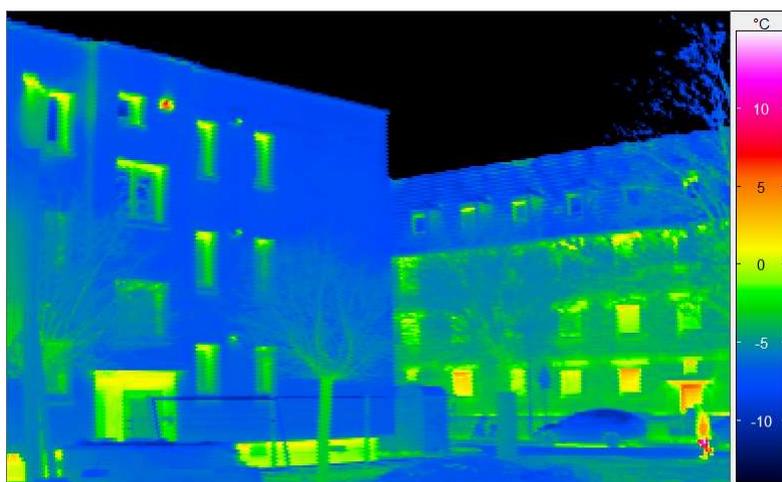


InSituNachweis / IEA Annex 71

# Messdatenauswertung zu einem mit Passivhauskomponenten sanierten Mehrfamilienhaus und Anwendung eines validierten Gebäudesimulationsverfahrens zur Identifikation des Einflusses von Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzung

## Projektendbericht (Teil II)



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Autoren: Søren Peper, Jürgen Schnieders, Wolfgang Hasper

Passivhaus Institut  
Rheinstraße 44/46, 64283 Darmstadt, [www.passiv.de](http://www.passiv.de)

März 2023

InSituNachweis / IEA Annex 71

**Messdatenauswertung zu einem mit Passivhaus-  
komponenten sanierten Mehrfamilienhaus und  
Anwendung eines validierten Gebäudesimulations-  
verfahrens zur Identifikation des Einflusses von  
Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzung**

**Projektendbericht (Teil II)**

**Autoren:**

Dipl.-Ing. (FH) Søren Peper  
Dr. Jürgen Schnieders  
Dipl.-Ing. Wolfgang Hasper

**Unter Mitarbeit von:**

Dipl.-Met. Sven Huneke  
B. Sc. Sarah Madlener  
B. Eng. Annika Hopf

**Herausgeber:**

PASSIVHAUS INSTITUT  
Dr. Wolfgang Feist  
Rheinstraße 44/46  
D-64283 Darmstadt  
Tel: 06151-82699-0  
E-Mail: mail@passiv.de  
www.passiv.de

**Darmstadt, März 2023**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Dieser Bericht entstand mit Fördermitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

**Titel des Forschungsvorhabens**

EnOB: InSituNachweis – Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Energieeffizienz von Gebäuden auf Basis von optimierten in situ Messungen.

**Teilvorhaben:** Nutzer – Technik – Hülle: Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten von Gebäuden mit Beteiligung am IEA EBC Annex 71

**Kurztitel:** InSituNachweis

**Förderkennzeichen:** 03ET1509B

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Wir danken der Wohnbau Gießen, insbesondere Hr. Werner für seine ständige Hilfsbereitschaft sowie allen Mieterinnen und Mietern für Bereitschaft durch die viele Störungen.

Alle Abbildungen und Grafiken dieses Berichtes sind Eigentum des Passivhaus Instituts. Davon abweichend sind jeweils die Quellen angegeben.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Mehrfamilienhaus Gießen.....	5
2.1	Vorstellung des Gebäudes.....	5
2.2	Messtechnik.....	17
2.3	Thermographische Untersuchung.....	23
3	Messdatenauswertung.....	28
3.1	Wetterbedingungen.....	28
3.2	Raumluftbedingungen.....	30
3.3	Energie (Wärme).....	44
3.4	Elektrischer Energieverbrauch.....	52
3.5	Gesamter Wasserverbrauch.....	56
3.6	Lüftung.....	59
3.7	Gemessene Energieverbräuche des Gebäudes.....	64
3.8	Minimalmonitoring.....	67
4	Zufriedenheit der Bewohnenden.....	70
5	Dynamische Gebäudesimulation.....	72
5.1	Simulationsmodell.....	72
5.2	Vergleich von Simulation und Messung.....	79
5.3	Parameterstudien.....	86
5.3.1	Ausgangspunkt.....	86
5.3.2	Einfluss der Gebäudehülle.....	87
5.3.3	Einfluss der Haustechnik.....	89
5.3.4	Einfluss des Nutzungsverhaltens.....	97
5.4	Analyse der internen Wärmequellen.....	102
5.4.1	Wassrerwärmung in den Toiletten-Spülkästen.....	103
5.4.2	IWQ im Simulationsmodell.....	106
6	Zusammenfassung.....	108
7	Quellen.....	112
8	Abbildungsverzeichnis.....	116
9	Tabellenverzeichnis.....	121

# 1 Einleitung

Das Mehrfamilienhaus Schwarzlachweg 42/44 in Gießen wurde im Rahmen der Sanierung in den Jahren 2018/2019 umfassend thermisch ertüchtigt. Die Eigentümerin Wohnbau Gießen GmbH hat an dem Standort drei Wohnblöcke gleichzeitig saniert. Die drei Gebäude haben u.a. eine hochwertige Wärmedämmung, geringe Wohnraumvergrößerung, neue Balkonanlagen, Lüftungsanlagen sowie ein hochwärmege-dämmtes neues Flachdach mit großer PV-Anlage sowie neue Haus- und Kellertüren erhalten.

Im Rahmen des IEA (Internationale Energieagentur) EBC Annex 71 („Building Energy Performance Assessment Based on In-situ Measurements“), mit der Teilnahme am nationalen Projekt „InSituNachweis“, hat das Passivhaus Institut (PHI) eines der drei Gebäude wissenschaftlich vermessen, untersucht und analysiert. Während der Planungs- und Bauphase war, das PHI nicht beteiligt und hatte somit keinen Einfluss auf die Sanierung. Ziel der Untersuchungen war es, das Verhalten des Gebäudes mit den umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen während der Nutzungsphase zu analysieren. Dabei sollten die Einflüsse weitestmöglich nach ihren Ursprüngen (Hülle, Haustechnik, etc.) mittels Messungen und stationärer sowie dynamischer Simulationsrechnung separiert werden. Ziel war es, die Ursachen für eventuelle Abweichungen zwischen Bedarfsberechnungen und Verbräuchen systematisch zu analysieren und entsprechend zuordnen zu können. Auf Grundlage der gemessenen Daten und der Auswertungen sollte u.a. eine Analyse der internen Wärmequellen (IWQ) in Wohngebäuden erfolgen.

Das Vorgehen und die Untersuchungsergebnisse zu dem Mehrfamilienhaus werden in diesem Bericht dargestellt.

## 2 Mehrfamilienhaus Gießen

In diesem Abschnitt erfolgt eine kurze Vorstellung des Gebäudes im Schwarzlachweg (Gießen) und der eingesetzten Messtechnik.

### 2.1 Vorstellung des Gebäudes

Es handelt sich um ein typisches Nachkriegsgebäude in Massivbauweise aus dem Baujahr 1955 mit insgesamt zwei Treppenhäusern und 12 Wohnungen. Eigentümerin ist die „Wohnbau Gießen GmbH“, ein kommunales Wohnungsunternehmen der Stadt Gießen. Sie ist Vermieterin und hat auch die Sanierungsarbeiten in Eigenregie durchgeführt. Diese wurden 2018/2019 im bewohnten Zustand durchgeführt.



Abbildung 1: Gebäude vor der Sanierung (Dezember 2017)

Bei der Sanierung wurde das Satteldach rückgebaut und durch ein Flachdach ersetzt. Die Wohnungsgrundrisse sind bis auf die Vergrößerung der Wohnfläche durch die Integration der halben Balkone (vormals Loggia) unverändert geblieben. Es wurde eine neue vorgestellte Balkonanlage errichtet. Während der Sanierungsarbeiten war das Gebäude vollständig bewohnt.

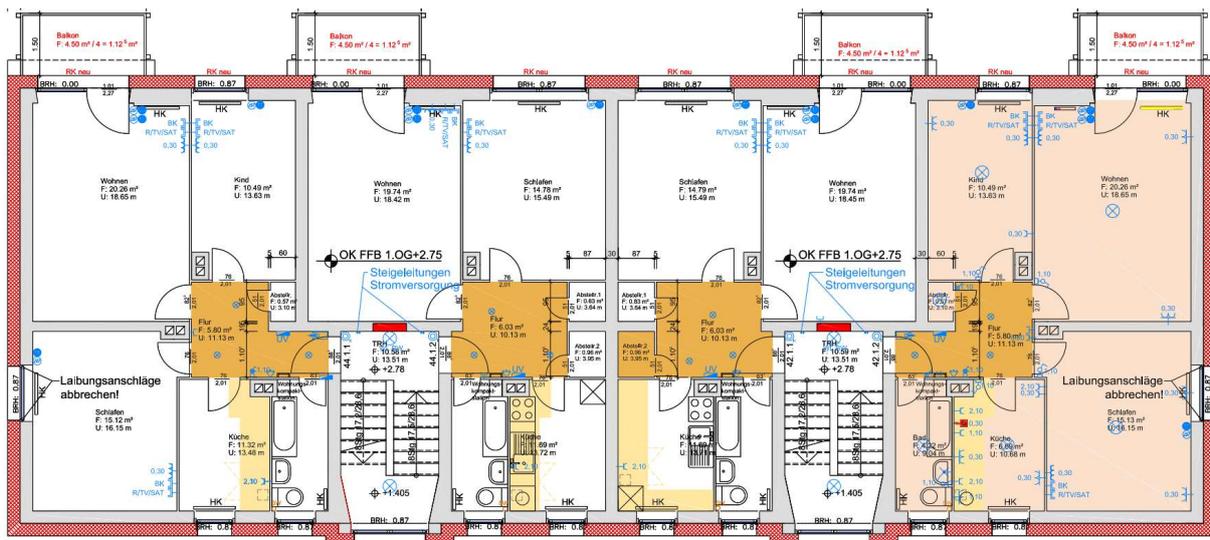


Abbildung 2: Gebäude nach der Sanierung (2019/2020) mit der Ost- und Nord-West-Fassade.



**Abbildung 3: West-Fassade des Gebäudes mit der neuen Balkonanlage nach der Sanierung (2019).**

Die Grundrisse des Gebäudes sind in den drei Wohngeschossen identisch. Je Eingang und Geschoss gibt es zwei Wohnungen.



**Abbildung 4: Grundrisse eines Geschosses (Quelle: Wohnbau Gießen).**

Die Wohnungsgrößen betragen 53,2 und 62,9 m². Das Gesamtgebäude verfügt ohne Treppenhäuser über eine beheizte Wohnfläche, d.h. ohne Balkons, von 696,7 m² und inkl. der beiden Treppenhäuser von 722,6 m² (Energiebezugsfläche, EBF).

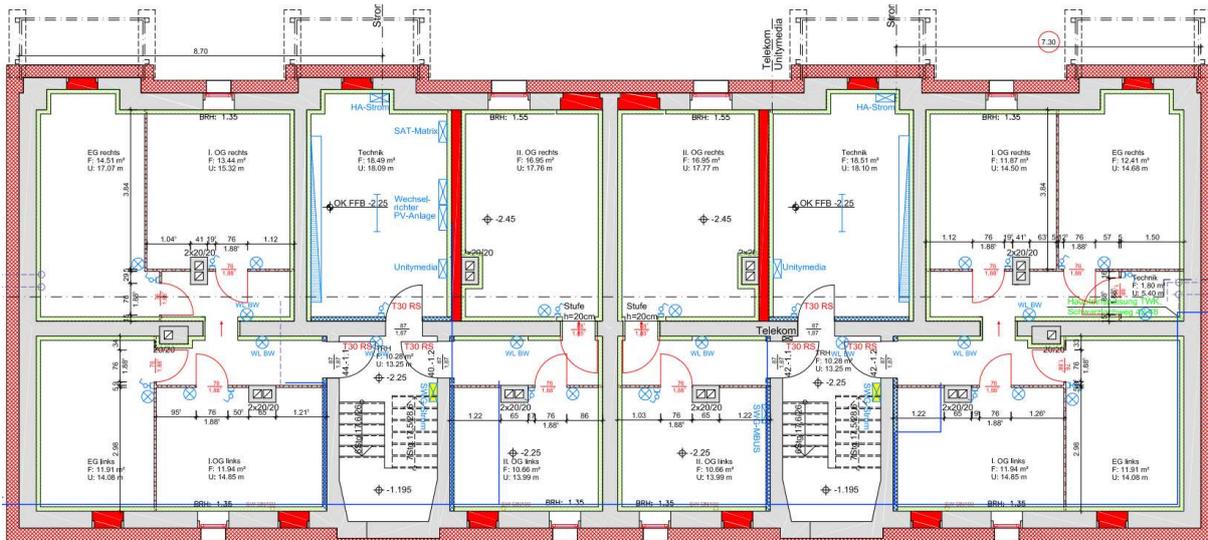


Abbildung 5: Grundrisse des Kellers (Quelle: Wohnbau Gießen).

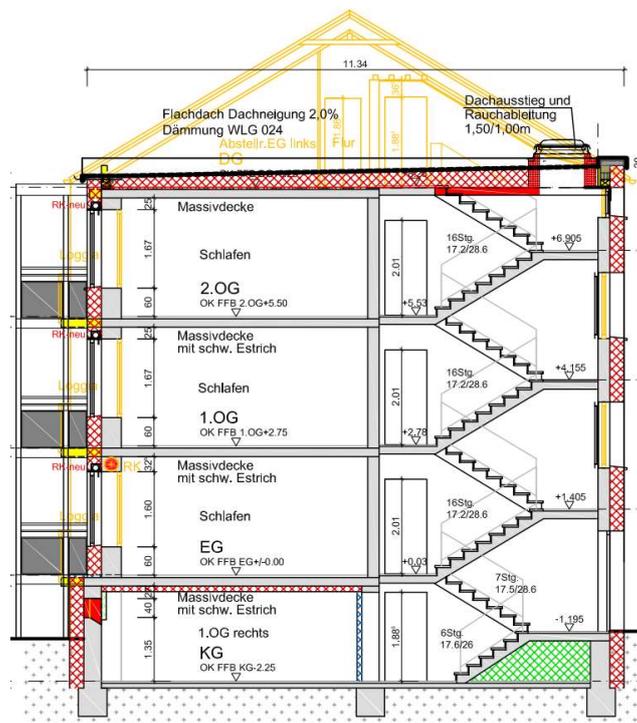


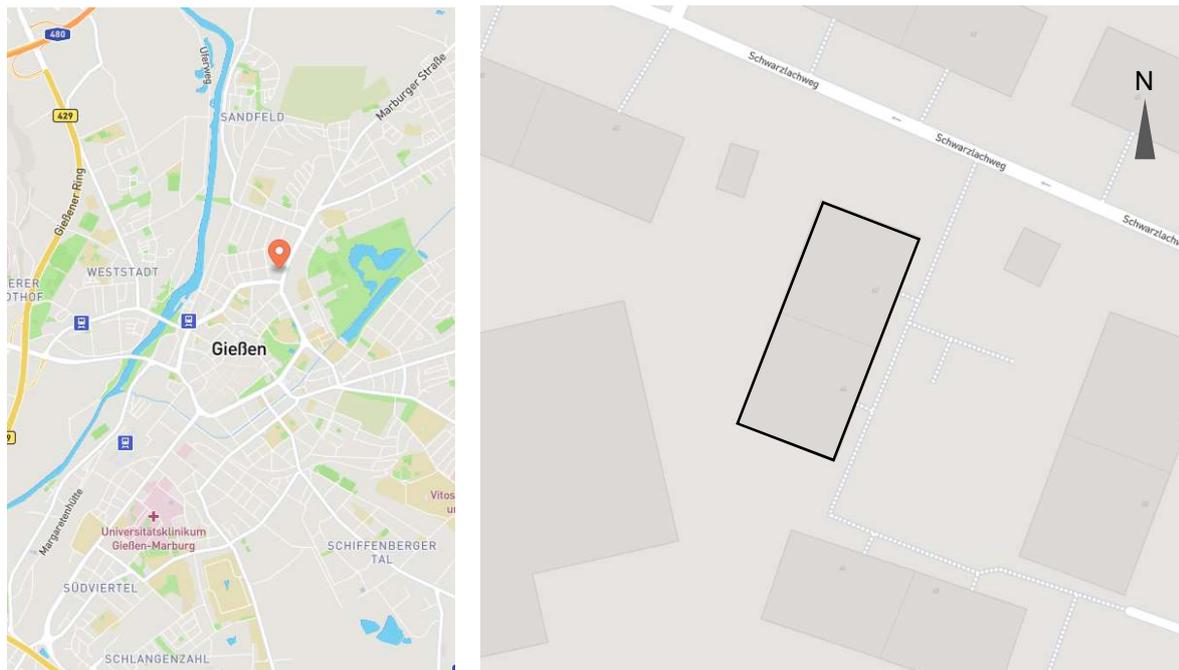
Abbildung 6: Gebäudeschnitt (A-A) Haus 42 (Quelle: Wohnbau Gießen).

Die Sanierung umfasste den kompletten Fenster- und Balkontürentausch, Austausch der Haustür, Einbau wohnungszentraler Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung sowie zwei Lüftungsgeräte mit WRG in den Treppenhäusern, Sanierung der Treppenhäuser, eine Wärmedämmung mit WDVS, Kellerdecken- und Dachdämmung, Ertüchtigung der Luftdichtheit, Erneuerung der zentralen Elektroverteilung in Treppenhäusern und Kellern inkl. neuer Stromzähler, Entfernung der Loggien sowie dem Bau einer freistehenden Balkonanlage. Zusätzlich wurde auf dem neuen Flachdach eine PV-Anlage mit 29,1 kWp errichtet.



**Abbildung 7: Detailansichten Fassade mit Lüftungselement und Nordfassade (nach der Sanierung)**

Das Gebäude befindet sich im Stadtgebiet von Gießen (Schwarzlachweg). Die Ausrichtung der Fassaden weicht 25 Grad ab gegenüber den Haupthimmelsrichtungen.



**Abbildung 8: Lageplan des Gebäudes im Schwarzlachweg, Gießen (Quelle: OpenStreetMap)**



**Abbildung 9: Montage der Außendämmung an der Fassade und Montage der neuen Fenster.**



**Abbildung 10: Montierte Wärmedämmung der Kellerdecke und Begleiddämmung an den Kellertrennwänden (links). PV-Anlage (29 kWp) auf dem neuen Flachdach (rechts).**

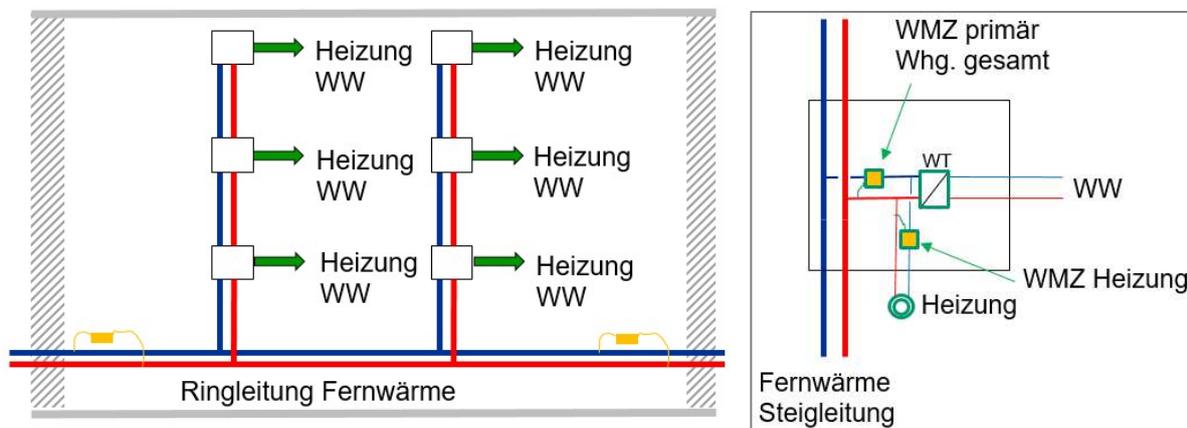
Die wichtigsten Kennwerte der Gebäudehülle vor und nach der Sanierung sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

**Tabelle 1: Kennwerte der Gebäudehülle vor und nach der Sanierung**

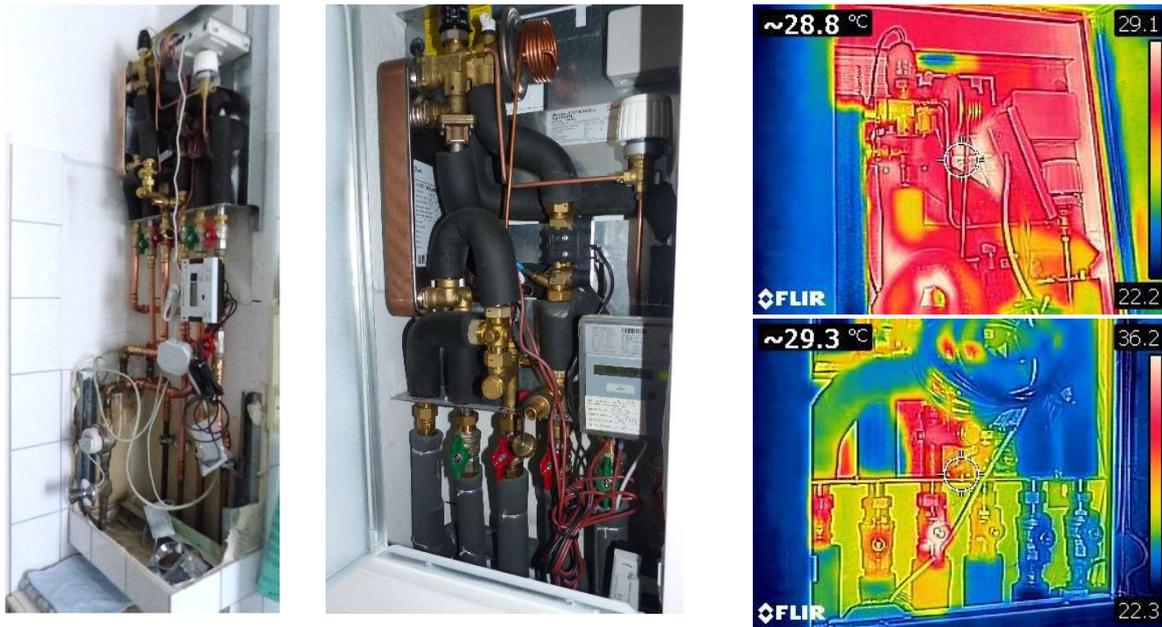
	<b>Vor Sanierung</b>	<b>Nach Sanierung</b>
Außenwand	1,19 W/(m <sup>2</sup> K)	0,10 W/(m <sup>2</sup> K)
Dach/oberste Geschossdecke	1,89 W/(m <sup>2</sup> K)	0,10 W/(m <sup>2</sup> K)
Kellerdecke	1,33 W/(m <sup>2</sup> K)	0,17 W/(m <sup>2</sup> K)
Fenster	2,75 W/(m <sup>2</sup> K)	1,03 W/(m <sup>2</sup> K)
Luftdichtheit	Unbekannt	n <sub>50</sub> 0,84 h <sup>-1</sup>
Lüftung	Fenster	Komfortlüftung mit WRG 86%

## 2.1.1 Versorgungstechnik Wärme

Das Gebäude wird über die Fernwärme der Stadtwerke Gießen versorgt. In jeder Wohnung ist eine Unterstation zur Versorgung vom Heizkreis (Fernwärme direkt) sowie des Plattenwärmeübertragers für die Bereitung des Nutzwarmwassers enthalten (siehe Abbildung 11). Es stellt eine Besonderheit dar, dass es keine weitere Übergabestation des Gebäudes gibt und die Fernwärme direkt zu den Wohnungen geführt wird; in den Heizungskreisen der Wohnungen wird direkt das Fernwärmewasser genutzt. Aus diesem Grund gibt es auch keine Möglichkeit, die übergebene Wärmemenge zentral für das Gebäude mit einem Wärmehähler für Abrechnungszwecke zu messen. Dieser Abgang der Fernwärme versorgt über die Vor- und Rücklaufleitung nach diesem Gebäude in „Parallelschaltung“ noch zwei weitere Nachbargebäude.



**Abbildung 11:** In dem Gebäude wird die Fernwärme ohne weitere Übergabestation direkt über Steigleitungen in die Wohnungen geführt (Prinzipskizze links). Dort wird jeweils eine Wohnungsstation (rechts) direkt versorgt. Die Wohnungsstationen verfügen über einen Wärmeübertrager zur Brauchwarmwassererwärmung sowie einen Abgang zur Versorgung des Heizkreises der Wohnung. Gemessen werden mittels zwei Wärmehähler der Gesamtverbrauch sowie der Heizwärmeverbrauch (Unterzähler).



**Abbildung 12: Montage einer neuen Wohnungsstation im Badezimmer an der Position des Vorgängermodells (links). Nach der Fertigstellung ist die Station durch eine Klappe zugänglich (Mitte). Thermographie des geöffneten Verteilerschranks (rechts).**

### 2.1.2 Lüftungstechnik

Im Rahmen der Sanierungen wurde jede Wohnung mit einem Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung ausgestattet (Hersteller: Vallox, Typ ValloMulti 200 MV). Der Wärmebereitstellungsgrad nach PHI Zertifikat beträgt 86 %, die elektrische Leistungsaufnahme ist dort mit  $0,44 \text{ Wh/m}^3$  angegeben. Die Geräte wurden in den Küchen an der Decke montiert und später verkleidet. Die kalten Rohrlängen der Außen- und Fortluftleitung zwischen Außenwand und Gerät sind dadurch auf ein sehr geringes Maß reduziert, was sich energetisch positiv auswirkt. Auf der Außenfassade neben dem Küchenfenster befindet sich ein kombiniertes Außen-Fortluft-Element. In der Wohnung erfolgt die Luftverteilung über eine Verteilerbox und Rohrleitungen an der Flur-Decke. Von dort werden die Zimmer mit jeweils einer Kernlochbohrung über den Türen angeschlossen. Damit liegt ein sehr kompaktes System vor. Nach der Montage wird nur im Flur eine abgehängte Decke montiert.

Zusätzlich sind in beiden Treppenhauköpfen auch Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung (Hersteller: Vallox) montiert. Die Absaugung (Abluft) erfolgt im obersten Bereich des Treppenhauses und die Zuluft wird auf dem Treppenpodest zwischen EG und 1. OG ausgeblasen. Damit ist eine energieeffiziente Grundlüftung der Treppenhäuser gewährleistet.

Im Keller gibt es je Hauseingang einen Abluftventilator (Cosmo VentRRV 160 EC) der gesteuert nach der absoluten (!) Feuchte, die Kellerluft nach außen transportiert. Die alten Kellerfenster wurden zugemauert und überdämmt.



**Abbildung 13: Lüftungsgerät einer Wohnung an der Küchendecke vor der Verkleidung und Rohrmontage (links). Luftverteilung an der Flurdecke vor der Montage der abgehängten Decke (rechts)**



**Abbildung 14: Fertig verkleidetes Lüftungsgerät an der Küchendecke (links). Montiertes Zuluftelement in einem Wohnraum kurz unter der Decke (rechts).**



**Abbildung 15: Einfacher Stufenschalter in einem Wohnungsflur für die Auswahl der drei Lüftungsstufen (links). Kombiniertes Außen-Fortluft-Element auf der Außenfassade (rechts).**



**Abbildung 16: Kalibriermessungen mit einem Volumenstrom-Messgerät mit Stützventilator (Prinzip: Nulldruckkompensation) vom Typ FlowFinder der Zu- und Abluftdüsen in einer der 12 Wohnungen. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit über einem Küchenschrank musste für die Messung ein Adapter hergestellt werden (rechts).**

### 2.1.3 Luftdichtheit, Wärmebrücken und Energiebilanz (PHPP)

Die Messung der Luftdichtheit des ertüchtigten Gebäudes erfolgte am 26.04.2019 durch die Fa. DEN aus Gießen. Die Messungen erfolgten je Hauseingang inkl. der Treppenhäuser bei geschlossenen Kellerzugangstüren. Während der Messungen waren die Zu- und Abluftöffnungen in den Wohnungen temporär abgeklebt. Bei den Gebäudehälften hat sich ein Messwert nach DIN EN 13829, Verfahren A von 0,81 bzw. 0,87 1/h ergeben. Damit ist auch die Anforderung ( $n_{50} \leq 1,0$  1/h) an die Luftdichtheit für Passivhaussanierungen (EnerPHit) erfüllt.

## Wärmebrücken

Für das Gebäude wurden von der Firma DEN (Gießen) Wärmebrückenberechnungen durchgeführt für z.B. Fenster, Kellerwände, Balkonhalterungen, Anschluss Dach-Wand und Wand-Keller, welche für den bautechnischen Nachweis und die Energiebilanzierung benötigt wurden. Einige der Detailpunkte wie Fensteranschluss und Balkonhalterungen wurden vom PHI überprüft bzw. neu berechnet. Vorher lagen z.B. keine 3-D Berechnungen vor. Insgesamt haben sich durch diese Überarbeitung und Ergänzungen etwas höhere Ergebnisse ergeben. Dazu gehören 32 Balkonanker mit einem  $\chi$ -Wert von je 0,195 W/K für das Gebäude eine relevante Größe, treten aber in der Gesamtwirkung hinter die Wärmebrücken durch die tragenden Kellerwände – trotz Begleitdämmung – zurück.



**Abbildung 17: Anker für die neue, freistehende Balkonanlage vor und nach der Dämmung der Fassade. Diese Anker stellen eine massive Wärmebrücke dar, welche in der Bilanzierung berücksichtigt werden muss. Vorzuziehen wäre hier eine in der Substanz bessere thermische Entkopplung. (Vgl.: [Schulz 2007])**

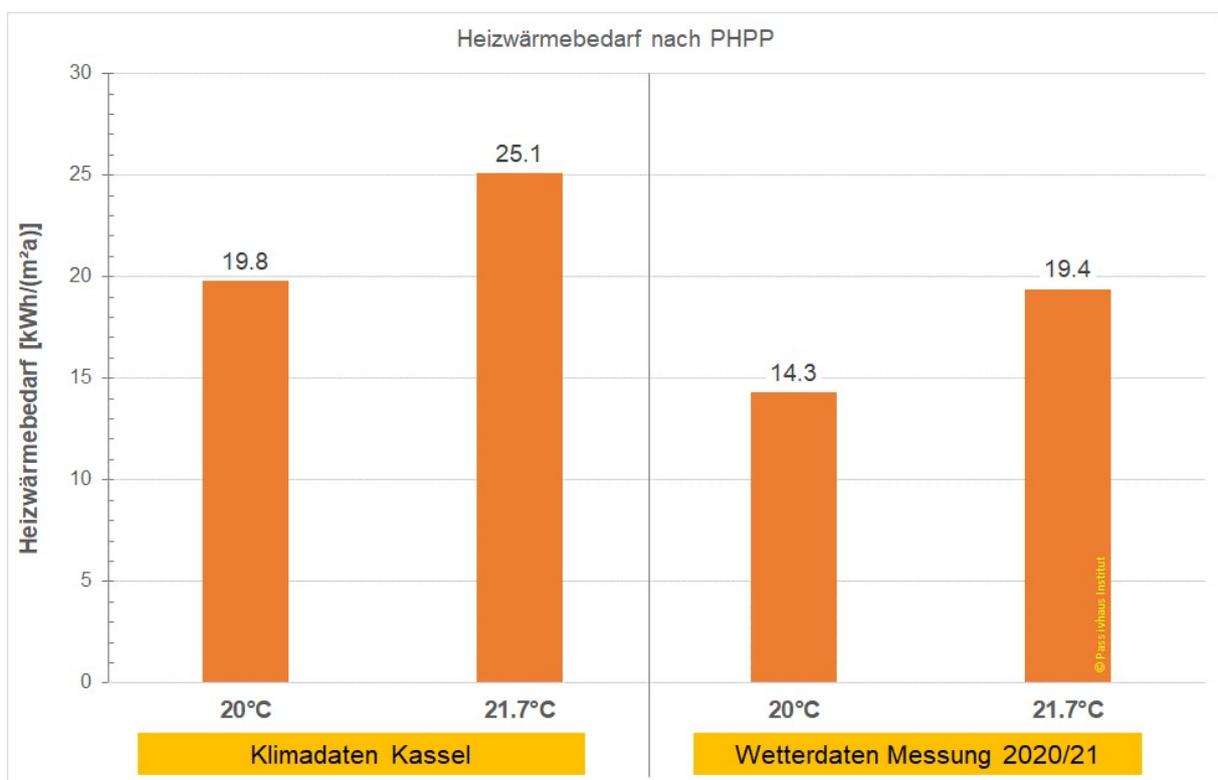
## Energiebilanz (PHPP)

Die Energiebilanzierung wurde mit dem PHPP durchgeführt. Die ursprüngliche Version wurde von der Firma DEN (Gießen) erstellt. In dieser wurden durch das PHI Überarbeitungen wie Einbeziehung zusätzlicher Wärmebrücken und Abbildung der technischen Anlagen durchgeführt. Dabei wurden auch die internen Wärmequellen (IWQ) neu ermittelt, da die vorhandenen Wärmeverteilungen (Fernwärme) direkt mit 4 Steigsträngen ungedämmt durch die Wohnungen verlaufen. Dadurch ergeben sich deutlich höhere Wärmeverluste der Verteilungen, als für die Planung in der mittleren Standardannahme üblich (ca. 50 W je Wohnung, siehe Abschnitt 5.1.5).

Als mittlere Winter-Temperatur des Gebäudes für die PHPP Bilanz muss nicht nur der Mittelwert der gemessenen Raumtemperaturen der 12 Wohnungen gebildet werden, sondern die beiden Treppenhäuser müssen ebenfalls berücksichtigt werden. In den

Treppenhäusern wurde jeweils die Ablufttemperatur an der Luftansaugung des Lüftungsgerätes gemessen. Diese sind im Treppenhaukopf angeordnet, was die Treppenhautemperaturen überschätzt. Andere Messdaten sind allerdings nicht vorhanden. Die für die Energiebilanz relevante mittlere Temperatur innerhalb der thermischen Hülle des Gesamtgebäudes ergibt sich mittels Gewichtung der Temperaturen mit dem jeweiligen thermischen Leitwert der entsprechenden Zone (Wohnung bzw. Treppenhaus). Diese Leitwerte werden auch für die thermische Simulation mit dem Programm DYNBIL benötigt. Bevor die Gewichtung damit durchgeführt werden kann, müssen die Leitwerte noch mit dem Lüftungswärmeverlusten der Zone ergänzt werden. Mit diesem Vorgehen ergibt sich eine mittlere Temperatur des Gesamtgebäudes inkl. Treppenhäuser für den Winterzeitraum (01.10.2020 bis 30.04.2021) von 21,7 °C. Diese wird in der Energiebilanz des PHPP verwendet.

Mit diesen angepassten Randbedingungen wurde für vier Varianten die Energiebilanz des sanierten Gebäudes mit dem PHPP berechnet: Mit den Klimadaten für Kassel, wie sie in der Planung verwendet worden waren sowie mit den gemessenen Wetterbedingungen des Winters 2020/21. Diese beiden äußeren Randbedingungen wurden zum einen für eine Standard-Innentemperatur von 20°C und für die gemessenen (siehe oben) 21,7 °C eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dokumentiert.



**Abbildung 18: Berechneter Heizwärmebedarf (mit PHPP; Bezug beheizte Wohnfläche) des sanierten Gebäudes mit unterschiedlichen Randbedingungen bzgl. der Innentemperatur und der Wetterdaten.**

## EnerPHit-Nachweis

Foto oder Zeichnung



**Objekt:** Sanierung eines MFH  
**Straße:** Schwarzlachweg 42 + 44  
**PLZ/Ort:** 35390 Gießen  
**Provinz/Land:** Hessen Deutschland  
**Objekt-Typ:** Mehrfamilienhaus  
**Klimadatensatz:** ud--02-GI Linden 9.20-8.21  
**Klimazone:** 3: Kühl-gemäßigt **Standorthöhe:** 159 m  
**Bauherrschaft:** Wohnbau Gießen GmbH  
**Straße:** Ludwigstraße 4  
**PLZ/Ort:** 35390 Gießen  
**Provinz/Land:**

**Architektur:**  
**Straße:**  
**PLZ/Ort:**  
**Provinz/Land:**

**Hautechnik:**  
**Straße:**  
**PLZ/Ort:**  
**Provinz/Land:**

**Energieberatung:** DEN GmbH & Co. KG  
**Straße:** Winchesterstr. 2  
**PLZ/Ort:** 35394 Gießen  
**Provinz/Land:**

**Zertifizierung:**  
**Straße:**  
**PLZ/Ort:**  
**Provinz/Land:**

Baujahr:	1955	Innentemperatur Winter [°C]:	21.7	Innentemp. Sommer [°C]:	25.0
Zahl WE:	12	Interne Wärmequellen (IWQ) Heizfall [W/m²]:	3.3	IWQ Kühlfall [W/m²]:	3.8
Personenzahl:	19.7	spez. Kapazität [Wh/K pro m² EBF]:	200	Mechanische Kühlung:	

**Gebäudekennwerte mit Bezug auf Energiebezugsfläche und Jahr**

		Energiebezugsfläche m²		Kriterien	alternative Kriterien	Erfüllt? <sup>2</sup>
<b>Heizen</b>	Heizwärmebedarf kWh/(m²a)	722.6	≤	25	-	ja
	Heizlast W/m²	16	≤	-	-	ja
<b>Kühlen</b>	Kühl- + Entfeuchtungsbedarf kWh/(m²a)	-	≤	-	-	-
	Kühllast W/m²	-	≤	-	-	-
	Übertemperaturhäufigkeit (> 25 °C) %	1	≤	10		ja
	Häufigkeit überhörter Feuchte (> 12 g/kg) %	0	≤	20		ja
<b>Luftdichtheit</b>	Drucktest-Luftwechsel n <sub>50</sub> 1/h	0.8	≤	1.0		ja
<b>Nicht erneuerbare Primärenergie (PE)</b>	PE-Bedarf kWh/(m²a)	64	≤	-		-
<b>Erneuerbare Primärenergie (PER)</b>	PER-Bedarf kWh/(m²a)	105	≤	50	65	nein
	Erzeugung erneuerb. Energie (Bezug auf überbaute Fläche) kWh/(m²a)	64	≥	60	94	

<sup>2</sup> leeres Feld: Daten fehlen; '-': keine Anforderung

**Abbildung 19: Nachweisblatt des PHPP mit dem Kennwert des Heizwärmebedarfs von 19,5 kWh/(m²a) bei 21,7°C und den gemessenen Wetterdaten vom 01.09.2020 bis 31.08.2021.**

In den beiden Energieausweisen des Gebäudes im Zustand vor der Sanierung (Altbau) ist der Gesamt-Energieverbrauch (Messwert) der Gebäude über drei Jahre (2009 bis 2011) aufgeführt [Energieausweis 2012]. Aus den Werten wurde der Mittelwert für das Gesamtgebäude berechnet. Um aus dem Gesamtverbrauch den Heizwärmeverbrauch zu ermitteln, wurde der Messwert des Energieverbrauchs zur Warmwassererzeugung von 16,3 kWh/(m²a) (Monitoring 2020/2021, vgl. Abschnitt 3.3.2) abgezogen. Erfahrungsgemäß schwankt der mittlere Energieeinsatz für die Warmwassererzeugung von einem Mehrfamilienhaus über unterschiedliche Jahre nur gering, was das gewählte Vorgehen ermöglicht. Es errechnet sich ein **Heizwärmeverbrauch vor der Sanierung**

von **119,5 kWh/ (m<sup>2</sup>a)**. Dieser wird später zur Berechnung der realisierten Einsparung der Heizwärme verwendet.

Für das Gebäude wurde auch eine PHPP-Energiebilanz für den Altbauzustand vor der Sanierung erstellt. Wird die Berechnung für das unsanierte Gebäude mit den gemessenen Wetterdaten 2020/21 durchgeführt und die gemessene Innentemperatur von 21,7 °C angesetzt, würde der Heizwärmebedarf auf erhebliche 236 kWh/(m<sup>2</sup>a) ansteigen. Dieser Wärmebedarf zeigt den notwendig hohen Energieaufwand, bei der im unsanierten Zustand eine vergleichbare Behaglichkeit (für die Raumlufttemperatur) zum Zustand nach der Sanierung vorhanden wäre.

## 2.2 Messtechnik

Das Gebäude wurde mit Messtechnik ausgestattet um die Verbrauchswerte (Wärme, Strom, Wasser), die Raumbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte, CO<sub>2</sub>-Konzentration) das Lüftungsverhalten sowie die Wetterbedingungen erheben zu können. Die Daten werden auf einem zentralen Messrechner im Keller des Gebäudes im 10-Minuten Intervall aufgezeichnet. Alle 24 Stunden erfolgt ein Mail-Versand der Messdaten, um sie am Passivhaus Institut automatisiert in eine zentrale Messdatenbank einzuspeisen. Die Datenbank verfügt über eine optische Darstellung über die Anwendung „Grafana“ mit der die Messdaten übersichtlich nach Gruppen dargestellt werden.

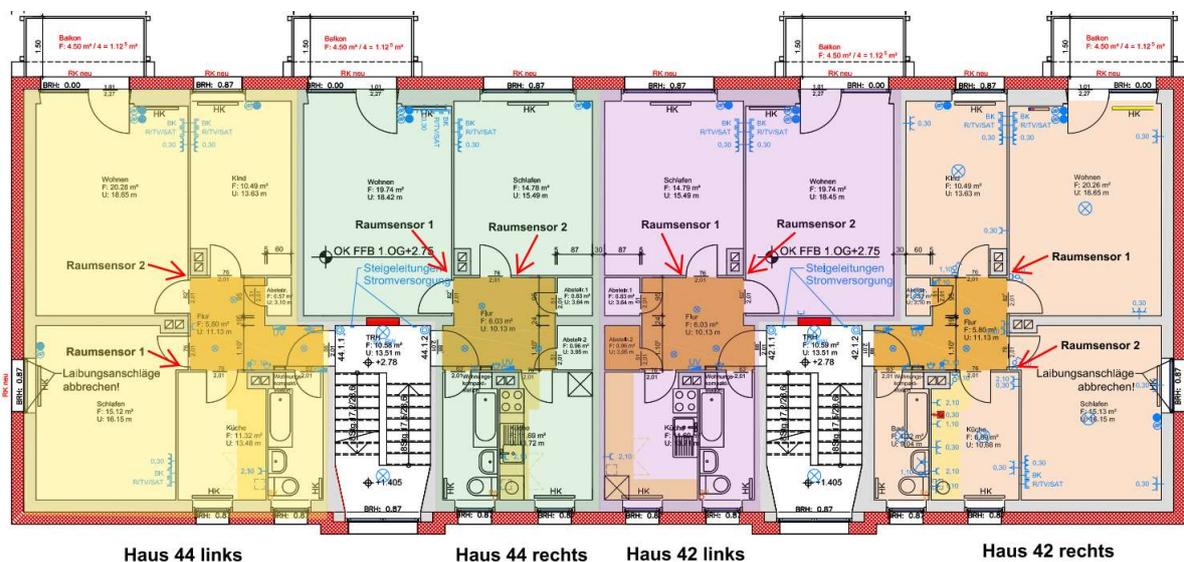
Die eingesetzte Messtechnik hat praktischen und wissenschaftlichen Anforderungen zu genügen. Für wissenschaftliche Aussagekraft galt es, die Messunsicherheit gering zu halten. Die praktische Handhabung musste eine effiziente und zuverlässige Datenerfassung sicherstellen. Es wurde daher auf ein in früheren Projekten bewährtes System basierend auf M-Bus nach EN 13757 als Rückgrat der Datenerfassung zurückgegriffen, das nach Bedarf um zusätzliche Datenerfassungssysteme ergänzt wurde. Es konnte mit freundlicher Erlaubnis auf die in den Gebäuden bestehende M-Bus Verdrahtung der Stadtwerke Gießen zurückgegriffen werden. Die Datenerfassung erfolgte in 10 Minuten-Intervallen über eine Software des PHI auf einem Einplatinen-Computer mit Linux Betriebssystem. Von dort wurden die Daten über eine DSL-Anbindung fortlaufend in eine zentrale Datenbank übergeben.

Daneben wurde ein Funk-Netz (EnOcean) aufgebaut, welches zur Erfassung des Zustandes der Fenster (Öffnungsvorgänge) und damit der freien Lüftung, dient. Hierzu wurden diverse Gateways sowie ein separater Datenlogger installiert und dessen Daten in gleichartiger Weise an die Datenbank übertragen.

Während des Messzeitraums wurden von den Stadtwerken sowohl die 12 Hauptwärmehähler als auch die Wasserzähler in den Wohnungen unangekündigt und einzeln getauscht. Die Neugeräte werden nicht mehr dauerhaft über kabelgebundenen

M-Bus sondern nur noch jährlich funkbasiert ausgelesen. Daher war es bei den Wärmehählern nötig, zusätzlich M-Bus Schnittstellenkarten in die Geräte einzufügen, damit weiterhin eine kabelgebundene Auslesung in der 10-Minuten Frequenz erfolgen konnte. Bei den Wasserzählern gibt es keine Möglichkeit eine zweite Schnittstelle vorzusehen. Daher wurden hier nachträglich Empfänger zum Auslesen des Wireless-M-Bus Funknetz installiert.

Jede Wohnung wurde mit zwei Raumluftsensoren (Temperatur, Feuchte und CO<sub>2</sub>) ausgestattet. Diese wurden jeweils neben der Zimmertür in etwa 1,1 m Höhe montiert. Ausgewählt wurden jeweils Schlaf- und Wohnzimmer. Die Anordnung der Sensoren ist in Abbildung 20 durch je zwei rote Pfeile je Wohnung dargestellt.



**Abbildung 20: Anordnung von je zwei Raumluftsensoren (T/rF/CO<sub>2</sub>) in den Wohnungen (Kennzeichnung mit roten Pfeilen). Die vier Wohnungen je Etage sind farbig angelegt. Quelle des ergänzten Planes: Wohnbau Gießen.**

## 2.2.1 Eingesetzte Messtechnik

Die verwendete Messtechnik ist den beiden folgenden Tabellen zu entnehmen:

**Tabelle 2: Übersicht der Messtechnikkomponenten für Meteorologische Parameter**

Bezeichnung	Produkt	Spezifikation	Signal/Bemerkung
Außenlufttemperatur & relative Feuchte (rF)	EE060	$\pm 2.5 \% \text{ rF}$ , $\pm 0.3 \text{ K}$	Analog auf ADC <sup>1</sup> , mit Strahlungsschutz und Aspirator
Globalstrahlung	Kipp&Zonen CM11	310 bis 2800 nm,	Analog auf ADC
Globalstrahlung Kardinalrichtungen vertikal	NES, SOZ-03	0...1200 W/m <sup>2</sup>	Temperaturkompensiert, Analog auf ADC
CO <sub>2</sub> -Konzentration Außenluft	Horiba TE 41	$\pm 1 \text{ ppm}$	Datenquelle HLNUG/Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden der L.M.U. Gießen
Luftdruck, Meereshöhe	Thies Klima, Anaeroid Dosensatz	$\pm 0.5 \text{ hPa}$	Datenquelle HLNUG

Die Sensoren für die Erfassung der Raumluft-Temperaturen und –Feuchten sowie für die CO<sub>2</sub>-Messung wurden einer in-situ Kalibrierung mit Hilfe eines Aspirations-Psychrometers und einer präzisen CO<sub>2</sub>-Sonde unterzogen.

**Tabelle 3: Übersicht der gebäudeintern eingesetzten Messtechnikkomponenten.**

Bezeichnung	Produkt	Spezifikation	Signal
Referenz Lufttemperatur & relative Luftfeuchte (rF)	AMR, FPAD 36-3	$\pm 1.0 \% \text{ rF}$ , $\pm 0.1 \text{ K}$	Digital, Logger
Referenz CO <sub>2</sub> Raumluft	Vaisala Carbocap GMP343	$\pm 15 \text{ ppm}$	Digital, Logger
Fensteröffnung	Hoppe SecuSignal	Offen - geschlossen	Funk, EnOcean
Lufttemperatur & Luftfeuchte Raumluft	THI, CMA11 / Sensirion SHT30	$\pm 2\% \text{ rF}$ , $\pm 0.2 \text{ K}$ , nachkalibriert	Digital, M-Bus
Raumlufttemperatur, rel. Raumluftfeuchte, CO <sub>2</sub>	EE800	$\pm 0.3 \text{ K}$ $\pm 3 \%$ $\pm 70 \text{ ppm}$	Analog/ADC/ M-Bus
Temperatur Spülkästen WC	ONSET, HOBO Pendant® MX	$< \pm 0.5 \text{ K}$ , nachkalibriert	Logger

<sup>1</sup> ADC: Analog-Digital-Umsetzer

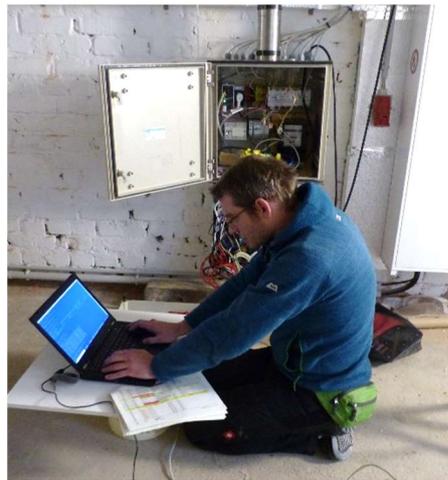
Elektrische Energie Wohnungen	DZG, DVS74	Klasse B $\pm 2\%$	5000 Imp/kWh, Digital, M-Bus
Elektrische Energie Lüftungsgeräte	ABB, C11	Klasse B, $< \pm 2\%$	1000 Imp/kWh, Digital, M-Bus
Wärme Wohnungen Gesamt	Landis&Gyr Ultraheat 550	Klasse 2, $< \pm 5\%$	M-Bus
Heizwärme Wohnungen	Diehl SharkyHeat US- WZR-1 0.6	Klasse 2, $< \pm 5\%$	M-Bus
Wasser-Volumina	Wasseruhren, versch. Hersteller	$\pm 10\% \dots 4\%$ je nach Durchfluss	(w) M-Bus
Lufttemperatur Treppenhaus	Pt100	$\pm 0.3$ K	Analog, ADC, M-Bus
Wärme Gesamtgebäude	Micronics, Ultraflo U1000 HM	Ca. $\pm 5\%$	Modbus/M-Bus
Ertragszähler PV	EMH, EDL300L	Klasse A $\pm 0.5\%$	10000 Imp/kWh, Digital, M-Bus



Abbildung 21: Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes (links) und Wandsensor (T, rF, CO<sub>2</sub>) in einem Zimmer während der Kalibriermessung (rechts).



Abbildung 22: Fenstergriff mit EnOcean Funktechnik zum Senden der Griffstellung (links). Stromzähler der Einzelwohnungen mit aufgeklebten Ausleseköpfen (rechts).



