

Modellvorhaben „KliNaWo“

Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau

Monitoringbericht Juli 2019

Beschreibung der Realisierungsvariante / abgerechnete Kosten / Ergebnisse
Monitoring

Martin Ploss, Tobias Hatt, Christina Schneider, Thomas Roskopf, Michael Braun
Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn



Das Modellvorhaben KliNaWo wurde als Projekt des Comet-Zentrums ALPS in Innsbruck gefördert. COMET Projekte werden durch die Bundesministerien BMVIT und BMWFW sowie durch das Land Vorarlberg gefördert und durch die FFG abgewickelt.



Zusammenfassung	5
1 Beschreibung der ausgeführten Variante	11
1.1 Allgemeine Daten zum Gebäude	11
1.2 Gebäudehülle	11
1.2.1 Luftdichtheitstests	14
1.3 Wärmeversorgungssystem	15
1.4 Lüftungsanlage	23
1.5 Beleuchtung Allgemeinbereiche und Tiefgarage	25
1.6 Berechnungsergebnisse Energie	25
1.6.1 Energieausweisberechnungen gem. OIB RL 6 (2011)	26
1.6.2 Energiebedarfsberechnungen PHPP	27
1.6.3 Dynamische Gebäude und Anlagensimulation	28
2 Beschreibung des Monitoringkonzepts	31
2.1 Ziele	31
2.2 Beschreibung	32
2.3 Messunsicherheiten	35
3 Ergebnisse Kosten	37
3.1 Auswirkungen auf Finanzierung und die Miete	38
3.2 Detailanalyse Haustechnikkosten	38
3.3 Einfluss der Grundstückskosten	39
4 Ergebnisse Monitoring	42
4.1 Klimadaten	42
4.2 Behaglichkeitsparameter Temperatur/Feuchte/CO ₂	47
4.2.1 Raumlufftemperaturen Wohnungen und Gemeinschaftsraum	47
4.2.2 Raumlufftemperaturen Stiegenhaus, Tiefgarage und Keller	57
4.2.3 Raumlufffeuchte Wohnungen und Gemeinschaftsraum	61
4.2.4 CO ₂ -Gehalt der Raumluff in Wohnungen und Gemeinschaftsraum	64
4.2.5 Behaglichkeitsbewertung	64
4.3 Ergebnisse Monitoring – Energieverbräuche/Strombezug	68

4.4	Ergebnisse Monitoring – Detailauswertungen	73
4.4.1	Jahressummenwerte Stromverbrauch und Wärmemengen	73
4.4.2	Haushaltsstromverbrauch und -bedarf	75
4.4.3	Warmwasserverbrauch und Bedarf	77
4.4.4	Heizwärmeverbrauch und Bedarf	79
4.4.5	Speicher.....	80
4.4.6	Solarthermie	84
4.4.7	Hochtemperatur-Wärmepumpe	86
4.4.8	Niedertemperatur-Wärmepumpe (Heizung)	89
4.4.9	Verteil- und Speicherverluste.....	91
5	Bewohnerbefragung	92
	Beteiligte und Projektfinanzierung.....	94
	Abbildungsverzeichnis.....	95
	Tabellenverzeichnis.....	99
	Literatur.....	101

Zusammenfassung

Ausgangslage, Zielsetzung, Vorgehensweise und Zwischenergebnisse des Projekts bis zur Auswahl der Realisierungsvariante sind im ersten Zwischenbericht von 2017 detailliert beschrieben [1]. Die in diesem zweiten Zwischenbericht dargestellten Ergebnisse zu den abgerechneten Kosten, den realen Energieverbräuchen und zur thermischen Behaglichkeit der 2016/17 realisierten Variante mit den niedrigsten Lebenszykluskosten können wie folgt zusammengefasst werden.

Abgerechnete Kosten

Die abgerechneten Netto-Errichtungskosten (ÖNORM 1801-1, KG 1-9) des Projekts liegen bei 2.400 EUR/m²_{WNF} [2]. Dieser Wert liegt aufgrund der sehr guten Planung und Projektsteuerung um 130 EUR/m²_{WNF} **unter** dem im ersten Zwischenbericht genannten Wert auf Basis der Kosten zum Stand Vergabe und um 238 EUR/m²_{WNF} **unter** der projektspezifisch ermittelten Kostengrenze der Wohnbauförderung Vorarlberg. Zur Einordnung der abgerechneten Netto-Errichtungskosten zeigt Abbildung 1 einen Vergleich mit den entsprechenden Kosten aller 69 zeitgleich ausgeschriebenen und errichteten gemeinnützigen Wohnbauten in Vorarlberg.

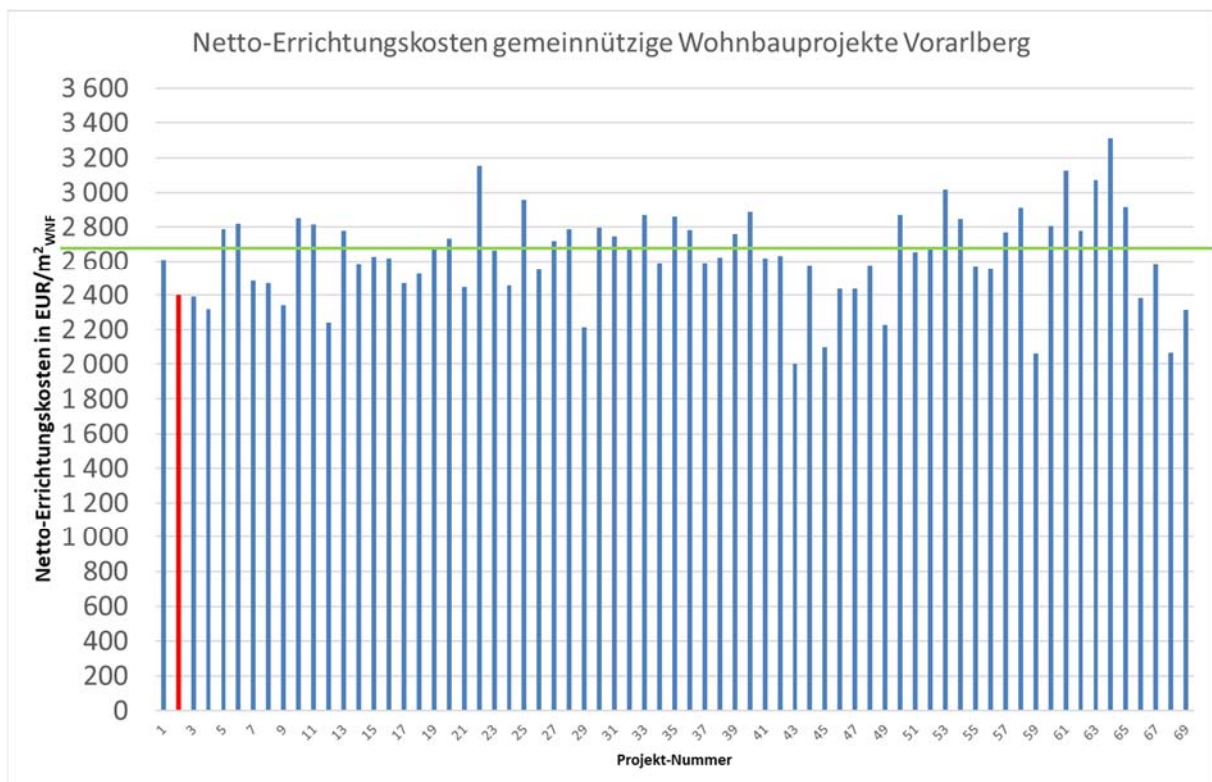


Abbildung 1 Netto-Errichtungskosten des Projekts KliNaWo im Vergleich zu denen aller zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen in Vorarlberg [3].

Die abgerechneten Netto-Errichtungskosten der 69 zeitgleich mit dem KliNaWo-Projekt errichteten gemeinnützigen Wohnbauprojekte liegen zwischen 2.000 und ca. 3.300 EUR/m²_{WNF}. Bei den günstigsten Projekten mit Kosten von 2.000 bis 2.200 EUR/m²_{WNF} handelt es sich um

Projekte des Programms „Wohnen 500“, die mit einem reduzierten Ausstattungsstandard errichtet wurden.

Der Mittelwert der abgerechneten Errichtungskosten der 69 zeitgleich errichteten gemeinnützigen Projekte in Vorarlberg liegt bei 2.630 EUR/m²_{WNF}. Die Kosten des KliNaWo-Projekts liegen damit bei deutlich höherer energetischer Qualität um 230 EUR/m²_{WNF} unter dem Mittelwert. Der Vergleich mit dem Mittelwert der zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen ist aussagekräftig, da das KliNaWo-Projekt bewusst so ausgewählt wurde, dass es bezüglich Gesamtwohnfläche, Wohnungsanzahl, durchschnittlicher Wohnungsgröße und Ausstattungs-niveau repräsentativ für den gemeinnützigen Wohnbau in Vorarlberg ist.

Reale Energieverbräuche

Die im ersten Betriebsjahr 2018 gemessenen Energieverbräuche für die verschiedenen Anwendungen sind in Abbildung 2 den Ergebnissen der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung gegenübergestellt. Zur Interpretation sind folgende Randbedingungen von Bedeutung:

- Die mittlere Außentemperatur während der Heizperiode entsprach gut dem Mittel der vergangenen 20 Jahre
- Die mittlere Raumlufthtemperatur in der Heizperiode lag mit 23,1°C um 1,1°C über der Annahme in der Verbrauchsprognoseberechnung
- Der pro-Kopf-Warmwasserverbrauch lag knapp unter der Annahme in der Verbrauchsprognoseberechnung, die Bewohnerzahl leicht unter der Berechnungsannahme

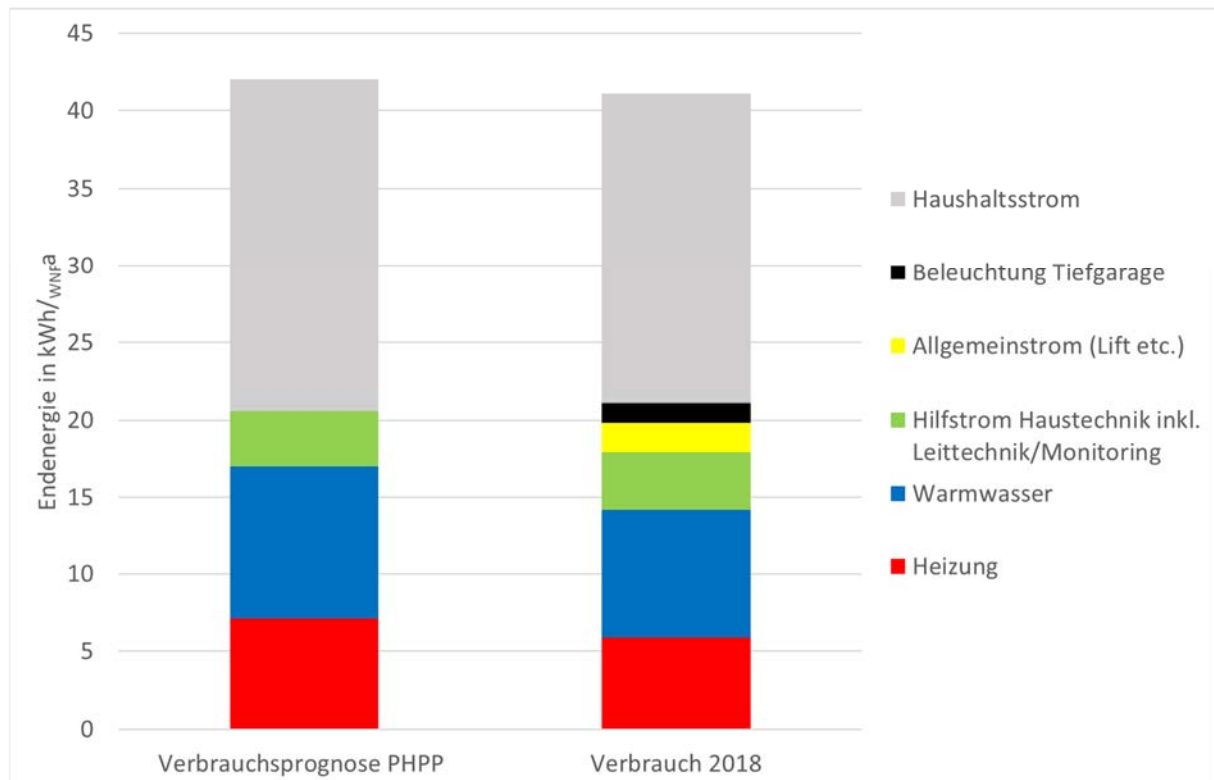


Abbildung 2: gemessener Endenergieverbrauch 2018 nach Anwendungen im Vergleich zur PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung.

Die gemessenen Verbräuche für Heizung und Warmwasser sowie für Haushaltsstrom liegen knapp **unter** den in der Verbrauchsprognoseberechnung ermittelten Werten, der Verbrauch für Hilfsstrom Haustechnik inkl. Leittechnik + Monitoring minimal über dem berechneten Wert. Für die gemessenen Endenergieverbräuche für Allgemeinstrom (Beleuchtung Treppenhaus und Erschließung, Lift...) sowie für die Tiefgarage liegen keine Vergleichswerte vor, da sie in den PHPP-Berechnungen mangels Erfahrungswerten nicht berücksichtigt wurden. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse im Detail.

Tabelle 1: Endenergieverbrauch nach Anwendungen absolut und spezifisch im Vergleich zu den spezifischen Werten der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung. Bezug auf WNF.

	gemessener Endenergieverbrauch		berechneter Endenergiebedarf
	kWh/a	kWh/(m ² _{WNFa})	kWh/(m ² _{WNFa})
	Messwerte 2018		Verbrauchsprognose PHPP
End _{Heiz}	7.537	5,9	7,1
End _{ww}	10.649	8,3	9,9
End_{Heiz+WW}	18.186	14,2	17,0
End _{Haustechnik inkl. Leittechnik/Monitoring}	4.713	3,7	3,6
Zwischensumme 1	22.899	17,9	20,6
End _{Allgemeinstrom}	2.464	1,9	0,0
End _{Tiefgarage}	1.701	1,3	0,0
Zwischensumme 2	27.064	21,1	20,6
End _{Haushaltsstrom}	25.562	20,0	21,4
Gesamtsumme	52.626	41,1	42,0

Mit einem gemessenen Endenergieverbrauch_{Heiz+WW} von 14,2 kWh/(m²_{WNFa}) ist das Projekt eines der effizientesten wärmepumpenbeheizten Mehrfamilienhäuser in Österreich. Auch die übrigen Verbräuche liegen in einem sehr effizienten Bereich.

Die Energiekosten liegen etwas niedriger als auf Basis der Verbrauchsprognoseberechnung angenommen: die Bruttokosten für Wärmepumpenstrom_{Heiz+WW} liegen für eine Wohnung mit 76m² Wohnfläche bei 10,50 EUR/Monat. Hinzu kommt die Strom-Grundgebühr von 5,80 EUR/Monat, so dass die Bruttokosten der 76m²-Wohnung für Wärmepumpenstrom_{Heiz+WW} bei 16,30 pro Monat liegen. Dies entspricht spezifischen Bruttokosten für Heizung und Warmwasser von 0,21 EUR/m²_{WNF} pro Monat.

Thermische Behaglichkeit

Wie das Monitoring des ersten Betriebsjahres zeigen, war die thermische Behaglichkeit sowohl im Winter, als auch im „Jahrhundertsommer“ 2018 gut. Abbildung 3 verdeutlicht dies am Beispiel der kältesten Winterwoche.

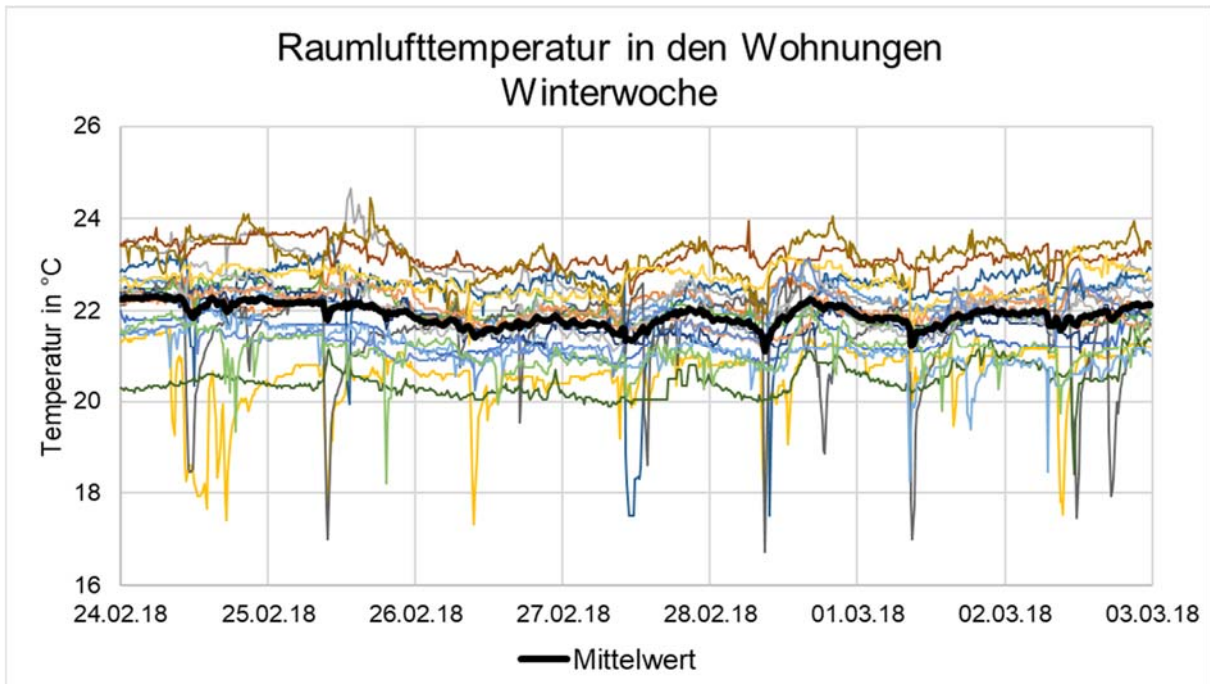


Abbildung 3: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnungen während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundennmesswerte).

Die Raumlufthtemperatur im Mittel aller Wohnungen liegt in der kältesten Winterwoche mit Außentemperaturen bis $-12,7^{\circ}\text{C}$ bei $21,9^{\circ}\text{C}$. Der Wochen-Mittelwert der einzelnen Wohnungen liegt im Bereich von $21,1^{\circ}\text{C}$ bis $22,3^{\circ}\text{C}$. Die Werte der einzelnen Wohnungen liegen in einem Temperaturband zwischen etwa 20 bis 24°C . Auch in der kältesten Winterwoche ist kein Abfall der Raumlufthtemperatur erkennbar.

Wie die Abbildung zeigt, wird in mindestens drei Wohnungen regelmäßig, z.T. zweimal täglich über die Fenster gelüftet. In Folge dieser zusätzlichen Fensterlüftung fallen die Raumlufthtemperaturen kurzfristig auf Werte zwischen 17 und $18,5^{\circ}\text{C}$, steigen jedoch sehr schnell wieder auf über 20°C .

Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Raumlufthtemperaturen aller Wohnungen in der wärmsten Sommerwoche, in der die Maxima der Außenlufttemperatur an 3 Tagen zwischen 34 und 35°C und an den anderen Tagen bei 30 bis 34°C lagen. Wie zu erkennen unterscheiden sich die mittleren Raumlufthtemperaturen der einzelnen Wohnungen deutlich. Die zeitgleich gemessenen Werte liegen in einem Temperaturband mit meist etwa $3 - 5\text{K}$ Spreizung. Wie die detaillierte Auswertung der Messwerte zeigt, ist die Raumlufthtemperatur im Sommer weniger von Orientierung und Lage der Wohnung als vom Nutzerverhalten abhängig (nächtliche Zusatzlüftung über die Fenster, Nutzung der außenliegenden Jalousien bei hohen Tagestemperaturen). Bei Bewertung nach EN 15251:2007 ergibt sich für alle Wohnungen im Winter wie im Sommer eine sehr gute bis gute Bewertung des thermischen Komforts.

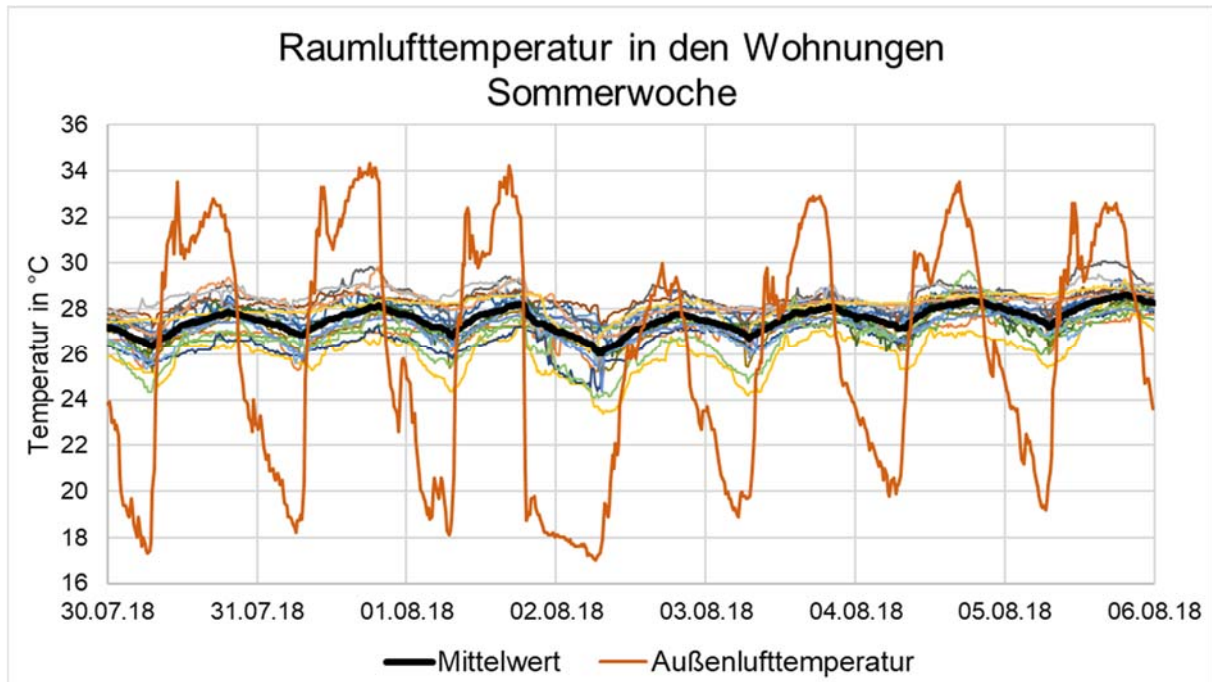


Abbildung 4: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Wohnungen während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundemesswerte).

Resumé

Die Auswertung der abgerechneten Kosten, der realen Energieverbräuche und der thermischen Behaglichkeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die abgerechneten Netto-Errichtungskosten liegen um $130 \text{ EUR/m}^2_{\text{WNF}}$ **unter** dem Wert bei Planstand Vergabe, um $238 \text{ EUR/m}^2_{\text{WNF}}$ **unter** der Kostengrenze der Wohnbauförderung Vorarlberg und um $230 \text{ EUR/m}^2_{\text{WNF}}$ **unter** dem Vergleichswert im Mittel aller zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnbauten Vorarlbergs
- Der reale Endenergieverbrauch_{Heizung+WW} liegt mit $14,2 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNFA}}$ knapp unter dem in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung ermittelten Wert. Auch die übrigen Verbräuche entsprechen sehr gut den berechneten Werten.
- Das Gebäude ist eines der effizientesten wärmepumpenbeheizten Mehrfamilienhäuser Österreichs.
- Die realen Brutto-Energiekosten für Heizung und Warmwasser liegen mit $10,50 \text{ EUR/Monat}$ (Verbrauch) zzgl. $5,80 \text{ EUR/Monat}$ (Grundgebühr) = $16,30 \text{ EUR/Monat}$ für eine 76m^2 -Wohnung etwas niedriger als vorausberechnet. Die flächenspezifischen Brutto-Energiekosten für Heizung und Warmwasser liegen mit $0,21 \text{ EUR/m}^2_{\text{WNF}}$ pro Monat sehr niedrig.
- Die Miete inkl. BK wurde aufgrund der geringen Errichtungskosten und der niedrigen Energiekosten des ersten Jahres in zwei Stufen reduziert.
- Die thermische Behaglichkeit ist im Winter sehr hoch und war auch im „Jahrhundert-sommer“ 2018 hoch.

- Da sowohl die abgerechneten Kosten, als auch die realen Energieverbräuche und –kosten sehr gut den vorausgerechneten und in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen verwendeten Werten entsprechen, können die Wirtschaftlichkeitsberechnungen als valide eingestuft werden.
- Das KliNaWo-Projekt zeigt in der Praxis, dass das Kostenoptimum bei sehr hohen energetischen Qualitäten liegt – bei Werten, die weit niedriger liegen als die Mindestanforderungen der BTV Vorarlberg und die Definition des Österreichischen Niedrigstenergiegebäudes gemäß Nationalem Plan von 2014 [4].

Tabelle 2: Vergleich der energetischen Qualität des KliNaWo-Gebäudes mit den Anforderungen der Bautechnikverordnung Vorarlberg 2017

Rechenverfahren	Indikator Einheit	Mindestanforderung BTV 2017	KliNaWo gem. Fertigstellungs-EAW OIB 2015
OIB RL 6 (2015)	PEB in kWh/m ² _{BGFA}	165	45,1
OIB RL 6 (2015)	CO ₂ in kg/m ² _{BGFA}	24	6,58

- Das Projekt unterstreicht die Bedeutung eines regelmäßig ausgewerteten Monitorings, mit dessen Hilfe die selbst in sehr guten Projekten auftretenden Fehler erkannt und behoben werden können.
- Die im Projekt entwickelte Methode zur Auswahl der im Lebenszyklus kostenoptimalen Variante hat sich bewährt und kann in jedem Bauprojekt angewandt werden.

Übertragbarkeit auf Nachfolgeprojekte

Im Nachfolge-Forschungsprojekt KoPro LZK⁺ der AEE Intec mit dem Energieinstitut Vorarlberg wurden inzwischen sieben Bauprojekte in verschiedenen österreichischen Bundesländern nach der im Projekt KliNaWo entwickelten Methodik bewertet. Die Resultate bestätigen die Ergebnisse des KliNaWo-Projekts: in allen Projekten (Wohnbau, Nicht-Wohnbau, jeweils Neubau und Sanierung) ergaben sich geringe investive Mehrkosten für energieeffiziente Varianten und Kostenoptima im Bereich sehr effizienter Gebäudequalitäten [5].

Die im Projekt KliNaWo entwickelte und in KoProLZK⁺ weiterentwickelte Methode wird inzwischen auf internationaler Ebene im EU-Horizon 2020-Projekt Crave zero „Kostenreduktion und beschleunigte Markteinführung von Niedrigstenergiegebäuden“ von den Wissenschaftspartnern AEE Intec, Fraunhofer, eurac research sowie einigen großen europäischen Baukonzernen angewandt [6].

1 Beschreibung der ausgeführten Variante

1.1 Allgemeine Daten zum Gebäude

Die wichtigsten allgemeinen Daten zur Ausführungsvariante des Gebäudes und zum Projektstandort sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3: Wichtigste allgemeine Daten zur Ausführungsvariante.

Baujahr	2016 / 2017
BGF lt. Fertigstellungs-Energieausweis	1.822 m ²
WNF	1.281,08 m ²
Energiebezugsfläche PHPP	1.421,2 m ²
Hüllflächenfaktor A/V	0,40
Anzahl Wohneinheiten	19 (davon eine Einheit derzeit als Gemeinschaftsraum genutzt)
Geschosse	E + 2
Breitengrad	47.31°
Längengrad	9.63°
Höhenlage	448 m
Orientierung Hauptfassade	42° aus der Südrichtung gedreht
Messjahr	2018
Mittlere Jahresaußentemperatur (TRY / Messjahr)	(9,7°C / 11,6°C (2018))
Mittlere Außentemperatur Heizperiode Jan bis März und Okt bis Dez (TRY / Messjahr)	(3,7°C / 4,0°C (2018))

1.2 Gebäudehülle

Die energetischen Kennwerte der Bauteile der Gebäudehülle für die Ausführungsvariante sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst, die schichtweisen Bauteilaufbauten in den darauffolgenden Abbildungen.

Gegenüber dem im Zwischenbericht von Januar 2017 dargestellten Planungsstand Ausschreibung [1] wurden in der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung der Ausführungsvariante die folgenden Änderungen an der Gebäudehülle durchgeführt:

- Außenwanddämmung: Wärmedämmverbundsystem mit 24 statt 22 cm EPS WLK 0032, U_{AW} : 0,118 statt 0,124 W/(m²K)
- Dämmung Flachdach: leichte Erhöhung der Dämmstoff-Dicke, Verbesserung des U-Werts um etwa 0,01 W/(m²K)

Tabelle 4: U-Werte der Bauteile gemäß PHPP.

	Einheit	Wert
U-Wert Außenwand	W/(m ² K)	0,118
U-Wert Flachdach	W/(m ² K)	0,081
U-Wert Kellerdecke gegen unkonditionierten Keller	W/(m ² K)	0,146
U-Wert Kellerdecke gegen Tiefgarage	W/(m ² K)	0,146
U-Wert Verglasung	W/(m ² K)	0,51
g-Wert Verglasung	[-]	0,53
psi-Wert spacer (Abstandshalter)	W/(mK)	0,039
U-Wert Rahmen	W/(m ² K)	0,97
U-Wert Verglasung Dachkuppel	W/(m ² K)	1,0
g-Wert Verglasung Dachkuppel		0,25
psi-Wert spacer Dachkuppel	W/(mK)	0,06
U-Wert Rahmen Dachkuppel	W/(m ² K)	1,2

Die U-Werte gemäß PHPP-Berechnung weichen zum Teil minimal von den in den folgenden Abbildungen dargestellten Werten aus dem Fertigstellungs-EAW ab.

Der mittlere U-Wert gemäß Fertigstellungs-Energieausweis beträgt 0,23 W/(m²K), der gewichtete mittlere U-Wert gemäß PHPP 0,247 W/(m²K).

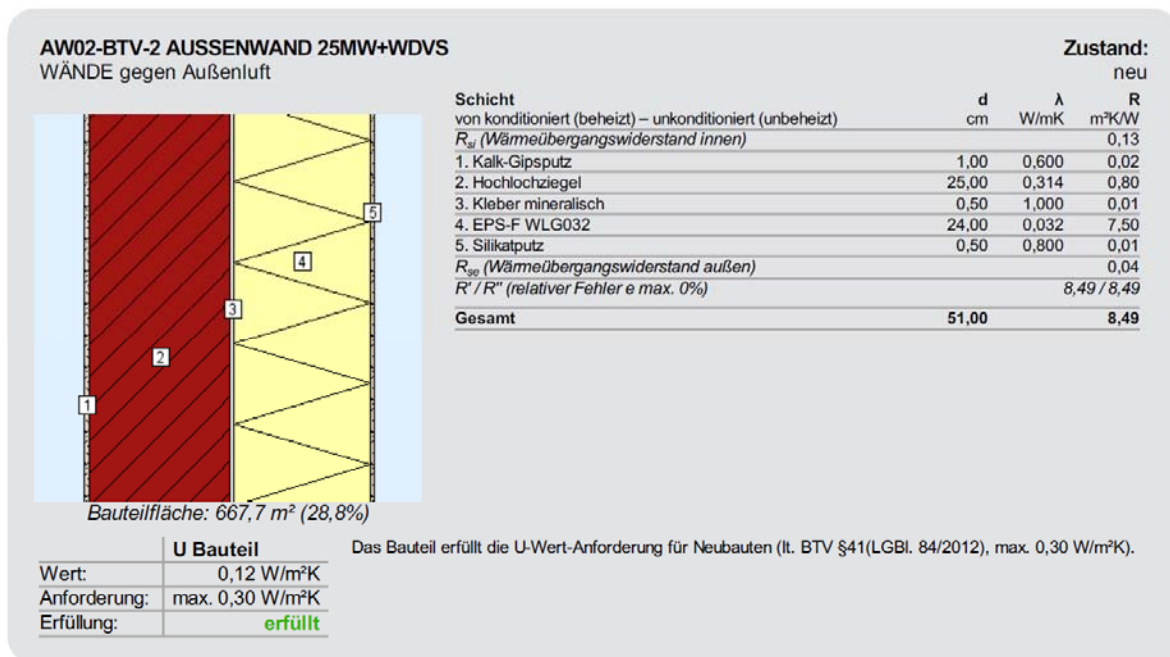


Abbildung 5: Bauteilaufbau Außenwand, Auszug aus EAW Fertigstellung.

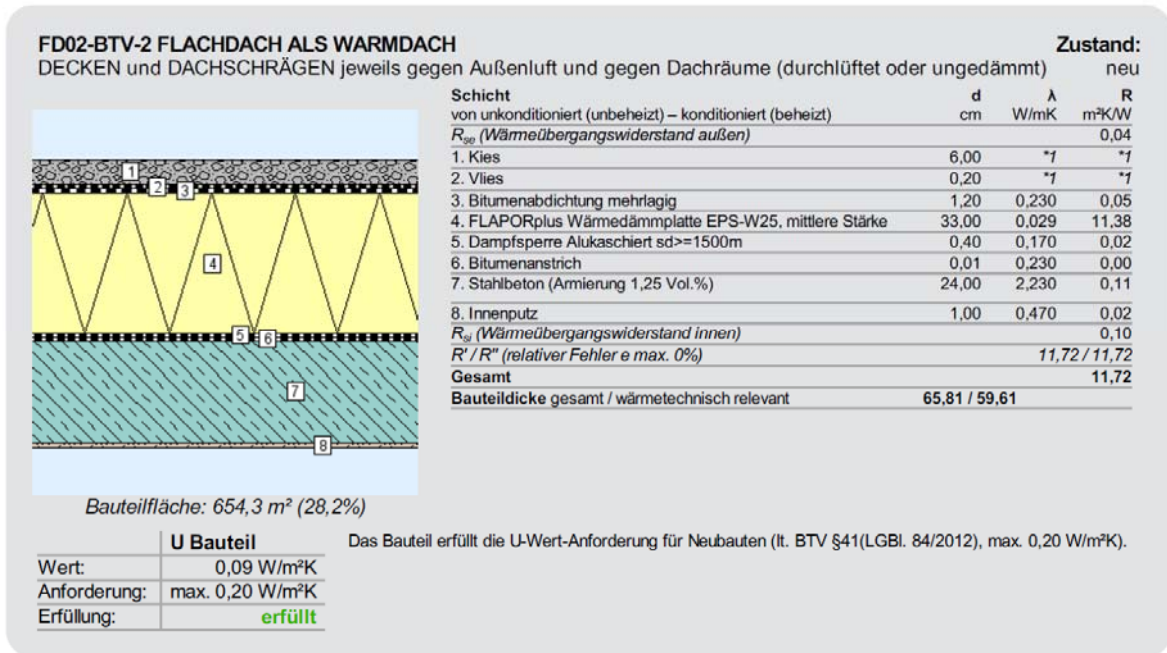


Abbildung 6: Bauteilaufbau Flachdach, Auszug aus EAW Fertigstellung.

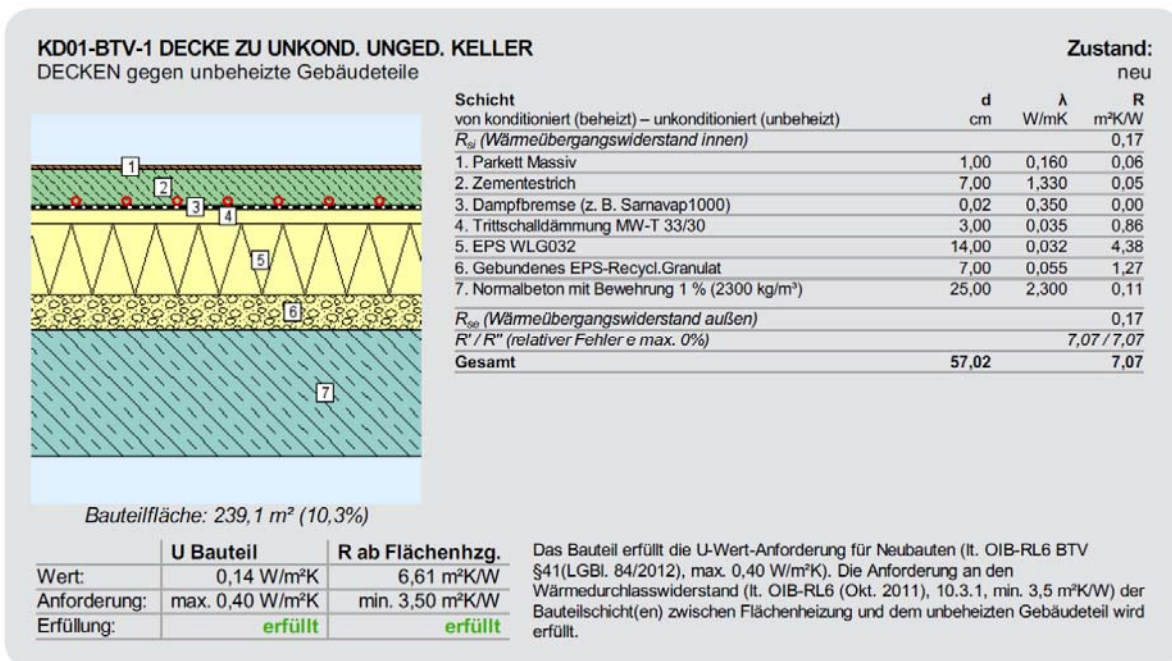


Abbildung 7: Bauteilaufbau Decke zu unconditioniertem Keller , Auszug aus EAW Fertigstellung.

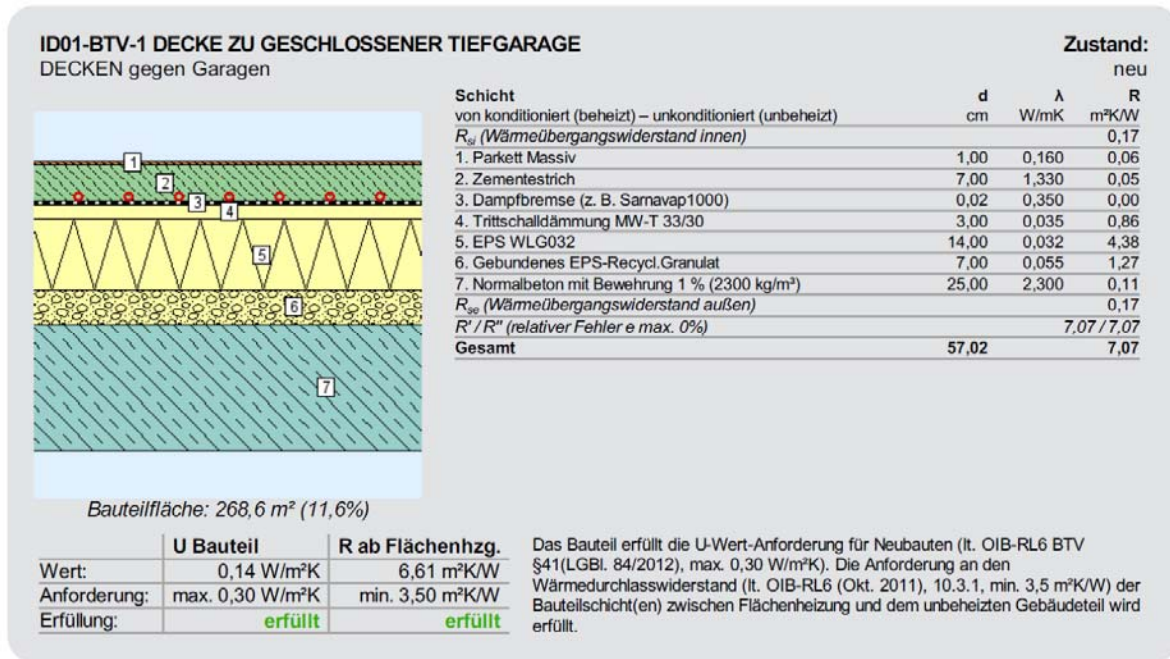


Abbildung 8: Bauteilaufbau Decke zu Tiefgarage, Auszug aus EAW Fertigstellung.

Im Rahmen der Variantenuntersuchung wurden Wärmebrückenberechnungen für etwa 20 Knotenpunkte je Konstruktionsart durchgeführt. Für die Ausführungsvariante ergab sich ein U-Wertzuschlag von 0,028 W/(m²K), von dem nur etwa 3% auf die Hülle entfallen, während die Anschlüsse von Keller und Tiefgarage etwa 57% und die Fensteranschlüsse etwa 40% des Zuschlags verursachen. Auch wenn eine weitergehende Minimierung der Wärmebrücken möglich gewesen wäre, zeigt das Gebäude, dass die Reduktion von Wärmebrücken am aufgehenden EG-Mauerwerk in Mehrfamilienhäusern in Massivbauweise an Grenzen stößt. Wärmebrückenfreie Konstruktionen mit Gesamt-U-Wertzuschlägen von 0 W/(m²K), wie sie in Einfamilienhäusern gut möglich sind, sind in Mehrfamilienhäusern in Massivbauweise nur schwer realisierbar.

1.2.1 Luftdichtheitstests

Die Luftdichtheit n_{50} wurde nach Fertigstellung des Gebäudes am 25.09.2017 in zwei Tests gemessen, in denen jeweils die Luftdichtheit des Gesamtgebäudes untersucht wurde. Beide Tests wurden in Anlehnung an ÖNORM EN 13829, Verfahren A durchgeführt.

In Test 1 wurden die Zuluftöffnungen in der Außenwand abgeklebt. In Test 2 wurden sie nicht abgeklebt, vielmehr wurden die eingebauten Klappen geschlossen.

In Test 1 wurde die Luftdichtheit n_{50} zu 0,63h⁻¹ bestimmt. In Test 2 wurde ein Wert n_{50} von 0,80h⁻¹ ermittelt. Die Klappen der Zuluftöffnungen weisen demnach auch im geschlossenen Zustand merkbare Undichtheiten auf.

Bei der geplanten Betriebsweise mit einem kontinuierlichen Betrieb der Abluftanlage spielt diese Undichtheit jedoch keine Rolle, da die Elemente ohnehin ständig von außen nach innen durchströmt werden.

1.3 Wärmeversorgungssystem

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde die Variante mit den niedrigsten Lebenszykluskosten zur Realisierung ausgewählt. Diese kann durch die folgenden energierelevanten Elemente charakterisiert werden:

- Gebäudehülle in Passivhausniveau (siehe Kapitel 1.2)
- gebäudezentrale Abluftanlage ohne Wärmerückgewinnung (siehe Kapitel 1.4)
- eine hocheffiziente Sole-Wärmepumpe (Niedertemperatur > Heizung)
- eine hocheffiziente Sole-Wärmepumpe (Hochtemperatur > Warmwasserbereitung)
- große thermische Solaranlage mit Pufferspeicher
- verlustminimiertes Vierleiter-Verteilssystem für Raumheizung und Brauchwarmwasser
- Fußbodenheizung (zusätzlich Heizkörper unter den Zuluft-Nachströmöffnungen in der Außenwand)

Abbildung 9 zeigt das Haustechnikschema, die wichtigsten Komponenten sind im Anschluss erläutert.

