

# PassivhausSozialPlus – Gesamtbericht

## Modellprojekt zum klimaneutralen Bauen und zur Minimierung der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau

Forschungsprojekt

### **MOBASY**

**Modellierung der Bandbreiten und systematischen  
Abhängigkeiten des Energieverbrauchs  
zur Anwendung im Verbrauchscontrolling  
von Wohngebäudebeständen**

(Verbundvorhaben Solares Bauen FKZ 03SBE0004A)

Darmstadt, 26.10. 2023

Autoren: Marc Großklos  
André Müller  
Guillaume Behem  
Britta Stein  
Tobias Loga  
Stefan Swiderek

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

Zitervorschlag: Großklos, Marc; Müller, André; Behem, Guillaume; Stein, Britta; Loga, Tobias; Swiderek, Stefan (2023): PassivhausSozialPlus – Gesamtbericht. Modellprojekt zum klimaneutralen Bauen und zur Minimierung der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau. IWU – Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2023

in Kooperation mit: Neue Wohnraumhilfe, Darmstadt  
faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH

*Wir bedanken uns ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit!*

ISBN 978-3-941140-78-3

Lizenz:



Lizenziert unter CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU)  
Rheinstraße 65  
64295 Darmstadt  
Germany

Telefon +49 (0)6151 2904-0  
Fax +49 (0)6151 2904-97  
Internet [www.iwu.de](http://www.iwu.de)

# Inhalt

<b>1 Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung und Projektvorstellung PassivhausSozialPlus.....</b>	<b>6</b>
2.1 Beschreibung der Gebäude .....	7
2.1.1 Gebäudehülle .....	10
2.1.2 Anlagentechnik .....	12
2.2 Umsetzung.....	17
2.3 Energiebilanzen .....	19
2.4 Ausstattung der Wohnungen .....	22
2.5 Reduktion der Nebenkosten und Budgetierungskonzept .....	23
<b>3 Messtechnik.....</b>	<b>26</b>
3.1 Messkonzept .....	26
3.2 Sensoren, Zähler und Fehlergrenzen.....	30
<b>4 Wetterdaten .....</b>	<b>32</b>
<b>5 Nutzungs- und Verbrauchsdaten der Wohnungen .....</b>	<b>36</b>
5.1 Raumtemperaturen .....	36
5.1.1 Gewichtete Gebäudetemperaturen in der Heizperiode.....	36
5.1.2 Schwankungsbreite zwischen den Wohnungen .....	38
5.1.3 Vergleich unterschiedlicher Räume im Winter.....	39
5.1.4 Raumtemperaturen im Sommer .....	40
5.1.5 Vergleich unterschiedlicher Räume im Sommer .....	43
5.1.6 Treppenhaustemperaturen im Neubau .....	44
5.1.7 Temperaturen Heizräume .....	45
5.1.8 Kellertemperaturen .....	45
5.2 Raumluftfeuchte.....	46
5.3 Fensteröffnungen .....	48
5.4 CO <sub>2</sub> -Gehalt der Raumluft.....	50
5.5 Betrieb der Lüftungsanlagen .....	52
5.6 Nutzung der Wohnungen .....	54
5.7 Heizung .....	56
5.7.1 Neubau .....	56
5.7.2 Wohnungen mit auffälligen Heizwärmeverbräuchen .....	56
5.7.3 Bestandsgebäude .....	57
5.7.4 Einordnung der gemessenen Verbräuche .....	58
5.8 Trinkwasserverbräuche .....	60
5.8.1 Trinkwasserverbräuche .....	60
5.8.2 Warmwasserverbräuche .....	63
5.9 Haushaltsstrom.....	65
<b>6 Verbrauchs- und Nutzungsdaten des Gesamtgebäudes.....</b>	<b>69</b>
6.1 Gesamtwärmeabnahme im Projekt .....	69

6.2	Fernwärmebezug und Lastgänge .....	71
6.3	Wärmespeicherung und -verteilung.....	73
6.4	Heizleistungen im Bestandsgebäude.....	75
6.5	Warmwasserbereitung .....	76
6.6	Grauwasseranlage .....	77
6.7	Stromerzeugung .....	79
6.8	Batteriespeicher .....	82
6.9	Allgemein- und Hilfsstromverbräuche .....	83
6.9.1	Lüftung.....	85
6.9.2	Aufzug.....	88
6.9.3	Heizzentralen.....	88
6.9.4	Internet, Abrechnung und Monitoring .....	89
6.10	Elektroenergiebilanz .....	89
<b>7</b>	<b>Auswertung der Nebenkosten .....</b>	<b>92</b>
<b>8</b>	<b>Auswertung der Baukosten.....</b>	<b>94</b>
8.1	Kosten einzelner technischer Anlagen .....	95
8.2	PV-Anlagen .....	97
8.3	Einordnung der Kosten.....	99
<b>9</b>	<b>Erfahrungen aus Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung.....</b>	<b>100</b>
9.1	Inbetriebnahmephase und Fehlerbehebung.....	100
9.2	Betriebsoptimierung.....	101
9.3	Erfahrungen aus der Umsetzung des Vorhabens .....	104
<b>10</b>	<b>Übertragbarkeit der Ergebnisse und offene Forschungsfragen .....</b>	<b>106</b>
10.1	Umsetzung PassivhausSozialPlus unter anderen Randbedingungen .....	106
10.2	Abgleich Nebenkosten mit Planungen .....	110
10.3	Offene Forschungsfragen .....	111
<b>11</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>113</b>
<b>Anhang A -</b>	<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>116</b>
<b>Anhang B -</b>	<b>Projektbeteiligte .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang C -</b>	<b>U-Werte Bestandsgebäude.....</b>	<b>122</b>
<b>Anhang D -</b>	<b>U-Werte Neubau.....</b>	<b>125</b>
<b>Anhang E -</b>	<b>Lüftungsanlagen.....</b>	<b>127</b>

# 1 Zusammenfassung

Die Neue Wohnraumhilfe setzte in den Jahren 2018/19 das Projekt „PassivhausSozialPlus“ um, bei dem insgesamt 42 Wohnungen im geförderten Wohnungsbau für Menschen mit Zugangsschwierigkeiten zum Wohnungsmarkt geschaffen wurden. Dazu wurde auf einem Konversionsgelände in Darmstadt ein Teil eines Kasernegebäudes energetisch modernisiert und ein Teil durch einen barrierefreien Neubau ersetzt. Die Gebäude sollten niedrige Nebenkosten erreichen, die im Wesentlichen über eine Betriebskosten-Pauschale abgerechnet werden. Auch Heizung (Warmmiete) und Trinkwassererwärmung wurden in die Pauschale mit aufgenommen, für Trinkwasser sowie Haushaltsstrom, der anders als bei üblichen Mietverträgen ebenfalls Bestandteil der Nebenkostenabrechnung ist, war ein Budget enthalten. Dieses Budget ist so kalkuliert, dass es bei sparsamem Verbrauch auskömmlich ist. Damit die Mieter über die Ausschöpfung ihres Budgets immer informiert sind, wurden alle Wohnungen mit Displays ausgestattet, die den Verbrauch bis zum aktuellen Tag anzeigen, außerdem historische Werte sowie eine Hochrechnung bis zum Jahresende und ggf. eine Prognose der zu erwartenden Kosten bei gleichbleibendem Verbrauch. Diese Verbrauchsrückmeldung sollte auch zu sparsamem Verhalten motivieren. Die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Befragung zu den Erfahrungen mit den Budgets sind in einem separaten Bericht dokumentiert [Hacke, Großklos].

