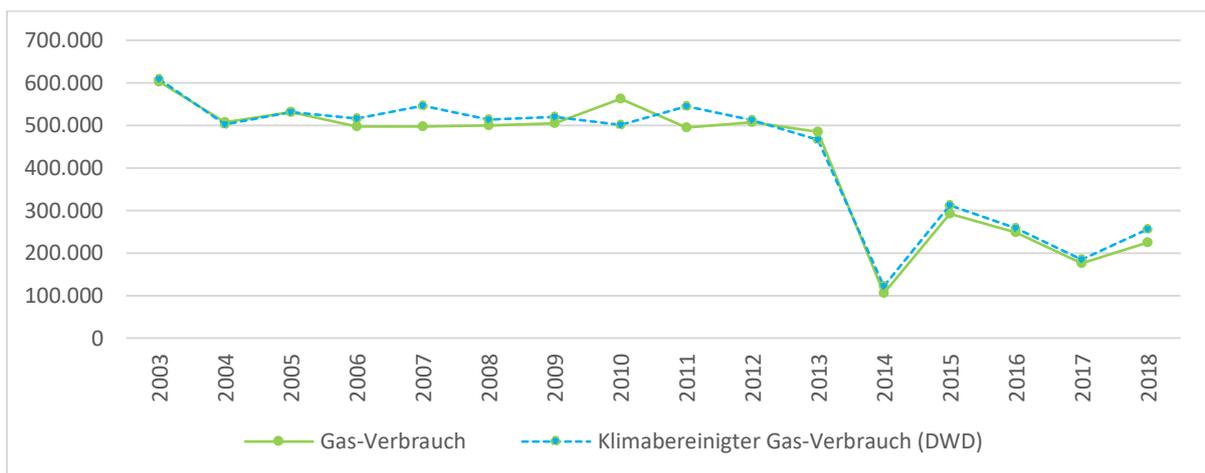


Abbildung 31 Gasverbrauch, 2003 - 2018

Die Reduktion des Gasverbrauches von 2013 auf 2014 markiert den Zeitpunkt der Sanierung. In den verfügbaren 11 Jahren vor der Sanierung betrug der durchschnittliche Gasverbrauch 517.028 kWh/a (klimabereinigt 523.744 kWh/a), in den 5 Jahren nach der Sanierung 209.130 kWh/a (klimabereinigt 226.611 kWh/a). Dies ergibt eine Reduktion des Gasverbrauches in Folge der Sanierung auf 40,45% (klimabereinigt 43,27%).

Der detaillierte, abgelesene Gasverbrauch für den Zeitraum August 2018 bis Ende Januar 2019 sieht wie folgt aus:

Tabelle 11 Gasverbrauch

Gas	Ablesewert	berechnet	berechnet	Monitoring	berechnet	Monitoring
	Zählerstand	Verbrauch	Verbrauch	Wärmemenge Garage	Wärmemenge Kessel	Betriebsstunden 2. Wärmeerzeuger (Kessel)
	[m³]	[m³]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[h]
1. Aug. 18	86804	260	1973	120	1853	414
3. Sep. 18	87064	683	5189	490	4699	117
1. Okt. 18	87747	1886	14336	2530	11806	336
1. Nov. 18	89633	3523	26776	3040	23736	66
4. Dez. 18	93156	3909	29708	3360	26348	82
2. Jan. 19	97065	4714	35826	4700	31126	201
1. Feb. 19	101779	-	-	-	-	-

Der Kessel ist jeden Monat, auch während der Kühlperiode, in Betrieb. Im August wurden 414 Betriebsstunden durch die GLT übermittelt. Die Garage stellt auch während der Kühlperiode einen kontinuierlichen Wärmeabnehmer dar, was kritisch zu prüfen wäre.

5.2.6 Fazit Systembetrachtung

Die Betriebszeiten der Wärmepumpe sind wesentlich zu gering. Um das System effizient zu machen, müsste die Wärmepumpe gut $\frac{3}{4}$ des Wärmebedarfes decken. Der Stromverbrauch ist in Folge der Sanierung wesentlich gestiegen, der Gasverbrauch gesunken.

6. Fazit

Die Messergebnisse zeigen, dass durch das architektonische Konzept solare Gewinne im Luftkollektor sowie im Kastenfenster zur Verfügung stehen. Das gebäudetechnische Konzept kann diese Gewinne allerdings kaum nutzbar machen, auch, weil sie zu gering sind, um sie technisch, systemisch zu nutzen.

Die Wärmepumpe sollte den Hauptteil des Wärmebedarfes bereitstellen, real ist der Gaskessel weiterhin der erste Erzeuger.

Die dezentralen Lüftungsgeräte verbrauchen Strom und verursachen zwei Mal jährlich Wartungskosten. Sie gewährleisten die angestrebte Raumluftqualität – vorausgesetzt, die Ergebnisse aus dem mit CO₂-Sensoren ausgestatteten Raum sind auf die anderen Räume übertragbar - nicht. Es wird empfohlen, die Gründe hierfür messtechnisch zu belegen, alternativ auf reine Fensterlüftung umzustellen. Eine Energieeinsparung im Vergleich zum Zustand vor der Sanierung wird auf Grund der Kastenfensterfunktion auch bei reiner Fensterlüftung real zu messen sein, die Verantwortung für die Raumluftqualität läge somit beim Nutzer, nicht bei der Technik. Toleranz und Zufriedenheit würden steigen (Anwendung des adaptiven, außenlufttemperaturabhängigen Komfortmodells).

Der Gasverbrauch sinkt durch die Sanierung auf Kosten des steigenden Stromverbrauches. Im Vergleich zum Stand vor der Gebäudesanierung fallen für den Bauherrn zusätzliche Kosten für Wartung und Instandhaltung an, zudem vergrößert sich der ökologische Fußabdruck durch Vergrößerung des CO₂-Ausstoßes im Betrieb, Stand heute. Beziffert man die Lebensdauer der zusätzlich verbauten technischen Komponenten mit 25 Jahren, zeigen die Messergebnisse, dass sie sich ökologisch wie ökonomisch nicht amortisieren können.