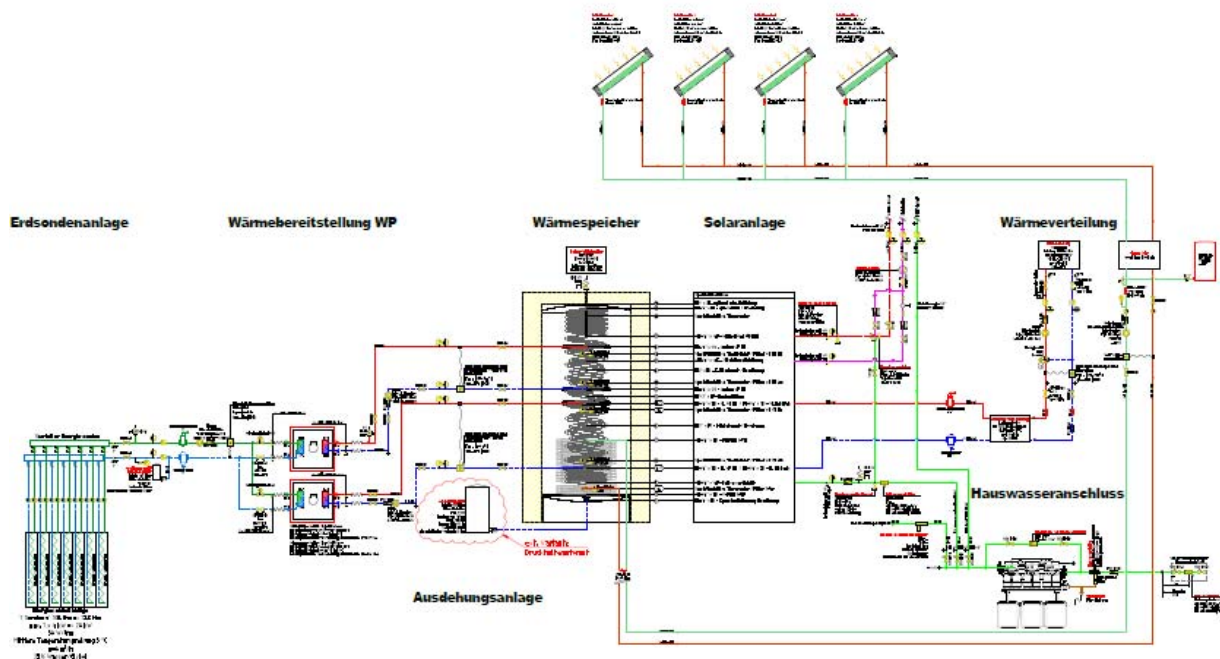


Abbildung 9: Haustechnikschema der Ausführungsvariante, Planungsbüro e-plus [8].

In Abbildung 10 ist das Haustechnikschema vereinfacht dargestellt und enthält nur die wichtigsten Komponenten.

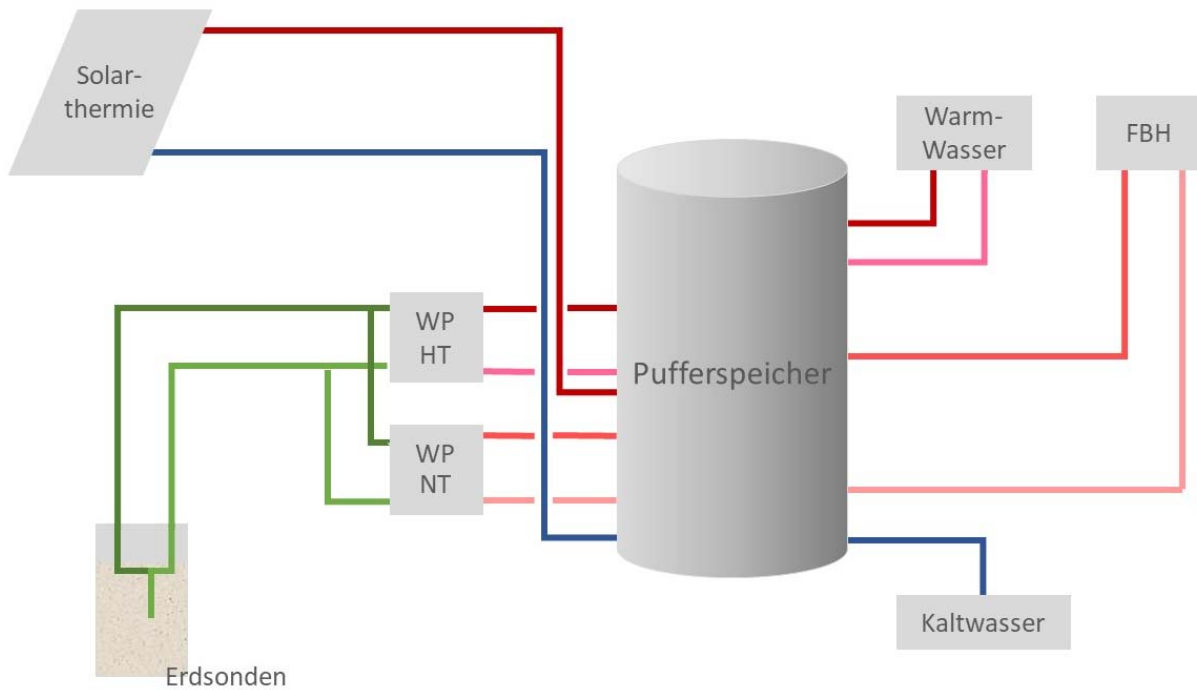


Abbildung 10: vereinfachtes Haustechnikschema.

Die wichtigsten in den Schemata dargestellten Komponenten werden nachfolgend beschrieben.

Kombispeicher

Forstner HS-674/B2/A2/T, 6.740 Liter, Dämmung Neodul 100/20 (Lambdawert 0,0316 W/(mK). Höhe 3,55 m Durchmesser 1,60 m. Je ein Wärmetauscher für Brauchwarmwasser und Solarthermie. Aufstellung innerhalb der thermischen Gebäudehülle.



Abbildung 11: Speicher für Heizung und Warmwasser.

Wärmeverteilungen - Dämmung und Leitungslängen

Das Wärmeverteilnetz ist aufgrund der Lage des Technikraumes im Zentrum des Gebäudes (innerhalb des konditionierten Gebäudevolumens) relativ kurz. Sowohl die Heizwärme-Verteilungen, als auch die Warmwasser-Zirkulationsleitungen wurden in 3/3 der Nennweite der Leitung gedämmt.

Heizwärmeverteilung

Länge Verteilungen	L_H	m
Nennweite der Leitung		mm
Dämmdicke		mm
Dämmung verspiegelt?		-
Wärmeleitfähigkeit der Dämmung		W/(mK)
Wärmeverlustkoeffizient je m gedämmter Leitung		W/(mK)
Dämmqualität der Armaturen, Rohraufhängungen etc.		-
Wärmebrückenaufschlag		W/K
Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient je m Leitung	Ψ	W/(mK)

innerhalb der thermischen Hülle			
1	2	3	4
204,5	88,8	11,1	40,9
16	22	27	36
15	22	27	36
0,040	0,040	0,040	0,040
0,206	0,204	0,208	0,212
2 - mäßig	2 - mäßig	2 - mäßig	2 - mäßig
7,758	3,708	0,989	2,030
0,244	0,246	0,297	0,262

WW-Zirkulationsleitungen

Länge Zirkulationsleitungen (Vor- + Rücklauf)	L _Z	m	137,3	58,01	52,49	18,50	0,47
Nennweite der Leitung		mm	16	22	27	36	42
Dämmdicke		mm	16	22	27	36	42
Dämmung verspiegelt?		-					
Wärmeleitfähigkeit der Dämmung		W/(mK)	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Wärmeverlustkoeffizient je m gedämmter Leitung		W/(mK)	0,203	0,208	0,212	0,215	0,216
Dämmqualität der Armaturen, Rohraufhängungen etc.		-	2 - mäßig	2 - mäßig	2 - mäßig	2 - mäßig	2 - mäßig
Wärmebrückenaufschlag		W/K	5,406	2,630	2,437	1,248	0,616
Gesamt-Wärmeverlustkoeffizient je m Leitung	Ψ	W/(mK)	0,243	0,254	0,258	0,282	1,531

Abbildung 12: Leitungslängen und Dämmung mit Wärmeverlusten; Auszug aus PHPP-Berechnung Energieinstitut Vorarlberg [7].

Thermische Kollektoren

6 Reihen, 99,1m² (Netto) Doma Flex Alu Großflächenkollektoren mit Aluminium Streifen-Absorber mit Kupferrohr. Wirkungsgrad 85,3%

Tabelle 5: Kollektorfläche.

	Bruttofläche in m ²	Nettofläche in m ²
Kollektorreihe 1	20,9	17,2
Kollektorreihe 2	20,9	17,2
Kollektorreihe 3	20,9	17,2
Kollektorreihe 4	15,1	13,1
Kollektorreihe 5	20,9	17,2
Kollektorreihe 6	20,9	17,2
Summe	119,6	99,1

Wärmepumpe Hochtemperatur

WP HT (Hochtemperatur/Warmwasser): Weider HT 140eco, Heizleistung 9,9kW bei 65°C, Leistungszahl (0/65): 2,2.

Wärmepumpe Niedertemperatur

Wärmepumpe WP NT (Niedertemperatur/Heizung): Weider SW 500eco, Heizleistung 36,2 kW bei 35°C (=25 W/m²PHPP) Leistungszahl bei 5K Spreizung (0/35): 4,3.



Abbildung 13: Wärmepumpe HT (WW) oben und Wärmepumpe NT (Heizung) unten.

Fußbodenheizung

VL/RL 35°C/28°C (Auslegung) 30,1 kW in Summe aller Wohnungen

Heizkurve

Heizfreigabe bei 13°C Außentemperatur (30 Std. gleitender Mittelwert). Die Heizkurve wurde im Laufe des Messjahrs angepasst, da im Einregelungsprotokoll eine andere Heizkurve mit etwa 3°C niedrigeren Temperaturen angegeben ist (wahrscheinlich Ende Februar 2018).

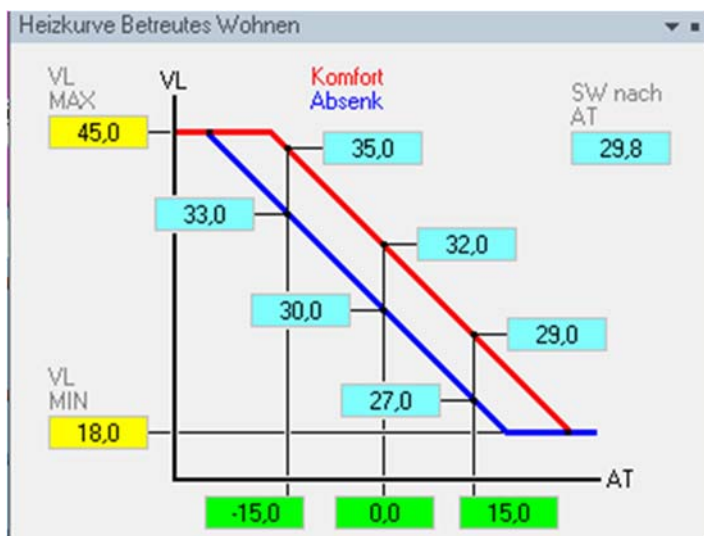


Abbildung 14: Heizkurve im Projekt KliNaWo (Stand Mai 2019, Quelle Auttec Regelung).

Sonden

6 Sonden, gesamt 732 m (geplant waren 7 Sonden á 105 m), dadurch höhere Druckverluste, höherer Stromverbrauch bzw. der geplante Durchfluss durch die Sonden war nicht möglich, daher nächst größere Pumpe eingebaut. Solepumpe: Grundfos Magna 3, 32-120 F



Abbildung 15: Solepumpe Grundfos Magna 3, 32-120 F.

Entzugsleistung der Sonden bei 38W/lfm: 28 kW (aufgrund Bodengutachten, Bohrprofil vorhanden und für Nachberechnung Pumpe hinterlegt)

Pumpen

Nr.	Bezeichnung	Typ	Fördermenge m³/h	Förderhöhe mWS
1	Solepumpe	Grundfos Magna3 32-120 F	2,5-10,5	8,1
2	Speicherpumpe WP HT	Grundfos Alpha2 25-60	1,9	2,5
3	Speicherpumpe WP NT	Grundfos Magna3 25-100	8,0	3,5
4	Zirkulationspumpe	Grundfos Alpha2 25-60 N	0,8	3,0
5	Heizkreispumpe	Grundfos Magna3 32-80	4,9	5,5
6	Solarpumpe	Grundfos Alpha Solar 25-145	1,9	6,0



Abbildung 16: Heizkreispumpe (oben links) und Solarpumpe (unten rechts).

Heizkörper

Zusätzliche Heizkörper unter Zuluftöffnungen in Außenwand: Um mögliche Zugerscheinungen durch das Einströmen kalter Luft durch die Zuluftöffnungen in der Außenwand zu verhindern oder abzumildern, wurden unter den Öffnungen Heizkörper installiert, die mit dem gleichen Temperaturniveau betrieben werden wie das eigentliche Wärmeverteilsystem Fußbodenheizung (192 W Leistung pro Heizkörper, Typ 22K6080). Die Leistung der Heizkörper beträgt in Summe aller Wohneinheiten 9,4kW.

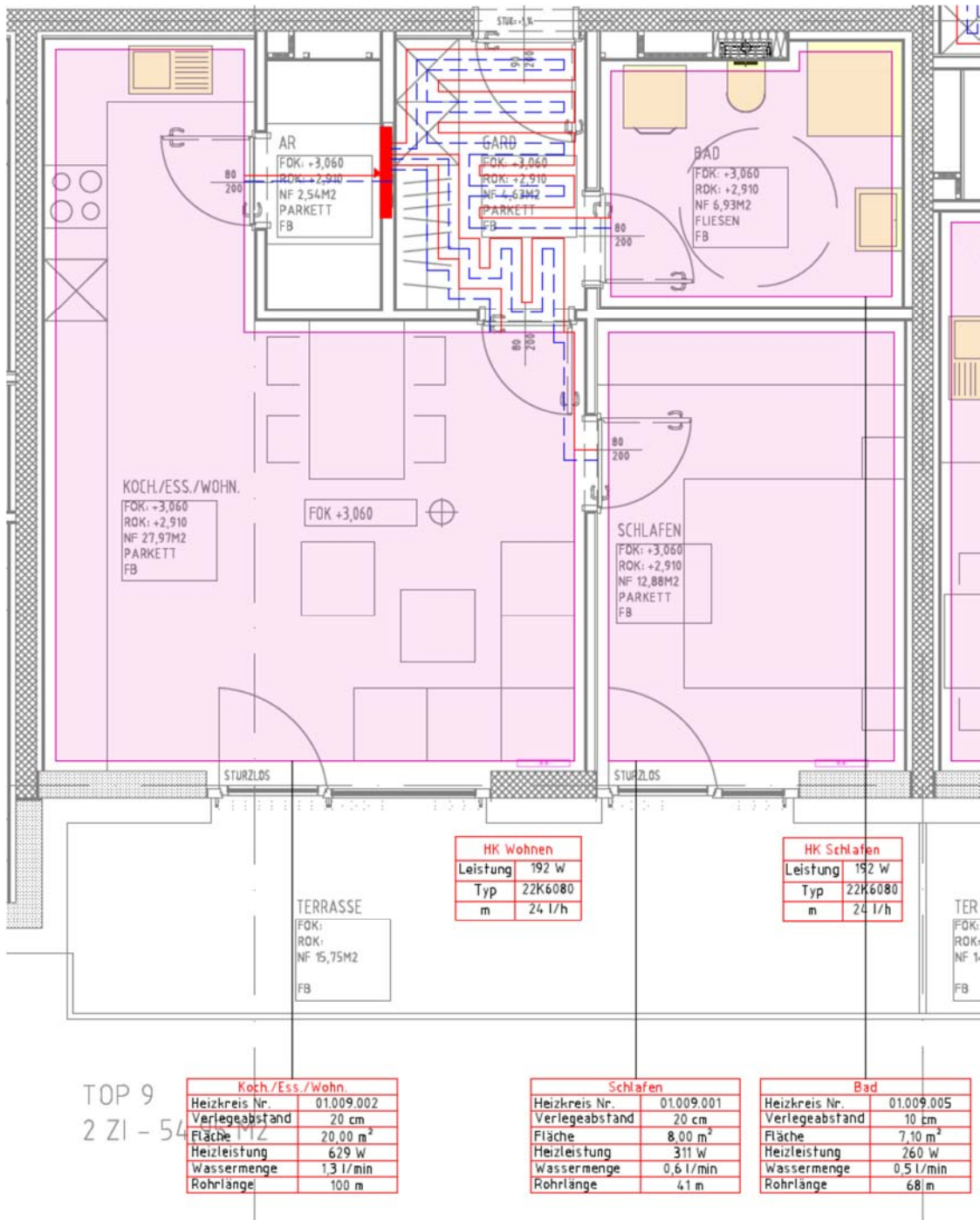


Abbildung 17: Fußbodenheizung und Heizkörper in Top 9.

Abluftventilator

Zentraler Abluftventilator für alle Wohnungen Typ Helios SB 400 EC. Details siehe nächstes Kapitel.

1.4 Lüftungsanlage

Wie im ersten Zwischenbericht beschrieben wurde das Gebäude nicht mit einer Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung, sondern mit einer zentralen Abluftanlage ausgeführt, da diese in Verbindungen mit der sehr effizienten Sole-Wärmepumpe für die Heizung geringfügig niedrigere Lebenszykluskosten verursacht.

Die Abluftanlage wird kontinuierlich mit dem bei der Auslegung der Komfortlüftung ermittelten hygienischen Luftwechsel von $0,30\text{h}^{-1}$ betrieben.

Die Gesamtanlage setzt sich aus drei Einzelanlagen zusammen. Bei allen Anlagen handelt es sich um Abluftanlagen mit Nachströmöffnungen ohne Wärmerückgewinnung.

Die Hauptanlage versorgt die Wohnungen und den Gemeinschaftsraum, zwei kleinere Anlagen jeweils den Keller sowie den Fahrradraum.

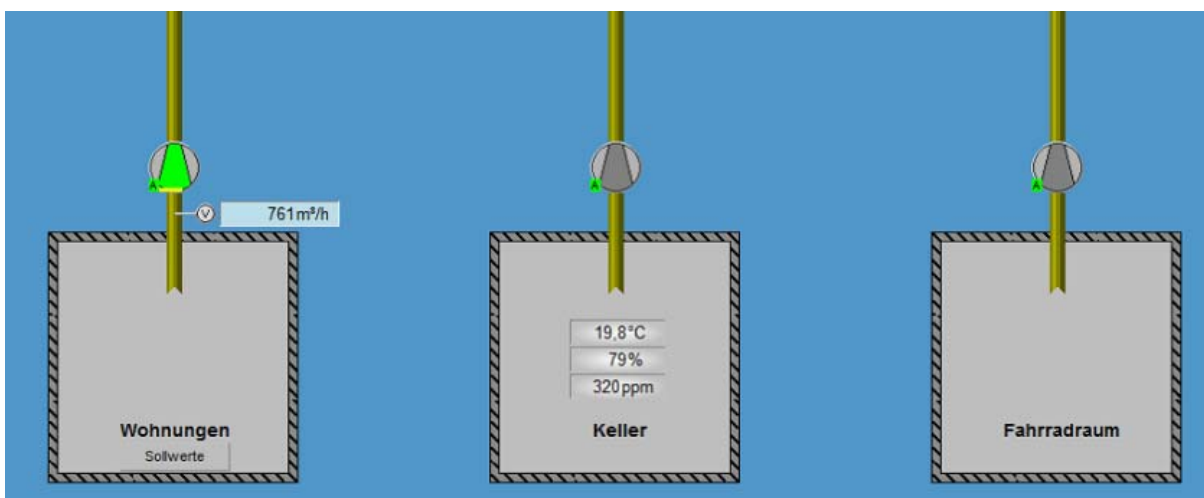


Abbildung 18: Screenshot aus der Gebäudeleittechnik für den Bereich Lüftung.

Bei der Hauptanlage handelt es sich um einen zentralen Abluftventilator, welcher im Technikraum im 2. OG angeordnet ist und die Fortluft über Dach führt. Die Abluft aus den Wohnungen wird über ein Sammelrohr zusammengeführt und durch den zentralen Abluftventilator angesaugt. Insgesamt wird das Gebäude über 14 Abluftstränge versorgt, an die jeweils zwei bzw. drei Ablufträume respektive Abluftventile angeschlossen sind. Die Volumenströme je Strang werden über Konstantvolumenstromregler eingestellt. Jeder Strang ist mit einem Rohrschalldämpfer versehen.



Abbildung 19: Zentraler Abluftventilator im Technikraum im 2.OG.



Abbildung 20: Sammelrohr und Einzelstränge mit Schalldämpfer und Konstantvolumenstromregler.

Die Nachströmung in die Wohnungen und Räume erfolgt über Schlitz-Nachströmöffnungen in den Außenwänden. Zur Vermeidung von Zugerscheinungen sind Heizkörper unter den Öffnungen angebracht, die ansonsten nicht notwendig gewesen wären, da das Gebäude über die Fußbodenheizung beheizt wird.



Abbildung 21: Nachströmöffnungen (links Außenansicht, rechts Innenansicht).

1.5 Beleuchtung Allgemeinbereiche und Tiefgarage

Sowohl die Beleuchtung der Allgemeinbereiche in den oberirdischen Geschossen, als auch die der Keller und der Tiefgarage wurden mit LEDs ausgeführt.

1.6 Berechnungsergebnisse Energie

Die Energiekennwerte des Gebäudes wurden sowohl nach den Algorithmen der OIB Richtlinie 6 (Energieausweisberechnung), als auch mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) berechnet. Für die Ausführungsvariante und einige weitere Varianten wurden zusätzlich auch dynamische Gebäude- und Anlagensimulationen durchgeführt.

Die Energieausweisberechnungen dienten der Justierung der Varianten nach den Mindestanforderungen der Bautechnikverordnung BTV und der Ermittlung der Energie-Boni der Wohnbauförderung Vorarlberg.

Die energetisch-wirtschaftliche Optimierung des Gebäudes erfolgte nicht anhand der Energieausweisberechnungen, sondern anhand von PHPP-Berechnungen. Dafür waren drei Gründe ausschlaggebend:

- das Rechenverfahren nach PHPP ist validiert
- die Randbedingungen können frei gewählt werden
- die Excel-basierten Energiebedarfsberechnungen mit PHPP konnten automatisiert werden, so dass die sehr große Anzahl an Berechnungen (für alle untersuchten Varianten) in kurzer Zeit durchgeführt werden konnten.

1.6.1 Energieausweisberechnungen gem. OIB RL 6 (2011)

Für die Ausführungsvariante wurden im Verlauf der Planung zwei Energieausweisberechnungen nach der zum Zeitpunkt der Planung aktuellen OIB Richtlinie 6, (2011) durchgeführt:

- Variante vor Auswahl und Optimierung der Ausführungsvariante
- Fertigstellungsenergieausweis

Im Fertigstellungsenergieausweis ist der in Kapitel 1.2 bis 1.3 beschriebene Ausführungsstand des Gebäudes zu Grunde gelegt.

Da die Ausführungsvariante nicht über eine Komfortlüftung mit WRG, sondern über eine Abluftanlage belüftet wird, liegt ihr HWB bei über 15 kWh/(m²_{BGF}a). Für die Verschattung wurde daher im Fertigstellungsenergieausweis der Default-Abminderungsfaktor der ÖNORM B 8110-6 (2014) von 0,75 angenommen, auch wenn die tatsächliche Verschattung des Gebäudes deutlich höher liegt. In den Energieausweisberechnungen vor Auswahl der Realisierungsvariante waren für alle Varianten einheitlich die detailliert ermittelten Verschattungsfaktoren berücksichtigt worden.

Der Fertigstellungsenergieausweis diente u.a. der Bemessung der Höhe der Wohnbauförderung für die Kriterien HWB, PEB und CO₂. Bei Verwendung der in ÖNORM B 8110-6 (2014) deutlich zu optimistisch festgelegten Defaultwerte der Verschattung ergeben sich niedrigere Energiekennwerte und damit höhere Förderungen als bei Verwendung der realen Verschattungswerte.

Tabelle 6: Energiekennwerte bei Berechnung nach OIB RL 6.

	HWB _{SK}	HWB _{Ref,SK}	PEB	CO ₂
EAW Planung gem. OIB RL 6 (2011)	24,7	k. A.	77,6	12,4
EAW Fertigstellung gem. OIB RL 6 (2011)	21,51	k. A.	63,6	10,1
EAW Fertigstellung gem. OIB RL 6 (2015)	21,32	21,32	45,1	6,58

Der Vergleich zwischen EAW Planung und EAW Fertigstellung zeigt, dass sich durch die im Fertigstellungs-EAW berücksichtigten Optimierungen der Ausführungsvariante sowie durch Annahme des Defaultwertes für die Verschattung merklich niedrigere Energiekennwerte ergeben. Werden die Energiekennwerte für die Ausführungsvariante nach der aktuellen OIB RL 6 (2015) [9] berechnet, so ergibt sich ein minimal niedrigerer HWB_{Ref,SK} als bei Berechnung nach OIB RL 6 (2011) [10]. Für PEB und CO₂ ergeben sich nach OIR Richtlinie 6 (2015) deutlich niedrigere Werte. Grund ist die Einführung niedrigerer Konversionsfaktoren für Strom: So wurde der Primärenergiefaktor von 2,62 in OIB RL 6 (2011) auf 1,91 in OIB RL 6 (2015) reduziert, der Konversionsfaktor CO₂ von 417 auf 276 g/kWh.

1.6.2 Energiebedarfsberechnungen PHPP

Als Grundlage für die Ermittlung der Energie- und der Lebenszykluskosten wurden nicht die Energieausweisberechnungen nach OIB verwendet, sondern Energiebedarfsberechnungen mit dem validierten Excel-Tool PHPP [7]. Für jede Gebäudevariante wurden zwei PHPP-Berechnungen durchgeführt:

- Variante mit Standard-Randbedingungen PHPP
- Verbrauchsprognoseberechnung mit projektspezifisch abgeschätzten Randbedingungen

Die Energie- und Lebenszykluskosten wurden auf der Basis der Verbrauchsprognoseberechnungen ermittelt.

Nach Auswahl und energetisch-wirtschaftlicher Optimierung der Ausführungsvariante wurden die PHPP-Berechnungen aktualisiert, dabei wurden die in Tabelle 7 aufgeführten Annahmen und Randbedingungen sowie die Flächen gemäß Planstand Polierplanung verwendet.

Tabelle 7: Annahmen und Randbedingungen für die PHPP-Berechnung der Ausführungsvariante.

Annahme/Randbedingung	Einheit	PHPP standardisiert	Verbrauchsprognose PHPP
Energiebezugsfläche PHPP	m ² _{EBF}	1.421,2	1.421,2
WNF	m ² _{WNF}	1.281,08	1.281,08
Anzahl Wohneinheiten	Stück	19	19
Klimadatensatz		TRY Feldkirch gemäß Messdaten 1994-2012 der ZAMG	
Raumlufttemperatur	°C	20	22
Luftwechselrate	h ⁻¹	0,31	0,31
Luftdichtheit n ₅₀	h ⁻¹	0,6	0,6
Abminderungsfaktor Verschattung Winter Nordfenster	%	0,77	0,77
Abminderungsfaktor Verschattung Winter Ostfenster		0,47	0,47
Abminderungsfaktor Verschattung Winter Südfenster		0,38	0,38
Abminderungsfaktor Verschattung Winter Westfenster		0,36	0,36
Anzahl Bewohner		36,7	36,7
Pro-Kopf Wohnfläche	m ² _{WNF} /Person	38,7	38,7
WW-Bedarf pro Person und Tag	Liter (60°C) / (Person d)	25	32,5
Interne Wärmequellen	W/m ² _{EBF}	2,8	2,8

Zur Berechnung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit die Konversionsfaktoren der OIB RL 6 (2015) verwendet.

Tabelle 8: Energiekennwerte PHPP für die Ausführungsvariante.

	Einheit	PHPP standardisiert	PHPP Verbrauchsprognose 22°C
HWB Monatsverfahren	kWh/(m ² _{EBFa})	27,5	34,5
WW-Bedarf (wirksame Nutzwärme WW)	kWh/(m ² _{EBFa})	13,4	17,5
Endenergie _{Heizung}	kWh/(m ² _{EBFa})	4,9	6,4
Endenergie _{ww}	kWh/(m ² _{EBFa})	7,5	8,9
Endenergie_{Heiz+WW}	kWh/(m²_{EBFa})	12,4	15,3
Endenergie Haustechnik	kWh/(m ² _{EBFa})	3,2	3,2
- davon Lüftung	kWh/(m ² _{EBFa})	1,7	1,7
Endenergie sonstiges	kWh/(m ² _{EBFa})	0,0	0,0
Endenergie Haushaltsstrom	kWh/(m ² _{EBFa})	19,3	19,3

1.6.3 Dynamische Gebäude und Anlagensimulation

Zur Optimierung der Behaglichkeit sowie zur detaillierten Darstellung der Energieflüsse im Gebäude wurden in verschiedenen Projektphasen dynamische Gebäude- und Anlagensimulationen durchgeführt. Eingesetzt wurde die Software IDA ICE in der Version 4.8 [11]. In den dynamischen Gebäude- und Anlagensimulationen können die Energieflüsse in Gebäuden zeitlich hochaufgelöst abgebildet werden. Durch die genaue Abbildung des Gebäudes, seiner Umgebung und der eingesetzten Anlagentechnik werden Ergebnisse erzielt, die dem tatsächlichen Gebäudebetrieb (Behaglichkeitsparameter, Anlagenverhalten, Wärmeströme, Energieverbrauch...) sehr nahekommen. Eine Grundlage für die hohe Genauigkeit ist die Eingabe des Gebäudes als 3D-Modell und die dreidimensionale Abbildung der Umgebung (Nachbargebäude, Topographie...), die es ermöglichen, die Solargewinne des Gebäudes mit hoher Genauigkeit zu berechnen (Abbildung 22).

Zur Optimierung des Gebäudeentwurfs wurden in der ersten Projektphase vor allem Behaglichkeit und Sommerkomfort untersucht, aufgrund der Simulationsergebnisse (auch unter Annahme eines Klimadatensatzes für 2050) wurden die Fensterflächenanteile gegenüber dem ursprünglichen Entwurf verkleinert.

Im Zuge der Auswertung der Monitoringdaten wurde das Gebäudemodell an den Ausführungsstand angepasst und die realisierte Anlagentechnik detailliert abgebildet. In den Nachsimulationen wurden Messdaten aus dem bewohnten Gebäude verwendet, so wurden etwa die Klimadaten für das Messjahr 2018 im Modell eingepflegt, die realen Personenzahlen je

Wohneinheit eingegeben und die gemessenen Raumlufttemperaturen nachgebildet. Der gemessene Haushaltsstrombedarf wurde den einzelnen Tops als stündliches Lastprofil zugewiesen, ebenso wie ein stündliches Warmwasserzapfprofil. Die Anwesenheit der Bewohner wurde messtechnisch nicht erfasst, deshalb wurden die Benutzerprofile für MFH nach SIA 2024 (2015) [12] hinterlegt. Auch die Nutzung des Sonnenschutzes und die zusätzliche Fensterlüftung wurden messtechnisch nicht erfasst. Im Simulationsmodell wurden daher Annahmen zur Nutzung getroffen. Berücksichtigt wurden sowohl eine zusätzliche Fensterlüftung im Sommer und im Winter als auch eine Verschattung durch außenliegende Raffstores im Sommer und im Winter. Die Annahmen bezüglich der zusätzlichen Fensterlüftung wurden so gewählt, dass sie eine gewisse „Fehlnutzung“ charakterisieren, z.B. das Öffnen eines Teils der Fenster an heißen Sommertagen oder in kalten Winternächten sowie die Nutzung der Verschattung auch an sonnigen Wintertagen. Die Luftmenge der Abluftanlage wurde laut dem Einregelungsprotokoll den einzelnen Wohnungen zugewiesen.

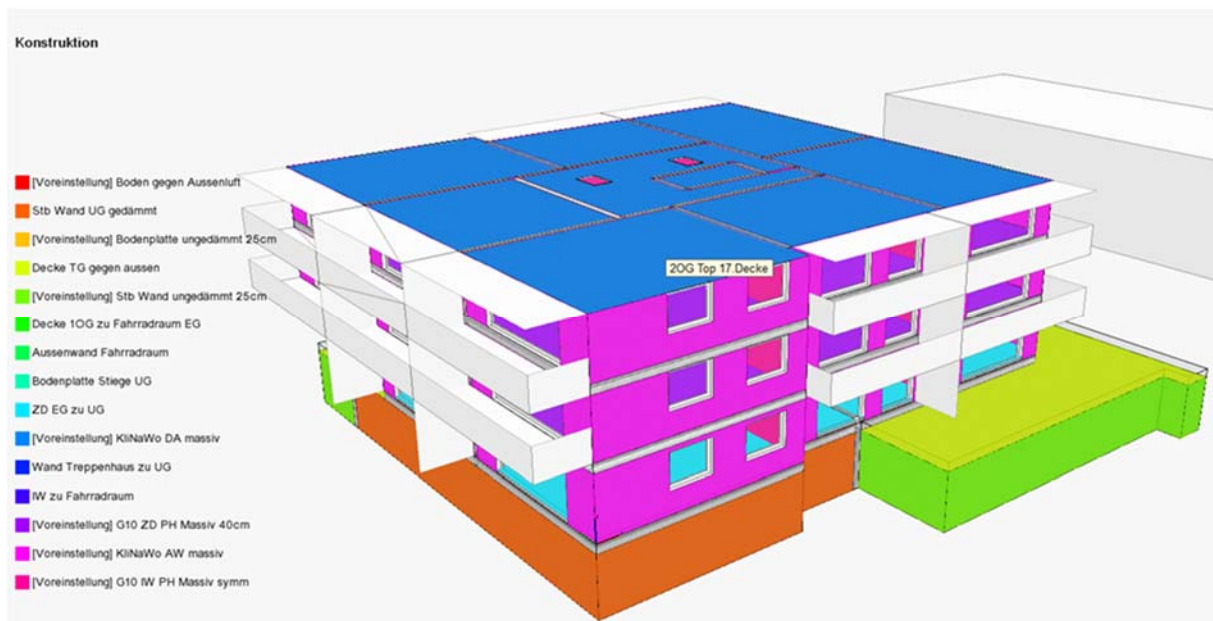


Abbildung 22: 3D Gebäudemodell des KliNaWo Gebäudes in der Gebäude- und Anlagensimulation in IDA ICE. Farblich unterschiedlich dargestellt sind die unterschiedlichen Konstruktionen.

Die internen Wärmequellen betragen nach SIA 2024 (2015) für die reale Personenanzahl 10.066 kWh/a für die Personen und bei einer 85%igen Anrechnung des Haushaltsstromes 23.822 kWh/a aufgrund der Abwärme der Geräte. Dies ergibt 33.888 kWh/a im konditionierten Bereich. Die gesamten IWQ sind dann gemittelt 3,87 kW Dauerleistung. Bei einer Energiebezugsfläche PHPP von 1.421 m² entspricht dies IWQ von 2,72 W/m². Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem PHPP-Wert von 2,8 W/m² überein

Das Anlagenmodell, welches in Abbildung 23 dargestellt ist, wurde der realen Haustechnikanlage nachempfunden, die Eigenschaften der vorher beschriebenen Komponenten wie Wärmepumpe, Pufferspeicher, Pumpen, Solarthermie-Anlage etc. in das Modell übernommen. Somit

können die Energieflüsse im Modell simuliert werden, und die Energiemengen und –flüsse nähern sich, in Rahmen der Modellgenauigkeiten, den gemessenen an.

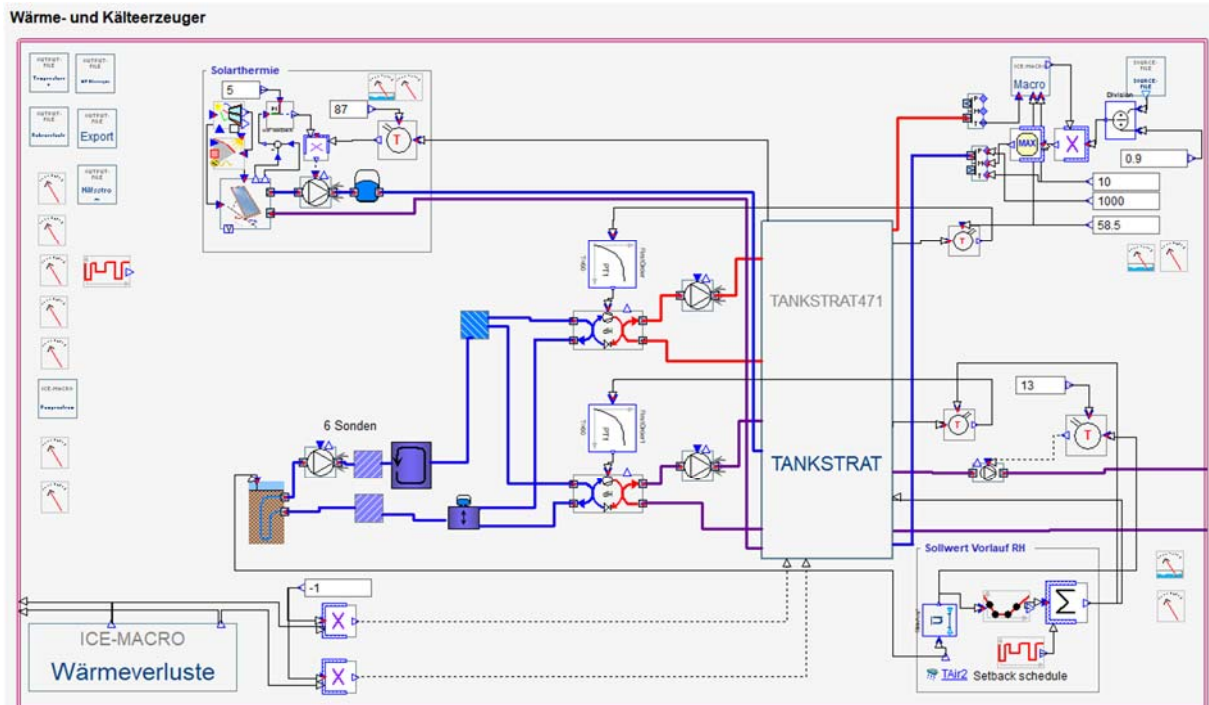


Abbildung 23: Anlagenmodell des KliNaWo Gebäudes in der Gebäude- und Anlagensimulation in IDA ICE.

In Summe ergibt sich aus der Simulation eine von der Fußbodenheizung abgegebene Wärmemenge von 50.074 kWh/a oder 35,2 kWh/(m²_{EBFa}). Dies deckt sich gut mit dem Heizwärmebedarf aus der PHPP Verbrauchsprognose von 34,5 kWh/(m²_{EBFa}). Die Lastverläufe aus der Simulation werden zum Teil im Kapitel Monitoringergebnisse als Vergleich zu den Messwerten dargestellt.

2 Beschreibung des Monitoringkonzepts

Das installierte Monitoring-System wurde aus Gründen der Kosten, der Einfachheit, der Reduktion von Schnittstellen in der Planung und Ausführung sowie dem Betrieb auf eine ohnehin geplante Gebäudeleittechnik aufgesetzt. Dadurch konnten bestehende Komponenten – allem voran der Leitrechner in Form eines Panel-PC (siehe Foto) - auch für das Monitoring verwendet werden. Somit konnte vor allem im Wohnbereich auf zusätzliche, sichtbare Komponenten verzichtet werden.



Abbildung 24: Zentraler Leit- und Monitoring-Panel-PC.

2.1 Ziele

Das Ziel des Monitorings ist vor allem die detaillierte Erfassung der Energieverbräuche und Wärmeströme als Grundlage für den Vergleich mit den vorausgerechneten Bedarfswerten, mit den Werten anderer hocheffizienter Gebäude und als Grundlage für den Vergleich der realen Energiekosten mit den Annahmen in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

Außerdem werden Luftqualität sowie Temperaturen und Feuchte in den einzelnen Wohnungen aufgezeichnet, um Rückschlüsse auf die Behaglichkeit und die richtige Funktionsweise der technischen Anlagen sowie auf das Nutzerverhalten ziehen zu können.

Durch die detaillierte Überwachung des Betriebsverhaltens der technischen Anlagen wie die Wärmepumpen oder die Solarthermie können Fehler und Störung frühzeitig erkannt und die Betriebsweisen der Anlagen hinsichtlich Energieverbrauch, Komfort und Erhöhung der Lebensdauer optimiert werden.

2.2 Beschreibung

Das Monitoring-System erfasst die nachfolgend aufgeführten Daten, wobei – wie eingangs beschrieben - so viel wie möglich der ohnehin benötigten Technik und Sensorik verwendet wurde.

In den Wohnungen werden die Temperaturen, die relative Luftfeuchtigkeit sowie der CO₂-Gehalt in allen Schlafzimmern, dem Wohnzimmer sowie dem Bad erfasst. Die Sensoren sind jeweils an den Innenwänden auf einer Höhe von 1,40 m installiert und in einem gemeinsamen, möglichst unauffälligen Gehäuse untergebracht.

Je Wohnung werden zudem die Warmwassermengen, die Temperaturen des Heizungs- und –rücklauf sowie die Energiemengen aufgezeichnet. Diese Daten werden alle 15 min geloggt und in eine Datenbank geschrieben, aus welcher automatisiert je Monat eine csv-Datei erzeugt wird, die auf dem Leitrechner zusätzlich abgespeichert wird. Diese Daten können per Fernzugriff heruntergeladen werden; ebenso ist eine Ansicht der Live-Daten sowie eine Änderung der Parameter über den Online-Zugang möglich.

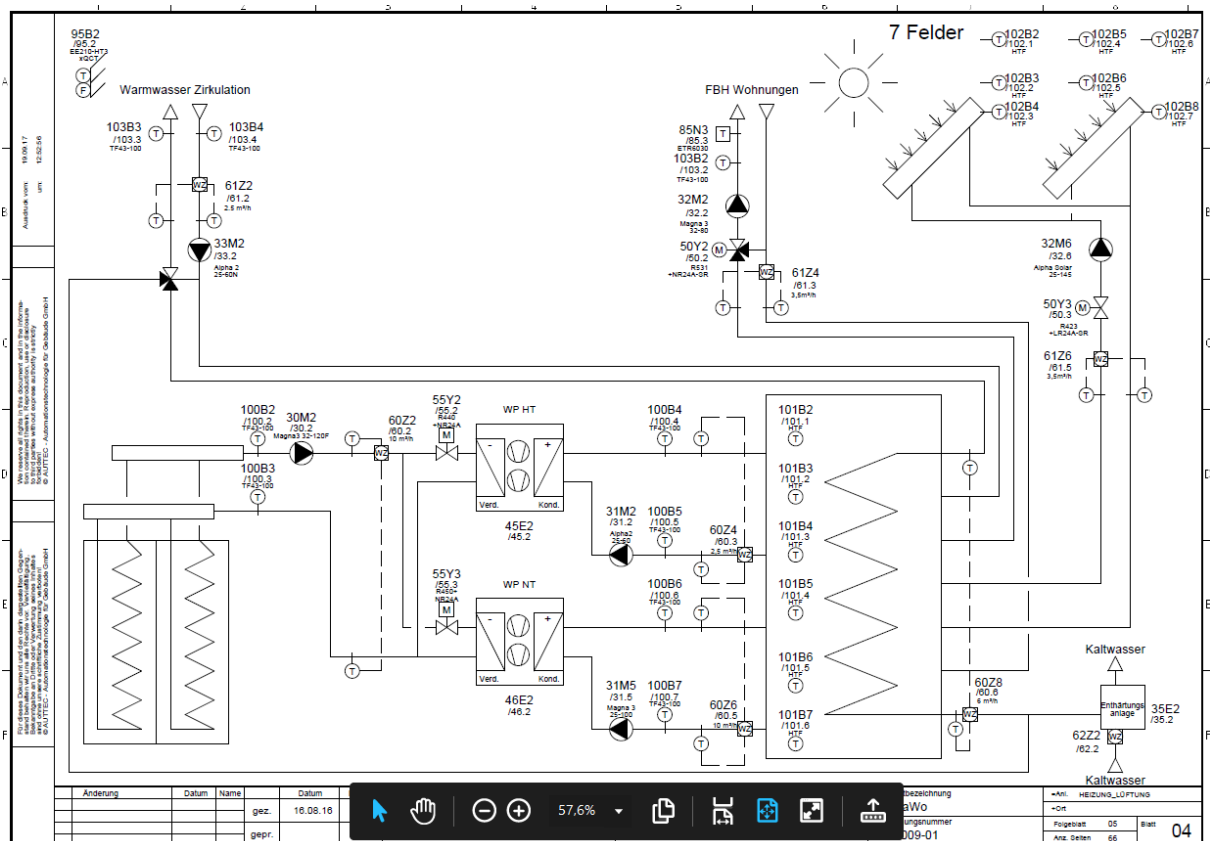


Abbildung 25: Monitoringschema (Quelle: Auttec).