Das Bestandsgebäude wurde mit Passivhaus-Komponenten modernisiert, der Neubau im Passivhaus-Standard errichtet. Das modernisierte Bestandsgebäude wird über die alten Heizkörper beheizt, der Neubau besitzt eine Zuluftheizung. Beide Gebäude verfügen über wohnungsweise Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Für die Trinkwassererwärmung besitzen alle Wohnungen Frischwasserstationen, in denen das benötigte Wasser in der Wohnung vor Ort erwärmt wird, wodurch der Energieaufwand für eine hygienische Warmwasserbereitung gegenüber anderen technischen Konzepten deutlich reduziert werden kann. Die Gebäude werden über einen gemeinsamen Fernwärmeanschluss mit Wärme versorgt.

Die Gebäude verfügen über PV-Anlagen mit 40,9 (Bestandsgebäude) bzw. 43,3 kWp (Neubau) und Batteriespeicher (Bestandsgebäude: 17,5 kWh, Neubau: 43,8 kWh Nutzkapazität). Um die energiewirtschaftlichen Anforderungen zu erfüllen, wurde eine Energiegenossenschaft für den Betrieb und die Stromlieferung an die Mieter hinzugezogen. Alle Wohnungen wurden mit Küchen und besonders sparsamen Haushaltsgeräten ausgestattet, um die Voraussetzung für niedrige Haushaltsstromverbräuche der Mieter zu schaffen. Ergänzt wird das Stromsparkonzept durch LED-Beleuchtung in allen Räumen sowie besonders energiesparende Anlagentechnik. Außerdem wird gering verschmutztes Abwasser aus Dusche und Handwaschbecken getrennt gesammelt und in einer Grauwasseranlage so aufbereitet, dass dieses für die Toilettenspülung wiederverwendet werden kann. Damit soll Trinkwasser eingespart und die Betriebskosten reduziert werden.

In den vermieteten Gebäuden wurde zwischen Oktober 2019 und August 2022 ein zeitlich hoch aufgelöstes Monitoring durchgeführt, um die Verbrauchs- und Nutzungsdaten der Wohnungen erfassen zu können. Die wesentlichen Erkenntnisse diese Monitorings sind:

## **Nutzung und Komfort**

Die Raumtemperaturen in den Wohnungen lagen im Mittel bei ca. 22 °C in der Heizperiode. Die Spanne zwischen der kühlssten (19 °C) und der wärmsten Wohnung (26 °C) ist aber sehr groß. Die Temperaturen unterschieden sich im Mittel nicht wesentlich von denen in anderen energieeffizienten Gebäuden im frei finanzierten Wohnungsbau und mit Heizkostenabrechnung, so dass es hier keine Indizien gibt, dass die pauschale Abrechnung im sozialen Wohnungsbau zu einem höheren Temperaturniveau in den Wohnungen führt.

Im Sommer werden die Komfortanforderungen der DIN 4108-2 mit Ausnahme von zwei Wohnungen immer eingehalten. Die beiden Ausreißer weisen bereits im Winter so hohe Raumtemperaturen auf, dass die Temperaturobergrenzen für den Sommerfall überschritten werden, so dass hier von einem gezielten Nutzerwunsch nach hohen Raumtemperaturen ausgegangen werden muss. Eine eindeutige vertikale Schichtung der Temperaturen im Sommer mit höheren Temperaturen in den oberen Stockwerken konnte nicht festgestellt werden.

Die Raumluftfeuchte lag im Winter im Mittel zwischen 42 und 45 % relativer Feuchte, gleichzeitig war die Streuung zwischen der Wohnung mit der niedrigsten (35 % rel. F.) und mit der höchsten Feuchte (55 % rel. F.) vergleichsweise gering. Auch der Unterschied zwischen Wohnungen mit Heizkörpern und Wohnungen mit Zuluftheizung war sehr gering.

In 19 detailliert betrachteten Wohnungen wurden die Fenster in der Heizperiode im Mittel ca. 5 h/(d\*Raum) geöffnet, allerdings sind die Messdaten mit einer größeren Messunsicherheit behaftet. Dies liegt deutlich über den Fensteröffnungszeiten, die in anderen Messprojekten erfasst wurden. Ein Zusammenhang zwischen Fensteröffnungsdauer und Heizwärmeverbrauch konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

In 20 Wohnungen wurden auch die Kohlendioxid-Gehalte (CO<sub>2</sub>) der Raumluft in Wohn- und Schlafzimmern erfasst. Im Mittel lagen die CO<sub>2</sub>-Gehalte maximal bei 873 ppm, einzelne Spitzenwerte bis zu 1774 ppm traten in Wohnungen auf, in denen die Lüftungsanlage aufgrund eines Defekts abgeschaltet war. Die nach DIN EN 16789-1 zu erreichende Obergrenze für gute Luftqualität von 950 ppm wurden in 83,4 % der Messwert eingehalten.

Die Lüftungsanlagen wurden von vielen Bewohnern immer wieder in ihrem Volumenstrom angepasst, im Mittel lag der Luftwechsel ca. 15 bis 30 % unter dem Auslegungsvolumenstrom.

### Verbräuche in den Wohnungen

Die Heizwärmeverbräuche der Wohnungen lagen bezogen auf die beheizte Wohnfläche im Neubau im ersten Auswertejahr 2020/21 bei 21,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), im zweiten Auswertejahr 2021/22 bei 16,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Bezogen auf die gesamte Energiebezugsfläche lagen die Heizwärmeverbräuche zwischen 18,2 und 13,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und somit extrem niedrig. Im Bestandsgebäude lag der Heizwärmeverbrauch zwischen 20,3 (2019/20) und 26,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (2020/21), hier sind aber die Verteilverluste für die Heizwärmeverteilung von ca. 4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) mit enthalten. Rechnet man diese Verluste heraus, ergeben sich mit Heizwärmeverbräuchen zwischen 16 und 22,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) ebenfalls sehr niedrige Verbräuche.

Der gesamte Trinkwasserverbrauch lag für beide Gebäude bei ca. 21 m<sup>3</sup>/(Person\*a). Die Verbräuche lagen ca. 35 % unter dem mittleren Trinkwasserverbrauch in Deutschland. Auch hier lag wieder eine vergleichsweise große Streuung zwischen den einzelnen Wohnungen vor, besonders bei Wohnungen mit wenigen Bewohnern, was aber gerade bei Trinkwasser nicht unüblich ist. Das Budget für Trinkwasser wurde im Mittel nur um 3 % (2020) bzw. 8 % (2021) überschritten.

Die Warmwasserverbräuche erreichten zwischen 40 und 50 % des Kaltwasserverbrauchs, rechnet man zum Vergleich die Verbräuche auf eine Zapftemperatur von 60 °C um, so wurden Warmwasserverbräuche von ca. 20 l/(Person\*d) erreicht, die somit noch deutlich unter dem Planungswert von 25 l/(Person\*d) des Passivhaus-Projektierungspaket liegen.

Der Haushaltsstromverbrauch erreichte Kennwerte zwischen 24 und 26 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Zwar wurde hier das Budget 2020 um 13 % und 2021 um 19 % überschritten, sie liegen jedoch um 51 % unter dem deutschen Durchschnitt, wenn man die personenbezogene Verbrauchskennwerte berechnet. Das zeigt sich auch daran, dass insbesondere im Bestandsgebäude alle Wohnungen in die drei besten Effizienzklassen A bis C des Stromspiegel Deutschland eingeordnet werden können. Im Neubau werden in einzelnen Wohnungen auch höhere Verbräuche erreicht.