**Abbildung 23: Zentraler Gesamtwärmezähler mit Ultraschall-Volumenstrommessung (ohne Auftrennung des Rohres) während der Montage am Fernwärmerohr im Keller des Gebäudes (links). Programmierarbeiten an der Messtechnikzentrale im Keller des Gebäudes (rechts).**



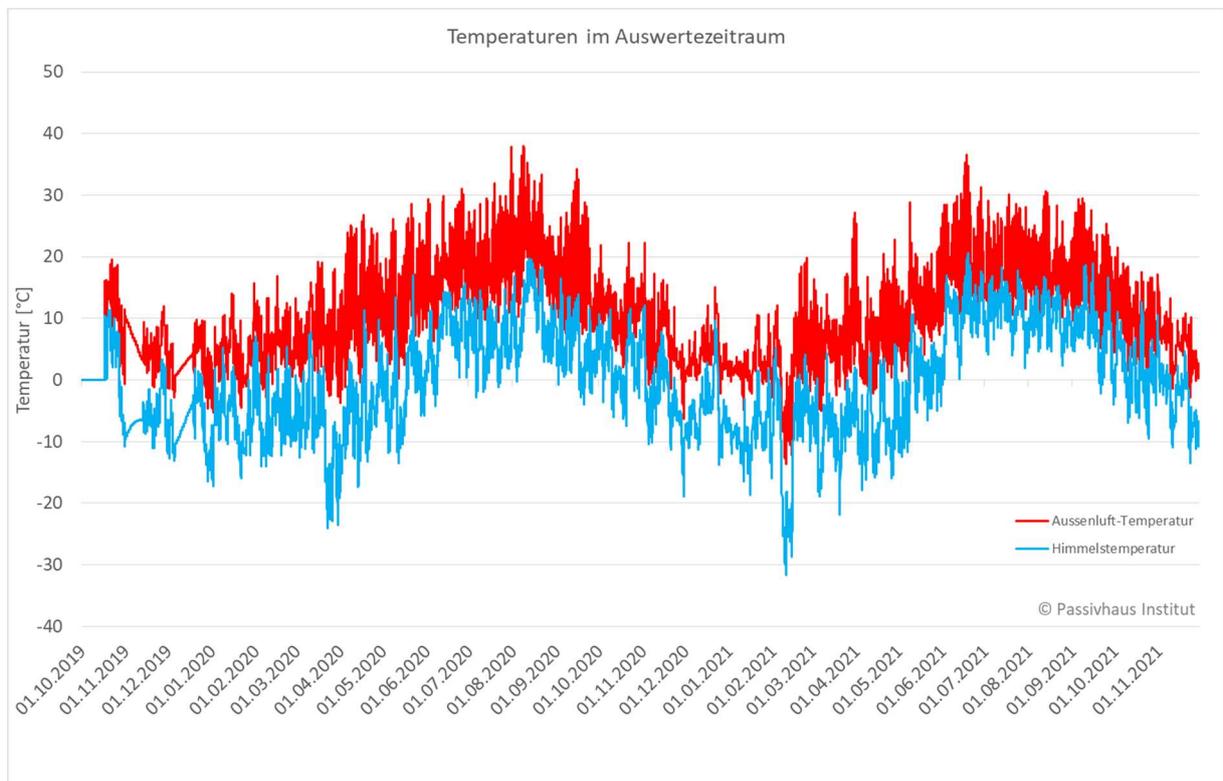
**Abbildung 24: Schaltschrank im Treppenhauskopf für die Umsetzung der Signale der Wetterstation (links). Montage der Temperaturmessung der Kaltwasserleitung mit einem Pt100 Anlegefühler. Der Bereich wurde danach wieder vollständig gedämmt (rechts).**

### 2.2.2 Abgeleitete Größen

Die am Gebäude erhobenen Wetterdaten wurden um Luftdruck-Messwerte aus dem Messnetz des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ergänzt. Da das Kabel zur Wetterstation in der Bauphase durch Arbeiten an der Dachabdichtung stark beschädigt worden war und auch nicht ersetzt werden konnte, waren die Signale teilweise gestört. Nach Abgleich der Daten mit den Werten der nächstgelegenen Station des HLNUG wurde schließlich aus Gründen der Konsistenz vollständig auf diesen Datensatz zurückgegriffen. Damit wurde eine verbesserte Abschätzung der Luftmasse zur Auswertung der kurzweiligen Strahlung mit Hilfe eines Himmelsmodells nach [Perez/Ineichen 1990] ermöglicht. Dieses lässt eine Aufteilung der gemessenen Globalstrahlung auf die Horizontale in direkte Strahlung und verschiedene Diffus-Komponenten zu, welche als Eingangswerte für die dynamische

Gebäudesimulation mit DYNBIL verwendet werden. Dieses Verfahren wurde im Kontext des Messobjektes Kranichstein umfassend geprüft und für das Gebäude in Gießen analog angewendet.

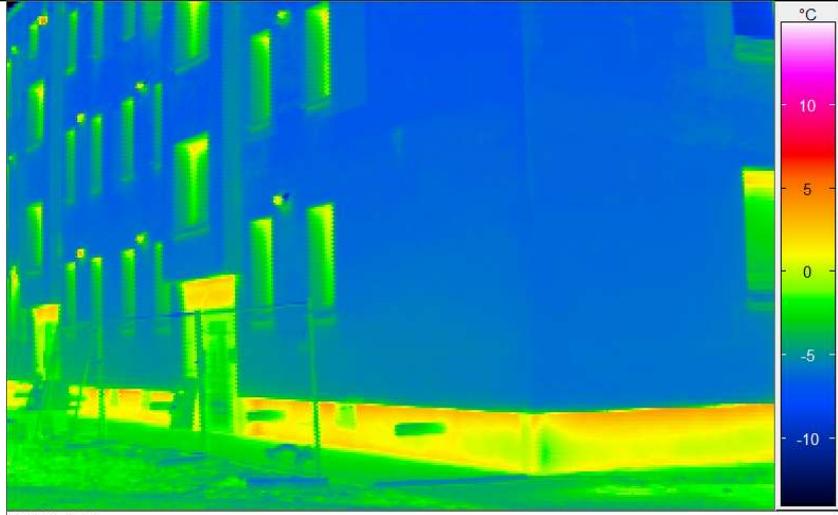
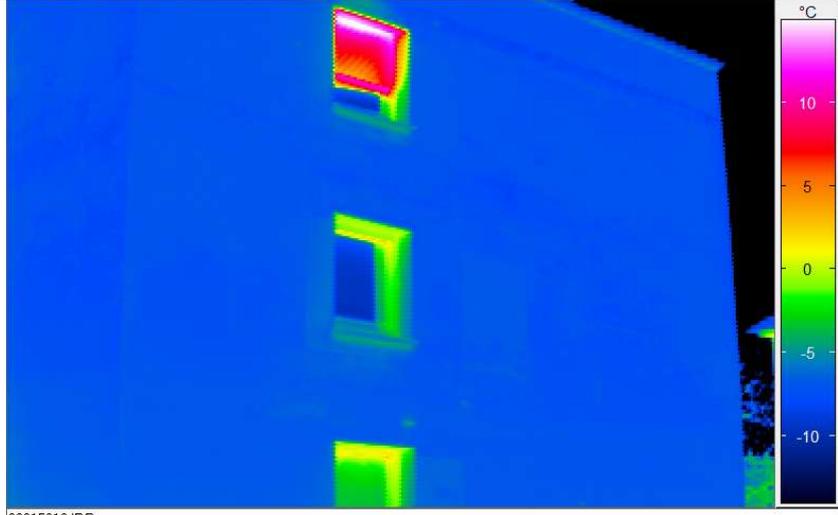
Die atmosphärische Gegenstrahlung<sup>1</sup> wurde über die Taupunkt-Temperatur der Luft rechnerisch bestimmt, direkte Messwerte standen in Gießen nicht zur Verfügung. Im parallelen Kranichsteinprojekt wurden Messwerte mit einem Pyrgeometer erhoben und mit den Berechnungen aus dem o.g. Taupunkttemperaturen verglichen. Die gute Übereinstimmung bestätigte die Validität des Verfahrens, das hier in Gießen angewendet wurde. Über das Stefan-Boltzmann-Gesetz kann die Gegenstrahlung auch als mittlere Himmelstemperatur angegeben werden, was für einen einfachen graphischen Plausibilitätstest hilfreich ist (vgl. Abbildung 25).



**Abbildung 25: Außenlufttemperatur und über den Taupunkt abgeleitete Himmelstemperatur im Zeitraum 1.10.2019 bis zum 29.11.2021.**

## 2.3 Thermographische Untersuchung

Am 15.02.2019 wurde das Gebäude in den frühen Morgenstunden (ca. 5:00 bis 6:30 Uhr) zur Qualitätssicherung mit einer Thermographiekamera von außen untersucht. Zu diesem Zeitpunkt fehlten noch die gesamte Sockeldämmung der Kelleraußenwände sowie die vorgestellten Balkonanlagen. Die Außentemperatur lag in diesem Zeitraum im Mittel bei  $-4,6^{\circ}\text{C}$ .

<p>Gebäudeecke Nord-Ost</p>  <p>90215014.IRB</p>	
<p>Fassade Nord</p>  <p>90215019.IRB</p>	
<p>Fassade West (südlicher Teil)</p>	

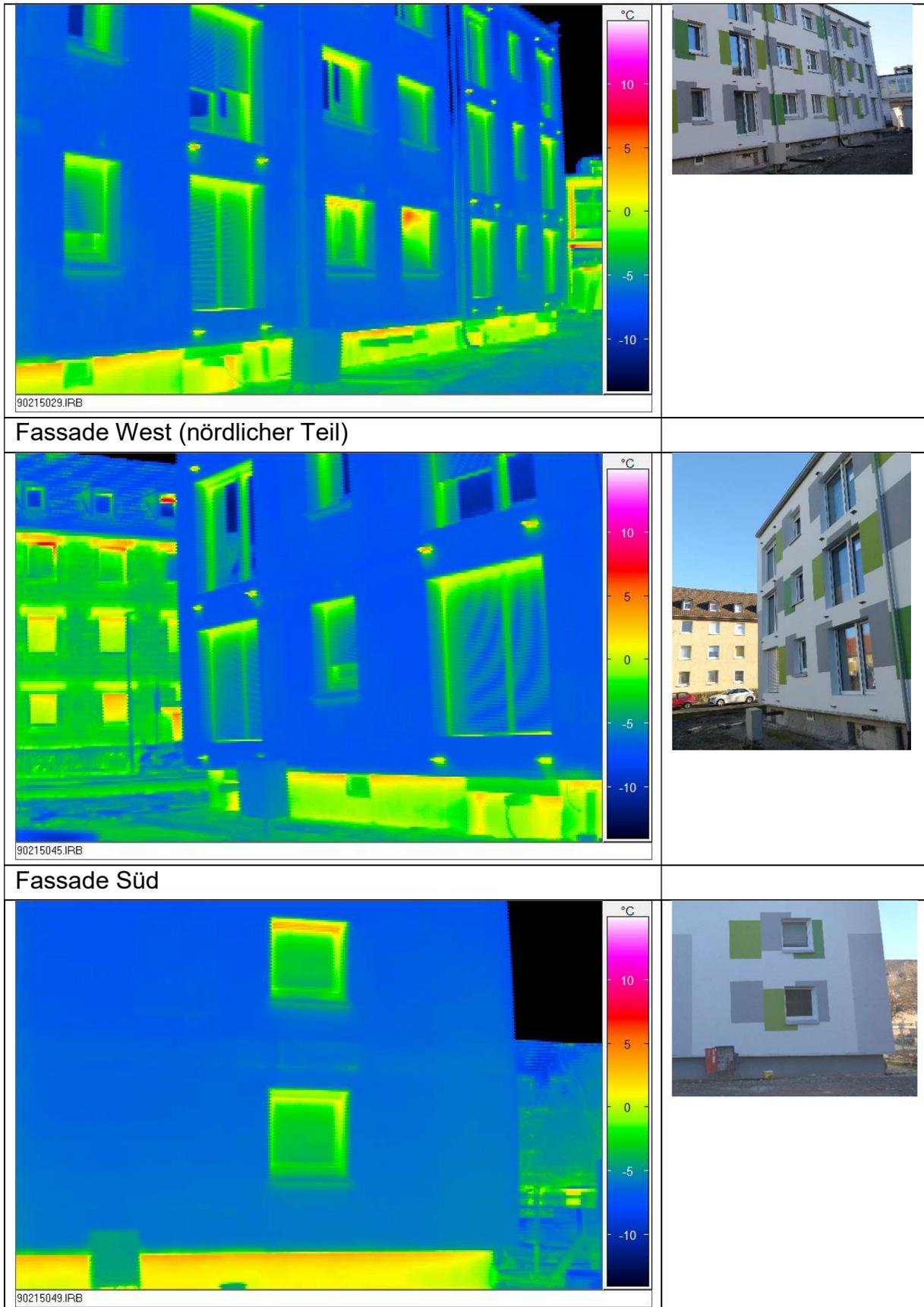
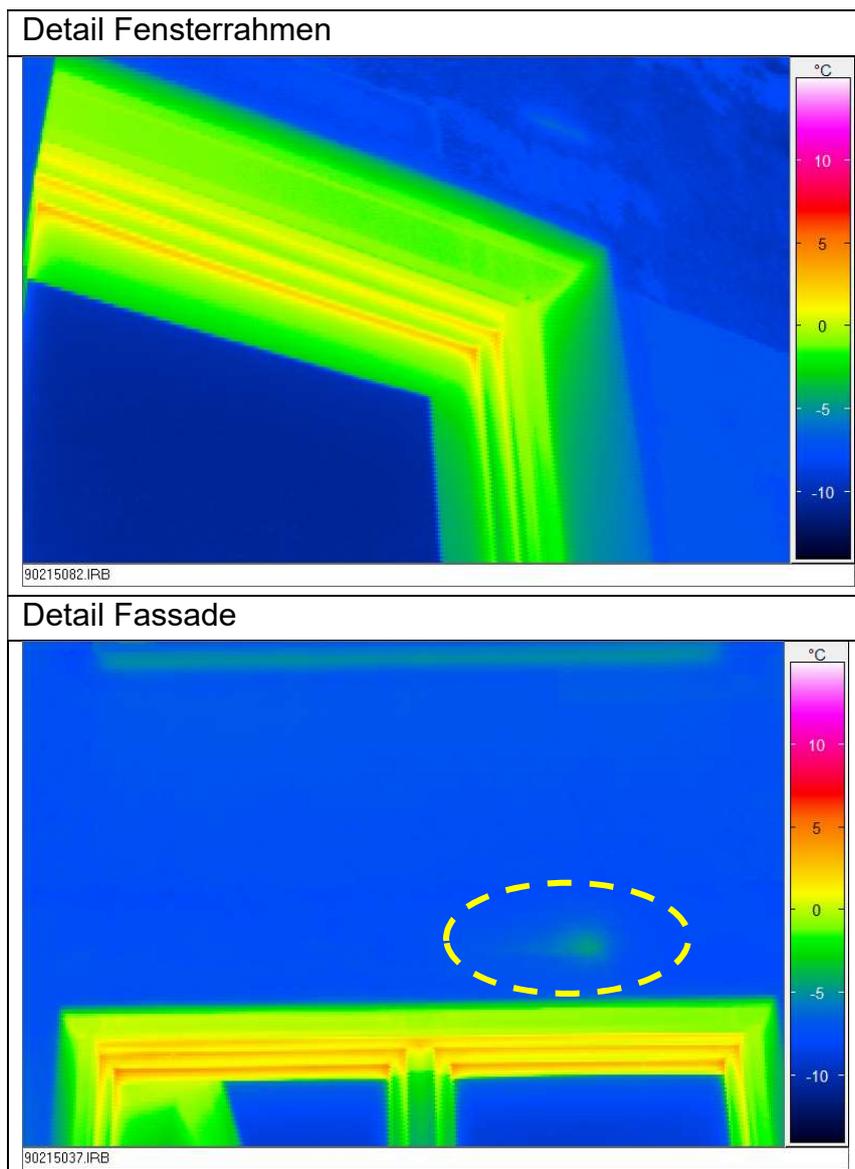


Abbildung 26: Außenfassaden des Gebäudes in der thermographischen Darstellung (Range: -14 bis +15°C) mit rechts jeweiligem Lichtbild zur Zuordnung.

Insgesamt verfügt das sanierte Gebäude über homogene Oberflächentemperaturen der gedämmten Außenfassaden, was eine gute Qualität der Außendämmung belegt. Insbesondere im Kontrast zum ungedämmten Sockelbereich und zum Nachbargebäude wird der Erfolg der Wärmedämmung deutlich. Auch die Fenster zeigen gleichmäßige, niedrige Oberflächentemperaturen. In einigen Aufnahmen sind geöffnete Fenster als Hotspot zu erkennen. Als punktuelle Wärmebrücken fallen die aus der Dämmung herausstehenden Metall-Anker zur Balkonbefestigung auf (siehe unten Abbildung 29).



**Abbildung 27:** Thermographische Detailbilder zu einem Fenster und einem Fassadenbereich über einem Fenster mit einer leichten Fehlstelle innerhalb der Markierung (Strich-Linie). Der eingestellte Temperaturbereich beträgt auch bei dieser Darstellung -14 bis +15°C.

Die Detaildarstellung des Fensterrahmens (Abbildung 27) zeigt niedrige Oberflächentemperaturen und im oberen Bereich die etwas höheren Temperaturen aufgrund der Warmluftwalze in den Scheibenzwischenräumen. Der Einsatz von wärmedämmten

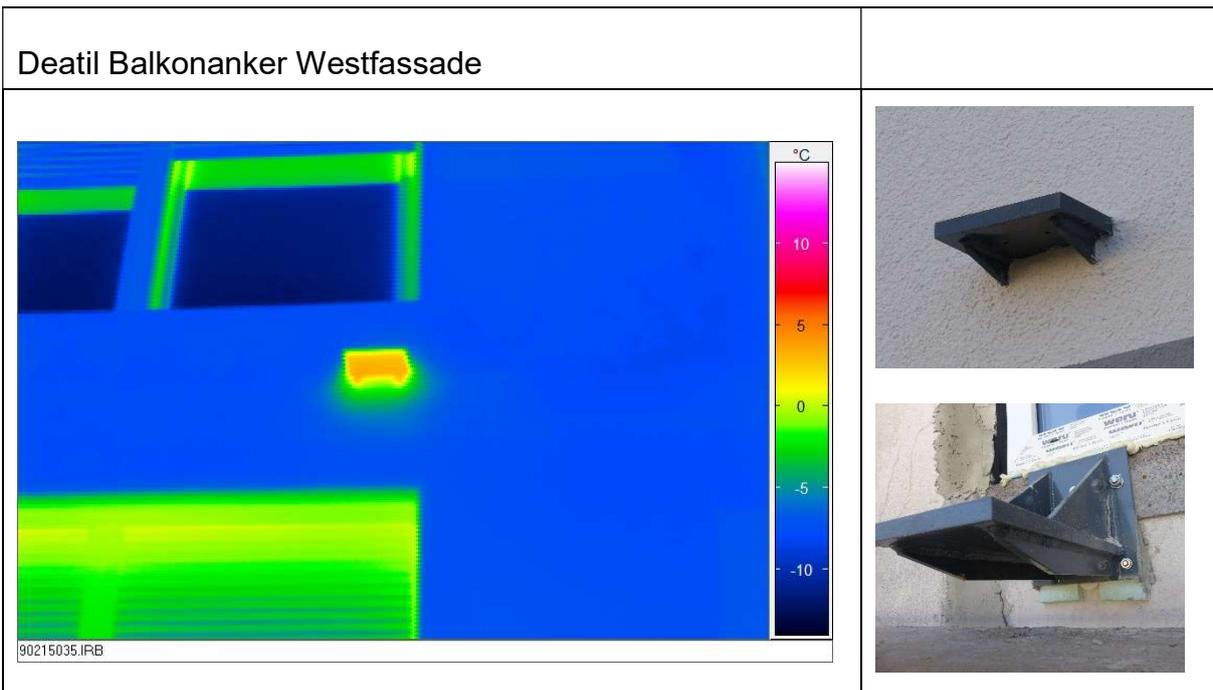
Fensterrahmen würde die Wärmeverluste noch weiter verringern. Das untere Thermogramm in Abbildung 27 zeigt einen kleinen Bereich an der Fassade über einem Fenster mit einer leichten Temperaturerhöhung. Hier ist zu vermuten, dass zwischen den Dämmstoffblöcken eine Fehlstelle (Luftraum) vorhanden ist. Dadurch kommt es hier zu einer punktuell etwas höheren Oberflächentemperatur. Damit verbunden ist ein geringfügig höherer Wärmeverlust als in der gedämmten Regelfläche. An einem der Nebenhäuser wurde während der Arbeiten eine ähnliche Fehlstelle, an einer anderen Fassadenposition festgehalten (Abbildung 28). Bei der Montage sollten Fugen dieser Art, welche größer sind als 5 mm, vermieden werden [Feist 1999]. Treten solche auf, sollten sie mit Dämmstoff gefüllt bzw. ausgestopft werden, um derartige Folgen zu verhindern. Insgesamt handelt es sich im vorliegenden Fall aber um eine nur geringe Störung, welche am Gebäude nur an dieser einen Stelle aufgefallen ist.



**Abbildung 28: Luftspalt zwischen zwei Dämmblöcken der Außenfassade an einem der Nebengebäude.**

Einen deutlich größeren thermischen Einfluss haben die 32 metallischen Balkonanker, welche die Wärmedämmung durchstoßen (vgl. Abschnitt 2.1.3). Wie in Abbildung 29 zu erkennen ist, handelt es sich hier um deutlich erkennbare Wärmebrücken. Die Wärmebrückenberechnung hat ergeben, dass der  $\chi$ -Wert erhebliche 0,159 W/K beträgt. Durch anders Material, eine thermische Trennung oder eine andere Dimensionierung stehen für Folgeprojekte mehrere alternative Verbesserungsmöglichkeiten zur Verfügung. Für diese Anwendungszwecke gibt es am Markt mittlerweile auch gut geeignete Spezialprodukte (siehe [componentdatabase.org](http://componentdatabase.org)).

Insgesamt bestätigt die thermographische Untersuchung die hochwertige thermische Qualität der Außenfassade.



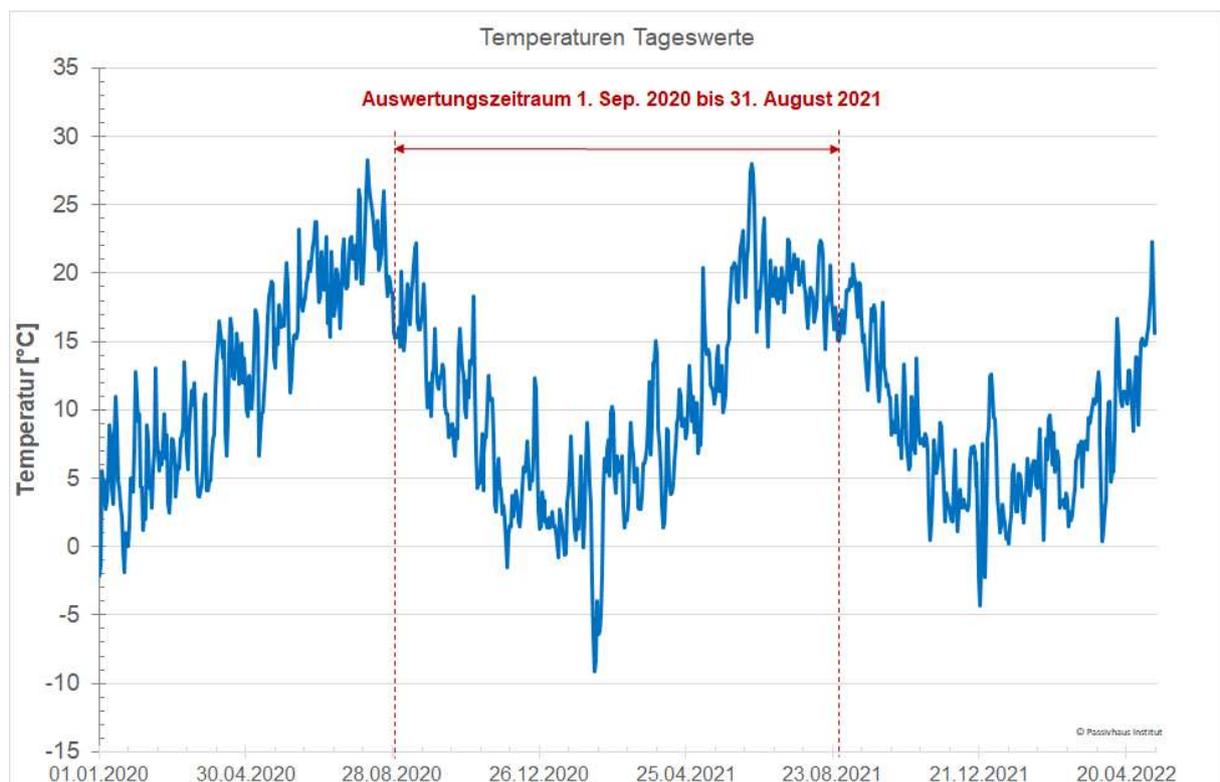
**Abbildung 29: Thermographie eines West-Fassaden Bereichs mit einem Balkonanker vor der Montage der Balkonanlage. Rechts Fotos der Balkonanker nach und vor der Montage der Wärmedämmung. (Range Thermogramm: -14 bis +15°C).**

### 3 Messdatenauswertung

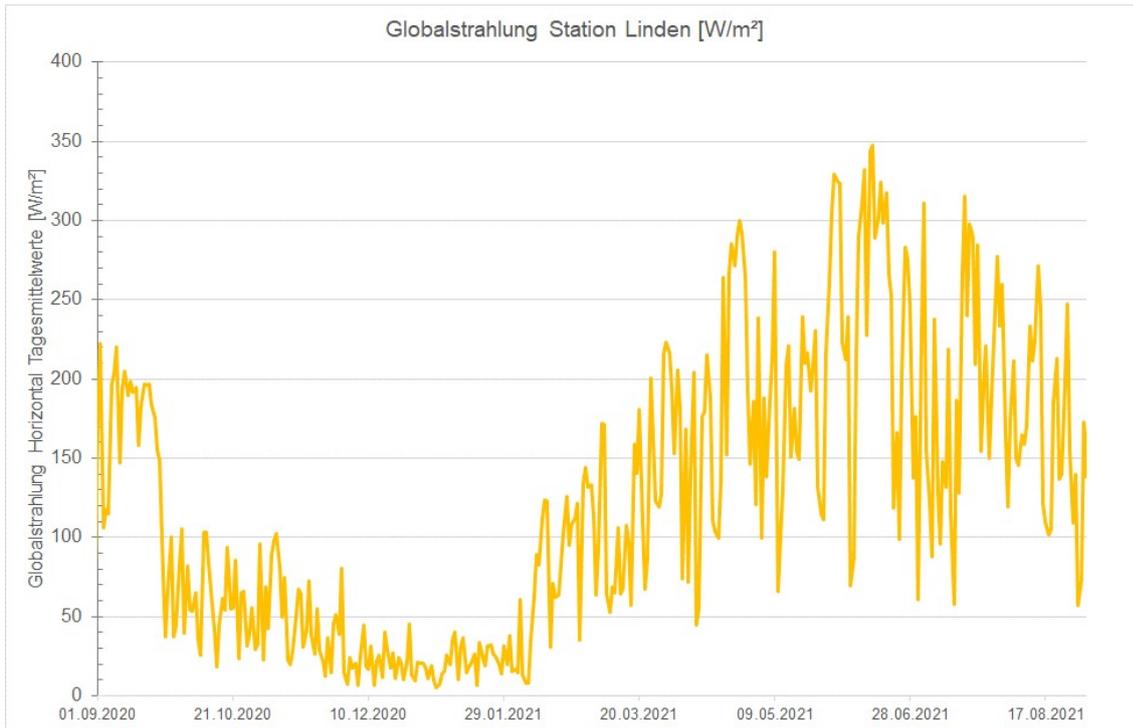
Als Auswertungszeitraum wird aufgrund der Datenverfügbarkeit ohne nennenswerte Ausfälle der 01. September 2020 bis 31. August 2021 gewählt. Als **Winter** wird der Zeitraum 01. Oktober 2020 bis 30. April 2021 festgelegt, als **Kernwinter** der Zeitraum 1. November 2020 bis 31. März 2021. Als **Sommerzeitraum** wird 01.08.2020 bis 31.08.2020 und 01. Mai 2021 bis 31. August 2021 betrachtet.

#### 3.1 Wetterbedingungen

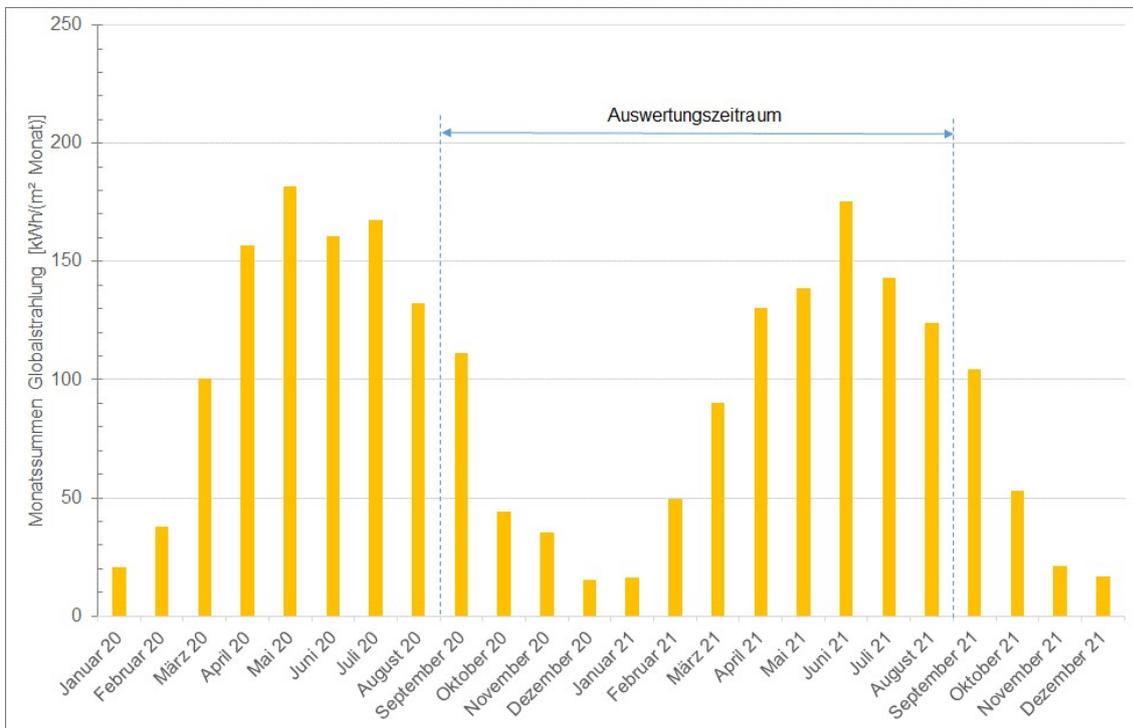
Um den Auswertungszeitraum einordnen zu können, werden die Wetterdaten im Messzeitraum dargestellt. Maßgeblich für die Energiebilanz sind dabei die Außentemperatur und die Globalstrahlung. Die Außentemperatur wurde auf dem Dach des Gebäudes gemessen. Die Globalstrahlungsdaten wurden von der HLNUG Wetterstation in Linden bezogen, welche etwa 6,5 km entfernt vom Gebäude positioniert ist.



**Abbildung 30: Außentemperatur (Tageswerte) vom 01.01.2020 bis zum 15.05.2022 der Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes. Der Auswertungszeitraum ist markiert.**



**Abbildung 31: Tagesmittlere Leistung der Globalstrahlung im Zeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021 von der Wetterstation HLNUG Linden (Quelle: [www.hlnug.de/messwerte](http://www.hlnug.de/messwerte), Darstellung PHI)**



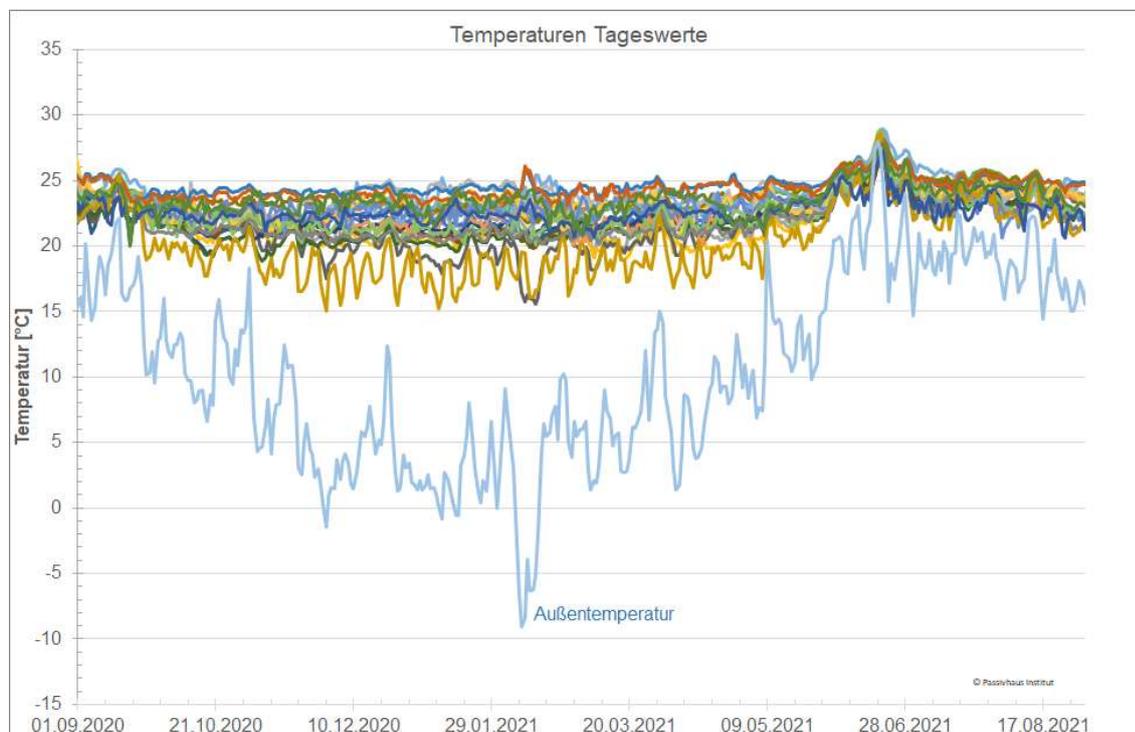
**Abbildung 32: Monatssummen der Globalstrahlung im Zeitraum Januar 2020 bis Dezember 2021 von der Wetterstation HLNUG Linden (Quelle: [www.hlnug.de/messwerte](http://www.hlnug.de/messwerte), Darstellung PHI)**

## 3.2 Raumlufbedingungen

In den 12 Wohnungen werden in jeweils einem Wohn- und einem Schlafrum die Raumlufbedingungen Temperatur, relative Luftfeuchte sowie die CO<sub>2</sub>-Konzentration als Leitwert der Raumlufqualität gemessen. Damit liegen in den Wohnungen Messwerte von 24 Räumen vor.

### 3.2.1 Temperaturen

Die Messung der je zwei Temperaturen pro Wohnung zeigt einen typischen Jahresverlauf mit gleichmäßigen Temperaturgängen und einer moderaten sommerlichen Spitze. Heraus fallen nur zwei Messstellen in zwei unterschiedlichen Wohnungen mit deutlich niedrigeren und viel stärker schwankenden Temperaturen während der Winterperiode.



**Abbildung 33: Raumluftemperaturen der 24 Messstellen in den 12 Wohnungen. Zum Vergleich ist auch der Verlauf der Außenlufttemperatur eingetragen. Tagesmittelwerte; Zeitraum: 01.09.2020 bis 31.08.2021.**

Für das Gebäude wurden die mittleren Temperaturen während der Jahresperiode und für den Winter und den Sommerzeitraum ermittelt. Sie sind der folgenden Tabelle 4 zu entnehmen. Dabei wurden die Temperaturen für jede Messstelle (2 pro Wohnung) jeweils einem Teilbereich der Wohnung zugeordnet und für die Wohnungsmitteltemperatur flächengewichtet gemittelt. Die für die Energiebilanz relevante mittlere Temperatur ergibt sich dann unter Berücksichtigung der thermischen Leitwerte sowie der Lüftungswärmeverluste, wie bereits in Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Es bleibt

festzuhalten, dass die Durchschnittstemperaturen der Wohnungen im Winter sowie im Kernwinter gleich hoch sind und mit 22,0 °C deutlich über den Standardbedingungen von 20 °C liegen. Werden die nur indirekt beheizten Treppenhäuser berücksichtigt, ergeben sich geringfügig niedrigere mittlere Temperaturen.

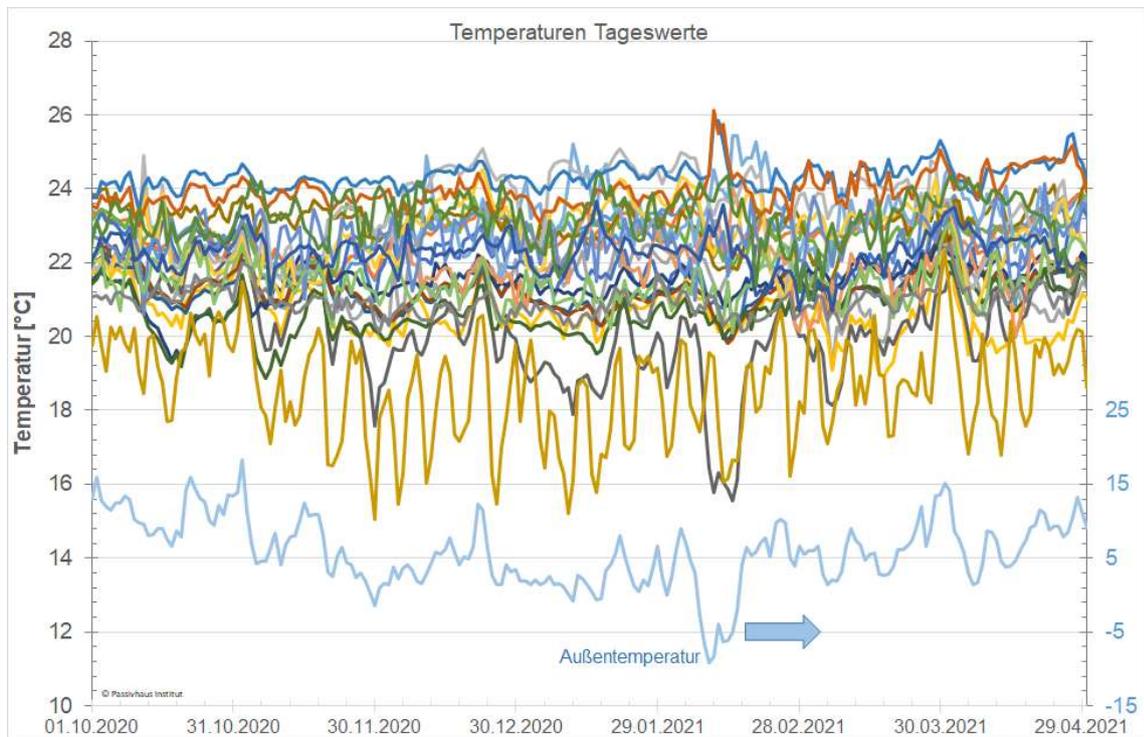
**Tabelle 4: Mittelwerte der Temperaturmessungen in den 12 Wohnungen (Gewichtet, vgl. Abschnitt 2.1.3)**

	Mittlere Temperatur	
	Alle Wohnungen [°C]	Alle Wohnungen und Treppenhäuser [°C]
Gesamtjahr 01.09.2020 bis 31.08.2021	22,8	22,5
Sommer: 1.9. bis 30.9.2020 und 1.05. bis 31.08.2021	23,9	23,7
<b>Winter</b> <b>01.10.2020 bis 30.04.2021</b>	<b>22,0</b>	<b>21,7</b>
Kernwinter 01.11.2020 bis 31.03.2021	22,0	21,6

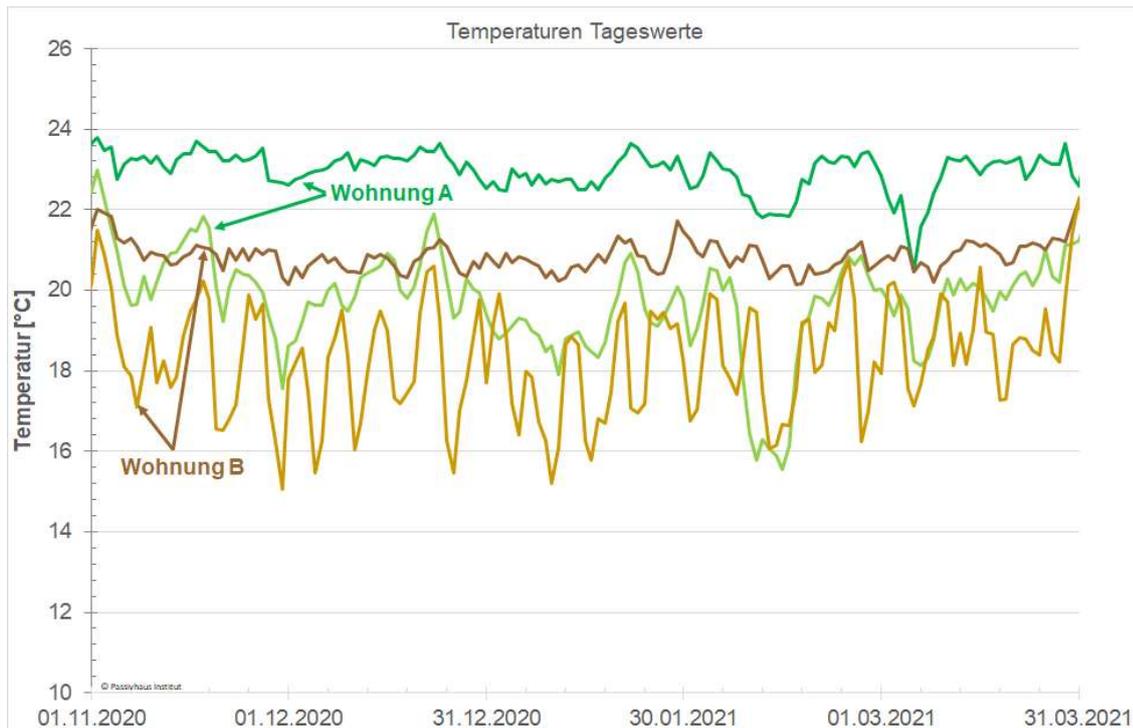
Die winterlichen Temperaturen werden in der folgenden Abbildung nur für den Winterzeitraum dargestellt. Das Temperaturband liegt im Winter hauptsächlich zwischen 20 und 25°C. Die Mietenden haben augenscheinlich unterschiedliche Bedürfnisse an die Höhe der Raumtemperatur und können diese wie gewünscht wählen. Die beiden Messpunkte mit deutlich niedrigeren Tagesmittelwerten sind auffällig und fallen aus den üblichen Messwerten heraus. Derart niedrige Temperaturen können in diesem Gebäude nur über langzeitige Fensterlüftung erklärt werden. Wie im Abschnitt 3.6.2 weiter unten noch untersucht wird, liegen hier Fensterlüftungszeiten von täglich 6 bis 8 Stunden in diesen zwei Zimmern vor. Damit wurde ein untypisches Verhalten beobachtet, was in der Form in anderen Passivhäusern bisher nicht vorkam.

Betrachtet man das jeweilige andere Zimmer in den beiden Wohnungen mit den langen Lüftungszeiten (Abbildung 35), zeigt sich, dass diese deutlich über 20°C liegen. Es wird also jeweils ein Raum durch die Fensteröffnung ausgekühlt und einer auf Behaglichkeitstemperatur geheizt. Dieses Vorgehen wird augenscheinlich von den Bewohnenden gewünscht. Daher kann festgehalten werden, dass auch ein solcher Wunsch durchaus in einer sanierten Wohnung umgesetzt werden kann. Natürlich führt dieses Verhalten zu einem erhöhten Heizwärmeverbrauch (wie auch bei anderen Gebäuden – nur dass dies i.d.R. weniger auffällt). Zum einen werden durch die langen Lüftungszeiten neben der Raumluft auch die Bausubstanz und Möbel sowie das Inventar ausgekühlt und müssen jedes Mal bei der Wiederaufheizung ebenfalls

erwärmt werden. Zum anderen wird für die Beheizung der direkt angrenzenden, deutlich wärmeren Räume mehr Energie benötigt (größere Temperaturdifferenz).



**Abbildung 34: Ausschnitt der Temperaturmessung der Winterzeit aus Abbildung 33. Tagesmittelwerte; Zeitraum: 01.10.2020 bis 30.04.2021.**



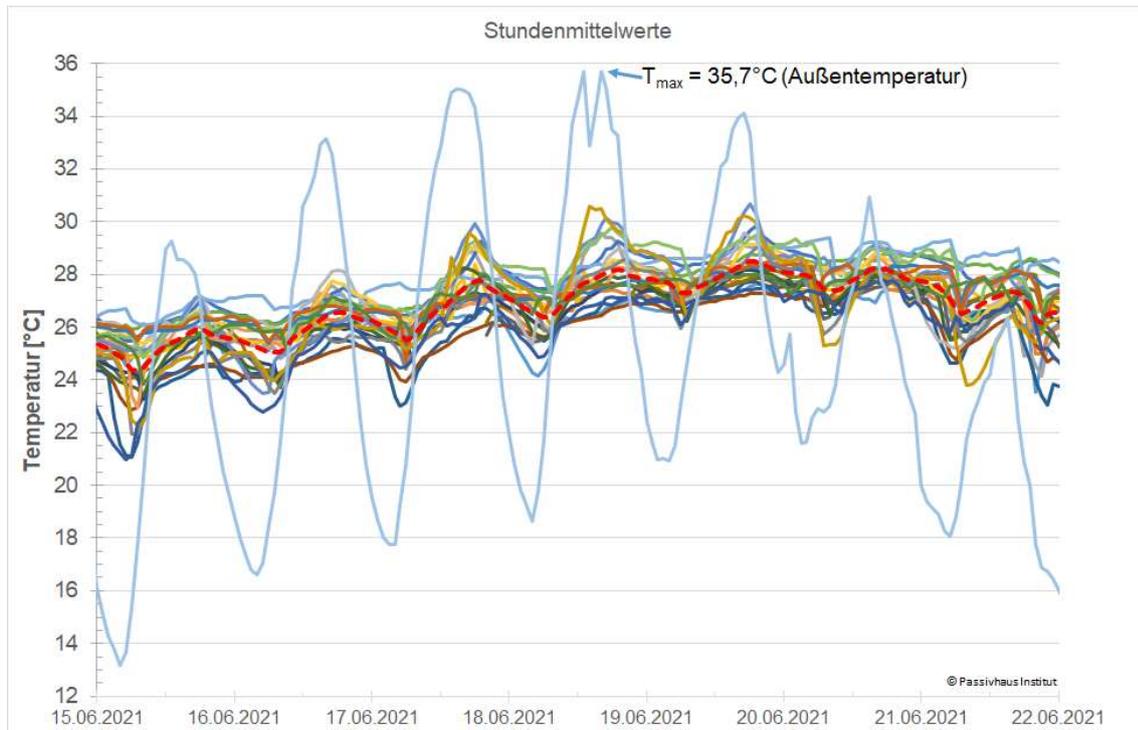
**Abbildung 35: Ausschnitt der Temperaturmessung der Winterzeit aus Abbildung 34 nur für die beiden Wohnungen mit langen Fensterlüftungszeiten (geänderte Farbwahl der Kurven gegenüber Abbildung 34). Jeweils eine der beiden Messstellen der Wohnungen zeigt deutlich höhere Temperaturen. (jeweils Tagesmittelwerte); Zeitraum: 01.11.2020 bis 31.03.2021.**

## Sommertemperaturen

Zur Bewertung der Sommertemperaturen und der Frage nach Überhitzungen ist es üblich die Stundenmittelwerte der Temperaturmessung zu untersuchen. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt Stundenmittelwerte verwendet und analysiert.

Die höchste Außentemperatur im untersuchten Jahreszeitraum wurde am 18.06.2021 mit 35,7°C gemessen. Die Temperaturspitzen haben sich in den Tagen zuvor langsam „aufgeschaukelt“, wie es typisch ist für eine Hitzeperiode in Mitteleuropa (Abbildung 36). Die Wohnungen zeigen auch während dieser Zeiten ein breites Temperaturband: Zur gleichen Uhrzeit betragen die Unterschiede zwischen der höchsten und der kühlestem Messstelle bis zu 4,3 K. Hier macht sich das unterschiedliche Nutzerverhalten deutlich bemerkbar (Einflüsse sind: Nachtlüftung über die Fenster; Lüftungsverhalten während der warmen Tageszeit, Höhe der internen Wärmequellen, u.a.). Während die eine Messstelle - für eine Hitzeperiode – maximal noch moderate 26,4°C bei einer Außentemperatur von fast 36°C anzeigt, liegt der höchste Messwert im Gebäude bei 30,7°C. Die kühlestem Wohnung während der Hitzeperiode befindet sich im mittleren Geschoss. Die wärmsten Messwerte werden im 1. und 2. OG festgestellt. Je wärmer es draußen wird, desto stärker fächert sich das Temperaturband der Wohnungen auf. Entscheidend dürfte das Lüftungsverhalten während der wärmeren Tageszeit sein

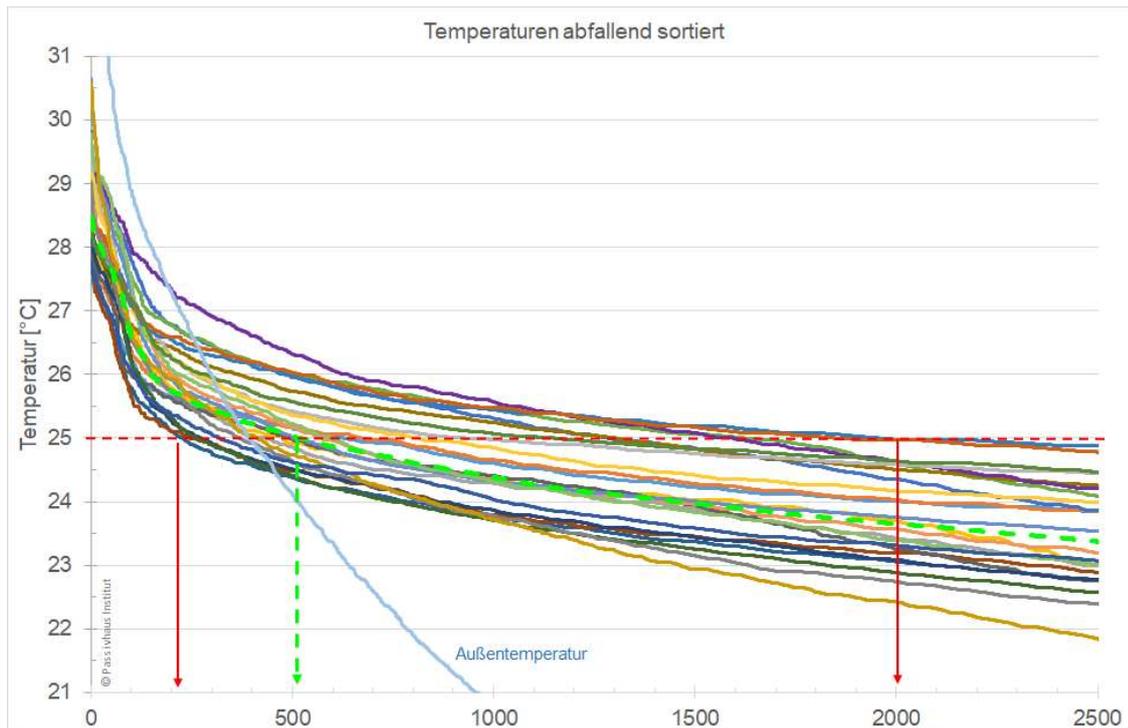
(Kopplung an die Außentemperatur): Die Wohnung, welche im Winter lange Fenster-Lüftungszeiten aufweist, ist auch im Sommer Temperatur-Spitzenreiter. Auch eine Wohnung mit winterlichen Spitzentemperaturen gehört im Sommer zu den wärmsten Wohnungen. Für niedrige Sommertemperaturen ist es wichtig, mit welcher Ausgangstemperatur am Ende des Winters gestartet wird.



**Abbildung 36: Raum- und Außentemperaturen während der wärmsten Tage („Hitzeperiode“) im Messzeitraum. Dargestellt ist der Zeitraum von 7 Tagen vom 15.06. bis zum 21.06.2021. Die rote gestrichelte Linie zeigt den flächengewichteten Mittelwert aller Messstellen.**

Zur Beurteilung der Übertemperaturhäufigkeit im Gebäude werden die Stundendaten aller 24 Messstellen und der Außentemperatur absteigend sortiert (Abbildung 37). Als strenger Maßstab wird die Überschreitung der 25 °C-Grenze herangezogen. Wie zu erwarten ist, sind die Überschreitungsstunden je Messstelle sehr unterschiedlich. Die kühlste Messstelle zeigt nur 219, die wärmste 1.956 Stunden. Das entspricht Werten zwischen 3 und 22% der Jahresstunden. Angestrebt bei der Planung mit Standardbedingungen ist eine Unterschreitung von 10 %. Bei der Betrachtung der weniger strengen 26 °C-Grenze liegen die Werte zwischen 1 und 7 % (99 bis 620 Stunden).

Aus den Stundendaten aller Messstellen wurde der flächengewichtete Mittelwert gebildet (siehe auch Abbildung 36). Werden diese Daten ebenfalls aufsteigend sortiert, ergibt sich die grüne Strichlinie in Abbildung 37. Im Mittel aller Wohnungen ergibt sich die Anzahl der Übertemperaturstunden (> 25°C) mit 514 Stunden, was 6 % der Jahresstunden entspricht. Damit liegt in diesem Untersuchungsjahr eine akzeptable Überwärmung vor. Bei der Betrachtung der weniger strengen 26 °C-Grenze ergeben sich 150 Stunden Übertemperatur, entsprechend 2 % der Jahresstunden.