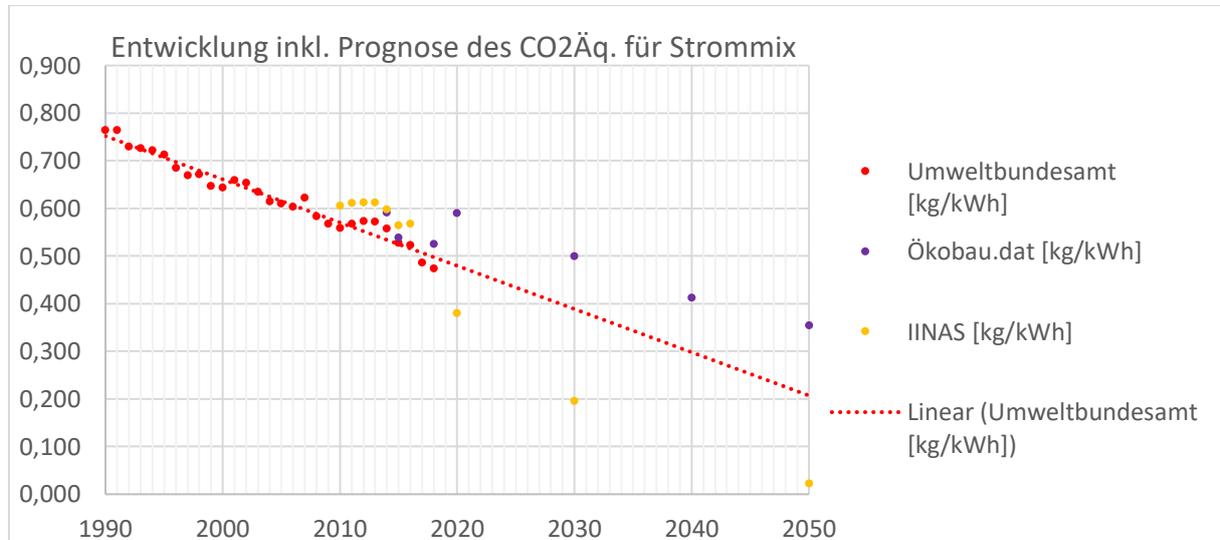


Abbildung 32 Auswertung CO₂-Prognosen Strommix (Tersluisen, ee concept)

Die Auswertung verfügbarer Studien zur Entwicklung der CO₂-Bilanz des deutschen Strommixes verdeutlicht, dass die Verschiebung von der Gasverbrennung zur Stromnutzung langfristig sinnvoll ist. Das CO₂-Äquivalent für 1kWh Strom wird im Gegensatz zum CO₂-Äquivalent von Gas kontinuierlich gegen Null sinken. Im vorliegenden Fall schätzen die Autoren den technischen Aufwand jedoch als nicht zielführend ein. Trotz Einbau der Wärmepumpe bleibt Gas weiterhin die erste Wärmequelle.

Die Vielzahl an technischen Einzelkomponenten sowie Regelungsparametern führt im vorliegenden Fall zur enormen Komplexität des Gesamtsystems. Hieraus resultiert, dass das Verständnis der Planer für das System schwindet (was sich in der fehlenden bzw. widersprüchlichen Gebäudedokumentation äußert) und die Fehleranfälligkeit in der Abstimmung der Einzelkomponenten untereinander steigt (was sich in der Nicht-Umsetzung der Regelungsparameter äußert).

7. Anlagen

Tabelle 12 Monitoring-Daten

Daten			2017											
			01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Außen	Globalstrahlung	[W/m ²]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Außenlufttemperatur (= Zuluft Kastenfenster)	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Rel. Feuchte	% rF					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bürogebäude	Luftkollektor	Wärmemengenzähler nach Kollektor (WM > WP)	[Wh]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Luftkollektortemperatur	[°C]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		GLT-Meldung Kollektor > Wärmepumpe						✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		GLT-Meldung Kollektor > Plattentaucher						✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		GLT-Meldung Kollektor > Gebläse im Bunker						✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Wärmepumpe	Stromzähler (Strombedarf WP)	[Wh]					✓ ²						
		Wärmemengenzähler nach Wärmepumpe (WM > Therm. Speicher)	[Wh]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Temperatur Eintritt in Wärmepumpe	[°C]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Temperatur Austritt Wärmepumpe > Speicher	[°C]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Bunkergebläse	Betontemperatur Bunker Nord 10 cm Eindringtiefe	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Betonkerntemperatur Bunker Nord 5 cm Eindringtiefe	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Einblastemperatur Bunker Nord	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Gasverbrauch	[Wh]					✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Meldung Schaltsignal Gaskessel							✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	
Garage	WMZ Garage	[Wh]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 105	Kastenfenster	Fensterzwischenraum Temperatur (= Zuluft Raum)	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✗	✓	✓	✗	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Raum 208	Kastenfenster	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✗	✓	✓	✗	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Raum 223	Kastenfenster	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✗	✓	✓	✗	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Raum 231	Kastenfenster	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	[°C]					✗	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✓	✓	✓	✗	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Raum 241	Kastenfenster	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	[°C]					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✗	✓	✓	✗	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	
Raum 135	Kastenfenster	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	[°C]					✗	✗	✗	✗	✗	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	%					✗	✗	✗	✗	✗	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	%					✗	✗	✗	✗	✗	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	% rF					✗	✗	✗	✗	✗	✗	