Auch die Strombräuche je Wohnung werden erfasst, sind aber – entgegen der ursprünglichen Planung - nicht auf das zentrale Monitoring aufgeschaltet, sondern werden vom Versorgungsnetzbetreiber Stadtwerke Feldkirch ausgelesen und dem Energieinstitut Vorarlberg zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Dies gilt auch für die Stromzähler der beiden Wärmepumpen. Im Leitrechner selbst werden nur die beiden zusätzlichen Sub-Zähler für die Leistungsaufnahme der zentralen Pumpen samt Messtechnik sowie des Abluftventilators für die Wohnungen erfasst.

Neben den Daten in Wohnungen werden auch im gemeinsamen Stiegenhaus im EG und im 2. OG sowie im Keller und in der Tiefgarage die Temperaturen, die relative Feuchte sowie der CO₂-Gehalt aufgezeichnet.

Die neben der Regelung der Gebäudetechnik werden im Leitrechner auch sieben Wärmemengenzähler aufgezeichnet, wie sie in Abbildung 16 dargestellt sind. Dies sind die Wärmemengen aus den Erdsonden, die abgegebene Wärmemenge der beiden Wärmepumpen, des Warmwassers, der Zirkulation, der Fußbodenheizung sowie der Solarthermie.

Die Anbindung der Messfühler erfolgte vor allem im Haustechnik-Raum via Kabel, im restlichen Gebäude über den EnOcean-Funk-Standard. Hierzu mussten im Gebäude fünf Repeater sowie eine externe Empfängerantenne installiert werden.

Erste Messperiode ist der Zeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum 31.12.2018.

Tabelle 9: Liste der Zähler und Fühler.

BMKZ	Bezeichnung
60Z2	Wärmezähler Erdsonden
60Z4	Wärmezähler Wärmepumpe HT
60Z6	Wärmezähler Wärmepumpe NT
60Z8	Wärmezähler Brauchwarmwasser
61Z2	Wärmezähler Zirkulation
61Z4	Wärmezähler FBH Wohnungen
61Z6	Wärmezähler Solarladung
62Z2	Wasserzähler Hauptwasserzähler
65Z2	Energiezähler Gemeinschaftsraum
65Z3	Energiezähler Top 4
65Z4	Energiezähler Top 1
65Z6	Energiezähler Top 2
65Z7	Energiezähler Top 3
66Z2	Energiezähler Top 5
66Z3	Energiezähler Top 6
66Z4	Energiezähler Top 7
66Z6	Energiezähler Top 8
66Z7	Energiezähler Top 9

67Z2	Energiezähler Top 10
67Z3	Energiezähler Top 11
67Z4	Energiezähler Top 12
67Z6	Energiezähler Top 13
67Z7	Energiezähler Top 14
68Z2	Energiezähler Top 15
68Z3	Energiezähler Top 16
68Z4	Energiezähler Top 17
68Z6	Energiezähler Top 18
70Z2	Wärmezähler FBH Gemeinschaftsraum
70Z3	Warmwasserzähler Gemeinschaftsraum
70Z5	Wärmezähler FBH Top 4
70Z6	Warmwasserzähler Top 4
71Z2	Wärmezähler FBH Top 5
71Z3	Warmwasserzähler Top 5
71Z5	Wärmezähler FBH Top 6
71Z6	Warmwasserzähler Top 6
72Z2	Wärmezähler FBH Top 7
72Z3	Warmwasserzähler Top 7
72Z5	Wärmezähler FBH Top 12
72Z6	Warmwasserzähler Top 12
73Z2	Wärmezähler FBH Top 13
73Z3	Warmwasserzähler Top 13
73Z5	Warmwasserzähler FBH Top 14
73Z6	Warmwasserzähler Top 14
74Z2	Wärmezähler FBH Top 1
74Z3	Warmwasserzähler Top 1
74Z5	Wärmezähler FBH Top 2
74Z6	Warmwasserzähler Top 2
75Z2	Wärmezähler FBH Top 3
75Z3	Warmwasserzähler Top 3
75Z5	Wärmezähler FBH Top 8
75Z6	Warmwasserzähler Top 8
76Z2	Wärmezähler FBH Top 9
76Z3	Warmwasserzähler Top 9
76Z5	Wärmezähler FBH Top 10
76Z6	Warmwasserzähler Top 10
77Z2	Wärmezähler FBH Top 11
77Z3	Warmwasserzähler Top 11
77Z5	Wärmezähler FBH Top 15
77Z6	Warmwasserzähler Top 15
78Z2	Wärmezähler FBH Top 16
78Z3	Warmwasserzähler Top 16
78Z5	Wärmezähler FBH Top 17

78Z6	Warmwasserzähler Top 17
79Z2	Wärmezähler FBH Top 18
79Z3	Warmwasserzähler Top 18
85N3	SI-Thermostat FBH Wohnungen
95B2	Temperatur- Feuchtefühler Außen
98B2	Strömungssensor Abluftventilator
100B2	Temperatur Austritt Erdsonden
100B3	Temperatur Eintritt Erdsonden
100B4	Temperatur Austritt Kondensator WMP HT
100B5	Temperatur Eintritt Kondensator WMP HT
100B6	Temperatur Austritt Kondensator WMP NT
100B7	Temperatur Eintritt Kondensator WMP NT
101B2	Temperatur Boiler HT- Bereich Oben
101B3	Temperatur Boiler HT- Bereich Mitte
101B4	Temperatur Boiler Mitte - unten
101B5	Temperatur Boiler NT- Bereich Oben
101B6	Temperatur Boiler NT- Bereich Mitte
101B7	Temperatur Boiler NT- Bereich Unten
102B2	Temperatur Kollektor 1
102B3	Temperatur Kollektor 2
102B4	Temperatur Kollektor 3
102B5	Temperatur Kollektor 4
102B6	Temperatur Kollektor 5
102B7	Temperatur Kollektor 6
102B8	Temperatur Kollektor 7
103B2	Temperatur VL FBH Wohnungen
103B3	Temperatur Brauchwarmwasser
103B4	Temperatur Zirkulation

2.3 Messunsicherheiten

Alle Messungen sind mit Messunsicherheiten belastet. Damit die Energiemengen korrekt bewertet werden können, wurden die Eichtoleranzen der Wärmemengenzähler nach der Physikalisch Technischen Bundesanstalt: Technische Richtlinien K 7.1 (Ausgabe: 11/06) bewertet. Die eingesetzten Wärmemengenzähler ISTA ultego® III perfect haben eine Messgenauigkeit nach EN 1434 in der Klasse 2/3.

Eichfehlergrenzen Wärmemengenzähler: Die Eichfehlergrenzen sind festgelegt als arithmetische Summe aus den Eichfehlergrenzen der Teilgeräte: $E = E_f + E_c + E_t$

- Volumenstrommessung:
 - Genauigkeitsklasse 2: $E_f = \pm (2 + 0,02 \text{ qp/ q})$, begrenzt auf $\pm 5 \%$
 - Genauigkeitsklasse 3: $E_f = \pm (3 + 0,05 \text{ qp/ q})$, begrenzt auf $\pm 5 \%$

- Rechenwerk:
 $E_c = \pm (0,5 + \Delta\theta_{\min} / \Delta\theta)$
- Temperaturmessung:
 $E_t = \pm (0,5 + 3 \Delta\theta_{\min} / \Delta\theta)$

Bewertet man z.B. den Wärmemengenzähler der Warmwasser Zirkulation, so ergibt sich unter der Annahme, dass der Nenndurchfluss gleich dem gemessenen Durchfluss ist (Genauigkeitsklasse 2):

$$E_f = \pm (2 + 0,02 \cdot 1) = 2,02 \%$$

$$E_c = \pm (0,5 + 3 / 5) = 1,1 \%$$

$$E_t = \pm (0,5 + 3 \cdot (3/5)) = 2,3 \%$$

$$E = E_f + E_c + E_t = 2,02 + 1,1 + 2,3 = 5,4 \%$$

Im Minimalfall, wenn in allen Gleichungen der zweite Teil nahezu null werden, würde sich eine Eichfehlergrenze von $2+0,5+0,5= 3\%$ für die Genauigkeitsklasse 2 ergeben oder 4% für die Genauigkeitsklasse 3.

Bei Wärmezählern gelten Eichfehlergrenzen bis zu 10% , die Verkehrsfehlergrenzen sind doppelt so groß. Innerhalb dieser Fehlergrenzen gelten die Messgeräte gesetzlich als richtig.

Laut PTB-Prüfregeln, Band 6, dritte Auflage Teil M Eichtechnische Prüfung von Elektrizitätszählern nach § 7h der Eichordnung („MID- Zähler“) beträgt die Eichfehlergrenze in der Genauigkeitsklasse A (Haushalte) $3,5 - 4\%$. Die erlaubten Verkehrsfehlergrenzen des Zählers (die während der Betriebsdauer des Zählers auftreten dürfen) sind nochmals doppelt so hoch, wie die oben angegebenen Eichfehlergrenzen. Daher empfiehlt der Bund der Energieverbraucher, erst ab einer gemessenen Abweichung von 15% zwischen dem Stromzähler und ggf. vorhandenen eigenen Messeinrichtungen, eine Überprüfung des Zählers beim Netzbetreiber zu veranlassen.

Es wird bei der Interpretation der Monitoringergebnisse bei den gemessenen Wärmemengen und Strommengen von einer Messungengenauigkeit von etwa 5% ausgegangen.

3 Ergebnisse Kosten

Die Netto-Errichtungskosten zum Projektstand Vergabe wurden im ersten Zwischenbericht mit 2.530 EUR/m²_{WNF} angegeben und bezogen sich auf die für den damaligen Planstand ermittelte WNF von 1.263m². Dieser Wert liegt auch allen Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu Grunde. Alle nachfolgend genannten Kosten und Energiekennwerte beziehen sich auf die nach Ausführung ermittelte WNF von 1.281,08 m²_{WNF} für die 18 Wohneinheiten sowie den Gemeinschaftsraum.

Die abgerechneten Netto-Errichtungskosten liegen mit 2.400 EUR/m²_{WNF} um 130 EUR/m²_{WNF} **unter** dem Kostenstand Vergabe, was die gute Planungs- und Projektsteuerungsqualität unterstreicht.

Die abgerechneten Netto-Errichtungskosten liegen um 238 EUR/m²_{WNF} **unter** der für das KliNaWo projektspezifisch ermittelten Kostengrenze der Wohnbauförderung Vorarlberg von 2.638 EUR/m²_{WNF}.

Zur Einordnung der abgerechneten Netto-Errichtungskosten zeigt die folgende Grafik einen Vergleich mit den entsprechenden Kosten aller 69 in etwa zeitgleich ausgeschriebenen und errichteten gemeinnützigen Wohnbauten in Vorarlberg.

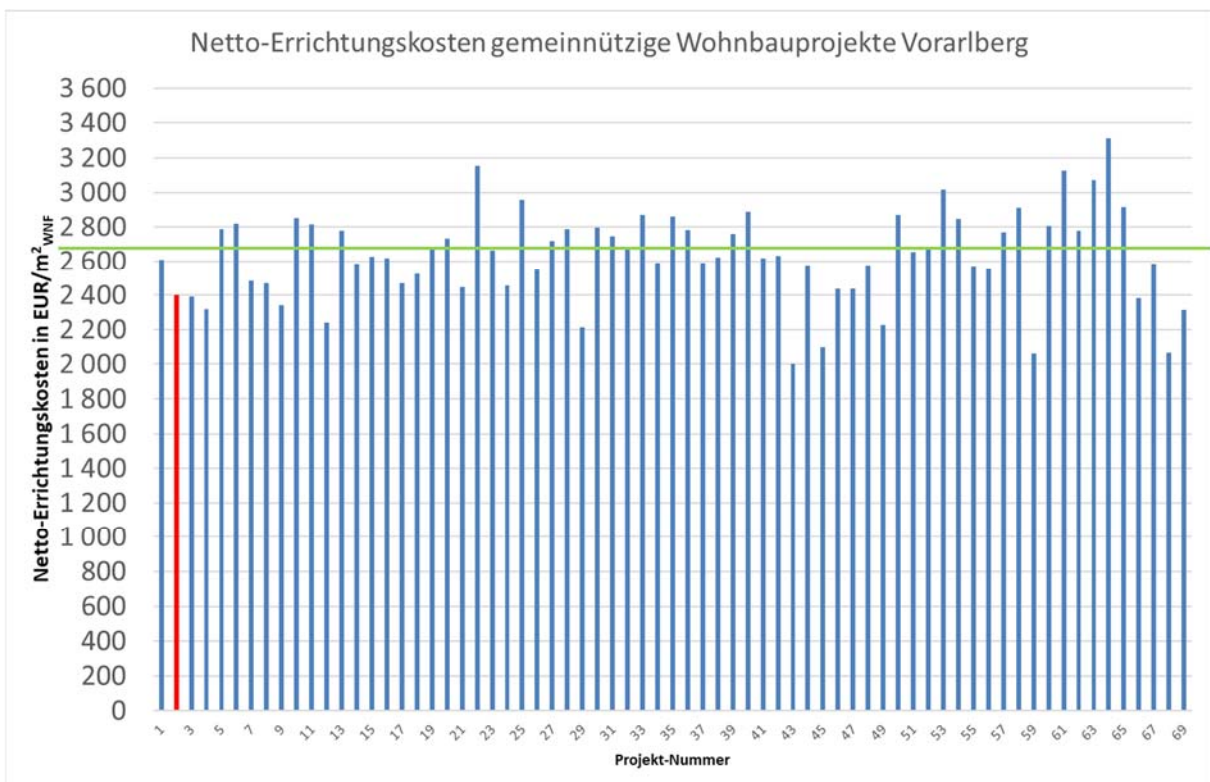


Abbildung 26: Netto-Errichtungskosten des Projekts KliNaWo im Vergleich zu denen aller zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen in Vorarlberg [3].

Wie zu erkennen, schwanken die abgerechneten Netto-Errichtungskosten der 69 zeitgleich mit dem KliNaWo-Projekt errichteten gemeinnützigen Wohnbauprojekte zwischen 2.000 und ca. 3.300 EUR/m²_{WNF}. Bei den günstigsten Projekten mit Kosten von 2.000 bis 2.200 EUR/m²_{WNF}

handelt es sich um Projekte des Programms „Wohnen 500“, die mit einem reduzierten Ausstattungsstandard errichtet wurden.

Der Mittelwert der abgerechneten Errichtungskosten der 69 zeitgleich errichteten gemeinnützigen Projekte in Vorarlberg liegt bei 2.630 EUR/m²_{WNF}. Die Kosten des KliNaWo-Projekts liegen damit um 230 EUR/m²_{WNF} **unter** dem Mittelwert. Der Vergleich mit dem Mittelwert der zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen ist sehr aussagekräftig, da das KliNaWo-Projekt bewusst so ausgewählt wurde, dass es bezüglich Größe und Wohnungsanzahl repräsentativ für den gemeinnützigen Wohnbau in Vorarlberg ist. Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der wichtigsten Kenndaten des KliNaWo-Projekts mit den Mittelwerten der gleichzeitig errichteten gemeinnützigen Wohnbauten.

Tabelle 7: Kenndaten des Projekts KliNaWo und der zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnbauten.

		KliNaWo	Mittelwert gemeinnützige
Anzahl der Wohneinheiten	Stück	19	16
WNF	m ²	1.281	1.109
Durchschnittliche WNF pro Wohnung	m ²	67,4	68
Netto-Errichtungskosten	EUR/m ² _{WNF}	2.400	2.630

3.1 Auswirkungen auf Finanzierung und die Miete

Als Folge der vergleichsweise niedrigen Errichtungskosten musste die VOGEWOSI für das Projekt KliNaWo keine Annuitätzuschüsse des Landes in Anspruch nehmen.

Die Miete inkl. Betriebskosten wurde in zwei Schritten von etwa 9,45 EUR/m²_{WNF} auf 9,20 EUR/m²_{WNF} reduziert – zunächst aufgrund der niedrigen Errichtungskosten, nach dem ersten Betriebsjahr erneut aufgrund der geringen Energiekosten.

3.2 Detailanalyse Haustechnikkosten

In der folgenden Tabelle sind die abgerechneten Haustechnikkosten (ÖNORM 1801-1, KG 3, Bauwerk-Technik) der ausgeführten Variante den Kosten bei Stand Vergabe gegenübergestellt. Da für das Gewerk Elektro keine Auswertung der abgerechneten Kosten vorliegt, fehlt dieses Gewerk in der Tabelle und wird danach ergänzt.

Tabelle 8: Netto-Haustechnikkosten zum Stand Vergabe und abgerechnete Kosten.

Position	Kosten Stand Vergabe	Kosten Stand Abrechnung		
	EUR	EUR	EUR/m ² _{WNF}	EUR/Wohneinheit
Sanitär	136.269,42	153.256,60	121,34	8.066,00
Heizung	170.772,67	169.050,88	133,84	8.897,41
Solar	47.451,43	52.721,18	41,74	2.274,80
Lüftung	42.419,85	46.487,46	36,81	2.446,71
Rege- lung	25.469,70	26.581,41	21,05	1.399,02
Summe netto	422.383,07	448.097,53	354,78	23.083,94

Wie zu erkennen liegen die abgerechneten Kosten um etwa 25.700 EUR über den Kosten zum Stand Vergabe. Der mit knapp 17.000 größte Teil dieser Abweichung entfällt auf nicht energierelevante Maßnahmen im Bereich Sanitär. Die Mehrkosten für die energierelevanten Obergruppen Heizung, Solar, Lüftung und Regelung betragen etwa 8.700 EUR, dies entspricht etwa 6,80 EUR/m²_{WNF}. Die geringen Mehrkosten der energierelevanten Haustechnik entstanden u.a. durch den Wechsel zu einem größeren Solarregister im Kombispeicher und aufgrund baulicher Mehrkosten bei der Montage der Zuluft-Außenwandelemente.

Die sehr geringe Abweichung der abgerechneten Haustechnikkosten von der Vergabesumme zeugt von einer hervorragenden Qualität der Haustechnikplanung. Das im Projekt KliNaWo beauftragte Büro e-plus hatte Qualität und Kosten trotz modularer Ausschreibung mit 60.000 Varianten sehr gut im Griff.

Ergänzt man die oben aufgeführten Kosten um 102,40 EUR/m²_{WNF} für das Gewerk Elektro, so erhält man die Kosten der KG 3 lt. ÖNORM 1801-1. Diese betragen 354,78 EUR für Sanitär, Heizung, Solar, Lüftung und Regelung (Stand abgerechnete Kosten, siehe Tabelle oben) + 102,40 EUR (Elektro, Stand Vergabe), also gesamt 457,18 EUR/m²_{WNF}.

Bei Bauwerkskosten von ca. 1.974 EUR/m²_{WNF} (Stand Vergabe) entspricht dies einem Anteil der Haustechnikkosten von 23%.

3.3 Einfluss der Grundstückskosten

Wie im ersten Zwischenbericht dargestellt, liegen die Netto-Bauwerkskosten der im Lebenszyklus kostenoptimalen Ausführungsvariante um 61 EUR/m²_{WNF} über den Kosten einer Variante mit Hülle nach Mindestanforderungen nach BTV, Wärmepumpe und ohne thermische Solaranlage. Dies entspricht Mehrkosten von 3% der Bauwerkskosten. Offensichtlich sind die Mehrkosten für Energieeffizienz nicht der Haupt-Kostentreiber beim Bau von Wohngebäuden. Analysiert man die Gründe für den starken Anstieg der Verkaufspreise von Wohnungen und

Häusern in Vorarlberg, so fällt der starke Anstieg der Grundstückspreise ins Auge. Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der Grundstückspreise in Feldkirch von 2008 bis 2019 [13].

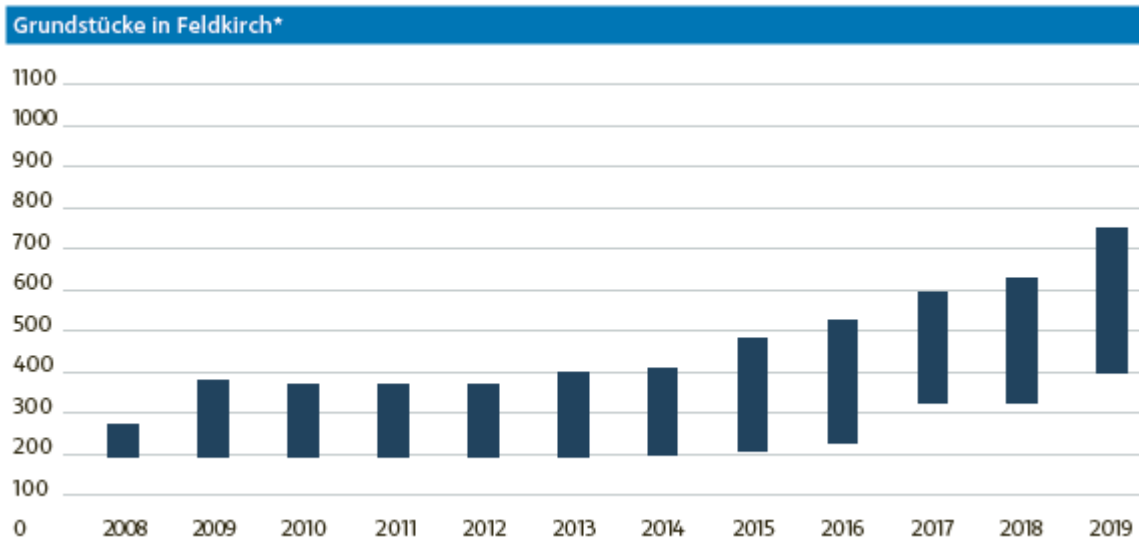


Abbildung 27: Grundstückspreisentwicklung im Rückblick 2008 bis 2019 – Feldkirch [13].

Die Grundstückspreise zum Zeitpunkt der Ausschreibung des KliNaWo-Projekts 2015 lagen bei etwa 210 bis 480 EUR/m², im Mittel also etwa bei 345 EUR/m². Im Jahr 2019 lagen sie zwischen 400 und 750 EUR/m², im Mittel also bei 575 EUR/m².

In der folgenden Abbildung wird am Beispiel des KliNaWo-Gebäudes verdeutlicht, wie sich diese Entwicklung auf den Kaufpreis einer Wohnung auswirken würde.

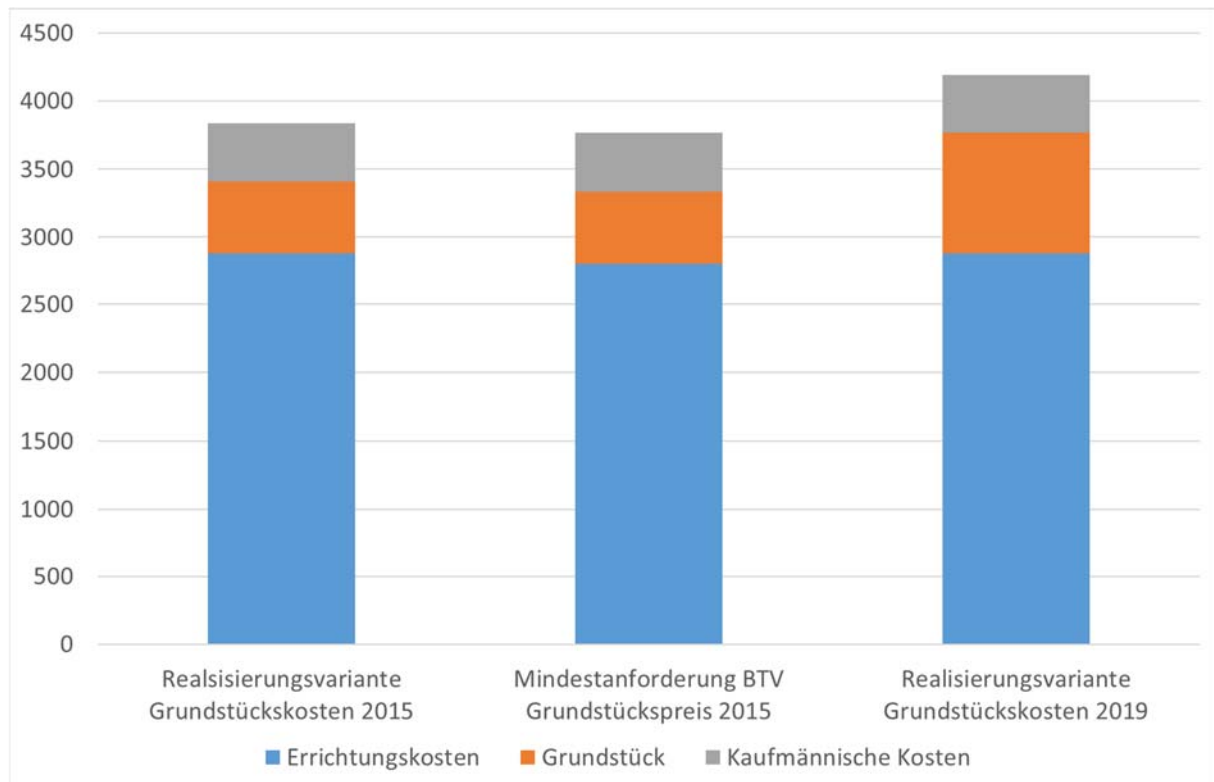


Abbildung 28: Auswirkung der Erhöhung der energetischen Qualität und der Grundstückspreisentwicklung der vergangenen Jahre auf den imaginären Kaufpreis einer Wohnung im MFH KliNaWo.

In der Abbildung sollen die Größenordnungen vermittelt werden, in denen die Verbesserung der Energieeffizienz (Reduktion Energiebedarf und CO₂-Emissionen um etwa 2/3) sowie die Entwicklung der Grundstückskaufpreise in Vorarlberg in den vergangenen 4 Jahren den Kaufpreis einer imaginären Wohnung im KliNaWo-Gebäude beeinflussen.

Dargestellt sind

- die abgerechneten Errichtungskosten (Ausschreibung Sommer 2015, Bau 2016/17) der Ausführungsvariante und der Variante nach BTV mit dem gleichen Wärmeerzeuger und ohne Solarthermie
- die kaufmännischen Kosten eines gewerblichen Bauträgers. Diese werden für alle drei dargestellten Varianten gleich hoch und etwas niedriger angesetzt, als in der Studie von Hassler [14]
- die Grundstückskosten. Angesetzt wurden die o.g., mittleren Grundstückskosten von 345 EUR/m² im Jahr 2015 und von 575 EUR/m² im Jahr 2019. Für das KliNaWo-Gebäude ergibt sich aufgrund der örtlich festgesetzten BNZ ein Grundstücksbedarf von etwa $1,53\text{m}^2_{\text{Grundstück}} \text{ pro } \text{m}^2_{\text{WNF}}$

Die linke Säule zeigt den imaginären Verkaufspreis der Realisierungsvariante unter Annahme des mittleren Grundstückspreises von 2015. Es ergäbe sich ein imaginärer Verkaufspreis von 3.837 EUR/m²_{WNF}.

Die mittlere Säule zeigt den imaginären Verkaufspreis der Variante nach den Mindestanforderungen der BTV unter Annahme des mittleren Grundstückspreises von 2015. Es ergäbe sich ein imaginärer Verkaufspreis von 3.764 EUR/m²_{WNF}. Der imaginäre Verkaufspreis liegt damit für die energetisch schlechtere Variante um 73 EUR/m²_{WNF} niedriger, als für die im Lebenszyklus kostenoptimale Variante mit ca. 2/3 Energieeinsparung.

Die rechte Säule zeigt den imaginären Verkaufspreis der Realisierungsvariante unter Annahme des mittleren Grundstückspreises von 2019. Es ergäbe sich ein imaginärer Verkaufspreis von 4.190 EUR/m²_{WNF}. Der imaginäre Verkaufspreis steigt also durch den Anstieg des mittleren Grundstückspreises in den letzten 4 Jahren um 353 EUR/m²_{WNF}.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass der Anstieg der Grundstückspreise in 4 Jahren einen etwa 5-mal höheren Einfluss auf den imaginären Kaufpreis einer Wohnung hat, als die Reduktion des Energiebedarfs um etwa 2/3 gegenüber den Mindestanforderungen der Bautechnikverordnung.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Entwicklung der Verkaufs- und Mietpreise von Wohnungen ist die Entwicklung der Baukosten. Diese sind in den vergangenen Jahren aufgrund der niedrigen Zinssätze und der auch dadurch entstandenen Hochkonjunktur im Bausektor stärker gestiegen als die allgemeinen Lebenshaltungskosten und als die Einkommen. Auf eine Analyse des Einflusses der Baukostensteigerung auf die Verkaufs- und Mietpreise wird verzichtet, da keine eigenen Indizes für Vorarlberg vorliegen.

4 Ergebnisse Monitoring

4.1 Klimadaten

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur in der ersten Messperiode vom 01. Januar bis zum 31. Dezember 2018.

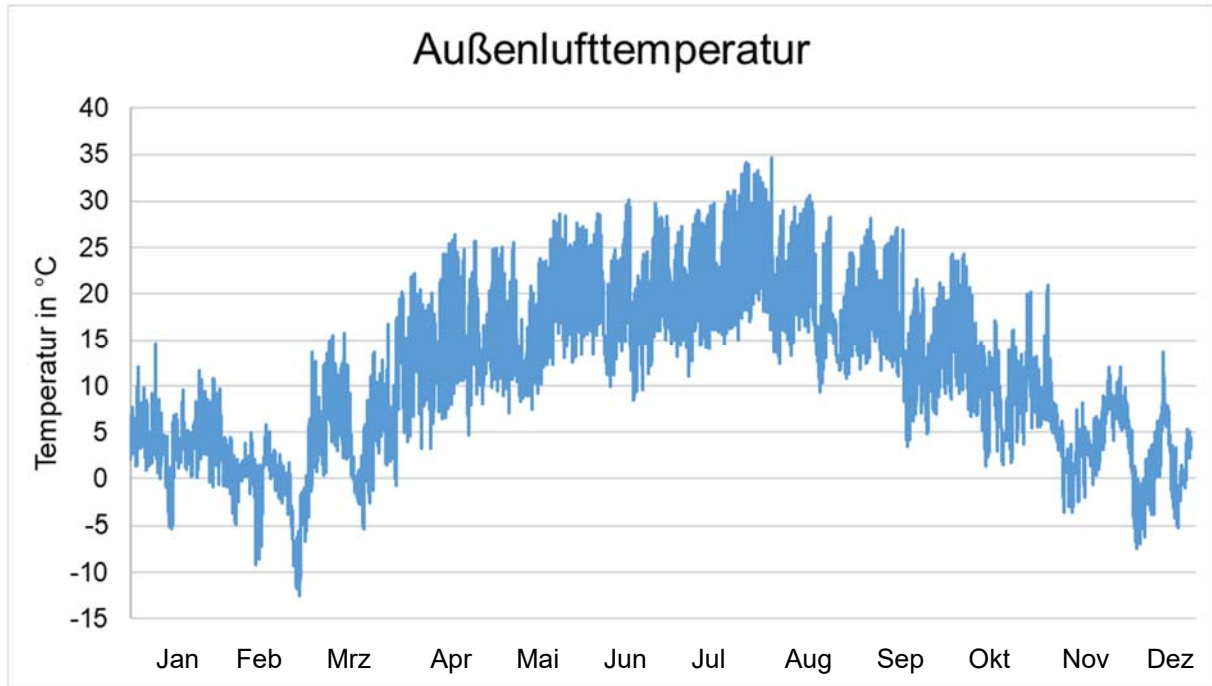


Abbildung 29: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur (halbstündliche Messwerte).

Wie zu erkennen, traten die niedrigsten Außenlufttemperaturen Ende Februar/Anfang März auf. Die minimale Außenlufttemperatur betrug $-12,7^{\circ}\text{C}$ am 28. Februar 2018 um 03:15 Uhr. Ebenfalls erkennbar ist die lange Hitzeperiode des „Jahrhundertsommers“ 2018 mit einem Maximum von $35,2^{\circ}\text{C}$ am 09. August 2018 um 16:00 Uhr.

In Abbildung 30 sind die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur dargestellt.

Die Abbildung verdeutlicht, dass der Februar mit Abstand der kälteste Monat war und dass die Monatsmittelwerte von Juni bis August nahe 20°C bzw. deutlich darüber lagen.

Zur Einordnung sind die gemessenen Monatsmittelwerte des Jahres 2018 in Tabelle 10 den Werten unterschiedlicher Klimadatenätze für Feldkirch gegenübergestellt.

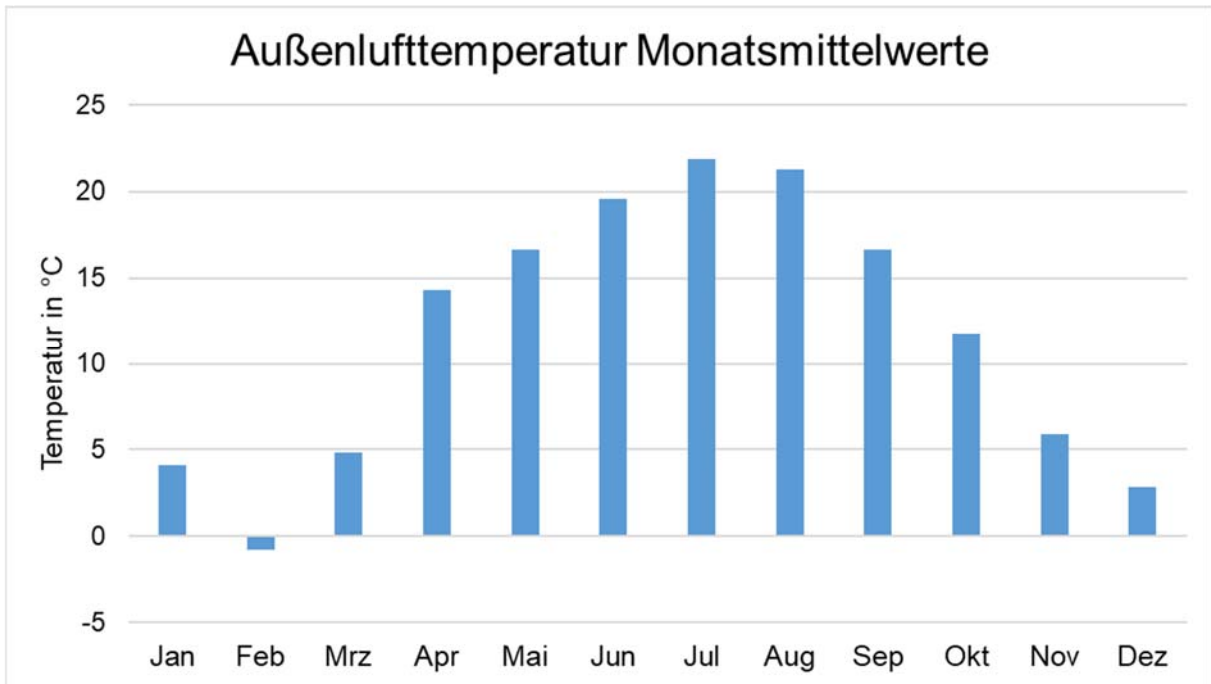


Abbildung 30: Außenlufttemperatur der ersten Messperiode (Jan bis Dez 2018) als Monatsmittelwerte.

Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Außenlufttemperatur mit Annahmen aus verschiedenen Quellen.

Datensatz / Quelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr	HP (1-3 + 10-12)
Außenlufttemperatur in °C														
(1) Messwerte KliNaWo (2018)	4,1	-0,8	4,8	14,3	16,6	19,6	21,9	21,2	16,6	11,8	5,9	2,8	11,6	4,0
(2) Klima DB (ZAMG) 1971-2000	-0,7	0,7	4,8	8,4	13,5	16,3	18,4	17,9	13,9	9,0	3,5	0,5	8,9	3,0
(3) B 8110-5 (2011)	-1,3	0,4	4,0	8,2	12,6	15,7	17,8	17,0	14,0	9,1	3,6	-0,2	8,4	2,6
(4) Meteonorm 1996-2005	0,0	1,7	6,0	9,6	14,6	17,9	18,2	18,8	14,4	10,2	4,3	1,2	9,7	3,9
(5) Meteonorm 1961-1990	-0,3	1,2	5,0	8,6	12,9	15,7	17,7	17,1	14,4	9,9	4,6	0,7	9,0	3,5
(6) PHPP Feldkirch (ZAMG) ältere Periode	-0,7	0,3	4,3	8,7	13,3	16,1	18,0	17,4	14,4	9,5	4,2	0,1	8,8	3,0
(7) TRY Feldkirch (ZAMG) 1994-2012	-0,4	1,9	5,3	10,1	15,3	17,4	18,4	17,8	15,0	9,3	5,3	1,0	9,7	3,7
(8) IPCC Szenario A1b (2050)	1,7	3,6	6,8	10,5	14,6	17,7	20,1	19,8	16,9	12,0	6,5	2,8	11,1	5,6

- Nr. 1: Messwerte Projekt am Projektstandort (KliNaWo-Gebäude), 2018
- Nr. 2: Klimadatensatz der ZAMG für Feldkirch für die Jahre 1971 bis 2000
- Nr. 3: Datensatz für den Standort gemäß ÖNORM B 8110-5 (2011)
- Nr. 4: Datensatz Feldkirch gemäß Meteonorm für Periode von 1996 bis 2005 [15]
- Nr. 5: Datensatz Feldkirch gemäß Meteonorm für Periode von 1961 bis 1990 [15]
- Nr. 6: Datensatz Feldkirch gemäß PHPP
- Nr. 7: Testreferenzjahr (TRY) Feldkirch (ZAMG 1994-2012) [16]
- Nr. 8: IPCC Szenario A1B (2050) – mittleres Szenario, generiert mit der Software aus Meteonorm [15]

Der Vergleich zeigt, dass die Jahresmitteltemperatur im Messjahr 2018 (Datensatz 1) um 1,9 bis 3,2 K über den langjährigen Mittelwerten gemäß der anderen Klimadatensätze lag.

Der Mittelwert der Heizperiode HP (Januar bis März sowie Oktober bis Dezember) liegt für das Jahr 2018 ebenfalls höher als die langjährigen Mittelwerte der anderen Klimadatensätze. Der Unterschied fällt jedoch mit 0,1 bis 1,4K weit geringer aus, als für das Gesamtjahr. Der Heizperioden-Mittelwert des Jahres 2018 von 4,0°C liegt nur geringfügig über den Mittelwerten der Datensätze, die auf Daten aus den vergangenen 20 bis 30 Jahren beruhen: So liegt der mit Meteonorm [15] generierte Klimadatensatz auf Grundlage der Messwerte der Periode 1996 bis 2005 (Datensatz 4) bei 3,9°C, der des Testreferenzjahres auf Basis der Messwerte der ZAMG für die Jahre 1994 bis 2012 bei 3,7°C (Datensatz 7).

Die Mittelwerte der Klimadatensätze, die auf den Messwerten weiter zurückliegender Perioden beruhen, liegen mit 2,6 bis 3,5°C deutlich niedriger, als die mit aktuelleren Messperioden.

Wie der Vergleich zeigt, sind die Messdaten des Jahres 2018 bezüglich der Heizperiode repräsentativ für die vergangenen 2 bis 3 Jahrzehnte.

Im Gegensatz dazu liegen die Messwerte des Jahres 2018 im Sommer weit über den Werten aller in den Klimadatensätzen abgebildeten langjährigen Perioden. So liegt etwa der Monatsmittelwert für den Juli 2018 um 3,4° über dem Vergleichswert des langjährigen Mittelwertes im Datensatz mit den höchsten Sommertemperaturen. Im August liegt der 2018er Wert um 2,4K höher, als der nächst hohe Monatsmittelwert, im Juni um 2,1K.

Vergleicht man die Messwerte des Jahres 2018 mit Daten, die auf älteren Messperioden beruhen (ÖNORM B8110, Teil 5 (2011), PHPP-Standard-Klimadatensatz Feldkirch), so sind die Unterschiede noch weit größer.

In Tabelle 11 sind die im Jahr 2018 gemessenen Monatsmittelwerte den Werten der Vergleichsdatsätze gegenübergestellt.

Tabelle 11: Vergleich der Globalstrahlungswerte aus verschiedenen Quellen.

Datensatz / Quelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr	HP (1-3 + 10- 12)
	Globalstrahlung in kWh/m ² Monat													
(1a) ZAMG 2018	36	47	84	159	177	205	200	162	131	83	42	26	1.352	318
(4) Meteonorm 1991-2010	38	58	102	138	159	167	175	147	109	73	39	30	1.235	340
(6) PHPP Feld- kirch (ZAMG ältere Periode)	35	55	92	120	153	154	168	142	102	69	35	27	1.152	313
(7) TRY Feld- kirch (ZAMG 1994-2012)	37	50	100	125	149	160	162	140	102	80	39	26	1.170	332

Nr. 1a: Messdaten 2018 an der Mess-Station Feldkirch der ZAMG (nicht am Projektstandort in Feldkirch-Tosters)

Nr. 4: Strahlungsdaten aus Meteonorm 7 für Standort Feldkirch, Periode 1991-2010

Nr. 6: Datensatz Feldkirch gemäß PHPP

Nr. 7: Testreferenzjahr (TRY) Feldkirch (ZAMG 1994-2012) [16]

Wie zu erkennen, lag die Jahressumme der Globalstrahlung im Messjahr 2018 deutlich über den Vergleichswerten der anderen Datensätze für Feldkirch. Grund ist der sehr strahlungsreiche Sommer. Die Globalstrahlung während der Heizperiode lag 2018 in der gleichen Größenordnung wie die Werte der Vergleichsdatsätze.

Zusätzlich zur Auswertung der Monatswerte der Außenlufttemperatur sind in der folgenden Abbildung die Viertelstundenwerte für die kälteste Winterwoche (24.02. bis 03.03.2018) dargestellt. Die kälteste Phase des Jahres trat 2018 untypisch spät auf. So wurde die kälteste Temperatur von -12,7°C am 28.02. erreicht und die Temperatur stieg während der gesamten dargestellten Woche nur sehr kurzzeitig auf Werte über 0°C an.