### Verbräuche im Gesamtprojekt

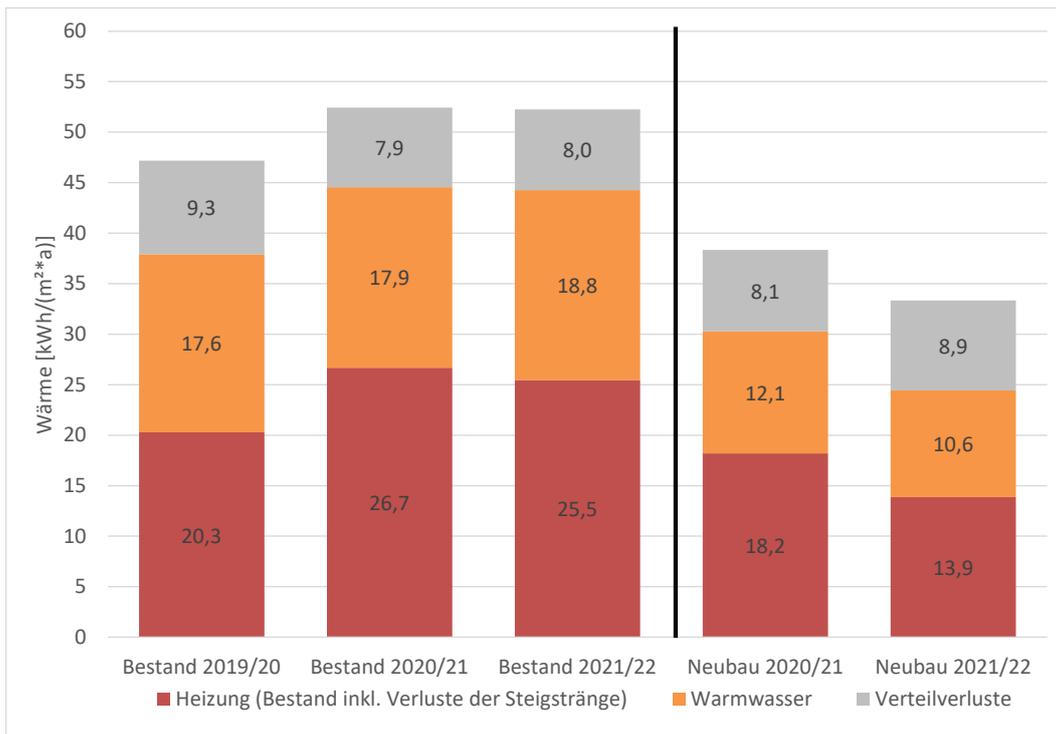
Der Gesamtfernwärmeverbrauch der beiden Gebäude lag mit 48,1 bzw. 45,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) für Heizung, Warmwasserbereitung sowie Speicher- und Verteilverluste extrem niedrig. Die Verbrauchskennwerte Wärme lagen beim Bestandsgebäude zwischen 47,2 und 52,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), beim Neubau zwischen 38,3 und 33,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (Bild 1). Hinzu kommen 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Verteilverluste zwischen Fernwärmeanschluss und Heizraum des Neubaus.

Der Fernwärmeanschluss für beide Gebäude wurde auf eine maximale Leistung von 60 kW begrenzt, die mittlere tägliche Ladeleistung für die Pufferspeicher lag bei maximal 22 kW, die maximal aufgetretene

Leistung wurde mit 77 kW gemessen. Für das Bestandsgebäude ergab sich eine maximale Heizlast (ohne Badheizkörper) von 13,9 kW für 1688 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche bzw. 8,2 W/m<sup>2</sup>.

Der Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung lag beim Bestandsgebäude bei ca. 18 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), beim Neubau zwischen 12,1 und 10,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Das Bestandsgebäude lag über dem üblichen Planungswert für den Warmwasserenergiebedarf von 11 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) – allerdings wohnen dort mehr Menschen als im Durchschnitt, der Neubau erreichte den Planungswert trotz hoher Personenanzahl. Für die Warmwasserbereitung ergaben sich im Tagesmittel Wärmeleistungen von 0,21 kW je Wohneinheit.

**Bild 1: Verbrauchskennwerte der beiden Gebäude im Messzeitraum**



Die Grauwasseranlage erreichte nach der Nachrüstung eines zusätzlichen Filters Deckungsgrade zwischen 60 und 70 % am gesamten Wasserverbrauch für die Toilettenspülung. Dieser lag jedoch zwischen 8 bis 25 % über dem mittleren deutschen Trinkwasserverbrauch für diese Anwendung. Im Betrieb zeigte sich, dass die Anlage nach ca. einem Jahr gewartet werden musste, um den ursprünglichen Deckungsgrad wieder annähernd zu erreichen.

Der Allgemeinstromverbrauch lag bei ca. 1,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Bestandsgebäude und bei 1,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Neubau. Für Hilfsstrom wurden jeweils ca. 6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) verbraucht. Die Lüftungsanlagen sind darin mit ca. 2,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Bestandsgebäude bzw. 4,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Neubau enthalten. Die Grauwasseranlage, die im Bestandsgebäude angeordnet ist und beide Gebäudeteile versorgt, wies einen Stromverbrauch von 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) auf, der Aufzug im Neubau 1,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

### Stromerzeugung und Speicherung

Die Ost-/West-orientierten PV-Anlagen auf den Dächern erzeugten zwischen 23 (2021) und 24 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (2020) elektrische Energie. Dies liegt etwa in der Größenordnung des Haushaltsstromverbrauchs der Wohnungen. Von der PV-Erzeugung wurden ca. 9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) ins öffentliche Netz eingespeist und ca. 11 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) direkt im Gebäude verbraucht. Für die Ladung der Batteriespeicher wurden zusätzlich ca. 3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) PV-Strom verwendet, der Wirkungsgrad der Speicher lag im Mittel bei 71 % im Bestandsgebäude und 75 % im Neubau.

Zwischen 58,1 und 63,2 % der PV-Stromerzeugung wurden im Gebäude selbst verbraucht, davon entfielen 45,5 bis 48,9 % auf Direktverbrauch und der Rest auf die zeitversetzte Nutzung nach Zwischenspeicherung in den Batteriespeichern. Insgesamt wurde ein Deckungsgrad des Gesamtstromverbrauchs im Gebäude zwischen 40,9 und 43,6 % erreicht.

Der Netzbezug der Gebäude lag bei 16,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Jahr 2020 und bei 18,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Jahr 2021.

### **Nebenkosten**

Die Auswertung der Betriebskosten ergab, dass diese im Jahr 2020 bei 2,02 und 2021 bei 2,36 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) lagen und damit für 2020 in der Höhe der Planwerte. Allerdings waren verbrauchsabhängige und verbrauchs-unabhängige Kosten anders verteilt als erwartet und es war keine Reserve für Unvorhergesehenes vorhanden, so dass die Betriebskostenpauschale 2021 von 2,10 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) auf 2,50 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) erhöht werden musste. Nach dem Betriebskostenspiegel 2019 hätten sich im Mittel 3,19 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) ergeben – die Kosten lagen somit um 22 % unter denen des Betriebskostenspiegels. Vergleicht man die Kosten mit denen im sozialen Wohnungsbau in Darmstadt 2020 von 3,54 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat), so liegen die Betriebskosten des PassivhausSozialPlus um 40 % unter diesem Vergleichswert.

Hinzu kommt das Budget für Haushaltsstrom, das von 0,52 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) auf 0,68 €/ (m<sup>2</sup>\*Monat) im Jahr 2021 erhöht wurde. Aufgrund der niedrigen Haushaltsstromverbräuche und des vergleichsweise niedrigen Strompreises durch den PV-Stromanteil wurden die Mieter hier ebenfalls deutlich entlastet.

Die hohen energetischen Standards und die Nutzung von PV-Strom haben bei dem deutlichen Energiepreisanstieg 2021 und vor allem im Jahr 2022 den Kostenanstieg für die Bewohner deutlich begrenzt, so dass die umgesetzten Konzepte auch die Robustheit gegenüber Preisanstiegen verbessern.