Daten		2018												
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Außen	Globalstrahlung	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Außenlufttemperatur (= Zuluft Kastenfenster)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Rel. Feuchte	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Bürogebäude	Luftkollektor	Wärmemengenzähler nach Kollektor (WM > WP)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Luftkollektortemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		GLT-Meldung Kollektor > Wärmepumpe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		GLT-Meldung Kollektor > Plattentauscher	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		GLT-Meldung Kollektor > Gebläse im Bunker	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Wärmepumpe	Stromzähler (Strombedarf WP)	✓ ²	✓ ³	✓ ³	✓ ⁴	✓ ⁴	✓ ⁴	✓ ⁴	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✗	✗
		Wärmemengenzähler nach Wärmepumpe (WM > Therm. Speicher)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Temperatur Eintritt in Wärmepumpe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Bunkergebläse	Temperatur Austritt Wärmepumpe > Speicher	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Betontemperatur Bunker Nord 10 cm Eindringtiefe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Betonkerntemperatur Bunker Nord 5 cm Eindringtiefe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Einblastemperatur Bunker Nord	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gasverbrauch		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✓ ⁵	✗	✗	
Meldung Schaltsignal Gaskessel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Garage	WM2 Garage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Raum 105	Kastenfenster	Fensterzwischenraum Temperatur (= Zuluft Raum)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 208	Kastenfenster	Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
	Raum	Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 223	Kastenfenster	Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 231	Kastenfenster	Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 241	Kastenfenster	Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		CO2-Fühler	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Raum 135	Kastenfenster	Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Raumtemperatur	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Strombedarf dezentrales Lüftungsgerät	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
		Temperatur Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Raum	Rel. Feuchte Fensterzwischenraum (= Zuluft Raum)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Außenluft-Ventilator (AUL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Auslastung Fortluft-Ventilator (FOL-Ventilator_AA)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
		Rel. Feuchte	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	