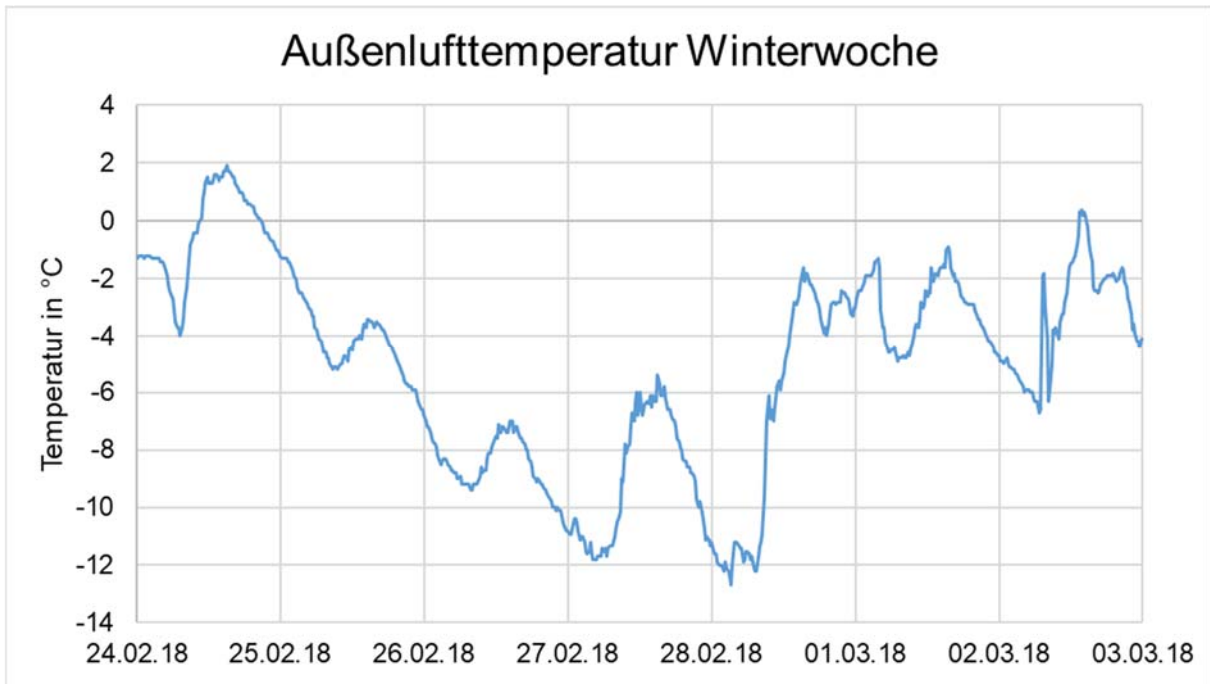


Abbildung 31: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).

Die darauffolgende Abbildung zeigt die Viertelstundenwerte der Außenlufttemperatur für die wärmste Sommerwoche (30.07. bis 06.08.2018). Die höchsten Außenlufttemperaturen der Messperiode traten Ende Juli/Anfang August auf. An 2 Tagen wurden Temperaturen über 34°C erreicht, an 4 weiteren Tagen lagen die Höchstwerte bei 30 bis knapp 34°C. Selbst am wenigsten heißen Tag wurde ein Tageshöchstwert von 30° erreicht. Die minimalen Nachttemperaturen lagen zwischen knapp über 17 bis knapp 20°C.

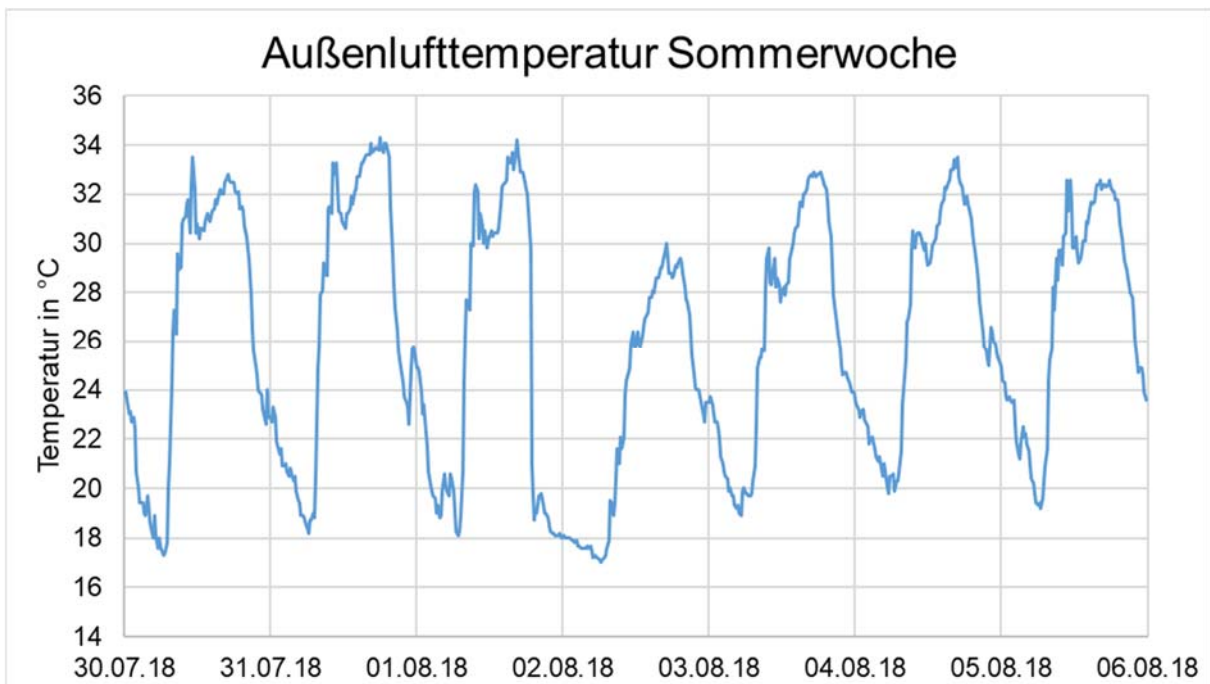


Abbildung 32: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).

4.2 Behaglichkeitsparameter Temperatur/Feuchte/CO₂

4.2.1 Raumlufthemperaturen Wohnungen und Gemeinschaftsraum

In den folgenden Abbildungen^a ist der Verlauf der Raumlufthemperaturen aller einzelnen Wohnungen sowie des Mittelwertes aller Wohnungen für das komplette erste Messjahr dargestellt. Die erste Grafik zeigt die Mittelwerte der einzelnen Wohnungen, die zweite die Werte der Wohnzimmer, die dritte die der Schlafzimmer und die vierte die der Badezimmer.

Dargestellt sind jeweils die Tagesmittelwerte der Temperatur, daher sind die nur kurzfristig auftretenden Spitzen der Außenlufttemperatur von bis über 35°C nicht ablesbar.

Die detaillierte Analyse der Temperaturverläufe in der kältesten Winter- und der wärmsten Sommerwoche finden sich in Abbildung 37 bis Abbildung 44.

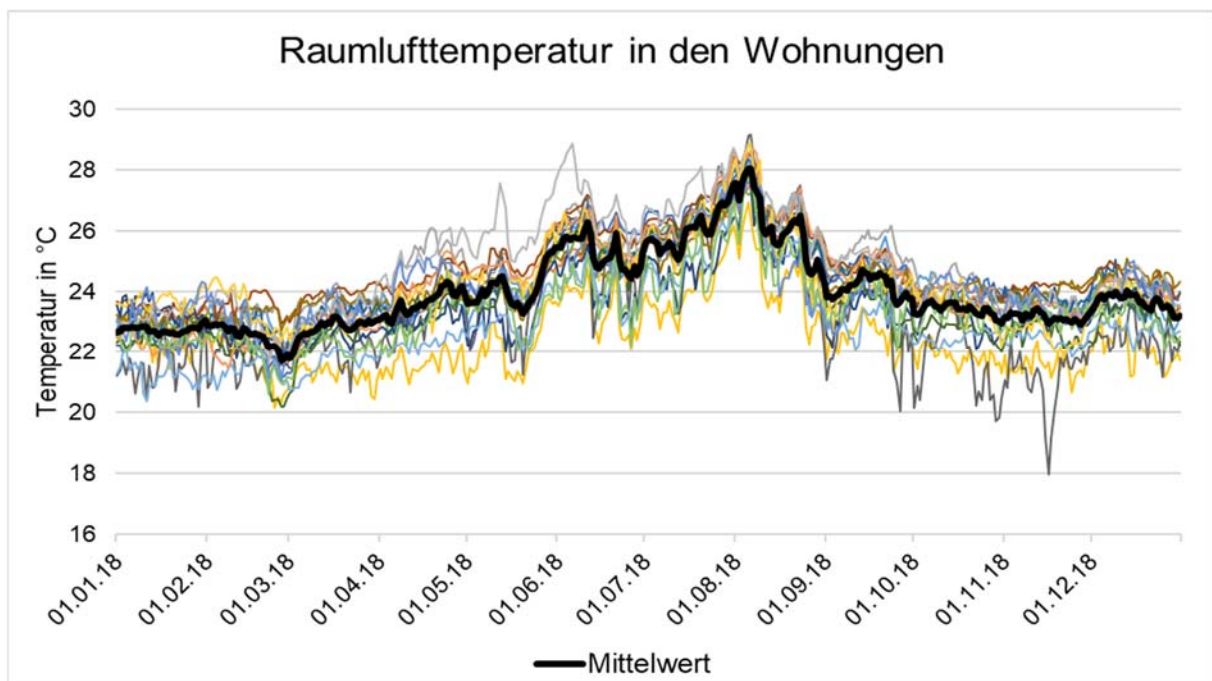


Abbildung 33: grafischer Verlauf der Raumlufthemperatur in den Wohnungen (Tagesmittelwerte).

Der flächengewichtete Jahresmittelwert der Raumlufthemperatur betrug im Messjahr 2018 24,0°C. Die Temperaturen im „Jahrhundertsummer“ 2018 liegen im KliNaWo-Gebäude in ähnlichen Bereichen wie in üblichen Neubauten. Für die empfundene Behaglichkeit ist nicht alleine die Raumlufthemperatur maßgeblich, sondern die operative Temperatur sowie andere Behaglichkeitsparameter wie die relative Feuchte.

^a Anmerkung zu den Abbildungen: Da in den Abbildungen die Tagesmittelwerte dargestellt sind, sind kurzzeitig auftretende Extrema nicht erkennbar.

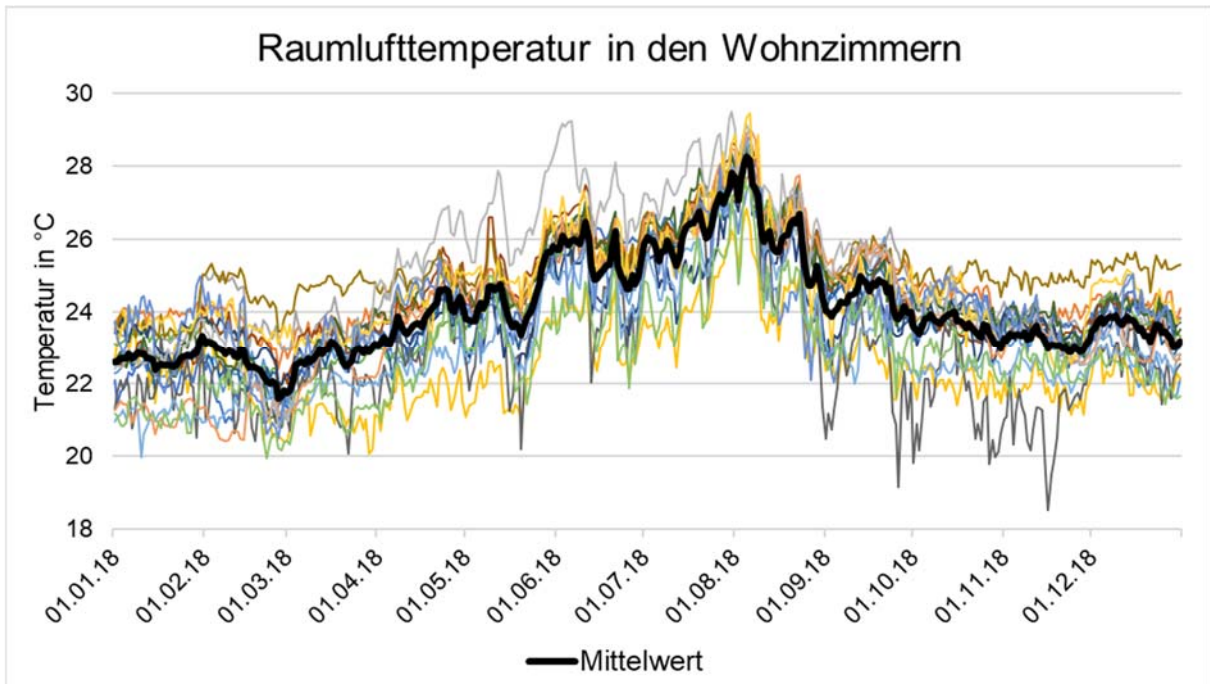


Abbildung 34: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Wohnzimmern (Tagesmittelwerte).

Die Abbildung zeigt, dass der Temperaturverlauf in den Wohnzimmern kaum von dem der flächengewichteten Mittelwerte der Wohnungen abweicht. Wie zu erkennen, unterscheiden sich die Temperaturen der einzelnen Wohnzimmer zum gleichen Zeitpunkt meist um mehr als 4K.

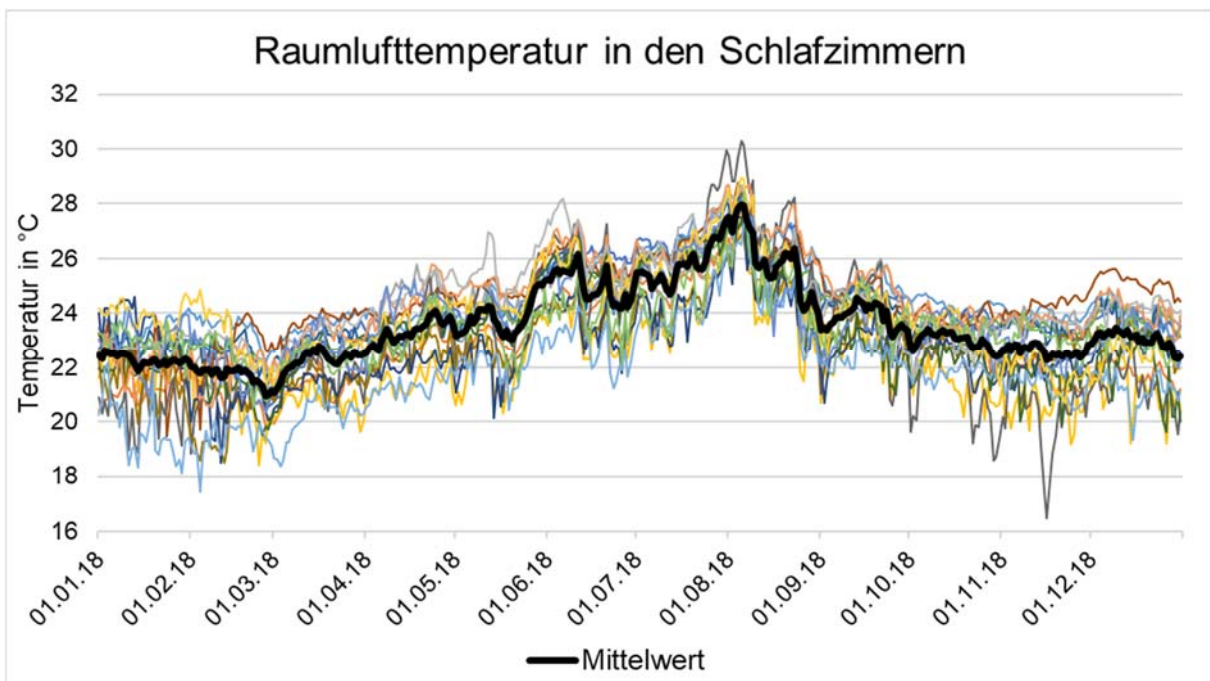


Abbildung 35: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Schlafzimmern (Tagesmittelwerte).

Auch die Temperaturen in den Schlafzimmern zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Wohnzimmer und die wohnungsmittleren Temperaturen. Die Werte der einzelnen Schlafzimmer unterscheiden sich zum gleichen Zeitpunkt meist um etwa 4 bis 5K.

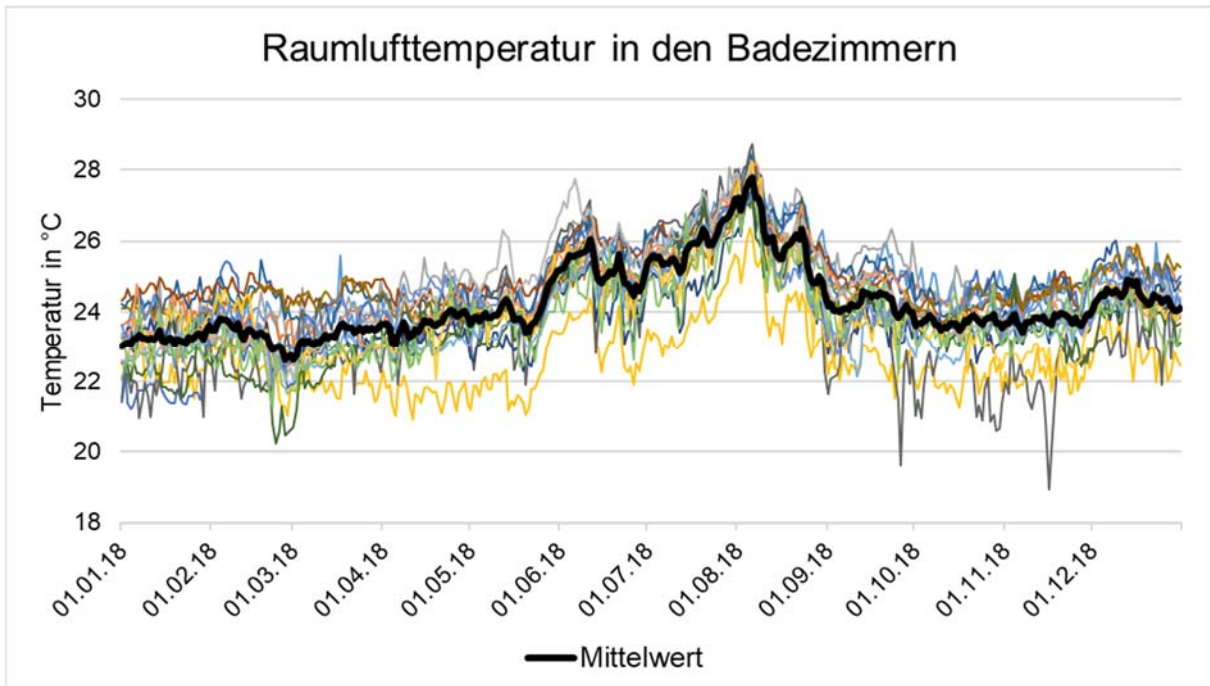


Abbildung 36: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Badezimmern (Tagesmittelwerte).

Der Verlauf der Temperaturen in den Bädern ähnelt dem Temperaturverlauf der anderen Räume.

Tabelle 12: Vergleich der flächengewichteten Raumlufthtemperaturen in Wohnzimmer, Schlafzimmer, Bad und gesamter Wohnung.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Jahr	HP 1-3 + 10-12
Wohnen	°C	22,7	22,6	22,7	23,8	24,3	25,5	26,3	26,3	24,4	23,6	23,2	23,6	24,1	23,2
Schlaf- fen	°C	22,3	21,7	22,2	23,3	23,8	25,0	25,8	25,9	23,9	23,0	22,6	23,0	23,6	22,6
Bad	°C	23,2	23,3	23,3	23,7	24,0	25,2	25,9	26,1	24,2	23,7	23,8	24,4	24,2	23,6
alle Räume	°C	22,7	22,5	22,8	23,6	24,1	25,3	26,0	26,2	24,1	23,4	23,2	23,7	24,0	23,1

Die Vergleichstabelle zeigt, dass die Temperaturdifferenzierung zwischen den einzelnen Raumtypen nicht sehr stark ausfällt. Die niedrigsten mittleren Raumlufthtemperaturen treten ganzjährig in den Schlafzimmern auf, die höchsten in den Bädern.

Die mittlere Raumlufthtemperatur aller Wohnungen während der Heizperiode liegt mit 23,1°C im Bereich der von Fanger genannten Werte, für die eine größtmögliche Zufriedenheit mit der thermischen Behaglichkeit erreicht wird

Die Messwerte des Projekts KliNaWo bestätigen die Erfahrungen aus anderen Monitoringprojekten in hocheffizienten Gebäuden, dass die Bewohner eine mittlere Temperatur im Winter

wählen, die dem Optimum der thermischen Behaglichkeit nahekommst, wenn sie dies ohne große Mehrkosten erreichen können.

Kälteste Winterwoche

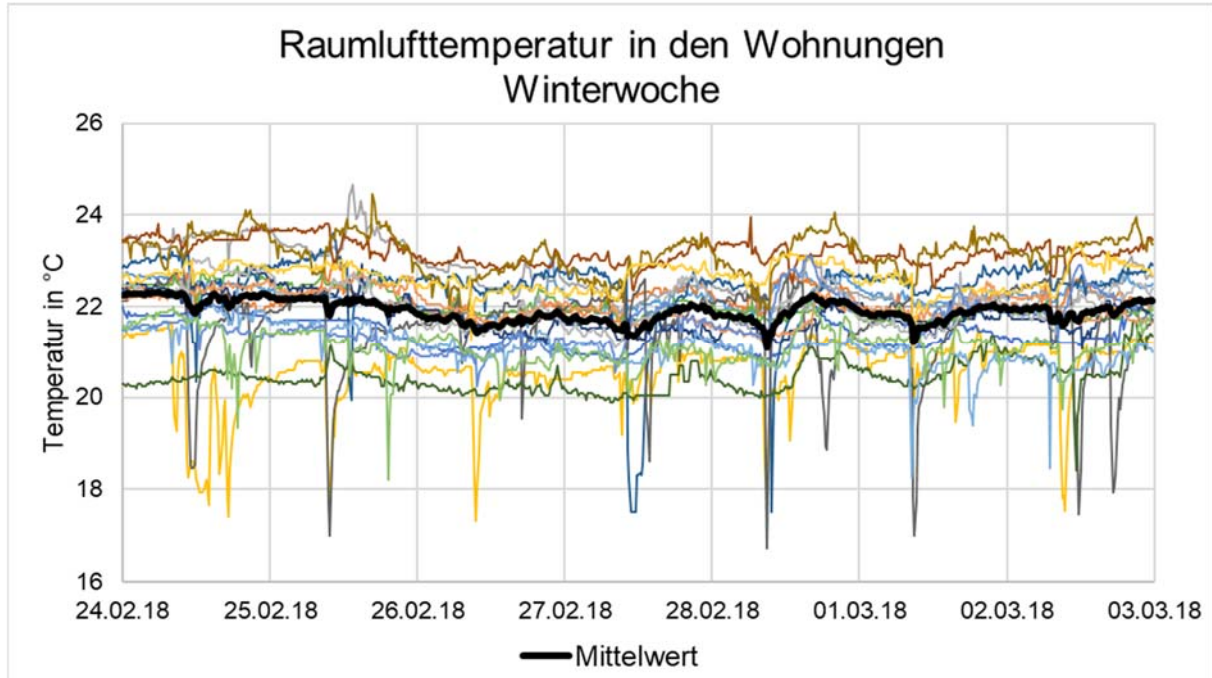


Abbildung 37: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnungen während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundennmesswerte).

Die Raumlufthtemperatur im Mittel aller Wohnungen liegt in der kältesten Winterwoche mit Außentemperaturen bis $-12,7^{\circ}\text{C}$ bei $21,9^{\circ}\text{C}$. Der Wochen-Mittelwert der einzelnen Wohnungen liegt im Bereich von $21,1^{\circ}\text{C}$ bis $22,3^{\circ}\text{C}$. Die Werte der einzelnen Wohnungen liegen in einem Temperaturband zwischen etwa 20 bis 24°C . Auch in der kältesten Winterwoche ist kein Abfall der Raumlufthtemperatur erkennbar.

Wie die Abbildung zeigt, wird in mindestens drei Wohnungen regelmäßig, z.T. zweimal täglich über die Fenster gelüftet. In Folge dieser zusätzlichen Fensterlüftung fallen die Raumlufthtemperaturen kurzfristig auf Werte zwischen 17 und $18,5^{\circ}\text{C}$, steigen jedoch sehr schnell wieder auf über 20°C .

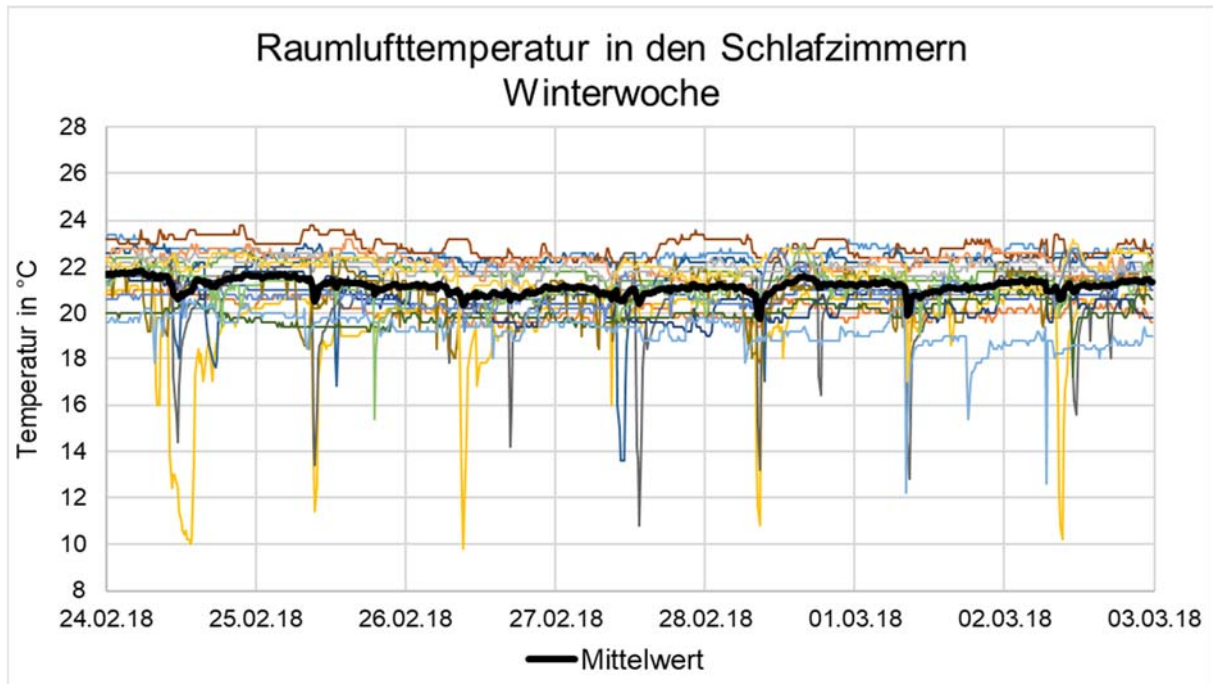


Abbildung 38: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Schlafzimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundemesswerte).

Wie die Abbildung zeigt, liegt der Mittelwert der Raumlufttemperaturen aller Schlafzimmern in der kältesten Winterwoche in einem Bereich zwischen 19,7 und 21,8°C. Der Mittelwert aller Schlafzimmer liegt bei 21,2°C. Die Werte der einzelnen Wohnungen liegen in einem Temperaturband von etwa 18 bis 23,5°C.

Wie zu erkennen wird in den Wohnungen 4, 7, 9 und 18 in merklichem Ausmaß zusätzlich über die Fenster gelüftet – entweder durch Öffnen oder Kippen. An zwei einzelnen Tagen wird auch in Top 13 zusätzlich über die Fenster gelüftet. In diesen Wohnungen sinkt die Raumlufttemperatur auf Werte zwischen 14 und 18°C, in zwei Wohnungen sehr kurzfristig auch auf 10 bis 12°C. Die Temperaturverläufe zeigen, dass die Raumlufttemperatur nach Schließen der Fenster sehr schnell wieder auf 18 bis 21°C steigen.

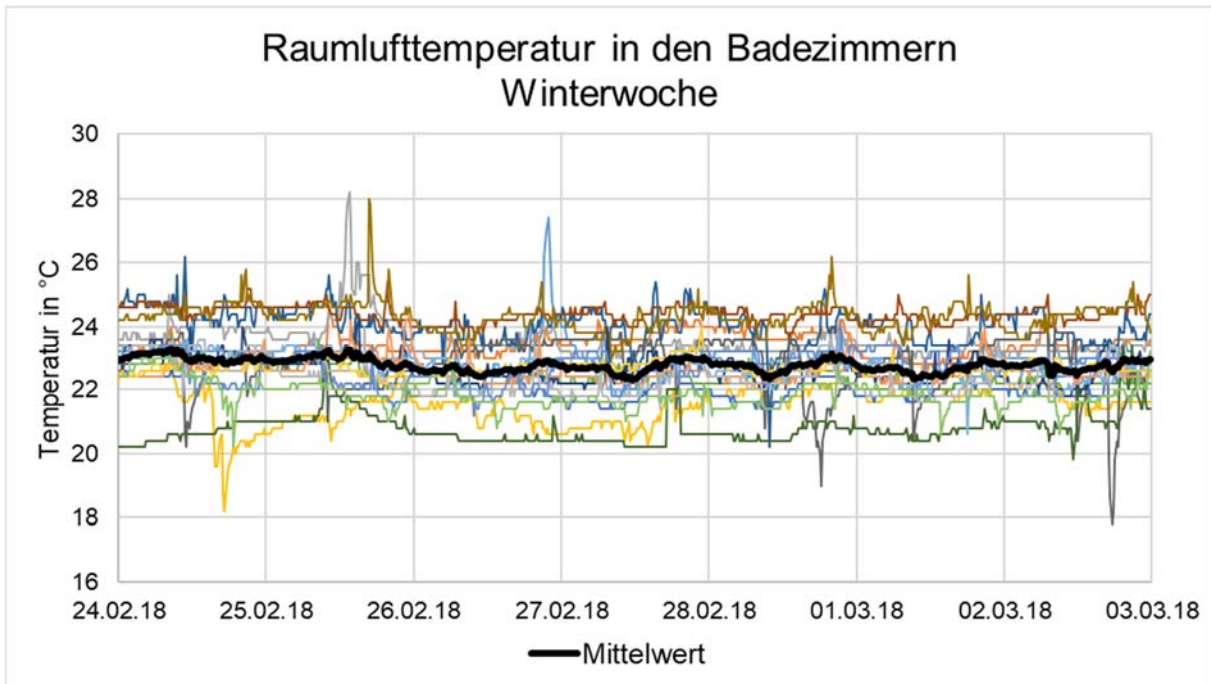


Abbildung 39: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Badezimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).

Die Raumlufthtemperatur im Mittel aller Badezimmer liegt in der kältesten Winterwoche bei 22,8°C. Mit Ausnahme von zwei Wohnungen liegen die Werte der einzelnen Bäder in einem Temperaturband von etwa 21,5 bis knapp 25°C.

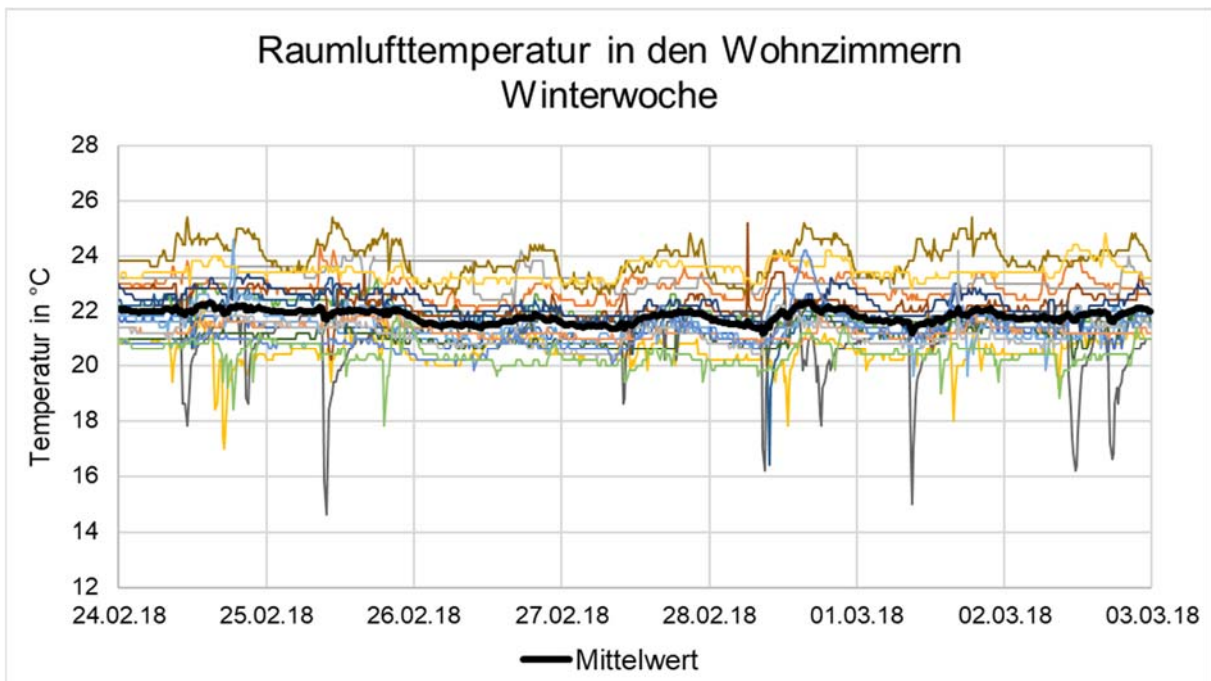


Abbildung 40: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnzimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).

In den Wohnzimmern zeigen sich ähnliche Verläufe der Raumlufttemperatur, wie in den anderen Räumen. Die Temperaturen im Wohnzimmer liegen etwas über denen in den Schlafzimmern. Auch in den Wohnzimmern wird in etwa drei Wohnungen in unterschiedlichem Ausmaß zusätzlich über die Fenster gelüftet.

Wärmste Sommerwoche

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Raumlufttemperatur im Mittel aller Wohnungen sowie die Werte in jeder einzelnen Wohnung für die wärmste Sommerwoche mit Außenlufttemperaturen von max. 35,2°C. Der Verlauf der Außenlufttemperatur ist ebenfalls dargestellt. Die vertikalen Gitternetzlinien stellen jeweils 00:00 Uhr dar. Dargestellt sind Viertelstundemesswerte.

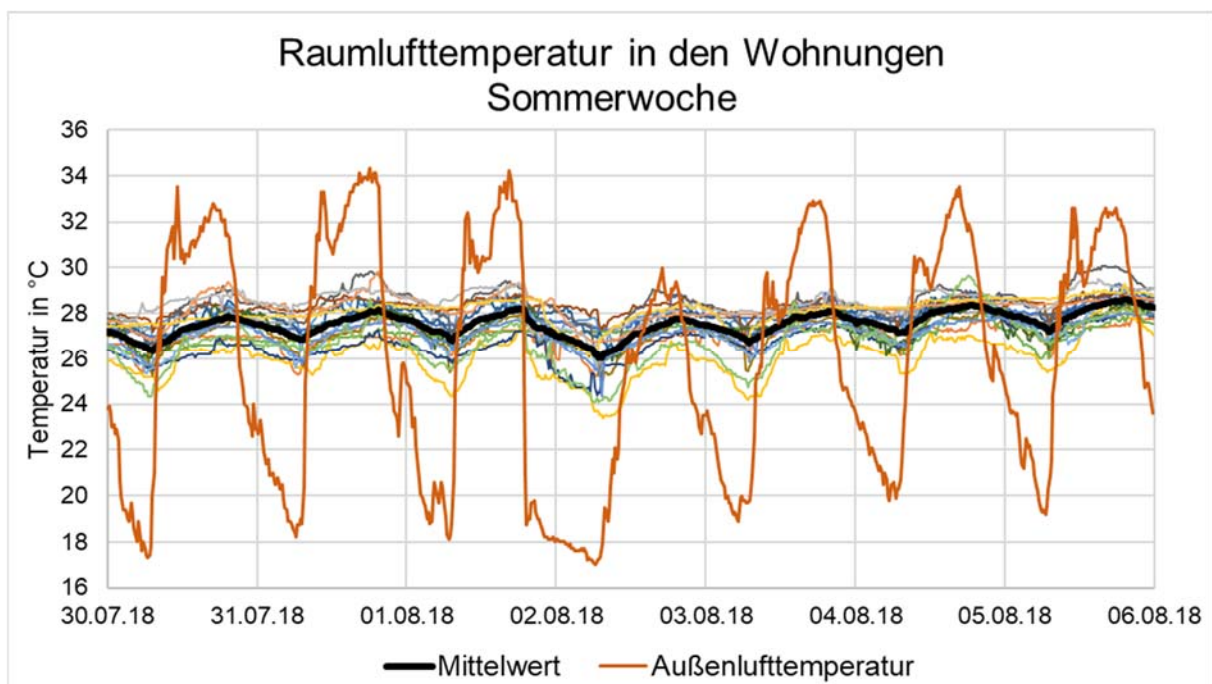


Abbildung 41: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnungen während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).

Wie zu erkennen unterscheiden sich die mittleren Raumlufthtemperaturen der einzelnen Wohnungen deutlich. Die zeitgleich gemessenen Werte liegen in einem Temperaturband mit meist etwa 3-5K Spreizung.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Wohnungen werden in der folgenden Tabelle detaillierter dargestellt.

Tabelle 13: Maximum und Minimum der Raumlufttemperatur in den Wohnungen sortiert nach Maximum von niedrig bis hoch während der wärmsten Woche im Sommer 2018.

Top	Raumlufttemperatur Wohnungen Maximum Sommerwoche	Raumlufttemperatur Wohnungen Minimum Sommerwoche	Ausrichtung der Fenster
2	27,8	25,2	SO
17	28,0	24,4	SO / SW
6	28,3	25,5	NW
10	28,4	25,0	SO / SW
4	28,5	23,4	SW
12	28,5	25,9	SW / NW
11	28,7	24,4	SW
1	28,9	25,6	NO / SO
3	29,0	27,0	SO / SW
8	29,0	26,9	NO / SO
13	29,0	25,3	NW
5	29,3	27,0	SW / NW
7	29,3	26,4	NW / NO
16	29,3	26,1	SO
15	29,5	26,6	NO / SO
18	29,7	24,1	SW
14	29,8	26,7	NW / NO
9	30,1	25,9	SO
Mittelwert über alle Tops	28,9	25,6	
Außenlufttem- peratur	34,3	17,0	

Die Maxima der in der wärmsten Sommerwoche gemessenen Raumlufttemperaturen schwanken zwischen 27,8 und 30,1 C. Die Minima liegen zwischen 23,4 und 27,0°C und zeigen damit noch stärkere Schwankungen als die Maxima. Die Zuordnung der Wohnungen zu den Haupthimmelsrichtungen zeigt, dass andere Einflussgrößen als die Orientierung für die wohnungsweise unterschiedlichen Raumlufttemperaturen ursächlich sind. Haupteinflussfaktoren sind vermutlich die Verschattung der Fenster und die nächtliche Lüftung über die Fenster zur Kühlung der Wohnung.

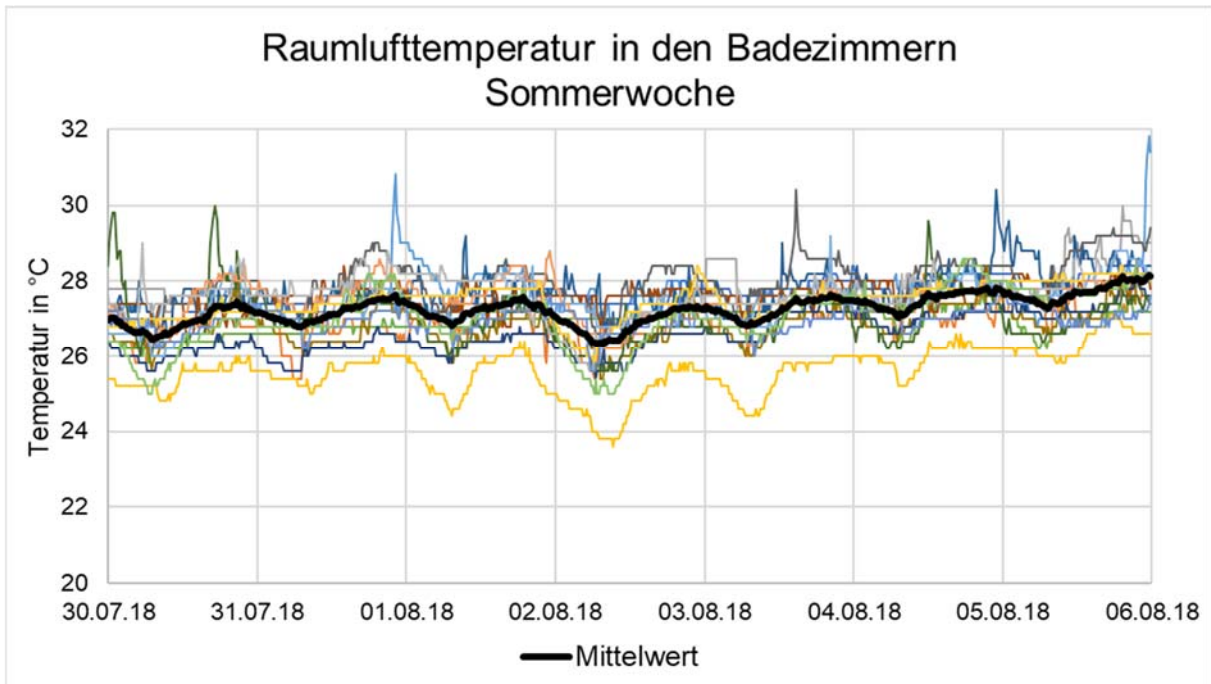


Abbildung 42: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Badezimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).

Die in der wärmsten Sommerwoche gemessene mittlere Raumlufttemperaturen im Bad liegen am Anfang der Hitzeperiode bei etwa 27°C, am Ende bei knapp 28°C. Auch in den Badezimmern zeigen sich große Unterschiede der gleichzeitig gemessenen Temperaturen.