### **Baukosten**

Die Baukosten für die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 lagen mit 1.468,63 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) im Bestandsgebäude und 1.744,94 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) im Neubau vergleichsweise niedrig. Im Bestandsgebäude liegen kaum geeignete Vergleichswerte vor, für den Neubau ergab eine Auswertung, dass das PassivhausSozialPlus im untersten Bereich der Kosten von KfW-Effizienzhaus 40-Projekten liegt (PV-Anlage und Batteriespeicher herausgerechnet) und auch noch innerhalb der Kostenspanne von Neubauten nach EnEV 2016. Somit konnte das Projekt trotz seines hohen Standards (Passivhaus, Grauwasseranlage, ...) sehr kostengünstig umgesetzt werden.

### **Erfahrungen**

Die Erfahrungen aus der Umsetzung des Projekts wurden auf Basis der Betriebsoptimierung und eines Workshops mit den beteiligten Planern und einigen Lieferanten zusammengetragen. In der Inbetriebnahmephase mussten Störungen und Fehlfunktionen behoben werden, weiterhin gab es Probleme, die durch Software-Updates bei den Lüftungsanlagen, den Batteriespeichern oder der Grauwasseranlage behoben werden konnten. Auch die Heizungsregelung wurde durch die Betriebsoptimierung verbessert und somit konnten Kosten für die Mieter eingespart werden.

Generell ist eine sorgfältige Inbetriebnahme der Anlagentechnik für den ordnungsgemäßen und energieeffizienten Betrieb sehr wichtig. Das zeigte sich auch im Workshop mit den Planern. Darüber hinaus kommt dem Gewerk Elektro mit der Vernetzung der verschiedenen anlagentechnischen Komponenten eine zentrale Rolle im heutigen Bauprozess zu. Zusätzlich ist eine Schnittstellenkoordination zwischen den Gewerken für den reibungsarmen und kostensparenden Bauprozess von großer Bedeutung.

### **Fazit**

Insgesamt zeigen die Projektergebnisse, dass mit dem PassivhausSozialPlus bei vergleichsweise niedrigen Baukosten Gebäude mit einem hohen Komfort und gleichzeitig niedrigen Verbräuchen bei Heizwärme,

Trinkwasser und Haushaltsstrom erreicht wurden. Die Nebenkosten liegen ca. 40 % unter denen vergleichbarer Wohnungen im sozialen Wohnungsbau in Darmstadt. Das Konzept der Pauschalierung in Verbindung mit einer Budgetierung von Verbrauchskosten bietet Mietern die Chance niedrige Betriebskosten zu erreichen und kann Vermieter vom Aufwand der Betriebskostenabrechnung entlasten und gleichzeitig Anreize für Investitionen in hohe energetische Standards sowie Konzepte für niedrige Nebenkosten schaffen.

## 2 Einleitung und Projektvorstellung PassivhausSozialPlus

Bezahlbarer Wohnraum steht im Fokus von Politik und Öffentlichkeit. Für die Bezahlbarkeit sind die Wohnkosten die entscheidende Größe. Sie umfassen einerseits die Kaltmieten, andererseits auch die Betriebs- bzw. Nebenkosten. Niedrige Kaltmieten werden in Deutschland vor allem im geförderten (sozialen) Wohnungsbau erreicht, die Anzahl der geförderten Wohnungen mit Mietpreisbindung hat sich jedoch seit 2007 von 2,03 Mio. auf 1,1 Mio. in 2020 fast halbiert [Statista 2023]. Die Bedeutung der Nebenkosten hat sich zuletzt während des extremen Anstiegs der Energiepreise im Jahr 2022 gezeigt.

Effizienzmaßnahmen wie Wärmedämmung oder sparsame Haushaltsgeräte können den Energieverbrauch deutlich senken und damit die Nebenkosten reduzieren oder bei einem Anstieg der Preise die Energiekosten dämpfen. Allerdings werden solche Effizienzmaßnahmen – wenn überhaupt – bisher eher im frei finanzierten Wohnungsbau umgesetzt. Beim geförderten (sozialen) Wohnungsbau beschränken die dort festgelegten Obergrenzen für die Kaltmieten die Baukosten, so dass die technischen Möglichkeiten zur Verbrauchsreduktion hier kaum ausgeschöpft werden. Menschen mit niedrigem Einkommen sind aber besonders auf geringe Wohnkosten angewiesen und müssen bei den Miet- und Verbrauchskosten entlastet werden. Betroffen sind große Teile der Bevölkerung – insbesondere Geringverdiener, Rentner, Alleinerziehende, Arbeitslose und kinderreiche Familien. Erhalten sie staatliche Transferleistungen, liegt die Minimierung der Wohnkosten auch im gesamtgesellschaftlichen Interesse, da diese Leistungen dann von der Allgemeinheit getragen werden.

Das PassivhausSozialPlus setzt an dieser Stelle an. Es ist ein Vorhaben der Neuen Wohnraumhilfe in Darmstadt, mit dem Menschen mit Zugangsschwierigkeiten zum Wohnungsmarkt mit kostengünstigem und klimafreundlichem Wohnraum versorgt werden sollen. 42 Wohnungen, geplant für Haushalte von einer bis zu 8 Personen, sind durch das Vorhaben entstanden. Die Konzeption erfolgt durch die Zusammenarbeit von Neuer Wohnraumhilfe und dem Büro faktor10.

Die Ziele des Vorhabens können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Schaffung von bezahlbarem Wohnraum im geförderten Wohnungsbau (Nettokaltmiete 6,50 €/m<sup>2</sup>\*Monat)
- Gebäude im Passivhaus-Standard errichtet bzw. mit Passivhauskomponenten modernisiert, um eine hohe Energieeffizienz und möglichst niedrige Treibhausgas-Emissionen zu erreichen. Gleichzeitig erfüllt das modernisierte Bestandsgebäude die Anforderungen an das KfW-Effizienzhaus 55, der Neubau den KfW-Effizienzhaus 40 Plus-Standard. Der Passivhausstandard ermöglicht nicht nur niedrige Energiekosten, sondern auch einen hohen Wohnkomfort für die Mieter mit gleichmäßigen Temperaturen und frischer Luft in den Wohnungen
- Preisgünstiges und optimiertes Bauen
- Barrierefreiheit für einen Teil der Wohnungen, 6 rollstuhlgerechte Wohnungen
- Niedrige Nebenkosten, die nicht mehr individuell abgerechnet werden, sondern über eine Pauschale
- Für Wasser und Haushaltsstrom ist ein Budget in der Nebenkostenpauschale enthalten, die Ausnutzung der Budgets wird in der Wohnung visualisiert
- Entlastung kommunaler Haushalte durch Verminderung der Kosten für Sozialleistungen für die Mieter

Die Beteiligten des Vorhabens sind in Tab. 33 im Anhang B - zu finden (ohne Nennung der zahlreichen ausführenden Handwerksfirmen).

## 2.1 Beschreibung der Gebäude

Das Projekt PassivhausSozialPlus befindet sich in der Lincoln-Siedlung in Darmstadt, einer ehemaligen amerikanischen Kaserne, die ab ca. 2015 für die zivile Nutzung umgewidmet wurde. Auf dem Grundstück befand sich ein Gebäuderiegel mit drei Hauseingängen, in dem sich auf drei Stockwerken Wohnungen für Soldaten mit ihren Familien befanden (Bild 2). Die Gebäude waren in den 1950er Jahren errichtet worden und insgesamt in einem vergleichsweise guten Zustand (Bild 3). Allerdings waren die Wohnungen recht groß und entsprachen nicht den Anforderungen an Wohnungen im geförderten Wohnungsbau in Hessen. Außerdem wäre eine Barrierefreiheit nur mit großem Aufwand und zu hohen Kosten herzustellen gewesen.