Abbildung 33 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 105 Süd

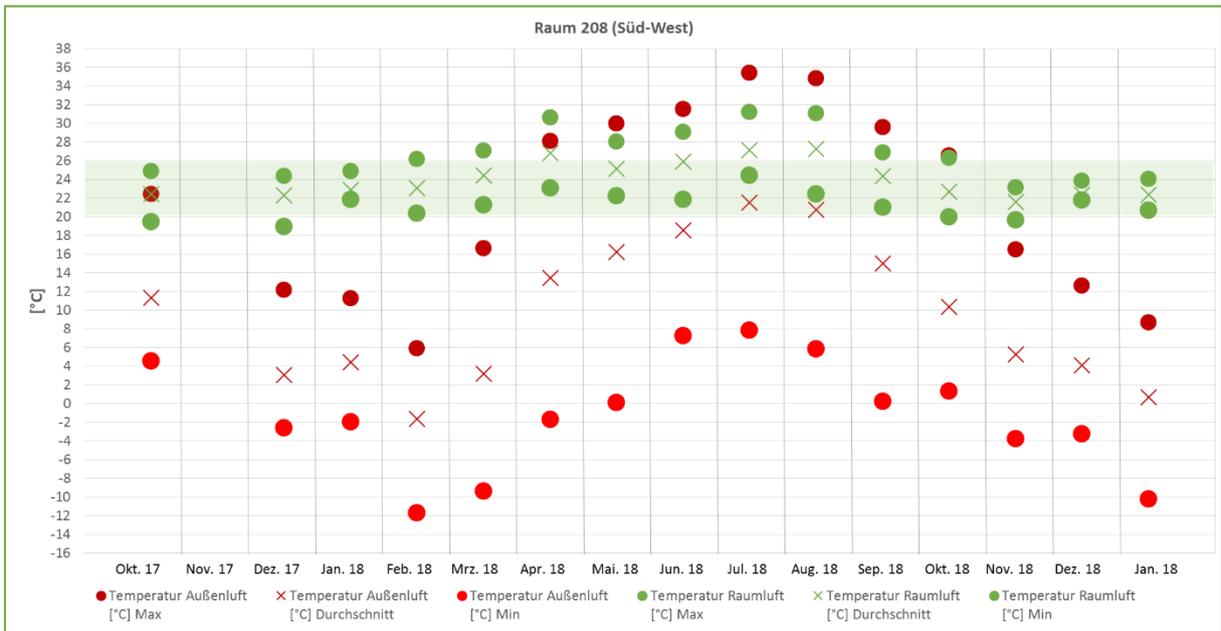


Abbildung 34 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum208 Süd-West

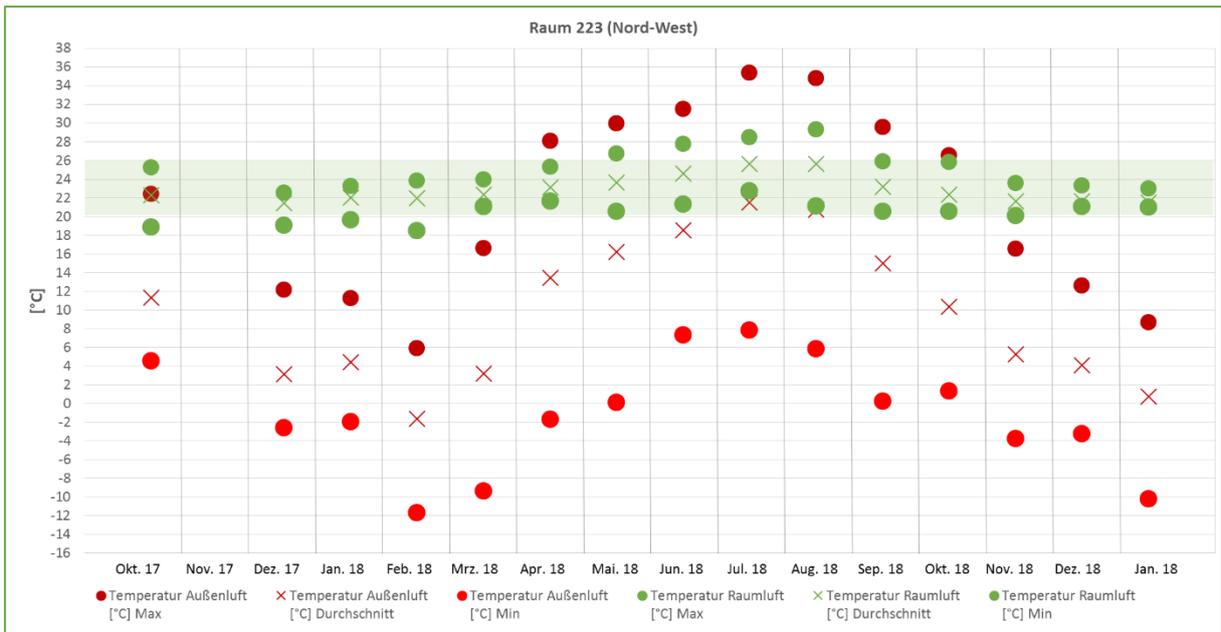


Abbildung 35 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 223 Nord-West

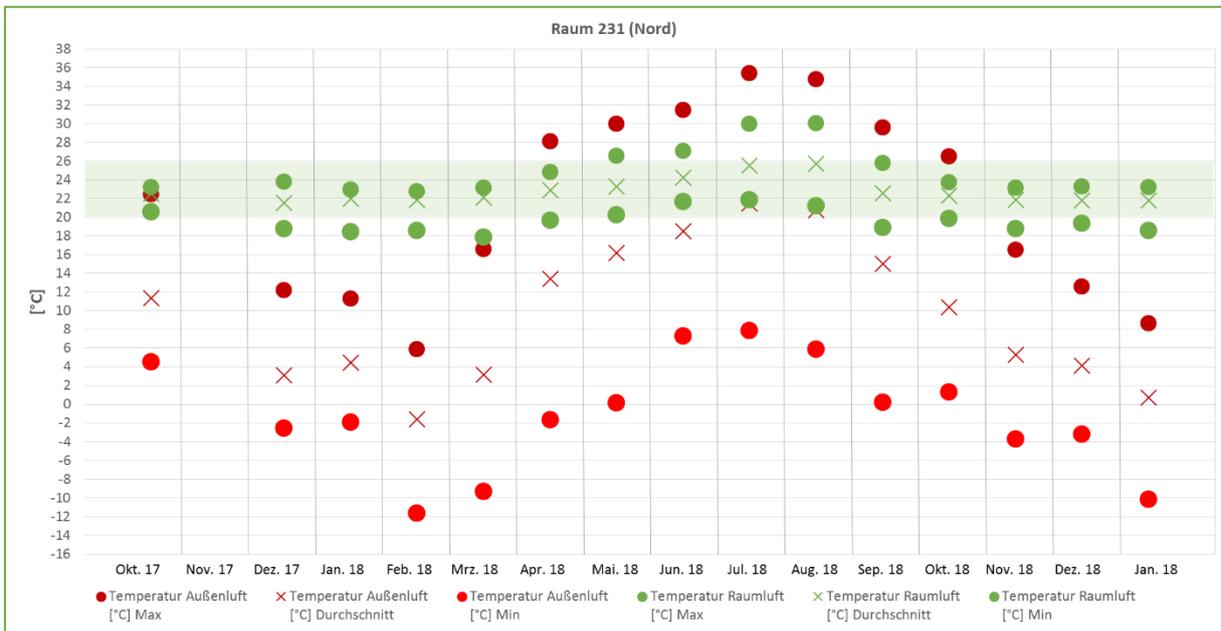


Abbildung 36 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 231 Nord

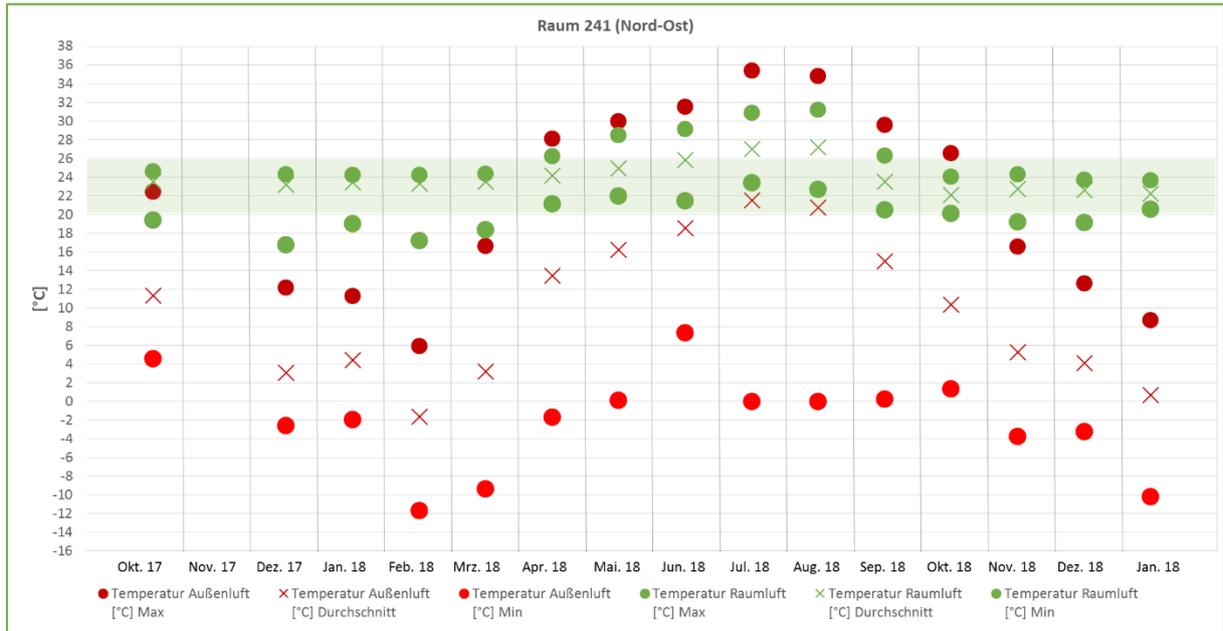


Abbildung 37 Raumtemperaturen im Kontext der Außenlufttemperaturen-Raum 241 Nord-Ost