**Abbildung 37: Absteigend sortierte Stundenmesswerte der Temperaturmessung von allen Wohnungen und der Außentemperatur. Dargestellt ist nur der Ausschnitt bis 2500 Jahresstunden. Die roten Pfeile zeigen die Stundenanzahl der wärmsten (1.956 h) und der kältesten (219 h) Wohnung (25 °C-Grenze) an. Der grüne Pfeil zeigt auf die Stunden über 25 °C des flächengewichteten Durchschnitts aller Wohnungen (514 h >25°C).**

Die Übertemperaturen können nach [DIN 4108-T2] auch als Übertemperaturgradstunden über einer Grenztemperatur angegeben werden. Für die mittlere Temperatur aller Wohnungen (ohne Treppenhäuser) sowie für die im Sommer wärmste und kälteste Wohnung sind die Werte in Tabelle 5 angegeben. Nach der Norm wird der Standort Gießen der Sommerklimaregion „B“ zugeordnet, für welche der Bezugswert der Innentemperatur von 26 °C vorgegeben ist. Der Anforderungswert für die Übertemperaturgradstunden beträgt nach der Norm 1200 Kh/a. Der Mittelwert über alle Wohnungen beträgt mit 176 Kh/a über 26 °C nur ein Bruchteil des maximal zulässigen Wertes. Sogar die sommerlich wärmste Wohnung unterschreitet die Grenze mit 687 Kh/a deutlich.

**Tabelle 5: Übertemperaturgradstunden über drei Temperaturschwellen des Gesamtgebäudes und der wärmsten und der kältesten Wohnung vom Jahreszeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021.**

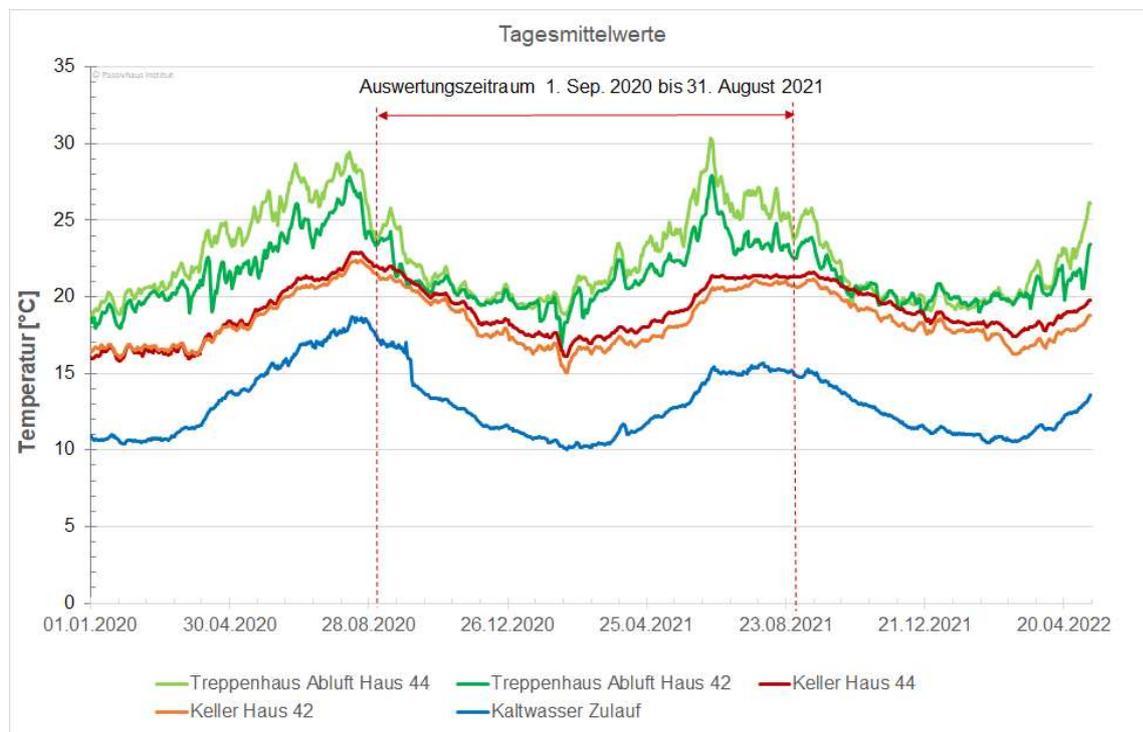
Übertemperaturgradstunden [Kh/a]	Mittelwert alle Wohnungen	Kälteste Wohnung	Wärmste Wohnung	Maximalwert nach [DIN 4108-T2]
<b>Über 25 °C</b>	<b>473</b>	197	1767	-
<b>Über 26 °C</b>	<b>176</b>	66	687	1200
<b>Über 27 °C</b>	<b>63</b>	9	243	-

### 3.2.2 Temperaturen Treppenhäuser, Keller und Kaltwasser

Um die Randbedingungen des Gebäudes für die Simulationsrechnungen zu bestimmen, wurden noch weitere Temperaturen gemessen. Die Temperaturgänge der Treppenhäuser, der Keller und des Kaltwassers zeigen typische Jahresgänge mit einer erwarteten Sommer-Winter-Schwankung. Die Treppenhaustemperaturen wurden in den Treppenhauköpfen in den Abluftöffnungen der Lüftungsanlagen gemessen. Im Auswertungszeitraum lagen die Temperaturen dort zwischen 16,6 und 30,3 °C (Tagesmittelwerte; Abbildung 38). Das Treppenhaus von Haus 44 ist immer etwas wärmer als das benachbarte.

In den beiden Kellerbereichen außerhalb der thermischen Gebäudehülle schwanken die Lufttemperaturen im Auswertungszeitraum zwischen 15,1 und 22,0 °C, wobei die Temperatur des Kellers von Haus 44 immer über der Kellertemperatur von Haus 42 liegt.

Die zentrale Kaltwasserzuleitung im Keller zeigt einen Temperaturgang im Auswertungszeitraum zwischen 10,0 und 17,8 °C. Diese Größenordnung, mit relativ hohen sommerlichen Temperaturen, wurde bereits auch in anderen Gebäuden festgestellt.

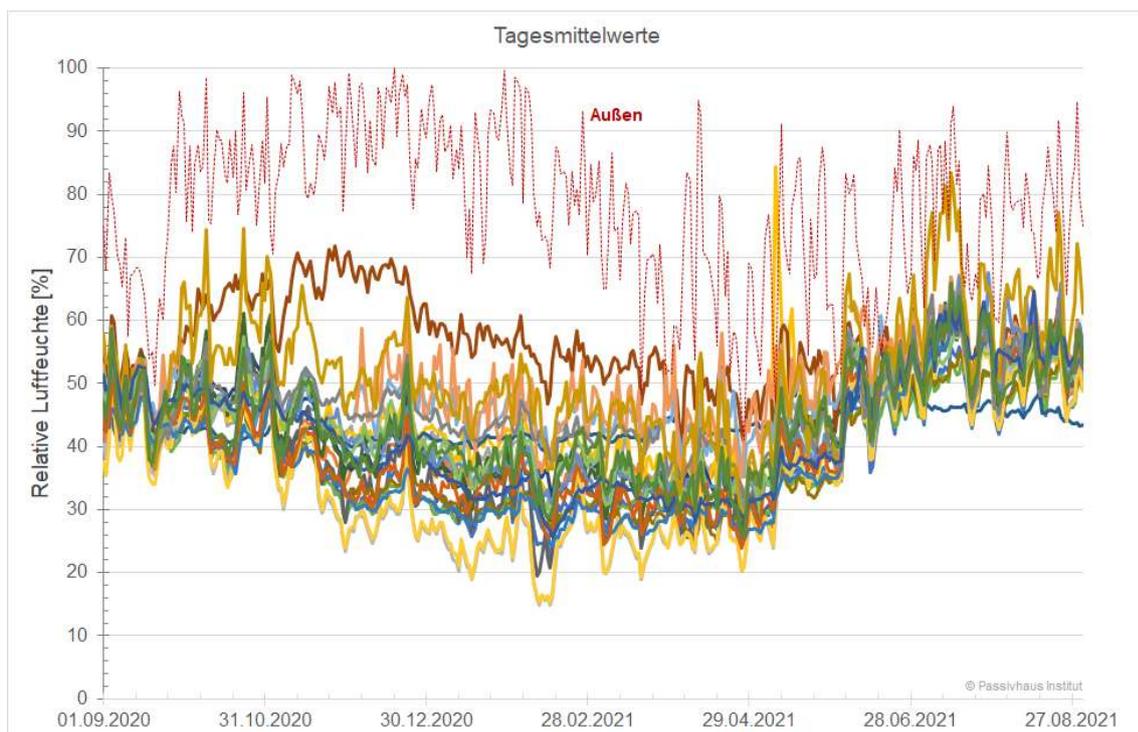


**Abbildung 38: Lufttemperaturmessungen in beiden Kellern und Treppenhäusern sowie der zentralen Kaltwasserleitung im Keller.**

### 3.2.3 Raumlufffeuchte

Die relativen Raumlufffeuchten in den Wohnungen werden über die Raumluff-Kombisensoren in den 24 Zimmern erfasst. Der Verlauf über das gesamte Messjahr inkl. der Außenfeuchte ist in Abbildung 39 dargestellt. Erkennbar ist ein relativ breites Feld von Messwerten und ein typischer Verlauf mit tendenziell höheren Innenraumwerten während der Sommermonate. In diesen Monaten liegen die Werte überwiegend etwa zwischen 35 und 70 % mit wenigen Ausreißern. Insbesondere eine der Messstellen setzt sich vom Feld deutlich ab und hat einen auffällig höheren Verlauf. Ob hier möglicherweise ein Defekt vorliegt, konnte nicht überprüft werden. Die zugehörige zweite Messstelle in derselben Wohnung zeigt in den ersten 2/3 des Jahreszeitraumes ein ganz anderes Verhalten mit deutlich niedrigeren und weniger schwankenden Messwerten.

In den Wintermonaten liegen die Feuchtwerte niedriger: Die meisten Werte liegen zwischen 30 und 45 %rF. Der Kernwinter wird in Abbildung 40 vergrößert dargestellt.



**Abbildung 39: Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte im gesamten Untersuchungsjahr.**

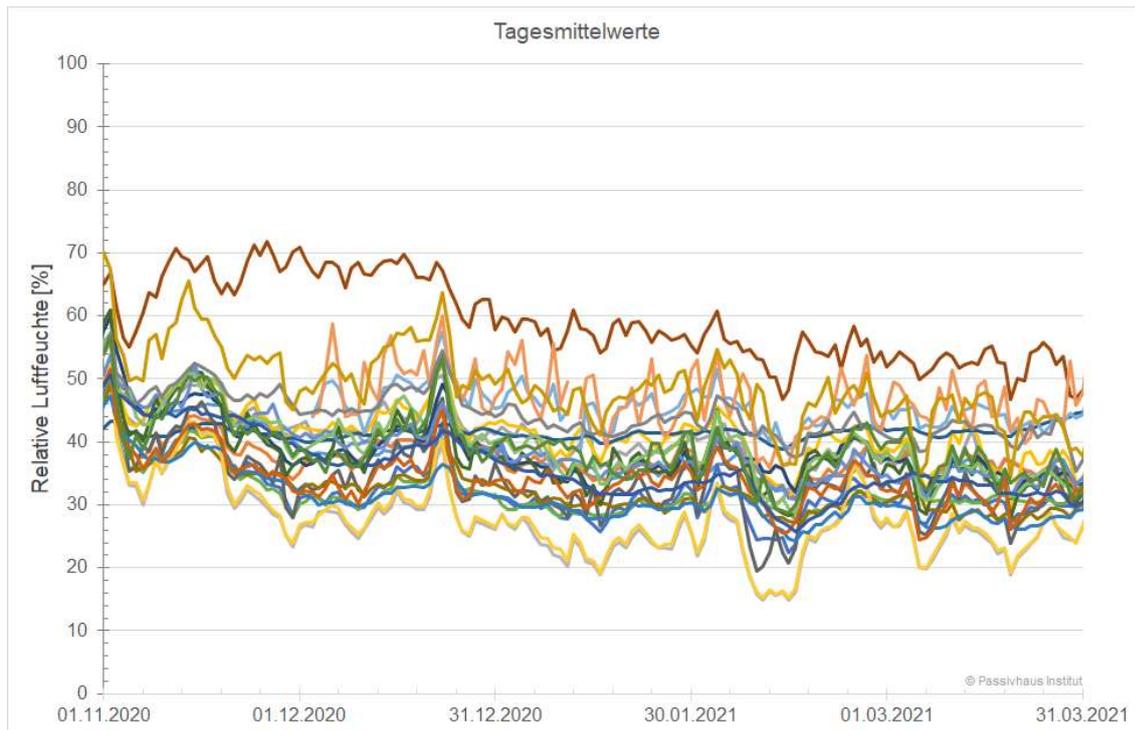
Die Übersicht der relativen Raumlufffeuchten in Tabelle 6 zeigt die sehr unterschiedlichen durchschnittlichen Messwerte. Das Nutzerverhalten macht sich dabei deutlich bemerkbar: Der maximale Unterschied im Winterzeitraum zwischen den Wohnungen liegt bei 20 %rF. Nur in einer Wohnung wird dabei im Durchschnitt ein Wert knapp unter 30 %rF festgestellt. Es handelt sich um eine Wohnung mit relativ hohen Raumtemperaturen um 23 °C. Hohe Raumlufftemperaturen führen bei gleichen

absoluten Wassergehalt zu relativ niedrigen Raumlufffeuchten. Über längere Zeiten Werte unter 30 % können nicht empfohlen werden.

**Tabelle 6: Mittelwerte der relativen Raumlufffeuchten in den 12 Wohnungen für den Winter und den Kernwinterzeitraum (aufsteigend sortiert nach dem Zeitraum „Winter“).**

	<b>Winter</b> 01.10.20 -30.04.21	<b>Kernwinter</b> 01.11.20-31.03.21
Wohnung 1	29,8	27,8
Wohnung 2	33,1	32,1
Wohnung 3	33,5	32,7
Wohnung 4	33,6	32,7
Wohnung 5	38,2	37,7
Wohnung 6	38,6	37,9
Wohnung 7	39,7	38,4
Wohnung 8	40,0	39,2
Wohnung 9	41,2	40,8
Wohnung 10	45,6	45,5
Wohnung 11	45,8	46,3
Wohnung 12	49,3	49,6

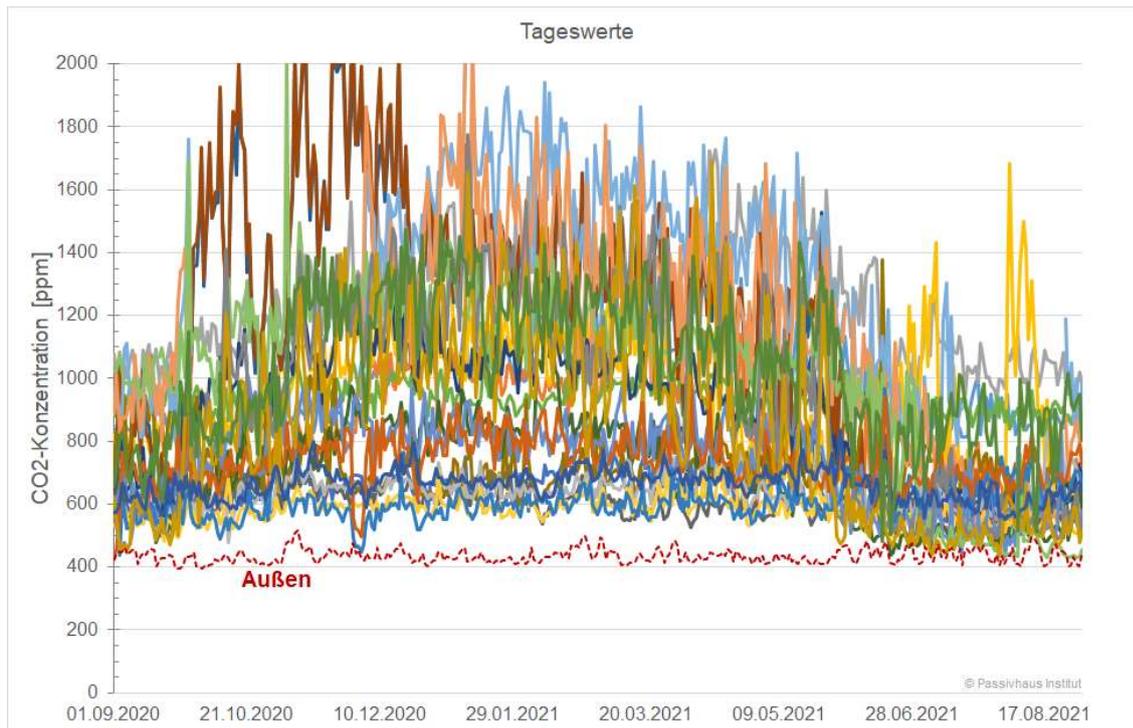
In der Darstellung nur des Kernwinters ergibt sich für den kältesten Zeitraum um den 05. bis 17.02.2021 eine Reduktion der Raumlufffeuchte in allen Räumen. Die Ursache ist in den veränderten Außenluftbedingungen begründet: Niedrigere Außentemperaturen bedeuten eine trocknere Außenluft (absoluter Feuchtegehalt). Wird ausreichend gelüftet, sinkt durch solche Veränderung automatisch auch der Feuchtegehalt der Innenraumluff. Auffällig zeigen sich zwei Kurven mit langen Zeiten mit den deutlich niedrigsten Messwerten unter 30 %rF. Beide Messungen stammen aus derselben Wohnung. Wie oben beschrieben verfügt die Wohnung über relativ hohe Raumtemperaturen, die eine Mitursache für die niedrigen relativen Feuchtwerte darstellen.



**Abbildung 40: Tagesmittlere relative Luftfeuchten in den 12 Wohnungen (je 2 Messstellen) im Kernwinter-Zeitraum (Ausschnitt aus der vorherigen Grafik)**

### 3.2.4 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration gilt als eine relativ leicht messbare Leitgröße zur Beurteilung der Luftqualität (Darstellung in der Einheit [ppm], „parts per million“). Die Messbereichsgrenze der eingesetzten Sensoren liegt bei 2000 ppm. Erwartungsgemäß sind in den Wintermonaten höhere Messwerte abzulesen als in den Sommermonaten mit zusätzlicher Fensterlüftung (Abbildung 41). An der Grafik ist auch erkennbar, dass zwischen den Wohnungen erhebliche Unterschiede bestehen: Auch wenn deutliche Schwankungen zwischen den Tageswerten einer Wohnung vorliegen, verfügen einige Zimmer über stabile Werte in einem niedrigeren Bereich andere liegen längere Zeit im Kernwinter deutlich höher. Das breite Band der Messwerte zeigt nur selten Überschreitungen der 2000 ppm und dies nur in den zwei Zimmern einer Wohnung. Diese Messbereichsgrenze wird häufig dabei auch nur als Spitze gerade erreicht. Insgesamt ist das unterschiedliche Nutzerverhalten (Bewohnerzahl, Anwesenheit, Lüftungseinstellung, Fensterlüftung) deutlich erkennbar.

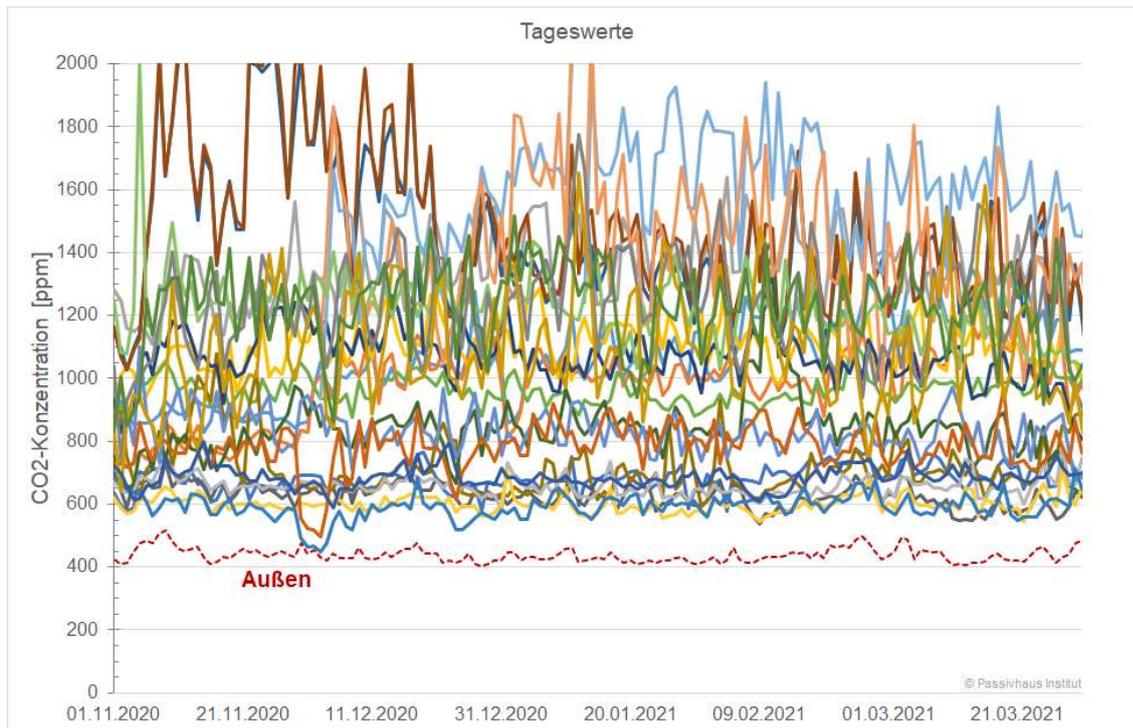


**Abbildung 41: CO<sub>2</sub>-Konzentrationen als Tagesmittelwerte in den 12 Wohnungen (24 Räume) im Messjahr September 2020 bis August 2021. Quelle der Außenkonzentration: Station des HLNUG in Linden bei Gießen.**

Um die schwankenden Werte besser beurteilen zu können, sind die Messwerte aus dem Kernwinter (November bis März) aus der Grafik Abbildung 42 in der folgenden Tabelle als Mittelwerte je Wohnung berechnet. Es handelt sich also um den Zeitraum, in dem mit der geringsten Zusatzlüftung über die Fenster gerechnet werden kann. Bei den Mittelwerten des Zeitraumes wird die Streuung deutlich; die Werte liegen zwischen 620 und 1470 ppm.

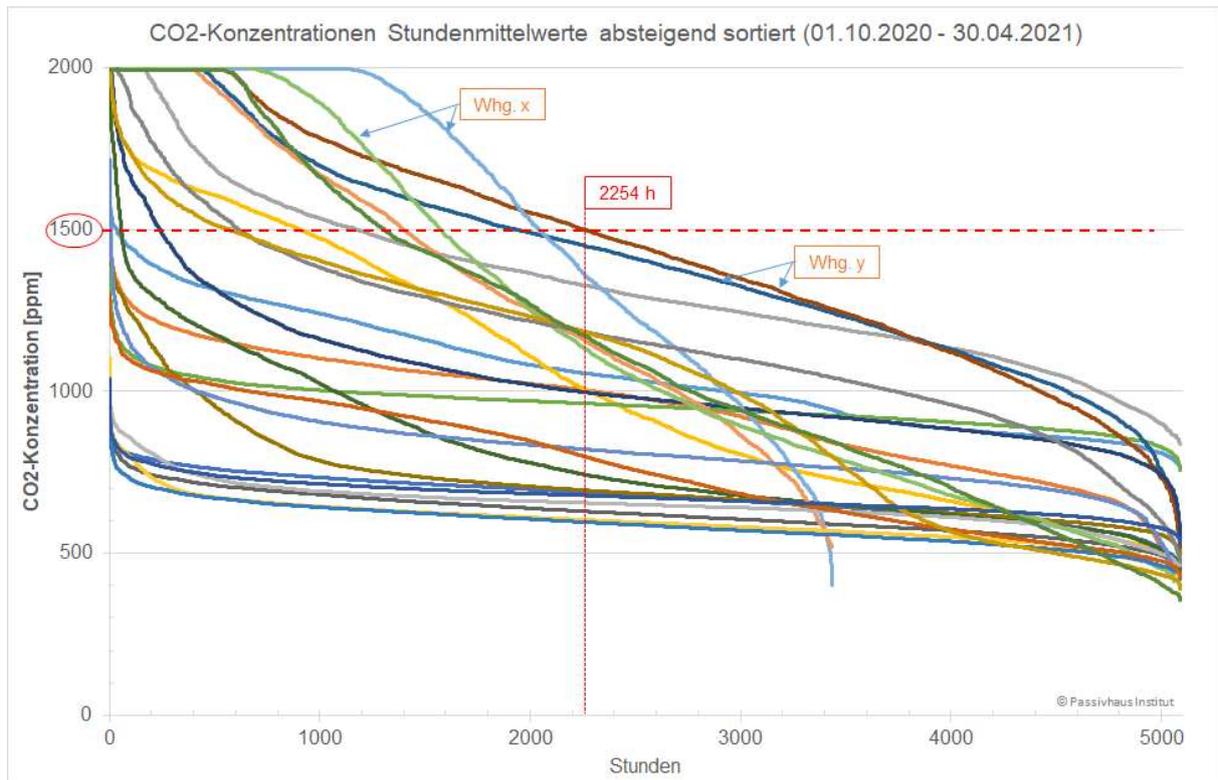
**Tabelle 7: Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentration während des Kernwinters (1.11.2020 – 31.03.2021) für die 12 Wohnungen (aufsteigend sortiert).**

	CO <sub>2</sub> -Konzentration Kernwinter
1	<b>627</b>
2	<b>694</b>
3	<b>697</b>
4	<b>811</b>
5	<b>964</b>
6	<b>978</b>
7	<b>1030</b>
8	<b>1044</b>
9	<b>1202</b>
10	<b>1238</b>
11	<b>1464</b>
12	<b>1504</b>



**Abbildung 42: Detail der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den 24 Räumen der 12 Wohnungen für den Kernwinter-Zeitraum (November 2020 bis März 2021). Quelle der Außenkonzentration: Station des HLNUG in Linden bei Gießen.**

Zur Beurteilung werden die stündlichen Messwerte der Winterperiode (01.10.2020 bis 30.04.2021) jeweils absteigend sortiert und grafisch dargestellt (Abbildung 43). Insgesamt umfasst der Zeitraum 5088 Stunden. Der zeitweilige Datenausfall von zwei Sensoren in einer Wohnung ist dabei durch die beiden verkürzten Kurven zu erkennen. Die höchsten vier Messwerte mit der längsten Überschreitung der 1500 ppm Grenze werden in den jeweils beiden Räumen von zwei Wohnungen festgestellt. Es ist auch zu erkennen, dass neun Wohnungen die Grenze gar nicht erreichen und weitere vier nur eine sehr geringe Stundenzahl darüber liegen.



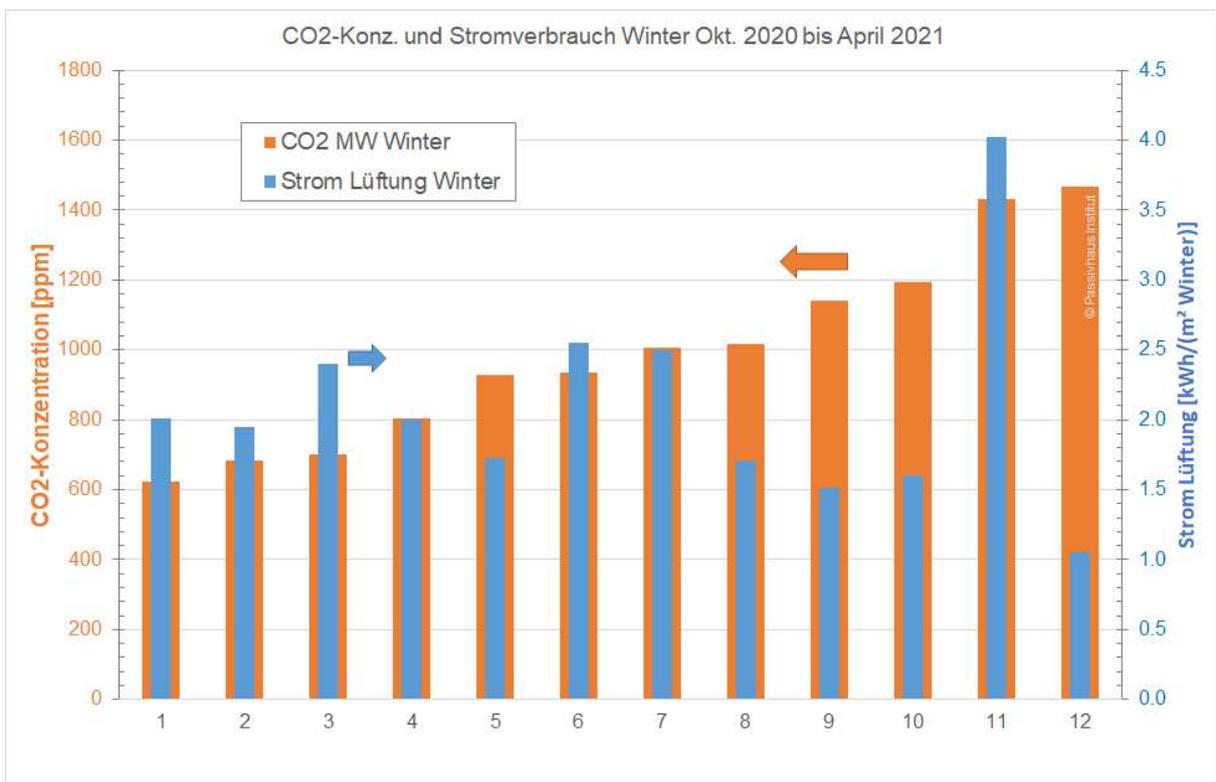
**Abbildung 43: Absteigend sortierte Messwerte der stündlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration in den 24 Räumen der 12 Wohnungen für den Winter-Zeitraum (Oktober 2020 bis April 2021). Die beiden verkürzten Kurven sind auf den zeitweiligen Ausfall der beiden Sensoren bedingt.**

Die Messwerte der Raumlauft zeigen, trotz der großen Bandbreite, insgesamt gute bis sehr gute Raumlufqualitäten im Vergleich zu fenstergelüfteten Wohnungen. Bei diesen werden in der Regel deutlich höhere Werte festgestellt (vgl. [Peper/Feist 2008]). Auch in den hier untersuchten Wohnungen kann die Wirksamkeit der Lüftungstechnik bestätigt werden, obwohl die Filterwechsel deutlich zu spät (Dezember 2021, damit außerhalb des hier untersuchten Jahreszeitraumes) durchgeführt wurden.

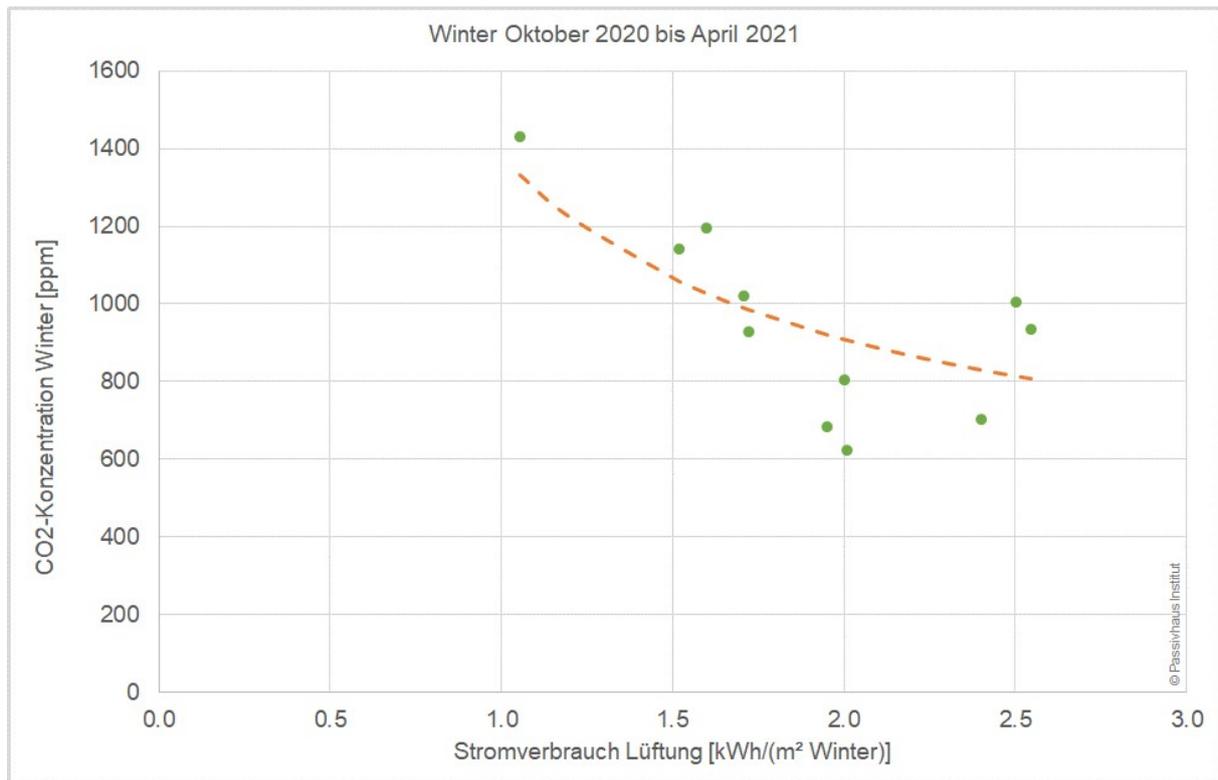
Zu den Ursachen der Überschreitungen der angestrebten Grenze der CO<sub>2</sub>-Konzentration wird der Betrieb der Lüftungsanlagen hier in die Betrachtung aufgenommen. Die vollständige Auswertung erfolgt in einem Folgekapitel (3.4.1). Aufgrund der Messung der Stromverbrauchswerte der Lüftungsanlagen kann festgestellt werden, in welchen Betriebsstufen die Anlagen betrieben werden. Viele Bewohnerinnen und Bewohner betreiben die Anlage überwiegend auf der niedrigsten Betriebsstufe und haben damit noch die Möglichkeit einen höheren Luftwechsel einzustellen und die Luftqualität zu verbessern.

Stellt man den Stromverbrauch der Lüftungsgeräte als Summe für den Winter-Zeitraum der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration im gleichen Zeitraum gegenüber, ergibt sich das Bild in Abbildung 44. Es zeigt sich, durch die aufsteigende Sortierung nach dem mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, dass Wohnungen mit niedrigeren Lüftungsstromverbrauchswerten tendenziell höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verzeichnen müssen. Eine

Ausnahme stellt offensichtlich nur die Wohnung 11 (in dieser Anordnung) dar: Hier liegt der höchste Stromverbrauch bei gleichzeitig der zweithöchsten CO<sub>2</sub>-Konzentration vor. Der Grund dafür konnte im Rahmen der Messung nicht geklärt werden. Wird dieser Ausreißer nicht berücksichtigt, zeigt Abbildung 45 eine klare Korrelation durch die Ausgleichsgerade. Auch wenn mit dieser Betrachtung die Bewohneranzahl der Wohnungen nicht berücksichtigt wird, kann damit bestätigt werden, dass die Nutzerinnen und Nutzer der Wohnungen durch die Erhöhung der Luftmengen die Belastung weiter verringern könnten, wenn sie dies wünschen.



**Abbildung 44: Mittlere CO<sub>2</sub>-Qualität in den Wohnungen im Vergleich zur Summe des Stromverbrauchs der 12 Lüftungsgeräte im Winter 2020/2021.**



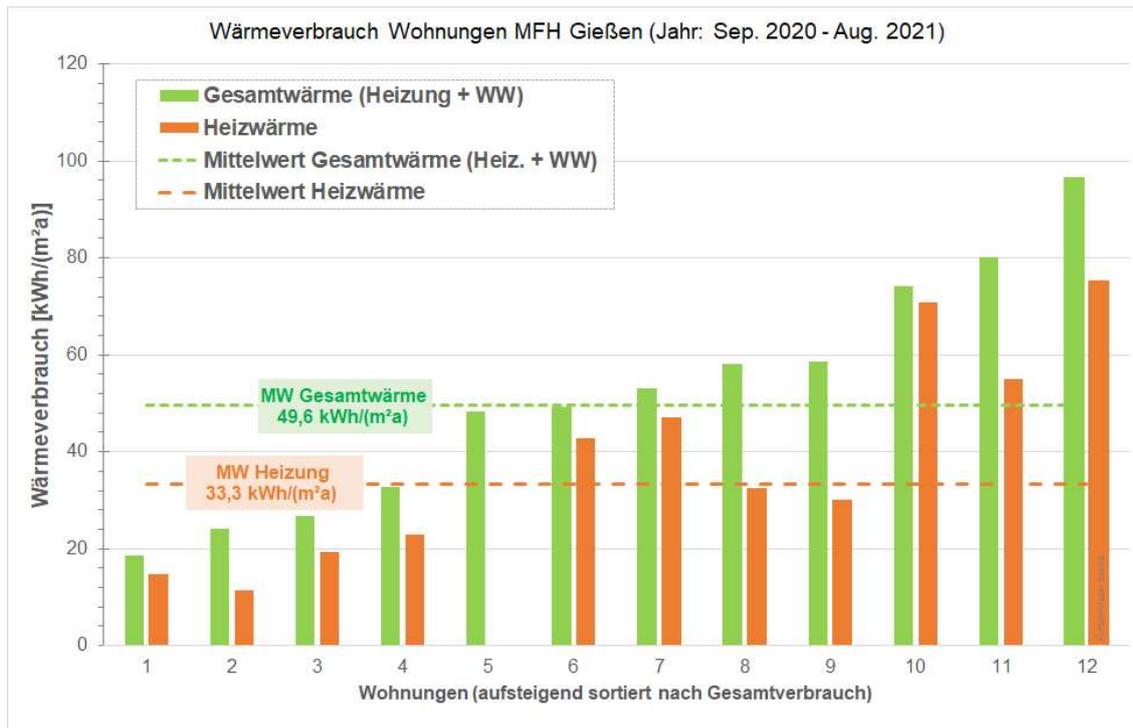
**Abbildung 45: Wertepaare der CO<sub>2</sub>-Konzentration und des Stromverbrauchs aus Abbildung 44 ohne Wohnung 11 im xy-Diagramm aufgetragen. Die Ausgleichskurve zeigt die Tendenz „Höhere Lüftungsstromverbrauch (= höhere Luftmenge) verringert die CO<sub>2</sub>-Konzentration“. Die Bewohneranzahl und Anwesenheitszeiten bleiben bei dieser vereinfachten Betrachtung unberücksichtigt.**

### 3.3 Energie (Wärme)

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, wird das Gebäude mit Fernwärme versorgt. Die Unterstationen der Wohnungen versorgen dann den Heizwärmestrang der Wohnung und die Warmwasserbereitung nach dem Durchlaufprinzip (Plattenwärmeübertrager). Die schematische Darstellung dazu ist Abbildung 11 im Abschnitt 2.1.1 zu entnehmen.

#### 3.3.1 Heizwärme

Als wichtige Verbrauchsgröße wird der Jahres-Heizwärmeverbrauch bestimmt. Im Jahreszeitraum 01.09.2020 bis zum 31.08.2021 ergibt sich der Heizwärmeverbrauch über alle Wohnungen zu durchschnittlich 33,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Einzelwerte der Wohnungen schwanken wie regelmäßig beobachtet erheblich und liegen im Betrachtungszeitraum zwischen 0 und 75,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der gesamte Wärmebezug der Wohnungen für Heizwärme und Warmwasserversorgung beträgt im Zeitraum durchschnittlich 49,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) und variiert zwischen 18,5 und 96,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) (siehe Abbildung 46).



**Abbildung 46: Wärmeverbrauch der 12 Wohnungen für Heizung und Warmwassererzeugung im Jahreszeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021 mit den beiden Mittelwerten. Aufsteigend sortiert nach dem Wärmegesamtbezug (grün).**

Es wurde festgestellt, dass auch in Zeiten außerhalb der Heizperiode Heizwärme verbraucht wurde. Werden nur die Monate betrachtet, in denen - bei diesem Dämmstandard – ein Heizwärme benötigt werden könnte (Oktober bis April), beträgt der Verbrauch noch **31,1 kWh/(m²a)**. In der übrigen Zeit ist davon auszugehen, dass die Heizung überwiegend nicht bewusst und ungewollt betrieben wird. Der Verbrauch ist nur in einzelnen Wohnungen aufgetreten. Dieser immer wieder beobachtete Effekt, dass selbst im Hochsommer Heizwärme verbraucht wird, kann in der Regel durch das zentrale Abschalten des Heizungsstranges verhindert werden. In diesem Gebäude sind aber die Heizwärme und die Warmwasserversorgung gekoppelt und eine Abschaltung ist daher nicht praktikabel.

Für die Betrachtung des Heizwärmeverbrauchs nur der Heizmonate (Oktober bis April) wurde auch der Winter des Folgejahrs ausgewertet. Die Darstellung Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse für jeweils 7 Monate. Für den Winter 2021/2022 ergibt sich ein nochmals geringerer Wert von **27,5 kWh/(m²a)**.

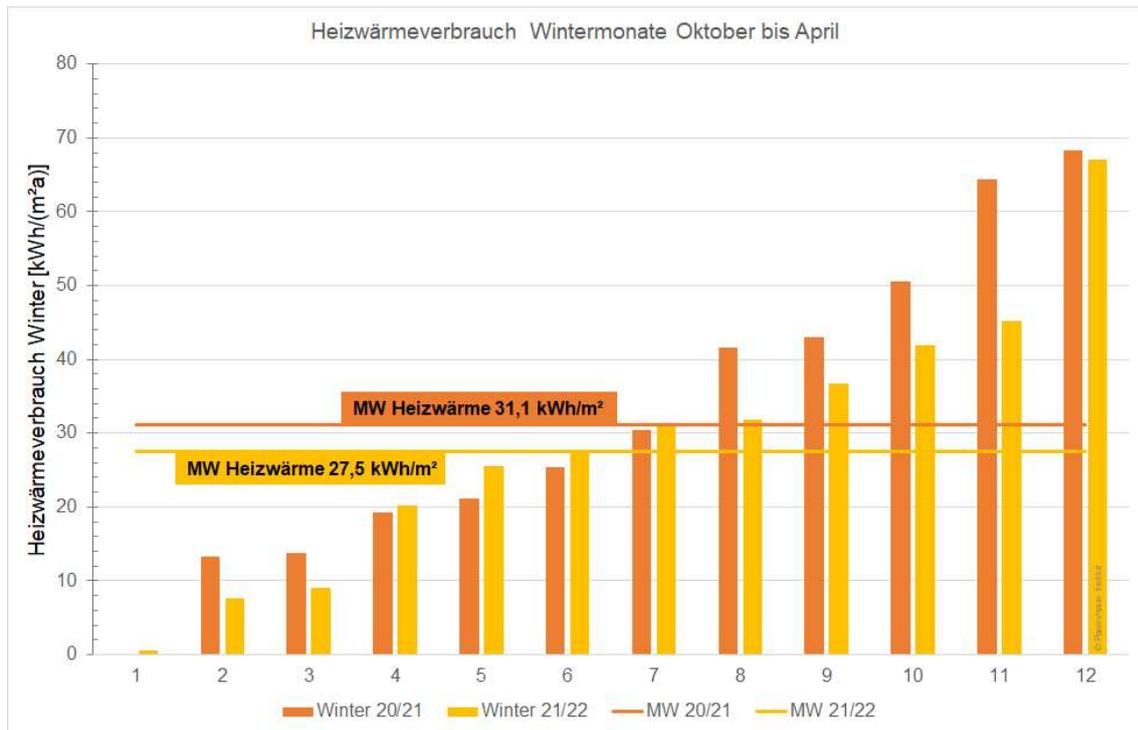
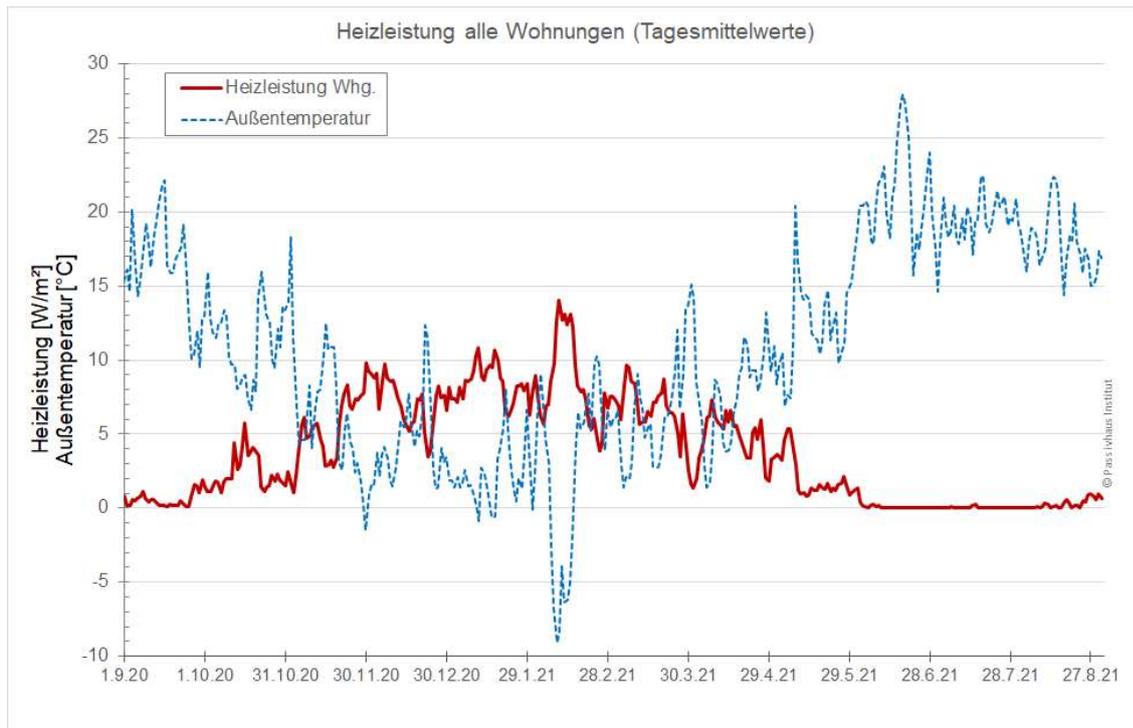


Abbildung 47: Heizwärmeverbrauch nur der Wintermonate Oktober bis einschließlich April in den beiden untersuchten Zeiträume 2020/2021 und 2021/2022 (jeweils aufsteigend sortiert).

## Heizleistung

Bei der Betrachtung der Heizleistungen sind aufgrund der Trägheit des Gebäudes Tagesmittelwerte die sinnvolle Untersuchungsgröße. Die 12 Einzelzähler der Wärmeversorgung „Heizung“ werden dazu tageweise addiert (Abbildung 48). Es zeigt sich, dass die maximale spezifische Heizlast im Untersuchungszeitraum 14 W/m<sup>2</sup> betrug. Diese trat in einer Kälteperiode mit einem Minimum von -9,1 °C Außentemperatur auf. Für einen sanierten Altbau ist dies ein sehr gutes Ergebnis. Die Beheizung wird bei etwa +10 °C Außentemperatur begonnen (Ende September/Anfang Oktober). Die nennenswerte Beheizung endet bei Außentemperaturen von ebenfalls etwa +10 °C (etwa 10. Mai 2021). Danach wird nur noch von einzelnen Wohnungen Ende Mai gering geheizt.



**Abbildung 48: Tagesmittlere Heizleistung der Heizungsversorgung aller 12 Wohnungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur im Messjahr September 2020 bis August 2021.**

Von weiterem Interesse zur Beurteilung des Gebäudes ist die mittlere Heizleistung der Wohnungen gegenüber der Differenz der Innen- und Außentemperatur. Der Vergleich erfolgt anhand von Tagesmittelwerten. Für die Berechnung der mittleren Innentemperatur werden die Temperaturen aller Wohnungen inkl. Treppenhäuser mit den jeweiligen berechneten Wärmeverlusten der Zone (Gebäudehülle plus Lüftungswärmeverluste) gewichtet (vgl. Abschnitt 3.2.1).

Für die Erstellung einer theoretischen Heizgeraden wird das Bilanztool PHPP herangezogen. Dort ist die Gebäudehülle bereits abgebildet. Auch die Lüftungswärmeverluste bei durchschnittlicher Nutzung sind in der Energiebilanz berücksichtigt. Die Summe dieser berechneten Werte (490 W/K) ergibt die Steigung einer Heizgeraden in einem Diagramm, welches die Heizleistung über der Temperaturdifferenz darstellt. Diese Gerade wird parallel verschoben um die internen Wärmequellen (IWQ) im Gebäude. Diese wurden durch den Ansatz der Stromverbräuche, der Wärmeabgabe der Heizleitungen und Personen sowie des Wärmeentzugs durch Kaltwasser und Verdampfungswärme abgeschätzt. Sie ergeben sich für das Gebäude zu 3,3 W/m<sup>2</sup>.

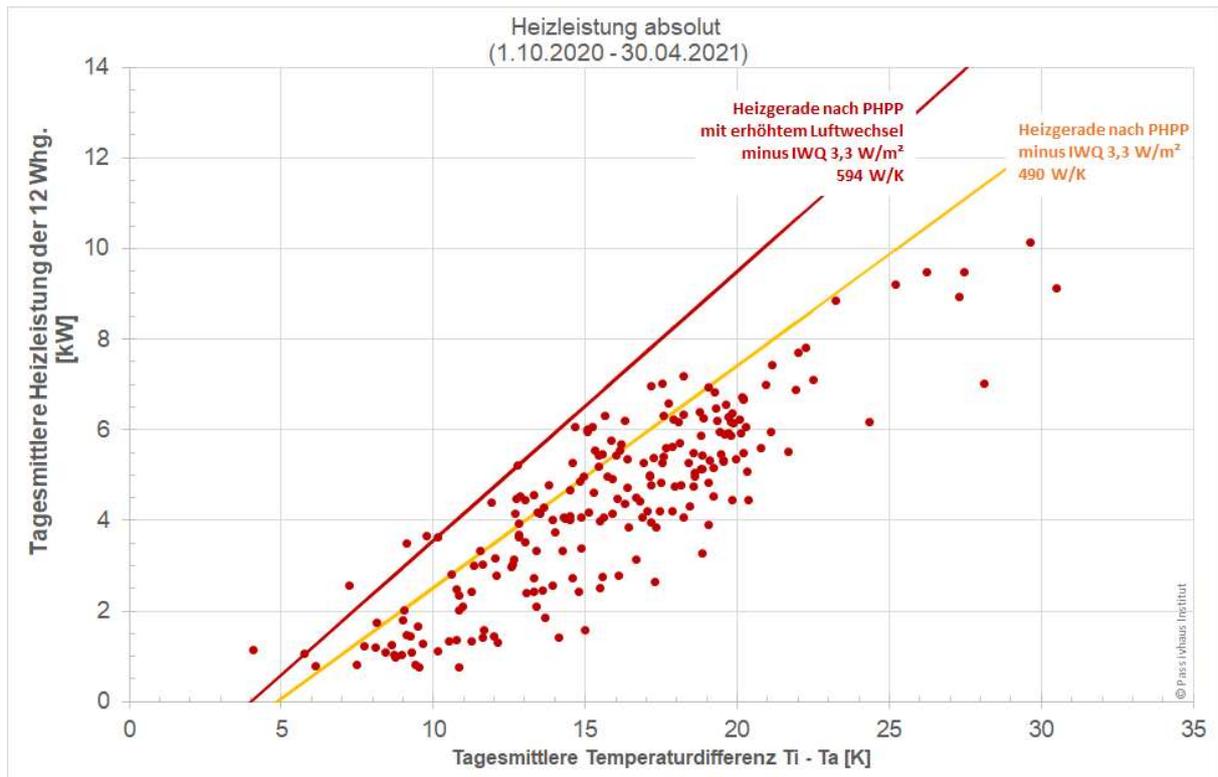
Man könnte zunächst erwarten, dass die Tageswerte der Heizleistung über der Temperaturdifferenz auf dieser Heizgeraden liegen. Wie in Abbildung 49 deutlich wird, ist dies in der Regel nicht der Fall (gelbe Gerade). Hauptursache ist der Einfluss der Solarstrahlung: Durch die Energielieferung der Sonne wird die nach obigem Verfahren berechnete Heizleistung reduziert; die gemessenen Heizleistungen liegen zum Teil deutlich unterhalb der Heizgeraden. Bei der gleichen Temperaturdifferenz zwischen

innen und außen (vertikale Linie im Diagramm) muss also je nach Stärke der Solarstrahlung unterschiedlich stark geheizt werden.