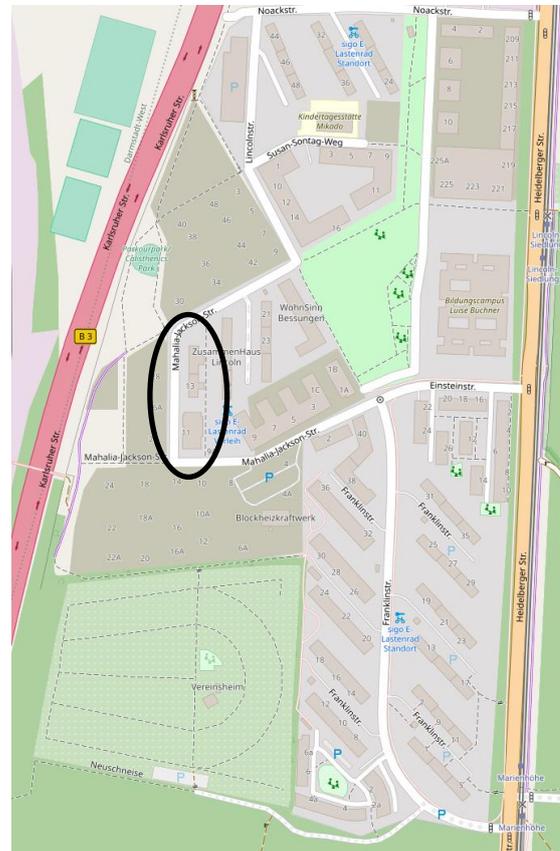
Für die Erreichung der Projektziele mussten die Gebäude sowohl bei den Wohnungsgrundrissen, dem energetischen Standard als auch bei der Anzahl der Wohnungen angepasst werden. Zwei Treppenhäuser wurden erhalten und energetisch modernisiert (Gebäudeteile „A“ und „B“), ein Treppenhaus wurde abgerissen und durch einen barrierefreien Ersatzneubau mit 6 rollstuhlgerechten Wohnungen ersetzt (Gebäudeteil „C“).

In den erhaltenen Gebäudeteilen wurden die Bestandswohnungen um je ein Zimmer verkleinert. Diese wurden zusammen mit zwei Anbauten zu insgesamt sechs zusätzlichen kleinen Wohnungen für jeweils eine Person. Weiter wurde das Bestandsdach abgetragen und durch ein neues Geschoss mit Flachdach ersetzt. Im Kellergeschoss wurde neben den Mieterkellern und Technikräumen auch ein Gemeinschaftsraum geschaffen. Durch die Weiterverwendung eines Großteils des Bestandsrohbaus und auch von Ausstattungskomponenten konnten die Herstellungskosten für das Projekt minimiert und gleichzeitig die Baukosten reduziert werden. Die Bauarbeiten starteten im Sommer 2018. Die Wohnungen des Bestandsgebäudes wurden im August bzw. September 2019 vermietet und überwiegend auch sofort bezogen.

Der Ersatzneubau besitzt vier Geschosse und ist nicht unterkellert. Dadurch mussten die Abstellräume für die Mieter innerhalb der thermischen Hülle im Bereich der Flure im Treppenhaus angeordnet werden. Im Erdgeschoss befindet sich auch ein kleines Büro für die Neue Wohnraumhilfe. Das Gebäude verfügt über einen zentralen Aufzug, barrierefreien Zugang zu allen Wohnungen und 6 Wohnungen, die rollstuhlgerecht ausgeführt sind. Der Neubau wurde im Dezember 2019 fertiggestellt.

In Bild 4 und Bild 5 sind die beiden Gebäude nach der Fertigstellung zu sehen. Bild 6 zeigt exemplarische Wohnungsgrundrisse von Bestandsgebäude und Neubau.

**Bild 2: Lincoln-Quartier mit Lage des PassivhausSozialPlus (Kartenausschnitt: [OpenStreetMap])**



**Bild 3: Ansichten der Gebäude vor der Modernisierung (Straßenansicht links), Rückseite (rechts)**



**Bild 4: Straßenansichten des modernisierten Gebäudes (links) und des Ersatzneubaus (rechts)**



**Bild 5: Rückansichten des modernisierten Gebäudes (links) und des Ersatzneubaus (rechts, Bildquelle [Gängler 2020])**



**Bild 6: Wohnungszerschnitte im Bestandsgebäude (Dachgeschoss Bauteile A und B, oben) und Neubau (Bauteil C, unten) (Bildquelle: [NWH 2020])**



Das Bestandsgebäude besitzt 22 Wohneinheiten und eine vermietete Wohnfläche von 1.685,5 m<sup>2</sup>, die Energiebezugsfläche beträgt 1.687,7 m<sup>2</sup>. Der Neubau besitzt 20 Wohnungen mit 1.591,8 m<sup>2</sup> vermieteter Wohnfläche und 1.767,9 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche (Tab. 1).

Die Unterschiede zwischen der beheizten Wohnfläche und der Energiebezugsfläche nach PHPP entstehen im Bestandsgebäude hauptsächlich durch den zusätzlichen Gemeinschaftsraum im Keller, beim Neubau durch die zusätzlichen Abstellräume und die Verkehrsflächen innerhalb der thermischen Hülle (ohne aktive Beheizung). Für die Auswertungen wird in der Regel die (etwas kleinere) beheizte Wohnfläche verwendet, da der Bezug zu den Wohnungen und deren Nutzung im Vordergrund stehen.

**Tab. 1: Flächen und energetische Kenndaten der Gebäude**

	Modernisiertes Bestandsgebäude	Neubau	Gesamt
vermietete Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	1.686,5	1.591,8	3.278,2
beheizte Wohnfläche [m <sup>2</sup> ] <sup>1</sup>	1.622,2	1.576,8	3.199,0
Energiebezugsfläche nach PHPP [m <sup>2</sup> ]	1.687,7	1.767,9	3.455,5
Gebäudenutzfläche A <sub>N</sub> [m <sup>2</sup> ]	2.179,9	2.116,8	4.296,7
Anzahl Wohnungen	22	20	42
Personenbelegung (Planwert)	74	58	132
A/V <sub>e</sub> [m <sup>-1</sup> ]	0,42	0,35	

### 2.1.1 Gebäudehülle

#### Bestandsgebäude

Das Bestandsgebäude wurde in den beheizten Bereichen mit Dämmstärken gedämmt, die dem Passivhaus-Standard entsprechen (siehe Anhang C - Tab. 34). Der Wärmeschutz besteht beim Bestandsgebäude überwiegend aus expandiertem Polystyrol (EPS) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(m\*K) und Schichtstärken von ca. 30 cm. Das Flachdach wurde mit 36 cm expandiertem Polystyrol ( $\lambda$ -Wert=0,032 W/(m\*K)), die Dächer der Anbauten mit 30 cm EPS gedämmt. Die Kellerdecke besitzt 3 cm Trittschaldämmung auf der Kellerdecke und kellerseitig 20 cm Mineralwolle ( $\lambda$ =0,035 W/(m\*K)). In einem Teilbereich des Versammlungsraumes im Keller konnte der Boden aufgrund der bauseitigen Höhen teilweise nur mit 10 cm extrudiertem Polystyrol gedämmt werden, teilweise waren auch hier 30 cm möglich. Kellerwände zum beheizten Bereich wurden mit 20 cm Polystyrol-Hartschaumplatten gedämmt, zum Kellerflur mit 10 cm. Die Treppenhäuserläufe zum Keller erhielten 6 cm Polyurethan-Dämmplatten ( $\lambda$ =0,025 W/(m\*K)), die Unterseiten des Eingangspodests zum Keller wurden mit 20 cm Polystyrol-Dämmplatten gedämmt.