Tabelle 13 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 105

Raum 105	Temperatur über 26°C	Temperatur über 27°C	Temperatur über 28°C	Temperatur über 29°C	Temperatur über 30°C	Temperatur unter 21°C	Temperatur unter 20°C	Temperatur unter 19°C	Temperatur unter 18°C	Temperatur unter 17°C
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Okt. 17	0	0	0	0	0	41	1	0	0	0
Dez. 17	0	0	0	0	0	142	3	1	0	0
Jan. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb. 18	0	0	0	0	0	123	3	2	1	1
Mrz. 18	0	0	0	0	0	8	3	2	1	0.3
Apr. 18	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Mai. 18	42	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Jun. 18	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul. 18	148	69	1	0	0	0	0	0	0	0
Aug. 18	234	185	0.3	0	0	1	0.3	0.2	0	0
Sep. 18	0	0	0	0	0	5	3	1	0.3	0.2
Okt. 18	0	0	0	0	0	9	3	1	0.3	0
Nov. 18	0	0	0	0	0	5	2	1	0.3	0
Dez. 18	0	0	0	0	0	3	1	0	0.2	0
Jan. 19	0	0	0	0	0	7	3	2	1	0.2

Tabelle 14 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 208

Raum 208	Temperatur über 26°C	Temperatur über 27°C	Temperatur über 28°C	Temperatur über 29°C	Temperatur über 30°C	Temperatur unter 21°C	Temperatur unter 20°C	Temperatur unter 19°C	Temperatur unter 18°C	Temperatur unter 17°C
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Okt. 17	0	0	0	0	0	1	0.2	0	0	0
Dez. 17	0	0	0	0	0	100	42	0.2	0	0
Jan. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb. 18	2	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0
Mrz. 18	19	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr. 18	497	336	144	43	16	0	0	0	0	0
Mai. 18	160	32	1	0	0	0	0	0	0	0
Jun. 18	301	184	74	3	0	0	0	0	0	0
Jul. 18	569	337	162	130	26	0	0	0	0	0
Aug. 18	503	352	238	191	116	0	0	0	0	0
Sep. 18	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Okt. 18	3	0	0	0	0	60	0.3	0	0	0
Nov. 18	0	0	0	0	0	154	10	0	0	0
Dez. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jan. 19	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0

Tabelle 15 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 223

Raum 223	Temperatur über 26°C	Temperatur über 27°C	Temperatur über 28°C	Temperatur über 29°C	Temperatur über 30°C	Temperatur unter 21°C	Temperatur unter 20°C	Temperatur unter 19°C	Temperatur unter 18°C	Temperatur unter 17°C
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Okt. 17	0	0	0	0	0	35	24	1	0	0
Dez. 17	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0
Jan. 18	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0
Feb. 18	0	0	0	0	0	1	0.3	0.2	0	0
Mrz. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mai. 18	15	0	0	0	0	5	0	0	0	0
Jun. 18	147	24	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul. 18	275	95	6	0	0	0	0	0	0	0
Aug. 18	309	175	101	21	0	0	0	0	0	0
Sep. 18	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
Okt. 18	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0
Nov. 18	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
Dez. 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jan. 19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Tabelle 16 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 231

Raum 231	Temperatur über 26°C	Temperatur über 27°C	Temperatur über 28°C	Temperatur über 29°C	Temperatur über 30°C	Temperatur unter 21°C	Temperatur unter 20°C	Temperatur unter 19°C	Temperatur unter 18°C	Temperatur unter 17°C
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Okt. 17	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
Dez. 17	0	0	0	0	0	122	72	1	0	0
Jan. 18	0	0	0	0	0	2	1	0.2	0	0
Feb. 18	0	0	0	0	0	2	0.7	0.2	0	0
Mrz. 18	0	0	0	0	0	1	1	0.2	0.2	0
Apr. 18	0	0	0	0	0	1	0.3	0	0	0
Mai. 18	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jun. 18	73	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul. 18	273	126	82	18	0.2	0	0	0	0	0
Aug. 18	296	198	131	92	0.3	0	0	0	0	0
Sep. 18	0	0	0	0	0	69	2	0.2	0	0
Okt. 18	0	0	0	0	0	32	0.2	0	0	0
Nov. 18	0	0	0	0	0	3	0.3	0.2	0	0
Dez. 18	0	0	0	0	0	8	1	0	0	0
Jan. 19	0	0	0	0	0	4	1	0.2	0	0

Tabelle 17 Zusammenfassung behaglichkeitsrelevanter Messdaten - Raum 241

Raum 241	Temperatur über 26°C	Temperatur über 27°C	Temperatur über 28°C	Temperatur über 29°C	Temperatur über 30°C	Temperatur unter 21°C	Temperatur unter 20°C	Temperatur unter 19°C	Temperatur unter 18°C	Temperatur unter 17°C
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Okt. 17	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0
Dez. 17	0	0	0	0	0	5	2	1	1	0.3
Jan. 18	0	0	0	0	0	5	1	0.2	0	0
Feb. 18	0	0	0	0	0	4	2	0.7	0.2	0
Mrz. 18	0	0	0	0	0	2	1	0.2	0	0
Apr. 18	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mai. 18	160	51	13	0	0	0	0	0	0	0
Jun. 18	347	205	54	6	0	0	0	0	0	0
Jul. 18	551	361	165	75	20	0	0	0	0	0
Aug. 18	484	316	235	207	138	0	0	0	0	0
Sep. 18	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Okt. 18	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0
Nov. 18	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0
Dez. 18	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Jan. 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 18 Stromverbrauch und Stromkosten dezentrales Lüftungsgerät pro Monat, 10.2017 – 01.2019

		Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät [kWh/Monat]	Stromkosten dezentrales Lüftungsgerät [€/Monat]
Okt. 17	Raum 105	↑ 26.64	5.55
	Raum 208	↓ 11.43	2.38
	Raum 223	↔ 15.06	3.14
	Raum 231	↓ 10.81	2.25
	Raum 241	↓ 10.02	2.09
Dez. 17	Raum 105	↓ 12.14	2.53
	Raum 208	↓ 12.55	2.61
	Raum 223	↓ 11.94	2.49
	Raum 231	↓ 11.51	2.40
	Raum 241	↓ 12.08	2.52
Jan. 18	Raum 105	↓ 11.59	2.41
	Raum 208	↓ 12.15	2.53
	Raum 223	↓ 12.26	2.55
	Raum 231	↓ 12.22	2.54
	Raum 241	↓ 10.90	2.27
Feb. 18	Raum 105	↓ 10.12	2.11
	Raum 208	↓ 11.01	2.29
	Raum 223	↓ 11.08	2.31
	Raum 231	↓ 10.92	2.27
	Raum 241	↓ 12.14	2.53
Mrz. 18	Raum 105	↓ 13.48	2.81
	Raum 208	↓ 11.93	2.48
	Raum 223	↓ 12.02	2.50
	Raum 231	↓ 12.14	2.53
	Raum 241	↔ 37.63	7.84
Apr. 18	Raum 105	↔ 37.49	7.81
	Raum 208	↔ 29.41	6.13
	Raum 223	↔ 18.55	3.86
	Raum 231	↔ 20.12	4.19
	Raum 241	↑ 48.41	10.08
Mai. 18	Raum 105	↑ 46.37	9.66
	Raum 208	↑ 47.26	9.84
	Raum 223	↔ 38.56	8.03
	Raum 231	↑ 45.16	9.41
	Raum 241	↑ 47.78	9.95
Jun. 18	Raum 105	↑ 44.21	9.21
	Raum 208	↑ 47.56	9.91
	Raum 223	↑ 43.68	9.10
	Raum 231	↑ 43.92	9.15
	Raum 241	↔ 43.07	8.97
Jul. 18	Raum 105	↔ 39.63	8.25
	Raum 208	↑ 43.93	9.15
	Raum 223	↑ 43.22	9.00
	Raum 231	↔ 39.50	8.23
	Raum 241	↑ 42.05	8.76
Aug. 18	Raum 105	↑ 38.59	8.04
	Raum 208	↑ 42.68	8.89
	Raum 223	↔ 40.24	8.38
	Raum 231	↔ 37.93	7.90
	Raum 241	↔ 38.93	8.11
Sep. 18	Raum 105	↔ 36.42	7.59
	Raum 208	↔ 39.73	8.28
	Raum 223	↔ 34.03	7.09
	Raum 231	↔ 36.31	7.56
	Raum 241	↔ 22.30	4.64
Okt. 18	Raum 105	↔ 26.54	5.53
	Raum 208	↔ 22.86	4.76
	Raum 223	↓ 9.89	2.06
	Raum 231	↔ 20.70	4.31
	Raum 241	↔ 9.67	2.01
Nov. 18	Raum 105	↔ 9.67	2.01
	Raum 208	↔ 9.64	2.01
	Raum 223	↓ 8.63	1.80
	Raum 231	↔ 10.16	2.12
	Raum 241	↑ 10.26	2.14
Dez. 18	Raum 105	↑ 10.48	2.18
	Raum 208	↔ 10.06	2.10
	Raum 223	↔ 9.95	2.07
	Raum 231	↔ 10.21	2.13
	Raum 241	↑ 10.28	2.14
Jan. 19	Raum 105	↑ 10.62	2.21
	Raum 208	↔ 10.00	2.08
	Raum 223	↔ 10.09	2.10
	Raum 231	↑ 10.47	2.18
	Raum 241	↑ 10.47	2.18

Tabelle 19 durchschnittlicher Stromverbrauch und Stromkosten pro dezentrales Lüftungsgerät (Auswertung der in der Messung vertretenen Verbräuche)

		Stromverbrauch dezentrales Lüftungsgerät [kWh/Monat]	Stromkosten dezentrales Lüftungsgerät [€/Monat]
Okt. 17-Jan. 19	Max	48.41	10.08
	Mittel	24.19	5.04
	Min	8.63	1.80
Kühl-period	Max	48.41	10.08
	Mittel	41.97	8.74
	Min	34.03	7.09
Heiz-period	Max	37.63	7.84
	Mittel	14.16	2.95
	Min	8.63	1.80

Tabelle 20 Betriebsstunden der unterschiedlichen Kreisläufe Prozentual

Datenquelle	berechnet	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring	Monitoring
	Betriebsstunden Wärmepumpe Verdichter 1&2	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Bunker-Wärmepumpe	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Bunker	Betriebsart Entladebetrieb Bunker-Kollektor	Betriebsart Notkühlung Kollektor-Bunker	Betriebsart Ladebetrieb Kollektor-Pufferspeicher	Betriebsstunden 2. Wärmeerzeuger (Kessel)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Oktober 2017	29.01	27.9	61.3	0.0	0.0	0.0	0.0	21.9
November 2017								
Dezember 2017	36.9	0.0	95.6	0.0	0.0	0.0	0.0	63.3
Januar 2018	40.1	12.2	87.8	0.0	0.0	0.0	0.0	55.9
Februar 2018	18.2	20.9	66.2	0.0	0.0	0.0	0.0	83.5
März 2018	30.1	59.9	31.2	0.0	0.0	0.0	0.0	49.3
April 2018	25.0	92.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	15.4
Mai 2018	10.6	78.1	0.0	0.0	0.0	0.4	15.1	9.1
Juni 2018	3.4	80.0	0.0	1.2	0.0	2.7	12.0	11.5
Juli 2018	0.6	69.3	0.0	10.9	0.0	8.8	16.6	3.0
August 2018	4.1	78.1	1.2	13.8	0.0	2.1	6.4	55.6
September 2018	0.0	92.5	3.3	0.0	0.0	0.0	0.7	16.3
Oktober 2018	0.0	59.5	35.9	0.0	0.0	0.0	0.0	45.2
November 2018	9.9	0.0	97.8	0.0	0.0	0.0	0.0	9.2
Dezember 2018	0.0	0.0	97.8	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0
Januar 2019	0.0	0.0	92.3	0.0	0.0	0.0	0.0	27.0
Summe	17.4	55.9	56.0	2.2	0.0	1.2	4.8	39.6