Eine wichtige weitere Ursache für die geringeren Heizleistungen als in der Theorie der Geraden zu erwarten liegt in der Trägheit der Gebäudemasse; das Gebäude reagiert auf Veränderungen der Außentemperatur zeitverzögert. Die Gerade bildet jedoch nur eine stationäre Situation, nicht die dynamischen Effekte wie z.B. Anheizvorgänge ab. Betrachtet man die einzelnen Punkte, welche oberhalb der eingetragenen Heizgerade liegen, fällt auf, dass diese meist aus Zeiträumen stammen, in denen die Heizleistung nach Kälteperioden wieder sinkt. Dies erklärt sich vermutlich ebenfalls durch die Trägheit des Gebäudes: Die Heizleistung folgt der Außentemperatur zeitverzögert.

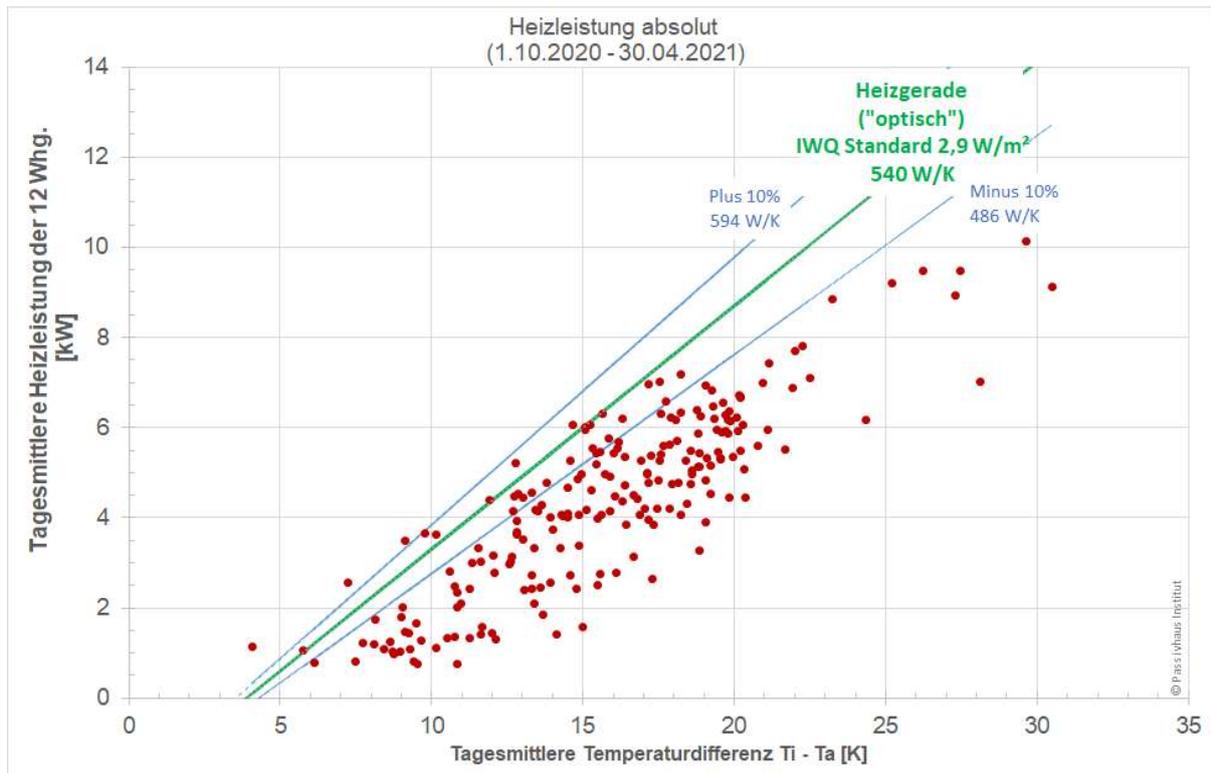
In Abbildung 49 schneidet die Heizgerade die Nulllinie der Heizleistung („keine Beheizung“) bei der Temperaturdifferenz von 4,9 K zwischen innen und außen, da die internen Wärmequellen (Stromverbrauch, Abwärme Personen) eine „Grundversorgung“ darstellen. Allerdings sind unterhalb 1 kW sowieso keine Heizleistungen gemessen worden.

Bei der Interpretation der Abbildung ist zu beachten, dass das hier verwendete PHPP die weiter unten in Abschnitt 5.2 beschriebenen Zusatzlüftungen und die Disbalance der Lüftungsgeräte nicht abbildet. Daher kann hier keine vollständige Übereinstimmung erwartet werden, während in anderen Sanierungsprojekten mit Passivhauskomponenten (vgl. [Peper/Grove-Smith/Feist 2009], [Peper/Feist 2008] und [Schulze Darup 2002]) solche Abweichungen nicht beobachtet wurden. Das PHPP wurde in einer Zusatzberechnung um die genannten zusätzlichen äquivalenten Lüftungsverluste ergänzt (vgl. Abschnitt 3.7.1). Nun bildet das PHPP auch den höheren Heizwärmeverbrauch aus der Messung ab. Wird damit erneut die Steigung der Heizgeraden berechnet, ergibt sich ein Wert von 594 W/K. Das entspricht einem deutlichen Zuwachs von 21 %. Die Gerade verläuft damit steiler (rote Gerade in Abbildung 49). Nun liegen fast alle Punkte unterhalb der Heizgeraden, was zeigt, dass die Realität damit gut abgebildet werden kann. Die PHPP-Berechnung bietet einen guten Weg, um die maximalen tagesmittleren Heizleistungen bestimmen zu können.



**Abbildung 49: Spezifische Heizleistung der 12 Wohnungen über der mittleren Differenz der Innen- zur Außentemperatur (alles Tagesmittelwerte). Dargestellt sind zusätzlich zwei theoretische Heizgeraden, mit unterschiedlichen Annahmen bzgl. der Randbedingungen (s.Text), welche an Hand der Daten aus dem PHPP erstellt wurden.**

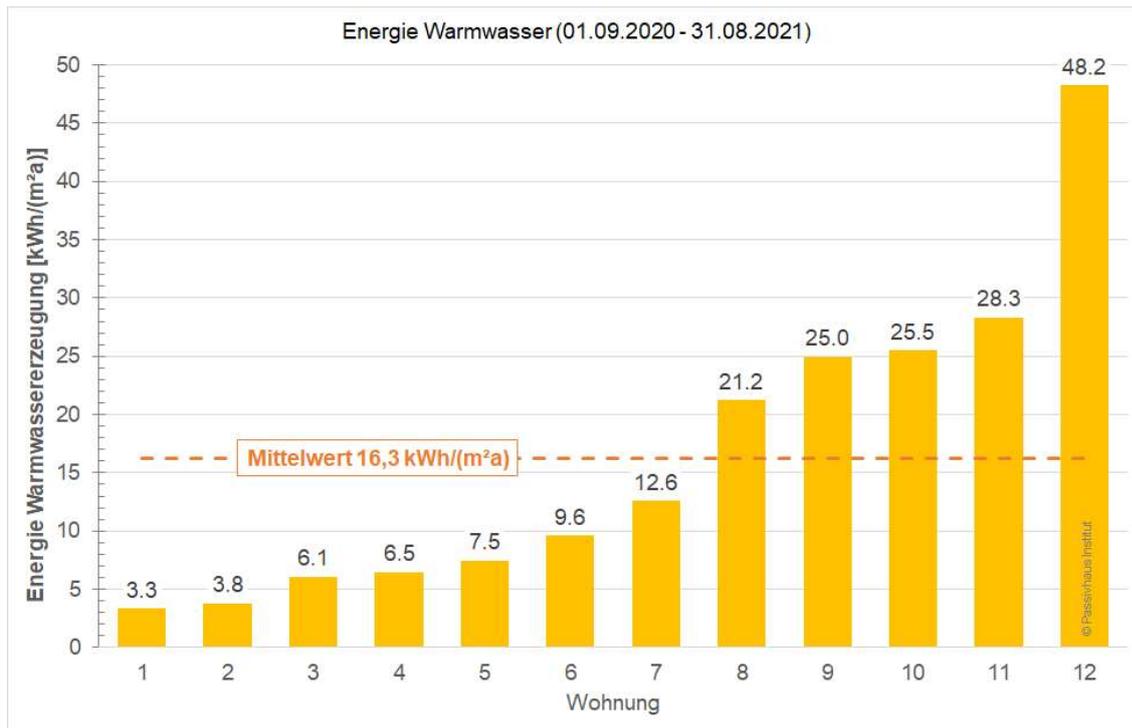
**Alternatives Verfahren:** Zusätzlich soll zur Bestimmung der Heizgeraden ein weiterer Ansatz getestet werden. Dafür wird von den IWQ ausgegangen, welche im PHPP für den Standardfall für Wohngebäude angesetzt werden: 2,9 W/m<sup>2</sup>. Im Regelfall liegen keine genaueren Ermittlungen der IWQ vor, was diesen Ansatz begründet. Mit diesem Wert ist der y-Achsenabschnitt einer Geraden festgelegt. Die Steigung der Geraden wird nun nach visueller Einschätzung von oben tangential an die Messpunkte herangefahren. Dabei bleiben einzelne Ausreißer unberücksichtigt. Wird die Heizgerade auf diesem Weg ermittelt, ergibt sich eine Steigung von etwa 540 W/K anstelle der vorher berechneten 594 W/K (Abbildung 50). Damit liegt eine Abweichung der Steigung von etwa -10 % gegenüber dem ermittelten Wert vor. Auf diesem Weg kann allein mit Hilfe der Standard-IWQ des PHPP mit einer vertretbaren Abweichung der thermische Leitwert der Gebäudehülle im bewohnten Zustand ermittelt werden. Dieses optische Verfahren beinhaltet zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit. Die Steigung der Heizgeraden lässt sich jedoch so auf +/-10% genau bestimmen (486 bis 594 W/K). Die thermische Qualität der Gebäudehülle kann so auch ohne nähere Kenntnis der IWQ überprüft werden.



**Abbildung 50: Messwerte der spezifischen Heizleistung wie oben in Abbildung 49. Dargestellt ist zusätzlich die theoretische Heizgerade, welche unter Berücksichtigung der im PHPP für Wohngebäude im Standardfall angesetzten IWQ von 2,9 W/m<sup>2</sup> visuell ermittelt wurde.**

### 3.3.2 Warmwasser

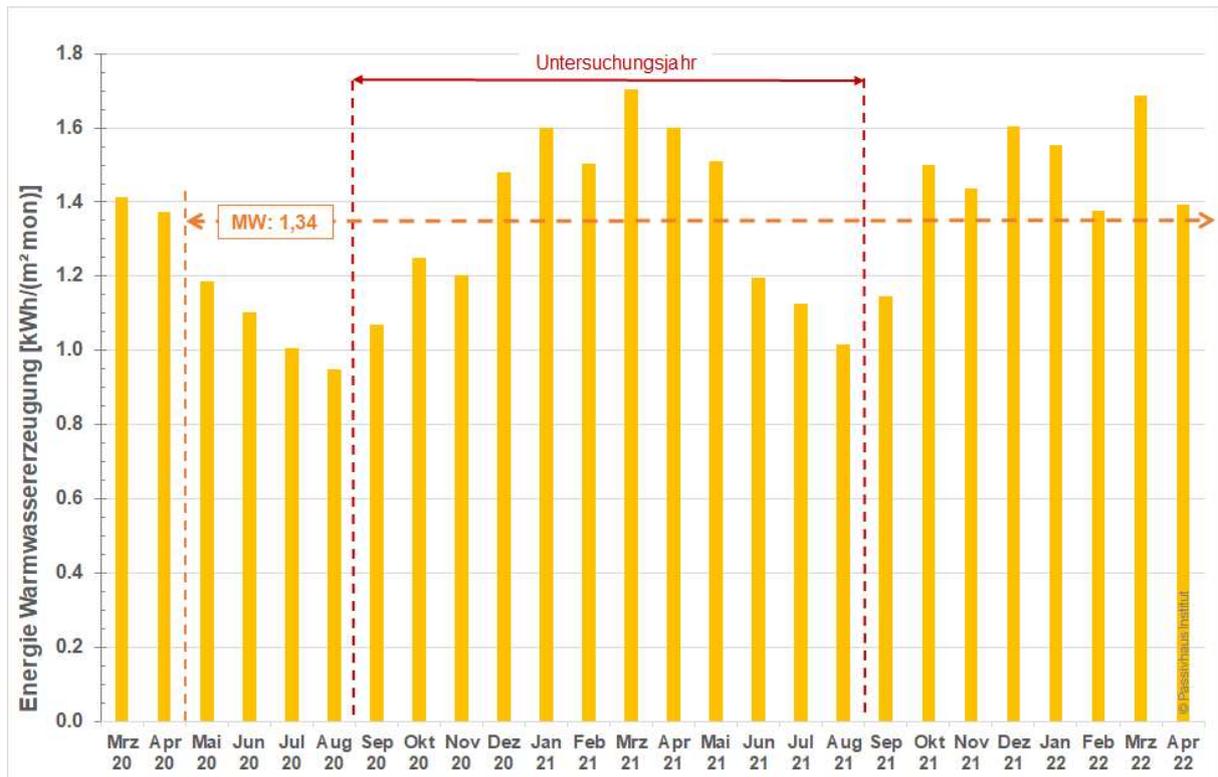
Der Energieeinsatz für die Warmwasserbereitung in den Wohnungen ergibt sich aus der Differenz des Zählers der gesamten Wärmemenge mit dem Unterzähler für die Beheizung. Durch diese indirekte Methode ist der Wert mit einem größeren Fehler behaftet als andernorts direkt gemessene Werte. Im Untersuchungsjahr 01. September 2020 bis 31.08.2021 ergeben sich Verbrauchswerte zwischen 3,3 bis 48,2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Wie üblich beim Warmwasser liegt eine große Schwankung der Verbrauchswerte vor. Der flächengewichtete Mittelwert beträgt **16,3 kWh/(m<sup>2</sup>a)**. Für den Wert werden die Verbräuche in den Wohnungen direkt vor den Plattenwärmeübertragern gemessen. Damit sind nur sehr geringe Verluste für die Umwandlung inkludiert. Die bei einer gebäudezentralen Erzeugung üblichen, meist erheblichen Speicherwärmeverluste fallen bei dieser Versorgungsmethode nicht an. Die Wärmeabgabe der Versorgungsleitungen durch das Gebäude (vier Steigstränge) bleibt bei dieser Messanordnung unberücksichtigt (und geht in die Verteilverluste des Fernwärmenetzes ein; siehe Abschnitt 3.7).



**Abbildung 51: Spezifischer Energieeinsatz für die Warmwassererzeugung im Jahres-Untersuchungszeitraum (aufsteigend sortiert).**

Wird der monatliche Verlauf der Verbrauchswerte zur Warmwassererzeugung betrachtet (Abbildung 52), zeigt sich eine ausgeprägte Sommer-Winter-Schwankung: Der Mittelwert von zwei vollen Jahren (Mai 2020 bis April 2022) beträgt 1,34 kWh/ (m<sup>2</sup> mon). Die Schwankungen vom Mittelwert zum kleinsten Wert im Sommer (Aug. 2020) beträgt -29%, zum größten Wert im Winter (März 2021) +27%. Die jahreszeitliche Schwankung ist ausgeprägter als aus anderen Objekten bekannt, vermutlich, da hier der Sockel aus Speicher- und Verteilverlusten nicht in den Wohnungsmessdaten enthalten ist und auf der Versorgungsseite anfällt.

Der Mittelwert der 12 Monate des Untersuchungsjahres (Sep. 2020 bis Aug. 2021) ist mit 1,35 kWh/ (m<sup>2</sup> mon) fast identisch zu dem der 24 Monate.



**Abbildung 52: Monatliche spezifische Energiemengen zur Warmwasserbereitung in den 12 Wohnungen im Verlauf vom März 2020 bis April 2022. Der Mittelwert von 2 Jahren (Mai 2020 bis April 2022) ist eingetragen, ebenso das Untersuchungsjahr (Sep. 2020 bis Aug. 2021).**

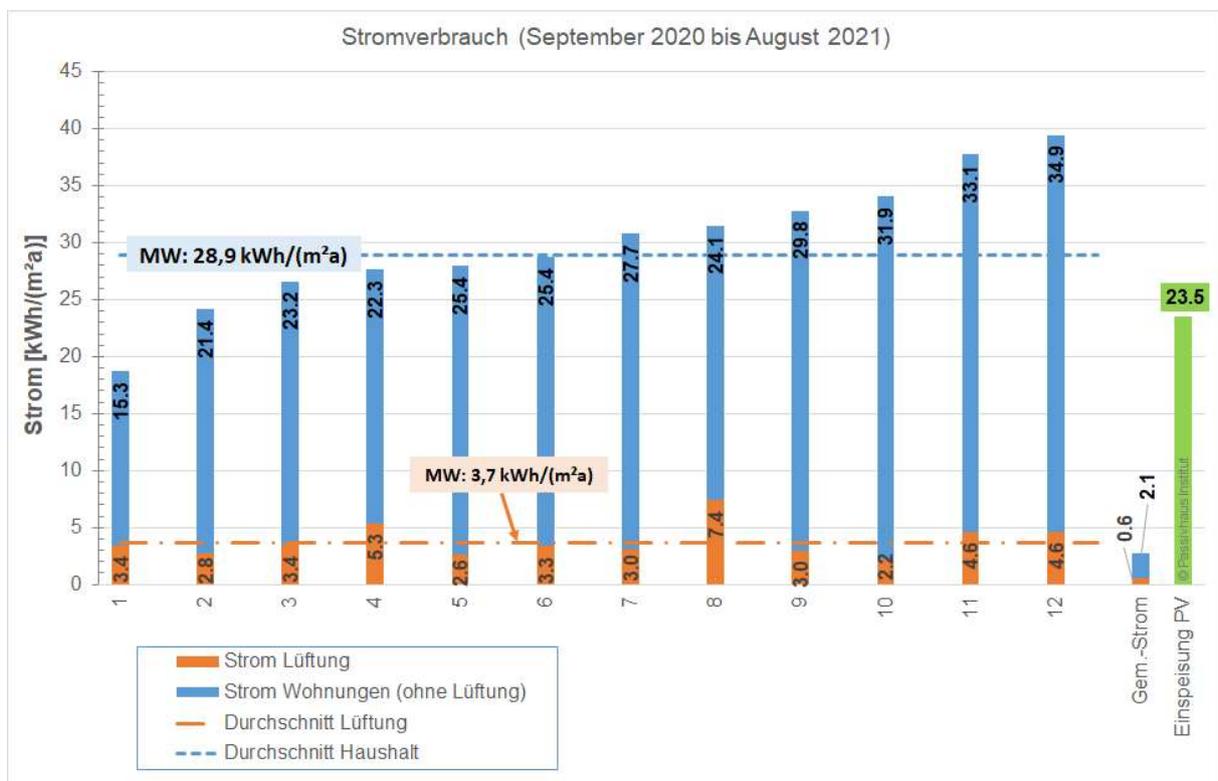
### 3.4 Elektrischer Energieverbrauch

Die Stromverbräuche der 12 Wohnungen sowie die Gemeinschaftsstromverbräuche wurden durchgehend erfasst. Im Jahreszeitraum betragen die Verbrauchswerte der Wohnungen zwischen 18,7 und 39,5 kWh/(m²a). Der Mittelwert für alle Wohnungen ergibt sich zu 28,9 kWh/(m²a) (vgl. Abbildung 53). Darin enthalten ist der Stromverbrauch für die Lüftungsgeräte von im Mittel 3,7 kWh/(m²a). Diese Verbräuche liegen zwischen 2,2 und 7,4 kWh/(m²a). Die Anteile am Gesamtstromverbrauch einer Wohnung liegen zwischen 7 und 23%, im Mittel sind es 13%. Bei der Interpretation muss berücksichtigt werden, dass die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung lt. Gebäudesimulation den Heizwärmebedarf in diesem Gebäude um 36 kWh/(m²a) reduzieren (vgl. Abschnitt 5.3.3.1). Mit einer eingesetzten Kilowattstunde Strom werden somit 10 kWh Wärme zurückgewonnen. Der Strom ist hier also im Vergleich zu anderen technischen Anlagen sehr effizient eingesetzt.

Insgesamt liegen die Stromverbrauchswerte unterhalb der üblichen Durchschnittsverbrauchswerte in Deutschland [destatis 2022]. Sie sind als eher sparsame Verbräuche einzustufen.

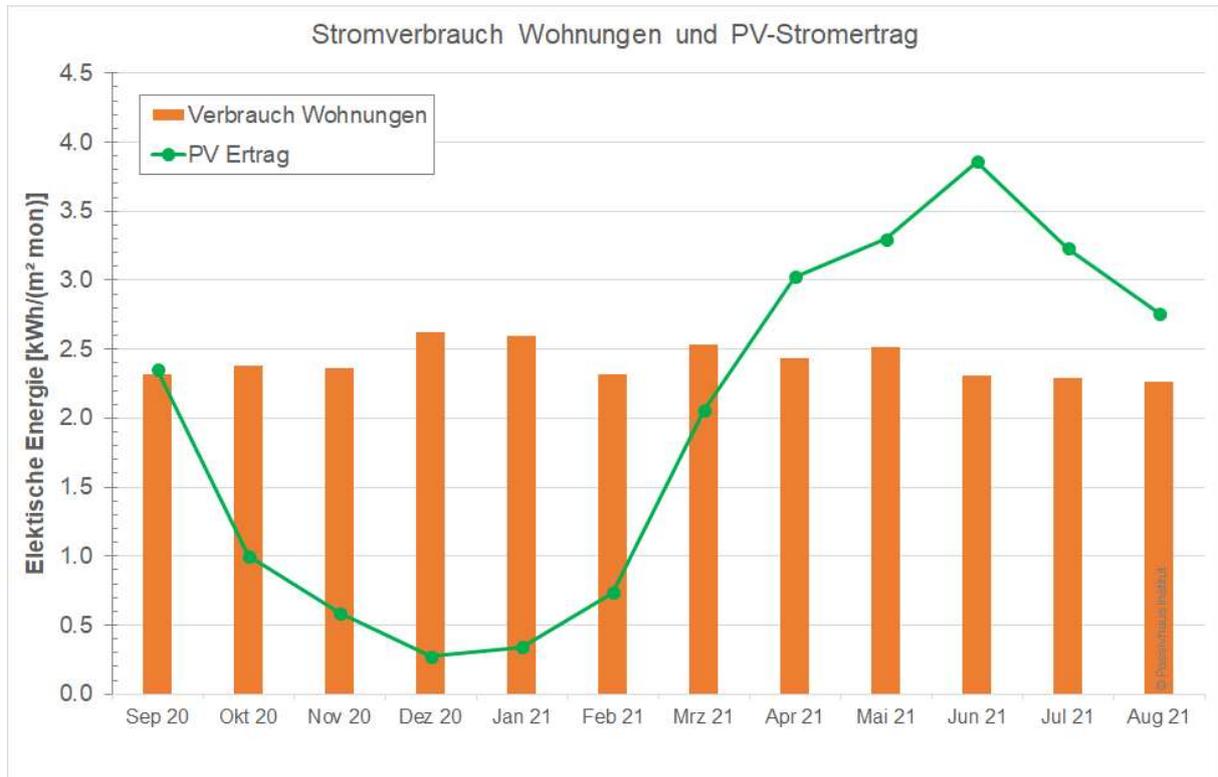
Der Gemeinschaftsstrom für Treppenhaus- und Kellerbeleuchtung, Server im Keller, Keller-Ventilator und Treppenhaus-Lüftung ergibt sich im Jahresverbrauch zu 2,7 kWh/(m<sup>2</sup>a). Eine Teilmenge davon sind die Stromverbräuche der beiden Lüftungsanlagen der Treppenhäuser. Diese betragen zusammen nur 0,6 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Die angegebenen Mittelwerte sind hier immer auf die Gesamtfläche des Gebäudes inkl. der beiden Treppenhäuser (722,6 m<sup>2</sup>) bezogen worden, um einen Vergleich mit dem Gemeinschaftsstrom und PV-Ertrag zu ermöglichen.



**Abbildung 53: Spezifische Stromverbräuche der 12 Wohnungen im Untersuchungsjahr. Zusätzlich sind der Gemeinschaftsstromverbrauch und der Lüftungsstromverbrauch sowie der Stromertrag der PV-Anlage aufgeführt. Alle Mittelwerte sind bezogen auf die Fläche des Gesamtgebäudes.**

Die große PV-Anlage auf dem Dach des Gebäudes erbringt in dem Jahreszeitraum 23,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) in Bezug auf die Wohnfläche, was absolut 16.991 kWh/a entspricht. Das entspricht rechnerisch 81 % des Jahresstromverbrauchs der Wohnungen. Wird der Jahresverlauf der Verbräuche und Erträge betrachtet, wird der Jahresgang erkennbar (Abbildung 54): In den Wintermonaten geht der Ertrag auf unter 0,3 kWh/(m<sup>2</sup>mon) zurück, in den Sommermonaten wird der Eigenverbrauch des Gesamtgebäudes deutlich übertroffen. Das führt die Speicherherausforderung vor Augen und zeigt auch, dass die alleinige Angabe von Jahressummen für die Bilanzierung nicht sinnvoll ist.

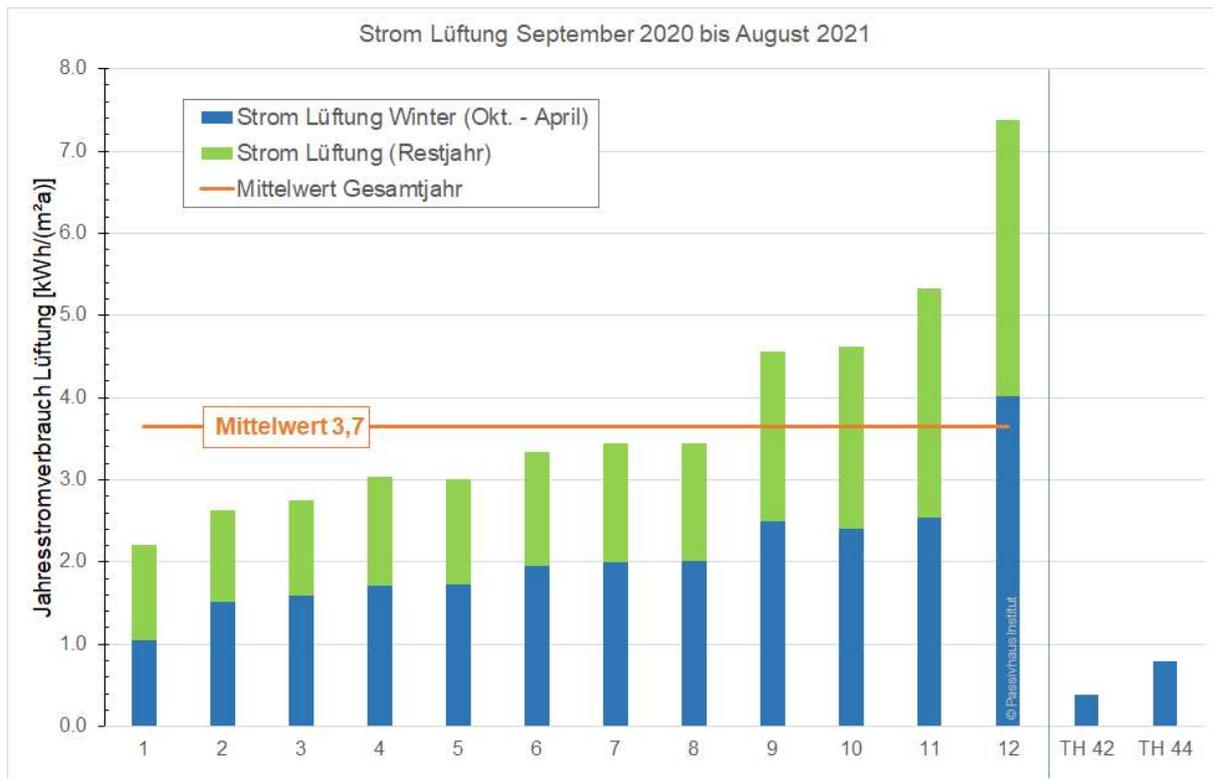


**Abbildung 54: Stromverbrauch aller Wohnungen und der PV-Ertrags im Jahresverlauf als Monatswerte (Sep. 2020 bis Aug. 2021).**

### 3.4.1 Stromverbrauch für die Lüftung

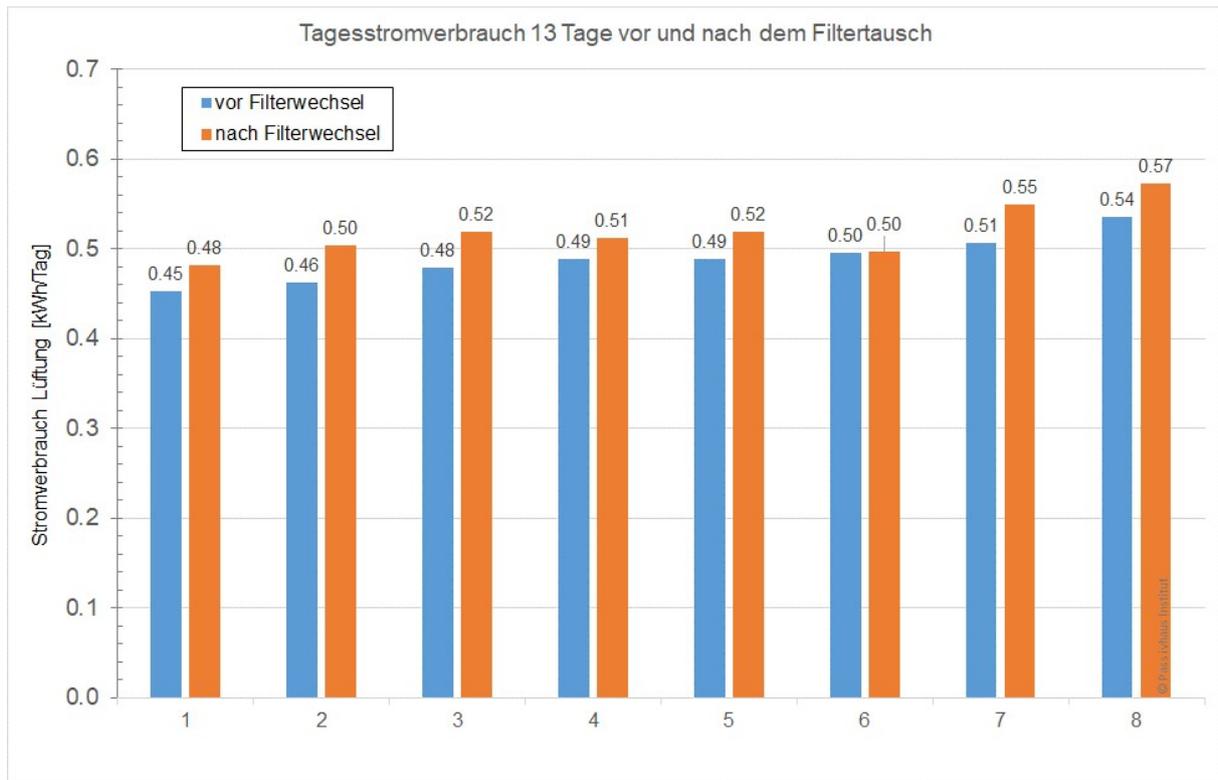
Der Stromverbrauch der Lüftungsanlagen soll hier im Detail noch näher betrachtet werden. Der elektrische Jahresverbrauch wurde dazu in den Winter- (Oktober bis April) und den Sommerverbrauch aufgeteilt (Abbildung 55). Der Anteil der Winterverbräuche am Jahresgesamtverbrauch für jede Wohnung beträgt 48 bis 58%, im Mittel sind es 55%. Da es in dem Gebäude keine innenliegenden Bäder etc. gibt, wäre es auch möglich, in den Sommermonaten überwiegend über die Fenster zu lüften und die Lüftungsanlagen ganz oder zumindest zeitweise abzuschalten. Damit könnte der Stromverbrauch der Anlagen nochmals deutlich reduziert werden. Ein Betrieb ist aus hygienischen Gründen oder für den Komfort nicht dauerhaft nötig. Nur in Hitzeperioden kann die Wärmerückgewinnung einen moderaten Beitrag zur Gebäudekühlung leisten, wenn die sehr warme Außenluft durch die Innenluft in der Anlage vorgekühlt wird. Dazu sollten dann die Fenster tagsüber geschlossen bleiben.

Weitere Analysen zum Lüftungsverhalten der Nutzerinnen und Nutzer des Gebäudes können Abschnitt 3.6 weiter unten entnommen werden.



**Abbildung 55: Stromverbrauch der Lüftungsanlagen aufgeteilt in Winter- (Oktober bis April) und Sommerverbrauch. Der Verbrauch der Lüftungsanlagen der beiden Treppenhäuser ist jeweils auf die halbe Hausfläche bezogen (361,3 m<sup>2</sup>).**

Der üblicherweise mindestens jährliche Filterwechsel bei den Lüftungsanlagen wurde bei dem Gebäude erst verspätet und zum ersten Mal am 08.12.2021 durchgeführt. Bei den sieben Wohnungen, welche nicht aktiv die Lüfterstufe verstellen, konnte der Stromverbrauch vor und nach dem überfälligen Filterwechsel verglichen werden. Dazu wurden die 13 Tage vor und die 13 Tage nach dem Filterwechsel getrennt aufsummiert und der Tagesmittelwert gebildet. In Abbildung 56 ist zu erkennen, dass bei 6 der 7 Wohnungen nach dem Filterwechsel ein geringer Anstieg des Stromverbrauchs erfolgte. Die verschmutzten Filter hatten bei den hier installierten Anlagen dazu geführt, dass nur eine geringere Luftmenge gefördert wurde und der Stromverbrauch um etwa 7% sank – anders als z.B. bei massenstromgeregelten Anlagen. Dies kann hier als Nachweis des Effektes des Filtertausches interpretiert werden. Ein mindestens jährlicher Filterwechsel ist auf jeden Fall angeraten, um die gewünschten Luftmengen transportieren zu können.



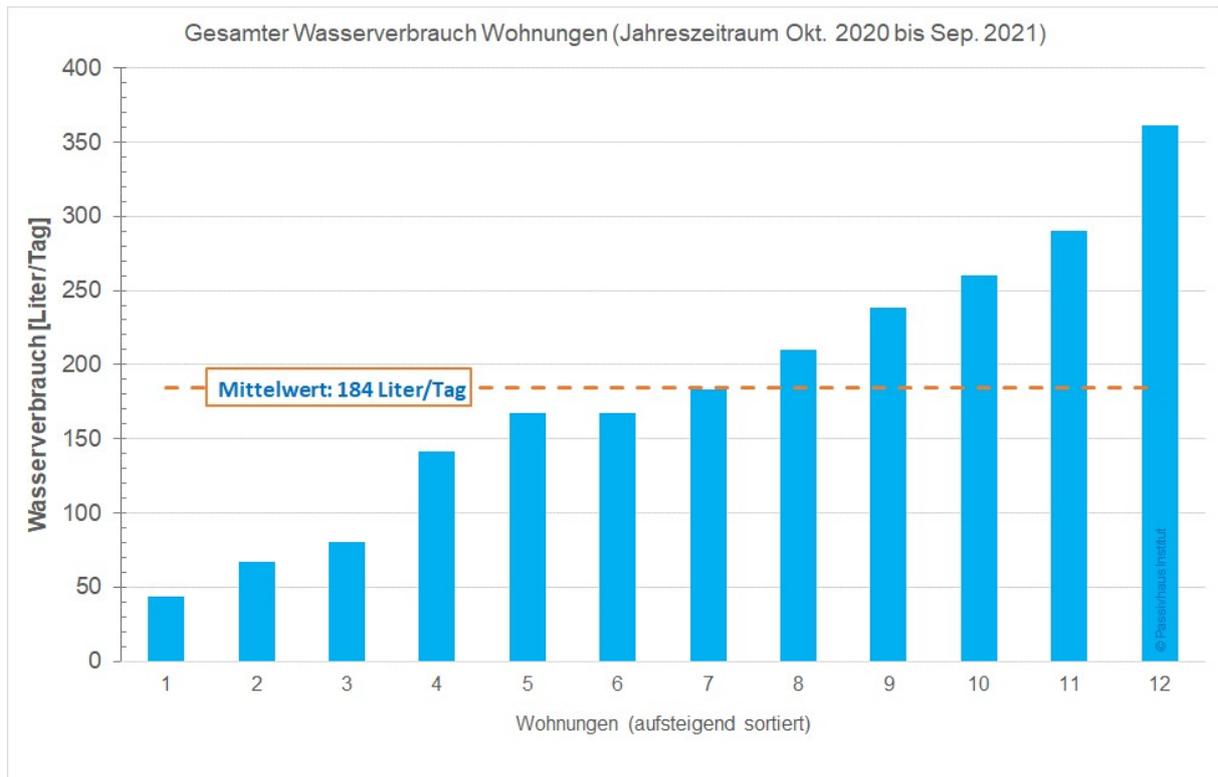
**Abbildung 56: Täglicher Stromverbrauch 13 Tage vor und 13 Tage nach dem Filterwechsel von 8 der 12 Lüftungsanlagen.**

### 3.5 Gesamter Wasserverbrauch

Für die Bilanzierung der internen Wärmequellen in den Wohnungen spielt auch der gesamte Wasserverbrauch eine Rolle. So wird z.B. das Spülwasser der Toiletten in den Wasserkästen durch die Raumluft aufgeheizt und stellt damit eine Wärmesenke dar. Der Wasserverbrauch wird über die Kaltwasserzähler einer jeden Wohnung erfasst; eine Teilmenge davon wird danach erwärmt. Während des Zeitraumes der Gebäudeuntersuchung gab es immer wieder unangekündigte Zählerwechsel durch einen Auftragnehmer der Stadtwerke Gießen. Dabei wurden immer nur einzelne Wasserzähler getauscht und gegen funkbasierte Zähler ersetzt. Aus diesem Grund erfolgte die Datenerfassung zum Teil über ein kabelgebundenes System und parallel über ein neu erstelltes funkbasiertes System. Dadurch gab es immer wieder einzelne Ausfallzeiten bei der Erfassung der Wassermengen. Vereinzelt wurden diese fehlenden Daten zum Monatswechsel interpoliert. Da die Umrüstung bei diversen Zählern zu größeren Datenlücken bis zum September 2020 geführt hat, wird hier abweichend als Jahreszeitraum erst ab Oktober 2020 bis September 2021 ausgewertet. Damit ist der Zeitraum gegenüber allen anderen Zeiträumen des Monitorings um einen Monat verschoben.

Die Werte betreffen die gesamte Wassermenge, welche in den Einzelwohnungen verbraucht wurde. Getrennte Messungen der Teilmenge Warmwasser waren bauseitig nicht vorgesehen.

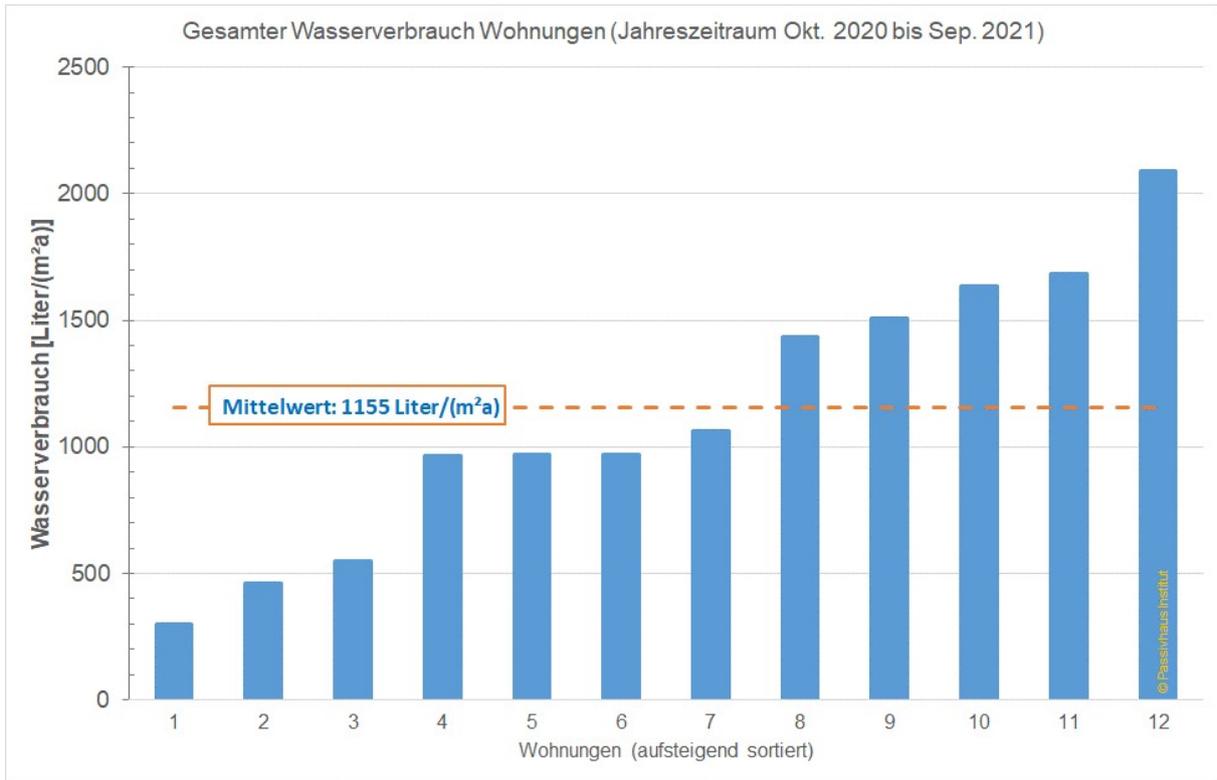
Die Auswertung der Wassermengen erfolgt für den Jahreszeitraum in drei unterschiedlichen Einheiten. Zuerst sind die Verbrauchswerte der Wohnungen in Liter pro Tag angegeben (Abbildung 57). Die Werte liegen zwischen 44 und 361 Liter/Tag und im Mittel bei 184 Liter/Tag.



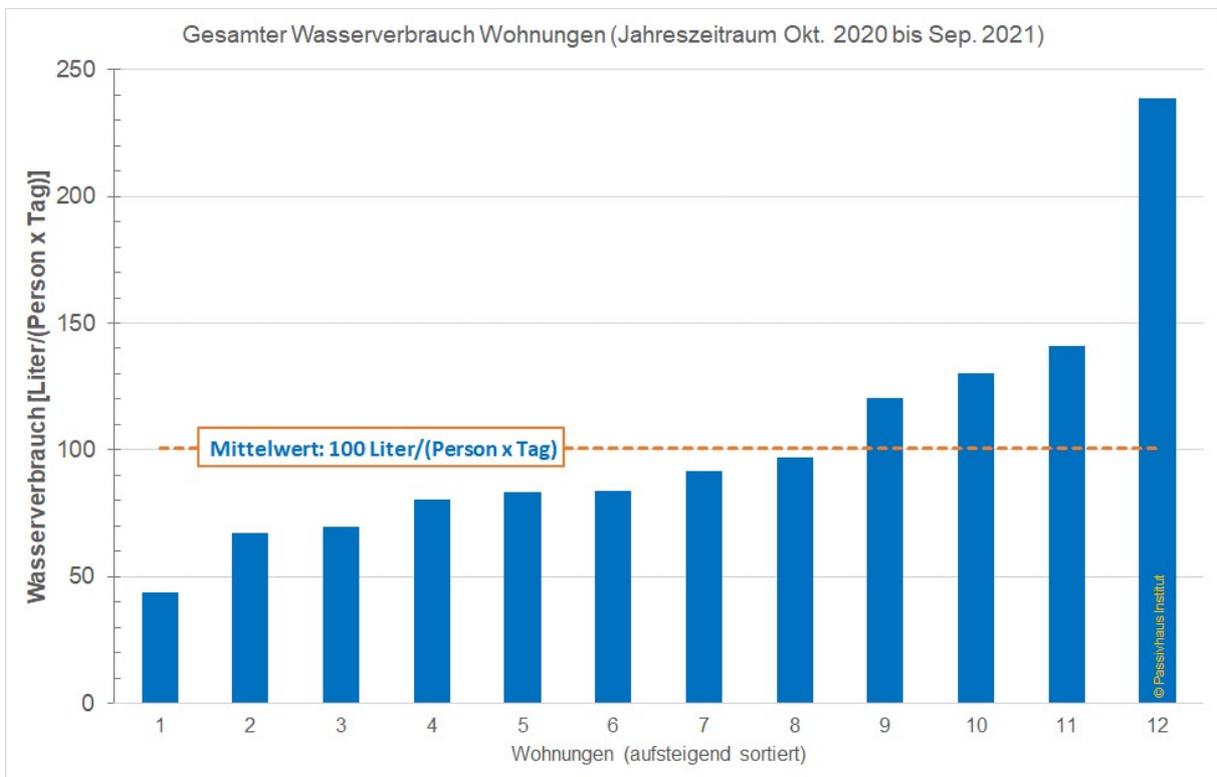
**Abbildung 57: Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Tag, aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021.**

Wird der jährliche Wasserverbrauch auf die Bezugsfläche einer jeden Wohnung umgerechnet, ergeben sich Werte zwischen 300 und 2090 Liter/(m<sup>2</sup>a), der Mittelwert für die 12 Wohnungen beträgt 1155 Liter/(m<sup>2</sup>a).

Wird in der Berechnung berücksichtigt, wie viele Personen in den Wohnungen leben, ergibt sich der Verbrauch pro Kopf und Tag je Wohnung. Hier liegen die Werte zwischen moderaten 44 Liter/(Person Tag) und herausstechenden 239 Liter/(Person Tag). Im Mittel über die Wohnungen wurden 100 Liter/(Person Tag) gemessen, was deutlich unterhalb des Durchschnittwertes für Deutschland liegt. Dieser betrug für das Jahr 2020 125 Liter/(Person Tag) [BDEW 2022].



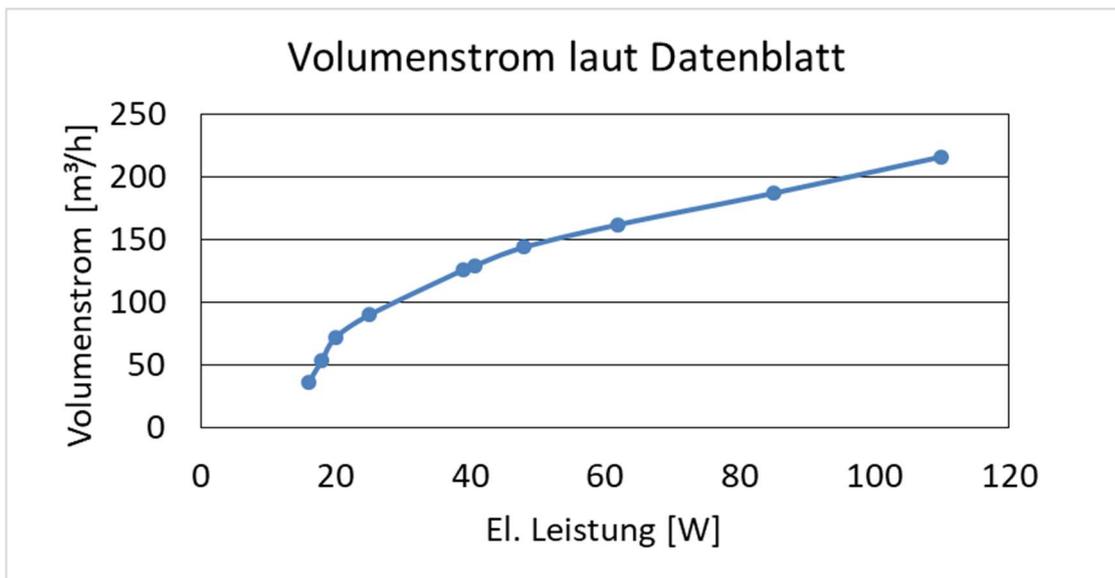
**Abbildung 58: Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Quadratmeter aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021.**



**Abbildung 59: Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Person aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021.**

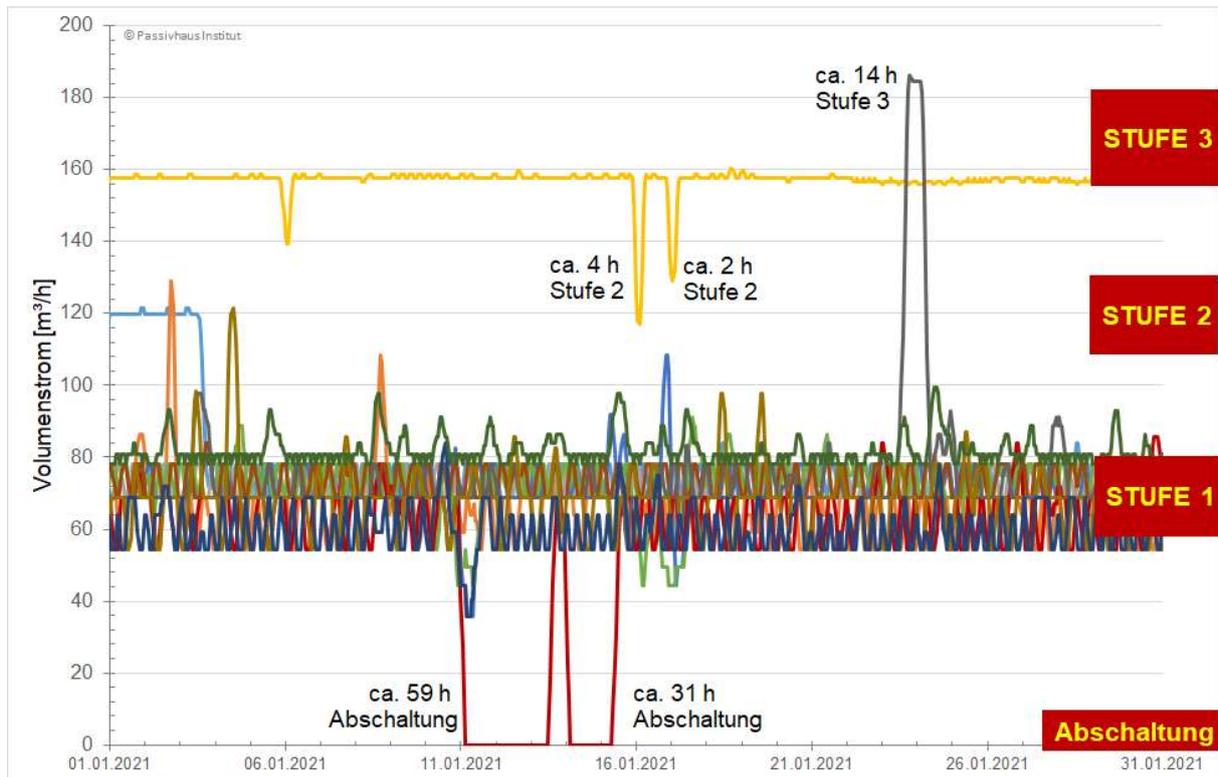
### 3.6 Lüftung

Im Bereich der maschinellen Lüftung war das Ziel, für die gesamte Messzeit Aussagen zu den Volumenströmen der Lüftungsanlagen in den 12 Wohnungen machen zu können. Da dauerhafte Volumenstrommessungen sehr aufwendig sind und relativ viel Platz benötigen würden, erfolgte die Erfassung indirekt über den Stromverbrauch. Das Vorgehen wird hier beschrieben: Der Stromverbrauch der Lüftungsgeräte jeder Wohnung und der beiden Treppenhäuser wird an Hand von Strommessungen in Volumenströme umgerechnet. Hierzu werden die Angaben aus dem Datenblatt des Geräts verwendet, wie sie in Abbildung 60 dargestellt sind.



**Abbildung 60: Korrelation von elektrischer Leistung und Luftvolumenstrom lt. Datenblatt**

Aufgrund der niedrigen Stromverbräuche der Geräte und der Auflösung der Stromzähler ergeben sich trotz Mittelwertbildung (fünf Stunden) Artefakte in der Darstellung (Abbildung 61): Das „Zappeln“ um einen Mittelwert ist daher nicht verursacht durch Schaltvorgänge o.ä. Es ist zu erkennen, dass die meisten der Geräte in der niedrigsten Stufe betrieben werden (ca. 60 – 80 m³/h) und es relativ wenige Schaltvorgänge gibt. Im Januar 2021 wurde eines der Geräte fast dauerhaft auf der obersten Stufe betrieben (gelbe Kurve) und nur eines war zeitweise abgeschaltet (ca. 3,5 Tage, rote Kurve). Allerdings hatte die Abschaltung als Ursache einen technischen Defekt, der die Sicherung ausgelöst hatte. Es wird auch für die restliche Winterzeit deutlich, dass kaum jemand die Anlage auf den momentanen Bedarf (z.B. Kochen etc.) anpasst. Die Geräte werden überwiegend zur Grundlüftung in meist unveränderter Einstellung betrieben.