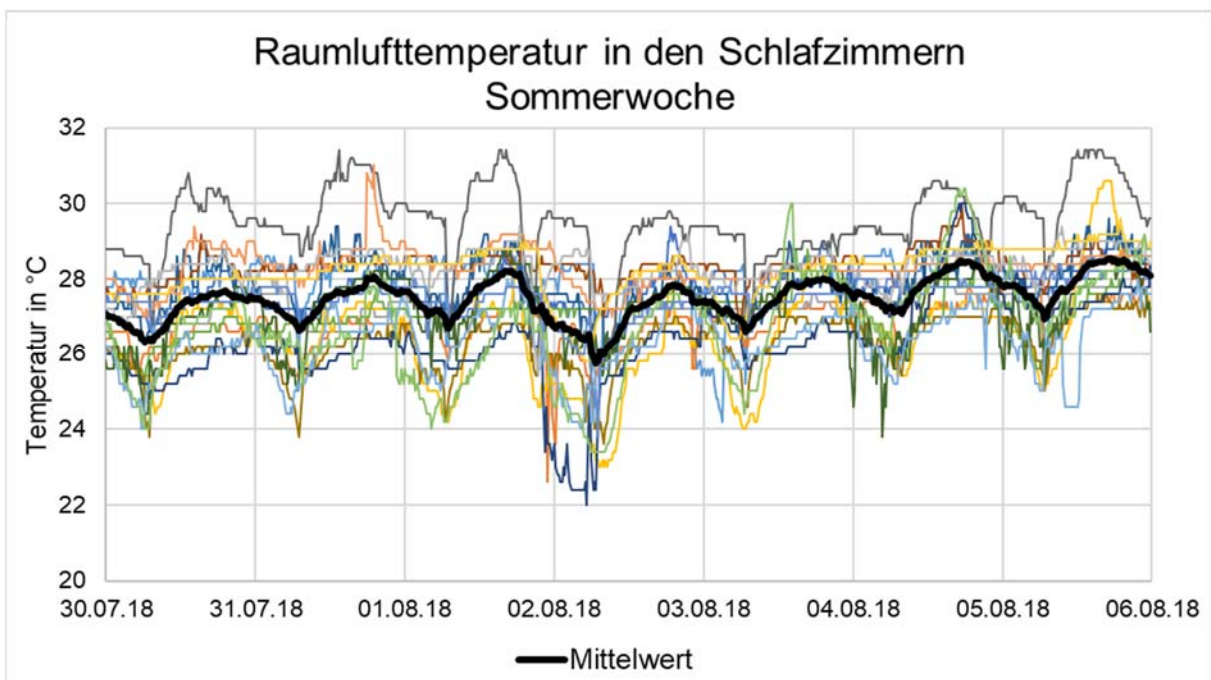


Abbildung 43: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Schlafzimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).

Wie zu erkennen differieren die Raumlufftemperaturen in den einzelnen Schlafzimmern je nach Nutzerverhalten um etwa 5 bis 6K, im Extremfall sogar um bis zu 8K. Wie die folgende Tabelle zeigt, können diese großen Unterschiede nicht aus der Orientierung abgeleitet werden. Sie sind vielmehr stark vom Nutzerverhalten (Verschattung tagsüber und Fensterlüftung nachts) abhängig: Während in der Nacht vom 02.08. zum 03.08. mehrere Wohnungen Raumlufftemperaturen von etwa 22 bis 24°C aufweisen, liegen die Temperaturen in anderen Wohnungen, in denen nachts nicht zusätzlich über die Fenster gelüftet wird, bei 28 bis 30°C.

Tabelle 14: Maximum und Minimum der Raumlufftemperatur in den Schlafzimmern sortiert nach Maximum von niedrig bis hoch während der wärmsten Woche im Sommer 2018.

Top	Raumlufftemperatur Schlafzimmer Maximum Sommerwoche	Raumlufftemperatur Schlafzimmer Minimum Sommerwoche	Ausrichtung Fenster
10	27,6	23,6	SO / SW
2	27,8	22,6	SO
13	28,0	24,0	NW
17	28,4	23,8	SO / SW
1	28,8	24,2	NO / SO
3	28,8	26,6	SO / SW
12	28,8	23,8	SW / NW
6	29,0	25,0	NW
5	29,4	26,6	SW / NW
15	29,4	25,4	NO / SO
7	29,6	26,2	NW / NO
16	29,6	25,8	SO
8	30,0	26,4	NO / SO
11	30,0	22,0	SW
18	30,4	23,4	SW
4	30,6	23,0	SW
14	31,0	27,0	NW / NO
9	31,4	25,8	SO
Mittelwert über alle Tops	29,4	24,7	
Außenlufttemperatur	34,3	17,0	

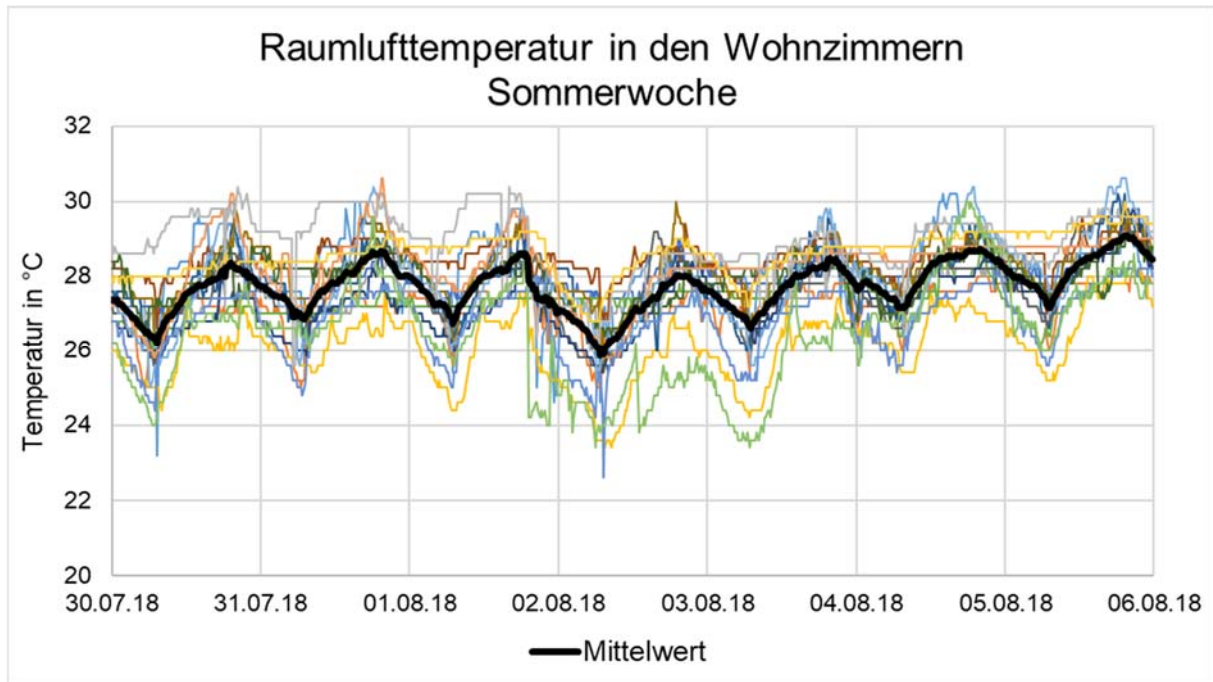


Abbildung 44: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur in den Wohnzimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundemesswerte).

Wie in den Schlafzimmern differieren auch die Raumlufttemperaturen der Wohnzimmer je nach Nutzerverhalten deutlich. Zwischen der Temperatur in der wärmsten und der kältesten Wohnung liegen typischerweise etwa 4 bis 5K.

4.2.2 Raumlufttemperaturen Stiegenhaus, Tiefgarage und Keller

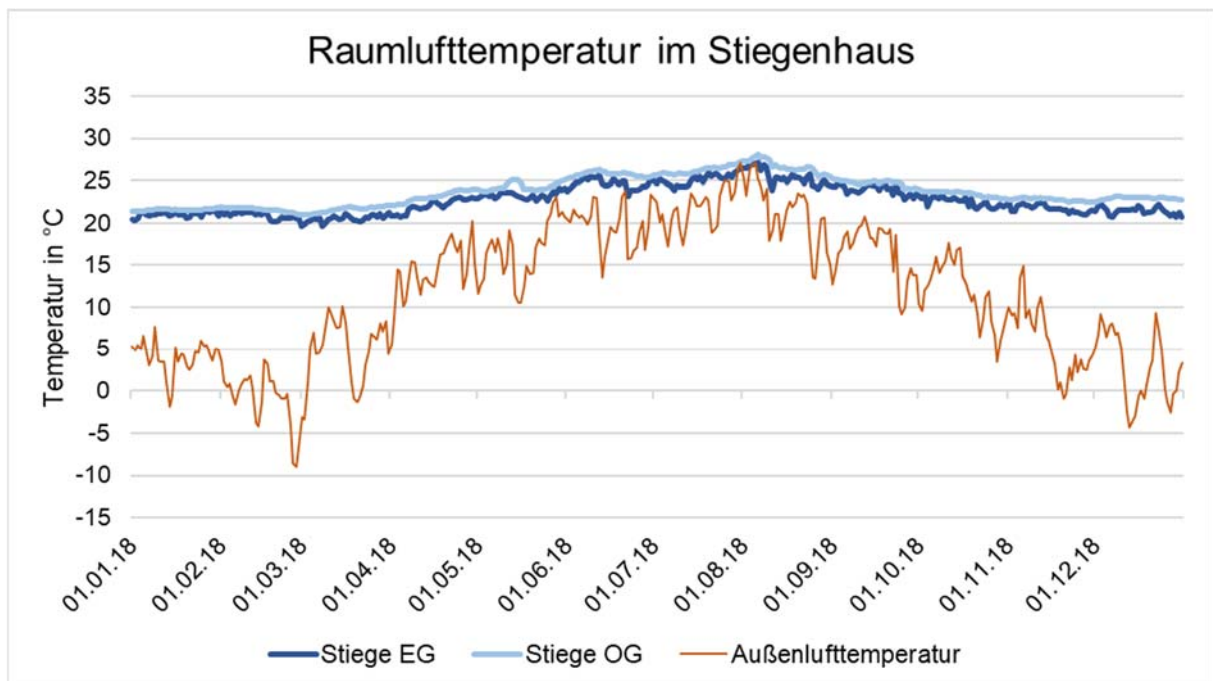


Abbildung 45: grafischer Verlauf der Raumlufttemperatur im Stiegenhaus verglichen mit der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwerte).

Abbildung 45 zeigt den Verlauf der Raumlufthtemperatur im EG und im OG des Stiegenhauses sowie die Außenlufttemperatur während des gesamten Messjahres 2018. Da die Darstellung in Tagesmittelwerten erfolgt, sind kurzfristige Extremwerte nicht erkennbar. Die Temperaturen im Sommer sind in der folgenden Abbildung in einer Auflösung von ¼ Stunden dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass im nicht direkt beheizten Stiegenhaus ganzjährig Raumlufthtemperaturen zwischen etwa 20 und 27, kurzzeitig 28°C auftreten.

Die Messwerte zeigen, dass es durch den im Inneren des Gebäudes aufgestellten 6.740 Liter-Pufferspeicher zu keinem nennenswerten Wärmeeintrag in den Gebäudekern kam. Wie andere Forschungsprojekte zeigen, ist dies nicht selbstverständlich, da große Speicher im Gebäudekern durchaus zu ungewollten Wärmeeinträgen und Behaglichkeitseinschränkungen führen können.

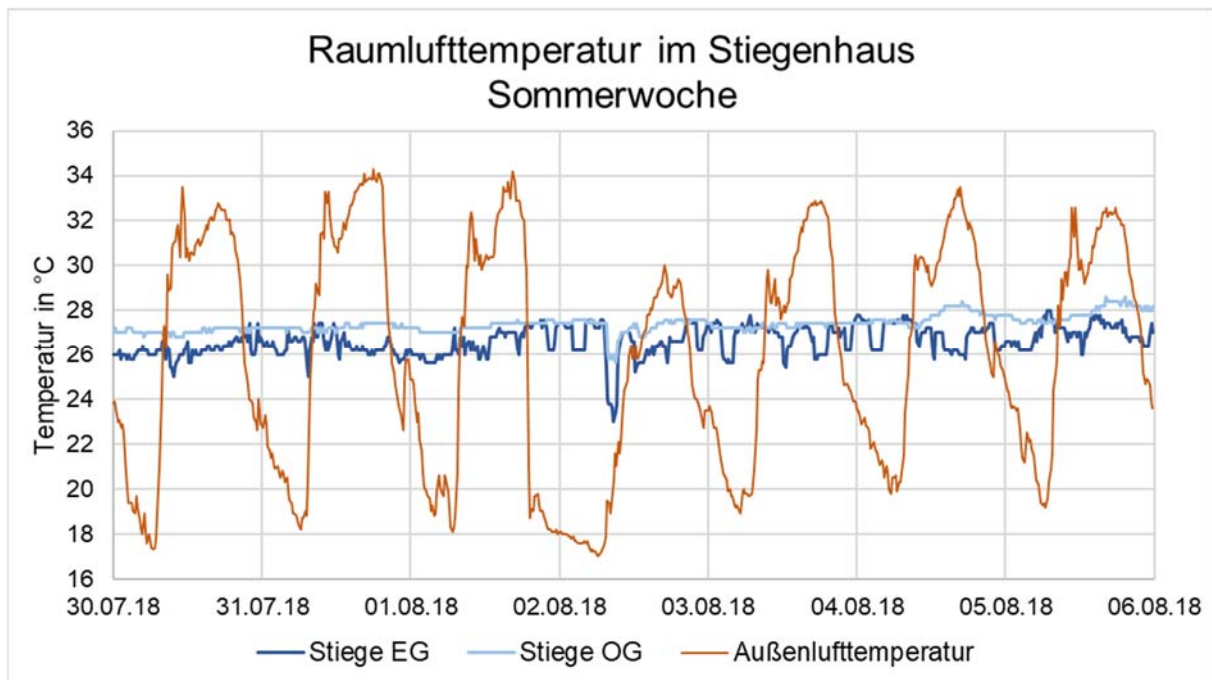


Abbildung 46: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur im Stiegenhaus während der wärmsten Woche im Sommer 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).

Wie zu erkennen liegen die Raumlufthtemperaturen im Stiegenhaus im Gebäudekern in der wärmsten Sommerwoche fast kontinuierlich zwischen 26 und 28°C. Diese Temperaturen zeigen, dass die deutliche Vergrößerung der Dachverglasung als Teil der energetisch-wirtschaftlichen Optimierung des Entwurfs eine sehr wichtige Maßnahme war.

Eine weitere Verbesserungsmaßnahme wäre es, das Dachfenster und ein Oberlicht über der Hauseingangstüre automatisiert öffnbar zu gestalten. Auf diese Art wäre mit geringen Mehrkosten eine deutliche Reduktion der Raumlufthtemperaturen im Gebäudekern erreichbar, da aufgrund des thermischen Auftriebes eine sehr gute Durchströmung mit kälterer Nachtluft erreicht würde.

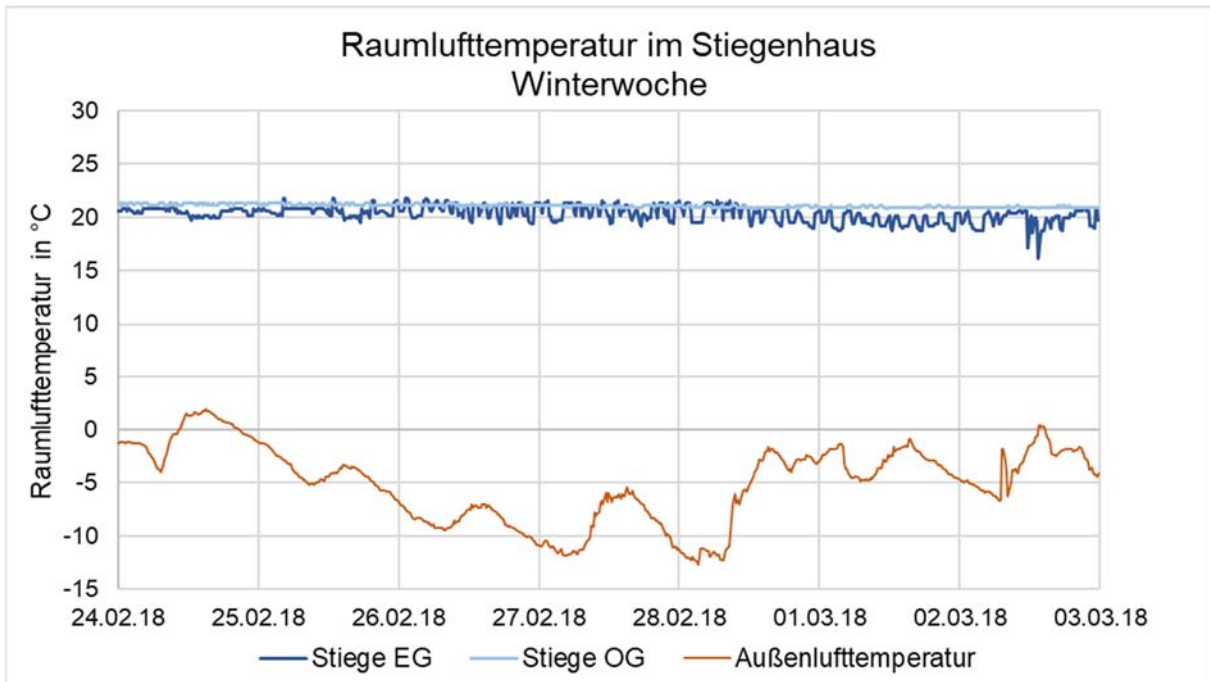


Abbildung 47: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur im Stiegenhaus während der kältesten Winterwoche verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundemesswerte).

Wie zu erkennen lag die Temperatur im OG des Stiegenhauses während der gesamten Winterwoche bei Werten um 21°C. Die Raumlufthtemperatur im EG zeigt einen gewissen Einfluss der Öffnung der Haustüre und schwankt meist zwischen 20 und 21°C. Bei einer längeren Türöffnung sank die Temperatur kurzzeitig auf Werte von etwa 17 bis 18°C.

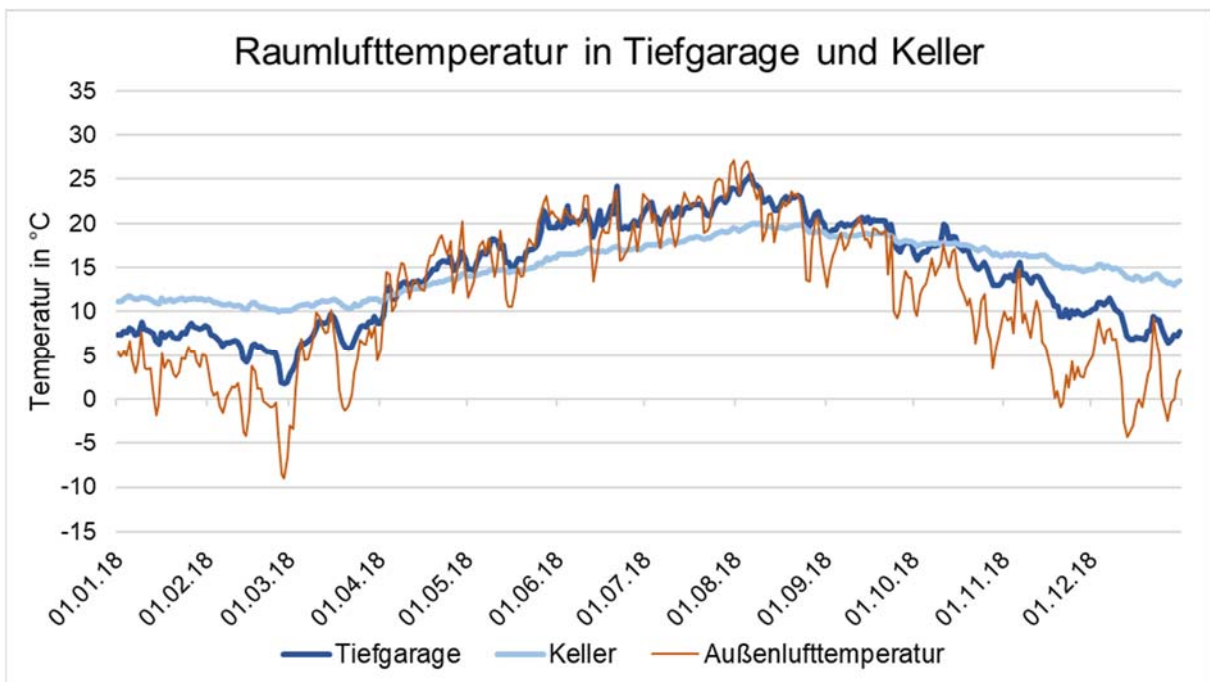


Abbildung 48: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in Tiefgarage und Keller verglichen mit der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwerte).

Da aus Messprojekten nur wenige Messwerte zu den Temperaturen im Keller und der Tiefgarage vorliegen, wurden beide Werte messtechnisch erfasst. Abbildung 48 zeigt die Tagesmittelwerte für das gesamte Messjahr 2018. Wie zu erkennen schwankt die Raumlufthtemperatur im aktiv über Ventilatoren entlüfteten Keller zwischen minimal 10°C im Winter und 20°C im Sommer. Die Temperatur in der natürlich über das Gittertor und Entrauchungsschächte entlüfteten Tiefgarage schwankt zwischen etwa 2°C im Winter und ca. 25°C im Sommer.

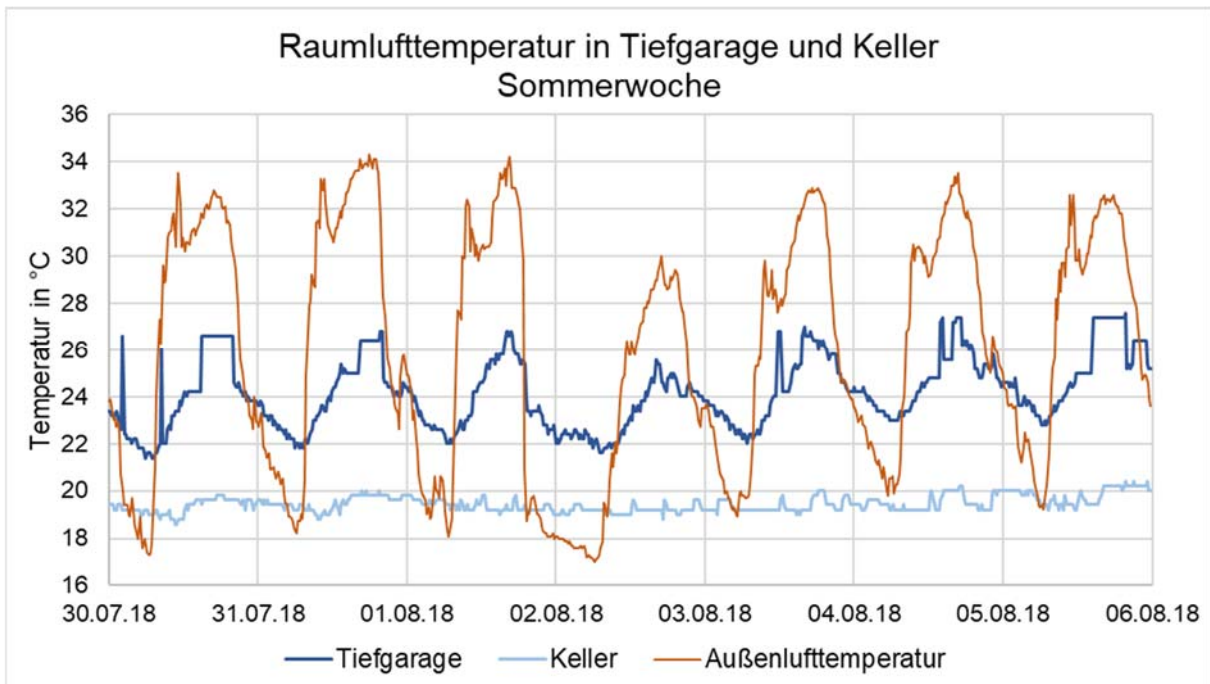


Abbildung 49: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in Tiefgarage und Keller während der wärmsten Woche im Sommer 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundemesswerte).

Abbildung 49 zeigt den Verlauf der Raumlufthtemperaturen in Tiefgarage und Keller sowie die Außenlufttemperatur während der wärmsten Sommerwoche. Wie zu erkennen schwankt die Temperatur in der Tiefgarage in der Hitzeperiode zwischen 22 und 27°C, während im Keller Temperaturen von etwa 19 bis 20°C herrschen.

Abbildung 50 zeigt den Verlauf der Raumlufthtemperaturen in Tiefgarage und Keller sowie die Außenlufttemperatur während der kältesten Winterwoche. Wie zu erkennen schwankt die Temperatur in der Tiefgarage in der Kälteperiode zwischen 2 und 6°C. Sehr kurzzeitig treten Temperaturen von 0°C auf. Im Keller herrscht eine konstante Temperatur von 10°C.

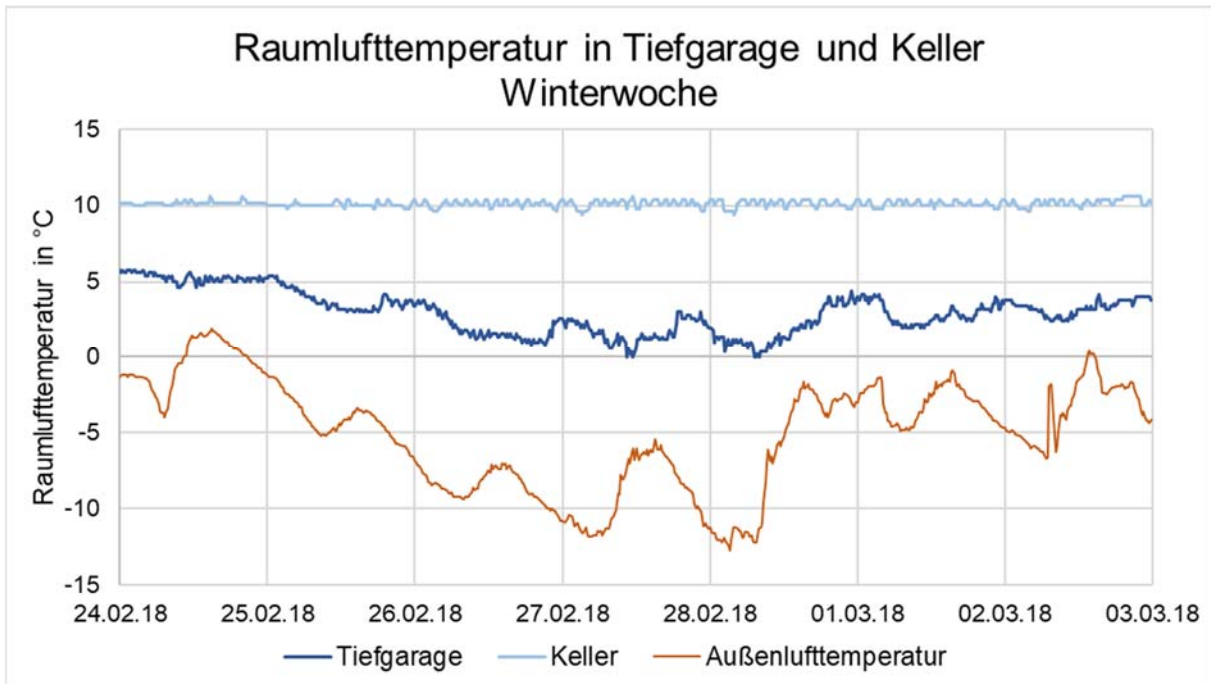


Abbildung 50: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in Tiefgarage und Keller während der kältesten Woche im Winter 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundemittelwerte).

4.2.3 Raumlufffeuchte Wohnungen und Gemeinschaftsraum

Abbildung 51 zeigt den Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen im Hochsommer.

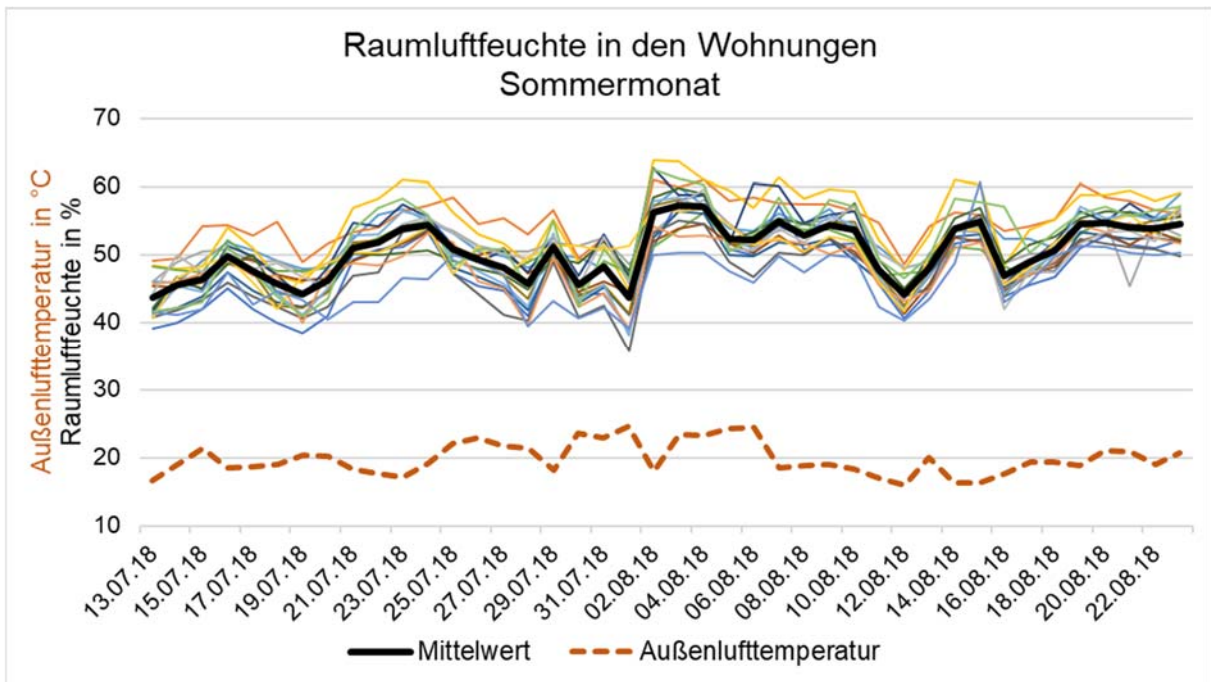


Abbildung 51: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen im Hochsommer (Stundenmittelwerte).

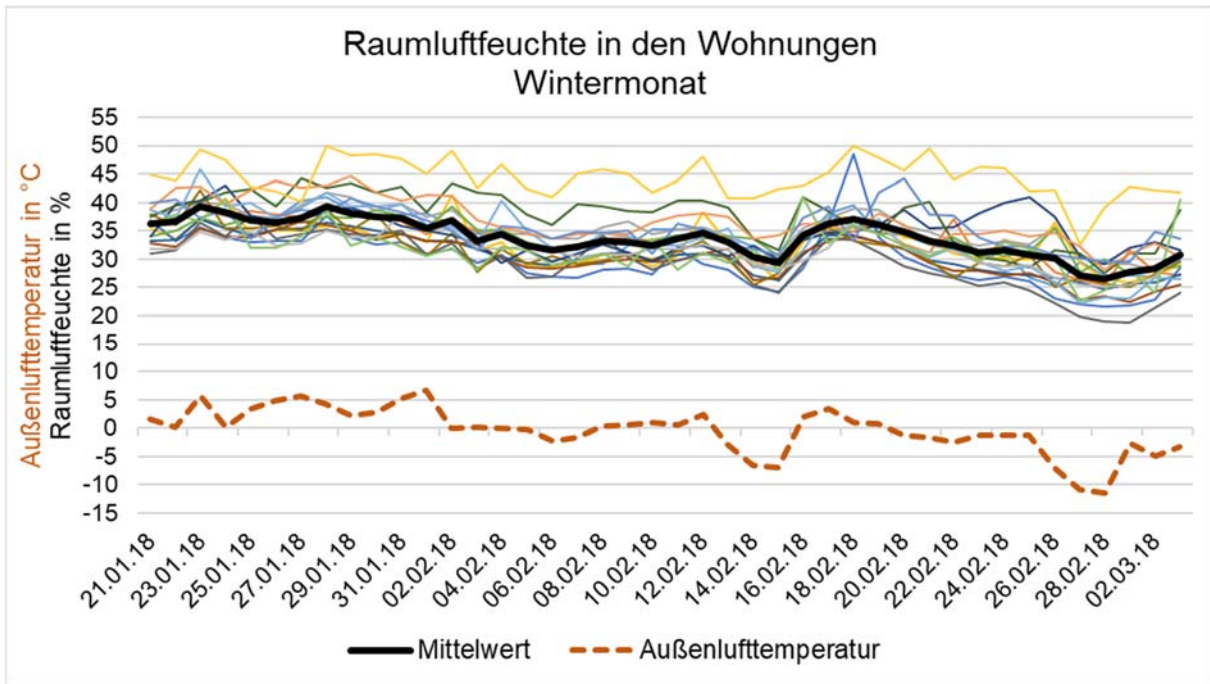


Abbildung 52: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen im Winter (Stundenmittelwerte).

Wie zu erkennen sinkt der Mittelwert der relativen Raumlufffeuchte aller Wohneinheiten bei sinkender Außenlufttemperatur. Der geringste Mittelwert der rel. Feuchte wird mit knapp über 25% zum Zeitpunkt der kältesten Außenlufttemperaturen erreicht. Die rel. Feuchte differiert in den einzelnen Wohnungen um etwa 10 bis 15% - siehe auch nächste Tabelle.

Kritische Winterwoche

Tabelle 15: Vergleich der Raumlufffeuchte in Top 9 und Top 16

	[%]	[%]	[%]
	Top 9	Top 16	Mittelwert aller WHG
24.02.2018	25	46	31
25.02.2018	23	42	30
26.02.2018	20	37	28
27.02.2018	18	32	26
28.02.2018	17	43	26
01.03.2018	20	42	28
02.03.2018	22	38	28

Wie dargestellt ist der Nutzereinfluss auf die Raumlufffeuchte sehr groß: Die Tagesmittelwerte in Wohnung 9 liegen während der gesamten kalten Winterwoche um 14 bis 22% unter der in Wohnung 16. Mögliche Einflussfaktoren sind die Personenzahl, die Nutzung (Feuchteeintrag, etwa durch Kochen, Pflanzen...) sowie das Nutzerverhalten (Raumlufftemperatur und zusätzliche Fensterlüftung).

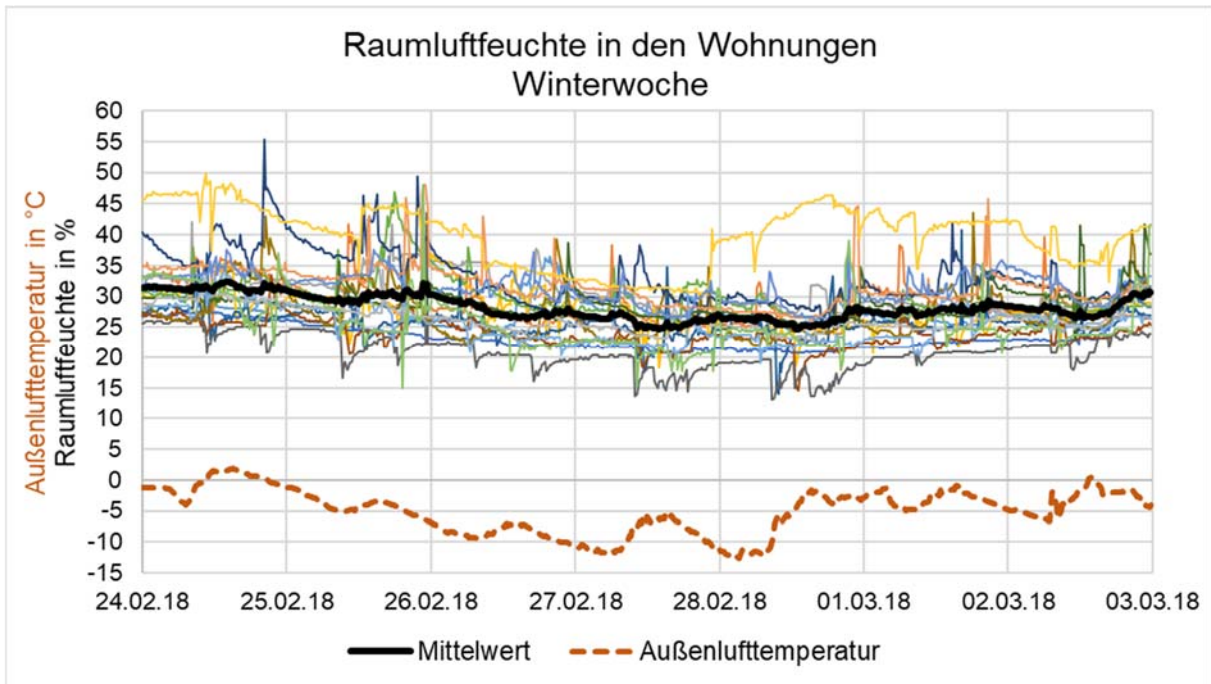


Abbildung 53: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen in der kältesten Winterwoche (Viertelstundenmittelwerte).

Die Abbildung verdeutlicht die schon in den vorigen Abbildungen erkennbaren Unterschiede in der rel. Feuchte der einzelnen Wohnungen. Aufgrund der höheren zeitlichen Auflösung sind auch sehr kurzfristige Werte erkennbar. Wie zu erkennen treten in zwei Wohnungen an vier Tagen temporär Werte von 15-20% auf.

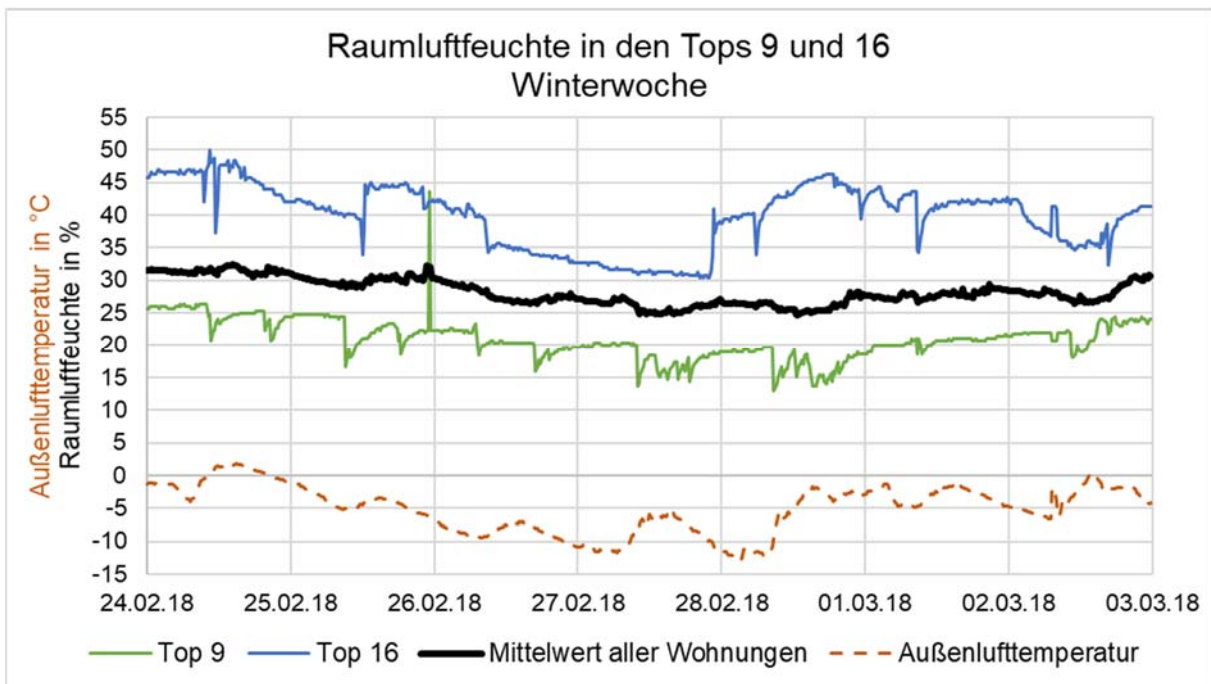


Abbildung 54: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen mit der höchsten und der niedrigsten Feuchte in der kältesten Winterwoche (Viertelstundenmittelwerte).

Die Abbildung zeigt die gleichen Messergebnisse wie die Abbildung zuvor, der Übersichtlichkeit halber jedoch nur für die Wohnungen mit der höchsten und der niedrigsten rel. Feuchte sowie den Durchschnittswert aller Wohneinheiten. Zu erkennen ist der große Schwankungsbereich aufgrund des Nutzerverhaltens. Während die Feuchte in einer Wohnung immer in einem angenehmen Bereich zwischen 30 und 50% liegt, treten in der anderen Wohnung während der gesamten Kältephase Werte zwischen 15 und 25% auf. Diese liegen deutlich unter dem häufig als unterem Schwellwert genannten Wert von 30% rel. Feuchte.

In der Wohnanlage mit Abluftsystem zeigen sich damit bezüglich der rel. Feuchte ähnliche Ergebnisse wie in Gebäuden mit Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung: Werden die Lüftungsanlagen kontinuierlich mit dem aus der Personenanzahl bestimmten hygienischen Mindestluftwechsel von etwa $0,3h^{-1}$ betrieben, so fällt die rel. Feuchte in Kältephasen in einem relevanten Anteil der Wohnungen auf unter 30%. Abhilfe kann (zumindest in Gebäuden mit Komfortlüftungen mit WRG) durch folgende Maßnahmen geschaffen werden:

- Regelung des Luftvolumenstroms auf Grundlage des CO_2 -Gehalts der Luft – bei Abwesenheit der Bewohner wird der Volumenstrom reduziert
- Kombination der Wärme- mit einer Feuchterückgewinnung
- Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur – Verringerung des Luftvolumenstroms bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen

Die letzte Möglichkeit wäre auch im KliNaWo-Gebäude mit seiner mit Konstantvolumenstrom betriebenen Abluftanlage möglich: diese könnte so geregelt werden, dass der Betrieb im Winter bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen tagsüber (bei geringer Belegung) für wenige Stunden eingestellt würde. Im Sommer könnte der Betrieb bei sehr hohen Außentemperaturen ebenfalls tagsüber für wenige Stunden unterbrochen werden, dafür könnte nachts ein leicht erhöhter Volumenstrom gefahren werden.

4.2.4 CO_2 -Gehalt der Raumlufte in Wohnungen und Gemeinschaftsraum

Wie im Kapitel Monitoring dargestellt, wurde neben den Raumlufteemperaturen und der relativen Feuchte auch der CO_2 -Gehalt der Luft raumweise gemessen und aufgezeichnet.

Da die Messungen zeigen, dass der CO_2 -Gehalt bei dem kontinuierlich betriebenen Luftvolumenstrom von $0,3h^{-1}$ mit unwesentlichen Ausnahmen stets im empfohlenen Bereich von etwa 500 bis etwa 1.500 ppm lag, werden die Ergebnisse nicht weiter analysiert.

4.2.5 Behaglichkeitsbewertung

In den einzelnen Wohnungen wurden die Raumlufteemperaturen in drei bzw. vier Räumen gemessen. Exemplarisch wird die Behaglichkeit dreier Schlafzimmer nach EN 15251:2007 [17] mit einem adaptiven Komfortmodell bewertet.

Zur Bewertung der Behaglichkeit wird gemäß dieser Norm analysiert, in wie vielen Nutzungsstunden die Temperatur jeder der vier Komfortkategorien (I-IV) entspricht. Jede Komfortkategorie wird durch einen Temperaturbereich definiert, der in Abhängigkeit von der Außentemperatur differenziert wird: Das Modell beruht auf der Beobachtung, dass bei höheren Außentemperaturen auch höhere Raumlufttemperaturen (bzw. operative Temperaturen) als angenehm empfunden werden.

Zur Analyse wurden die folgenden Räume ausgewählt:

- ein Schlafzimmer mit durchschnittlichen Raumlufttemperaturen im Sommer
- das Schlafzimmer mit den niedrigsten Raumlufttemperaturen im Sommer
- das Schlafzimmer mit den höchsten Raumlufttemperaturen im Sommer

In Abbildung 55 ist die Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 für das Schlafzimmer einer Wohnung mit durchschnittlichen Raumlufttemperaturen im Sommer abgebildet.