Tabelle 21 Stundenzahl der Überhitzung von Kollektor

		Minimalwert	Mittelwert	Maximalwert	Temperatur über 80°C	Temperatur über 90°C	Temperatur über 95°C	Temperatur über 100°C	Temperatur über 120°C
		[°C]	[°C]	[°C]	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]
Oktober 17	OST	0.7	12.6	49.8	0	0	0	0	0
	SUED	4.6	17.2	57.3	0	0	0	0	0
	WEST	5.4	17.6	59.8	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	3.6	15.8	54.2	0	0	0	0	0
Dezember 17	OST	4.4	7.5	17.0	0	0	0	0	0
	SUED	-0.9	5.3	22.2	0	0	0	0	0
	WEST	-0.7	5.2	20.0	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	0.9	6.0	18.7	0	0	0	0	0
Januar 18	OST	2.9	8.3	20.5	0	0	0	0	0
	SUED	-3.4	7.1	24.9	0	0	0	0	0
	WEST	-2.6	7.0	22.6	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	-1.0	7.4	21.3	0	0	0	0	0
Februar 18	OST	-2.8	7.9	35.0	0	0	0	0	0
	SUED	-11.2	3.7	38.0	0	0	0	0	0
	WEST	-10.5	4.7	42.8	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	-8.1	5.4	37.7	0	0	0	0	0
März 18	OST	-0.8	13.6	64.1	0	0	0	0	0
	SUED	-8.2	11.9	68.0	0	0	0	0	0
	WEST	-8.2	11.8	66.3	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	-5.7	12.4	65.0	0	0	0	0	0
April 18	OST	-93.5	24.3	73.6	0	0	0	0	0
	SUED	-1.0	32.3	89.9	33	0	0	0	0
	WEST	-0.8	30.4	82.7	7	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	1.3	29.0	79.3	0	0	0	0	0
Mai 18	OST	-93.5	9.8	74.3	0	0	0	0	0
	SUED	3.8	41.2	101.2	80	27	7	1	0
	WEST	3.8	38.8	95.3	51	4	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	5.5	29.9	76.0	0	0	0	0	0
Juni 18	OST	-93.5	14.9	73.7	0	0	0	0	0
	SUED	9.9	43.4	103.7	63	28	14	3	0
	WEST	9.7	41.4	98.9	48	16	7	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	-15.9	33.2	77.3	0	0	0	0	0
Juli 18	OST	0.0	46.2	83.4	18	0	0	0	0
	SUED	0.0	48.7	98.3	112	32	9	0	0
	WEST	0.0	46.5	102.8	116	64	31	4	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	0.0	47.3	98.0	91	17	3	0	0
August 18	OST	0.0	42.4	82.1	3	0	0	0	0
	SUED	0.0	36.6	89.1	1	0	0	0	0
	WEST	0.0	42.1	98.4	64	21	6	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	0.0	40.4	86.4	10	0	0	0	0
September 18	OST	7.7	32.5	61.8	0	0	0	0	0
	SUED	9.3	26.3	44.4	0	0	0	0	0
	WEST	3.1	31.6	82.2	2	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	6.9	30.1	60.1	0	0	0	0	0
Oktober 18	OST	0.0	22.2	52.1	0	0	0	0	0
	SUED	0.0	18.9	35.5	0	0	0	0	0
	WEST	0.0	20.9	66.1	0	0	0	0	0
	MITTELWERT 3x Kollektor	0.0	20.7	48.4	0	0	0	0	0

Tabelle 22 Kollektortemperatur, Einblasen Temperatur und Betonkerntemperatur

		Okt. 17	Dez. 17	Jan. 18	Feb. 18	Mrz. 18	Apr. 18	Mai. 18	Jun. 18	Jul. 18	Aug. 18	Sep. 18	Okt. 18	Nov. 18	Dez. 18	Jan. 19
Temperatur Außenluft	Mittelwert	11.3	3.1	4.4	-1.6	3.2	13.4	16.2	18.5	21.5	20.7	15.0	10.4	5.3	4.1	0.7
	Max	22.4	12.2	11.3	5.9	16.6	28.1	30.0	31.5	35.4	34.8	29.6	26.5	16.5	12.6	8.7
	Min	4.5	-2.6	-2.0	-11.7	-9.4	-1.7	0.1	7.3	0.0	0.0	0.2	0.0	-3.8	-3.3	-10.2
Mittelwert 3x Kollektor	Mittelwert	15.8	6.0	7.4	5.4	12.4	29.0	29.9	33.2	47.3	40.4	30.1	20.7	12.0	9.0	5.5
	Max	54.2	18.7	21.3	37.7	65.0	79.3	76.0	77.3	98.0	86.4	60.1	48.4	29.9	19.3	18.1
	Min	3.6	0.9	-1.0	-8.1	-5.7	1.3	5.5	-15.9	0.0	0.0	6.9	0.0	0.8	-0.2	-7.1
Einblastemperatur Bunker Nord	Mittelwert	14.2	6.2	6.0	10.5	13.5	16.4	19.8	27.6	35.8	34.3	26.4	23.0	22.8	21.6	20.5
	Max	19.3	14.7	11.5	14.7	18.6	17.6	59.5	69.4	69.9	70.1	35.8	30.6	23.3	22.2	21.2
	Min	3.7	1.5	1.3	1.3	2.4	15.4	12.1	13.1	0.0	0.0	17.7	0.0	14.0	20.9	19.4
Betonkerntemperatur Bunker Nord 10cm	Mittelwert	15.1	7.9	7.2	10.1	12.6	12.6	17.3	22.8	29.3	30.3	25.0	22.2	21.4	20.3	19.2
	Max	17.8	11.9	10.3	12.6	14.0	14.0	21.0	29.6	34.3	35.0	27.2	23.8	21.9	20.8	19.9
	Min	12.7	6.6	5.9	7.0	10.0	10.0	15.9	20.2	0.0	0.0	23.2	0.0	20.8	19.8	18.6