**Abbildung 61: Volumenströme der 12 Lüftungsanlagen der Wohnungen (berechnet aus den gemessenen Stromverbräuchen) im Januar 2021. Am rechten Rand sind grob die Bereiche der Stufen eingetragen. Beispielhaft sind einige augenfällige Schaltvorgänge mit ihrer Dauer markiert. Bei der „Abschaltung“ hatte die Sicherung ausgelöst (technischer Defekt).**

Die langzeitigen Mittelwerte der Volumenströme geben Auskunft über die unterschiedlichen Nutzungen der Anlagen. In Tabelle 8 sind die Mittelwerte für den Winter (01.10.2020 – 30.04.2021), Kernwinter (01.11.2020 – 31.03.2021) sowie den Sommer (01.08.2020 – 30.09.2020 und 01.05.2021 bis 31.08.2021) dargestellt. Zusätzlich sind die mittleren Volumenströme der Winterzeit pro Person je Wohnung eingetragen. Die Luftmengen pro Person unterscheiden sich, da es zwischen 1 und 3 Bewohnende gibt. Sie liegt zwischen etwa 20 und 90 m<sup>3</sup>/h/Person.

Auffällig ist der niedrige Mittelwert in „Wohnung 1“ in der Winterzeit. Die Ursache dafür ist eine vollständige Abschaltung der Anlage vom 30.09. bis zum 03.12.2020.

Die Winter-Volumenströme unterscheiden sich nur sehr wenig von denen im Kernwinter. Die Geräte werden im Durchschnitt unverändert betrieben und die Veränderungen sind mit max. 8 m<sup>3</sup>/h nur gering. Im Sommerzeitraum wird in der Hälfte der Wohnungen eine durchschnittlich höhere Luftmenge gemessen. In keiner Wohnung wird eine Reduktion der Luftmenge oder gar eine Abschaltung der Geräte festgestellt. Nur in einer Wohnung wird während der Hitzeperiode um den 19.06.2021 eine aktive Veränderung der Lüftungsstufen festgestellt. Dazu sei angemerkt, dass es aus energetischer Sicht sinnvoll wäre, die Geräte im Sommerzeitraum vollständig abzuschalten, um keinen Strom zu verbrauchen (vgl. Ausführungen dazu in Abschnitt

3.4.1). In dem Gebäude sind in allen Aufenthaltsräumen, Küchen und Bädern Fenster vorhanden. Im Sommer könnte daher auch vollständig über die Fenster gelüftet werden. Vermutlich haben sich viele der Bewohnenden an die Geräte gewöhnt und schätzen den Komfort auch in der Sommerzeit: Dauerhaft unverbrauchte Außenluft ohne aktives Lüften über die Fenster. In Hitzewellen kann die Anlage über die Wärmerückgewinnung auch geringfügig zur Kühlung der Räume beitragen. Dann wäre auch an diesen Sommertagen ein Betrieb angeraten, wenn gleichzeitig die Fenster - zumindest tagsüber – konsequent geschlossen gehalten werden.

Die Lüftungsgeräte der beiden Treppenhäuser werden dauerhaft in unterschiedlichen Betriebsstufen betrieben: Haus 42 auf Stufe 1 und Haus 44 auf Stufe 2.

**Tabelle 8: Mittlere Luftmengen der Lüftungsanlagen im Gebäude in unterschiedlichen Zeiträumen (aufsteigend sortiert nach dem Winter-Zeitraum)**

[m <sup>3</sup> /h]	Winter	Kernwinter	Sommer	Pro Person (Winter)
Wohnung 1	<b>43</b>	48	68	22
Wohnung 2	<b>59</b>	59	61	30
Wohnung 3	<b>66</b>	65	66	33
Wohnung 4	<b>68</b>	68	67	68
Wohnung 5	<b>73</b>	73	73	73
Wohnung 6	<b>73</b>	72	79	24
Wohnung 7	<b>74</b>	73	77	37
Wohnung 8	<b>74</b>	73	73	74
Wohnung 9	<b>85</b>	82	108	85
Wohnung 10	<b>89</b>	85	99	89
Wohnung 11	<b>91</b>	83	126	30
Wohnung 12	<b>138</b>	143	157	46
Treppenhaus H42	36	36	35	
Treppenhaus H44	113	113	112	

### 3.6.1 Balance der Lüftungsanlagen

Die Balance der Lüftungsanlagen, also die Einstellung der gleichen Außen- wie Fortluftmenge, ist eine wichtige Voraussetzung für den effizienten Betrieb einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Abweichungen von bis zu 10% in beide Richtungen (Fortluft- oder Außenluftüberschuss) stellen keine nennenswerten Beeinträchtigungen dar [AK 17], vgl. dazu auch Abschnitt 5.3.3.2). Aufgrund der Messgenauigkeit der Messgeräte sind einer optimalen Einstellung Grenzen gesetzt. Aufgrund von Filterverschmutzungen ist im Laufe des Betriebs auch mit einer Verschlechterung der Balance zu rechnen. Üblicherweise lassen sich die Außen- und Fortluftströme an den Anlagen nicht gut messen. Daher wird die Messung gewöhnlich

zu- und abluftseitig an den Ventilen in den Zimmern durchgeführt. Eine Leckage des Lüftungssystems wird dabei vernachlässigt.

Beim untersuchten Gebäude wurde bei der Inbetriebnahme aller Anlagen eine Balanceeinstellung durch eine Fachfirma durchgeführt. Laut der Protokolle lagen die Messwerte der Balance zwischen +2 und -8 %, der Mittelwert der 12 Anlagen betrug -2 %. Die Berechnung erfolgt auf die Weise:  $(\text{Volumenstrom Zuluft} - \text{Volumenstrom Abluft}) / \text{Volumenstrom Zuluft}$ . Dabei bedeutet ein negativer Wert einen Abluftüberschuss.

Das Passivhaus Institut führte am 28.02.2020 in drei Wohnungen stichprobenartig Messungen der Balanceeinstellung durch (vgl. Abbildung 16 in Abschnitt 2.1.2). Dabei stellten sich in allen drei Schaltstufen der Anlagen deutlich höhere Disbalancen heraus. Gemessen wurde mit dem FlowFinder 2 des Herstellers ACIN. Die Messabweichung wird mit 3 % vom Messwert und mindestens 3,4 m<sup>3</sup>/h angegeben. Bei den geringen Volumenströmen von Werten zwischen nur 10 bis 40 m<sup>3</sup>/h sind die Messabweichungen entsprechend hoch. Noch bessere Geräte sind für den Feldeinsatz am Markt nicht erhältlich.

Aufgrund dieser Abweichungen wurde am 29.09.2020 gemeinsam mit der Fachfirma bei einer Anlage eine weitere Messung durchgeführt. Die Messung erfolgte nach einem Filterwechsel und zeigte eine optimale Balance-Einstellung. Über ein Jahr später erfolgte dann eine weitere Kontrolle der Balanceeinstellung in zwei Wohnungen, eine davon war auch schon bei der ersten Kontrollmessung des PHI vertreten. Die gemessenen Abweichungen betragen in Stufe 2 nun +22 und -13 %. Daher erfolgte eine erneute Einregulierung auf Werte unter 10 %. Auch jetzt gab es keine Erklärung für die Ursachen der gemessenen Abweichungen. Der deutlich verspätete Filterwechsel in allen Wohnungen wurde dann am 09.12.2021 durch eine Fachfirma durchgeführt. Am 26.01.2022 erfolgte dann ein weiterer Kontrolltermin gemeinsam mit einem Vertreter des Herstellers. Dabei wurde in einer Wohnung eine perfekte Einstellung vorgefunden, in zwei weiteren lagen wieder deutliche Abweichungen der Balance vor (-42 und +76 %). Eine dieser Wohnungen wurde bereits früher, am 29.9.2020, geprüft und wies zu diesem Zeitpunkt einen sehr guten Wert auf. Die beiden Wohnungen wurden durch das Verstellen der Ventilatorleistungen erneut justiert. Die Ursachen für die Abweichungen konnten nicht aufgeklärt werden. Vorgefunden wurden allerdings auch verschmutzte Filter in den Abluftventilen, welche aber als alleinige Ursachen die Abweichung nicht erklären würden. Es muss für den Betrieb im Messzeitraum daher davon ausgegangen werden, dass viele der Anlagen nicht in der gewünschten Balance betrieben wurden.

Die Wohnbau Gießen wird nun mindestens bei jedem Mieterwechsel die Balanceeinstellung überprüfen und ggf. nachjustieren lassen. Insgesamt muss resümiert werden, dass Anlagen mit automatischer Balance-Regelung eindeutig der Vorzug

gegeben werden muss. Die anfängliche Mehrinvestition hat deutliche Einsparungen beim Energieverbrauch, bei der Inbetriebnahme und dem notwendigen Abgleich bei der Wartung zur Folge. Es sollte auch hervorgehoben werden, dass, trotz des nicht optimalen Betriebs, die vorhandenen Lüftungsanlagen mit WRG einen wertvollen Beitrag zur Energieeinsparung und zur höheren Behaglichkeit leisten. Wie weiter unten in Abschnitt 5.3.3.1 ausgeführt wird, steigt der Heizwärmebedarf mit einer einfachen Abluftanlage gegenüber einer balancierten Lüftungsanlage um 160 %. Dies zeigt, dass die Nachrüstung während der Sanierung sehr sinnvoll ist. Bei kompakter Bauweise ist der Einbau mit überschaubarem Aufwand möglich.

### 3.6.2 Fensterlüftung

Die Untersuchung der Fensteröffnungen aller 60 öffnbaren Fenster erfolgt über die Fenstergriffe, welche mit bei der Bewegung in eine andere Griffstellung ein Funksignal aussenden (Hersteller: EnOcean). Dieses Signal wird von einem Funk-Repeater in der Wohnung an einen zentralen Empfänger gesendet und ebenfalls in der Datenbank gespeichert. Mittels dieser Methode sollte die Dauer der zusätzlichen Fensterlüftung eingeschätzt werden.

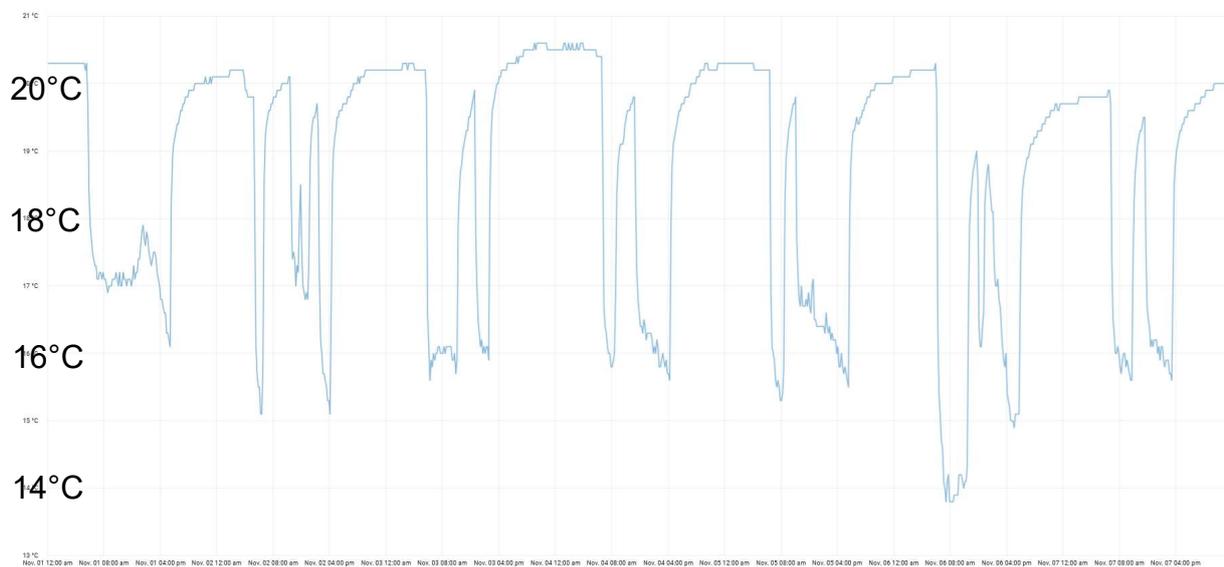
Trotz technischer Umbauten und Austausch aller Repeater und des Empfängers zeigt die Auswertung, dass diese Technik in dem Gebäude nicht ausfallsfrei funktioniert. Neben der technischen Seite gibt es zusätzlich das mechanische Problem der Stellung der Fenstergriffe: Wird der Griff nicht vollständig in die Endposition (geöffnet oder geschlossen) gestellt, wird kein Impuls gesendet. Die Fensteröffnungen konnten daher nicht vollständig erfasst werden, so dass die Lüftungsdauern allenfalls ansatzweise erhoben werden konnten.

Aus diesem Grund wurden weitere Informationen über Fassaden-Fotos erhoben: Durch die Beobachtungen bei Ortsterminen und an Hand der unregelmäßig erstellten Fassadenfotos durch einen Bewohner wurden in zwei Wohnungen jeweils ein Fenster identifiziert, welche längere Zeiten auch bei niedrigen Außentemperaturen geöffnet sind. Um eine Abschätzung dieser Lüftungszeiten zu erhalten, wurde für einen Zeitraum von sieben Tagen in der Winterzeit (1. bis 7. November) die Raumlufttemperatur ausgewertet: Dazu wurden in der Darstellung der Raumlufttemperaturen die Zeiten mit massiver Temperaturabsenkungen bis zum Beginn des Temperaturanstiegs festgestellt und deren Dauer aufsummiert (vgl. Abbildung 62). Durch die optische Auswertung der Temperaturgänge wurde auch noch eine dritte Wohnung mit längeren Lüftungszeiten identifiziert.

Für die drei Fenster in den drei Wohnungen ergaben sich Lüftungszeiten von 6,0; 6,3 und 8,1 Stunden pro Tag. Das entspricht einer Lüftungszeit von 25,2; 26,1 bzw. 33,6% des Gesamtages und muss daher als erhebliche Zusatzlüftung gewertet werden.

Meist handelt es sich um zwei bis drei längere Lüftungsvorgänge. In diesen Einzelfällen werden Raumtemperaturen bis minimal unter 14°C gemessen. Diese Komforteinbußen werden von den Bewohnenden bewusst hingenommen. Natürlich ist dies mit einem höheren Heizwärmeverbrauch zur Wiederaufheizung verbunden. Die ausgetauschte Luft wird nicht über die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage geführt; womit die Wärme zu 100% für das Gebäude verloren ist. Über die lange Lüftungszeit kühlt nicht nur die Raumluft aus, sondern auch die Bausubstanz, Möbel und Inventar (thermische Masse), was einen deutlich höheren Energieeinsatz zur Wiederaufheizung bedeutet.

Diese Beobachtungen werden gemeinsam mit weiteren Aussagen zum Lüftungsverhalten für die Gebäudesimulation verwendet.



**Abbildung 62: Temperaturgang vom 1. bis zum 7. November 2021 an einer Messstelle im Schlafzimmer der Wohnung mit den längsten Öffnungszeiten eines Fensters (Bildschirmfoto aus dem Datenvisualisierungsprogramm „Grafana“)**

### 3.7 Gemessene Energieverbräuche des Gebäudes

In der Zusammenstellung aller gemessenen und abgeschätzten Energieströme ergibt sich Abbildung 63. Die Verbrauchsmengen der Endenergie inkl. des Stromverbrauchs summieren sich auf 88,7 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Summe der Wärmeanwendungen beträgt **56,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)**, die der Stromanwendungen 31,8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die PV-Anlage liefert im gleichen Zeitraum 24,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) Strom.

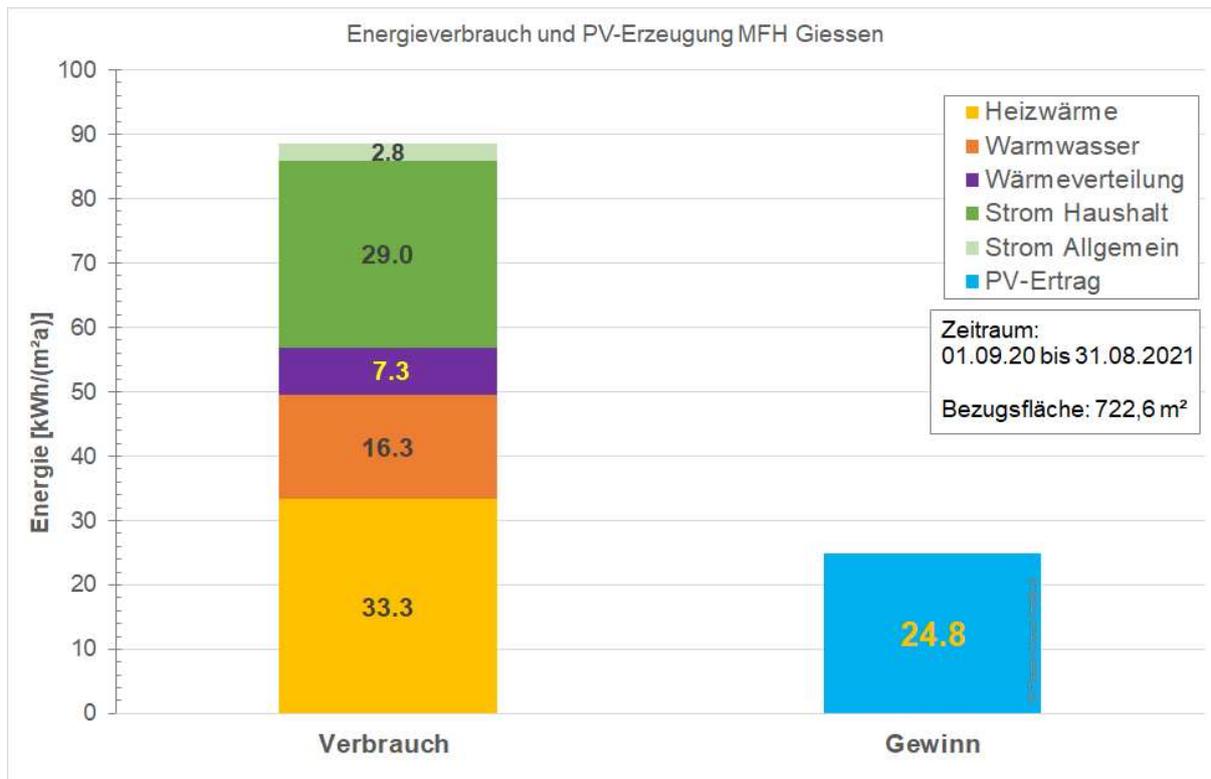


Abbildung 63: Energieverbrauch und PV-Erzeugung im Jahreszeitraum 01. September 2020 bis 31. August 2021

### 3.7.1 Vergleich der Messung mit der PHPP-Berechnung

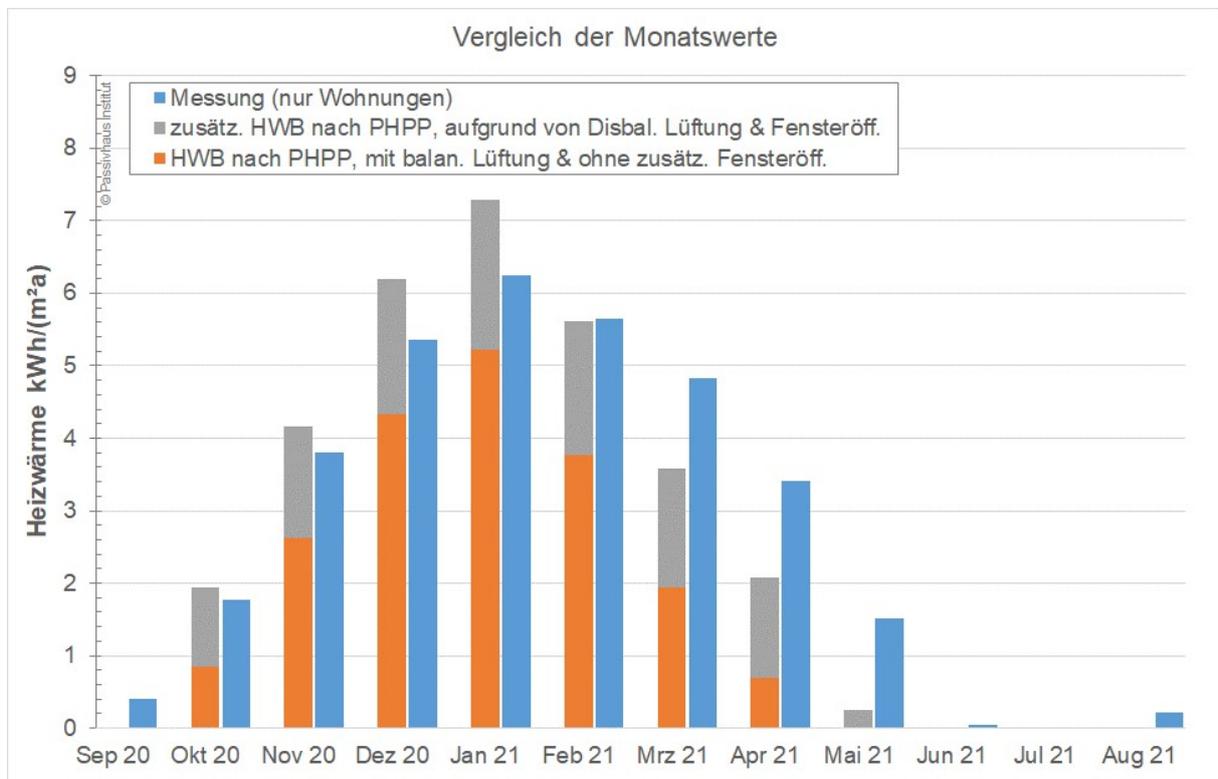
Ein Vergleich der Monatswerte der gemessenen Heizwärmeverbräuche mit den PHPP-Berechnungen ist in Abbildung 64 dargestellt. Im PHPP sind die Verluste der Fernwärmeverteilung im Gebäude (s. Abschnitt 5.1.5) dabei als interne Wärmequellen berücksichtigt so dass die PHPP-Ergebnisse unmittelbar mit den gemessenen Werten vergleichbar sind.

Die zusätzlichen Einflüsse „winterliche Fensterlüftung“ und „Disbalance der Lüftungsanlagen“ werden im PHPP zunächst nicht mit abgebildet. Aus diesem Grund wurde in einer Zusatzberechnung im PHPP versucht, diesen Effekt zu berücksichtigen. Hierfür wurde ein geeigneter Fensterluftwechsel im PHPP eingetragen, der beide Einflüsse abbildet. In Abbildung 64 stimmen die Summe des Heizwärmeverbrauchs „PHPP“ inkl. „Disbalance & Fensterlüftung“ (orange/grau) über den Zeitraum Oktober bis April mit den gemessenen Werten (blau) derselben Periode übereinstimmt. Der Betrieb der Heizung in den Monaten Mai bis September ist unbeabsichtigt und trägt nicht zu Deckung des Bedarfs bei (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Die PHPP-Berechnung zeigt von Oktober bis Januar eine Überschätzung der Messwerte, daran anschließend eine Unterschätzung. Dies ist zumindest zum Teil darauf zurückzuführen, dass das Monatsverfahrens Wärmespeichervorgänge von einem

Monat in den nächsten nicht berücksichtigt. Das im Herbst noch warme Gebäude benötigt weniger Wärme als wenn im Frühjahr unter sonst gleichen Randbedingungen der Monat mit verhältnismäßig kalten Gebäudemassen beginnt. In der Jahressumme gleichen sich diese Effekte aus.

Die berechneten Werte liegen in der Spitze, im Kernwinter, höher als die gemessenen, dafür ist die gemessene Heizperiode etwas länger als die berechnete. Es ist zu vermuten, dass Fensteröffnungen mit den zugehörigen erhöhten Wärmeverlusten vorwiegend in den Übergangs-Jahreszeiten erfolgen, während bei niedrigen Außentemperaturen die Fenster aus Komfortgründen dann eher geschlossen bleiben. So wurde bisher auch bei anderen untersuchten Projekten beobachtet [Ebel, Großklos, Loga 2002].



**Abbildung 64: Vergleich der Messung mit der Berechnung mittels PHPP für den Jahreszeitraum 01. September 2020 bis 31. August 2021. Beim PHPP sind die Klimadaten des Zeitraumes (Außentemperatur und Globalstrahlung) sowie die gemessene erhöhte Innentemperatur von 21,7 °C berücksichtigt.**

Wird der Jahresheizwärmeverbrauch (Messung) gegenüber dem Messwert vor der Sanierung (vgl. Abschnitt 2.1.3) betrachtet, zeigt sich eine realisierte Einsparung von über 70% (Abbildung 65). Das zeigt den Erfolg der umfassenden energetischen Sanierung. Weitere Vorteile der Sanierung sind der thermische Komfort, und die deutlichen Verbesserungen des Wohnklimas, z.B. höhere Oberflächentemperaturen, bessere Nutzung des gesamten Raumes, höhere Luftqualität zu nennen, welche sich nicht allein im Messwert und der hohen Einsparung ausdrücken.

Die Prognosewerte des PHPP liegen deutlich unter den gemessenen Werten, was für derartige Gebäude ungewöhnlich ist. Meist liegen die PHPP-Berechnungen wesentlich näher am gemessenen Verbrauch (vgl. [Peper/Grove-Smith/Feist 2009], [Peper/Feist 2008] und [Schulze Darup 2002]). Die Abweichungen in diesem Projekt erklären sich, wie weiter oben diskutiert und im folgenden Abschnitt 5 analysiert, durch die unerwartet hohe Disbalance der Lüftungsgeräte und die vereinzelt überdurchschnittlichen winterlichen Fensterlüftungen. Insgesamt sind die realisierten Einsparungen überzeugend (s. 3.6.1) und zeigen die Robustheit des Systems bzw. der Maßnahmen.

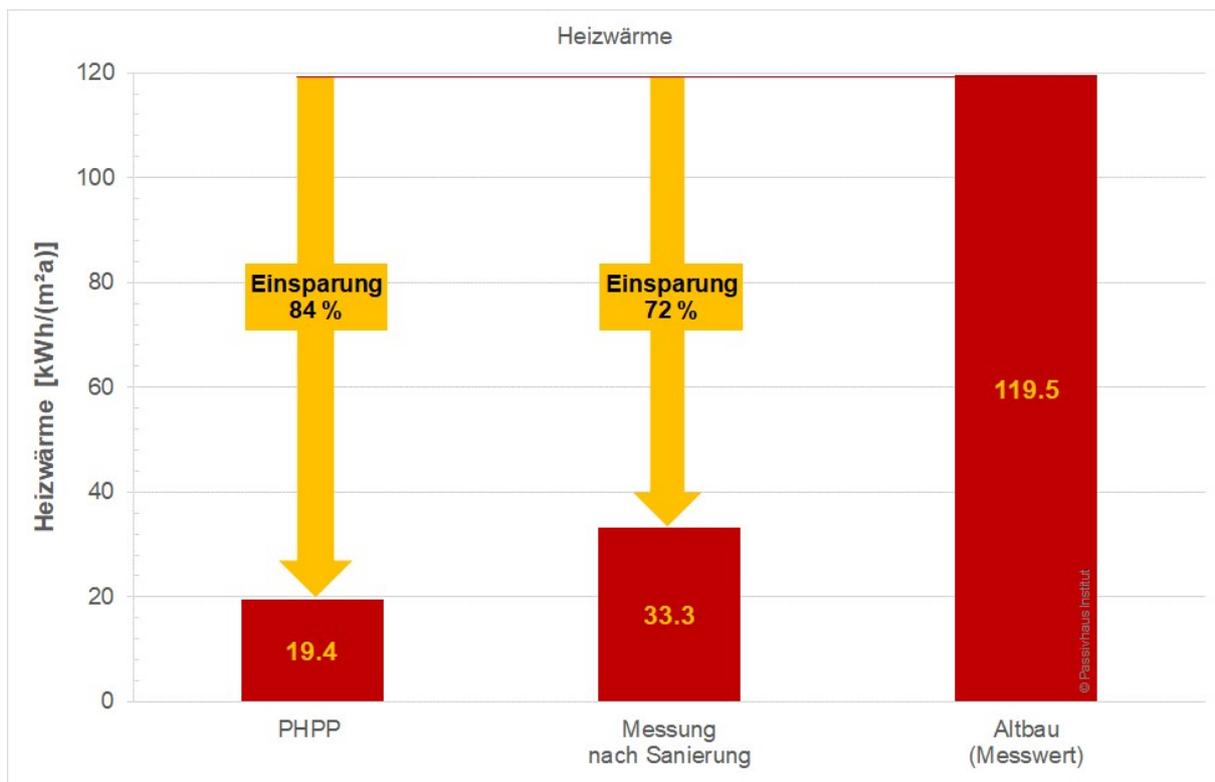


Abbildung 65: Vergleich der Heizwärme von der Berechnung (PHPP), der Messungen nach und vor der Sanierung. Die gemessene Einsparung beträgt 72%.

### 3.8 Minimalmonitoring

Im Rahmen der Untersuchungen und Auswertungen sollte zusätzlich geprüft werden, ob Möglichkeiten bestehen, um - bei vergleichbarer Aussagekraft - den messtechnischen Aufwand zu reduzieren. Das Vorgehen für ein sog. „Minimalmonitoring“ ist in [Peper 2012] beschrieben. Die Überlegungen zur validen Untersuchung eines solchen Gebäudes zeigen, dass die folgenden Größen auf jeden Fall erfasst werden müssen:

- Wärmeströme (Heizung, Warmwasser)
- Stromverbrauchswerte (Haushalts-, Lüftungs- und Gemeinschaftsstrom)
- Wetterdaten (Außentemperatur, rel. Feuchte, Globalstrahlung)

- Raumtemperaturen
- Wasserverbrauch

Aufwendig war in dem Objekt die Erfassung der Wärmemengen der Heizung und Warmwasserversorgung, da die Aufteilung in den Hausstationen erst in den einzelnen Wohnungen erfolgt. Ist dies nicht der Fall, würden zwei zentrale Zähler zur Erfassung der Beheizung und der Warmwasserversorgung ausreichen. Natürlich wären in einem solchen Fall Aussagen zu den Einzelwohnungen (Verbrauchsspreizung) nicht mehr möglich. Bereits erfolgreich durchgeführte Untersuchungen [Peper 2016] [Peper 2021] zeigen, dass auch bei minimaler Datenlage noch gute Aussagen zur Verbrauchshöhe getroffen werden können. Natürlich steigt dann die Unsicherheit der Angaben an und die Aufteilung in Heizung und Warmwasser kann nur vereinfacht erfolgen. Bei Untersuchungen z.B. zu den internen Wärmequellen sind derartige Vereinfachungen allerdings nicht zielführend.

Auf jeden Fall auch benötigt werden die Innentemperaturen in den Wohnungen, um Analysen zu möglichen Abweichung der Wärmeverbräuche durchführen zu können. Liegen diese bei einem Minimalmonitoring oder einer nachträglichen Untersuchung nicht vor, kann nur pauschal eine Innentemperatur von 21 bis 22 °C angesetzt werden. In der überwiegenden Mehrzahl der untersuchten Wohngebäude, gleichgültig ob Sanierung mit Passivhauskomponenten oder Neubau, wurde dieses Temperaturniveau im Mittel festgestellt (vgl. [Peper 2012a]). Ist die Zahl der Wohneinheiten im untersuchten Projekt nur klein (weniger als 10 WE), kann eine solche Pauschalannahme allerdings weit neben der Realität liegen.

Ähnlich verhält es sich mit den Wetterdaten. Die unmittelbar am Gebäude erhobenen Außenbedingungen sind die beste Möglichkeit einer realitätsnahen Untersuchung. Da der Aufwand für das Errichten einer eigenen Wetterstation allerdings erheblich ist, wäre projektspezifisch zu prüfen, ob nicht Messwerte externer Stationen zugänglich sind, deren Abweichung aufgrund der Entfernung tolerierbar sind.

Wie weiter oben im Abschnitt 3.7.1 gezeigt wird, sind die gemessenen monatlichen Heizwärme-Verbrauchswerte gut mit den PHPP Werten aus dem Monatsverfahren zu vergleichen. Dabei muss allerdings ein möglichst baurealitätsnahes PHPP vorliegen. In diesem müssen dann zumindest die Wetterbedingungen des untersuchten Zeitraumes (Außentemperatur und Globalstrahlung) sowie die mittlere winterliche Innentemperatur nach den Messergebnissen eingetragen werden. Mit diesen Voraussetzungen kann mittels dieses „digitalen Zwillings“ – der stationären Energiebilanz des PHPP – auch schon in der Phase der Inbetriebnahme mit einzelnen Monatswerten gearbeitet werden. Bekanntlich sind die Unsicherheiten des ersten Messjahres dabei höher als im folgenden „Regelbetrieb“. Eine Möglichkeit zum Aufspüren von Abweichungen und deren möglichen Ursachen ist aber auch schon während der Inbetriebnahme gegeben, insbesondere wenn diese während der Heizzeit stattfindet. Im

vorliegenden Gebäude wurde aufgrund der Messungen und erster Grobanalysen festgestellt, dass in einer Wohnung ein altes Verteilventil eines Heizkörpers defekt war und die Verteilleitung zum Wohnzimmer dauerhaft mit Heizungswasser durchströmt wurde. Dabei wurden erhebliche Mengen Heizwärme (auch in Sommermonaten) an die Wohnung abgegeben, bevor dieser Zustand repariert wurde. Dieser Umstand war einer der Gründe, warum mit einer Messung des normalen Gebäudezustandes erst verspätet begonnen werden konnte.

Das Beispiel zeigt, wie wichtig das frühzeitige Starten und Auswerten von Verbrauchsdaten zumindest auf Monatsbasis ist. Wie oben erwähnt, sind dazu nur wenige zentrale Wärmezähler notwendig, wenn die Heizungshydraulik dies zulässt – und das ist auch die Methode, die wir für solche Untersuchungen empfehlen.

## 4 Zufriedenheit der Bewohnenden

Eine kurze anonyme Befragung der Bewohnerinnen und Bewohner wurde im Sommer 2022 mittels Fragebogen durchgeführt. Neben z.B. dem winter- und sommerlichen Lüftungsverhalten wurde auch die generelle Zufriedenheit abgefragt. Aus acht der zwölf Wohnungen gab es Antworten zu der Befragung (67 %). Dabei ergab sich, dass 63% der Befragten sehr zufrieden sind mit der Beheizung des Hauses; 38% nur zum Teil. Niemand war unzufrieden oder sehr unzufrieden.

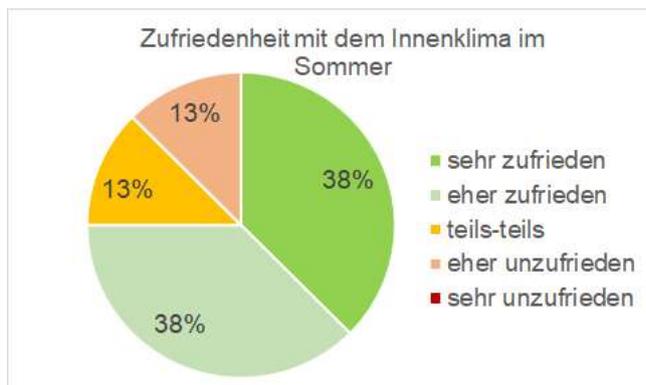


Abbildung 66: Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit der Beheizung



Abbildung 67: Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit dem Innenklima im Winter

Mit dem winterlichen Innenklima sind 63% der Bewohnenden sehr oder eher zufrieden und ebenfalls 38% nur teilweise (Abbildung 67). Im Sommer dagegen (Abbildung 68) sind sogar 76% sehr oder eher zufrieden, wobei aber für eine Wohnung „eher unzufrieden“ mit dem Innenklima angegeben wird.



**Abbildung 68: Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit dem Innenklima im Sommer**

Insgesamt zeigen diese Aussagen aus der Befragung eine überwiegend hohe Zufriedenheit mit den klimatischen Bedingungen in den sanierten Wohnungen.

## 5 Dynamische Gebäudesimulation

Der Zweck der vorliegenden Untersuchung besteht zunächst darin, den Einfluss der Hauptfaktoren (Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzer) auf den Energieverbrauch des Gebäudes zu analysieren und ggffls zu separieren.

Zu diesem Zweck wurde ein dynamisches thermisches Simulationsmodell des Gebäudes erstellt, das all diese Faktoren möglichst realitätsgetreu abbildet. Ein Abgleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten soll absichern, dass der beobachtete Betrieb im Modell adäquat wiedergegeben wird, und einen Ausgangspunkt für die weitergehende Analyse schaffen.

Im Anschluss kann anhand des Simulationsmodells der Einfluss einzelner Aspekte aus allen drei Bereichen auf das thermische Verhalten des Gebäudes und den Energiebedarf untersucht werden. Wie sich zeigen wird, sind tatsächlich alle drei Faktoren für das Endergebnis maßgeblich.

### 5.1 Simulationsmodell

#### 5.1.1 Das Simulationsprogramm DYNBIL

Die Simulationsrechnungen wurden mit dem dynamischen thermischen Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL durchgeführt [Feist 1981]. DYNBIL wurde in den 1980er und 90er-Jahren von Wolfgang Feist entwickelt und seither vielfach validiert (s.z.B. [AK 5]), ergänzt und erweitert. Dieses instationäre Berechnungsverfahren ist für die Gebäudeanalyse und -optimierung ausgelegt. Die Methodik des Simulationsmodells lässt sich wie folgt beschreiben: Das Gebäude wird in einzelne Zonen bzw. Räume unterteilt, die durch Leitwerte und dynamische Wandmodelle miteinander gekoppelt sind. Jedes Raummodell des Programms besitzt zwei klar getrennte Temperaturnoten für Luft- und Strahlungstemperatur. Die inneren konvektiven und radiativen Wärmeübergänge werden abhängig von den Temperaturen und ggf. der Lage der Fläche im Raum berechnet. Auf den Außenoberflächen werden die Einflüsse von Windgeschwindigkeit, Solarstrahlung und infrarotem Strahlungsaustausch mit dem Himmel und der Umgebung berücksichtigt.

Die opaken Bauteile werden mit einem Widerstands-Kapazitäten-Modell abgebildet, einem sogenannten Beuken-Modell, in dem das Bauteil in einzelne Wärmekapazitäten, zwischen denen sich jeweils Wärmedurchlasswiderstände befinden, diskretisiert wird. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung innerhalb der Wand erfolgt über ein Vorwärts-Differenzen-Verfahren, das auch über lange Zeiträume die Energieerhaltung sicher stellt und eine korrekte Berechnung hochgedämmter Bauteile inkl. langfristiger Speichervorgänge erlaubt. Details zum Verfahren und seiner Genauigkeit sind in [Feist 1994] zu finden.

Der Feuchtetransport in den Bauteilen wird analog simuliert, eine separate Diffusion und Sorptionsleitung, die nichtlineare Sorptionsisotherme der Baumaterialien sowie die Sorptionswärme können berücksichtigt werden.

Die Wärmedurchlasskoeffizienten und Energiedurchlassgrade der Verglasungen werden ebenfalls abhängig von der jeweiligen Temperatur und der Solarstrahlung (insbesondere der Richtung) in jedem Zeitschritt neu ermittelt. Die Verteilung der einfallenden Solarstrahlung auf die Oberflächen im Raum und ggf. den Lufttemperaturknoten kann entweder manuell vorgegeben oder automatisch berechnet werden.

Wärmebrücken werden durch eindimensionale Ersatzmodelle berücksichtigt, die einen Teil des regulären Wandaufbaus ersetzen. Dabei bleibt die Größe der wärmeübertragenden Fläche unverändert, um den Strahlungswärmetransport im Raum nicht zu verfälschen.

Interne Wärmequellen und -senken können zonenspezifisch für jeden Zeitschritt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmetransportmechanismen in das Modell einbezogen werden. Auch die Luftströme zwischen dem Gebäude und der Umgebung sowie zwischen den Zonen untereinander können für jeden Zeitschritt variieren.

Der Solver ermittelt die Temperaturleitwerte und stellt Kopplungsgleichungen zwischen den Raumluf- und Strahlungsknoten aller Räume auf. Die Temperaturen der Zonen werden durch Invertierung des resultierenden linearen Gleichungssystems ermittelt.

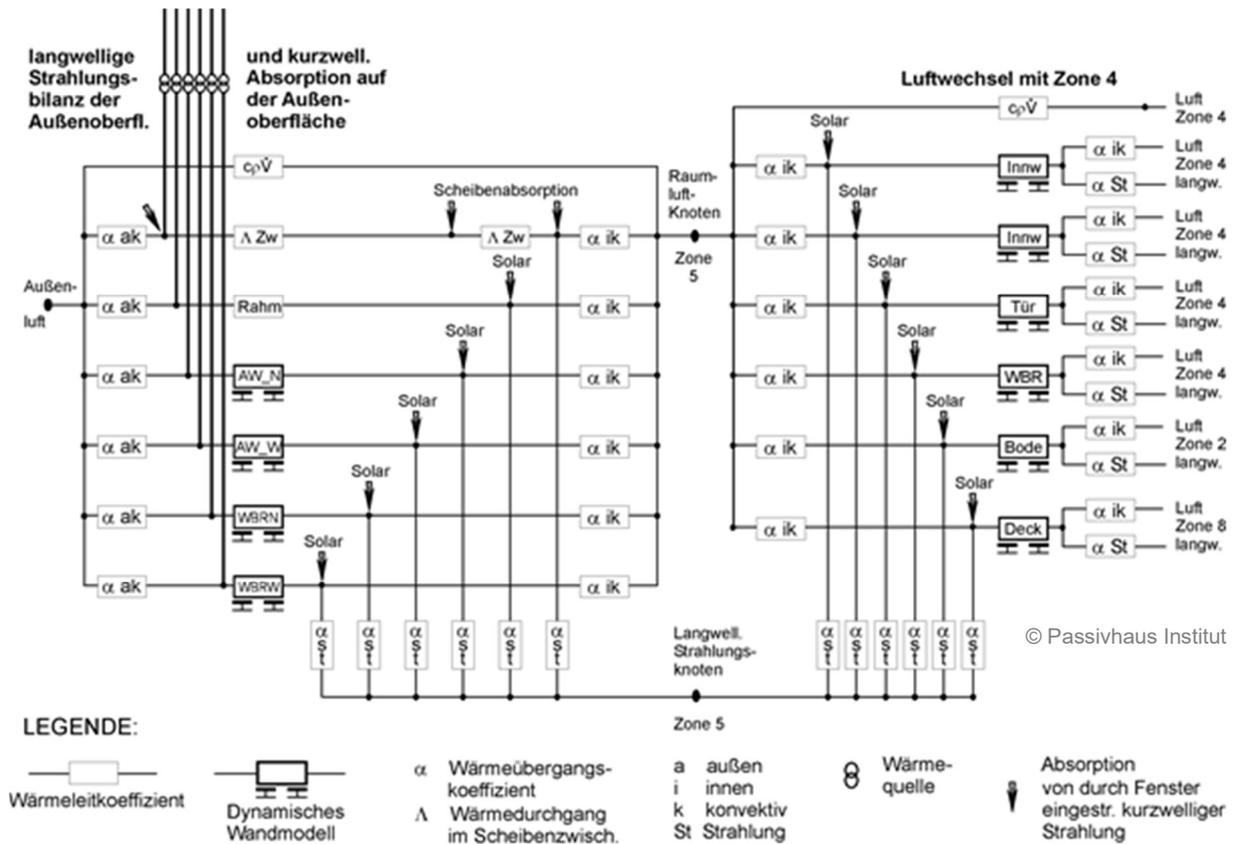


Abbildung 69: Beispiel für die Modellierung einer Zone

Eine beispielhafte Verknüpfung der Einflussgrößen in einer Zone in DYNBIL zeigt Abbildung 69. In der Mitte der Abbildung sind oben und unten klar voneinander getrennt die Temperaturknoten der Beispielzone dargestellt. Der Raumlufknoten oben ist über die zonenbegrenzenden Bauteile mit den Nachbarzonen und dem Außenbereich gekoppelt. Diese Bauteile werden nach der Fourier-Gleichung modelliert. Ihnen wird innen und außen jeweils ein konvektiver Wärmeübergang zugeordnet. In dieses dynamische Wandmodell geht bei den Innenbauteilen auch die langwellige Strahlung aus der Nachbarzone mit ein. Der konvektive Wärmetransport durch Luftwechsel mit der Nachbarzone und der Außenluft ist ebenfalls berücksichtigt. Dieser wird über den durchströmenden Volumenstrom und die Wärmekapazität der Luft definiert. Das Fenster wird in Rahmen und Verglasung unterteilt, die Verglasung wird dabei in die einzelnen Scheiben mit deren Zwischenräumen aufgelöst, die Strahlungsabsorption in jeder Scheibe gesondert berücksichtigt. Der Strahlungsknoten der Zone mittig unten wird mit den Oberflächen der angrenzenden Bauteile über den radiativen Wärmeübergang verknüpft. Auf den Oberflächen der Bauteile wird auch die in den Raum gelangende Solarstrahlung wirksam. Die langwellige Strahlung und die kurzwellige Absorption auf der Außenoberfläche werden als Wärmeströme in die Oberflächen der Außenbauteile eingespeist.

Die Algorithmen und ihre Implementierung wurden in der Vergangenheit bereits in verschiedenen Forschungsprojekten anhand von Messdaten aus realisierten Gebäuden validiert ([Feist 1997], [Kaufmann 2001], [Schnieders 2003], [Ottinger 2016]). Die Auswertungen zum Passivhaus Darmstadt-Kranichstein in diesem Forschungsprojekt zeigen weiterhin, dass sich das thermische Verhalten eines Gebäudes auch im bewohnten Zustand – ausreichend genaue Kenntnis der Vorgänge im Gebäude vorausgesetzt – mit sehr hoher Genauigkeit abbilden lässt.

### 5.1.2 Zonierung

Das Gebäude wurde in mehrere thermische Zonen aufgeteilt, um die Wechselwirkungen zwischen den Wohnungen und Räumen bei unterschiedlichem Nutzerverhalten untersuchen zu können. Vom Grundsatz her bildet jede Wohnung eine Zone (vgl. Abbildung 70). Jede Wohnung noch in einzelne Räume aufzuteilen wäre bei der vorliegenden Datenlage nicht angemessen gewesen, denn es lagen weder räumlich aufgelöste Informationen zum Nutzerverhalten noch entsprechend detaillierte Temperatur- und Heizleistungsmessungen vor, sodass ein aussagekräftiger Vergleich mit der Messung nicht möglich gewesen wäre.

Für vertiefende Fragestellungen im Rahmen der späteren Sensitivitätsanalysen wurde in zwei der Wohnungen (Schwarzlachweg 44, 1. OG, vgl. Abbildung 71) jedem Raum eine eigene thermische Zone im Modell zugeordnet.

Hinzu kommen die beiden Treppenhäuser, die jeweils eine eigene Zone erhielten. In Summe ergeben sich damit 23 thermische Zonen. Die Kellerräume wurden im Modell als Randbedingung mit einem vorgegebenen Temperaturverlauf abgebildet, hierfür wurden die im Keller gemessenen Temperaturen verwendet.



**Abbildung 70: Zonierung des Gebäudes in der Ansicht.**

**Abbildung 71: Zonierung des Gebäudes am Beispiel des 1. OG. Im EG und im 2. OG bildet jede Wohnung eine Zone.**

### 5.1.3 Gebäudehülle

Die Aufbauten der Wände und Fenster, des Dachs und der Kellerdecke wurden den Plänen entnommen. Alle Wärmebrücken wurden entsprechend der Analyse im PHPP auch in der Simulation berücksichtigt. Die Verschattungssituation, bedingt durch umstehende Gebäude und die Eigenverschattung durch Fensterlaibungen und Balkone wurde für jedes Fenster einzeln ermittelt und im Modell abgebildet.

### 5.1.4 Lüftung und Infiltration

Die wohnungsweisen Lüftungsanlagen wurden nach dem Konzept der gerichteten Durchströmung geplant. Die Zuluft wird in die Wohn- und Schlafräume eingebracht und strömt über die Flure in die Küchen und Bäder. Von dort wird die Abluft entnommen und über den Wärmeübertrager nach draußen geführt. Jede Lüftungsanlage ist mit einem Stromzähler versehen, der den momentanen Stromverbrauch erfasst. Über eine Korrelation von Stromverbrauch und Volumenstrom, die sich aus dem Datenblatt der Lüftungsgeräte ableiten ließ, konnte der Zeitverlauf des Volumenstroms in jeder Wohnung bestimmt werden (vgl. Abschnitt 3.4.1).

Die gute Luftdichtheit von  $n_{50} \approx 0,8 \text{ h}^{-1}$  führt dazu, dass der Einfluss der Infiltration verhältnismäßig gering ist. Die Infiltrationsverluste nach PHPP betragen ca. 5

kWh/(m<sup>2</sup>a). Nähere Informationen zur Verteilung der Leckagen lagen nicht vor. Damit ist es angemessen genau, den Infiltrationsvolumenstrom als zeitlich unveränderlichen Wert gemäß PHPP zu ermitteln und proportional zur Außenoberfläche auf die einzelnen Zonen zu verteilen.

Unklar ist hingegen, in welchen Wohnungen und zu welchem Zeitpunkt die Lüftungsanlagen in Balance liefen. Wie in Abschnitt 3.6.1 beschrieben, wiesen die Anlagen in einigen der Wohnungen bei Kontrollmessungen eine erhebliche Disbalance auf, auch wenn sie wenige Monate vorher nachgewiesenermaßen gut balanciert waren.

Zusätzlich wurde im Gebäude in einigen Wohnungen ein nennenswerter Anteil an Fensterlüftung festgestellt (vgl. Abschnitt 3.6.2), ungewöhnlich in Gebäuden mit Zu- und Abluftanlage (hier möglicherweise den Bewohnern nicht ausreichend bewusst). Wie groß der daraus resultierende Luftaustausch ist, lässt sich nicht genau feststellen. Zum einen ist der Fensteröffnungs-Zustand nicht gut genug bekannt, zum anderen begrenzen Hindernisse im freien Querschnitt (Rollläden, Vorhänge) den Luftaustausch. Auch die Windgeschwindigkeit und -richtung in Fensternähe sowie die Stellung der Innentüren, die jeweils einen Einfluss auf den Luftaustausch besitzen, sind nicht oder nur näherungsweise verfügbar.

Diese Unsicherheiten in den Randbedingungen sind nicht unbedeutend und beeinträchtigen die Genauigkeit der Berechnungen.

#### **5.1.5 Interne Wärmequellen (IWQ)**

Die internen Wärmequellen setzen sich aus verschiedenen Teilen zusammen.

Die Wärmeabgabe der Personen wurde anhand der in den Wohnungen lebenden Personen, soweit deren Zahl von Ortsterminen her bekannt war, abgeschätzt. Die sensible Wärmeabgabe einer Person wird mit 80 W angesetzt, für die Anwesenheit in den verschiedenen Wohnungen mussten plausible Annahmen getroffen werden (für dieses Objekt lagen keine Anwesenheitsprotokolle vor).

Der Stromverbrauch für Haushaltsstrom, Beleuchtung u.ä. wurde über einen separaten Zähler wohnungsweise erfasst. Dieser Stromverbrauch wird vollständig in Wärme umgesetzt, allerdings steht aufgrund von Ablaufverlusten (Kochen, Wasch- und Spülmaschine) nur ein Teil dieser Wärmemenge innerhalb der thermischen Hülle des Gebäudes zur Verfügung, angesetzt wurden in Anlehnung ans [PHPP] 79%. In den Wohnungen AA und BB, die in mehrere thermische Zonen pro Wohnung aufgeteilt wurden, wurde der gemessene Stromverbrauch der Wohnung in einem festen, plausiblen Verhältnis auf die Räume verteilt.

Die Warmwasserbereitung erfolgt durch Fernwärme auf dem Weg über die Wohnungsstation. Es gibt einen Gesamtwärmezähler und einen zweiten für die Raumheizung, so dass sich per Differenzbildung auch der Warmwasser-Wärmeverbrauch bestimmen lässt. Während das benutzte Warmwasser ohne bedeutende Wärmeabgabe wieder abfließt, sind die Verteilleitungen nach jeder Zapfung mit warmem Wasser gefüllt, dessen Wärme allmählich an den Raum abgegeben wird. Diese Wärmeverluste der Verteilleitungen in die Zonen werden gemäß PHPP mit 5,6 % der Warmwasser-Nutzwärme ermittelt. In den Wohnungen AA und BB wurden die Verluste der Verteilleitungen zu gleichen Teilen auf Bad und Küche aufgeteilt.

Im Gegensatz zu den Warmwasserleitungen nehmen die Kaltwasserleitungen Wärme aus dem Raum auf und vermindern damit die internen Wärmegewinne. Die Temperaturen des Kaltwassers aus den Messdaten werden zu einem 4-Tage-Minimum geglättet. Die Differenz aus Lufttemperatur der Zone und Wassertemperatur des Kaltwassers wird mit der spezifischen Wärmekapazität von Wasser multipliziert, um den Wärmeentzug des Kaltwassers aus der Zone zu erhalten. Die Wärmeleistung wird dabei auf einen Wert begrenzt, der sich bei kontinuierlicher Durchströmung der Leitungen mit kaltem Wasser ergeben würde; dies sind im vorliegenden Fall ca. 70 W pro Wohnung.