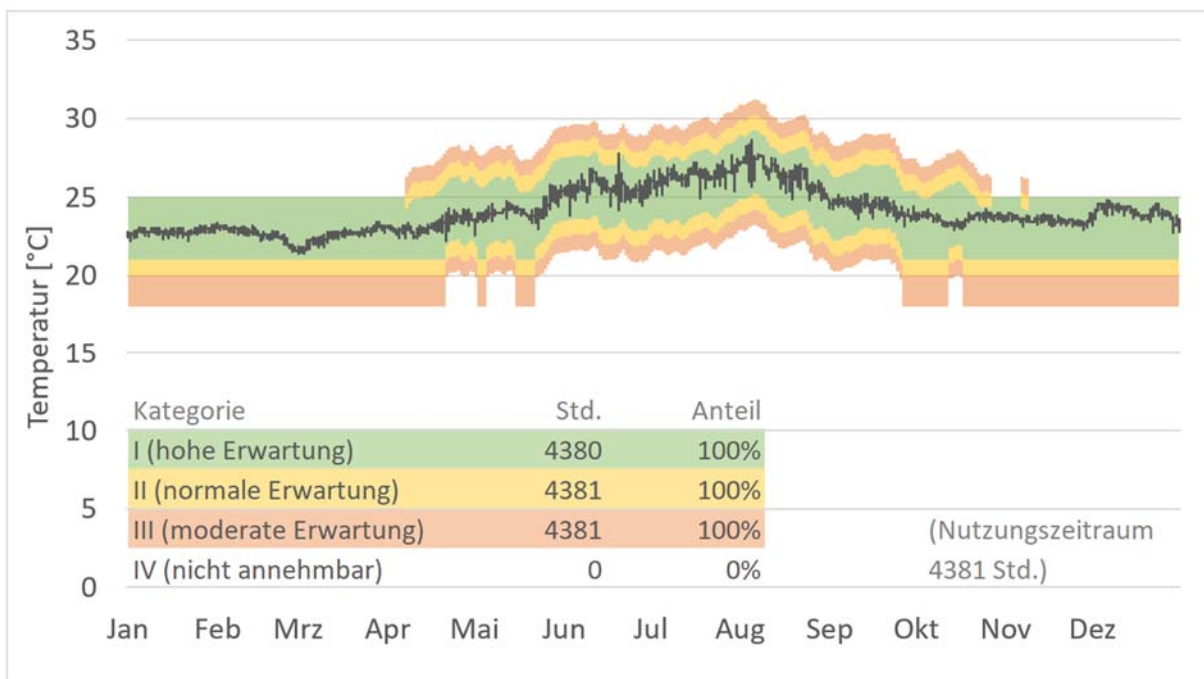


Abbildung 55: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer einer Wohnung mit durchschnittlichen sommerlichen Raumlufttemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00).

Die schwarze Linie zeigt den gemessenen Verlauf der Raumlufttemperatur, die farbigen Flächen charakterisieren die vier Komfortkategorien I bis IV.

Wie die Abbildung zeigt, wird in der Wohnung mit durchschnittlichen Raumlufttemperaturen im Sommer während der angenommenen Nutzungszeit von 20:00 bis 8:00 während des Messjahres 2018 immer der Temperaturbereich der Kategorie I (hohe Erwartungen an den Komfort) erreicht.

In Abbildung 56 ist die Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 für das Schlafzimmer einer Wohnung mit den niedrigsten Raumlufftemperaturen im Sommer abgebildet.

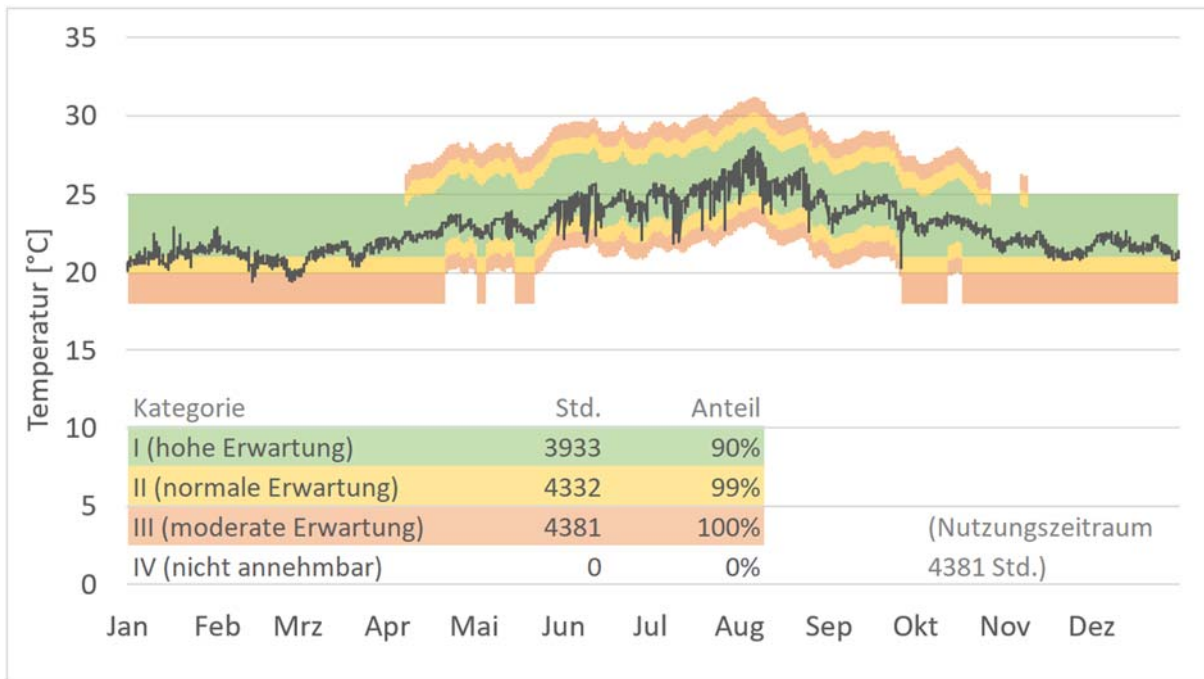


Abbildung 56: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer der Wohnung mit den niedrigsten sommerlichen Raumlufftemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00).

Wie zu erkennen, werden in der Wohnung mit den niedrigsten sommerlichen Raumlufftemperaturen in 99% der Nutzungsstunden (20:00 bis 8:00) des Jahres 2018 die Anforderungen der Kategorie II (normale Erwartungen an den Komfort) erreicht. Während das Temperaturband der Kategorie I im Sommer nie überschritten wird (also keine Probleme mit Überhitzung auftreten), treten vor allem Anfang des Jahres kurzzeitig Raumlufftemperaturen auf, die etwas niedriger liegen, als der Wertebereich der Kategorien I und II.

In Abbildung 57 ist die Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 für das Schlafzimmer einer Wohnung mit den höchsten Raumlufftemperaturen im Sommer abgebildet.

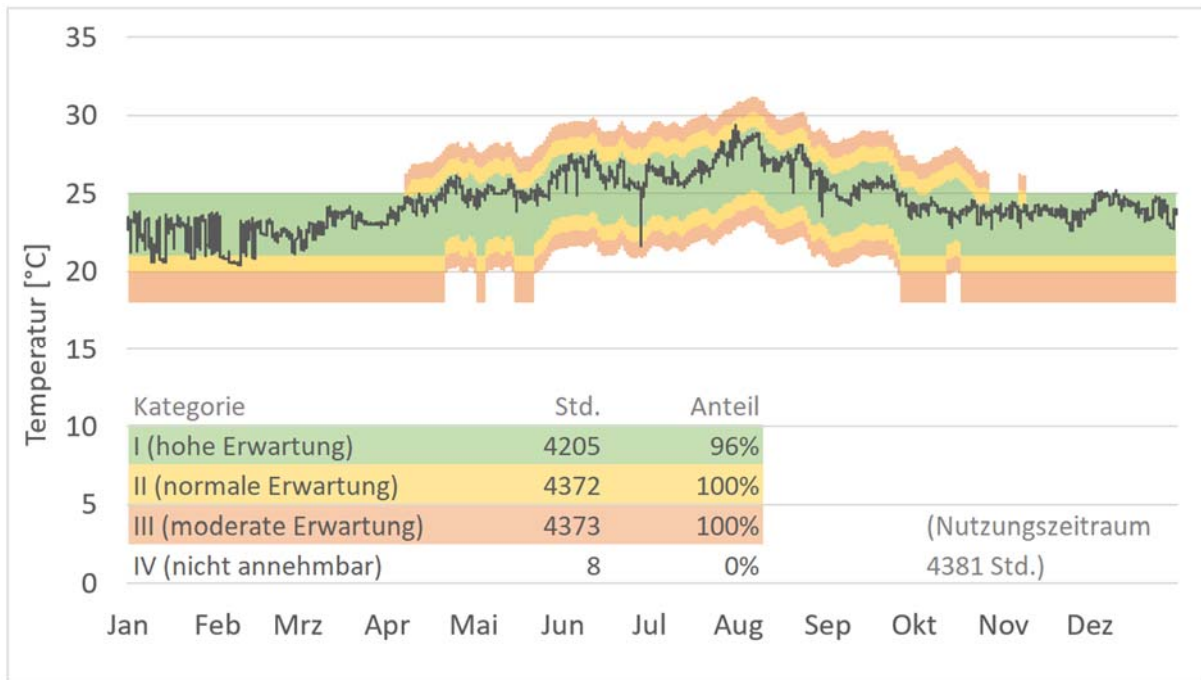


Abbildung 57: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer der Wohnung mit den höchsten sommerlichen Raumlufthtemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00).

Wie dargestellt wurde im Jahr 2018 in 96% der Nutzungsstunden (von 20:00 bis 8:00) der Temperaturbereich der Komfortklasse I hohe Erwartungen an den Komfort) erreicht. Man sieht, dass sich die Temperaturen im Sommer immer eher an der oberen Grenze von Kategorie I zu II bewegen.

Trotz der Einstufung in die höchste Komfortklasse werden die Temperaturen in einigen Sommernächten wohl von einigen Personen als zu heiß empfunden werden.

Resumé Behaglichkeitsbewertung

Die dargestellten Auswertungen zeigen den großen Einfluss des Nutzerverhaltens auf die thermische Behaglichkeit im Gebäude. Wie die Auswertungen zeigen, kann bei entsprechendem Nutzerverhalten (Verschattung an heißen Sommertagen, zusätzliche Nachlüftung über Fenster) auch in sehr heißen Sommern ein angenehmer Temperaturbereich gewährleistet werden. Bei Bewertung nach EN 15251:2007 ergeben sich sehr gute bis gute Werte auch für die Wohnungen mit den höchsten sommerlichen Raumlufthtemperaturen.

Da die Bewertung nach EN 15251:2007 bei sehr hohen Außentemperaturen auch relativ hohe Raumlufthtemperaturen noch als angenehm ausweist, und diese Bewertung nach Einschätzung der Autoren von vielen Nutzern nicht geteilt wird, werden nach der zweiten Sommerperiode zusätzliche Auswertungen der Behaglichkeit (z.B. nach Fanger) vorgenommen werden.

4.3 Ergebnisse Monitoring – Energieverbräuche/Strombezug

In Tabelle 16 sind die gemessenen Verbräuche des ersten Messjahres für die unterschiedlichen Anwendungen als Absolutwerte sowie als flächenspezifische Werte mit Bezug auf die Wohnnutzfläche WNF dargestellt. Zum Vergleich sind auch die Ergebnisse der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung als flächenspezifische Werte dargestellt.

Der Bezug auf die WNF wurde gewählt, da auch die Betriebskostenabrechnung auf die Fläche referenziert und da auch die flächenspezifischen Kosten auf die WNF bezogen wurden.

Tabelle 16: Endenergieverbrauch absolut und flächenspezifisch nach Anwendungen im Vergleich zu den spezifischen Werten der Verbrauchsprognoseberechnung PHPP.

	gemessener Endenergieverbrauch		berechneter Endenergiebedarf
	Messwerte 2018		Verbrauchsprognose PHPP
	kWh/a	kWh/(m ² _{WNFA})	kWh/(m ² _{WNFA})
End _{Heiz}	7.537	5,9	7,1
End _{ww}	10.649	8,3	9,9
End_{Heiz+WW}	18.186	14,2	17,0
End _{Haustechnik inkl. Leittechnik/Monitoring}	4.713	3,7	3,6
Zwischensumme 1	22.899	17,9	20,6
End _{Allgemeinstrom}	2.464	1,9	0,0
End _{Tiefgarage}	1.701	1,3	0,0
Zwischensumme 2	27.064	21,1	20,6
End _{Haushaltsstrom}	25.562	20,0	21,4
Gesamtsumme	52.626	41,1	42,0

Anmerkung 1: WNF 1.281,08 m², PHPP (EBF) 1.421,2 m², BGF 1.822 m²

Anmerkung 2: Wie die folgende Aufzählung zeigt, hat der Flächenbezug einen großen Einfluss auf den spezifischen Bedarf/Verbrauch. Der im ersten Betriebsjahr 2018 gemessene absolute Endenergieverbrauch_{Heiz+WW} beträgt 18.186 kWh/a. Je nach Flächenbezugsmaß beträgt der spezifische Verbrauch:

- 14,2 kWh/(m²_{WNFA}) (siehe Tabelle)
- 12,8 kWh/(m²_{PHPPA})
- 10,0 kWh/(m²_{BGFA})

Anmerkung 3: Haushalts-Stromverbrauch inklusive Verbrauch im Gemeinschaftsraum

Wie die Tabelle zeigt, entsprechen die gemessenen Verbräuche des ersten Messjahres sehr gut den in der PHPP-Verbrauchsprognose berechneten Werten.

- Der Endenergieverbrauch_{Heizung} liegt mit 5,9 kWh/(m²_{WNFA}) um 1,2 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem berechneten Wert.
- Der Endenergieverbrauch_{Warmwasser} liegt mit 8,3 kWh/(m²_{WNFA}) um etwa 1,6 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem berechneten Wert.

- Der Endenergieverbrauch_{Heiz+WW} liegt mit 14,2 kWh/(m²_{WNFA}) um 2,8 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem berechneten Wert.
- Der Endenergieverbrauch_{Haustechnik incl. Leittechnik/Monitoring} liegt mit 3,7 kWh/(m²_{WNFA}) um 0,1 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem berechneten Wert.
- Der Endenergieverbrauch_{HH-Strom} liegt mit 20,0 kWh/(m²_{WNFA}) um 1,4 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem berechneten Wert.

Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich der in der Verbrauchsprognoseberechnung berechneten Bedarfswerte mit den im ersten Betriebsjahr gemessenen Verbräuchen.

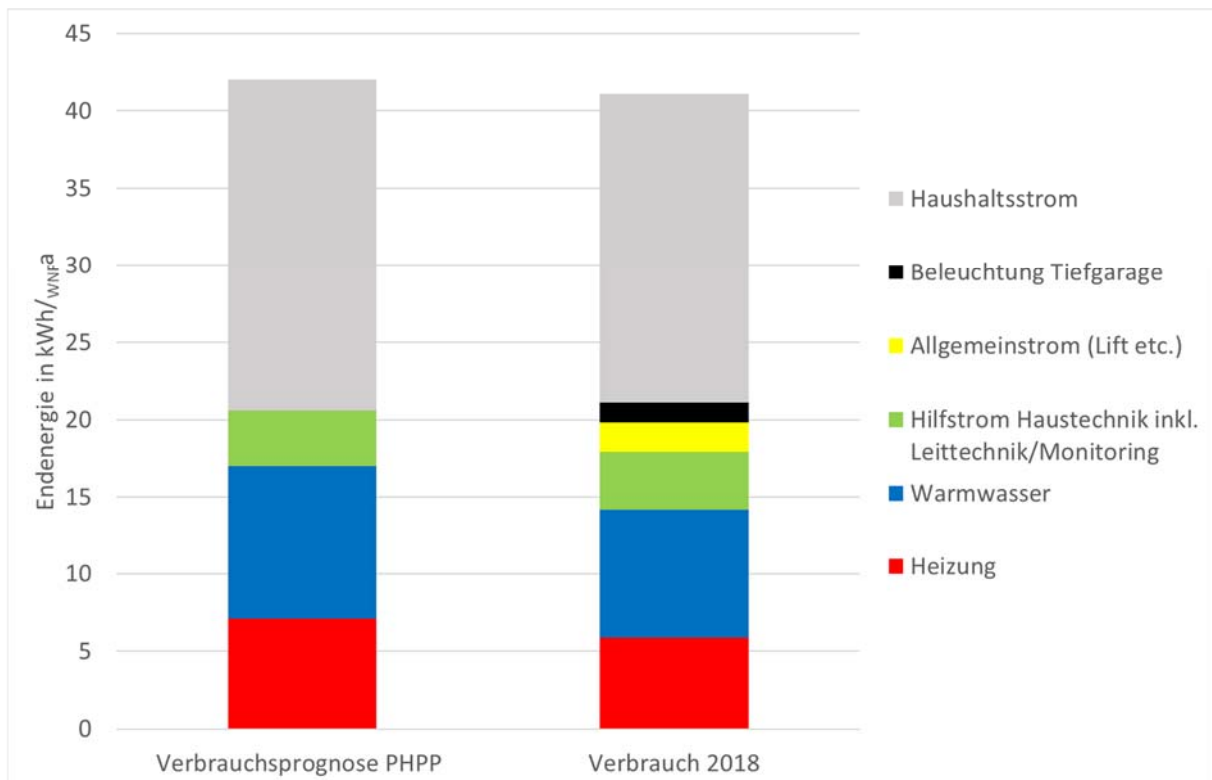


Abbildung 58: Endenergieverbrauch 2018 nach Anwendungen im Vergleich zur Verbrauchsprognoseberechnung PHPP.

Wie bereits dargestellt liegen die gemessenen Verbräuche für Heizung und Warmwasser sowie für Haushaltsstrom knapp **unter** den in der Verbrauchsprognoseberechnung ermittelten Werten. Der Verbrauch für Hilfsstrom Haustechnik inkl. Leittechnik und Monitoring liegt minimal über dem berechneten Wert.

Für die gemessenen Endenergieverbräuche für Allgemeinstrom (Beleuchtung Treppenhaus und Erschließung, Lift...) sowie für die Tiefgarage liegen keine berechneten Vergleichswerte vor, da sie in den PHPP-Berechnungen mangels Erfahrungswerten nicht berücksichtigt wurden.

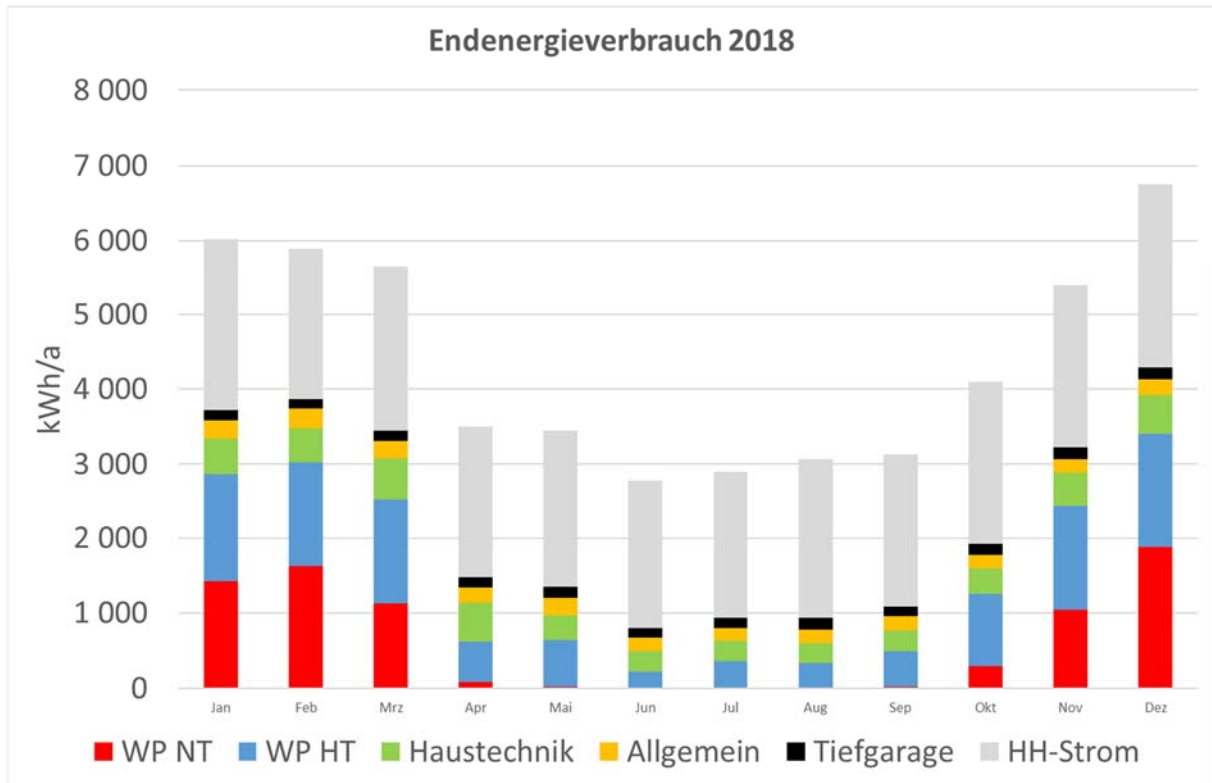


Abbildung 59: Monatswerte des Endenergieverbrauchs nach Anwendungen.

Abbildung 59 zeigt die Monatswerte der gemessenen Endenergieverbräuche im ersten Messjahr 2018 nach Anwendungen. Wie zu erkennen, hatte die Hochtemperatur-Wärmepumpe (Warmwasser) trotz der großen Solarthermieanlage einen nicht unerheblichen sommerlichen Energieverbrauch. Die Gründe für diesen unerwarteten Verbrauchsverlauf sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

Tabelle 17: Endenergieverbrauch in monatlichen absoluten Werten aufgliedert nach Anwendung.

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
End _{Heiz}	1.421	1.626	1.131	84	23	4	4	4	18	297	1.044	1.882
End _{WW}	1.444	1.399	1.398	534	612	221	353	333	475	953	1.404	1.523
End _{Haustech- nik}	484	463	551	517	338	260	267	263	271	348	440	510
End _{Allge- meinstrom}	237	260	228	206	233	183	171	179	193	174	184	217
End _{Tiefgarage}	139	121	140	141	146	131	138	153	131	147	155	158
End _{HH-Strom}	2.298	2.019	2.185	2.019	2.096	1.980	1.969	2.133	2.047	2.183	2.168	2.464

Tabelle 18: Vergleich der gemessenen Verbräuche mit den Vergleichswerten der Verbrauchsprognoseberechnung und der PHPP-Berechnung mit realer Personenzahl, realer Raumlufttemperatur, realer Außentemperatur und realem Warmwasserbedarf.

	gemessener Endenergieverbrauch		berechneter Endenergiebedarf	berechneter Endenergiebedarf
	kWh/a	kWh/(m ² _{WNFA})	kWh/(m ² _{WNFA})	kWh/(m ² _{WNFA})
	Messwerte 2018		Verbrauchsprognose PHPP	PHPP mit gemessenen Raumlufttemperatur, Warmwasserbedarf + realer Personenzahl
End _{Heiz}	7.537	5,9	7,1	7,2
End _{ww}	10.649	8,3	9,9	7,2
End_{Heiz+WW}	18.186	14,2	17,0	14,3
End _{Haustechnik inkl. Leittechnik/Monitoring}	4.713	3,7	3,6	3,3
Zwischensumme 1	22.899	17,9	20,6	17,6
End _{Allgemeinstrom}	2.464	1,9	0,0	0,0
End _{Tiefgarage}	1.701	1,3	0,0	0,0
Zwischensumme 2	27.064	21,1	20,6	17,6
End _{Haushaltsstrom}	25.562	20,0	21,4	19,9
Gesamtsumme	52.626	41,1	42,0	37,5

In Tabelle 18 sind neben den in der Verbrauchsprognoseberechnung vorausgerechneten Bedarfswerten und den im Betriebsjahr 2018 gemessenen Verbräuchen auch die Werte dargestellt, die sich ergeben, wenn in die PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung die realen Klimadaten des Messjahres, die reale mittlere Raumlufttemperatur von 23,1°C in der Heizperiode des Messjahres und der gemessene Warmwasserverbrauch sowie die reale Bewohneranzahl eingegeben werden.

Der Vergleich dieser berechneten Werte mit dem realen Verbrauch zeigt eine Übereinstimmung des berechneten Endenergiebedarfs_{Heiz+WW} mit dem gemessenen Verbrauch von 0,1 kWh/(m²_{WNFA}).

In Abbildung 60 ist der Haustechnikstrom in verschiedene Einzelkomponenten differenziert. Da die einzelnen Bilanzanteile am Haustechnikstrom nicht messtechnisch erfasst wurden, stammen die dargestellten Werte aus dem Simulationsmodell und wurde z.T. über Laufzeiten und Leistungsaufnahmen plausibilisiert. Wie zur erkennen entfällt ein relevanter Anteil des Haustechnikstroms von etwas mehr als 1.000 kWh/m²a auf den Abluftventilator. Der spezifische Stromverbrauch liegt damit bei etwa 0,8 kWh/(m²_{WNFA}) und damit um etwa 1,7 kWh/(m²_{WNFA}) unter dem einer effizienten Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung. Nächste große Einzelverbraucher sind die Sole- und die Zirkulationspumpe. Der graue Balken ist der

nicht zuordenbare Rest, in dem auch der Verbrauch für die Mess- und Regeltechnik enthalten ist.

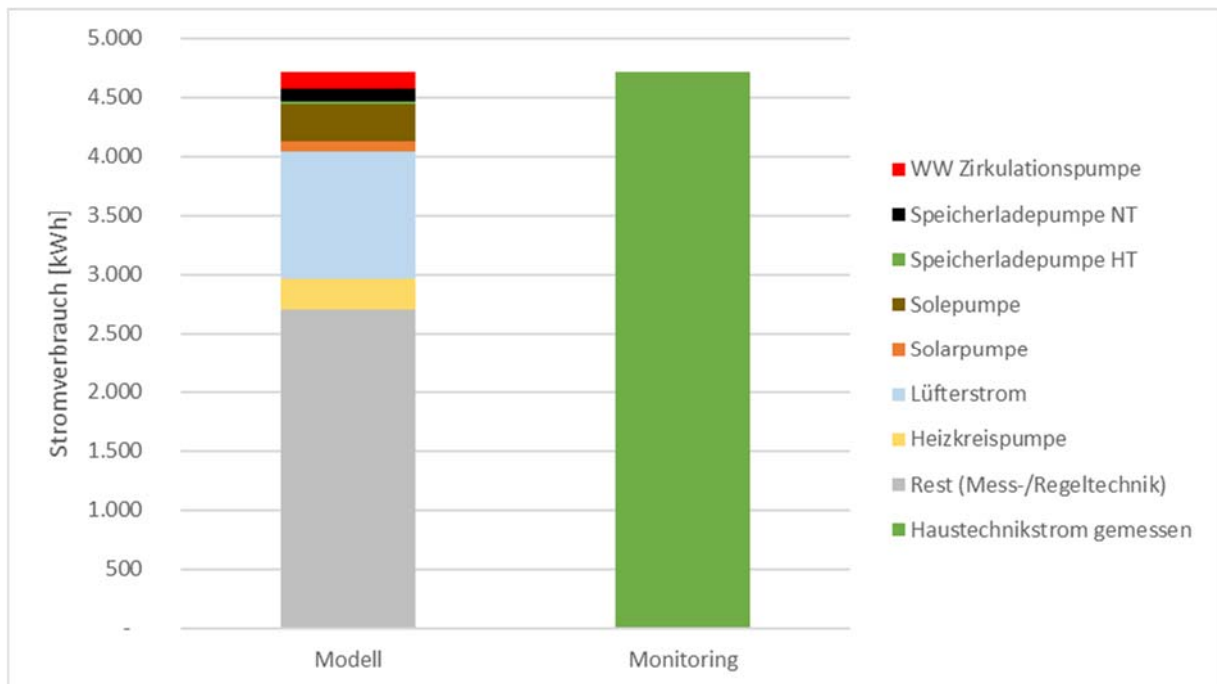


Abbildung 60: Aufteilung des Haustechnikstromes mit den Annahmen aus dem Simulationsmodell. Dies sind keine gemessenen Werte.

4.4 Ergebnisse Monitoring – Detailauswertungen

4.4.1 Jahressummenwerte Stromverbrauch und Wärmemengen

Nachfolgend werden Stromverbrauch und Wärmeerzeugung/verbrauch für das Messjahr 2018 als Jahressummenwerte dargestellt. Zur leichteren Vergleichbarkeit werden die Werte zusätzlich auch als spezifische Werte bezogen auf die Wohnnutzfläche ausgewiesen. Die einzelnen Bilanzanteile werden in den folgenden Unterkapiteln detaillierter betrachtet.

Tabelle 19: Stromverbrauch und Wärmeerzeugung/verbrauch gemessene Werte Messjahr 2018.

	Jahreswert in kWh/a	Messunsicherheit (Annahme $\pm 5\%$)	Jahreswert in kWh/(m ² _{WNFA})
Endenergie Strom WP Heizung	7.537	± 377	5,9
Endenergie Strom WP Warmwasser	10.649	± 532	8,3
Wärmemenge WP Heizung an Speicher	37.718	± 1.886	29,4
Wärmemenge WP Warmwasser an Speicher	26.267	± 1.313	20,5
Wärmemenge Solarthermie an Speicher	22.212	± 1.111	17,3
Wärmemenge Speicher an Heizung	56.290	± 2.815	43,9
Wärmemenge Speicher an Warmwasser	19.241	± 962	15,0
Wärmemenge Speicher an Zirkulation	14.525	± 726	11,3
Summe Wärmemenge Heizung aller WHG inkl. GMR	54.361	± 2.718	42,4

Anmerkungen: WNF 1.281,08 m²

Tabelle 20: Stromverbrauch und Wärmeerzeugung/verbrauch berechnete Werte Messjahr 2018.

	Jahreswert in kWh/a	Jahreswert in kWh/(m ² _{WNFA})
Summe Wärmemenge WW aller WHG inkl. GMR (berechnet aus Warmwassermenge und Temperaturen mit WW = 58,5°C und Kaltwasser = 10°C)	21.449	16,7
Speicherverluste aus Simulation	1.688	1,3
Verteilverluste Raumheizung	1.929	1,5
Energie an Speicher (WP+Solar)	86.197	67,3
Energie aus Speicher (RH, WW, Zirkulation)	90.056	70,3
Nutzenergie WW+RH	75.810	59,2

Anmerkungen: WNF 1.281,08 m²

Die Summe der Messunsicherheit kann ± 12.000 kWh oder mehr betragen, wenn alle Abweichungen in die gleiche Richtung gingen. Wird die Annahme getroffen, dass sich etwa 50% der Messunsicherheiten durch ein anderes Vorzeichen ausgleicht, liegen die Messunsicherheiten etwa noch bei ± 6.000 kWh. Wird die Speicherbilanz gebildet, ergibt sich eine negative Abweichung von -5.550 kWh. Bezogen auf die Speicherenergiemenge von etwa 90.060 kWh sind das in etwa 6%. Wie im Kapitel Monitoring beschrieben wurde, gelten bei Wärmehählern Eichfehlergrenzen von etwa 5% und die Verkehrsfehlergrenzen sind doppelt so groß. Die Speicherbilanz kann also im Rahmen der Messunsicherheiten als ausgeglichen betrachtet werden.

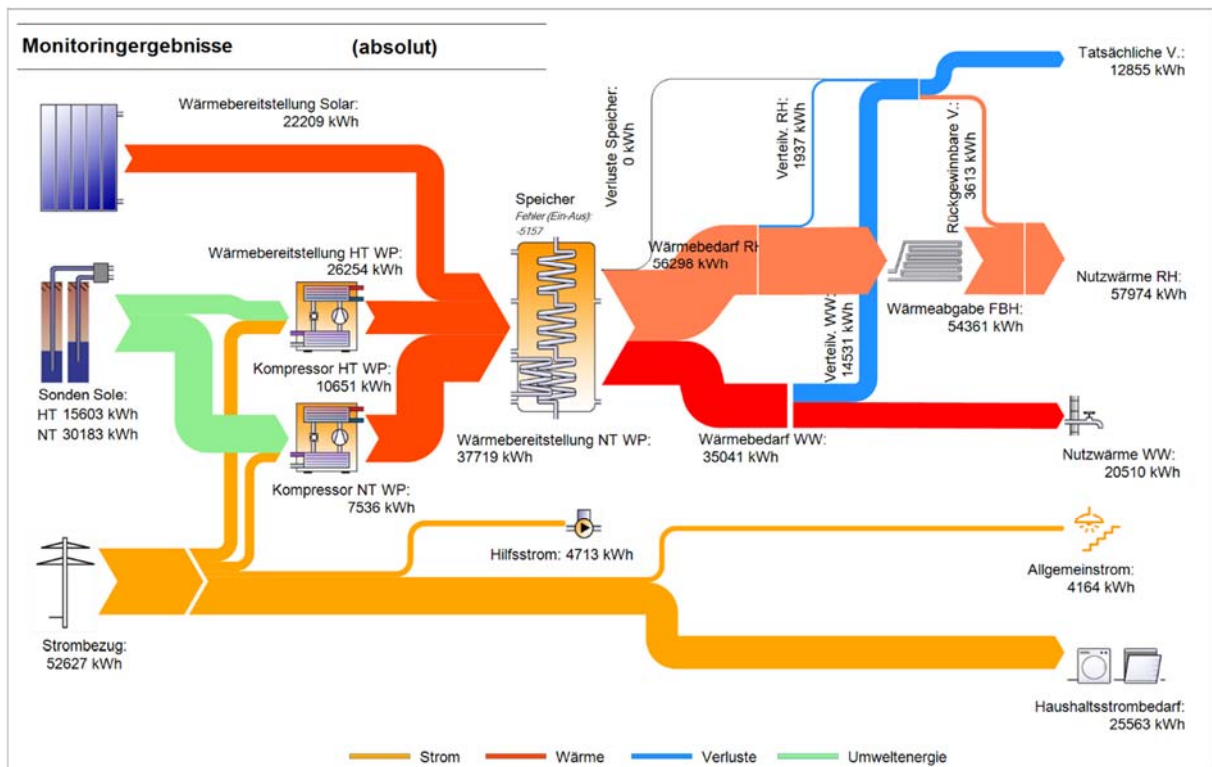


Abbildung 61: Sankey-Diagramm der Energieflüsse im Gebäude im Messjahr 2018.

In Abbildung 61 werden die Energieflüsse im Gebäude als Sankey-Diagramm dargestellt. Die Dicke der Pfeile ist proportional zum gemessenen Energie/Wärmestrom. Die angegebenen Werte weichen durch Rundungsdifferenzen leicht von denen in der Tabelle ab. Man sieht, dass der Speicher als zentrales Element für die Wärmeenergie fungiert. Hauptabnehmer auf der Nutzenergieseite (rechts) ist die Raumwärme, gefolgt vom Haushaltsstrom und dem Warmwasser. Die Verluste von Speicher und Raumheizung sind untergeordnet, während die Verteilverlust von Warmwasser vor allem durch die Zirkulation mit 70% des Nutzwärmebedarfes Warmwasser zu Buche schlagen. Ein Teil dieser Verluste ist im Winter rückgewinnbar, da er zur Gebäudebeheizung beiträgt, ein anderer großer Teil der Verteilverluste kann vor allem im Sommer über die Solarthermie gedeckt werden. Dieser Anteil wurde nicht quantifiziert, wird aber bei korrekter Funktion der Solarthermie bei über 50% liegen. Die Solarthermie lieferte

geringere Erträge als erwartet (siehe Kapitel 4.4.6), weshalb die Hochtemperaturwärmepumpe mehr liefern musste. Man kann aber insgesamt erkennen, dass die Solarthermie in dem Konzept eine wichtige Rolle spielt.

Vom gesamten Strombezug des Gebäudes gehen über die Hälfte direkt in die einzelnen Wohnungen als Haushaltsstrom.

4.4.2 Haushaltsstromverbrauch und -bedarf

Der Haushaltsstrombedarf in Summe aller Wohnungen und des Gemeinschaftsraumes liegt bei 25.562 kWh/a oder auf die Wohnnutzfläche bezogen bei 20,0 kWh/(m²_{WNFA}) und stimmt gut mit der Verbrauchsprognose von 21,4 kWh/(m²_{WNFA}) überein.

Zur Einordnung des Haushaltsstromverbrauchs im Projekt KliNaWo zeigt Tabelle 21 einen Vergleich mit den Messwerten anderer hocheffizienter Mehrfamilienhäuser.

Tabelle 21: spezifischer Haushaltsstromverbrauch hocheffizienter Mehrfamilienhäuser.

	kWh/(m ² _{WNFA})	Bemerkungen
Innsbruck Lodenareal [18]	32,5	gemeinnütziger Wohnbau, Messjahr 2010
Frankfurt Speicherstrasse [19]	18,0	Haushaltsgeräte optimiert, Messjahr 2016; inkl. Strom Lüftung WRG
Frankfurt Cordierstrasse [20]	18,7	Haushaltsgeräte optimiert, Messjahr 2014/15
Feldkirch KliNaWo	20,0	Gemeinnütziger Wohnbau, Messjahr 2018

Wie Analysen der Statistik Austria zeigen, ist der durchschnittliche Haushaltsstrombedarf in den vergangenen 10 Jahren deutlich gesunken [21]. Diese Tendenz zeigt sich auch in den in der Tabelle aufgeführten Mehrfamilienhäusern: lag der Messwert des gemeinnützigen Wohnbaus Lodenareal in Innsbruck im Jahr 2010 noch bei etwa 32 kWh/(m²_{WNFA}) und damit in einer Größenordnung wie mehrere andere Forschungsprojekte dieser Zeit, so lag der Verbrauch im Projekt KliNaWo bei 20 kWh/(m²_{WNFA}). Sowohl im Projekt Lodenareal, als auch im Projekt KliNaWo gelang es nicht, den Bewohnern im Rahmen des Forschungsprojekts effiziente Geräte zur Verfügung zu stellen. Offensichtlich stattete jedoch ein größerer Anteil der Bewohner des KliNaWo-Projekts die Wohnungen mit effizienten Geräten und LED-Beleuchtung aus.

In Projekten, in denen auch das Thema des Haushaltsstroms Teil des Forschungsansatzes ist, sind noch niedrigere Haushaltsstromverbräuche möglich: Für die beiden Projekte in Frankfurt, die im Rahmen des dt. Forschungsprojekts „Effizienzhaus Plus“ durchgeführt wurden, galt für den Haushaltsstromverbrauch ein Grenzwert von 20 kWh/(m²_{WNFA}). Dieser wurde in beiden Fällen deutlich unterschritten, da es in diesen Projekten möglich war, effiziente Haushaltsgroßgeräte auszuwählen und Teile der Beleuchtung mit LED-Technik auszuführen. Im Messwert des Projekts in der Speicherstrasse ist auch der Verbrauch der wohnungsweisen Komfortlüftung mit WRG in Höhe von etwa 2 bis 3 kWh/(m²_{WNFA}) enthalten. Das Projekt zeigt damit, dass

Haushaltsstromverbräuche (ohne Lüftung) von etwa $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$ in der Praxis in Mehrfamilienhäusern gut erreichbar sind.

Auf eine weitergehende Analyse der Messwerte zum Haushaltsstrom wird verzichtet, da zur detaillierten Interpretation Daten zur Anzahl der Bewohner sowie weitere Angaben wie Einkommen und Alter sowie Haushaltsstruktur notwendig wären. Diese Daten liegen nur für die wenigsten Forschungsprojekte vor.

Für die 2- bis 3-Zimmer-Wohnungen im Projekt KliNaWo ergibt sich ein mittlerer Haushaltsstromverbrauch von 1.420 kWh/a pro Wohnung. Dieser Wert liegt unter dem Durchschnitt in Vorarlberg. Zwischen den Wohnungen gibt es aber Abweichungen und die Verbräuche bewegen sich zwischen $690 - 2.400 \text{ kWh/a}$.

Der Strombedarf ist nicht konstant über den Tag verteilt, sondern wie in nachfolgender Grafik in blau dargestellt mit einer Spitze am Morgen und am Abend. Vergleicht man das aus den Messwerten 2018 allen Wohnungen gemittelte Tagesprofil mit dem Standardlastprofil H0 des BDEW [22], dann sieht man eine gute Übereinstimmung. Im gemessenen Lastprofil beginnt die Abendspitze etwas früher und die Vormittagsspitze ist etwas weniger ausgeprägt.

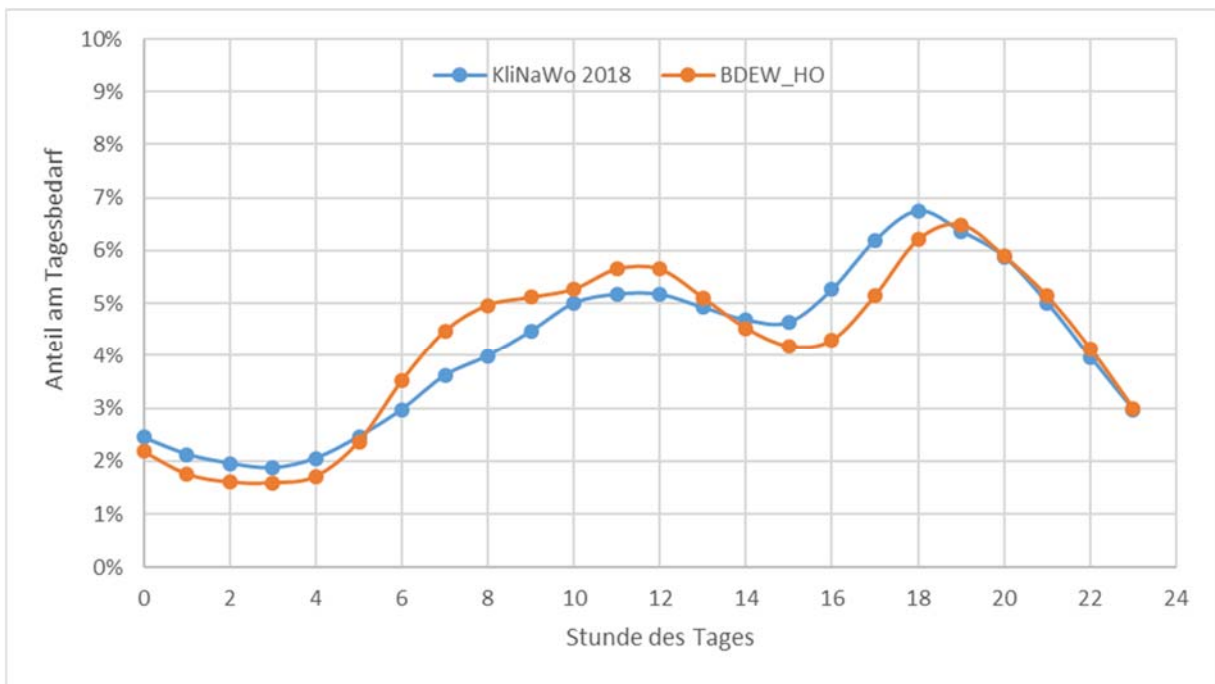


Abbildung 62: Vergleich des gemittelten gemessenen Jahreslastprofil 2018 mit dem Standardlastprofil H0 des BDEW [22].

In der vorhergehenden Grafik ist des gemittelte Profil über alle Wohnungen gezeigt. Nachfolgend ist das Tageslastprofil je Top dargestellt. Hier sieht man, dass je nach Nutzerverhalten sehr unterschiedliche Lastgänge auftreten. Bei einigen treten Lastspitzen schon am Morgen auf, bei anderen mittags, bei fast allen am Abend. Die Anzahl von 18 Wohneinheiten scheint aber bereits auszureichen, damit im Mittel über alle Wohnungen eine Annäherung an das Standardlastprofil erfolgt.