Die Verglasungen der Fenster besitzen einen U-Wert von 0,5 W/(m<sup>2</sup>\*K), einen g-Wert von 0,54 sowie thermisch getrennte Abstandhalter. Der U-Wert des Rahmens liegt bei 0,94 W/(m<sup>2</sup>\*K), bei den Eingangstüren bei 1,2 W/(m<sup>2</sup>\*K), bei den Balkon- bzw. Terrassentüren mit Festverglasung bei 1,0 W/(m<sup>2</sup>\*K). Die sich ergebenden Fenster-U-Werte U<sub>w</sub> liegen zwischen 0,70 W/(m<sup>2</sup>\*K) bei großen Fenstern und 0,87 W/(m<sup>2</sup>\*K) bei Balkontüren.

#### Neubau

Der Neubau wurde mit einem Wärmeschutz im Passivhaus-Standard ausgeführt. Die Dämmung der Außenwand wurde in der Fläche mit 30 cm Polystyrol mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,034 W/(m\*K) ausgeführt, die Brandriegel in Mineralfaser ( $\lambda$ =0,035 W/(m\*K)). Die Bodenplatte wurde vollflächig mit 30 cm extrudiertem Polystyrol-Schaum ( $\lambda$ =0,035 W/(m\*K)) ohne zusätzliche Fundamente gedämmt. Das Dach erhielt 36 cm expandierte Polystyrol-Dämmung ( $\lambda$ =0,032 W/(m\*K)), der Dachausstieg vom Treppenhaus 22 cm Polyurethan-Hartschaumdämmung ( $\lambda$ =0,023 W/(m\*K)). Die U-Werte sind in Anhang D - in Tab. 35 zu finden.

<sup>1</sup> Im Vergleich zu den Wohn- und Energiebezugsflächen, die in [Großklos et al. 2021] zugrunde gelegt wurden, haben sich die Flächen durch eine Nacherhebung der Flächen nach Abschluss der Arbeiten leicht verändert. Die Differenzen liegen zwischen 0,2 % und 1,5 %.

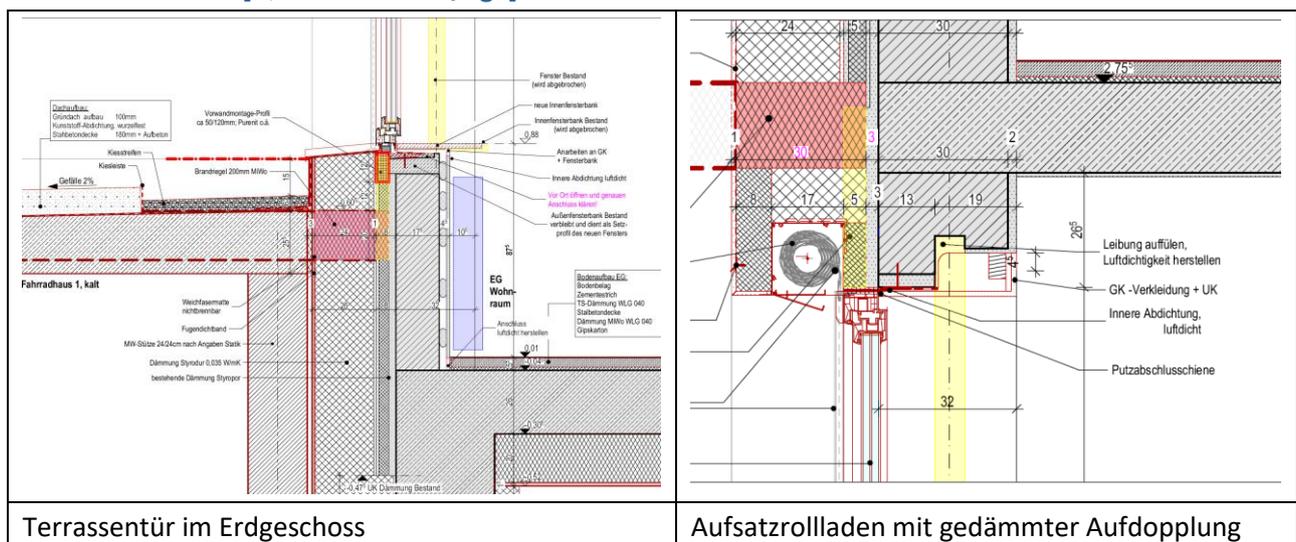
Die Verglasungen der Fenster besitzen einen U-Wert von  $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , einen g-Wert von  $0,54$  sowie thermisch getrennte Abstandhalter. Die sich ergebenden Fenster-U-Werte  $U_w$  liegen zwischen  $0,70 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bei großen Fenstern und  $0,87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  bei Balkontüren. Ein Teil der Fenster besitzt opake Paneele mit einem U-Wert von  $0,56 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Der U-Wert des Rahmens liegt bei  $0,94 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , bei den Eingangstüren bei  $1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , bei den Balkon- bzw. Terrassentüren mit Panel bei  $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

### Wärmebrücken

Für die Bilanzierung des Gebäudes nach EnEV in der Planungsphase wurde beim Bestandsgebäude ein pauschaler Wärmebrückenzuschlag von  $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  und beim Neubau der Wert von  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  verwendet, da Kosten für einen detaillierten Wärmebrückennachweis eingespart werden sollten und die Zielwerte für die KfW-Förderung dennoch erreicht wurden.

Beim Neubau konnte aufgrund des zu hohen Anteils an Fenstern mit Vorbaurollladen ( $> 70 \%$ ) sowie einer Rahmenüberdämmung von nur  $2,5$  statt  $3 \text{ cm}$  der verbesserte Wärmebrückenzuschlag von  $0,035 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  nach Formblatt D der KfW nicht verwendet werden. Das Gebäude wurde jedoch wärmebrückenfrei konstruiert: die Bodenplatte ist ohne Durchdringungen vollflächig mit  $30 \text{ cm}$  druckbelastbarem Dämmstoff gedämmt (siehe Bild 7 links), die Attika außer einer Holzwerkstoffplatte und einzelnen Metallaschen komplett in Wärmemedämmung ausgeführt, die Fenster wurden vor dem Mauerwerk in der Dämmebene angeordnet und die Vorbaurollläden auf  $8 \text{ cm}$  starke Aufdopplungen mit PU-Dämmstoff montiert (Bild 7 rechts). Die einzigen nennenswerten Wärmebrücken liegen im Bereich der Befestigungen der thermisch getrennten Balkone am Gebäude. Für solche Metallanker wurden bei dem Gebäude Cordierstraße 4 in Frankfurt [Schaede, Großklos 2013] in einer thermisch weniger optimierten Fassung ein punktförmiger Wärmebrückenverlust von  $0,058 \text{ W}/\text{K}$  je Anker ermittelt. Bei insgesamt  $48$  Ankern ergibt sich ein zusätzlicher Wärmebrückenverlust für das PHSP von  $2,784 \text{ W}/\text{K}$  für das Gebäude, was einem Wärmebrückenaufschlag von  $0,001 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  entspricht. Insgesamt wurde der tatsächliche Wärmebrückenzuschlag auf  $< 0,030 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  abgeschätzt. In der Gebäudebilanzierung werden die Zielwerte für den KfW-Standard jedoch auch mit dem Pauschalwert von  $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  erreicht.