Eine weitere Wärmesenke stellt die Verdunstung von Wasser aus Topfpflanzen, Handtüchern, nasser Kleidung etc. dar. Auch hierfür wurden aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen Zeitpläne erstellt.

In den Gebäuden wird ein direkt durchströmtes Fernwärmesystem ohne Trenntauscher zum Netz der Stadtwerke Gießen betrieben (vgl. Abschnitt 2.1.1). Übereinander liegende Wohnungen sind durch ein gemeinsames Paar Steigleitungen angebunden. Von diesen aus wird das Durchlaufsystem zur Trinkwarmwasserbereitung im Bad ebenso wie die Heizkörper zur Raumbeheizung durchströmt.

Die Leitungen verliefen vor der Sanierung auf Putz durch die Flure, sie wurden im Zuge der Arbeiten mit einer Abkofferung in Leichtbauweise versehen (Abbildung 72). Eine Wärmedämmung der Leitungen erfolgte vermutlich nicht; sie könnte durch Einbringen von Einblasdämmstoff ggfs. nachgerüstet werden, was auch die parallel verlaufende Trinkwasserleitung vor Wärmeeintrag schützen kann.



**Abbildung 72: Steigleitungen der Fernwärmeversorgung vor (links) und nach der Sanierung (rechts)**

Aufgrund der komplexen Geometrie und der nicht näher bekannten Situation im Innern des Schachtes kann die Wärmeabgabe an die umliegenden Räume nicht einfach bestimmt werden.

Thermographische Untersuchungen legen eine mittlere Temperatur der Verkofferungs-Oberfläche ca. 3-4 K über der Raumtemperatur nahe. Diese Beobachtung wird gestützt durch Messwerte der Temperatur in einer der angrenzenden Abkofferungen in einem Bad, die konstant bei ca. 26 °C liegen. Die mittlere Temperatur im Gebäude lag um 22 °C.

Über die Fläche der Verkofferung lässt sich damit auf eine Wärmeabgabe von ca. 50 W pro Wohnung schließen. Dieser Wert wurde in der Simulation zu Grunde gelegt.

## **5.2 Vergleich von Simulation und Messung**

Für den Vergleich wurden die gemessenen Heizleistungen als Randbedingung ins Gebäudemodell eingespeist und die resultierenden Temperaturen ermittelt. Das Simulationsergebnis wurde den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

Die nur unsicher bekannten Randbedingungen, z.B. Nutzung, Luftmengen durch geöffnete Fenster und Verteilung der internen Wärmequellen, wurden im Rahmen sinnvoller Grenzen so aufgesetzt, dass die tatsächlichen Verhältnisse während des Auswertungszeitraums vom Modell möglichst gut wiedergegeben werden. Die größten Unsicherheiten in Bezug auf die Randbedingungen bestanden in der Disbalance der

Lüftungsanlagen sowie der Fensterlüftung. Diese wurden durch einen äquivalenten Fensterluftwechsel abgebildet: Für jeden Monat und jede Wohnung wurde ein plausibler, mit den Beobachtungen und Messungen kompatibler äquivalenter Außenluftwechsel angesetzt, der dann im Monatsmittel zu einer guten Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Innentemperaturen führte. Damit handelt es sich in diesem Fall um ein empirisch an die vorgefundenen Ergebnisse angepasstes Referenzmodell; solche Modelle sind für die Untersuchung der hier gegebenen Parametervariationen hilfreich, eignen sich aber selbstverständlich nicht für die Validierung der Berechnungsalgorithmen.

Im Gegenteil sind valide Berechnungsalgorithmen die Voraussetzung dafür, aus dem Vergleich von Messung und Simulation auf den äquivalenten Fensterluftwechsel schließen zu können. Die Auswertungen zum Passivhaus Darmstadt-Kranichstein in diesem Forschungsprojekt belegen, dass DYNBIL für eine solche Anwendung geeignet ist.

Wo bekannt war, dass die Nutzer die Fenster häufiger öffnen bzw. sie im Schlafzimmer offen stehen lassen, waren tatsächlich gewisse Luftmengen für die Fensterlüftung anzusetzen, was für die Plausibilität des Vorgehens spricht. Im Kernwinter (1.11.-31.3.) betrug dieser Zusatzluftwechsel, bezogen auf das gesamte Gebäude,  $0,03 \text{ h}^{-1}$ , also weniger als ein Zehntel der Luftmengen, die von den Lüftungsanlagen transportiert wurden. In anderen Wohnungen, in denen aufgrund von vorliegenden Außenaufnahmen und Angaben der Bewohnenden eher keine zusätzliche Fensteröffnung zu erwarten war, ergaben sich dennoch in demselben Zeitraum weit höhere Zusatzluftwechsel. Für das gesamte Gebäude musste der Außenluftwechsel um  $0,11 \text{ h}^{-1}$  (ohne Wärmerückgewinnung) erhöht werden, um eine gute Übereinstimmung zu erreichen. Tabelle 9 zeigt die angesetzten Werte im Einzelnen.

**Tabelle 9: Angenommene äquivalente Fensterlüftung (monatsweise konstant) in den Wohnungen.**  
Wohnungsbezeichnungen anonymisiert.

zus. Luftmenge [m <sup>3</sup> /h]	Fensterlüftung bekannt					keine Fensterlüftung bekannt						
	X	Q	S	C	L	U	R	Z	G	M	D	J
Jan	0	0	0	10	30	0	0	0	0	10	20	90
Feb	0	0	0	10	30	0	0	0	0	10	20	90
Mär	0	20	70	30	40	0	0	10	0	10	30	90
Apr	0	20	70	30	50	0	0	10	20	20	30	90
Mai	0	50	70	30	50	0	0	30	20	20	40	110
Jun	0	50	70	30	60	0	0	30	20	40	40	130
Jul	0	50	80	30	70	0	50	30	60	70	50	150
Aug	0	50	80	30	70	0	50	30	60	70	50	150
Sep	0	20	0	30	50	0	0	30	20	20	20	130
Okt	0	0	0	10	50	0	0	10	0	10	20	110
Nov	0	0	0	10	40	0	0	0	0	10	20	90
Dez	0	0	0	10	30	0	0	0	0	10	20	90

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass für den überwiegenden Teil der nicht erfassten Wärmeverluste jedenfalls nicht die Fensterlüftung verantwortlich war, sondern eher die Disbalance oder ein unbeabsichtigter Bypass der Lüftungsanlagen.

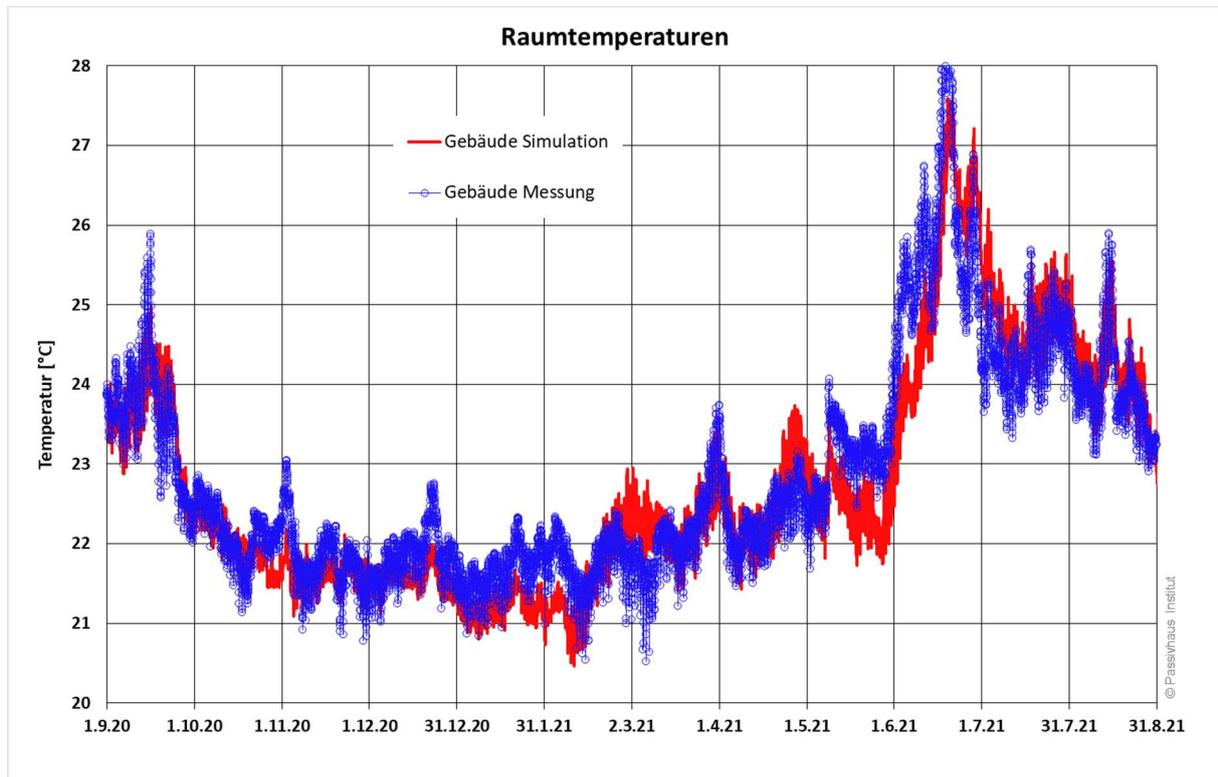
Wie man in Tabelle 10 sieht, unterscheiden sich die errechneten Temperaturen in allen Zonen, ausgenommen die Treppenhäuser in den Sommermonaten, um maximal 1,1 K von den gemessenen Werten. Da in den Treppenhäusern nur die angesogene Abluft im oberen Bereich gemessen wurde, sind die Messwerte ohnehin nicht unmittelbar mit den Simulationsergebnissen (die eine mittlere Lufttemperatur im Treppenhaus darstellen) vergleichbar.

**Tabelle 10: Aufstellung der Temperaturdifferenzen zwischen Simulation und Messung pro Zone.**

Differenz Simulation - Messung [K]

	A	B	AA	BB	AAA	BBB	T	a	b	aa	bb	aaa	bbb	t
September 20	-0.6	-0.9	0.3	-0.3	0.3	0.8	-1.0	-0.5	-0.1	-0.4	0.1	0.6	0.1	0.8
Oktober 20	-0.4	-0.6	0.4	-0.3	0.4	-0.2	-0.8	0.2	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	-0.4	0.1
November 20	0.3	-0.3	0.6	-0.5	0.1	-0.7	-0.8	0.1	-0.8	-0.6	-0.2	0.5	0.0	-0.7
Dezember 20	0.2	-0.2	0.4	-0.3	-0.2	-0.7	-0.7	0.2	-0.8	-0.7	-0.3	0.5	0.0	-0.8
Januar 21	-0.2	-0.3	0.1	-0.8	-0.6	-0.8	-0.9	-0.2	-0.6	-1.0	-0.2	0.5	0.1	-0.9
Februar 21	0.0	0.2	0.0	-0.2	-0.8	-0.1	-0.8	0.2	-0.2	-0.9	0.0	0.2	0.2	-0.4
März 21	0.8	0.9	0.6	0.9	-0.1	1.0	-0.5	-1.1	0.2	-0.9	0.7	0.4	0.7	-0.1
April 21	1.1	0.5	1.1	0.3	0.5	0.6	-0.8	-1.1	-0.4	-0.8	0.2	0.4	0.1	-0.1
Mai 21	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	0.1	0.2	-2.2	-0.5	-0.7	-0.8	-0.3	-0.7	-0.7	-0.1
Juni 21	-1.1	-0.8	-0.8	-0.9	-0.1	0.5	-2.9	-0.5	0.4	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.4
Juli 21	0.2	-0.3	0.8	-0.6	0.9	0.9	-1.3	0.3	0.7	0.3	0.2	0.7	0.6	2.3
August 21	0.7	-0.3	0.5	-0.5	0.7	0.2	-1.0	0.2	0.2	-0.1	-0.3	0.5	-0.6	2.0

Der Zeitverlauf der Gebäude-Mitteltemperatur (Abbildung 73) zeigt, dass das Simulationsmodell den Zeitverlauf der Temperaturen im Prinzip korrekt wiedergibt. Die Abweichungen liegen niemals über 2 K, nur in 6,5% der Zeit sind sie größer als 1 K.



**Abbildung 73: Nach spezifischem Transmissions- und Lüftungswärmeverlust gewichtete Mitteltemperaturen des Gebäudes**

Beispielhaft sind in Abbildung 74 und Abbildung 76 die Temperaturverläufe zweier Wohnungen über ein Jahr dargestellt (anonymisiert).

Wohnung L gehört zu den Wohnungen, für die aus Beobachtungen bekannt ist, dass regelmäßig zusätzlich über die Fenster gelüftet wird; nach Tabelle 9 ist sie in dieser Gruppe diejenige, für die sich der größte Fensterluftwechsel vermuten lässt. In dieser Wohnung zeigen sich starke Tagesgangschwankungen in der Messung, die, so ist es aus Abbildung 74 zu erkennen, auf eine Fensterlüftung in Raum 2 zurückzuführen sind. Betrachtet man kürzere Zeiträume, wie z.B. in Abbildung 75, so lässt sich erkennen, dass die betreffenden Lüftungsvorgänge tagsüber stattfinden, während nachts das Fenster wieder geschlossen wird. Es kommt dann zu einem konvektiven Temperatursprung bis in die Nähe der übrigen Räume, anschließend steigt die Temperatur nur langsam an, während die Bauteilmassen sich allmählich weiter erwärmen. Die Simulation bildet diese Vorgänge nicht ab, da die gesamte Wohnung zu einer thermischen Zone zusammengefasst ist und das Nutzerverhalten nicht in der dafür nötigen Tiefe erfasst wurde.

Eine Saisonalität in den Innentemperaturen ist in dieser Wohnung mit 20 °C im Winter und 23 °C im Sommer deutlich zu erkennen. Im Sommer zeichnen sich besonders warme Wetterbedingungen durch Spitzen im Temperaturverlauf ab, die Innentemperaturen steigen Ende Juni auf ihr Jahresmaximum mit bis zu 30 °C. Die simulierten Temperaturen stimmen während der Hitzeperiode in ihrem Verlauf gut mit der Messung überein. Die verbleibenden Abweichungen sind ebenfalls mit der Unsicherheit im angenommenen Lüftungsverhalten zu erklären.

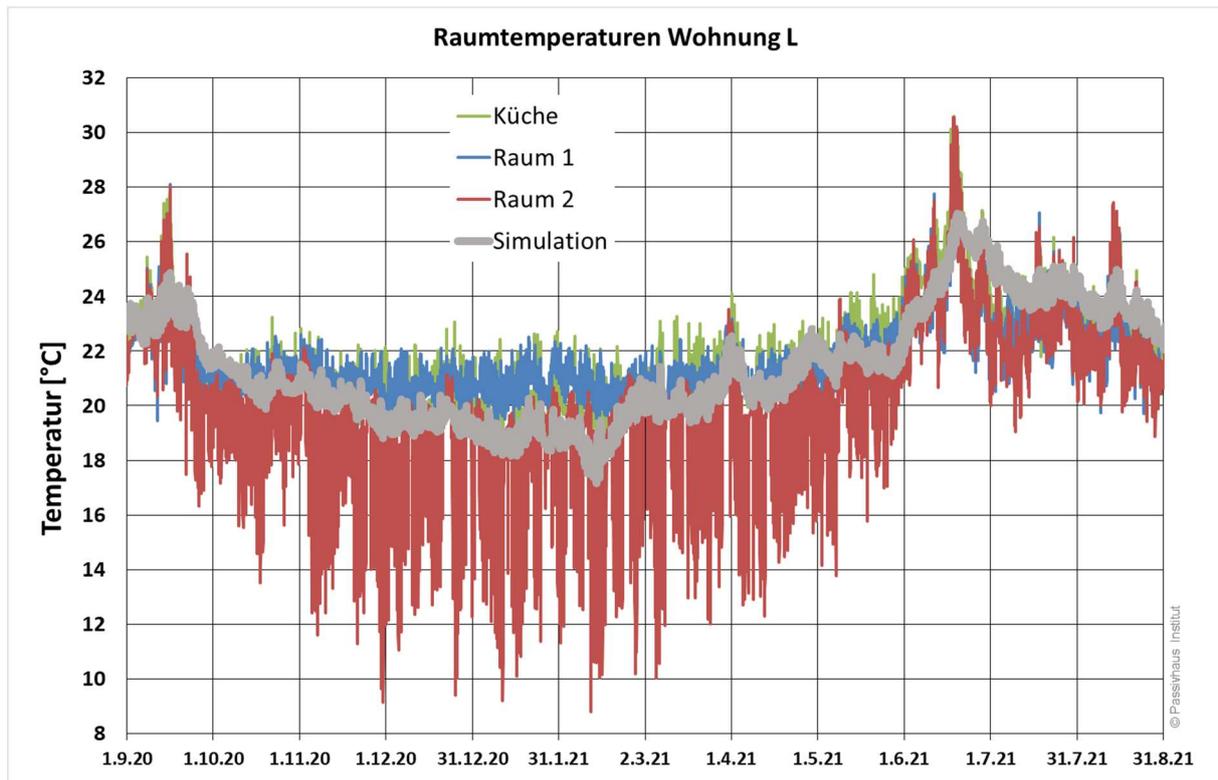
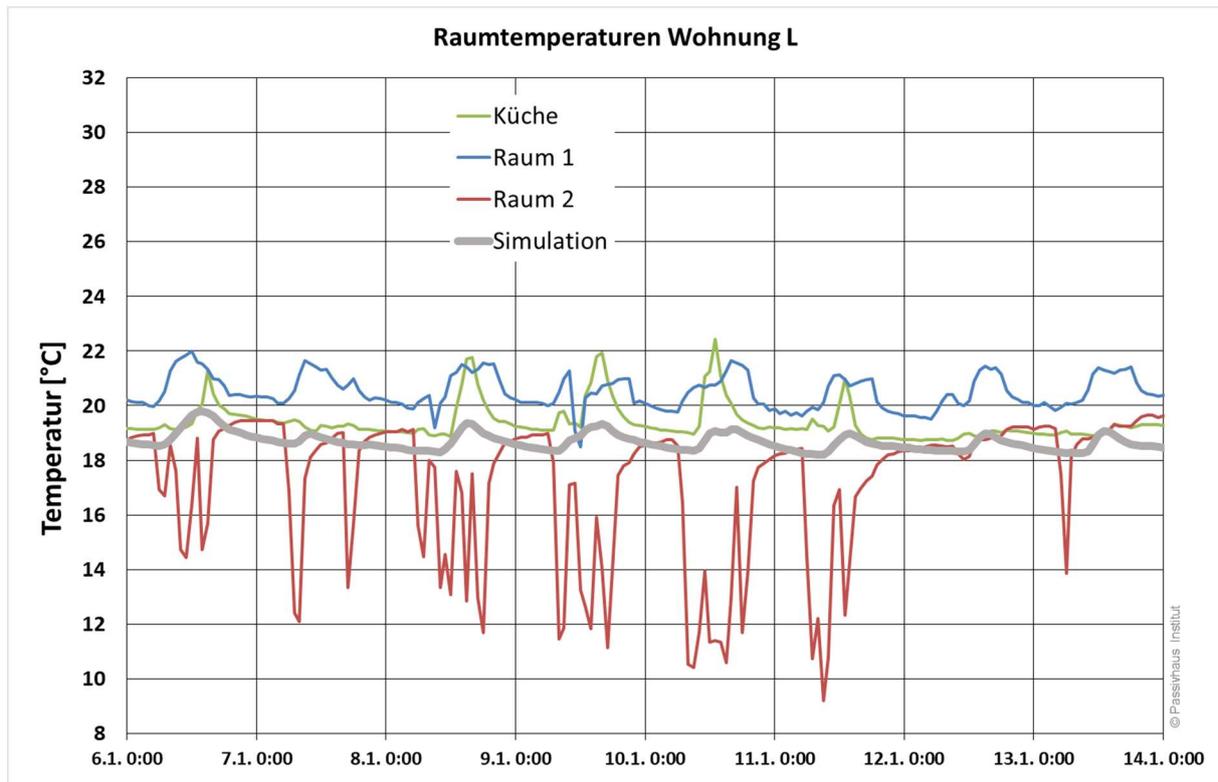


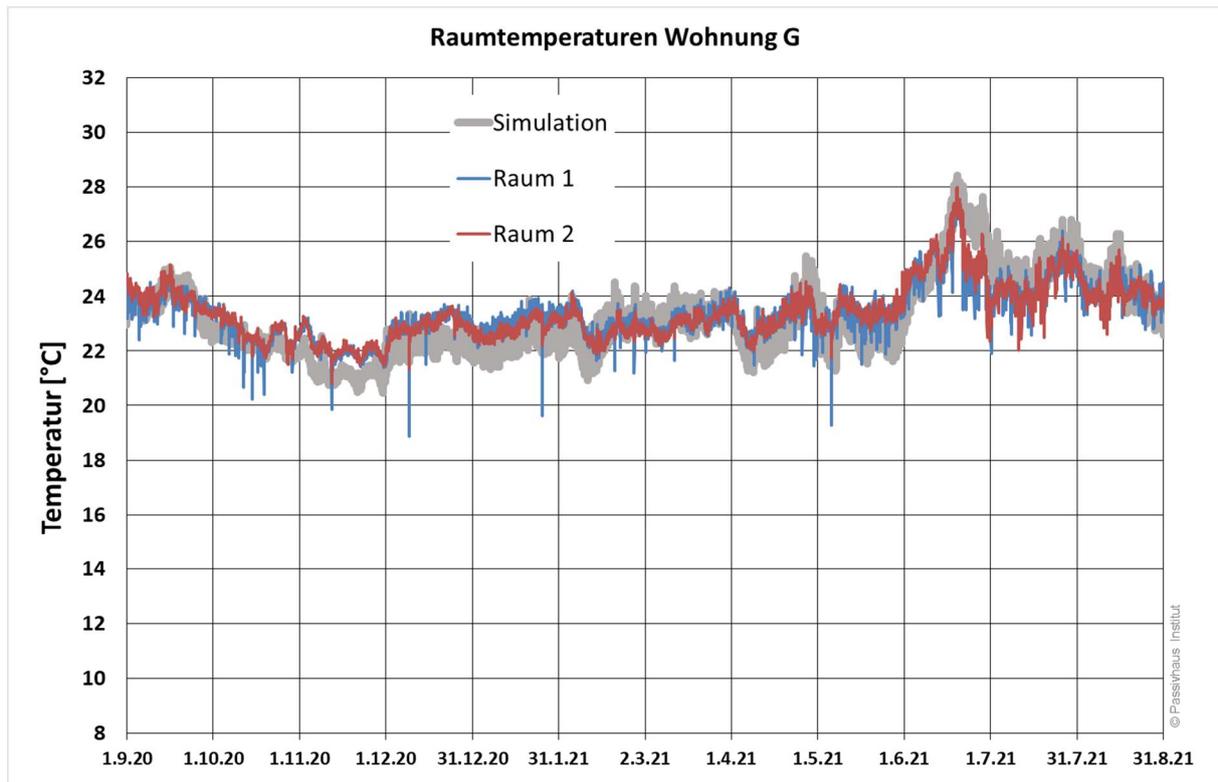
Abbildung 74: Jährlicher Temperaturverlauf der Wohnung L, simuliert und gemessen



**Abbildung 75: Temperaturverlauf der Wohnung L während einer typischen Woche im Januar**

Wohnung G unterscheidet sich im Nutzerverhalten stark von Wohnung L. Grundsätzlich zeigt sich im Verlauf der gemessenen Innentemperaturen eine deutlich geringere Schwankung. Einflüsse von Fensterlüftung sind in Abbildung 76 nur in Einzelfällen im Raum 1 zu erkennen. Dementsprechend wurde in der Simulation für den Kernwinter keine äquivalente Fensterlüftung angenommen.

Die Simulation der Wohnung G zeigt eine geringfügig höhere Differenz zu den gemessenen Temperaturen. Die Wintermonate haben in der Simulation vereinzelt zu niedrige Temperaturen, während im Sommer zu hohe Werte simuliert werden. Trotzdem ist erkennbar, dass die Simulation dem gleichen Kurvenverlauf folgt wie die Messung und die Differenzen in den Temperaturen in einem akzeptablen Bereich liegen. Außerdem unterscheiden sich die Temperaturen zwischen Sommer und Winter nicht so stark wie in Wohnung L. In der Hitzeperiode Ende Juni bleiben die Raumtemperaturen nahezu im Komfortbereich. Die warmen Temperaturspitzen sind ersichtlich, allerdings weniger ausgeprägt als in Wohnung L.

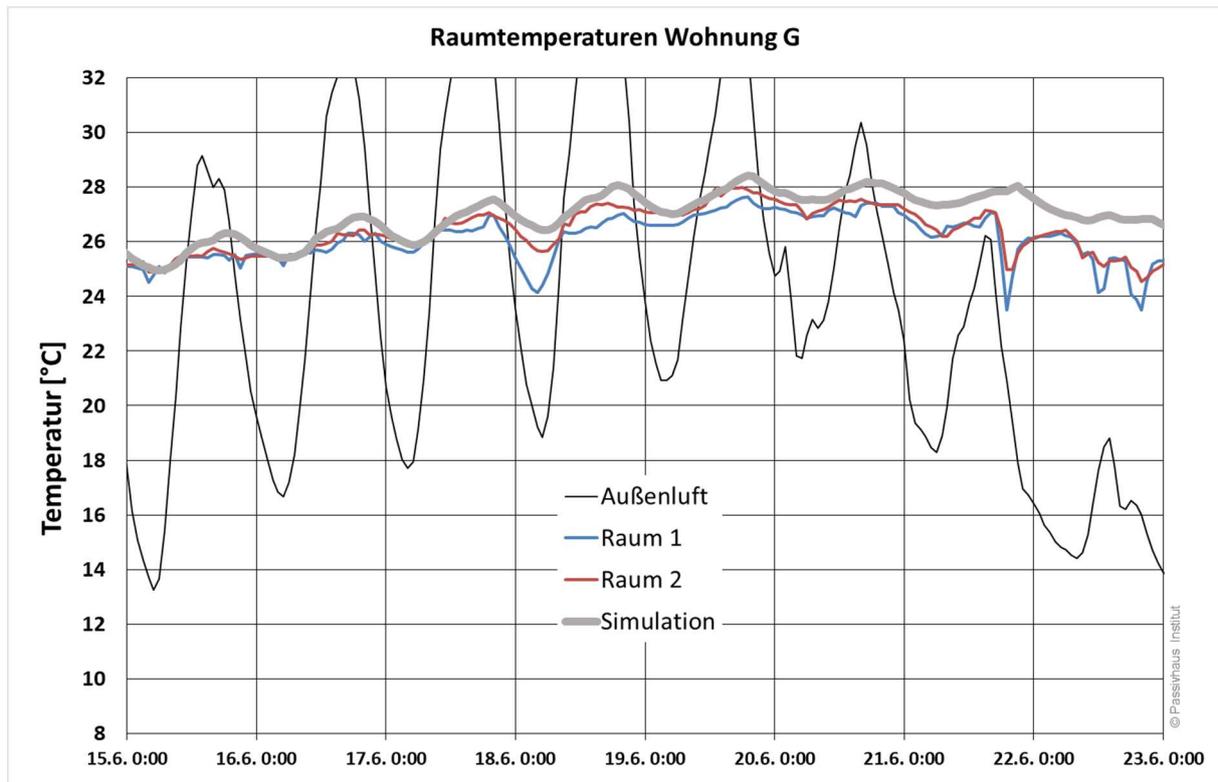


**Abbildung 76: Jährlicher Temperaturverlauf der Wohnung G, simuliert und gemessen**

Das Nutzerverhalten wird bei Betrachtung der Hitzeperiode im Juni 2021 transparent (Abbildung 77). In der Simulation wurde ein konstanter, zusätzlicher Außenluft-Volumenstrom in Höhe von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  verwendet, der ein typisches Sommerlüftungsverhalten plausibel abbildet. Die gemessenen Innentemperaturen werden damit im Mittel gut wiedergegeben.

Vom 15. bis 17.6.21 führt das zu stärkeren tageszeitlichen Temperaturschwankungen als gemessen. In der Nacht vom 17. auf den 18. Juni wird in Raum 1, vielleicht auch in Raum 2, ein Fenster geöffnet, um die Temperaturen zu senken. Ähnliche Ereignisse sind am 21. Juni abends und am 22. Juni zu erkennen. Im Vergleich mit dem Temperaturverlauf aus der Simulation, dem ein konstanter Fensterluftwechsel zugrunde liegt, wird der Einfluss solcher Nachtlüftungsereignisse transparent. Wie man sieht, kann die Nachtlüftung die Raumtemperatur um etwa 0,5 bis 1 K reduzieren.

Die vorhandenen Rollläden sind in der Simulation zu Abbildung 77 bei Temperaturen oberhalb von  $24 \text{ °C}$  geschlossen. Vermutlich war das auch im realen Betrieb der Fall, andernfalls würden die gemessenen Raumtemperaturen tagsüber stärker ansteigen.



**Abbildung 77: Temperaturverlauf der Wohnung G während der Hitzeperiode im Juni**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Simulationsmodell eine gute Grundlage für die Parameterstudien im folgenden Abschnitt darstellt, auch wenn einige Eingangsgrößen nur mit einer gewissen Unsicherheit zur Verfügung standen. Dies betrifft insbesondere die Anwesenheit der Nutzer, das Nutzerverhalten bzgl. Fensterlüftung und Einstellung der Verschattung, die Volumenströme der Lüftung und den Zustand des Bypass' in den Lüftungsanlagen.

## 5.3 Parameterstudien

### 5.3.1 Ausgangspunkt

In diesem Abschnitt werden mit Hilfe des Simulationsmodells die Einflüsse verschiedener Änderungen in den Bereichen Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzung untersucht. Ausgangspunkt dafür ist ein Basisfall, der vom Grundsatz her dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Referenzmodell entspricht, aber der besseren Übersichtlichkeit wegen in einigen Punkten verändert wurde. Hierzu zählen:

- Die winterliche Fensterlüftung, die es offenbar in einigen Wohnungen gab, wurde zunächst entfernt. In anderen Wohngebäuden, in denen konventionelle Dreh-Kipp-Fenster eingebaut sind, spielt die Fensterlüftung erfahrungsgemäß kaum eine Rolle.

- Im Winter wird für jede Wohnung eine thermostatisch geregelte, konvektive Heizung vorgesehen, die die operative Temperatur in der jeweiligen Zone auf dem Sollwert hält, sofern die Heizleistung hierfür ausreicht. Die Solltemperatur ist dabei in jeder Wohnung anders gewählt, und zwar so, dass die verschiedenen gemessenen Mitteltemperaturen im Winter auch im Basisfall vorkommen. Bei einem neuen Heizsystem würde man im Basisfall maximal 2000 W pro Wohnung installieren. Tatsächlich wurden im Zuge der Sanierung am Heizsystem keine bedeutenden Änderungen vorgenommen, auch die Temperatur des anliegenden Fernwärmeverlaufs ist unverändert; es steht also vermutlich fünf- bis zehnmal so viel Leistung zur Verfügung wie jemals benötigt wird. Im Basisfall wird die Heizleistung daher als unbegrenzt angenommen.
- Eine sommerliche Fensterlüftung nach einem festen Schema wurde vorgesehen. Steigt die operative Raumtemperatur um mehr als 2 K über die winterliche Solltemperatur, werden die Fenster (zunächst wenig) geöffnet; bei 3 K über der winterlichen Solltemperatur wird ein maximaler Außenluftvolumenstrom über die Fenster von 400 m<sup>3</sup>/h erreicht.
- Die Lüftungs-Wärmerückgewinnung läuft im Sommer im Bypass, wobei der genaue Zeitraum je nach Wohnung variiert. Bei sehr hohen Raumtemperaturen wird der Bypass nur im Juli genutzt, bei niedrigen Raumtemperaturen von Mai bis Oktober.
- Sofern vorhanden sind Rollläden von Mai bis September vollständig geschlossen, wenn die Raumlufttemperatur über 24 °C liegt. Unterhalb von 23 °C sind sie stets geöffnet. Das führt bei hohen Solltemperaturen dazu, dass trotz Heizung die Rollläden geschlossen sein können. Dies tritt aber nur in Einzelfällen auf.

Der Zeitverlauf der internen Wärmegewinne wurde gegenüber dem Referenzmodell nicht verändert.

### 5.3.2 Einfluss der Gebäudehülle

#### 5.3.2.1 Fensterrahmen

In der realisierten Sanierung wurden preiswerte, konventionelle PVC-Fensterrahmen mit Dreifachverglasung ausgeführt, die in der Mauerwerksebene eingebaut sind (vgl. Abbildung 9). In einer Variante wurden nun hochwertige Passivhausrahmen ausgewählt, die durch eine schmalere Ansichtsbreite (67 statt 119 mm) auch mehr solare Gewinne erlauben. Sie sind in der Dämmebene eingebaut und überdämmt, sodass ein Einbau- $\Psi$ -Wert von 0 statt der 0,069 W/(mK) in der realisierten Sanierung erreicht wird. Abbildung 78 zeigt das Ergebnis. Der Heizwärmebedarf sinkt durch bessere Fensterrahmen von 22,4 auf 17,0 kWh/(m<sup>2</sup>a). In dem relativ stark verschatteten, ost-west-orientierten Gebäude mit eher kleinen Fensterflächen ist nur ein kleiner Teil davon auf

die höhere transparente Fläche zurückzuführen; die solaren Gewinne wachsen nur um  $0,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

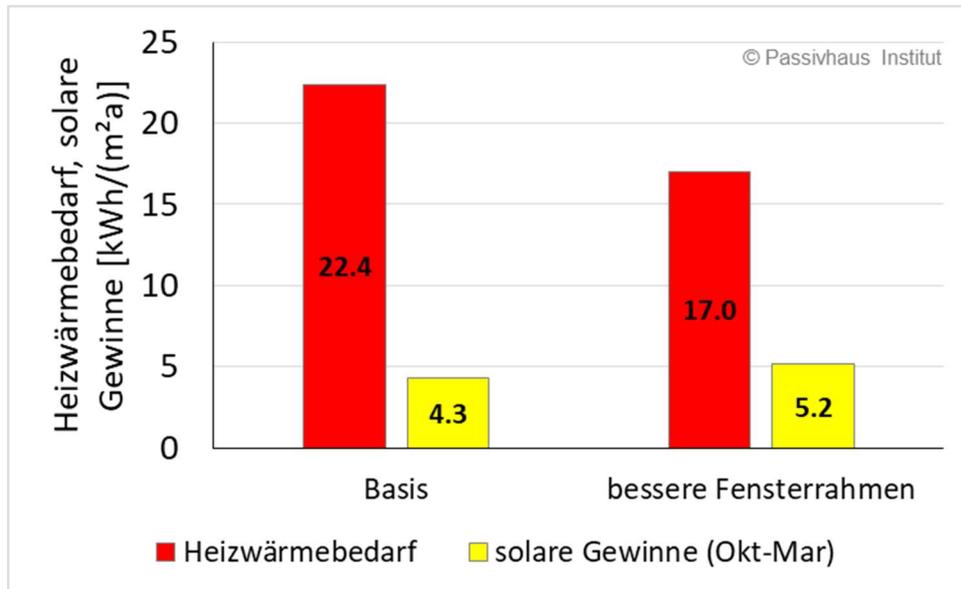


Abbildung 78: Auswirkungen besserer Fensterrahmen

### 5.3.2.2 Wärmeschutz der Wände und des Daches

In der realisierten Sanierung wurden die Wände mit 30 cm EPS der WLS 032 gedämmt, der U-Wert beträgt  $0,099 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Das Flachdach besitzt eine Gefälledämmung mit einem mittleren U-Wert von ebenfalls  $0,099 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Zum Vergleich wurden in der Simulation beide Dämmstoffstärken jeweils um ein Drittel bzw. die Hälfte reduziert.

Wie Abbildung 79 zeigt, wirken sich Veränderungen an der sehr guten Wärmedämmung zunächst nicht bedeutend aus. Selbst eine Halbierung der Dämmstoffstärke der Außenwand ließe sich durch die in Abschnitt 5.3.2.1 beschriebenen besseren Fensterrahmen nahezu kompensieren.

Ein guter Wärmeschutz ist natürlich trotzdem erforderlich: Würde man beispielsweise auf die Dämmung der Außenwand vollständig verzichten, wäre ein gewaltiger Anstieg des Heizwärmebedarfs auf  $105 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  die Folge. Außerdem würden die üblichen Probleme ungedämmter Bauteile, nämlich Komfortdefizite und die Gefahr von Schimmel, weiter bestehen.

Das dargestellte Ergebnis darf nicht so verstanden werden, dass hohe Dämmstoffstärken per se überzogen seien. Das wirtschaftliche Optimum liegt bei den höheren Werten ([Krick 2021]). Wenn Wand oder Decke ohnehin gedämmt werden, bietet es sich an, dieses Optimum auch zu realisieren.

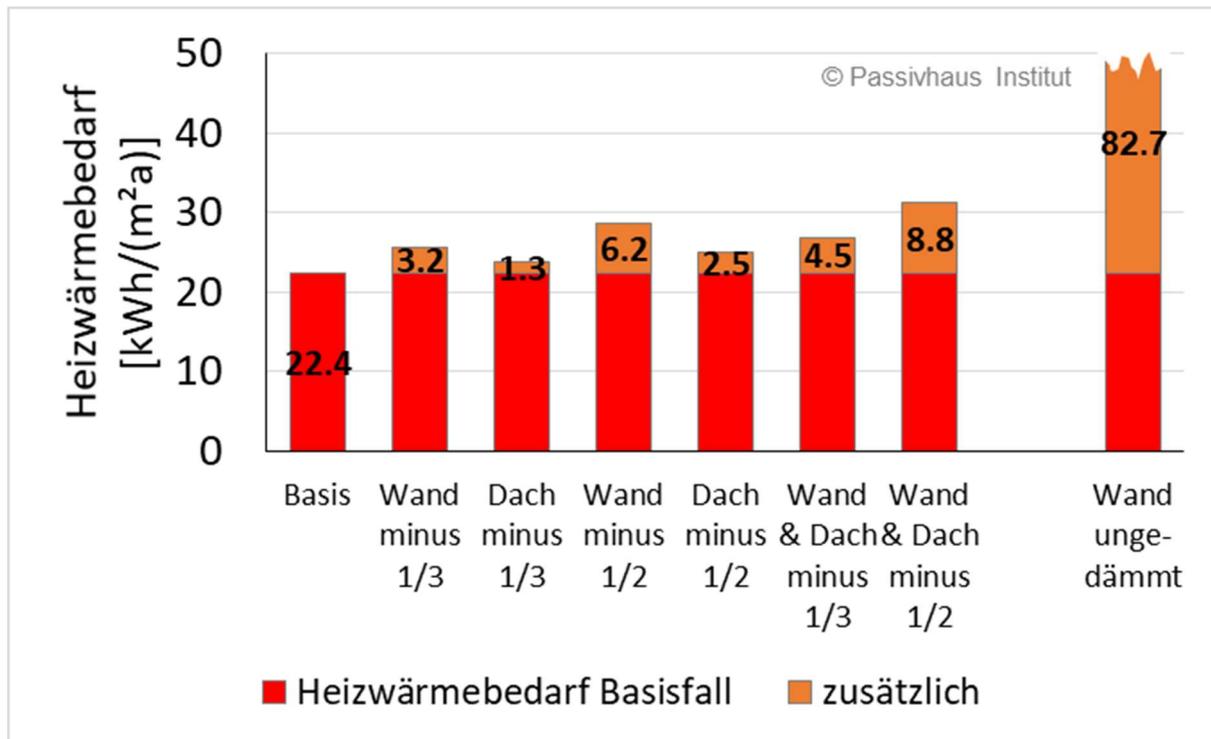


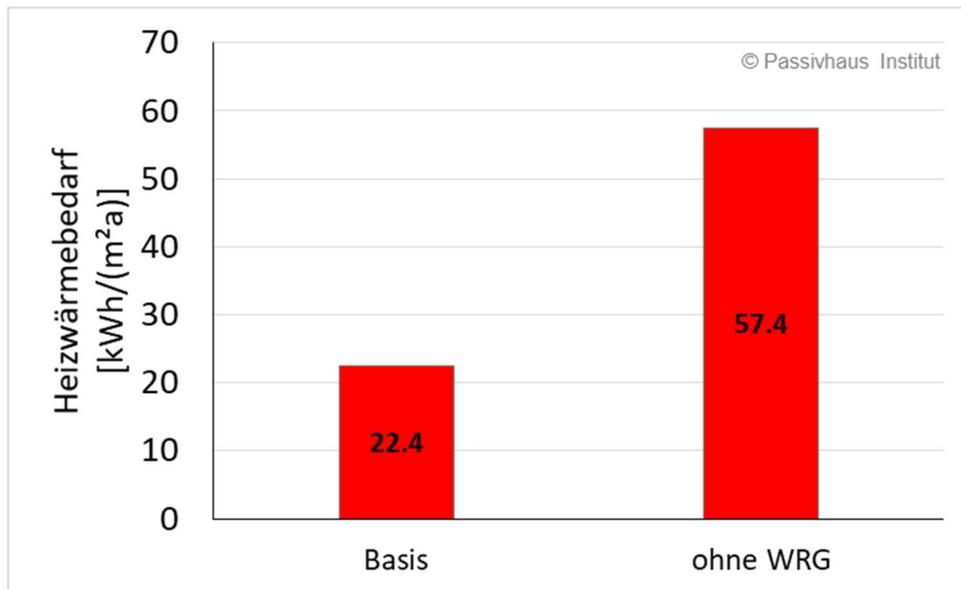
Abbildung 79: Auswirkung reduzierter Wärmedämmung in Wänden und Dach

### 5.3.3 Einfluss der Haustechnik

#### 5.3.3.1 Lüftungswärmerückgewinnung

In der realisierten Sanierung wurde in jeder Wohnung und in den Treppenhäusern je eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung installiert. Zum Vergleich wurden in einer weiteren Variante der Simulation überall reine Abluftanlagen angenommen, bei denen die in der Abluft enthaltene Wärme vollständig ungenutzt das Gebäude verlassen würde.

Der Heizwärmebedarf steigt dadurch erheblich, von 22 auf 57 kWh/(m²a). Aufgrund der dichten Belegung der Wohnungen muss der Luftwechsel relativ hoch sein, die Lüftungswärmerückgewinnung ist deshalb besonders relevant. Hier zeigt sich der große Einfluss einer Wärmerückgewinnungsanlage auf den Heizwärmebedarf. Dieser ist – neben dem Komfortgewinn - auch der Grund, warum aus thermischer Sicht Anlagen mit WRG der Vorzug zu geben ist. Kaum eine technische Anlage hat ein so gutes Verhältnis von eingesetzter Energie für Lüfterstrom und Frostschutz zu gewonnener bzw. eingesparter Energie. Im vorliegenden Fall wurde bei ganzjährigem Betrieb ein Stromverbrauch der Lüftungsgeräte von 3,7 kWh/(m²a) gemessen. Die Jahresarbeitszahl liegt also knapp unter 10. Würden die Lüftungsgeräte nur im Winter betrieben, läge sie weit über 10.



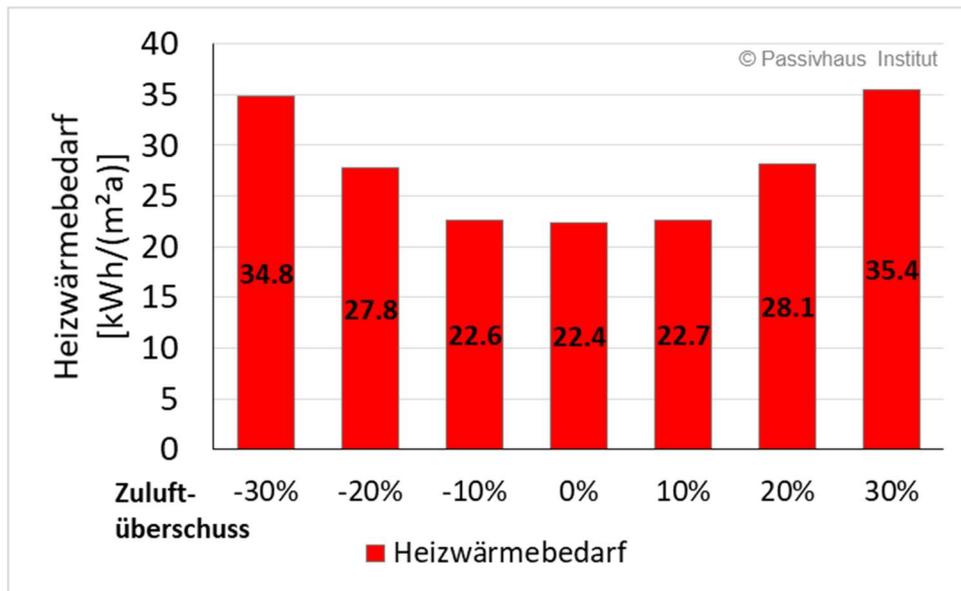
**Abbildung 80: Auswirkung fehlender Lüftungs-Wärmeückgewinnung („Basis“ enthält eine Wärmerückgewinnung für jede Wohnung)**

### 5.3.3.2 Lüftungsanlagen in Disbalance

In der realisierten Sanierung liefen die Lüftungsanlagen nicht überall mit balancierten Außen- und Fortluftmassenströmen (vgl. Abschnitt 3.6.1). Daher wurde in der Simulation untersucht, wie sich Disbalance der Luftmassenströme auswirkt. Vereinfachend werden dabei für den Basisfall perfekt luftdichte Lüftungsanlagen angenommen, bei denen Außen- und Zuluftmassenstrom stets identisch sind, ebenso wie Ab- und Fortluftmassenstrom. Es sind mehrere Effekte zu berücksichtigen:

- Die Temperaturverhältnisse in der Lüftungsanlage verschieben sich. Ist beispielsweise der Außenluftmassenstrom geringer als der Fortluftmassenstrom, so erwärmt sich die Außenluft stärker als sich die Abluft abkühlt.
- Ein Zuluftüberschuss führt zu verstärkter Exfiltration über die Gebäudehülle und umgekehrt.
- Bei Zuluftüberschuss entsteht ein Überdruck im Gebäude, der die Infiltrationsmassenströme reduziert. Mittels Korrelationen, die im [PHPP] angegeben sind, lässt sich dieser Einfluss quantifizieren.

Abbildung 81 zeigt, dass jenseits von 10% Disbalance der Heizwärmebedarf steil ansteigt. Im realisierten Gebäude lagen die gemessenen Disbalancen nach der für Abbildung 81 verwendeten Definition meist zwischen 0 und 30%. Daraus ergibt sich ein Mehrverbrauch an Heizwärme von mehr als 5 kWh/(m²a).



**Abbildung 81: Auswirkung von Disbalance in den Lüftungsanlagen. Der angegebene Zuluft-überschuss gibt an, um wieviel der Zuluftmassenstrom größer ist als der Mittelwert aus Ab- und Zuluftmassenstrom. Der Abluftmassenstrom ist entsprechend um denselben Betrag geringer als dieser Mittelwert.**

### 5.3.3.3 Fernwärmeverteilung im Gebäude

In der realisierten Sanierung erfolgen Raumheizung und Warmwasserbereitung über Fernwärmeübergabestationen, die sich direkt in den Wohnungen befinden (vgl. Abschnitt 2.1.1). Wie in Abschnitt 5.1.5 beschrieben wurde der Wärmeverlust der Steigleitungen zu den Wohnungen auf 50 W pro Wohnung geschätzt. Die Steigleitungen verlaufen innerhalb der thermischen Gebäudehülle in einer Abkoffierung in den Fluren. Die Wärmeleistung von 50 W pro Wohnung ergibt eine flächenspezifische Wärmemenge von 7,3 kWh/(m²a) als Mittelwert für das Gesamtgebäude.

Wie sich unterschiedliche Dämmstandards der Verteilung auswirken würden, zeigt Abbildung 82. Als hypothetisches Optimum wurde angenommen, dass die Verteilverluste entfallen. Zusätzlich zum Basisfall wurde eine Verdopplung bzw. Verdreifachung der Wärmeverluste betrachtet.

Ein Teil der Wärmeverluste fällt innerhalb der Heizperiode in den Wohnungen an, sodass sich der Heizwärmebedarf reduziert. Etwa 60% der jährlichen Wärmeverluste erweisen sich als nutzbar, die übrigen 40% gehen netto verloren. Empfehlenswert ist also in jedem Falle eine möglichst weit gehende Reduktion dieser Verluste. Das beeinflusst auch den sommerlichen Wärmeschutz positiv. Die sommerliche Spitzentemperatur (Gebäudemittelwert) ändert sich zwischen den Extremfällen um fast 1 Kelvin.

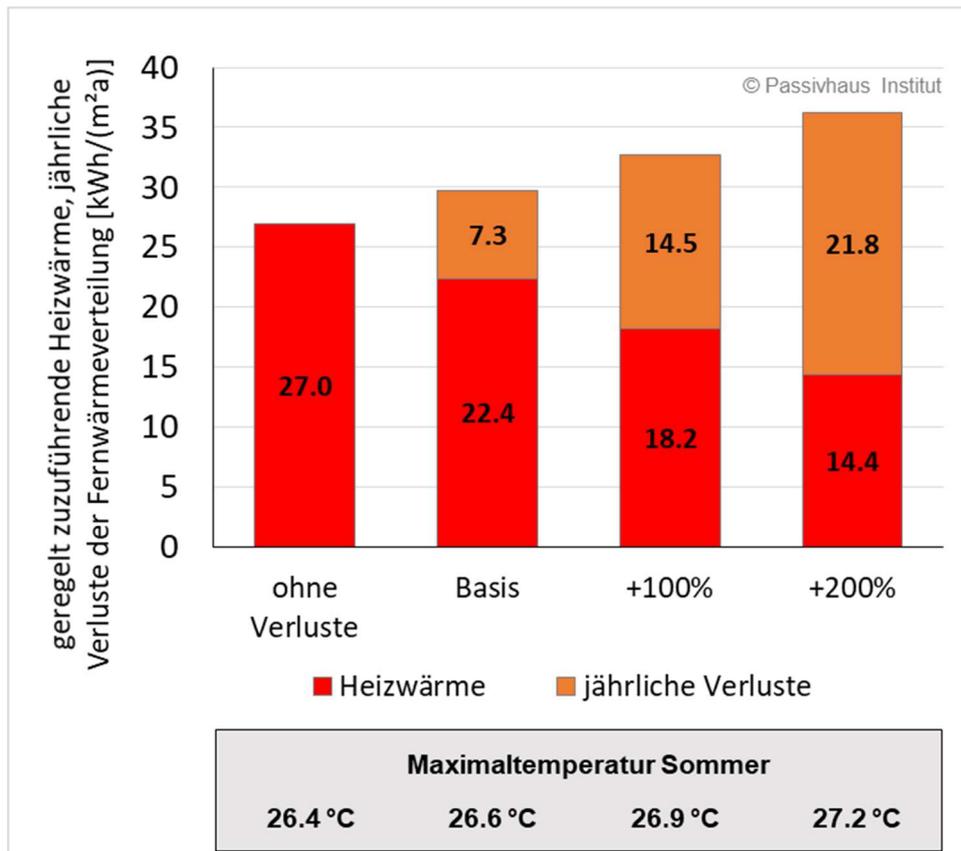


Abbildung 82: Auswirkung der Dämmung der Fernwärme-Verteilungen mit der Annahme des vollständigen Wegfalls, der Verdopplung oder der Verdreifachung der Wärmeverluste

#### 5.3.3.4 Wärmeübergabe: Fußbodenheizung

Wenn die benötigte Heizwärme über eine Fußbodenheizung anstelle einer rein konvektiven Heizung zugeführt wird, können sich dadurch die Durchschnittstemperaturen und der Temperaturverlauf ändern.