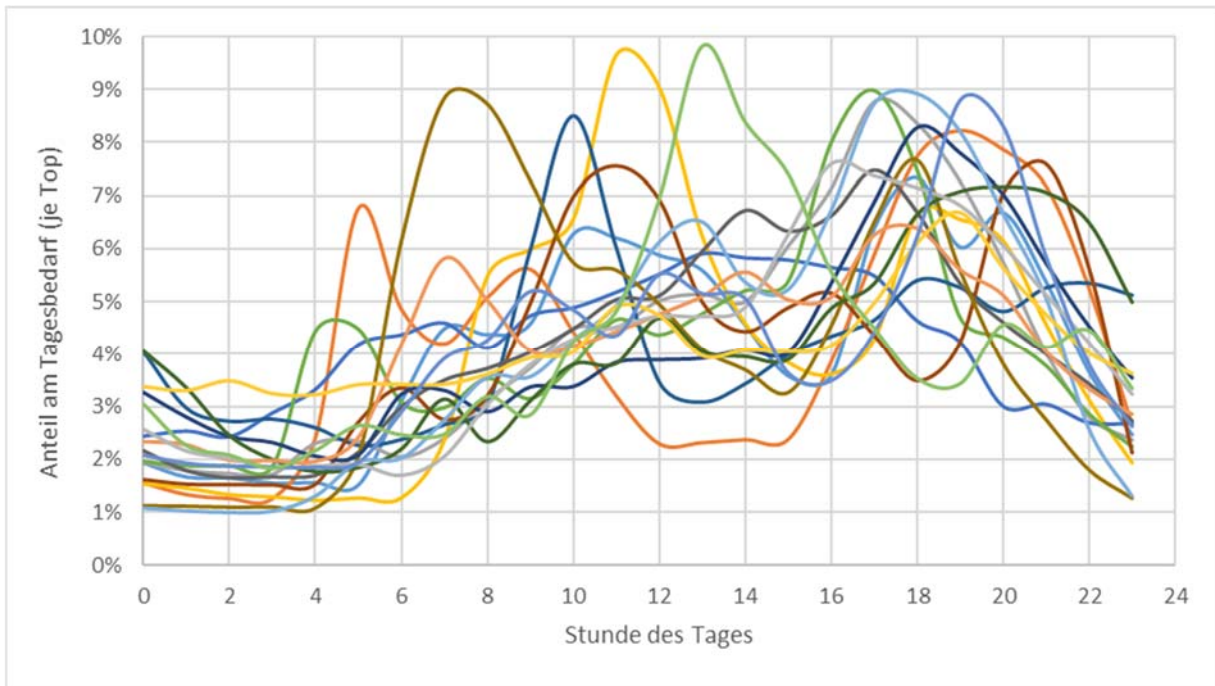


Abbildung 63: gemittelte gemessene Tageslastprofile je Wohnung.

4.4.3 Warmwasserverbrauch und Bedarf

Der gemessene Warmwasserverbrauch in Summe der 18 Wohnungen und des Gemeinschaftsraums betrug 380,7 m³/a. Bei 33 Bewohnern entspricht dies einem durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauch von 31,6 Liter/Tag. Der Verbrauch liegt damit über dem PHPP-Standardwert von 25 Liter/Tag (60°C) und knapp unter dem in der Verbrauchsprognose angenommenen pro-Kopf-Wert von 32,5 Liter/Tag (60°C).

Die Zapfungen sind nicht konstant über den Tag verteilt, sondern wie in nachfolgender Grafik in blau dargestellt mit einer Spitze am Morgen und am Abend. Vergleicht man das gemittelte Tagesprofil aus dem gemessenen Jahreszapfprofil 2018 mit dem Tagesprofil des Warmwasserbedarfs in großen Wohngebäuden für Wochentage nach VDI 6002, (Abbildung D3), dann sieht man eine gute Übereinstimmung. In der Messung ist die Abendspitze noch ausgeprägter.

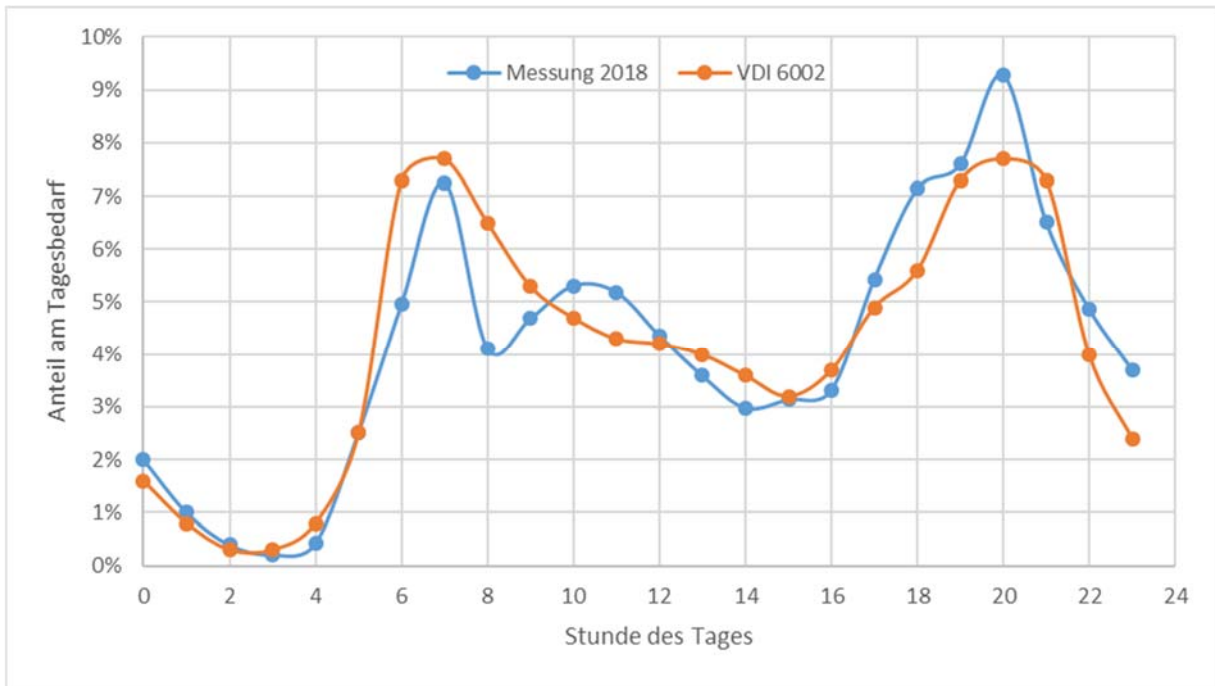


Abbildung 64: Vergleich des gemittelten gemessenen Jahreszapfprofil 2018 mit dem Tagesprofil des Warmwasserbedarfs in großen Wohngebäuden für Wochentage nach VDI 6002, Abbildung D3.

Der Warmwasserverbrauch ist jahreszeitlich relativ konstant, die Werte im Winter liegen leicht über denen im Sommer. Die durchschnittliche WW Temperatur am Speicherausgang liegt bei 58,5°C.

Tabelle 22: Warmwasserverbrauch in den Wohnungen verglichen mit den Annahmen in den PHPP-Berechnungen.

	Personenzahl	Pro-Kopf-Verbrauch pro Tag in Liter/Person	m³/a
KliNaWo Messwert	33	31,6 (58,5°C)	380,7
PHPP Standard	36,7	25 (60°C)	334,9
PHPP Verbrauchsprog.	36,7	32,5 (60°C)	435,4

Da die reale Bewohneranzahl mit 33 Personen unter der Annahme in den PHPP-Berechnungen von 36,7 Personen liegt, liegt der Absolutwert des realen Verbrauchs in Summe aller Bewohner um etwa 13% unter der Annahme in der Verbrauchsberechnung.

Der am Wärmemengenzähler am Speicherausgang gemessene Verbrauch für Warmwasser liegt mit 15,0 kWh/(m²_{WNFA}) etwas niedriger als der in der Verbrauchsprognose berechneten Wert von 19,4 kWh/(m²_{WNFA}).

4.4.4 Heizwärmeverbrauch und Bedarf

Im Monitoring wird in jeder Wohnung die Wärmemenge für die Heizung gemessen. Diese Wärmemenge entspricht in etwa dem Heizwärmebedarf der Wohnungen, immer unter der Voraussetzung, dass die gewünschte Raumtemperatur in den Wohnungen erreicht wird. Im Kapitel Temperaturen wurde gezeigt, dass dies im Projekt KliNaWo der Fall war. Somit kann man den gemessenen Wert mit einem berechneten HWB bei den selben Raumtemperaturen vergleichen. In Abbildung 65 sieht man die abgegebene Wärmeleistung der Heizungen in den Wohnungen im Vergleich zur Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte 2018). Man erkennt, dass bei niedrigen Außenlufttemperaturen die Heizleistung steigt. Bei Temperaturen unter -10 °C wird die Auslegeleistung der Fußbodenheizung von etwa 30 kW und der zusätzlichen Heizkörper mit etwa 10 kW , also in Summe 40 kW erreicht. Dies entspricht einer Heizlast von etwa $31\text{ W/m}^2_{\text{WNF}}$.

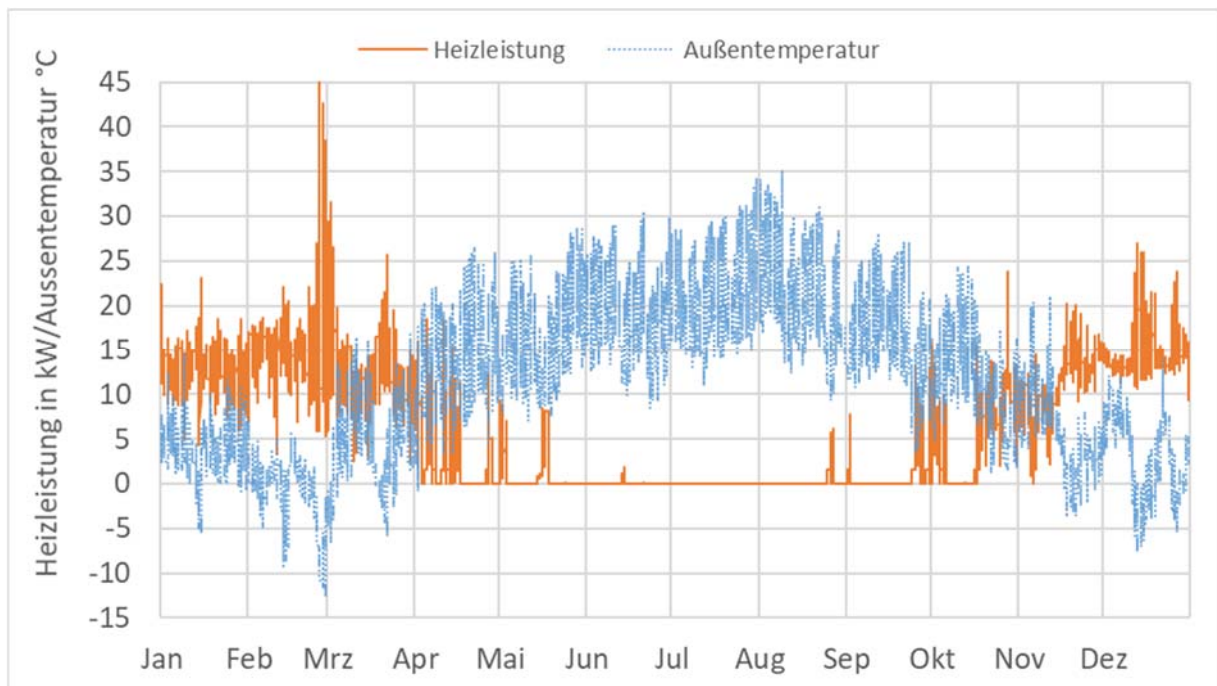


Abbildung 65: Abgegebene Wärmeleistung der Heizungen in den Wohnungen im Vergleich zur Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte 2018).

Der an den WMZ der einzelnen Wohnungen gemessene Heizwärmeverbrauch beträgt 54.361 kWh/a oder $42,4\text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$. Der gemessene Wert stimmt recht gut mit dem in der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung (22 °C) berechneten Wert von $38,3\text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$ überein. Im Simulationsmodell, unter Berücksichtigung der realen Temperaturen und des Außenklimas vom Standort im Jahr 2018 ergibt sich eine abgegebene Wärmemenge der FBH von 50.075 kWh/a oder $39,1\text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$. Diese Ergebnisse decken sich mit den Messwerten im Rahmen der Mess- und Modellgenauigkeiten.

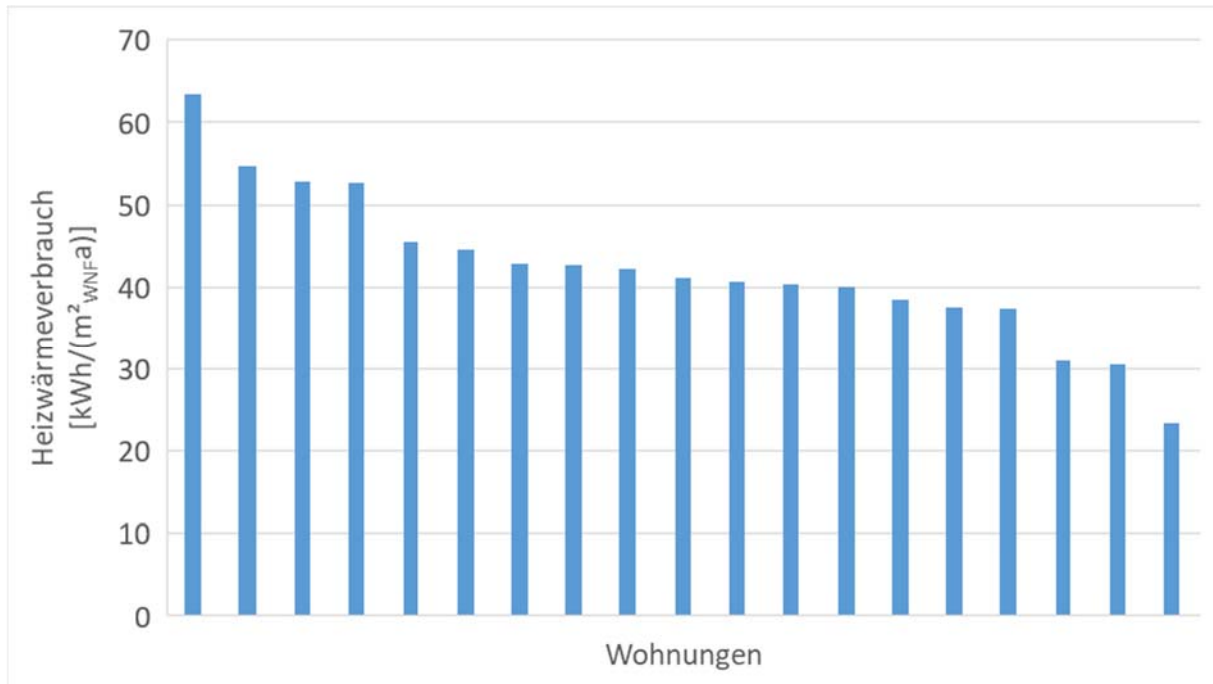


Abbildung 66: Verteilung des Heizwärmeverbrauches im Messjahr 2018 auf die einzelnen Wohnungen

In Abbildung 66 sieht man die Verteilung des Heizwärmeverbrauches im Messjahr 2018 auf die einzelnen Wohnungen. Den höchsten Verbrauch hat eine Wohnung mit 63 kWh/(m²_{WNFA}). Der mittlere Verbrauch der Wohnungen inklusive dem Gemeinschaftsraum liegt bei 42 kWh/(m²_{WNFA}). Zwischen der Wohnung mit dem niedrigsten und der mit dem höchsten Verbrauch liegt der Faktor 3.

Das Temperaturniveau der Fußbodenheizung wird außentemperaturabhängig variiert. Die Abhängigkeit ist bei den Komponenten in Form der Heizkurve dargestellt (siehe Abbildung 14). Die Verteilverluste für die Raumheizung lassen sich aus der Differenz der Wärmemenge am Speicherausgang und der Summe aller Wärmemengenzähler der Wohnungen ermitteln. Diese Verluste liegen bei 1.929 kWh/a oder 1,5 kWh/(m²_{WNFA}). Bezogen auf die abgegebene Wärme in den Wohnungen mit 54.361 kWh/a betragen die Verteilverluste der Raumheizung etwa 3,5%. Diese Verluste sind zum großen Teil rückgewinnbar, da die Leitungen alle innerhalb der thermischen Hülle liegen.

4.4.5 Speicher

Der Kombischichtspeicher mit 6.500 Litern Heizungswasser ist ein zentrales Element im Haustechnikkonzept. Er beinhaltet zwei Wärmetauscher, einen für das Brauchwarmwasser und den anderen für die thermische Solaranlage. Die untere Hälfte des Speichers dient im allgemeinen der Raumheizung und hat somit ein gewünschtes Temperaturniveau von etwa 35°C während der obere Teil für das Brauchwarmwasser etwa 60°C aufweisen sollte. Die beiden Wärmepumpen speichern deshalb in den unterschiedlichen Niveaus ein. Die solarthermische Anlage speichert im unteren Bereich ein.

Insgesamt wurde im Messjahr 2018 eine Energiemenge von etwa 90.000 kWh/a oder 70,3 kWh/(m²_{WNFA}) an den Speicher geliefert und daraus abgerufen. Die Bewirtschaftung mit den verschiedenen Temperaturniveaus funktioniert gut und der Speicher weist, wie in nachfolgender Abbildung zu sehen ist eine gute Schichtung auf. Es werden im Speicher an sechs Messpunkten über die Höhe verteilt die Temperaturen gemessen. Die unteren drei Messpunkte bewegen sich vor allem im Winter in einem Niveau von 20 – 40°C und im Sommer, wenn kein Heizbetrieb ist, kann die Solarthermie das Temperaturniveau im gesamten Speicher anheben. Die maximale Speichertemperatur ist in der Regelung auf 85°C begrenzt. Wie man in Abbildung 67 erkennen kann, wurde im Sommer 2018 diese maximale Speichertemperatur nie erreicht. Abbildung 68 zeigt die laut Simulation erwarteten Temperaturen im Speicher. Während des Heizbetriebes bis Anfang April und ab Mitte Oktober stimmen die gemessenen Werte gut mit der Simulation überein, aber außerhalb der Heizperiode sind die gemessenen Speichertemperaturen mit etwa 60°C deutlich unterhalb der 85°C laut Simulation. Nach genauer Analyse konnte festgestellt werden, dass die Solarthermieanlage immer sehr frühzeitig hohe Temperaturen erreichte und deshalb in Stagnation ging. Im Juni 2019 wurde deshalb nach Ursachenforschung mit dem Haustechnikplaner die Solarpumpe durch ein größeres Modell ersetzt, da die Druckverluste im System vermutlich größer sind als in den Berechnungen.

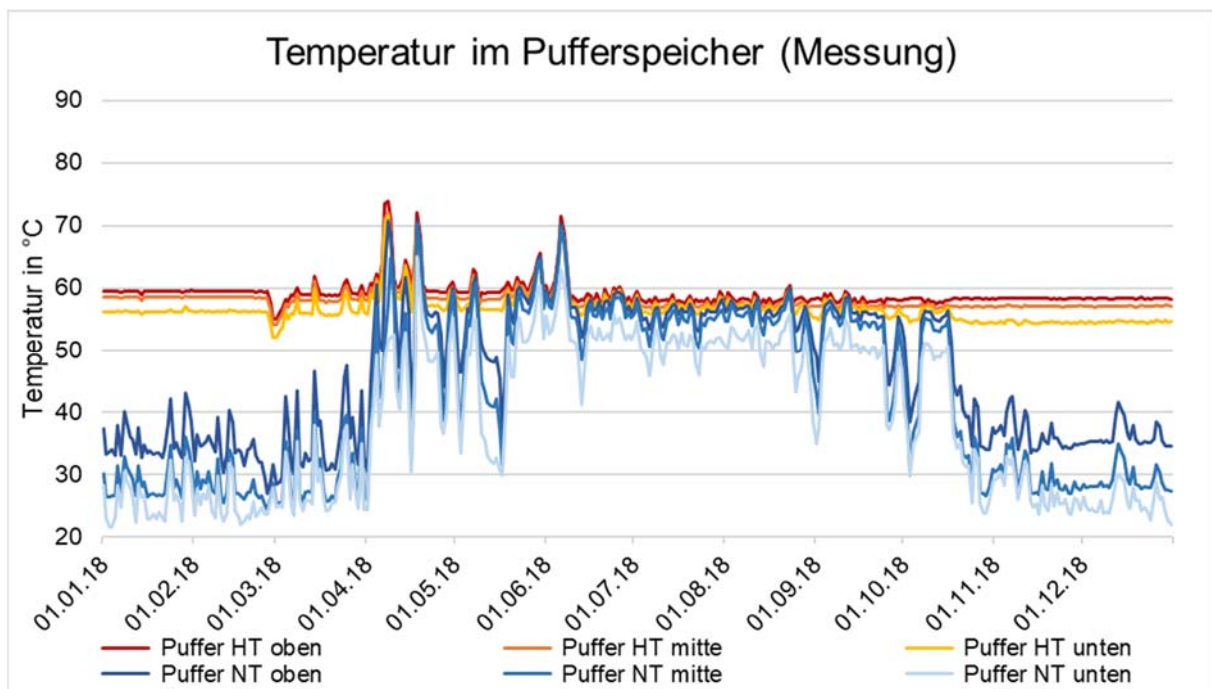


Abbildung 67: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher im Messjahr 2018 (Tagesmittelwerte).

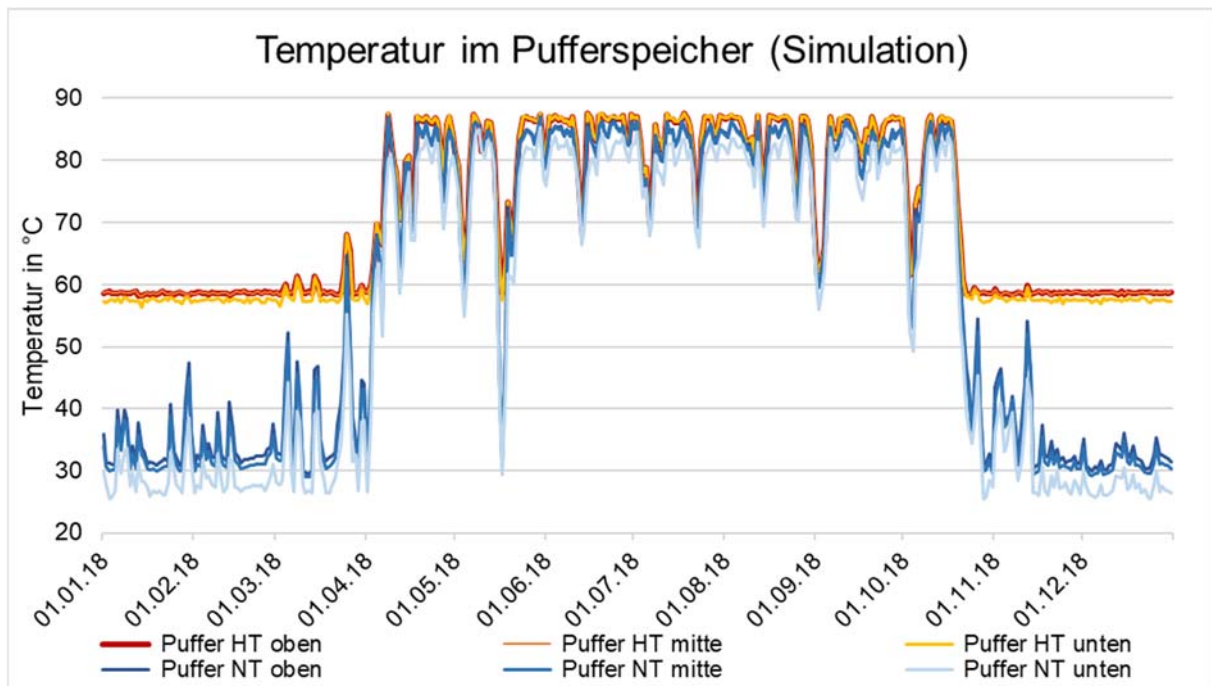


Abbildung 68: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher aus der Simulation für das Jahr 2018 (Tagesmittelwerte).

In Abbildung 69 sieht man den Temperaturverlauf im Pufferspeicher im Hochsommer 2018. Man erkennt, dass das Temperaturniveau nicht stark über 60°C geht und oft soweit abfällt, dass sogar im Hochsommer die Hochtemperaturwärmepumpe meist am frühen Morgen einschalten muss um die Speichertemperatur aufrecht zu erhalten. In der dargestellten Woche geschieht dies 9 Mal und ist in der Grafik mit den roten Pfeilen gekennzeichnet.

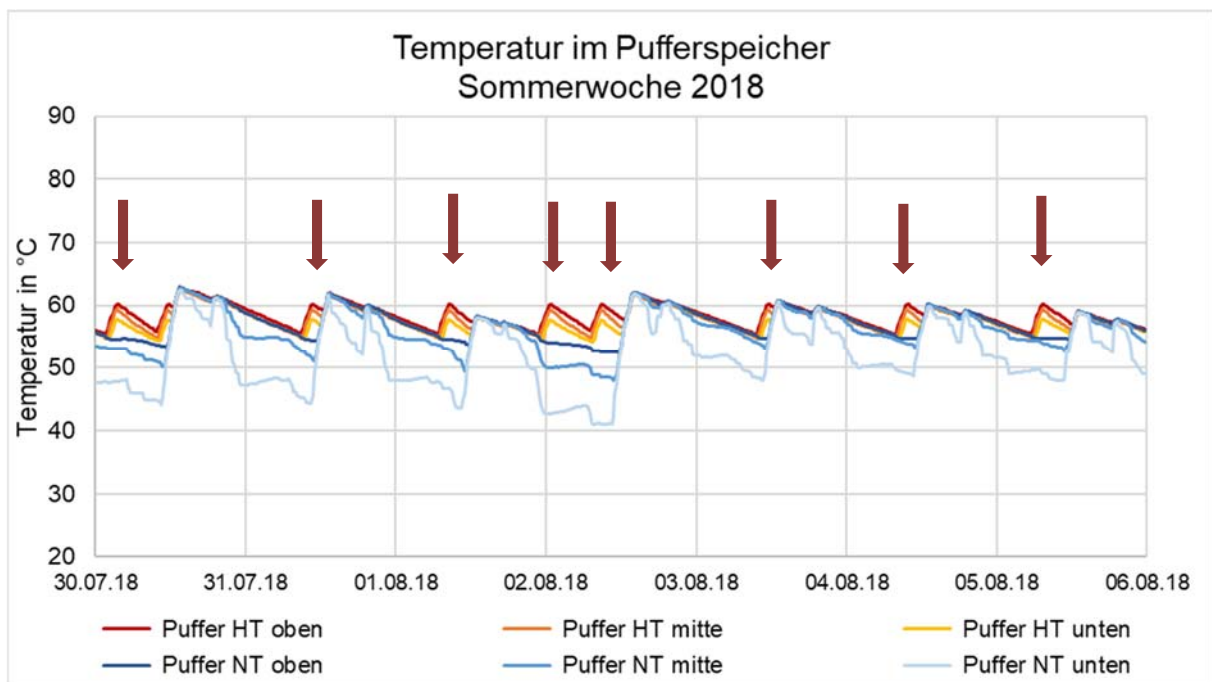


Abbildung 69: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundennmesswerte) vor Tausch der Solarpumpe.

In Abbildung 70 ist die erste Juliwoche 2019 nach Tausch der Solarpumpe dargestellt. Am ersten Juli ist der Kombispeicher fasst vollständig durchgeladen. Bis zum 3. Juli sind keine nennenswerten solaren Einträge vorhanden und durch den Warmwasserverbrauch, sowie durch Speicher- und Zirkulationsverluste fällt die Temperatur unter das gewünschte Niveau und die HT- Wärmepumpe schaltet am Morgen für einen Aufwärmzyklus ein. Danach fällt die Temperatur wieder und ab Mittag liefert die Solarthermieanlage Wärme an den Speicher, so dass dieser abends bereits 75°C erreicht. Am vierten und fünften Juli wird der Speicher dann vollständig auf die gewünschten 85°C durchgeladen. Danach gibt es keine solaren Erträge und der Speicher kühlt wieder ab. Man sieht, dass der Speicher das Gebäude bei vollständiger Beladung zwei bis drei Tage mit Brauchwarmwasser versorgen kann, bevor bei fehlenden solaren Erträgen die Wärmepumpe liefern muss. Der in der Abbildung dargestellte Verlauf entspricht den Erwartungen und das Problem mit der solarthermischen Anlage konnte auf der Grundlage des Soll-Ist-Vergleichs (Simulation + Monitoring) behoben werden.

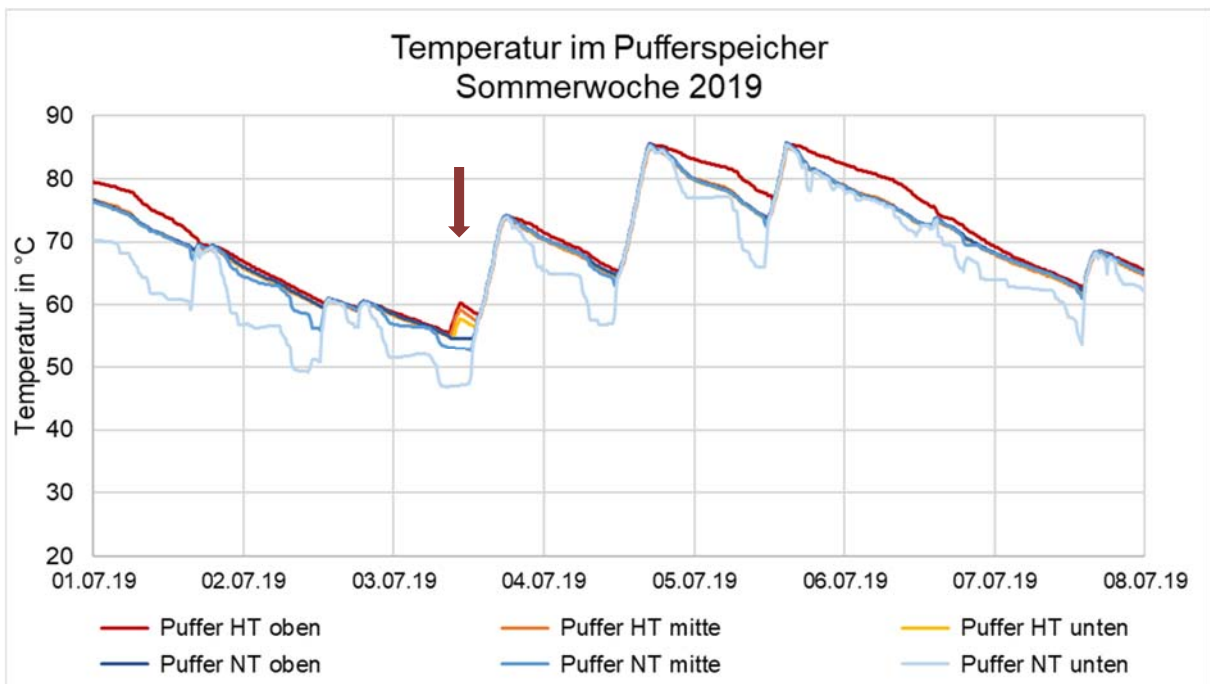


Abbildung 70: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der ersten Juliwoche im Sommer 2019 (Viertelstundemesswerte) nach Tausch der Solarpumpe.

Im Winter stellt sich eine Schichtung ein und der Speicher weist im Wesentlichen zwei Temperaturzonen auf. Oben für Brauchwarmwasser, unten zur Raumheizung. Der Wärmetauscher der Solarthermie ist im unteren Bereich angeordnet und dient somit vorrangig der Heizungsunterstützung und danach der Brauchwarmwassererwärmung. Man sieht in Abbildung 71 vor allem am 25.12 und 26.12, dass die Solarthermie hier das Temperaturniveau im unteren Bereich anhebt und so die Niedertemperaturwärmepumpe entlastet. In Abbildung 67 sieht man, dass während der Heizperiode die Solarthermie die Temperatur im unteren Bereich nicht bis

auf Brauchwasserniveau (60°C) anheben kann und deshalb im Winter nur heizungsunterstützend wirkt.

In Abbildung 71 sieht man außerdem an den Schwingungen der Temperaturen, dass die HT-Wärmepumpe 3-4 Mal pro Tag läuft und die NT-Wärmepumpe bis zu 10 mal. Auf diesen Punkt wird noch im Unterkapitel Wärmepumpen eingegangen.

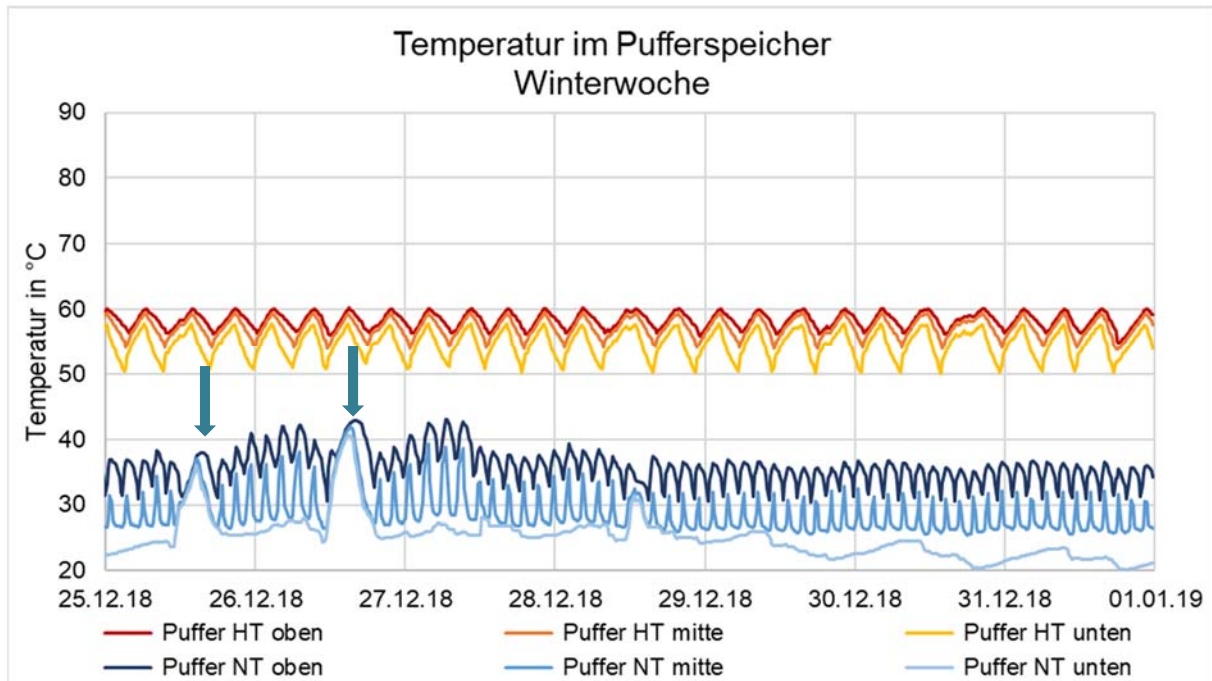


Abbildung 71: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).

4.4.6 Solarthermie

Die Solarthermie lieferte im ersten Messjahr 2018 eine Wärmemenge von 22.000 kWh/a oder 17,3 kWh/(m²_{WNFA}) an den Speicher. Dies entspricht einem Ertrag von $22.212 / 99,1 = 224$ kWh/(m²_{Kollektor, netto}a). Der reale Ertrag des ersten Messjahres liegt deutlich unter dem auf Basis der Simulation zu erwartenden Wert von $33.000 / 99,1 = 333$ kWh/(m²_{Kollektor, netto}a). Ursache für die verminderten Erträge waren erhöhte Druckverlusten im System, weshalb im Juni 2019 eine größere Solarpumpe eingebaut wurde. Nach dem Austausch der Pumpe funktioniert das System wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, so dass in Zukunft Erträge erwartet werden, die den Simulationswerten entsprechen.

In Abbildung 72 sieht man die Wärmelieferung der Solarthermieanlage an den Speicher im Messjahr 2018 (Intervall: Tageswerte) und in Abbildung 73 im Vergleich dazu die Werte aus der Simulation. Man erkennt, dass die Verläufe bis April ähnlich sind, wobei die Werte in der Simulation leicht höher sind.

Im Winter versorgt die Solarthermie vorrangig die Heizung, was man gut an den Temperaturen im Speicher erkennen kann.

Im Sommer deckt die Solarthermie nur noch den Brauchwarmwasserbedarf von rund 53 kWh/d und die Verluste von etwa 45 kWh/d. Dies ergibt eine tägliche Wärmenachfrage von etwa 100 kWh/d. Wenn es eine Schönwetterperiode mit täglichen solaren Erträgen gibt, so muss oder kann die Solarthermie also nur rund 100 kWh/d liefern. In der Simulation erkennt man, dass im Sommer die gelieferte Energie oft bei dieser Größenordnung liegt. Wenn dann aber trübe Tage vorhanden sind und der Puffer bis auf 60° abkühlt, kann am nächsten sonnenreichen Tag bis zu 300 kWh/d pro Tag an den Puffer geliefert werden. Zur Plausibilitätsprüfung wird der Energieinhalt des Pufferspeichers bei einem Temperaturabfall von 85 auf 55°C berechnet. Bei einem Inhalt von 6,74 m³ und einem delta T von 30°C ergibt dies $6,74 \cdot (4,182/3,6) \cdot (85-55) = 235 \text{ kWh}$. Auch hier erkennt man, dass der Speicher im Sommer bei einem täglichen Bedarf von etwa 100 kWh/d rund zweieinhalb Tage das Gebäude versorgen kann.

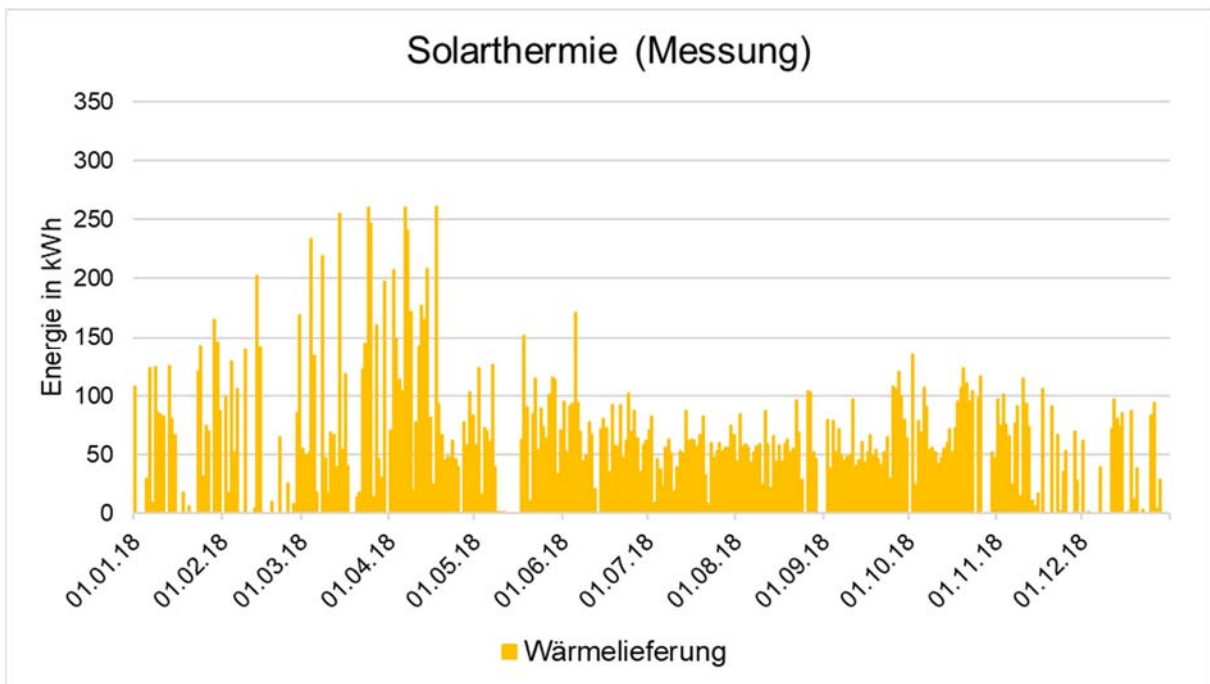


Abbildung 72: Wärmelieferung der Solarthermie Anlage an den Speicher im Messjahr 2018 (Intervall: Tageswerte).

Die Wärmelieferung der Solarthermie im ersten Messjahr betrug 22.212 kWh/a, die gesamte Wärmelieferung an den Speicher 86.197 kWh/a. Der solare Deckungsgrad für Heizung und Warmwasser betrug damit 26%. Durch die Anordnung des Wärmetauschers der Solarthermie im unteren Bereich des Speichers wird davon ausgegangen, dass vorrangig die Raumheizung bedient wird und erst wenn keine Wärmeabnahme für die Heizung erfolgt, wird das Brauch-

warmwasser bedient. Da aber der Brauchwarmwasser Wärmetauscher auch unten im Speicher beginnt, und auch im Heizbetrieb dadurch schon vorgewärmt wird, stimmt diese Trennung in Realität nicht ganz. Werden die Messdaten auf 15 Minuten Basis mit vorher beschriebener Aufteilung analysiert ergibt sich für Heizung und Warmwasser jeweils ein gleicher solarer Deckungsgrad von etwa 13%.

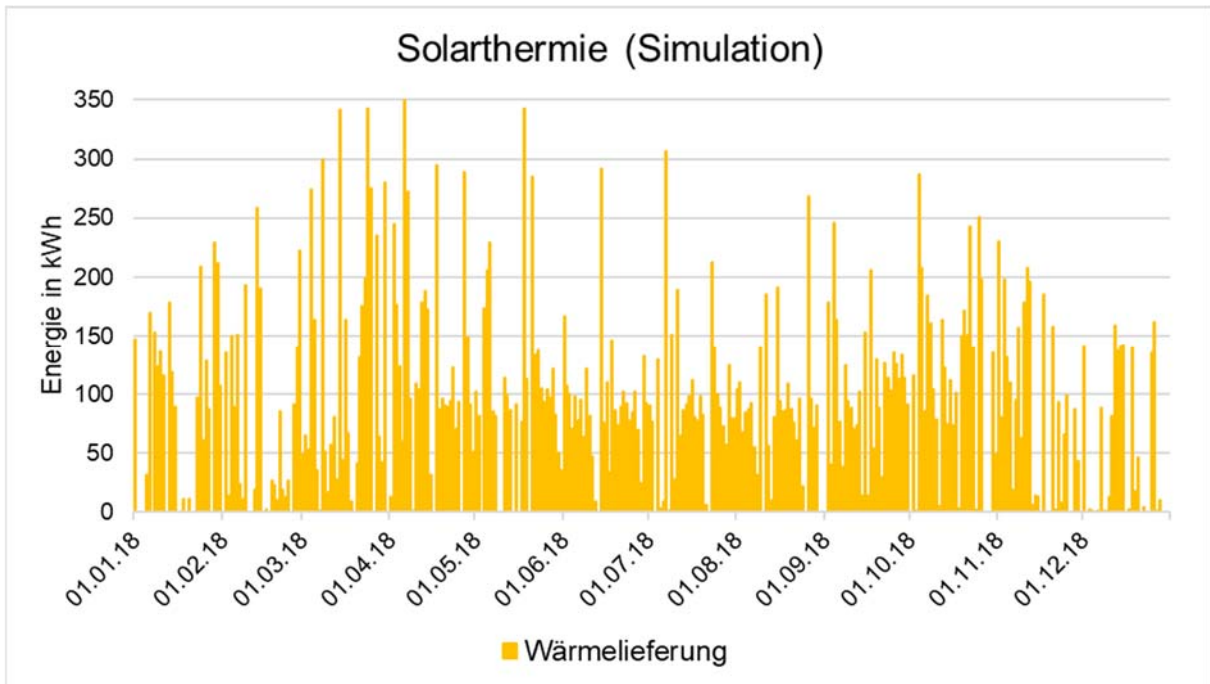


Abbildung 73: Wärmelieferung der Solarthermie Anlage an den Speicher im Aus der Simulation für das Jahr 2018 (Intervall: Tageswerte).