**Bild 7: Ausführung der Details an Terrassentür und Fensters am Aufsatzrollladen im Bestandsgebäude [Quelle: faktor10/dga]**



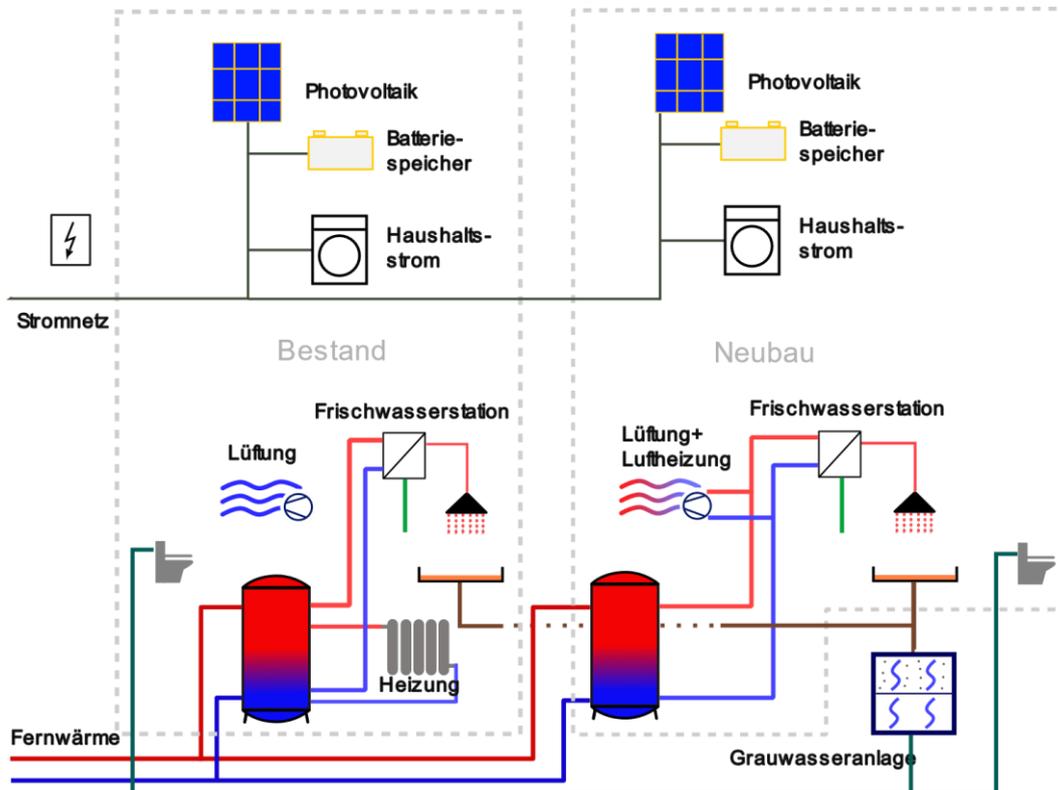
Im Nachgang der Umsetzung wurden die Wärmebrücken detailliert berechnet. Für das Bestandsgebäude ergab sich ein Wärmebrückenzuschlag  $\Delta U_{WB}$  von  $0,018 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , beim Neubau lag der Wert aufgrund der wärmebrückenfreien Konstruktion bei  $0,002 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Somit werden die oben beschriebenen Ansätze in der Praxis deutlich unterschritten.

## 2.1.2 Anlagentechnik

### Wärmeversorgung

Die Gebäude des PassivhausSozialPlus besitzen einen gemeinsamen Fernwärmeanschluss im Keller des ersten Bestandsgebäudes. Von diesem aus wird die Wärme zu den beiden Heizungsräume für das Bestandsgebäude und den Neubau geführt. Jeder Heizungsraum verfügt über zwei Pufferspeicher mit je 1500 l Volumen, aus denen die Wärme für die Beheizung und die Warmwasserbereitung verteilt wird. Die Speicher dienen der Pufferung von Lastspitzen bei der Warmwasserbereitung und damit der Reduktion der Fernwärme-Anschlussleistung, wodurch sich die Nebenkosten für die Bewohner reduzieren (siehe Kapitel 2.5). Die Fernwärmeübergabestation besitzt eine maximale Leistung von 90 kW, die bestellte Leistung wurde jedoch auf 60 kW reduziert. Zwei gekoppelte Regelungen steuern die Nachladung der Pufferspeicher über den Fernwärmeanschluss. Der lokale Versorger garantiert für die Fernwärme einen Primärenergiefaktor von 0,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>End</sub>. Bild 8 zeigt das grundsätzliche Anlagenschema für Bestandsgebäude und Neubau für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Strom und Grauwassernutzung.

**Bild 8:** Grundsätzliches Anlagenschema für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Strom und Grauwasseraufbereitung (auch im Bestandsgebäude vorhanden)



### Beheizung

Bei den Bestandsgebäuden wurden die alten Heizkörper und die Verteilung mit Steigsträngen an den Fensterachsen auf der West- und Ostseite des Gebäudes weitgehend beibehalten. Die Heizkörper wurden gereinigt und nach Fertigstellung der Wohnungen wieder montiert. Die Steigstränge waren nicht mehr zugänglich und verblieben im Originalzustand mit einer Verlegung in der Außenwand und ohne nennenswerte Rohrdämmung. Die horizontale Verteilung im Keller wurde durch Regulierventile für jeden Steigstrang und mit 160 mm Dämmung neu verlegt. Neben den Bestandsheizkörpern wurden auch die Heizkörper für die Anbauten und die Räume im aufgestockten Dachgeschoss an die bestehenden Steigstränge angeschlossen, die Badheizkörper wurden überwiegend an die Verteilung für die Frischwasserstationen angeschlossen.

Die Heizungsverteilung besitzt eine maximale Vorlauftemperatur von 48 °C und wird über einen Außentemperaturfühler beim Überschreiten der Heizgrenztemperatur von 10 °C abgeschaltet (siehe auch Kapitel 9). Alle Heizkörper besitzen raumweise Thermostatventile zur Regulierung.

Im Neubau werden die Wohnungen überwiegend über Nachheizregister in den Lüftungsanlagen beheizt. Dazu befindet sich im Wohnzimmer bzw. einem Führungsraum jeder Wohnung ein Raumluftthermostat, mit dem die Bewohner die Raumlufttemperatur zentral für die Wohnung einstellen können. Zusätzlich befinden sich in jedem Bad noch ein Heizkörper, mit dem über ein Thermostatventil die Temperatur in diesem Raum individuell eingestellt werden kann. Nachheizregister und Heizkörper sind an die Warmwasserversorgung angeschlossen (siehe unten) und werden damit ganzjährig mit Temperaturen von ca. 55 °C versorgt.

### Warmwasserbereitung

Trinkwasser wird dezentral in den Wohnungen über Frischwasserstationen erwärmt. Dadurch muss kein warmes Trinkwasser bevorratet werden und die Sicherstellung der Trinkwasserhygiene ist auch ohne thermische Desinfektion mit hohen Temperaturen von mindestens 60 °C möglich, wenn in der Planung darauf geachtet wird, dass sich von der Frischwasserstation bis zu Zapfstelle weniger als 3 Liter Wasser in den Leitungen befindet. Aus diesem Grund wurden in einer sehr großen Wohnung im Dachgeschoss des Bestandsgebäudes zwei Frischwasserstationen installiert.

Die Frischwasserstationen sind jeweils übereinander angeordnet, die Steigstränge wurden im Bestandsgebäude neu verlegt und mit 32 mm gedämmt. Am oberen Ende jedes Steigstranges besitzt die letzte Frischwasserstation ein Überströmventil, um die Temperatur im Steigstrang und damit auch an der Frischwasserstation möglichst konstant zu halten und schnell Warmwasser auf der eingestellten Zapftemperatur von ca. 45 °C liefern zu können. Die Frischwasserstationen befinden sich in der Regel im Badezimmer und liefern das Warmwasser auch in die im Nebenraum angeordneten Küchen.