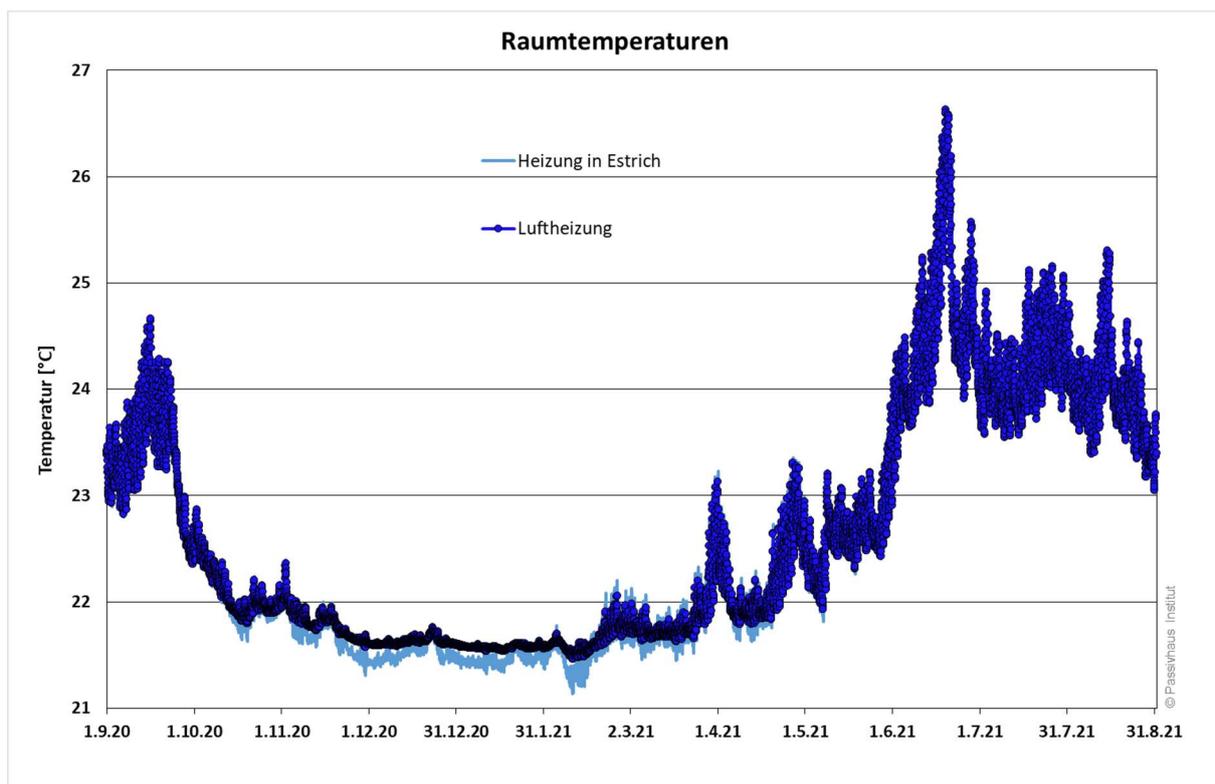
Als Beispiel wurde dieselbe Wärmeleistung, die für die konvektive Heizung im Basisfall benötigt wird, zusammen mit den internen Wärmequellen in den Estrich der entsprechenden Wohnung eingespeist. Da die Zwischendecken nur 15 mm Trittschalldämmung und einen U-Wert von  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  besitzen, kommt ein Teil der zugeführten Wärme nun dem darunterliegenden Raum zu Gute. Tabelle 11 zeigt, wie sich die Monatsmittelwerte der operativen Temperaturen in den Räumen dadurch verändern. Die Erdgeschossräume werden in der Heizperiode, vor allem im Kernwinter, wärmer, die Räume im Dachgeschoss entsprechend kälter. Die kurzzeitigen Temperaturschwankungen in den einzelnen Zonen, die sich durch die Umstellung ergeben, liegen in der Größenordnung von 0,5 K.

Die Durchschnittstemperatur im Gebäude verändert sich dagegen kaum; sie ist im Winter wenige Zehntel Kelvin niedriger (Abbildung 83). Von einer höheren Effizienz

einer Luft- bzw. einer Strahlungsheizung per se kann man folglich bei Gebäuden dieses Dämmniveaus nicht sprechen; welchem System der Vorzug zu geben ist, hängt von anderen Erwägungen ab.

**Tabelle 11: Auswirkung der Wärmezufuhr in den Fußboden statt in die Raumluft. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz gegenüber dem Basisfall.**

Differenz Sim - Basis	A	B	AA	BB	AAA	BBB	T	a	b	aa	bb	aaa	bbb	t
September 20	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Oktober 20	0.0	0.3	0.0	-0.4	0.0	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0
November 20	0.0	0.4	-0.2	-0.4	-0.1	-0.4	0.0	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.3	0.0
Dezember 20	0.2	0.5	-0.2	-0.4	-0.2	-0.6	0.0	0.2	0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.5	0.0
Januar 21	0.3	0.6	-0.2	-0.4	-0.3	-0.7	0.0	0.3	0.3	-0.1	-0.1	-0.5	-0.6	0.0
Februar 21	0.3	0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.6	0.0	0.4	0.3	-0.1	0.0	-0.4	-0.5	0.1
März 21	0.2	0.4	-0.1	-0.3	0.0	-0.3	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	-0.2	-0.2	0.1
April 21	0.1	0.3	0.0	-0.2	0.0	-0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.1
Mai 21	0.0	0.2	0.0	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juni 21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juli 21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
August 21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



**Abbildung 83: Auswirkung der Wärmezufuhr in den Fußboden statt in die Raumluft auf den Zeitverlauf der Gebäudemitteltemperatur.**

### 5.3.3.5 Wärmeübergabe: Zuluftheizung

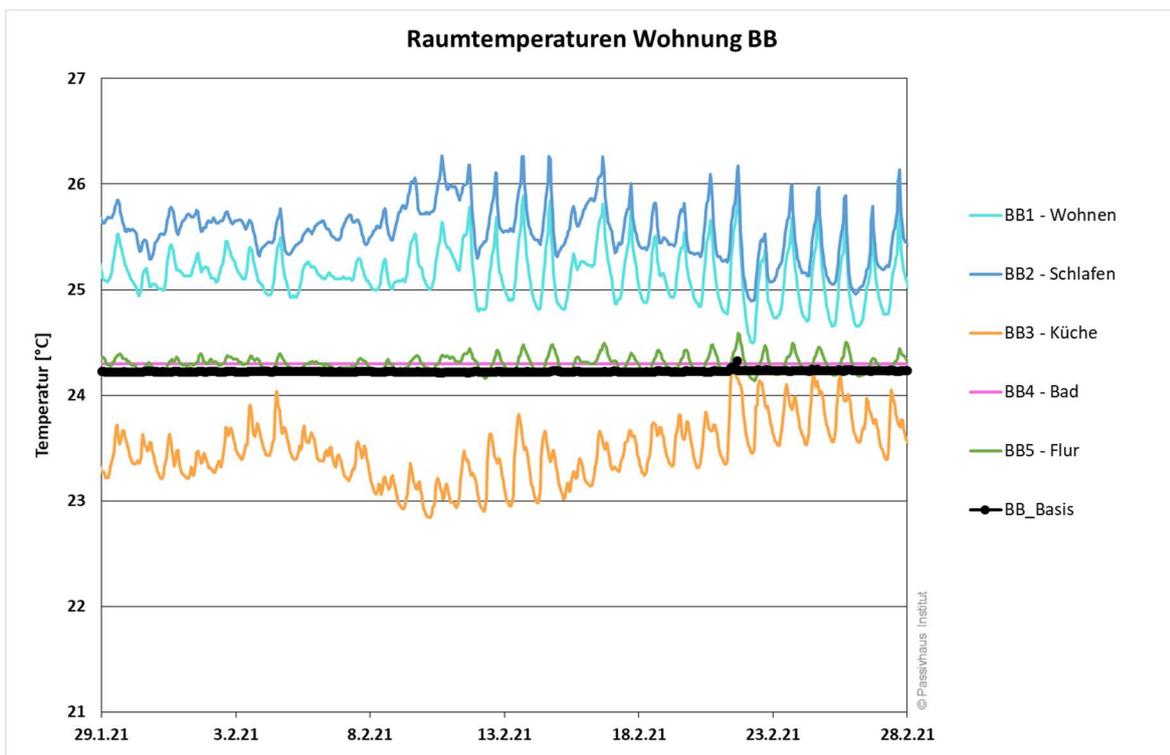
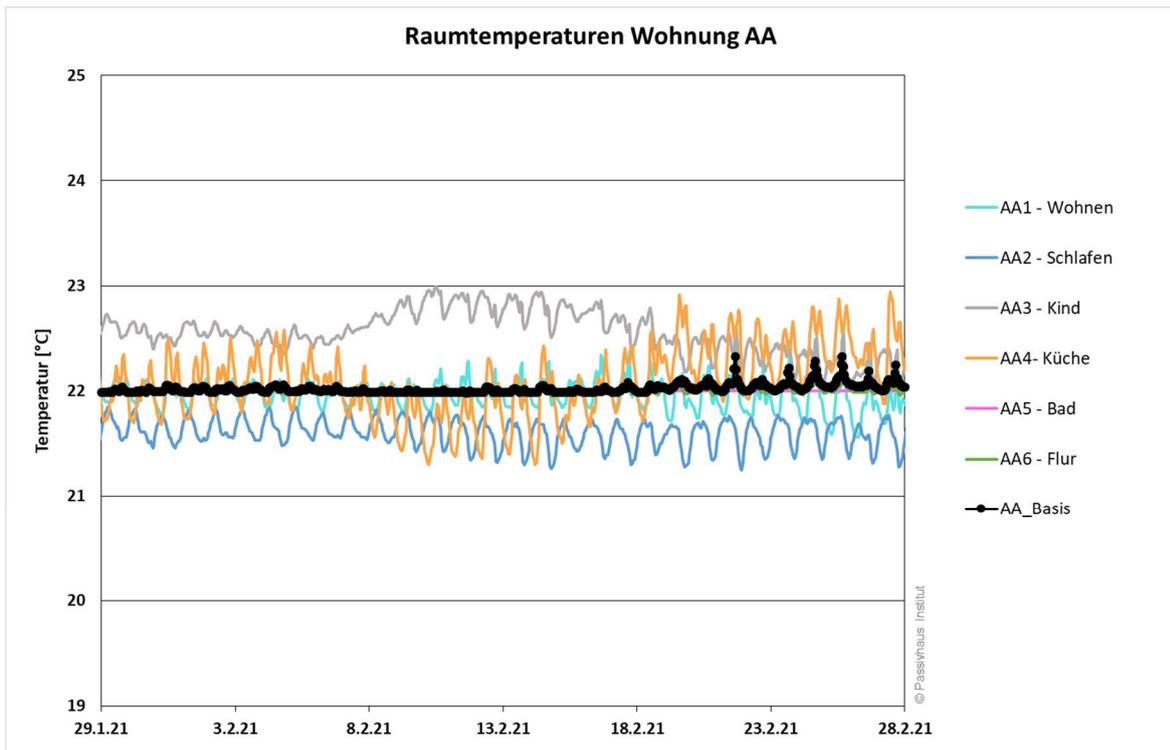
In der realisierten Sanierung wird die Wärme für die Raumheizung über Heizkörper zugeführt. Mit Ausnahme der Flure hat jeder Wohnraum einen eigenen Heizkörper,

der in Fensternähe angeordnet ist (vgl. Abbildung 71). Beim untersuchten Gebäude handelt es sich um eine EnerPHit-Sanierung und nicht um ein Passivhaus, der Heizwärmebedarf ist daher etwas höher. Dennoch ist von Interesse, ob neben der in Abschnitt 5.3.3.4 diskutierten Fußbodenheizung auch eine Beheizung über die ohnehin zugeführte Zuluft möglich wäre. Dies wäre zwar für Wärmepumpenheizungen nicht sinnvoll, da zu hohe Vorlauftemperaturen benötigt werden, in Verbindung mit dem vorhandenen Fernwärmeanschluss könnte diese Option jedoch in Frage kommen.

Untersucht wurde dies in den Wohnungen AA und BB, in denen das Simulationsmodell raumweise aufgelöst ist. Die erwärmte Zuluft gelangt in die Wohn-, Schlaf- und ggf. Kinderzimmer und beheizt zunächst diese. Die Regelung erfolgt dabei so, dass nach Möglichkeit im zentralen Flur (Zone AA6 bzw. BB5) eine konstante Solltemperatur gehalten wird. Ein zusätzlicher Luftaustausch durch die Innentüren, der die Temperaturen der Räume weiter vergleichmäßigen würde, ist in dieser Simulationsvariante nicht angesetzt; die Innentüren bleiben also geschlossen, es handelt sich diesbezüglich um eine Worst-Case- Annahme. In den Bädern (Zone AA5 bzw. BB4) wird ein zusätzlicher Badheizkörper angenommen, da die Heizung in Bädern nach Norm ohnehin auf eine Temperatur von 24 °C auszulegen ist. Abbildung 85 zeigt die für den Fall Zuluftheizung resultierenden operativen Temperaturen im besonders kalten Februar 2021 (vgl. Abbildung 30) unter der Annahme, dass auch der Badheizkörper mit derselben Solltemperatur geregelt wird, die für die Wohnung angesetzt wurde. Die Bandbreite der Temperaturen in den verschiedenen Zonen einer Wohnung läge damit in der Regel bei  $\pm 1$  K. Das entspräche weiterhin der besten Komfortkategorie A nach ISO 7730 (vgl. auch [Passipedia 2022]).

Eine Ausnahme stellt nur die Küche (Zone BB3) in Wohnung BB dar. Hier sind die internen Wärmegegewinne nur etwa halb so groß wie in der Küche von Wohnung AA. Berücksichtigt man diese, kann die Temperaturbandbreite während der Kälteperiode auf bis zu  $\pm 1,5$  K ansteigen. In dieser Periode wächst auch die Gebäudeheizlast auf mehr als 10 W/m<sup>2</sup> an. Bei mildereren Temperaturen ist die Bandbreite der Raumtemperaturen wieder geringer.

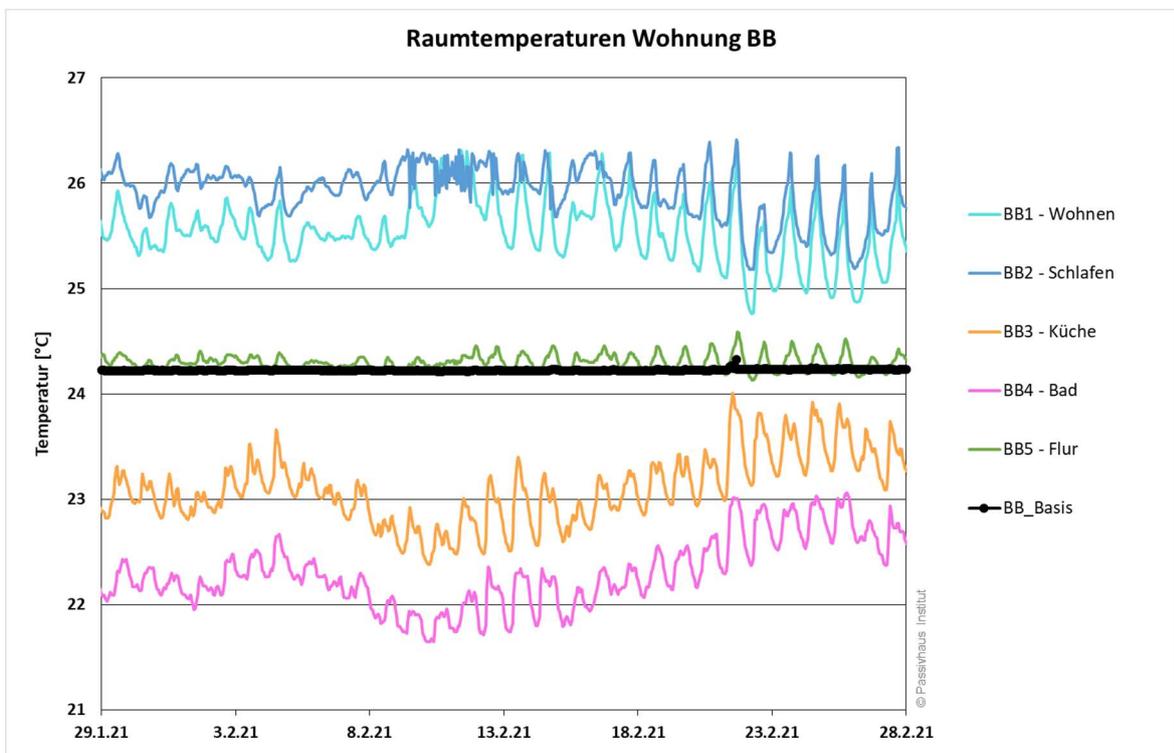
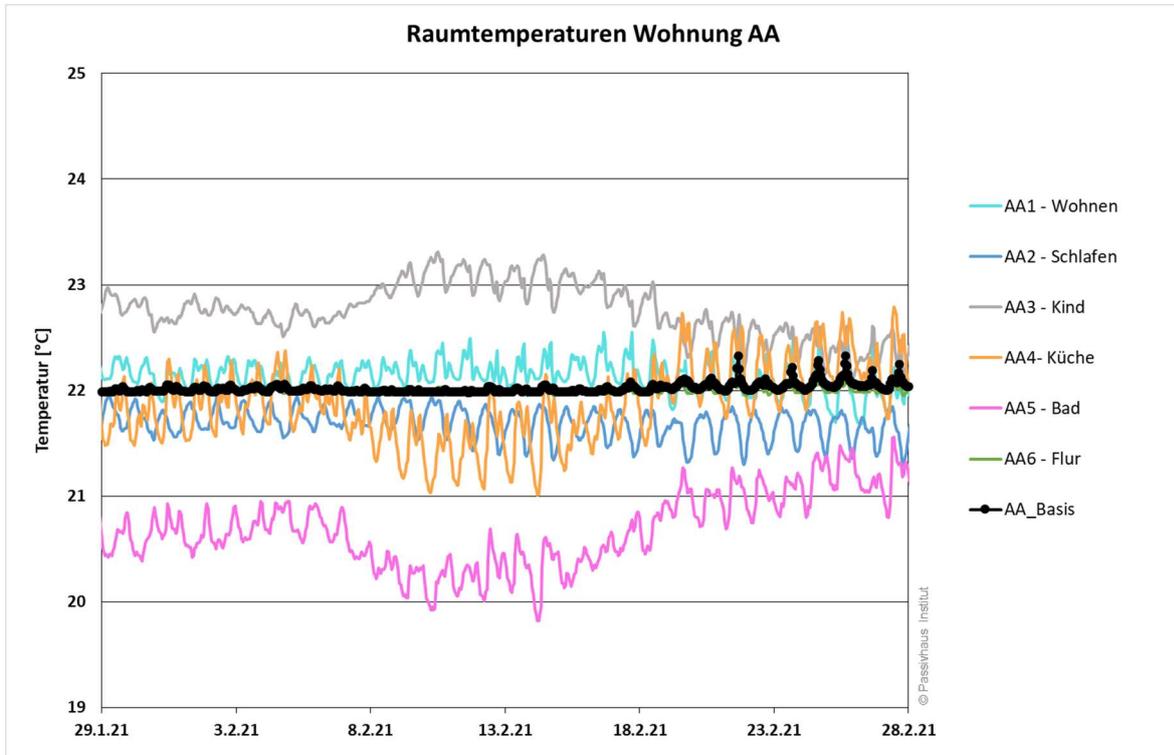
Durch einen kleinen Elektroheizkörper oder eine zum Flur hin geöffnete Tür ließe sich die Temperatur in der Küche leicht ausreichend anheben.



**Abbildung 84: Auswirkung der Wärmezufuhr per Zuluftheizung in die Wohnung auf die Raumlufttemperaturen, im Vergleich zum Basisfall der raumweisen, konvektiven Beheizung. Variante mit Badheizkörper.**

Die Temperaturen in der Simulationsvariante mit Zuluftheizung, aber ohne Badheizkörper zeigt Abbildung 85. Mitte Februar erreicht die Bandbreite der Temperaturen in diesem Fall bis zu  $\pm 2$  K. Die eindeutig niedrigsten Temperaturen sind dabei gerade in

den Bädern zu beobachten, die an das unbeheizte Treppenhaus grenzen und in denen aufgrund von Verdunstung, Wärmeabgabe an die Toilettenspülkästen etc. die internen Wärmegewinne gering sind.



**Abbildung 85: Auswirkung der Wärmezufuhr per Zuluftheizung in die Wohnung anstelle einer raumweisen, konvektiven Beheizung. Variante ohne Badheizkörper.**

## 5.3.4 Einfluss des Nutzungsverhaltens

### 5.3.4.1 Fensteröffnung

Wie wirken sich in einem Mehrfamilienhaus im Winter geöffnete Fenster auf die Energiebilanz und die Raumtemperaturen aus? Dazu wurden am Beispiel des Schlafzimmers in der Wohnung BB einige Simulationsläufe durchgeführt, und zwar für ein weit geöffnetes und für ein gekipptes Fenster. Das Fenster in diesem Raum hat zwei Flügel mit einer lichten Öffnung von je ca. 1,00 m Breite und 1,25 m Höhe.

Die zusätzlichen Luftmengen bei Fensterlüftung wurden mit Hilfe des [PHPP] ermittelt, der windgetriebene Luftaustausch wurde dabei vernachlässigt. Für einen geöffneten Flügel ergibt sich bei 1 K Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ein Luftvolumenstrom von 185 m<sup>3</sup>/h, für ein gekipptes Fenster mit wirksamer Öffnungsweite 5 cm sind es 11 m<sup>3</sup>/h. Der temperaturgetriebene Volumenstrom wächst proportional zur Wurzel aus der Temperaturdifferenz, dies wurde in der Simulation berücksichtigt.

Abbildung 86 zeigt die Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes. Das eine dauerhaft gekippte Fenster wirkt sich auf das Gesamtgebäude nur mäßig aus: Selbst wenn das Schlafzimmer mit dem gekippten Fenster auf der Solltemperatur gehalten würde, würde der Heizwärmebedarf des Gebäudes nur um 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) oder etwa 12 % wachsen. Wird der Raum – was das wahrscheinlichere Szenario sein dürfte – nicht beheizt, beträgt der Mehrbedarf an Heizwärme nur 1,4 kWh/(m<sup>2</sup>a). An den kältesten Tagen der Messperiode sinken die Raumtemperaturen dann gegenüber dem beheizten Basisfall um fast 8 K ab, gegenüber dem unbeheizten Fall mit geschlossenem Fenster um bis zu 4 K (grüne und blau gestrichelte Linien in Abbildung 87).

Für ein weit geöffnetes Fenster können die Auswirkungen aber erheblich sein. Wenn ausreichend Heizleistung zur Verfügung stehen würde, um den Raum trotz offenem Fenster auf der Solltemperatur zu halten, würde sich der Heizwärmebedarf *des gesamten Gebäudes* durch ein einzelnes offenes Fenster verdreifachen.

Wird der entsprechende Raum nicht beheizt, sind die Wärmeverluste geringer. Dann sinkt die Temperatur im Raum allerdings bis auf 2 °C, wie man ebenfalls in Abbildung 87 sieht. Dort ist auch zu erkennen, dass eine Heizung mit angemessener Leistung entsprechend Abschnitt 5.3.1 (hier: 500 W pro Raum, was bei bestimmungsgemäßem Betrieb mehr als ausreichend ist) in dieser Situation nicht in der Lage ist, die Raumtemperatur nennenswert anzuheben. Umgekehrt zeigt Abbildung 86, dass der zusätzliche Heizwärmebedarf in diesem Fall noch vergleichsweise moderat ausfällt.

Einen Vergleich mit den gemessenen Temperaturen im realisierten Objekt erlaubt Abbildung 88. Die dort dargestellten Raumtemperaturen sinken bis auf ca. 10 °C. Das

ist konsistent mit den Simulationsergebnissen, zumal in der Messung die Fenster nur zeitweise geöffnet werden und die Temperatur der Wärmekapazitäten im Raum sich zwischenzeitlich immer wieder erholen kann.

Das realisierte Objekt ist nur mit Drehfenstern ausgestattet. Man kann schlussfolgern, dass ständig weit offen stehende Fenster dort nicht vorkamen, denn sonst hätte der gemessene Verbrauch wesentlich höher sein müssen.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Empfehlungen für die Planung ableiten, die es erleichtern, in der Praxis einen niedrigen Heizwärmeverbrauch zu erzielen:

- Die verfügbare Heizleistung sollte nicht wesentlich größer sein als die Heizlast der jeweiligen Räume. Diese Empfehlung kann Ansätzen einer netzdienlichen Wärmeversorgung entgegenstehen, bei denen bei Verfügbarkeit erneuerbarer Energien größere Mengen Wärme im Gebäude eingespeichert werden. Grundsätzlich wäre letzteres möglich, denn mit Passivhauskomponenten sanierte Massivbauten können einige Tage ohne Heizung überbrücken. Erfahrungen mit solchen Strategien stehen jedoch noch aus.
- Die üblichen Dreh-Kipp-Fenster haben sich in anderen Projekten regelmäßig gut bewährt. Sie kommen den Nutzergewohnheiten entgegen, der zusätzliche Energieverbrauch ist beherrschbar. In der realisierten Sanierung wurde versucht, durch reine Drehfenster zusätzlich Energie zu sparen. Die Messungen zeigen, dass dies nicht zielführend ist.

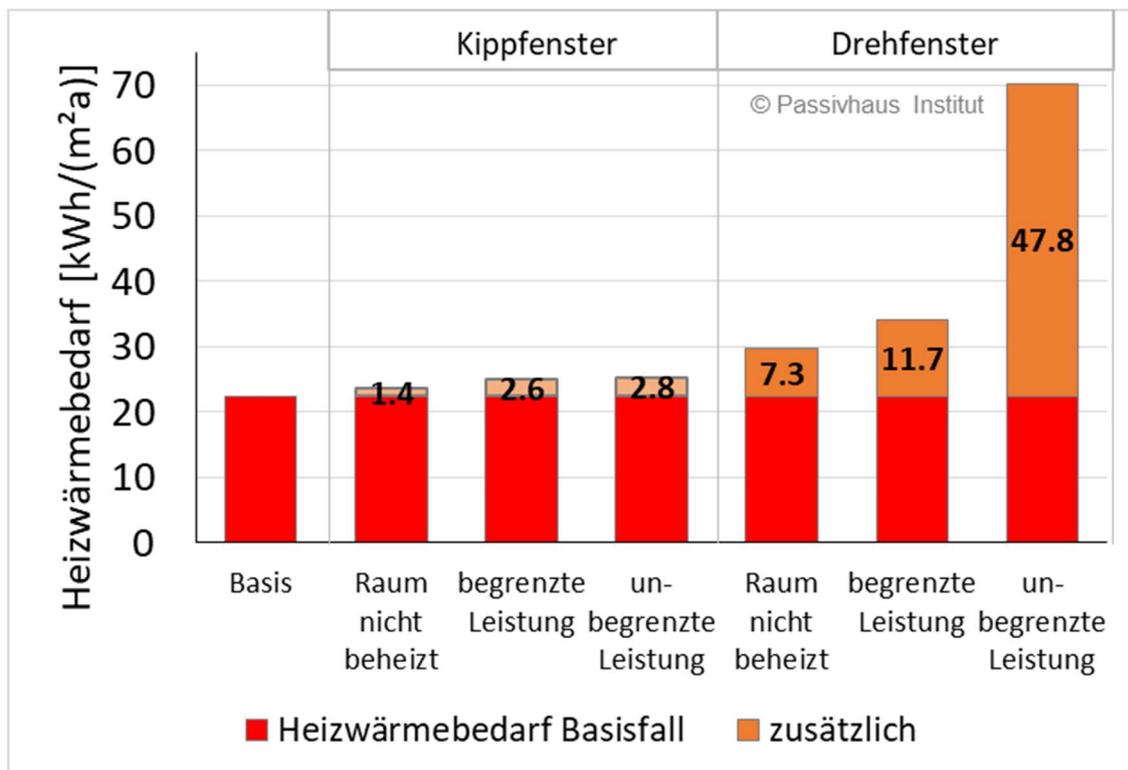
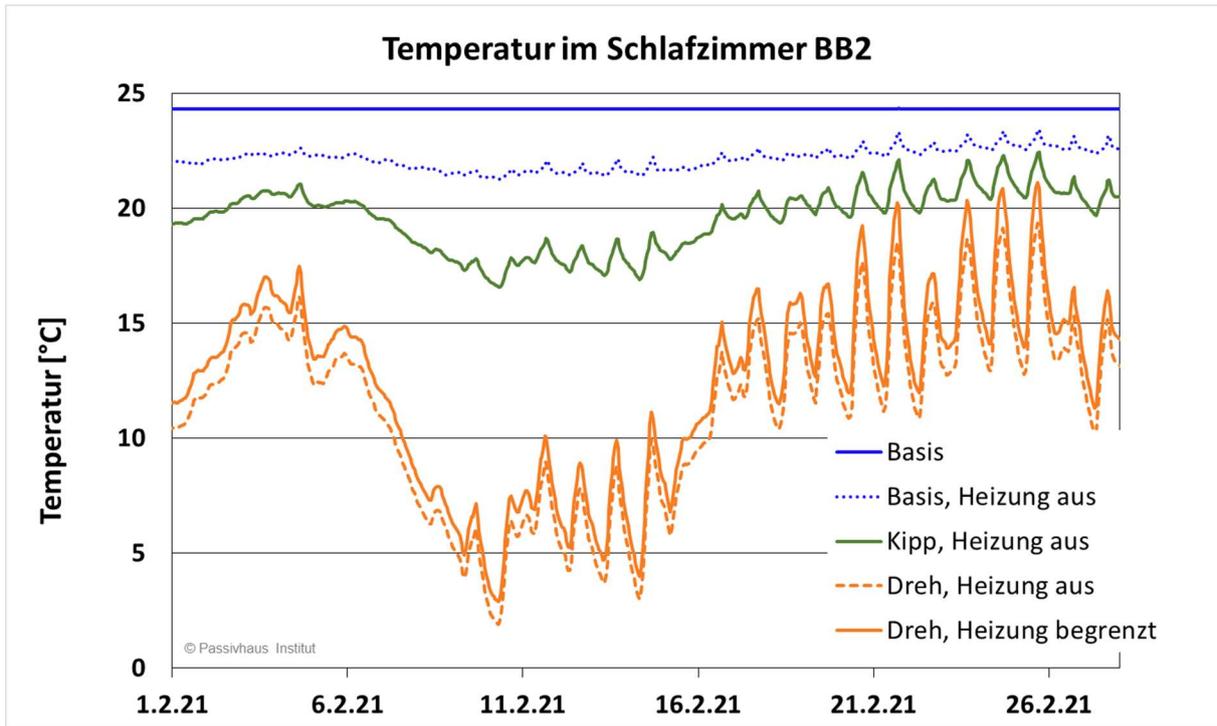
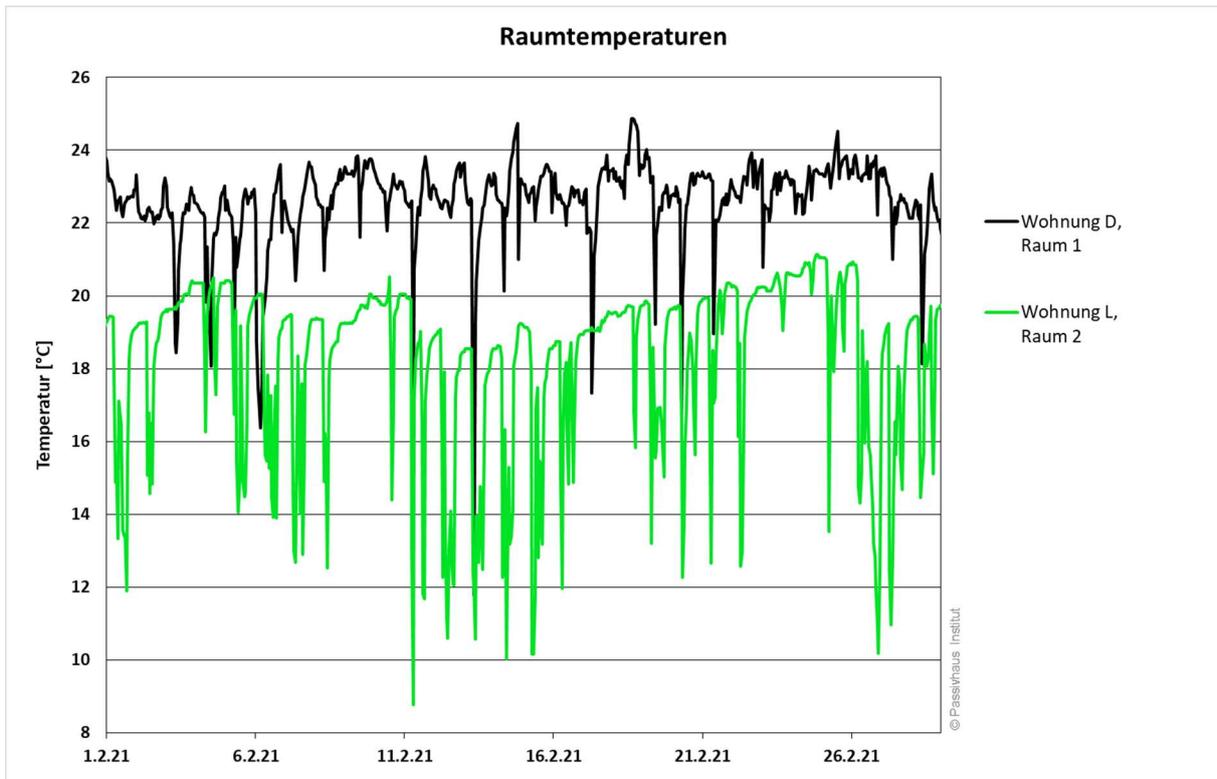


Abbildung 86: Auswirkung eines gekippten bzw. geöffneten Fensters im Raum BB2.



**Abbildung 87: Operative Temperaturen im Raum BB2 für ein geschlossenes, gekipptes und weit geöffnetes Fenster. Je nach Variante wird der Raum nicht oder nur mit begrenzter Leistung beheizt.**



**Abbildung 88: Zum Vergleich mit Abbildung 87: gemessene Raumtemperaturen in zwei Räumen, in denen häufigere Fensterlüftung im Temperaturprofil erkennbar ist.**

### 5.3.4.2 Nutzung der Rollläden

In der realisierten Sanierung sind die Fenster, mit Ausnahme der relativ kleinen Öffnungen auf der Ostseite, mit Rollläden ausgestattet. Aus thermischer Sicht wären diese Rollläden idealerweise im Sommer tagsüber geschlossen, im Winter dagegen am Tag geöffnet, um solare Gewinne zu nutzen.

Die Bedeutung der Rollläden ist im hier untersuchten Gebäude nicht sehr groß. Die beiden Extremfälle ständig geöffneter und (noch weit unwahrscheinlicher) ständig geschlossener Rollläden zeigt Abbildung 89. Im Heizwärmebedarf beträgt der Unterschied 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>a), die sommerliche Maximaltemperatur unterscheidet sich um 1 K. Der Basisfall, in dem die Rollläden nur von Mai bis September genutzt werden, liegt bezüglich Heizung und Sommertemperatur jeweils nahe am günstigsten Wert.

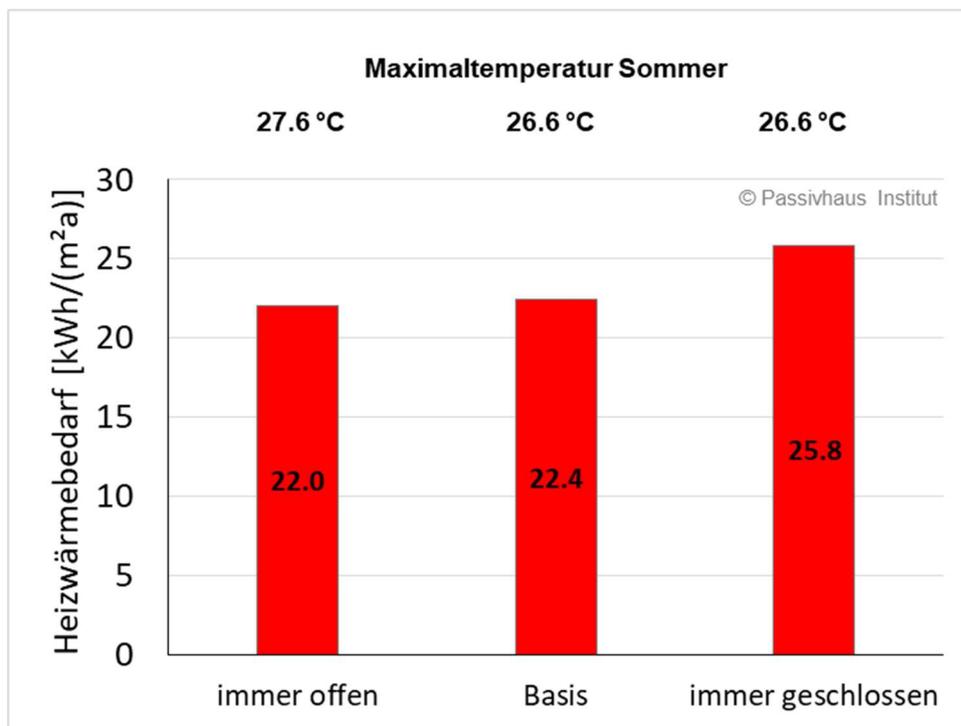


Abbildung 89: Heizwärmebedarf mit stets offenen oder stets geschlossenen Rollläden

### 5.3.4.3 Einfluss des Betriebs einzelner Wohnungen auf den Heizwärmebedarf

Grundsätzlich ist von gut gedämmten Gebäuden bekannt, dass die thermische Kopplung zwischen angrenzenden Wohnungen einen bedeutenden Einfluss auf den Heizwärmeverbrauch jeder Wohnung besitzt. Sollen höhere Raumtemperaturen erreicht werden, müssen nicht nur die höheren Wärmeverluste an die Außenluft gedeckt werden, es sind auch die Querwärmeströme in die angrenzenden Wohnungen auszugleichen.

Wie man in Abbildung 90 sieht, wirkt sich das im untersuchten Mehrfamilienhaus in besonderem Maße aus. Wird die Solltemperatur im gesamten Gebäude um 2 K erhöht, wächst der Heizwärmebedarf um ca. 8 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. knapp 40%. Wird die Solltemperatur dagegen nur in Wohnung AA um 2 K erhöht, verdreifacht sich deren Heizwärmebedarf ungefähr. Für den Gesamt-Energiebedarf stellt das kein Problem dar, denn Wohnung AA heizt die angrenzenden Wohnungen mit, sodass deren Heizwärmebedarf sinkt. Der (in Abbildung 90 nicht explizit dargestellte) Heizwärmebedarf des Gesamtgebäudes wächst daher durch die höhere Temperatur in Wohnung AA nur um 7%.

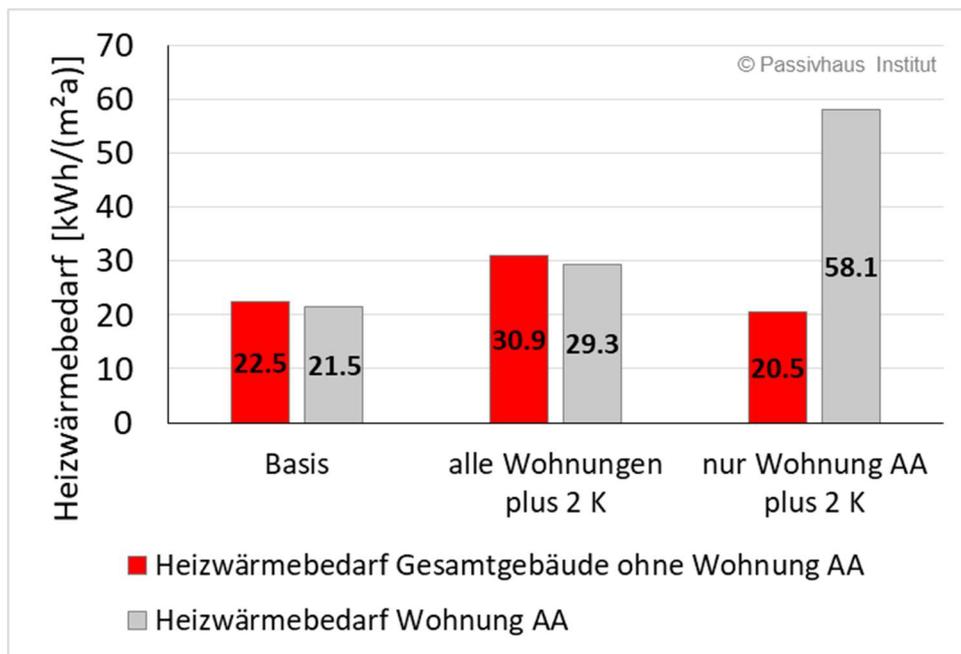


Abbildung 90: Heizwärmebedarf bei um 2 Kelvin erhöhter Temperatur

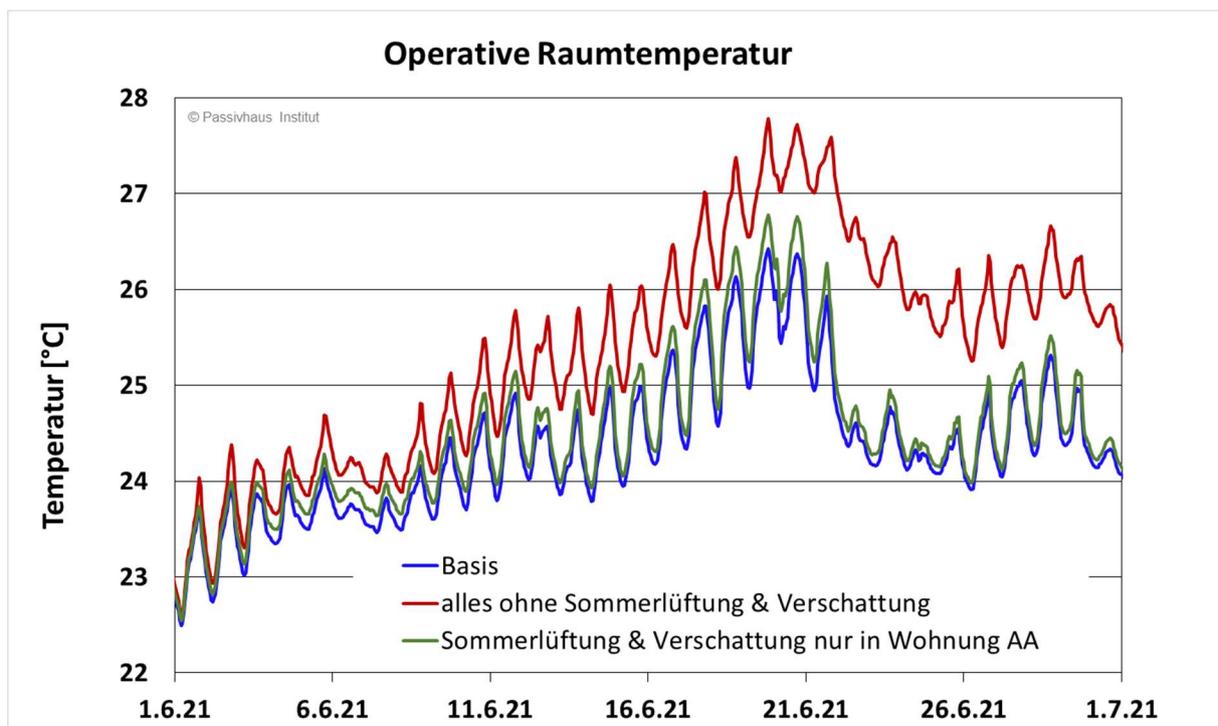
#### 5.3.4.4 Einfluss des Betriebs einzelner Wohnungen auf den sommerlichen Komfort

In Abschnitt 5.3.4.3 wurde gezeigt, wie stark der Heizwärmebedarf einer Wohnung von den Temperaturen der Nachbarwohnungen beeinflusst wird. In diesem Abschnitt wird nun die Frage behandelt, ob die Sommertemperaturen ähnlich stark vom Zustand der benachbarten Wohnungen abhängen.

Im Basisfall wird angenommen, dass die Nutzerinnen und Nutzer sich so verhalten, dass ein akzeptabler Komfort überall erreicht werden kann. Im flächengewichteten Mittel über alle Zonen ist das Gebäude dann während 4,4% des Jahres wärmer als 25 °C. Die in derselben Weise gemittelten Übertemperaturgradstunden bzgl. 25 °C sind mit 204 Kh weit unter der Grenze der DIN 4108 von 1200 Kh; für den Standort Gießen wären sie sogar bzgl. 26 °C zu berechnen. Baulich-technische Gründe für das gute Ergebnis sind die ohnehin günstigen Voraussetzungen eines Massivbaus mit

kleinen Fenstern in Kombination mit dem automatisch geregelten Bypass der Lüftungsanlage.

Nimmt man nun an, dass die Nutzerinnen und Nutzer sich in ihrem Verhalten nicht an die sommerlichen Bedingungen anpassen, d.h. im Sommer die Fenster geschlossen und die Rollläden geöffnet lassen, ergeben sich erkennbar höhere Raumtemperaturen (Abbildung 91, rote Linie). Bemerkenswert ist allerdings, dass die sommerlichen Temperaturen in einer einzelnen Wohnung trotzdem weit komfortabler sein können, auch wenn nur in dieser Wohnung wieder eine sinnvolle Sommerstrategie umgesetzt wird, während die übrigen Wohnungen weder Fensterlüftung noch Verschattung nutzen (grüne Linie). Die Nutzerinnen und Nutzer haben also – in diesem Objekt und unter den gegebenen klimatischen Randbedingungen – ihren sommerlichen Komfort weitgehend selbst in der Hand.



**Abbildung 91: Ergebnisse der Gebäudesimulationsrechnungen mit Dynbil: Mittlere Raumtemperatur im Juni 2021 in einer der Wohnungen für verschiedene Szenarien.**  
**Basis (blau):** alle verhalten sich ‚vernünftig‘  
**Extrem (rot):** alle verhalten sich ‚unvernünftig‘  
**Individuell (grün):** eine Wohnung, die sich vernünftig verhält, in einem Gebäude, in dem alle anderen sich wie bei der roten Kurve ‚extrem‘ verhalten

## 5.4 Analyse der internen Wärmequellen

Die internen Wärmequellen (IWQ) sind eine wichtige Einflussgröße für die Heizwärmebilanz des Gebäudes. Auch für den sommerlichen Komfort spielen sie eine Rolle.

Ob es bedeutende Unterschiede zwischen den Wohnungen sowie zwischen Winter und Sommer gibt, ob die in der Energiebilanzrechnung verwendeten Werte sinnvoll sind, ist Gegenstand dieses Abschnitts.

Die 12 Wohnungen im untersuchten Mehrfamilienhaus haben eine Energiebezugsfläche (beheizte Wohnfläche) nach [PHPP] von 65,0 bzw. 55,4 m<sup>2</sup>, wenn die im PHPP anrechenbaren Flächen aus den Treppenhäusern gleichmäßig auf die Wohnungen aufgeteilt werden. Auf diese Flächen sind die nachfolgend angegebenen IWQ bezogen.

#### 5.4.1 Wassererwärmung in den Toiletten-Spülkästen

Der größte Anteil des *Kaltwassers* wird in Wohngebäuden für die Toilettenspülung verbraucht ([BDEW 2018]). Dieses Wasser erwärmt sich in den Zuleitungen und im Spülkasten in Richtung auf die Raumtemperatur, bevor es beim Spülvorgang das Gebäude wieder verlässt. Je nachdem, wie nah die Wassertemperatur zu diesem Zeitpunkt an der Raumtemperatur liegt, sind unterschiedliche, jedoch stets negative interne Wärmegewinne anzusetzen.

Um zu quantifizieren, wie groß der entstehende Wärmeentzug ist, wurden Detailmessungen in zwei Wohnungen durchgeführt. Die Wassertemperatur in den Spülkästen wurde dabei mit Hilfe je eines Datenloggers über den Zeitraum vom 11.12.20 bis 16.5.21 gemessen. Einen Ausschnitt aus den Messergebnissen zeigt Abbildung 92.

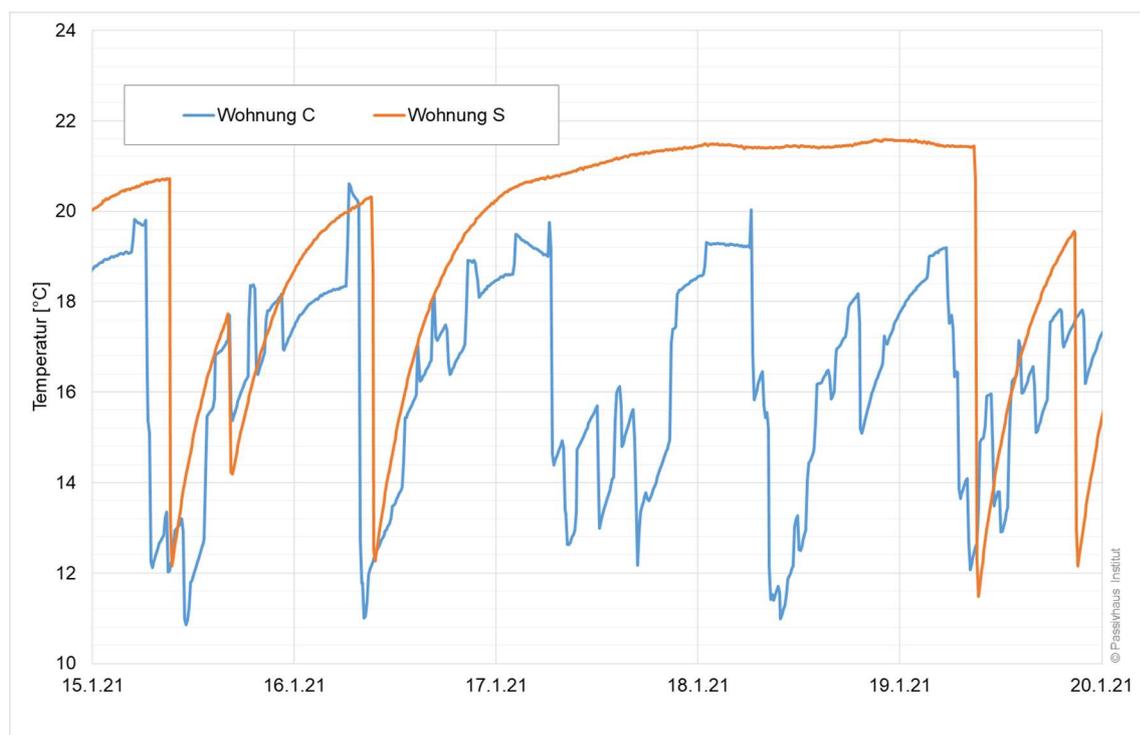


Abbildung 92: Wassertemperatur im Spülkasten

Man erkennt zunächst ein erhebliches Rauschen der Messdaten in Wohnung C, dessen Ursache ungeklärt ist. Zuverlässiger wirken die in Wohnung S gemessenen Daten. Hier sind jeweils ein rascher Temperaturabfall nach dem Spülvorgang und eine anschließende, exponentielle Annäherung an eine Gleichgewichtstemperatur zu erkennen, wie man es erwarten würde.

Dieser Temperaturanstieg lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben:

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{-(t-t_0)/\tau}$$

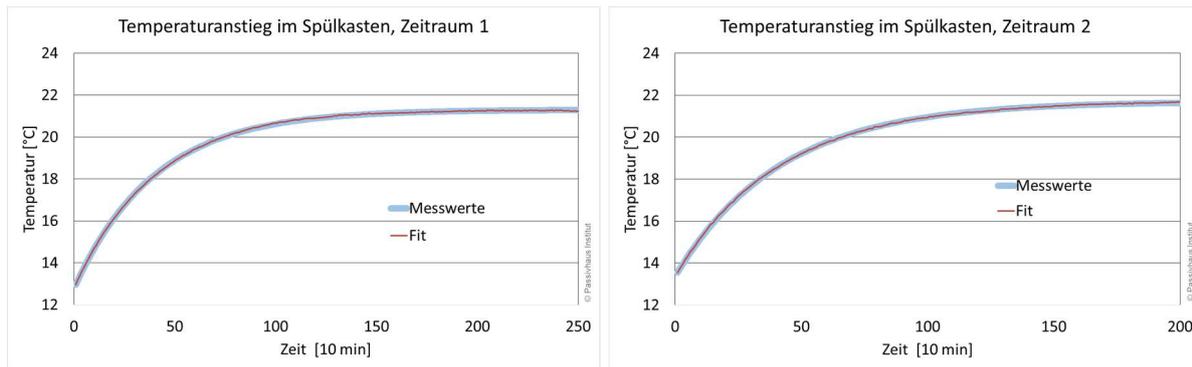
Darin bedeuten

$T(t)$	aktuelle Temperatur
$t$	Zeit
$T_0$	Temperatur nach dem Spülvorgang
$t_0$	zugehörige Zeit
$T_{\infty}$	Temperatur im Gleichgewichtszustand
$\tau$	Zeitkonstante

Aus der Messung verfügbar sind neben den Zeiten  $t$  nur die Temperaturen  $T$  im Spülkasten. Es verbleiben die beiden Unbekannten  $T_{\infty}$  und  $\tau$ . Man darf annehmen, dass  $\tau$  eine Konstante ist, die nur von den Eigenschaften des Spülkastens abhängt, während  $T_{\infty}$  die Temperatur im Bad darstellt und sich im Prinzip zeitlich ändern kann. Da die Raumtemperaturen im Bad nicht unmittelbar gemessen wurden, ist  $T_{\infty}$  zum jeweiligen Zeitpunkt nicht bekannt. Auf die gemessenen Temperaturen in den übrigen Räumen der Wohnung zurückzugreifen erwies sich als fragwürdig, denn diese lagen um ca. 2 K über den mit der nachfolgenden Methodik bestimmten Werten.