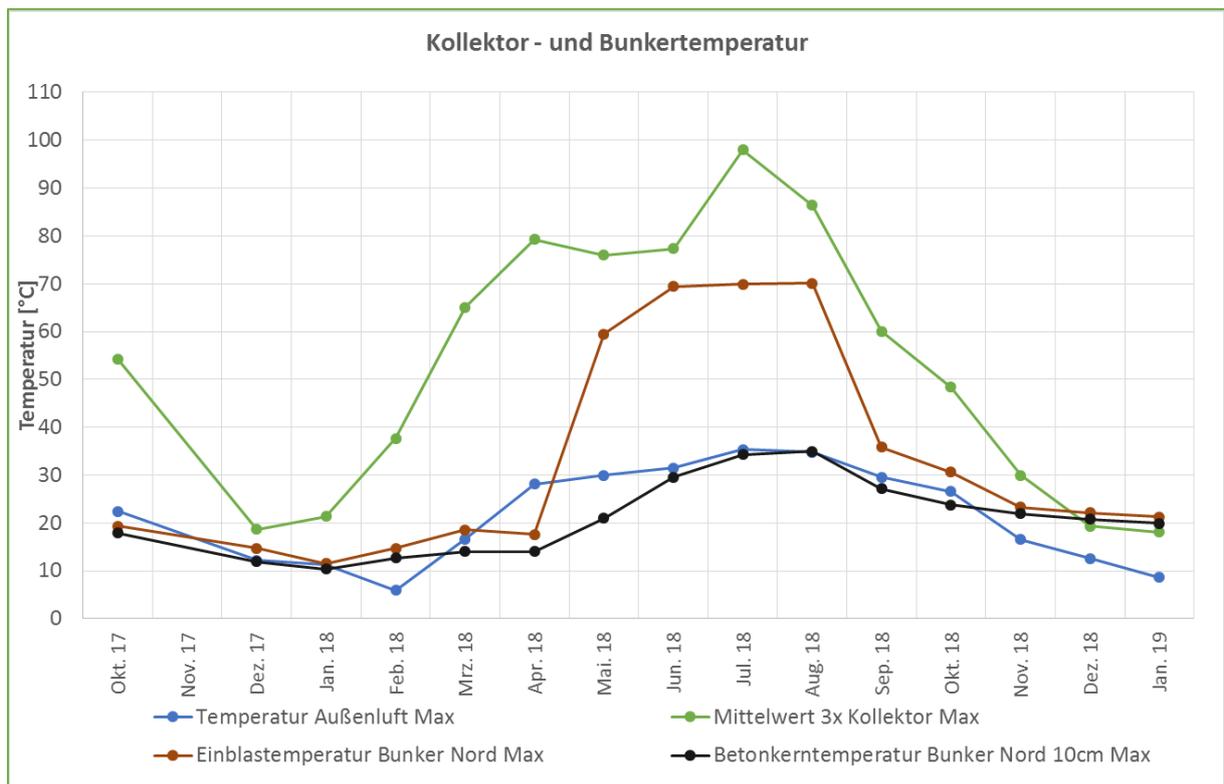


Abbildung 38 Stromverbrauch und Wärmeerzeugung der Wärmepumpe

Tabelle 23 Stromverbrauch und erzeugte Wärme durch Wärmepumpe

Datenquelle	Monitoring	Ablesewert	Berechnet	berechnet
	Mittelwert Außentemperatur [°C]	Stromverbrauch Wärmepumpe [kWh]	wärmemengenzähler Wärmepumpe [kWh]	Betriebsstunden Wärmepumpe Verdichter 1&2 [h]
Oktober 2017	7.6	88.30	525.0	215.8
November 2017	5.7	77.27		
Dezember 2017	3.1	82.92	532.9	274.3
Januar 2018	4.4	106.24	588.0	298.5
Februar 2018	-1.6	43.18	247.2	122.3
März 2018	3.2	78.69	544.0	224.2
April 2018	13.4	77.71	449.5	180.3
Mai 2018	16.2	34.23	209.7	79.2
Juni 2018	18.5	10.13	79.6	24.7
Juli 2018	21.5	1.81	16.7	4.2
August 2018	20.7	0.29	3.7	30.5
September 2018	15.0	0.0	1.4	672.3
Oktober 2018	10.4	0.00	2.8	704.7
November 2018	5.3	0.33	2.8	71.5
Dezember 2018	4.1	0.00	0.0	0
Januar 2019	0.7	0.00	0.5	0
Summe		601.10	3203.7	2902.5

Tabelle 24 Steuerung Solaranlage und Wärmepumpe

*dT 5K	Klartext	Betriebsarten					
		Kollektor direkt auf Puffer	Wärmepumpe über Kollektor	Wärmepumpe über Bunker	Ladebetrieb Bunker	Entladebetrieb Bunker	Notkühlung Kollektoren in die Bunker
Fühler							
T1 (+HZG03-5B3)	Kollektor VL-Temperatur	T1>T3 8K EIN T1>T3 2K AUS	<50°C	>15°C <50°C	> 50°C	<50°C	>75°C
T2 (+HZG03-6B2) (+HZG03-6B3) (+HZG03-6B4)	Mittelwert 3x Kollektorfühler unter Polyplatten	> -3°C	> -3°C	> -3°C	T4 < T2 *	T4 > T2 *	> -3°C
T3 (+HZG03-5B2)	Puffertemperatur (letzter Puffer)	< 70°C	< 70°C	< 70°C	> 70°C	> 70°C	> 70°C
T4 (+HZG03-5B4)	Bunkertemperatur (Raumtemperatur nur in Bunker Süd)	...	T4 < T2 *	T4 > T2 *	T4 < T2 *	T4 > T2 *	...
Aktoren							
P4.1/4.2 (+HZG03-2M1+2)	Kollektorpumpe	EIN	EIN	AUS	EIN	EIN	EIN
P3 (+HZG03-2M1+2)	Pumpe Plattentaucher	EIN	AUS	AUS	AUS	AUS	AUS
V1 (+HZG03-2M6)	Umschaltventil	AB-A	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)	AB-B (Bypass)
WP (+HZG03-3A1)	Wärmepumpe Freigabe	AUS	EIN	EIN	AUS	AUS	AUS
M1 (Nord)+M2(Süd) (+HZG03-2M4+5)	2xLüfter Bunker	AUS	AUS	EIN	EIN	EIN	EIN
V2 (+HZG03-2M6)	Absperrventil Bunker	ZU	ZU	AUF	AUF	AUF	AUF

fatuk Fachbereich Architektur
Technische Universität
Kaiserslautern