4.4.7 Hochtemperatur-Wärmepumpe

Auch die Hochtemperatur –Wärmepumpe zeigt prinzipiell das erwartete Verhalten. Die gemessene Jahresarbeitszahl lag bei 2,5, in der PHPP-Berechnung wurde im Vorfeld ein Wert von 2,9 ermittelt.

Tabelle 23: Jahresarbeitszahl HT-WP und monatliche Arbeitszahlen.

	JAZ	Monatsarbeitszahlen											
		Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
WP Warmwasser	2,5	2,4	2,4	2,5	2,3	2,2	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6	2,5

Auffällig war allerdings, dass die Wärmepumpe während der Sommermonate weit häufiger in Betrieb war als erwartet (siehe auch nachfolgende Abbildung). Ursache war, dass die thermische Solaranlage wie im vorigen Kapitel erläutert aufgrund der unzureichenden Durchströmung einzelner Kollektorfelder gesamthaft in den Stillstand ging, ohne dass der Pufferspeicher

bereits voll beladen gewesen wäre. Dies führte zu einer Pufferspeichertemperatur von rund 55°C, so dass selbst im Sommer bei bester Solarstrahlung die HT-Wärmepumpe nachheizen musste, um die geforderte Ausgangstemperatur von 60°C zu erreichen. Nach der im Vorkapitel dargestellten Fehlerbehebung wird die HT-Wärmepumpe im Sommerhalbjahr nur noch in Ausnahmesituationen in Betrieb gehen müssen.

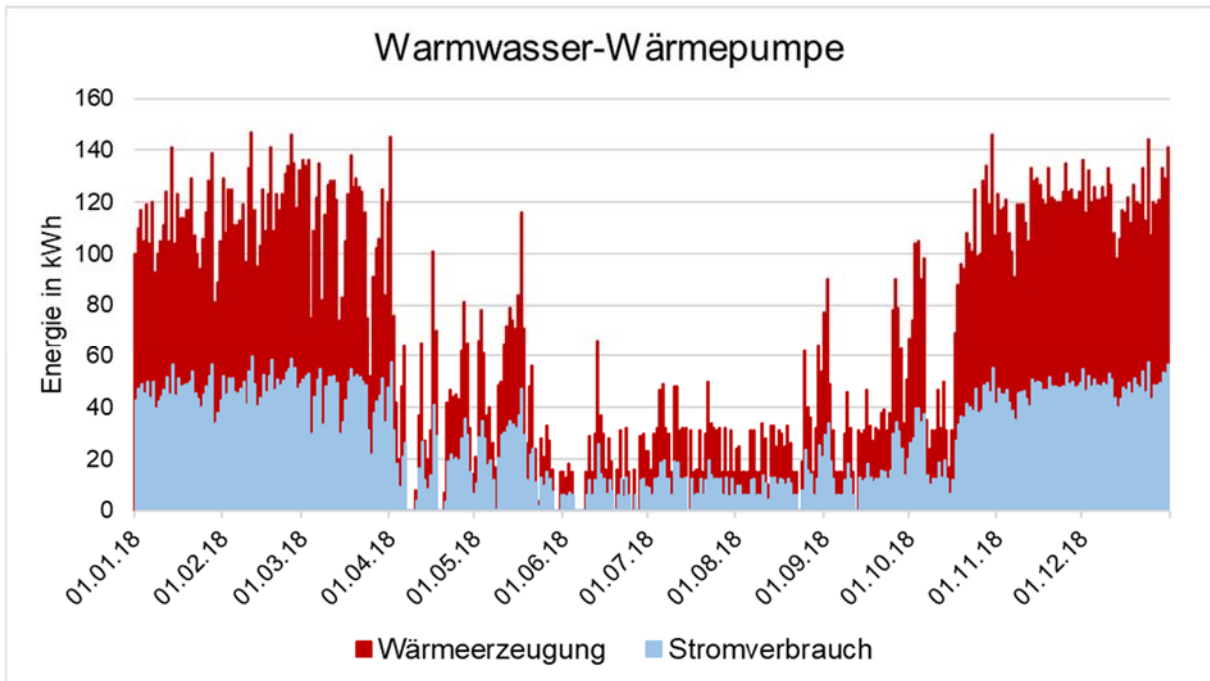


Abbildung 74: grafische Darstellung von Wärmeerzeugung und Stromverbrauch der Warmwasser-Wärmepumpe als Tagesmittelwerte in kWh/Tag.

Ein weiteres Problem das auftrat, war eine zu klein dimensionierte Sole-Pumpe. Entgegen der Planung wurden nur sechs statt sieben Erdsonden gebohrt, was zu einem höheren Druckverlust führt, da die Gesamt-Sondenlänge gleichblieb.

Durch den zu hohen Druckverlust sank der Massenstrom, wodurch die beiden WP nur alternierend betrieben werden konnten. Dies führt zu dem häufigen Takten und deutlich schwankenden Warmwassertemperaturen; teilweise unter dem Sollwert. Der Fehler mit der zu kleinen Solepumpe bzw. vielmehr der Soleleitungen mit zu hohem Druckverlust wurde im März 2018 bemerkt und durch eine größere Sole-Pumpe behoben. Abbildung 75 zeigt den Temperaturverlauf und das Takten der WP vor dem Tausch der Solepumpe, Abbildung 76 die Situation nach Wechseln der Solepumpe. Vor dem Tausch lief die WP bis zu 10-mal am Tag für relativ kurze Zeit, nach dem Tausch nur noch 3-4-mal und dafür etwa für 2 Stunden.

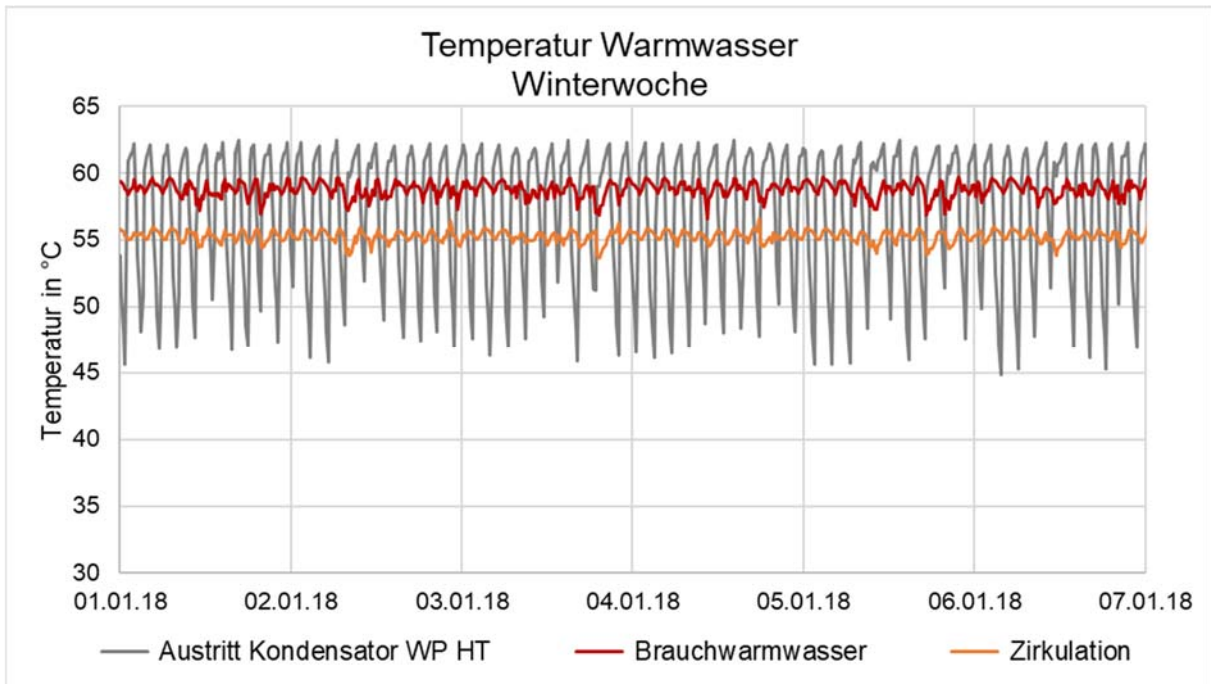


Abbildung 75: grafischer Verlauf der Temperatur des Warmwassers während der ersten Woche des Jahres 2018 (Viertelstundemesswerte) vor Tausch der Solepumpe.

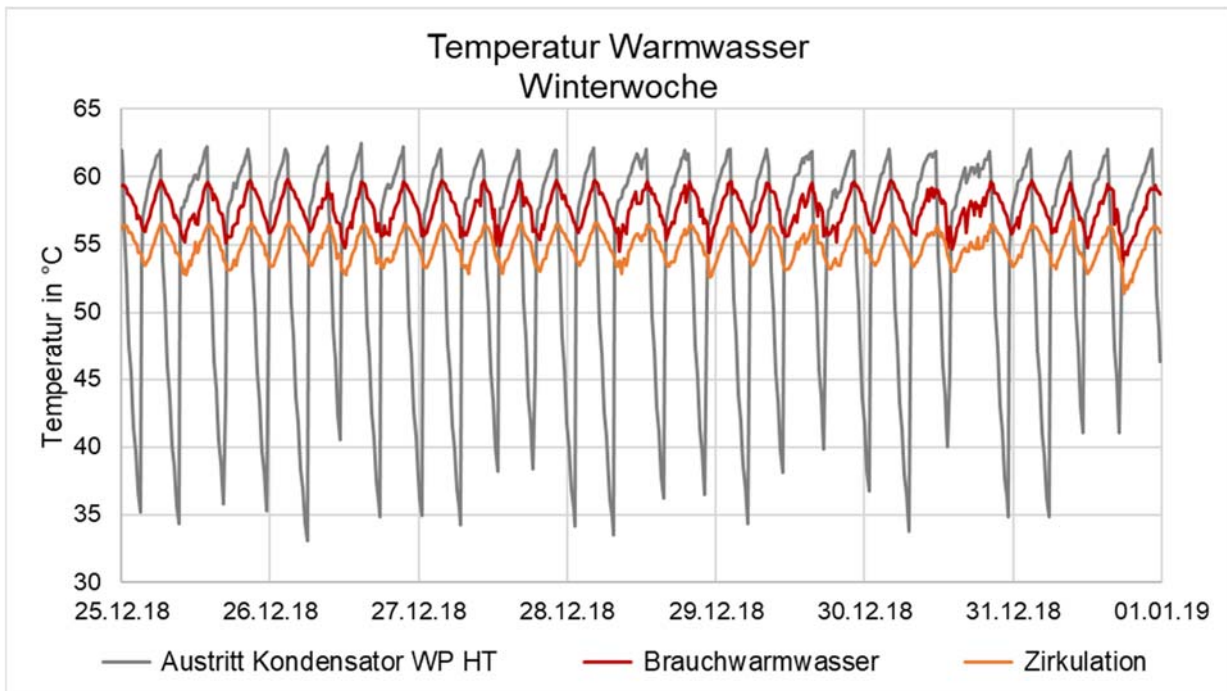


Abbildung 76: grafischer Verlauf der Temperatur des Warmwassers während der letzten Woche des Jahres 2018 (Viertelstundemesswerte) nach Tausch der Sole-Pumpe.

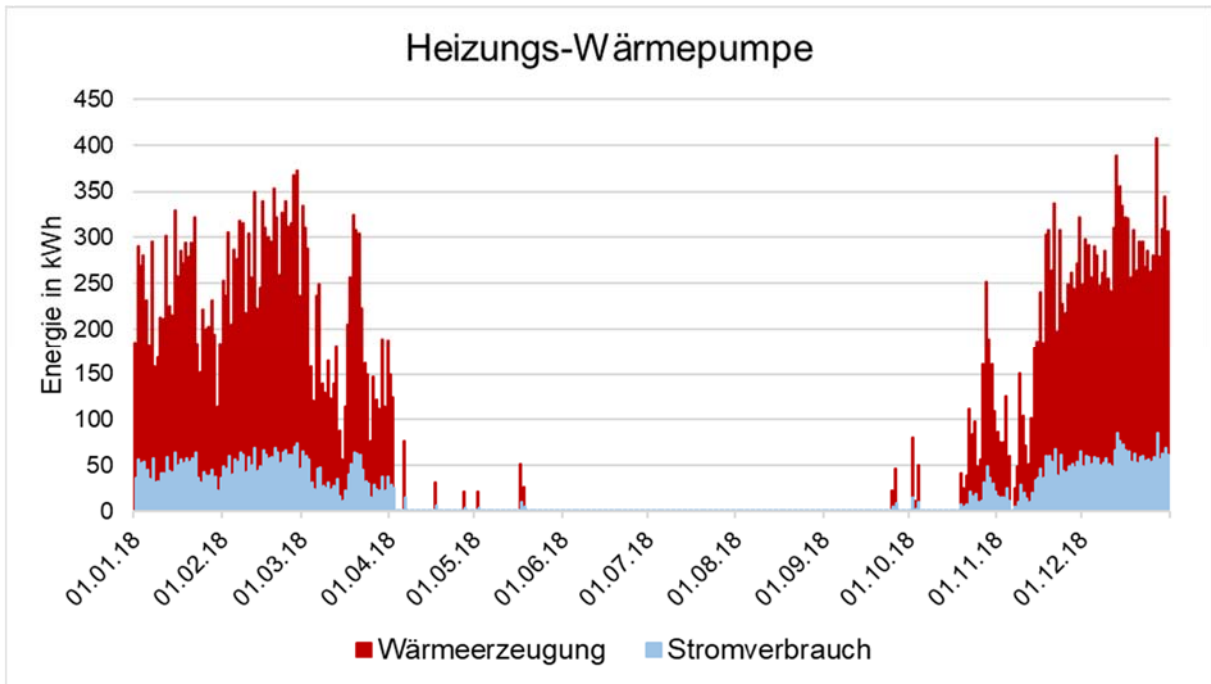


Abbildung 78: grafische Darstellung von Wärmeerzeugung und Stromverbrauch der Heizungs-Wärmepumpe als Tagesmittelwert.

Wie die Abbildung zeigt, lag die maximale Wärmeabgabe der Niedertemperatur-Wärmepumpe bei etwa 370 bis 400 kWh/Tag. Die Maximalwerte wurden in den kältesten Wintertagen Ende Februar/Anfang März sowie Ende Dezember gemessen.

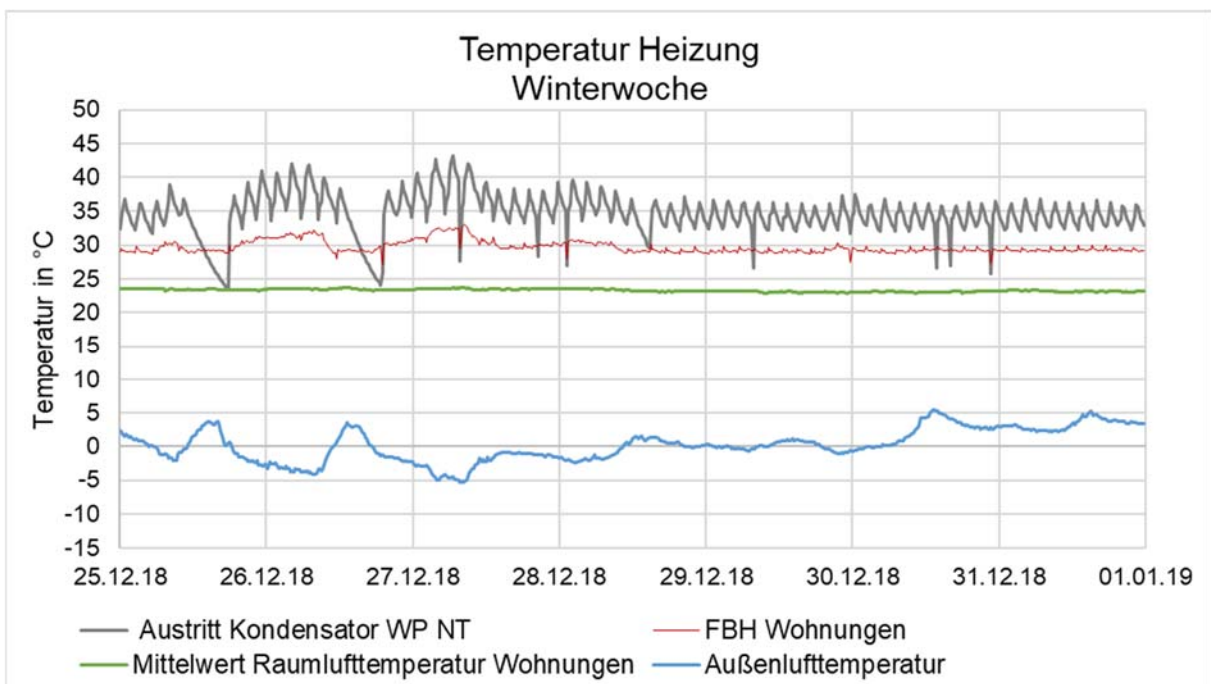


Abbildung 79: grafischer Verlauf der Temperatur der Heizung während der letzten Woche des Jahres 2018 verglichen mit Raumlufttemperatur und Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).

Bei genauerer Betrachtung der Messwerte ist selbst in der kältesten Woche 2018 ein häufiges Takten der Wärmepumpe zu beobachten. Dies liegt zum einen daran, dass es sich um ein nicht modulierendes Modell handelt und zum anderen, dass die WP eine hohe Auslegungswärmeleistung besitzt, welche nur bei sehr niedrigen Außentemperaturen benötigt wird. Sie wurde gemäß der Heizlast-Norm EN 12831 dimensioniert.

4.4.9 Verteil- und Speicherverluste

Der an den WMZ der einzelnen Wohnungen gemessene Heizwärmeverbrauch beträgt 42,4 kWh/(m²_{WNFA}) und der gemessene Verbrauch für Warmwasser aus dem Speicher 15,0 kWh/(m²_{WNFA}). Insgesamt wird damit in den Wohnungen 57,4 kWh/(m²_{WNFA}) an Wärme entnommen. Werden die Speicherverluste mit 1,3 (aus Simulation), die Verteilverluste der Raumheizung mit 1,5 und die Zirkulationsverluste mit 11,3 summiert, ergeben sich Gesamtverluste für Speicherung und Verteilung von 14,4 kWh/(m²_{WNFA}). Somit ergibt sich aus der teils berechneten Summe aus dem Speicher mit 71,8 kWh/(m²_{WNFA}) im Vergleich zur gemessenen (70,3) eine Abweichung von etwa 2%. Setzt man die Verluste von 14,4 kWh/(m²_{WNFA}) ins Verhältnis zur Gesamtwärmemenge aus dem Speicher (71,8) so ergeben sich etwa 20% Speicher- und Verteilverluste.

Nachfolgende Grafik zeigt zum Vergleich die Verluste eines anderen hocheffizienten MFH mit effizientem Wärmeverteilsystem.

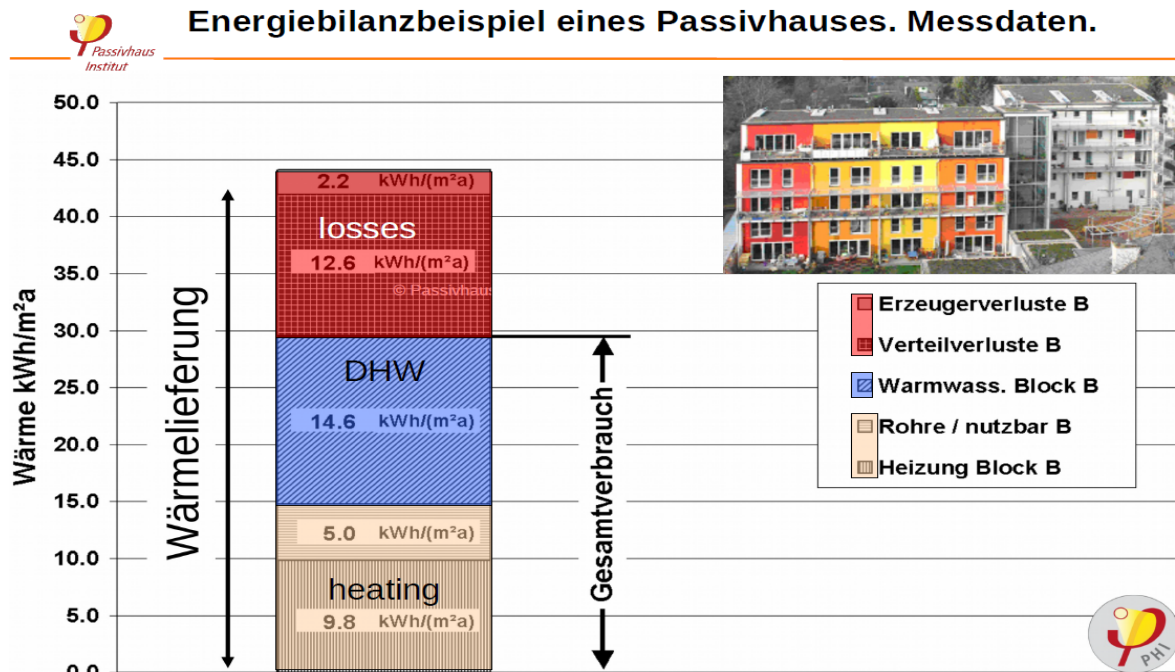


Abbildung 80: Vergleichsprojekt nordorientiertes MFH Frankfurt [21]^b.

^b Anmerkung zur Abbildung: Werte in der Grafik bezieht sich auf die Energiebezugsfläche nach PHPP, welche etwas größer ist als die Wohnnutzfläche

Wie die Abbildung zeigt, liegen die Verteilverluste des Gebäudes mit 12,6 kWh/m²_{PHPPA} in der gleichen Größenordnung wie im KliNaWo-Projekt.

Wie Untersuchungen zeigen, könnten die Verteilverluste um etwa 3-4 kWh/(m²_{WNFA}) reduziert werden, wenn die Leitungsdämmung statt mit 3/3 der Rohrdicke mit doppelter Rohrdicke ausgeführt würde.

Wie andere Projekte (auch in Vorarlberg) zeigen, können die Verteilverluste hocheffizienter Mehrfamilienhausprojekte durchaus auch in der Größenordnung von 30 bis 35 kWh/(m²_{WNFA}) liegen.

5 Bewohnerbefragung

Zusätzlich zum Monitoring der Energieverbräuche, der wichtigsten Behaglichkeitsfaktoren sowie der Luftqualität wurde eine erste Bewohnerbefragung durchgeführt. Diese soll einen ersten Eindruck über die subjektive Einschätzung der Einwohner zu verschiedenen Aspekten der Behaglichkeit und der Luftqualität vermitteln. Außerdem wurde nach der Art der Nutzung des Gemeinschaftsraums und der Anzahl der Bewohner pro Wohneinheit gefragt. Von den 18 Wohnungen haben 12 an der Befragung teilgenommen.

In der folgenden Tabelle sind die Antworten der Bewohner je Wohnung zusammengefasst. Eine detailliertere Bewohnerbefragung ist für das Frühjahr 2020 geplant.

Tabelle 25: Bewohnerbefragung.

Raumtemperatur	Luftfeuchte	Zugerscheinung	Luftqualität	Nutzung Gemeinschaftsraum	Personen
Im Winter abends ein wenig kalt	Im Winter zu trocken	Im Winter im Wohnzimmer		nein	4
gut	Im Winter zu trocken, unter 20%	nein		nein	1
Im Sommer teilweise ein wenig zu warm	Keine Meinung	-		Fitness	1
	vermutet dass nicht geregelt	nein	Schlechte Luft von rauchendem Nachbarn kommt durch Lüftung herein	Nein, kein Bedarf	1

Raumtemperatur	Luftfeuchte	Zugerscheinung	Luftqualität	Nutzung Gemeinschaftsraum	Personen
Schlafzimmer sehr kalt, Badezimmer sehr warm, FB Garderobe durchgehend warm, im Sommer eigentlich gut <u>wenn</u> Jalousie <u>und</u> Fenster zu (Südseite)		Immer in Wohnzimmer und Schlafzimmer		Sport, Geburtstagsfeier, im Sommer grillen (ist auf Balkon nicht erlaubt)	2
Zu kalt wenn draußen extrem kalt		Winter + Übergangszeit im Wohnzimmer		Geburtstagsfeier	1
Töchter finden es zu kalt Manche FB-Bereiche kalt, Im Sommer gut <u>wenn</u> verschattet	Regelung passt nicht, Regler unten = offen	Im Winter im Wohnzimmer	Beim Kochen bleibt Geruch zurück Schlechte Luft von rauchendem Nachbar kommt über Lüftung herein	Fitnessgeräte waren sehr laut im ganzen Haus, sind jetzt weg Tochter lernt dort	4
	Im Winter angelaufene Fenster morgens und abends	nein		Fitness	1
Heizkörper wurden abgedreht	Im Winter zu trocken, Parkett klafft auf, nur 28%, Luftbefeuchter angeschafft und Lüftungsschlitz abgeklebt	nein		Nein, kein Bedarf	1,5
Im Sommer im Schlafzimmer viel zu heiß	Winter + Übergangszeit viel zu trocken, teils unter 30%	nein	Frischlufzufuhr ist sehr gut	nein	1
Zieht beim Lüftungsschlitz rein		Sommer + Winter in Wohnzimmer und Küche/Esszimmer		Zusammensitzen und Fitness	2

Beteiligte und Projektfinanzierung

Bauherr ist die gemeinnützige Bauvereinigung VOGEWOSI, die ebenso wie die Arbeiterkammer Vorarlberg Finanzierungspartner des Projekts ist. Der aus dem Forschungsprojekt resultierende Planungsmehraufwand und die wissenschaftliche Begleitung werden als Projekt des Comet-Zentrums ALPS in Innsbruck gefördert. Als weitere Firmenpartner in der zweiten Projektphase konnten die gemeinnützigen Bauvereinigungen Alpenländische Heimstätte Vorarlberg und Wohnbauselbsthilfe Vorarlberg gewonnen werden. Comet-Projekte werden durch die Bundesministerien BMVIT und BMWFW sowie durch das Land Vorarlberg gefördert und durch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Die Hardwarekosten des Monitorings werden vom Land Vorarlberg getragen.

Wissenschaftspartner sind die Universität Innsbruck (Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften – Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen und das Passivhaus Institut, Standort Innsbruck). Das Forschungsprojekt wird vom Energieinstitut Vorarlberg geleitet.

Die Gebäudeplanung wurde vom folgenden Planungsteam übernommen:

- Architektur: walser + werle architekten zt gmbh, Feldkirch
- Haustechnikplanung: Planungsteam e-plus GmbH, Egg
- Bauphysik: Spektrum – Zentrum für Umwelttechnik und –management GmbH, Dornbirn
- Statik: M+G Ingenieure, Feldkirch
- Elektroplanung: ekplan, Elektroplanung, Nenzing

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Netto-Errichtungskosten des Projekts KliNaWo im Vergleich zu denen aller zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen in Vorarlberg [3].	5
Abbildung 2: gemessener Endenergieverbrauch 2018 nach Anwendungen im Vergleich zur PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung.	6
Abbildung 3: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnungen während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	8
Abbildung 4: grafischer Verlauf der Raumlufthtemperatur in den Wohnungen während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	9
Abbildung 5: Bauteilaufbau Außenwand, Auszug aus EAW Fertigstellung.	12
Abbildung 6: Bauteilaufbau Flachdach, Auszug aus EAW Fertigstellung.	13
Abbildung 7: Bauteilaufbau Decke zu unkonditioniertem Keller , Auszug aus EAW Fertigstellung.	13
Abbildung 8: Bauteilaufbau Decke zu Tiefgarage, Auszug aus EAW Fertigstellung.	14
Abbildung 9: Haustechnikschema der Ausführungsvariante, Planungsbüro e-plus [8].	15
Abbildung 10: vereinfachtes Haustechnikschema.	16
Abbildung 11: Speicher für Heizung und Warmwasser.	17
Abbildung 12: Leitungslängen und Dämmung mit Wärmeverlusten; Auszug aus PHPP-Berechnung Energieinstitut Vorarlberg [7].	18
Abbildung 13: Wärmepumpe HT (WW) oben und Wärmepumpe NT (Heizung) unten.	19
Abbildung 14: Heizkurve im Projekt KliNaWo (Stand Mai 2019, Quelle Auttec Regelung).	19
Abbildung 15: Solepumpe Grundfoss Magna 3, 32-120 F.	20
Abbildung 16: Heizkreispumpe (oben links) und Solarpumpe (unten rechts).	21
Abbildung 17: Fußbodenheizung und Heizkörper in Top 9.	22
Abbildung 18: Screenshot aus der Gebäudeleittechnik für den Bereich Lüftung.	23
Abbildung 19: Zentraler Abluftventilator im Technikraum im 2.OG.	24
Abbildung 20: Sammelrohr und Einzelstränge mit Schalldämpfer und Konstantvolumenstromregler.	24
Abbildung 21: Nachströmöffnungen (links Außenansicht, rechts Innenansicht).	25
Abbildung 22: 3D Gebäudemodell des KliNaWo Gebäudes in der Gebäude- und Anlagensimulation in IDA ICE. Farblich unterschiedlich dargestellt sind die unterschiedlichen Konstruktionen.	29
Abbildung 23: Anlagenmodell des KliNaWo Gebäudes in der Gebäude- und Anlagensimulation in IDA ICE.	30
Abbildung 24: Zentraler Leit- und Monitoring-Panel-PC.	31
Abbildung 25: Monitoringschema (Quelle: Auttec).	32

Abbildung 26: Netto-Errichtungskosten des Projekts KliNaWo im Vergleich zu denen aller zeitgleich errichteten gemeinnützigen Wohnanlagen in Vorarlberg [3].	37
Abbildung 27: Grundstückspreisentwicklung im Rückblick 2008 bis 2019 – Feldkirch [13].	40
Abbildung 28: Auswirkung der Erhöhung der energetischen Qualität und der Grundstückspreisentwicklung der vergangenen Jahre auf den imaginären Kaufpreis einer Wohnung im MFH KliNaWo.	40
Abbildung 29: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur (halbstündliche Messwerte).	42
Abbildung 30: Außenlufttemperatur der ersten Messperiode (Jan bis Dez 2018) als Monatsmittelwerte.	43
Abbildung 31: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	46
Abbildung 32: grafischer Verlauf der Außenlufttemperatur während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	46
Abbildung 33: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnungen (Tagesmittelwerte).	47
Abbildung 34: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnzimmern (Tagesmittelwerte).	48
Abbildung 35: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Schlafzimmern (Tagesmittelwerte).	48
Abbildung 36: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Badezimmern (Tagesmittelwerte).	49
Abbildung 37: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnungen während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	50
Abbildung 38: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Schlafzimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	51
Abbildung 39: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Badezimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	52
Abbildung 40: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnzimmern während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	52
Abbildung 41: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnungen während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	53
Abbildung 42: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Badezimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	55
Abbildung 43: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Schlafzimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	55
Abbildung 44: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in den Wohnzimmern während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte).	57

Abbildung 45: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur im Stiegenhaus verglichen mit der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwerte).....	57
Abbildung 46: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur im Stiegenhaus während der wärmsten Woche im Sommer 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).....	58
Abbildung 47: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur im Stiegenhaus während der kältesten Winterwoche verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).	59
Abbildung 48: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in Tiefgarage und Keller verglichen mit der Außenlufttemperatur (Tagesmittelwerte).....	59
Abbildung 49: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in Tiefgarage und Keller während der wärmsten Woche im Sommer 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).....	60
Abbildung 50: grafischer Verlauf der Raumlufftemperatur in Tiefgarage und Keller während der kältesten Woche im Winter 2018 verglichen mit der Außenlufttemperatur (Viertelstundenmittelwerte).....	61
Abbildung 51: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen im Hochsommer (Stundenmittelwerte).	61
Abbildung 52: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen im Winter (Stundenmittelwerte).	62
Abbildung 53: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen in der kältesten Winterwoche (Viertelstundenmittelwerte).....	63
Abbildung 54: grafischer Verlauf der rel. Raumlufffeuchte in den Wohnungen mit der höchsten und der niedrigsten Feuchte in der kältesten Winterwoche (Viertelstundenmittelwerte).....	63
Abbildung 55: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer einer Wohnung mit durchschnittlichen sommerlichen Raumlufftemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00).....	65
Abbildung 56: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer der Wohnung mit den niedrigsten sommerlichen Raumlufftemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00). .	66
Abbildung 57: Behaglichkeitsbewertung nach EN 15251:2007 im Schlafzimmer der Wohnung mit den höchsten sommerlichen Raumlufftemperaturen (Nutzungszeitraum 20:00-8:00).	67
Abbildung 58: Endenergieverbrauch 2018 nach Anwendungen im Vergleich zur Verbrauchsprognoseberechnung PHPP.	69
Abbildung 59: Monatswerte des Endenergieverbrauchs nach Anwendungen.	70
Abbildung 60: Aufteilung des Haustechnikstromes mit den Annahmen aus dem Simulationsmodell. Dies sind keine gemessenen Werte.....	72
Abbildung 61: Sankey-Diagramm der Energieflüsse im Gebäude im Messjahr 2018.....	74

Abbildung 62: Vergleich des gemittelten gemessenen Jahreslastprofil 2018 mit dem Standardlastprofil H0 des BDEW [22].	76
Abbildung 63: gemittelte gemessene Tageslastprofile je Wohnung.	77
Abbildung 64: Vergleich des gemittelten gemessenen Jahreszapfprofil 2018 mit dem Tagesprofil des Warmwasserbedarfs in großen Wohngebäuden für Wochentage nach VDI 6002, Abbildung D3.	78
Abbildung 65: Abgegebene Wärmeleistung der Heizungen in den Wohnungen im Vergleich zur Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte 2018).	79
Abbildung 66: Verteilung des Heizwärmeverbrauches im Messjahr 2018 auf die einzelnen Wohnungen.	80
Abbildung 67: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher im Messjahr 2018 (Tagesmittelwerte).	81
Abbildung 68: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher aus der Simulation für das Jahr 2018 (Tagesmittelwerte).	82
Abbildung 69: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der wärmsten Woche im Sommer 2018 (Viertelstundenmesswerte) vor Tausch der Solarpumpe.	82
Abbildung 70: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der ersten Juliwoche im Sommer 2019 (Viertelstundenmesswerte) nach Tausch der Solarpumpe.	83
Abbildung 71: grafischer Verlauf der Temperatur im Pufferspeicher während der kältesten Woche im Winter 2018 (Viertelstundenmesswerte).	84
Abbildung 72: Wärmelieferung der Solarthermie Anlage an den Speicher im Messjahr 2018 (Intervall: Tageswerte).	85
Abbildung 73: Wärmelieferung der Solarthermie Anlage an den Speicher im Aus der Simulation für das Jahr 2018 (Intervall: Tageswerte).	86
Abbildung 74: grafische Darstellung von Wärmeerzeugung und Stromverbrauch der Warmwasser-Wärmepumpe als Tagesmittelwerte in kWh/Tag.	87
Abbildung 75: grafischer Verlauf der Temperatur des Warmwassers während der ersten Woche des Jahres 2018 (Viertelstundenmesswerte) vor Tausch der Solepumpe.	88
Abbildung 76: grafischer Verlauf der Temperatur des Warmwassers während der letzten Woche des Jahres 2018 (Viertelstundenmesswerte) nach Tausch der Sole-Pumpe.	88
Abbildung 77: schematische Darstellung einer Wärmepumpenanlage mit den Bilanzgrenzen zur Ermittlung der Arbeitszahl [23].	89
Abbildung 78: grafische Darstellung von Wärmeerzeugung und Stromverbrauch der Heizungs-Wärmepumpe als Tagesmittelwert.	90
Abbildung 79: grafischer Verlauf der Temperatur der Heizung während der letzten Woche des Jahres 2018 verglichen mit Raumlufttemperatur und Außenlufttemperatur (Viertelstundenmesswerte).	90

Abbildung 80: Vergleichsprojekt nordorientiertes MFH Frankfurt [21].....91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Endenergieverbrauch nach Anwendungen absolut und spezifisch im Vergleich zu den spezifischen Werten der PHPP-Verbrauchsprognoseberechnung. Bezug auf WNF.7

Tabelle 1: Vergleich der energetischen Qualität des KliNaWo-Gebäudes mit den Anforderungen der Bautechnikverordnung Vorarlberg 2017..... 10

Tabelle 2: Wichtigste allgemeine Daten zur Ausführungsvariante. 11

Tabelle 3: U-Werte der Bauteile gemäß PHPP. 12

Tabelle 4: Kollektorfläche. 18

Tabelle 5: Energiekennwerte bei Berechnung nach OIB RL 6. 26

Tabelle 6: Annahmen und Randbedingungen für die PHPP-Berechnung der Ausführungsvariante. 27

Tabelle 7: Energiekennwerte PHPP für die Ausführungsvariante. 28

Tabelle 8: Liste der Zähler und Fühler. 33

Tabelle 9: Vergleich der gemessenen Außenlufttemperatur mit Annahmen aus verschiedenen Quellen. 43

Tabelle 10: Vergleich der Globalstrahlungswerte aus verschiedenen Quellen. 45

Tabelle 11: Vergleich der flächengewichteten Raumlufftemperaturen in Wohnzimmer, Schlafzimmer, Bad und gesamter Wohnung. 49

Tabelle 12: Maximum und Minimum der Raumlufftemperatur in den Wohnungen sortiert nach Maximum von niedrig bis hoch während der wärmsten Woche im Sommer 2018. 54

Tabelle 13: Maximum und Minimum der Raumlufftemperatur in den Schlafzimmern sortiert nach Maximum von niedrig bis hoch während der wärmsten Woche im Sommer 2018. 56

Tabelle 14: Vergleich der Raumlufffeuchte in Top 9 und Top 16 62

Tabelle 15: Endenergieverbrauch absolut und flächenspezifisch nach Anwendungen im Vergleich zu den spezifischen Werten der Verbrauchsprognoseberechnung PHPP. 68

Tabelle 16: Endenergieverbrauch in monatlichen absoluten Werten aufgegliedert nach Anwendung. 70

Tabelle 17: Vergleich der gemessenen Verbräuche mit den Vergleichswerten der Verbrauchsprognoseberechnung und der PHPP-Berechnung mit realer Personenzahl, realer Raumlufftemperatur, realer Außentemperatur und realem Warmwasserbedarf. 71

Tabelle 18: Stromverbrauch und Wärmeerzeugung/verbrauch gemessene Werte Messjahr 2018. 73

Tabelle 19: Stromverbrauch und Wärmeerzeugung/verbrauch berechnete Werte Messjahr 2018. 73

Tabelle 20: spezifischer Haushaltsstromverbrauch hocheffizienter Mehrfamilienhäuser.....	75
Tabelle 21: Warmwasserverbrauch in den Wohnungen verglichen mit den Annahmen in den PHPP-Berechnungen.....	78
Tabelle 22: Jahresarbeitszahl HT-WP und monatliche Arbeitszahlen.	86
Tabelle 23: Jahresarbeitszahl NT-WP und monatliche AZ.....	89
Tabelle 24: Bewohnerbefragung.	92

Literatur

- [1] M. Ploss, T. Hatt, C. Schneider, T. Rosskopf, und M. Braun, „Modellvorhaben KliNaWo - Klimagerechter, nachhaltiger Wohnbau - Zwischenbericht Jänner 2017“, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn, 2018.
- [2] „Endabrechnung zum Modellvorhaben KliNaWo“, Vorarlberger gemeinnützige Wohnungsbau- und Siedlungsgesellschaft mbH (VOGEWOSI), Dornbirn.
- [3] „Errichtungskosten der gemeinnützigen Wohnbauprojekte in Vorarlberg (interne Auswertung)“. Land Vorarlberg, Abt. Wohnbauförderung.
- [4] „OIB-Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem ‚Nationalen Plan‘ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU“, Österreichisches Institut für Bautechnik, März 2014.
- [5] T. Weiß, „Kosten- und Prozessoptimierung im Lebenszyklus von Niedrigst- und Plusenergiegebäuden“, bmvit (Herausgeber), Wien, 01/2019.
- [6] R. Perneti, „Cost reduction and market acceleration for viable nearly zero energy buildings; D 2.2 spreadsheet with LCCs - A database for benchmarking actual NZEB life-cycle costs of the case studies“, eurac research, Aug. 2018.
- [7] Passivhaus Institut, *PHPP 9.2 Passivhausprojektierungspaket*. Darmstadt: Passivhaus Institut, 2015.
- [8] „Haustechnikschema Realisierungsvariante KliNaWo“. Planungsbüro e-plus, Egg.
- [9] Österreichisches Institut für Bautechnik, *OiB-Richtlinie 6 2015 - Energieeinsparung und Wärmeschutz*. 2015.
- [10] Österreichisches Institut für Bautechnik, *OiB - Richtlinie 6 2011 Energieeinsparung und Wärmeschutz*. 2011.
- [11] IDA ICE, *IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)*. Solna: EQUA Simulation AB, 2018.
- [12] SIA 2024:2015, Hrsg., „Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik“. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [13] „Wohnimmobilien und Grundstücke - Richtpreise 2019 Vorarlberg“, Hypo Immobilien & Leasing GmbH, Dornbirn.
- [14] M. Hassler, „Studie über Kostentreiber im Wohnbau im Raum Vorarlberg“, 2013.

- [15] Meteotest, *Meteonorm*. Bern: Meteotest, 2017.
- [16] „Testreferenzjahr Feldkirch auf Basis der Messwerte 1994 bis 2012“, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG.
- [17] ÖNORM EN 15251, Hrsg., „ÖNORM EN 15251:2007 Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden — Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“. Österreichisches Normungsinstitut, 01-Sep-2007.
- [18] W. Wagner, „Forschungsprojekt Passivhauswohnanlage Lodenareal - Endbericht“, Energie Tirol, Nov. 2012.
- [19] B. Mahler, „Aktiv Stadthaus in Frankfurt - Bericht über Forschung, Planung, Umsetzung sowie Monitoring im Betrieb, in: economicum leistbares und energieeffizientes Wohnen, Themenband zu Session 6“, EGS-Plan GmbH.
- [20] M. Großklos, „Mehrfamilienhaus mit Energiegewinn Cordierstrasse 4, Frankfurt am Main - Endbericht der Messphase 2014 bis 2016“, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Juli 2016.
- [21] W. Bittermann, „Strom- und Gastagebücher 2008 / 2012 / 2016“, Statistik Austria, Direktion Raumwirtschaft, Wien, 2018.
- [22] Hermann Meier, Christian Fünfgeld, Thomas Adam, und Bernd Schieferdecker, „Repräsentative VDEW-Lastprofile“, VDEW, Frankfurt/M, 1999.
- [23] M. Miara, „Wärmepumpen Effizienz - Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im Betrieb - Kurzfassung“, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, 2011.