Zur Auswertung der Messungen wurde daher folgendes Verfahren gewählt:

- Für zwei relativ lange Zeiträume zwischen zwei Spülvorgängen wurden nach der Methode der kleinsten Quadrate diejenigen Werte für  $T_{\infty}$  und  $\tau$  bestimmt, die die Messdaten am besten wiedergeben (Abbildung 93). Die Zeitkonstante ergab sich zu 6,6 bzw. 6,9 h. Die Größenordnung dieses Werts lässt sich rechnerisch bestätigen: Für einen Spülkasten von 10 x 25 x 40 cm mit einer mittleren Dämmung der WLS 040 von 7,5 mm Stärke ergibt sich ebenfalls eine Zeitkonstante von 6,6 h.



**Abbildung 93: Gemessener Temperaturanstieg im Vergleich zum Fit für zwei verschiedene Zeiträume. Es ist praktisch kein Unterschied zwischen Messung und Fit zu erkennen.**

Ist  $\tau$  einmal ermittelt, kann  $T_\infty$  durch Umstellen der obigen Gleichung aus zwei beliebigen Temperaturen  $T_0$  und  $T_1$  zum Zeitpunkt  $t_0$  und  $t_1$  wie folgt bestimmt werden:

$$T_\infty = \frac{T_1 - T_0 e^{-(t_1 - t_0)/\tau}}{1 - e^{-(t_1 - t_0)/\tau}}$$

Das wurde für jeden Spülvorgang getrennt durchgeführt, wobei für  $T_1$  die Temperatur kurz vor dem betrachteten Spülvorgang, für  $T_0$  die Temperatur kurz nach dem vorhergehenden Spülvorgang verwendet wurde.

- Benötigt wird nun noch die Temperatur  $T_{KW}$  des Kaltwassers, das ins Gebäude gelangt. Die Kaltwassertemperatur wurde in der Nähe des Gebäudeeintritts kontinuierlich gemessen; in Perioden, in denen wenig oder kein Wasser gezapft wird, erwärmt sich die Messstelle jedoch um ein bis zwei Kelvin über die Kaltwassertemperatur in der Versorgungsleitung. Als Kaltwassertemperatur wurde daher das 4-Tages-Minimum der gemessenen Kaltwassertemperatur rund um den jeweiligen Zeitpunkt verwendet.
- Damit lässt sich für jeden Spülvorgang bestimmen, um welchen Anteil  $f$  der Temperaturdifferenz zwischen Kaltwasser und Raumtemperatur sich das Wasser erwärmt, bevor es die Gebäudehülle wieder verlässt. Dieser Anteil beträgt

$$f = \frac{T_1 - T_{KW}}{T_\infty - T_{KW}}$$

Für Wohnung S ergeben sich Anteile zwischen 23 und 100%. Zur Ermittlung eines Mittelwerts müssten die einzelnen Messungen eigentlich mit der zugehörigen Wassermenge gewichtet werden. Da es im Zuge dieser ergänzenden Detailmessung nicht möglich war, die Wassermassenströme für die Toilettenspülung separat und mit ausreichender Auflösung zu ermitteln, konnte nur ein einfaches arithmetisches Mittel bestimmt werden. Für Wohnung S ergab sich ein Wert von **81%**. Für Wohnung C, mit häufigeren Spülvorgängen, wurde das Verfahren trotz der schwankenden Messwerte analog angewandt. Hier ergibt sich ein Mittelwert von **74%**.

- Für Energiebilanzverfahren kann es auch sinnvoll sein,  $f$  gemäß

$$f = \frac{T_1 - T_{KW}}{T_{Raum} - T_{KW}}$$

auf die gemessene Raumtemperatur  $T_{Raum}$  der gesamten Wohnung zu beziehen.

Damit ergaben sich Werte von 71 bzw. 70%.

Über die übrigen Kaltwasserströme ist damit noch keine Aussage möglich. Kleine Mengen Kaltwasser, die z.B. im Handwaschbecken genutzt werden, dürften sich vor der Nutzung bis auf Raumtemperatur erwärmt haben. Bei größeren Mengen, die etwa zum Temperieren von Heißwasser zum Duschen oder Spülen verwendet werden, erwärmt sich das Kaltwasser vor der Nutzung dagegen kaum. Man darf daher annehmen, dass der Faktor  $f$  eher noch unter 70% anzusetzen ist.

#### 5.4.2 IWQ im Simulationsmodell

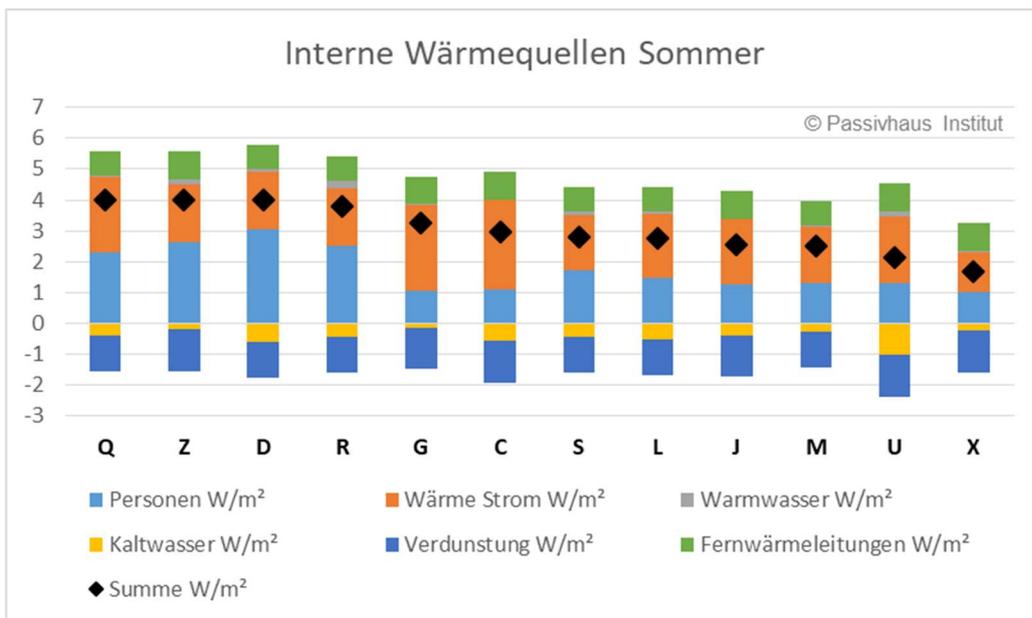
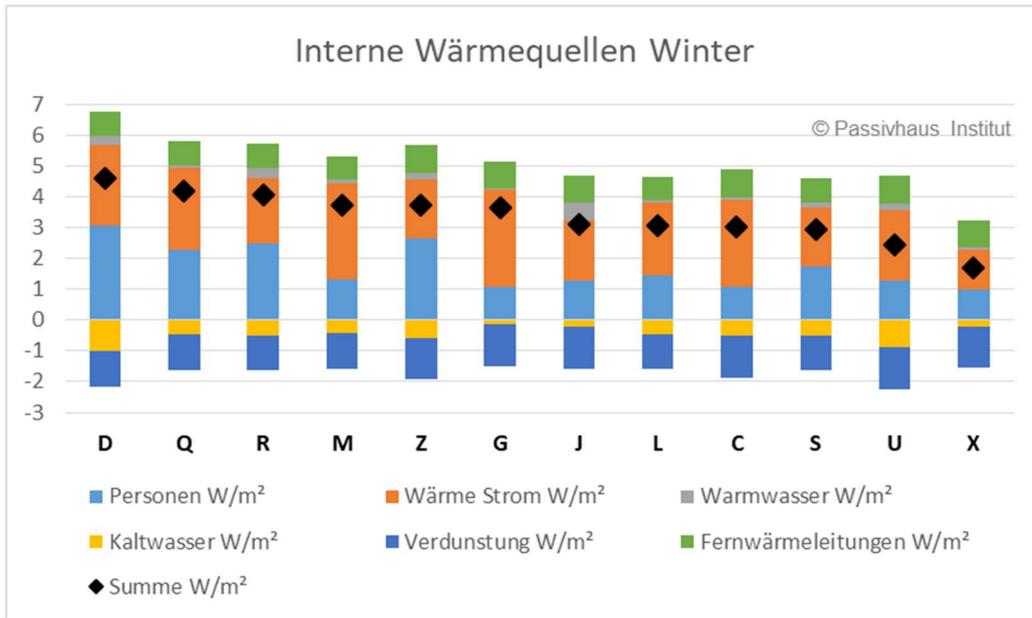
Für die oben beschriebenen dynamischen Simulationen wurden die internen Wärmequellen stundenweise projektspezifisch zusammengestellt. Unterschiede zwischen den 12 Wohnungen wurden dabei berücksichtigt, soweit es die Datenlage erlaubte. Dies betrifft den Wärmeeintrag durch Personen, Haushaltsstrom sowie den Warm- und Kaltwasserverbrauch. Wo erforderlich wurden die vorliegenden Daten mit Werten aus der Literatur, insbesondere aus dem [PHPP], kombiniert. Näheres zu den verfolgten Ansätzen findet sich in Abschnitt 5.1.5.

Die im Mittel gute Übereinstimmung von Messung und Simulation, die in Abschnitt 5.2 dargestellt ist, belegt zwar nicht die Richtigkeit der hier ermittelten Werte für die IWQ, deutet aber doch darauf hin, dass die wesentlichen Einflüsse in der Summe korrekt erfasst wurden.

Die Ergebnisse für die IWQ zeigt Abbildung 94. Im Winter liegen die ermittelten Werte zwischen 1,7 und 4,6 W/m<sup>2</sup>, im Sommer zwischen 1,7 und 4,0 W/m<sup>2</sup>. Die Mittelwerte betragen **3,4 W/m<sup>2</sup>** im Winter und **3,0 W/m<sup>2</sup>** im Sommer. Zum Vergleich: Nach der aktuellen Version 10.3 des [PHPP] werden für die größeren Wohnungen 2,9, für die kleineren 3,0 W/m<sup>2</sup> angesetzt. Die im PHPP gewählten Standardwerte, wie sie in der Planungsphase verwendet werden, werden durch die hier ermittelten Ergebnisse also als ein wenig auf der sicheren Seite liegend bestätigt.

Es gibt eindeutig baulich-technisch bedingte Beiträge zu den IWQ, insbesondere die Wärmeverluste der Fernwärmeleitungen. Die Abwärme der Personen ist dagegen nutzerbedingt. Für viele Beiträge, etwa aus der Warm- und Kaltwasserversorgung, ist eine eindeutige Zuordnung zu einer der Sphären Haustechnik oder Nutzer jedoch nicht sinnvoll möglich, hier können sowohl die Planenden als auch die Nutzenden Einfluss nehmen.

Die Standardabweichung der internen Wärmequellen in verschiedenen Wohnungen lässt sich aufgrund der hier untersuchten Stichprobe auf 20 (Winter) bis 25 (Sommer) Prozent schätzen. Es können durchaus relevante Unterschiede zwischen den Wohnungen auftreten; die Standardabweichung ist aber dennoch klein genug, dass es für die Planung zweckmäßig erscheint, Mittelwerte zu verwenden, zumal sich die Unterschiede zwischen den Wohnungen kaum vorhersagen lassen.



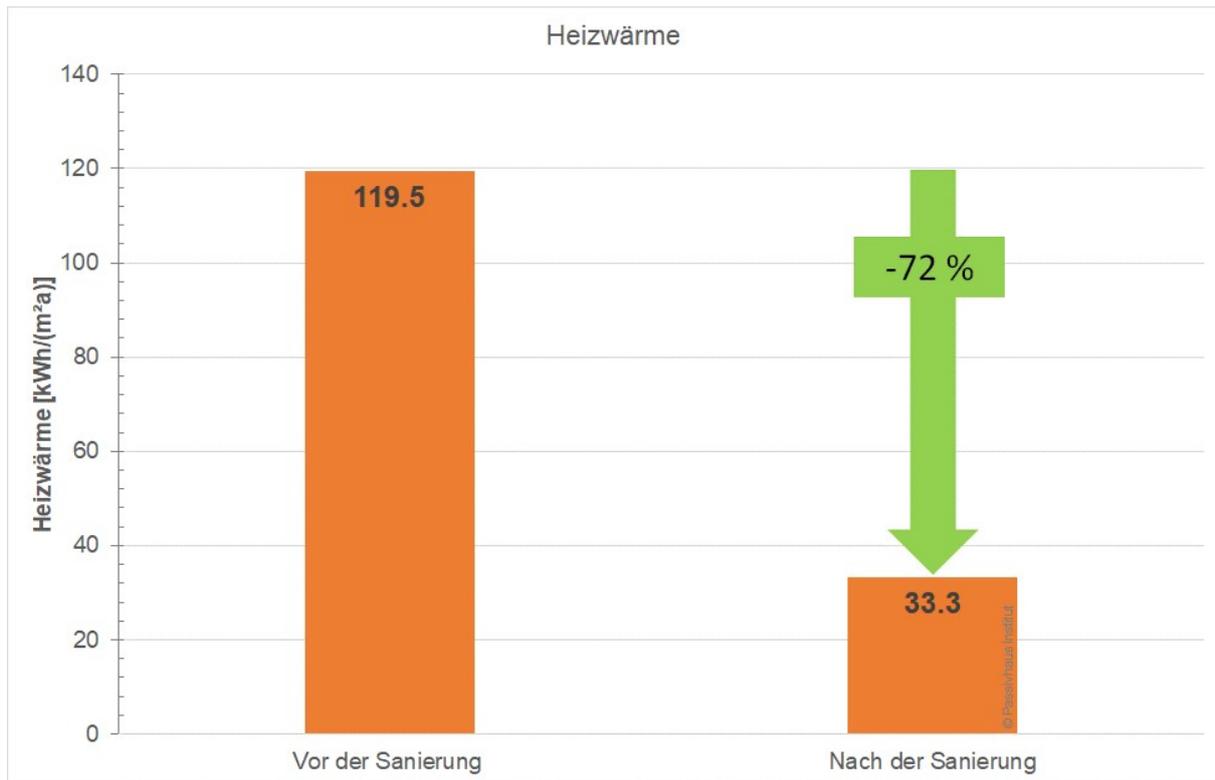
**Abbildung 94: Zusammensetzung der internen Wärmequellen nach Wohnungen und Jahreszeit. Als Winter wurden hier die Monate Oktober bis März betrachtet, als Sommer Juni bis August. Zeiten außerhalb der Heizperiode, in denen aber keine Gefahr der Überhitzung besteht, bleiben bewusst außen vor.**

## 6 Zusammenfassung

Die Wohnbau Gießen GmbH hat in den Jahren 2018/2019 das Mehrfamilienhaus Schwarzlachweg 42/44 in Gießen umfassend thermisch ertüchtigt. Das Gebäude erhielt u.a. eine hochwertige Wärmedämmung, neue Balkone, wohnungsweise Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, dreifachverglaste Fenster und neue Haus- und Kellertüren. Die Luftdichtheit wurde auf  $n_{50} = 0,8 \text{ h}^{-1}$  verbessert. Die Wärmeversorgung erfolgt über den bereits vorhandenen Fernwärmeanschluss und neue, wohnungsweise Fernwärmeübergabestationen. Die zwölf Wohneinheiten haben inkl. der beiden Treppenhäuser eine Energiebezugsfläche von 722,6 m<sup>2</sup>.

Im Rahmen des IEA EBC Annex 71 hat das Passivhaus Institut (PHI) mit Förderung durch das BMWK das Gebäude umfassend messtechnisch ausgestattet. Gemessen wurden Raumlufttemperaturen und -feuchte sowie CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in je zwei Räumen pro Wohnung, Fernwärmeverbräuche differenziert nach Heizung und Warmwasser, die Stromverbräuche für Haushalts- und Lüfterstrom sowie der Allgemeinstromverbrauch und der PV-Stromertrag, die zentrale Kaltwassertemperatur, Trinkwasserverbrauch je Wohnung und die Wetterbedingungen. Das Passivhaus Institut war in der Planungs- und Bauphase des Gebäudes weder wissenschaftlich begleitend noch beratend involviert.

Der gemessene Wärmeverbrauch aller Wohnungen für die Raumheizung beträgt 33,4 kWh/(m<sup>2</sup>a), der Verbrauch vor der Sanierung lag bei 119,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Somit konnte eine Einsparung von mehr als 70% erzielt werden. Das zeigt den Erfolg der umfassenden energetischen Sanierung. Weitere Vorteile sind die deutlichen Verbesserungen des Wohnklimas, z.B. höhere Oberflächentemperaturen, bessere Nutzung des gesamten Raumes, höhere Luftqualität. Der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung betrug 16,3 kWh/(m<sup>2</sup>a), hinzu kommen Verteilverluste für die Fernwärme innerhalb des Gebäudes von 7,3 kWh/(m<sup>2</sup>a).



**Abbildung 95: Gemessener Heizwärmeverbrauch vor und nach der Sanierung des Gebäudes.**

Mit den gemessenen Wetterdaten und Raumtemperaturen beträgt der Heizwärmebedarf nach PHPP 19,4 kWh/(m²a). Die Differenz zur Messung lässt sich durch einen erhöhten äquivalenten Luftaustausch mit der Außenluft in Höhe von insgesamt 315 m³/h erklären; dieser setzt sich vermutlich aus einem kleineren Anteil Fensterlüftung durch einige der Bewohnerinnen und Bewohner und aus einem größeren Anteil Disbalance bzw. unerwünschter Bypass der Lüftungsanlagen zusammen.

Anhand der tagesmittleren gemessenen Heizlasten wurden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung einer Heizgeraden des Gebäudes erfolgreich erprobt. Mit der ermittelten Heizgeraden kann mit einer vertretbaren Abweichung der thermische Leitwert der Gebäudehülle im bewohnten Zustand ermittelt werden. Es wurde bestätigt, dass sich mit dem PHPP die maximalen tagesmittleren Heizlasten bei Standardnutzung zuverlässig bereits in der Planungsphase bestimmen lassen.

Für genauere Untersuchungen wurde ein dynamisches thermisches Simulationsmodell des Gebäudes mit dem Programm DYNBIL aufgesetzt. Die gemessenen Temperaturen in den Wohnungen konnten damit mit einer Genauigkeit von weniger als  $\pm 1$  K reproduziert werden. Dieses Modell wurde verwendet, um mit Hilfe von Parameterstudien verschiedene Einflüsse von Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzenden zu untersuchen. Alle drei Bereiche können bedeutenden Einfluss auf den Energiebedarf und den sommerlichen Komfort haben.

## **Aus den Untersuchungen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:**

Grundlage für einen geringen Energieverbrauch ist ein ausgezeichneter Wärmeschutz der **Gebäudehülle**. Dabei ist es oftmals wichtiger, schlechte Details zu vermeiden als bereits gute Komponenten noch weiter zu verbessern. Um Wärmebrücken, die durch mäßig gedämmte Fensterrahmen und einen ungünstigen Einbau entstehen, zu kompensieren, müsste beispielsweise der U-Wert der Außenwand von 0,15 auf 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) verbessert werden.

Im Gebäude wurden von der Wohnungsbaugesellschaft Dreh- statt der gebräuchlichen Dreh-Kipp-Fenster eingebaut, in der Annahme, unnötiges Dauerlüften im Winter möglichst verhindern zu können; bei geöffnetem Fenster soll die niedrige Raumtemperatur daran erinnern, das Fenster bald wieder zu schließen. Wie sich zeigt, gibt es trotzdem einzelne Räume, in denen dauerhaft oder überwiegend ein Fenster offen steht, in der Wirkung ggf. gedämpft durch einen geschlossenen Rollladen oder einen fixierten Fensterflügel. In einem solchem Ausmaß wurden in anderen untersuchten Objekten (Sanierungen und Neubauten) noch keine Fensteröffnungen beobachtet. Es erscheint im Nachhinein fraglich, ob nicht mit Dreh-Kipp-Fenstern ein ähnliches oder sogar besseres Ergebnis hätte erzielt werden können. In zahlreichen anderen Gebäuden wurde für Dreh-Kipp-Fenster kein signifikanter Einfluss der Fensterlüftung beobachtet.

Einen wesentlichen Beitrag für die Gesamteffizienz des sanierten Gebäudes leistet auch die **Haustechnik**. Durch die Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird der Heizwärmebedarf auf weniger als die Hälfte reduziert. Die Erfahrungen im untersuchten Objekt bestätigen die Empfehlung, Lüftungsgeräte mit einer automatischen Massenstrombalance auszustatten. Sowohl der Wartungsaufwand als auch der Energieverbrauch werden dadurch bedeutend reduziert.

Wärmeverteilungen sollten innerhalb wie außerhalb der thermischen Gebäudehülle sehr gut (Orientierung: 2 DN) gedämmt werden. Andernfalls können gerade in Objekten, die in Passivhausqualität ausgeführt sind, die Verluste der Verteilungen einen erheblichen Anteil am gesamten Wärmeverbrauch ausmachen. Nur bei Heizungsverteilungen innerhalb der thermischen Hülle, die außerhalb der Heizperiode kalt sind, ist die gesetzlich vorgeschriebene Dämmung ausreichend.

Der **Einfluss der Nutzerinnen und Nutzer** auf den Heizwärmeverbrauch ist ebenfalls bedeutend. Ein Anstieg der durchschnittlichen Raumtemperatur um 2 °C führt in diesem Gebäude zu einem Anstieg des Heizwärmebedarfs um fast 40%. Die mittlere Innentemperatur in der Heizperiode betrug 21,7 °C. Solche Werte wurden teilweise auch in anderen Gebäuden mit Passivhauskomponenten beobachtet [Johnston 2020], vor allem dann, wenn ein Teil der Heizwärmezufuhr nicht kontrolliert werden kann (Wärmeverluste von Verteilungen). Dauerhafte Änderungen sind daher eher

unwahrscheinlich, zumal die absoluten Betriebskosten für den höheren Komfort nicht prohibitiv hoch sind. Auch mit der gewünschten Raumtemperatur ist der Energieverbrauch des gut gedämmten Hauses noch immer sehr niedrig.

Im Sommer können die Nutzerinnen und Nutzer durch geschicktes Öffnen und Schließen der Fenster und der außenliegenden Verschattung die Raumtemperaturen spürbar beeinflussen. Die Simulation zeigt für den untersuchten Zeitraum eine Reduzierung der Raumtemperatur um bis zu 2 K. In längeren Hitzeperioden sind noch stärkere Unterschiede zu erwarten.

Um Strom zu sparen könnten die Bewohnenden bei diesem Gebäude ohne innenliegende Bäder in den Sommermonaten die Lüftungsanlagen ausschalten und vollständig über die Fenster lüften. Das könnte den Stromverbrauch der Lüftungsgeräte um ca. 20 bis 40 % reduzieren. Nur während der Hitzeperioden würden die Anlage durch die Wärmerückgewinnung einen kleinen Beitrag zu Kühlung bewirken können. Nur dann wäre hinsichtlich der Energieeffizienz ein sommerlicher Betrieb bei tagsüber überwiegend geschlossenen Fenstern zu empfehlen.

Die Ergebnisse der Untersuchung für die internen Wärmequellen (IWQ) ergaben für den Winter Werte zwischen 1,7 und 4,6 W/m<sup>2</sup>, für den Sommer zwischen 1,7 und 4,0 W/m<sup>2</sup>. Die Mittelwerte betragen **3,4 W/m<sup>2</sup>** im Winter und **3,0 W/m<sup>2</sup>** im Sommer. Für die Planungsphase werden im PHPP Standardwerte von 2,9 bis 3,0 W/m<sup>2</sup> verwendet, die damit als kompatibel mit in der Realität vorgefundenen Werten bestätigt werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass sich mit dem PHPP Gebäude realitätsnah, mit guter Genauigkeit und überschaubarem Aufwand energetisch planen lassen, und sich insbesondere der Heizenergiebedarf - ohne eine aufwendige dynamische Simulation - vorausberechnen lässt. Entscheidend ist vor allem, dass die relevanten Parameter realitätsnah erfasst und in der Bilanz abgebildet werden. Die energetische Sanierung des Gebäudes mit der deutlichen Verbesserung des Wohnklimas und der realisierten Heizwärmeeinsparung von über 70 % sind überzeugend und deuten auf die Robustheit des Systems und der Maßnahmen hin.

## 7 Quellen

- [AK 5] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 5: Energiebilanz und Temperaturverhalten. Hier insb. die Beiträge „Grundlagen der Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden“ und „Vergleich von Messung und Simulation“. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1997
- [AK 17] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase II, Protokollband Nr. 17: Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1999
- [BDEW 2019] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Trinkwasserverwendung im Haushalt, [https://www.bdew.de/media/documents/Trinkwasserverwendung\\_im\\_HH\\_2018\\_o\\_j\\_Ott\\_online\\_03042019.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Trinkwasserverwendung_im_HH_2018_o_j_Ott_online_03042019.pdf). Abgerufen am 21.7.2022
- [BDEW 2022] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. Trinkwasserverbrauch je Einwohner, [www.bdew.de](http://www.bdew.de), Zugriff Homepage am 02.08.2022
- [destatis 2022] Statistisches Bundesamt, [www.destatis.de](http://www.destatis.de), „Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen“ und „Bewohnte Wohnungen in Wohngebäuden nach Wohnfläche und Baujahr 2018“, Zugriff der Homepage am 16.08.2022, Eigene Umrechnungen
- [DIN 4108-T2] DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Februar 2013, Beuth Verlag
- [Ebel, Großklos, Loga 2002] Ebel, W.; Großklos, M.; Loga, T.: Bewohnerverhalten in Passivhäusern. In: Tagungsband zur 6. Europäischen Passivhaustagung 2002 in Basel. Herausgeber: Markus Steinmann, Muttentz bei Basel: Fachhochschule beider Basel, 2002
- [Energieausweis 2012] Stadtwerke Gießen (SWG): Energieausweise (Verbrauch) für Wohngebäude gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) des Gebäudes (Haus 42 vom 02.04.2012 und für Haus 44 vom 03.04.2012), Gießen 2012

- [Feist 1981] Feist, W.; Dynamische Wärmebilanzen mit dem Programm „DYNBIL“, Tübingen, 1981.
- [Feist 1999] Wolfgang Feist (Hrsg.): „Qualitätssicherung beim Bau von Passivhäusern“; Protokollband Nr. 18 zum Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser; Passivhaus Institut; Darmstadt, Dezember 1999
- [Feist 1994] Feist, Wolfgang: Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1. Aufl., Heidelberg, C. F. Müller 1994
- [Feist 1997] Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation, In: Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 5, Energiebilanz und Temperaturverhalten, Passivhaus Institut, Darmstadt, 1997
- [Fricke 1984] J. Fricke, W.L.Borst: Energie. Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen. 2. Aufl., Oldenbourg 1984.
- [Johnston 2020] David Johnston, Mark Siddall, Oliver Ottinger, Soeren Peper und Wolfgang Feist: Are the energy savings of the passive house standard reliable? A review of the as-built thermal and space heating performance of passive house dwellings from 1990 to 2018; Energy Efficiency (2020) 13:1605–1631; <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09855-7>
- [Kaufmann 2001] Kaufmann, Berthold, Wolfgang Feist: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Passivhaus Institut, Darmstadt, Juni 2001.
- [Krick 2021] Krick, B.: Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienz und erneuerbarer Energie für die Raumwärme - einzeln und in Kombination. In: Energieeffizienz und erneuerbare Energien: Zielkonflikt oder Synergie? Protokollband Nr. 56 zum Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2021.
- [Ottinger 2016] Ottinger, O.; Schnieders, J.; Hasper, W.; Feist, W.: Messtechnische Bestimmung der Wärmeverlustkoeffizienten von Passivhaus-Wohngebäuden, Projektbericht IEA Annex 58 (Förderkennzeichen: 03ET1144C). Passivhaus Institut, Darmstadt, 2016.

- [Peper 2012] Peper, Søren.: Messung zur Verbrauchskontrolle – „Minimalmonitoring“. In: Feist, W. (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 45: Richtig messen in Energiesparhäusern. Passivhaus Institut, Darmstadt,
- [Peper 2012a] Peper, S.: Messkonzepte, Störgrößen und adäquate Lösungen. In: Feist, W. (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 45: Richtig messen in Energiesparhäusern. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2012
- [Peper 2016] Peper, Søren: Energie-Monitoring von Wohngebäuden im Passivhaus-Stadtteil Heidelberg-Bahnstadt. Passivhaus Institut, 2016, Darmstadt
- [Peper 2021] Peper, Søren: BuildTog Darmstadt-Kranichstein Monitoring, Endbericht, Passivhaus Institut, 2021, Darmstadt
- [Peper/Feist 2008] Peper, S.; Feist, W.: Gebäudesanierung „Passivhaus im Bestand“ in Ludwigshafen / Mundenheim, Messung und Beurteilung der energetischen Sanierungserfolge. *Passivhaus Institut, Darmstadt, 2008.*
- [Peper/Grove-Smith/Feist 2009] Peper, Søren; Grove-Smith, Jessica; Feist, Wolfgang: Sanierung mit Passivhauskomponenten. Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt a.M. Passivhaus Institut, Darmstadt, Februar 2009
- [Perez/Ineichen 1990] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R. (1990) Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. *Solar Energy*, 44, 271-289
- [PHPP] Passivhaus-Projektierungspaket. Berechnung von Energiebilanzen und Planungstool für energieeffiziente Gebäude. Passivhaus Institut, Darmstadt 1998–2022. Aktuelle Version: PHPP 10.3 (2022).
- [Schnieders 2003] Schnieders, Jürgen: Passive Strategien zur sommerlichen Kühlung im Passiv-Bürogebäude Cölbe: Praxiserfahrungen und Simulationsergebnisse. In: Proceedings of the 7th International Passive House Conference, Hamburg, 2003, Darmstadt, Passivhaus Institut, Feb 2003

- [Schulz 2007] Schulz, Tanja: Balkonanschlüsse – wärmebrückenoptimierte Lösungen. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase IV, Protokollband Nr. 35: Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2007.
- [Schulze Darup 2002] Schulze Darup, Burkhard (Hrsg.): Passivhaus-Projektbericht Energie & Raumluftqualität. Messtechnische Evaluierung und Verifizierung der energetischen Einsparpotentiale und Raumluftqualitäten an Passivhäusern in Nürnberg. AnBus e.V. Nürnberg 2002
- [Passipedia 2022] Komfortbänder für die Behaglichkeit.  
[https://passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische\\_grundlagen/thermische\\_behaglichkeit/komfortbaender\\_fuer\\_die\\_behaglichkeit/#wo\\_liegen\\_die\\_grenzen](https://passipedia.de/grundlagen/bauphysikalische_grundlagen/thermische_behaglichkeit/komfortbaender_fuer_die_behaglichkeit/#wo_liegen_die_grenzen)

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gebäude vor der Sanierung (Dezember 2017) .....	5
Abbildung 2:	Gebäude nach der Sanierung (2019/2020) mit der Ost- und Nord-West-Fassade.....	5
Abbildung 3:	West-Fassade des Gebäudes mit der neuen Balkonanlage nach der Sanierung (2019).....	6
Abbildung 4:	Grundrisse eines Geschosses (Quelle: Wohnbau Gießen). .....	6
Abbildung 5:	Grundrisse des Kellers (Quelle: Wohnbau Gießen). .....	7
Abbildung 6:	Gebäudeschnitt (A-A) Haus 42 (Quelle: Wohnbau Gießen) . .....	7
Abbildung 7:	Detailansichten Fassade mit Lüftungselement und Nordfassade (nach der Sanierung) .....	8
Abbildung 8:	Lageplan des Gebäudes im Schwarzlachweg, Gießen (Quelle: OpenStreetMap) .....	8
Abbildung 9:	Montage der Außendämmung an der Fassade und Montage der neuen Fenster. ....	9
Abbildung 10:	Montierte Wärmedämmung der Kellerdecke und Begleitdämmung an den Kellertrennwänden (links). PV-Anlage (29 kWp) auf dem neuen Flachdach (rechts)..	9
Abbildung 11:	In dem Gebäude wird die Fernwärme ohne weitere Übergabestation direkt über Steigleitungen in die Wohnungen geführt (Prinzipskizze links). Dort wird jeweils eine Wohnungsstation (rechts) direkt versorgt. Die Wohnungsstationen verfügen über einen Wärmeübertrager zur Brauchwarmwassererwärmung sowie einen Abgang zur Versorgung des Heizkreises der Wohnung. Gemessen werden mittels zwei Wärmezähler der Gesamtverbrauch sowie der Heizwärmeverbrauch (Unterzähler)..	10
Abbildung 12:	Montage einer neuen Wohnungsstation im Badezimmer an der Position des Vorgängermodells (links). Nach der Fertigstellung ist die Station durch eine Klappe zugänglich (Mitte). Thermographie des geöffneten Verteilerschranks (rechts).....	11
Abbildung 13:	Lüftungsgerät einer Wohnung an der Küchendecke vor der Verkleidung und Rohrmontage (links). Luftverteilung an der Flurdecke vor der Montage der abgehängten Decke (rechts) .....	12
Abbildung 14:	Fertig verkleidetes Lüftungsgerät an der Küchendecke (links). Montiertes Zuluftelement in einem Wohnraum kurz unter der Decke (rechts).....	12
Abbildung 15:	Einfacher Stufenschalter in einem Wohnungsflur für die Auswahl der drei Lüftungsstufen (links). Kombiniertes Außen-Fortluft-Element auf der Außenfassade (rechts).....	13
Abbildung 16:	Kalibriermessungen mit einem Volumenstrom-Messgerät mit Stützventilator (Prinzip: Nulldruckkompensation) vom Typ FlowFinder der Zu- und Abluftdüsen in einer der 12 Wohnungen. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit über einem Küchenschrank musste für die Messung ein Adapter hergestellt werden (rechts). ....	13
Abbildung 17:	Anker für die neue, freistehende Balkonanlage vor und nach der Dämmung der Fassade. Diese Anker stellen eine massive Wärmebrücke dar, welche in der Bilanzierung berücksichtigt werden muss. Vorzuziehen wäre hier eine in der Substanz bessere thermische Entkopplung. (Vgl.: [Schulz 2007]).....	14
Abbildung 18:	Berechneter Heizwärmebedarf (mit PHPP; Bezug beheizte Wohnfläche) des sanierten Gebäudes mit unterschiedlichen Randbedingungen bzgl. der Innentemperatur und der Wetterdaten. ....	15
Abbildung 19:	Nachweisblatt des PHPP mit dem Kennwert des Heizwärmebedarfs von 19,5 kWh/(m <sup>2</sup> a) bei 21,7°C und den gemessenen Wetterdaten vom 01.09.2020 bis 31.08.2021. ....	16
Abbildung 20:	Anordnung von je zwei Raumsensoren (T/rF/CO <sub>2</sub> ) in den Wohnungen (Kennzeichnung mit roten Pfeilen). Die vier Wohnungen je Etage sind farbig angelegt. Quelle des ergänzten Planes: Wohnbau Gießen. ....	18
Abbildung 21:	Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes (links) und Wandsensor (T, rF, CO <sub>2</sub> ) in einem Zimmer während der Kalibriermessung (rechts).....	20
Abbildung 22:	Fenstergriff mit EnOcean Funktechnik zum Senden der Griffstellung (links). Stromzähler der Einzelwohnungen mit aufgeklebten Ausleseköpfen (rechts). ....	20
Abbildung 23:	Zentraler Gesamtwärmezähler mit Ultraschall-Volumenstrommessung (ohne Auftrennung des Rohres) während der Montage am Fernwärmerohr im Keller des	

	Gebäudes (links). Programmierarbeiten an der Messtechnikzentrale im Keller des Gebäudes (rechts).....	21
Abbildung 24:	Schaltschrank im Treppenhaukopf für die Umsetzung der Signale der Wetterstation (links). Montage der Temperaturmessung der Kaltwasserleitung mit einem Pt100 Anlegefühler. Der Bereich wurde danach wieder vollständig gedämmt (rechts).....	21
Abbildung 25:	Außenlufttemperatur und über den Taupunkt abgeleitete Himmelstemperatur im Zeitraum 1.10.2019 bis zum 29.11.2021. ....	22
Abbildung 26:	Außenfassaden des Gebäudes in der thermographischen Darstellung (Range: -14 bis +15°C) mit rechts jeweiligem Lichtbild zur Zuordnung. ....	24
Abbildung 27:	Thermographische Detailbilder zu einem Fenster und einem Fassadenbereich über einem Fenster mit einer leichten Fehlstelle innerhalb der Markierung (Strich-Linie). Der eingestellte Temperaturbereich beträgt auch bei dieser Darstellung -14 bis +15°C. 25	
Abbildung 28:	Luftspalt zwischen zwei Dämmblöcken der Außenfassade an einem der Nebengebäude. ....	26
Abbildung 29:	Thermographie eines West-Fassaden Bereichs mit einem Balkonanker vor der Montage der Balkonanlage. Rechts Fotos der Balkonanker nach und vor der Montage der Wärmedämmung. (Range Thermogramm: -14 bis +15°C). ....	27
Abbildung 30:	Außentemperatur (Tageswerte) vom 01.01.2020 bis zum 15.05.2022 der Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes. Der Auswertungszeitraum ist markiert. ....	28
Abbildung 31:	Tagesmittlere Leistung der Globalstrahlung im Zeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021 von der Wetterstation HLNUG Linden (Quelle: <a href="http://www.hlnug.de/messwerte">www.hlnug.de/messwerte</a> , Darstellung PHI) .....	29
Abbildung 32:	Monatssummen der Globalstrahlung im Zeitraum Januar 2020 bis Dezember 2021 von der Wetterstation HLNUG Linden (Quelle: <a href="http://www.hlnug.de/messwerte">www.hlnug.de/messwerte</a> , Darstellung PHI) .....	29
Abbildung 33:	Raumlufttemperaturen der 24 Messstellen in den 12 Wohnungen. Zum Vergleich ist auch der Verlauf der Außenlufttemperatur eingetragen. Tagesmittelwerte; Zeitraum: 01.09.2020 bis 31.08.2021. ....	30
Abbildung 34:	Ausschnitt der Temperaturmessung der Winterzeit aus Abbildung 33. Tagesmittelwerte; Zeitraum: 01.10.2020 bis 30.04.2021. ....	32
Abbildung 35:	Ausschnitt der Temperaturmessung der Winterzeit aus Abbildung 34 nur für die beiden Wohnungen mit langen Fensterlüftungszeiten (geänderte Farbwahl der Kurven gegenüber Abbildung 34). Jeweils eine der beiden Messstellen der Wohnungen zeigt deutlich höhere Temperaturen. (jeweils Tagesmittelwerte); Zeitraum: 01.11.2020 bis 31.03.2021. ....	33
Abbildung 36:	Raum- und Außentemperaturen während der wärmsten Tage („Hitzeperiode“) im Messzeitraum. Dargestellt ist der Zeitraum von 7 Tagen vom 15.06. bis zum 21.06.2021. Die rote gestrichelte Linie zeigt den flächengewichteten Mittelwert aller Messstellen. ....	34
Abbildung 37:	Absteigend sortierte Stundenmesswerte der Temperaturmessung von allen Wohnungen und der Außentemperatur. Dargestellt ist nur der Ausschnitt bis 2500 Jahresstunden. Die roten Pfeile zeigen die Stundenanzahl der wärmsten (1.956 h) und der kühlfsten (219 h) Wohnung (25 °C-Grenze) an. Der grüne Pfeil zeigt auf die Stunden über 25 °C des flächengewichteten Durchschnitts aller Wohnungen (514 h >25°C).....	35
Abbildung 38:	Lufttemperaturmessungen in beiden Kellern und Treppenhäusern sowie der zentralen Kaltwasserleitung im Keller.....	36
Abbildung 39:	Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte im gesamten Untersuchungsjahr. ....	37
Abbildung 40:	Tagesmittlere relative Luftfeuchten in den 12 Wohnungen (je 2 Messstellen) im Kernwinter-Zeitraum (Ausschnitt aus der vorherigen Grafik) .....	39
Abbildung 41:	CO <sub>2</sub> -Konzentrationen als Tagesmittelwerte in den 12 Wohnungen (24 Räume) im Messjahr September 2020 bis August 2021. Quelle der Außenkonzentration: Station des HLNUG in Linden bei Gießen. ....	40

Abbildung 42:	Detail der CO <sub>2</sub> -Konzentration in den 24 Räumen der 12 Wohnungen für den Kernwinter-Zeitraum (November 2020 bis März 2021). Quelle der Außenkonzentration: Station des HLNUG in Linden bei Gießen. ....	41
Abbildung 43:	Absteigend sortierte Messwerte der stündlichen CO <sub>2</sub> -Konzentration in den 24 Räumen der 12 Wohnungen für den Winter-Zeitraum (Oktober 2020 bis April 2021). Die beiden verkürzten Kurven sind auf den zeitweiligen Ausfall der beiden Sensoren bedingt. ...	42
Abbildung 44:	Mittleren CO <sub>2</sub> -Qualität in den Wohnungen im Vergleich zur Summe des Stromverbrauchs der 12 Lüftungsgeräte im Winter 2020/2021.....	43
Abbildung 45:	Wertepaare der CO <sub>2</sub> -Konzentration und des Stromverbrauchs aus Abbildung 44 ohne Wohnung 11 im xy-Diagramm aufgetragen. Die Ausgleichskurve zeigt die Tendenz „Höhere Lüftungsstromverbrauch (= höhere Luftmenge) verringert die CO <sub>2</sub> -Konzentration“. Die Bewohneranzahl und Anwesenheitszeiten bleiben bei dieser vereinfachten Betrachtung unberücksichtigt.....	44
Abbildung 46:	Wärmeverbrauch der 12 Wohnungen für Heizung und Warmwassererzeugung im Jahreszeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021 mit den beiden Mittelwerten. Aufsteigend sortiert nach dem Wärmegesamtbezug (grün). ....	45
Abbildung 47:	Heizwärmeverbrauch nur der Wintermonate Oktober bis einschließlich April in den beiden untersuchten Zeiträume 2020/2021 und 2021/2022 (jeweils aufsteigend sortiert).....	46
Abbildung 48:	Tagesmittlere Heizleistung der Heizungsversorgung aller 12 Wohnungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur im Messjahr September 2020 bis August 2021.....	47
Abbildung 49:	Spezifische Heizleistung der 12 Wohnungen über der mittleren Differenz der Innen- zur Außentemperatur (alles Tagesmittelwerte). Dargestellt sind zusätzlich zwei theoretische Heizgeraden, mit unterschiedlichen Annahmen bzgl. der Randbedingungen (s.Text), welche an Hand der Daten aus dem PHPP erstellt wurden. ....	49
Abbildung 50:	Messwerte der spezifischen Heizleistung wie oben in Abbildung 49. Dargestellt ist zusätzlich die theoretische Heizgerade, welche unter Berücksichtigung der im PHPP für Wohngebäude im Standardfall angesetzten IWQ von 2,9 W/m <sup>2</sup> visuell ermittelt wurde. ....	50
Abbildung 51:	Spezifischer Energieeinsatz für die Warmwassererzeugung im Jahres-Untersuchungszeitraum (aufsteigend sortiert).....	51
Abbildung 52:	Monatliche spezifische Energiemengen zur Warmwasserbereitung in den 12 Wohnungen im Verlauf vom März 2020 bis April 2022. Der Mittelwert von 2 Jahren (Mai 2020 bis April 2022) ist eingetragen, ebenso das Untersuchungsjahr (Sep. 2020 bis Aug. 2021).....	52
Abbildung 53:	Spezifische Stromverbräuche der 12 Wohnungen im Untersuchungsjahr. Zusätzlich sind der Gemeinschaftsstromverbrauch und der Lüftungsstromverbrauch sowie der Stromertrag der PV-Anlage aufgeführt. Alle Mittelwerte sind bezogen auf die Fläche des Gesamtgebäudes.....	53
Abbildung 54:	Stromverbrauch aller Wohnungen und der PV-Ertrags im Jahresverlauf als Monatswerte (Sep. 2020 bis Aug. 2021). ....	54
Abbildung 55:	Stromverbrauch der Lüftungsanlagen aufgeteilt in Winter- (Oktober bis April) und Sommerverbrauch. Der Verbrauch der Lüftungsanlagen der beiden Treppenhäuser ist jeweils auf die halbe Hausfläche bezogen (361,3 m <sup>2</sup> ).....	55
Abbildung 56:	Täglicher Stromverbrauch 13 Tage vor und 13 Tage nach dem Filterwechsel von 8 der 12 Lüftungsanlagen. ....	56
Abbildung 57:	Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Tag, aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021.....	57
Abbildung 58:	Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Quadratmeter aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021. ....	58
Abbildung 59:	Jahreswasserverbrauch (kalt und warm) der 12 Wohnungen pro Person aufsteigend sortiert für den Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 30. September 2021.....	58
Abbildung 60:	Korrelation von elektrischer Leistung und Luftvolumenstrom lt. Datenblatt .....	59
Abbildung 61:	Volumenströme der 12 Lüftungsanlagen der Wohnungen (berechnet aus den gemessenen Stromverbräuchen) im Januar 2021. Am rechten Rand sind grob die	

	Bereiche der Stufen eingetragen. Beispielhaft sind einige augenfällige Schaltvorgänge mit ihrer Dauer markiert. Bei der „Abschaltung“ hatte die Sicherung ausgelöst (technischer Defekt).....	60
Abbildung 62:	Temperaturgang vom 1. bis zum 7. November 2021 an einer Messstelle im Schlafzimmer der Wohnung mit den längsten Öffnungszeiten eines Fensters (Bildschirmfoto aus dem Datenvisualisierungsprogramm „Grafana“).....	64
Abbildung 63:	Energieverbrauch und PV-Erzeugung im Jahreszeitraum 01. September 2020 bis 31. August 2021 .....	65
Abbildung 64:	Vergleich der Messung mit der Berechnung mittels PHPP für den Jahreszeitraumes 01. September 2020 bis 31. August 2021. Beim PHPP sind die Klimadaten des Zeitraumes (Außentemperatur und Globalstrahlung) sowie die gemessene erhöhte Innentemperatur von 21,7 °C berücksichtigt. ....	66
Abbildung 65	Vergleich der Heizwärme von der Berechnung (PHPP), der Messungen nach und vor der Sanierung. Die gemessene Einsparung beträgt 72%. ....	67
Abbildung 66:	Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit der Beheizung.....	70
Abbildung 67:	Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit dem Innenklima im Winter .....	70
Abbildung 68:	Auswertung der Befragung zur Zufriedenheit mit dem Innenklima im Sommer .....	71
Abbildung 69:	Beispiel für die Modellierung einer Zone .....	74
Abbildung 70:	Zonierung des Gebäudes in der Ansicht. ....	76
Abbildung 71:	Zonierung des Gebäudes am Beispiel des 1. OG. Im EG und im 2. OG bildet jede Wohnung eine Zone. ....	76
Abbildung 72:	Steigleitungen der Fernwärmeversorgung vor (links) und nach der Sanierung (rechts). ....	79
Abbildung 73:	Nach spezifischem Transmissions- und Lüftungswärmeverlust gewichtete Mitteltemperaturen des Gebäudes .....	82
Abbildung 74:	Jährlicher Temperaturverlauf der Wohnung L, simuliert und gemessen.....	83
Abbildung 75:	Temperaturverlauf der Wohnung L während einer typischen Woche im Januar .....	84
Abbildung 76:	Jährlicher Temperaturverlauf der Wohnung G, simuliert und gemessen .....	85
Abbildung 77:	Temperaturverlauf der Wohnung G während der Hitzeperiode im Juni.....	86
Abbildung 78:	Auswirkungen besserer Fensterrahmen.....	88
Abbildung 79:	Auswirkung reduzierter Wärmedämmung in Wänden und Dach .....	89
Abbildung 80:	Auswirkung fehlender Lüftungs-Wärmeückgewinnung („Basis“ enthält eine Wärmerückgewinnung für jede Wohnung) .....	90
Abbildung 81:	Auswirkung von Disbalance in den Lüftungsanlagen. Der angegebene Zuluftüberschuss gibt an, um wieviel der Zuluftmassenstrom größer ist als der Mittelwert aus Ab- und Zuluftmassenstrom. Der Abluftmassenstrom ist entsprechend um denselben Betrag geringer als dieser Mittelwert. ....	91
Abbildung 82:	Auswirkung der Dämmung der Fernwärme-Verteilleitungen mit der Annahme des vollständigen Wegfalls, der Verdopplung oder der Verdreifachung der Wärmeverluste. ....	92
Abbildung 83:	Auswirkung der Wärmezufuhr in den Fußboden statt in die Raumluft auf den Zeitverlauf der Gebäudemitteltemperatur.....	93
Abbildung 84:	Auswirkung der Wärmezufuhr per Zuluftheizung in die Wohnung auf die Raumlufttemperaturen, im Vergleich zum Basisfall der raumweisen, konvektiven Beheizung. Variante mit Badheizkörper. ....	95
Abbildung 85:	Auswirkung der Wärmezufuhr per Zuluftheizung in die Wohnung anstelle einer raumweisen, konvektiven Beheizung. Variante ohne Badheizkörper. ....	96
Abbildung 86:	Auswirkung eines gekippten bzw. geöffneten Fensters im Raum BB2.....	98
Abbildung 87:	Operative Temperaturen im Raum BB2 für ein geschlossenes, gekipptes und weit geöffnetes Fenster. Je nach Variante wird der Raum nicht oder nur mit begrenzter Leistung beheizt.....	99
Abbildung 88:	Zum Vergleich mit Abbildung 87: gemessene Raumtemperaturen in zwei Räumen, in denen häufigere Fensterlüftung im Temperaturprofil erkennbar ist. ....	99
Abbildung 89:	Heizwärmebedarf mit stets offenen oder stets geschlossenen Rollläden .....	100
Abbildung 90:	Heizwärmebedarf bei um 2 Kelvin erhöhter Temperatur.....	101

Abbildung 91:	Ergebnisse der Gebäudesimulationsrechnungen mit Dynbil: Mittlere Raumtemperatur im Juni 2021 in einer der Wohnungen für verschiedene Szenarien. Basis (blau): alle verhalten sich ‚vernünftig‘ Extrem (rot): alle verhalten sich ‚unvernünftig‘ Individuell (grün): eine Wohnung, die sich vernünftig verhält, in einem Gebäude, in dem alle anderen sich wie bei der roten Kurve ‚extrem‘ verhalten.....	102
Abbildung 92:	Wassertemperatur im Spülkasten.....	103
Abbildung 93:	Gemessener Temperaturanstieg im Vergleich zum Fit für zwei verschiedene Zeiträume. Es ist praktisch kein Unterschied zwischen Messung und Fit zu erkennen..	105
Abbildung 94:	Zusammensetzung der internen Wärmequellen nach Wohnungen und Jahreszeit. Als Winter wurden hier die Monate Oktober bis März betrachtet, als Sommer Juni bis August. Zeiten außerhalb der Heizperiode, in denen aber keine Gefahr der Überhitzung besteht, bleiben bewusst außen vor. ....	107
Abbildung 95:	Gemessener Heizwärmeverbrauch vor und nach der Sanierung des Gebäudes.....	109

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennwerte der Gebäudehülle vor und nach der Sanierung .....	9
Tabelle 2:	Übersicht der Messtechnikkomponenten für Meteorologische Parameter .....	19
Tabelle 3:	Übersicht der gebäudeintern eingesetzten Messtechnikkomponenten. ....	19
Tabelle 4:	Mittelwerte der Temperaturmessungen in den 12 Wohnungen (Gewichtet, vgl. Abschnitt 2.1.3) .....	31
Tabelle 5:	Übertemperaturgradstunden über drei Temperaturschwellen des Gesamtgebäudes und der wärmsten und der kältesten Wohnung vom Jahreszeitraum 01.09.2020 bis 31.08.2021.....	35
Tabelle 6:	Mittelwerte der relativen Raumlufffeuchten in den 12 Wohnungen für den Winter und den Kernwinterzeitraum (aufsteigend sortiert nach dem Zeitraum „Winter“). ....	38
Tabelle 7:	Mittelwerte der CO <sub>2</sub> -Konzentration während des Kernwinters (1.11.2020 – 31.03.2021) für die 12 Wohnungen (aufsteigend sortiert).....	40
Tabelle 8:	Mittlere Luftmengen der Lüftungsanlagen im Gebäude in unterschiedlichen Zeiträumen (aufsteigend sortiert nach dem Winter-Zeitraum).....	61
Tabelle 9:	Angenommene äquivalente Fensterlüftung (monatsweise konstant) in den Wohnungen. Wohnungsbezeichnungen anonymisiert. ....	81
Tabelle 10:	Aufstellung der Temperaturdifferenzen zwischen Simulation und Messung pro Zone..	81
Tabelle 11:	Auswirkung der Wärmezufuhr in den Fußboden statt in die Raumluf. Dargestellt ist die Temperaturdifferenz gegenüber dem Basisfall. ....	93