### Lüftungsanlagen

Die Wohnungen besitzen jeweils ein eigenes Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung (siehe Bild 9). Da im Bestandsgebäude Heizkörper vorhanden sind, besitzen die Lüftungsanlagen weder ein Heizregister noch ein Frostschutzregister. Im Fall von strengem Frost in der Außenluft takten die Anlagen, um ein Vereisen der Wärmetauscher zu verhindern. Die Anlagen wurden je nach Wohnungsgröße auf Luftwechsel zwischen 0,44 1/h und 0,68 1/h ausgelegt. Die Kenndaten der Lüftungsanlagen im Bestandsgebäude sind im Anhang in Tab. 36 zu finden. Für die Anlagen gibt der Hersteller Temperaturänderungsgrade zwischen 82 und 88 % an, für die Bilanzierung im PHPP wurde je nach Gerätetyp mit Wärmebereitstellungsgraden zwischen 80 und 83 % gerechnet.

Im Neubau erfolgt die Beheizung überwiegend über die Zuluft – nur in den Bädern sind separate Heizkörper vorhanden. Aus diesem Grund verfügen die Lüftungsanlagen im Neubau sowohl über ein Nachheizregister zur Beheizung der Wohnung als auch ein elektrisches Vorheizregister zur Frostfreihaltung der Wärmetauscher. Dadurch steht die Heizleistung auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen dauerhaft zur Verfügung. Die Regelung der Vorheizregister hing ursprünglich neben der Außentemperatur auch von der Raumlufttemperatur und –feuchte sowie den Temperaturen am Wärmetauscher selbst ab, so dass keine festen Schwellen für das Einschalten des Vorheizregisters existierten. Im November 2020 wurde ein Software-Update auf den Anlagen eingespielt, das eine getrennt Einstellung der Frostschutztemperatur erlaubt (siehe Kapitel 6.9.1 und 9).

Bei Frostgefahr wird die Zuluft teilweise im Bypass am Wärmetauscher vorbeigeführt. Die Anlagen besitzen eine Wärmebereitstellungsgrad nach DIBt zwischen 86 % und 89 %, für die Bilanzierung wurden hier die Werte aus den Zertifikaten des Passivhaus Institut im Bereich zwischen 84 und 86 % verwendet. Der Auslegungsluftwechsel liegt zwischen 0,44 1/h und 0,68 1/h – je nach Wohnungsgröße (siehe Tab. 37 im Anhang). Für die Verlegung der Lüftungskanäle wurden vor allem abgehängte Decken im Wohnungsflur genutzt. Das prinzipielle Verlegeschema ist in Bild 101 und Bild 102 im Anhang E - zu sehen. In jeder Wohnung befindet

sich ein 4-Stufen-Schalter, mit dem die Bewohner den Volumenstrom der Anlage individuell einstellen können (Bild 9 rechts).

**Bild 9: Lüftungsanlagen in den Gebäuden: Einbau in der abgehängten Decke in einer Küche des Bestandsgebäudes (links), Einbau in einer Nische im Bestandsgebäude (Mitte), Stufenschalter der Lüftung**



In den Gebäuden werden auch die Treppenhäuser mechanisch mit Wärmerückgewinnung belüftet, im Neubau war dies auch für die Einhaltung der Förderkriterien für den KfW Effizienzhaus 40 Plus-Standard erforderlich. Die Lüftungsgeräte sind oben im Treppenhaukopf positioniert (Bild 10 links), die Zu- und Abluftkanäle sind im Bestandsgebäude an den Treppenpodesten an der Außenwand verlegt. Im Neubau wurde der Zuluftkanal in einem separaten Schacht bis ins Erdgeschoss geführt. Die Auslegungsdaten sind in Tab. 36 und Tab. 37 im Anhang dokumentiert.

Der Gemeinschaftsraum im Kellergeschoss des Bestandsgebäudes und das Büro im Neubau werden jeweils mit einem eigenen Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung belüftet (siehe Tab. 36). Die Kellerräume im Bestandsgebäude werden über einen Abluftventilator entlüftet (Bild 10 rechts). Im Zuge der Modernisierung wurden dazu die Kellerfenster verschlossen (außer im Technikraum) und drei Zuluftöffnungen auf der gegenüberliegenden Seite des Kellers geschaffen. Der Raum mit der Grauwasseraufbereitungsanlage wird separat mechanisch entlüftet.

**Bild 10: Lüftungsanlage für das Treppenhaus (links) und im Keller (rechts)**



**PV-Anlagen und Batteriespeicher**

Sowohl das modernisierte Bestandsgebäude als auch der Neubau erhielten jeweils sowohl eine PV-Anlage als auch einen Batteriespeicher. Zum Einsatz kamen monokristalline PV-Module aus deutscher Fertigung mit einem Normwirkungsgrad (STC) von 18,5 %. Die Module besitzen eine Ost-/West-Orientierung und eine Neigung von 15 ° (Bild 11). Da sie auf einem Gründach installiert sind, wurden spezielle Aufständungen verwendet, die die PV-Module ohne Dachdurchdringung mit der Last des Gründachs fixieren. Auf dem Neubau mussten 39,3 kWp PV-Leistung erreicht werden, um die Anforderungen an das KfW-Effizienzhaus 40 Plus einzuhalten. Die erforderliche Mindeststromerzeugung ergibt sich bei 20 Wohneinheiten und einem Gebäudevolumen  $V_e$  von 7.464 m<sup>3</sup> zu 31.002 kWh/a. Die Mindestanzahl lag damit bei 129 Modulen in der eingesetzten Qualität, wenn für die Berechnung Modulkennwerte und die Wetterdaten der Klimaregion 12 (Mannheim) zugrunde gelegt werden. Für das Bestandsgebäude gab es keine Vorgaben für die Größe der PV-Anlage.

**Bild 11: PV-Anlage auf dem Neubau (links) und Wechselrichter der PV-Anlage des Bestandsgebäudes (rechts)**



Die installierte PV-Leistung liegt beim Bestandsgebäude bei 40,9 kWp, beim Neubau bei 43,3 kWp (siehe Tab. 2). Die leistungsstärkeren Module mit 310 W<sub>p</sub>, die beim Bestandsgebäude verwendet wurden, waren bei der Installation auf dem Neubau nicht lieferbar – deswegen wurden auf dem Neubau 305 W<sub>p</sub>-Module installiert. Beide Anlagen besitzen jeweils zwei Wechselrichter, die jeweils im oberen Bereich des Treppenhauses zum Dachausgang innerhalb der thermischen Hülle montiert wurden.

**Tab. 2: Dimensionierung von PV-Anlage und Batteriespeicher**

	Anzahl Module und Modulleistung	Batteriespeicher Brutto-/Nettokapazität (Lade-/Entladeleistung)
Bestand (BT AB)	132 Module à 310 W <sub>p</sub> ; Σ 40,92 kWp	22,1 kWh / 17,5 kWh (3x3 kW)
Neubau (BT C)	142 Module à 305 W <sub>p</sub> ; Σ 43,31 kWp	55,2 kWh / 43,8 kWh (3x5 kW)

Die Elektrospeicher besitzen Batteriezellen aus Lithium-Eisenphosphat, die aufgrund ihrer Zelltechnologie eine hohe Brandsicherheit besitzen. Der Speicher im Neubau musste aufgrund der Anforderungen aus dem KfW-Effizienzhaus 40 Plus mindestens eine Kapazität von 39,3 kWh besitzen. Installiert wurden 43,8 kWh Nutzkapazität. Für das Bestandsgebäude bestanden keine Vorgaben zur Speichergröße, so dass dieser mit 17,5 kWh Nutzkapazität deutlich kleiner ausgelegt wurde, als im Neubau (Bild 12).

**Bild 12:** Elektrospeicher für beide Gebäudeteile: links Bestandsgebäude (17,5 kWh Nettokapazität), rechts Neubau (43,8 kWh Nettokapazität)

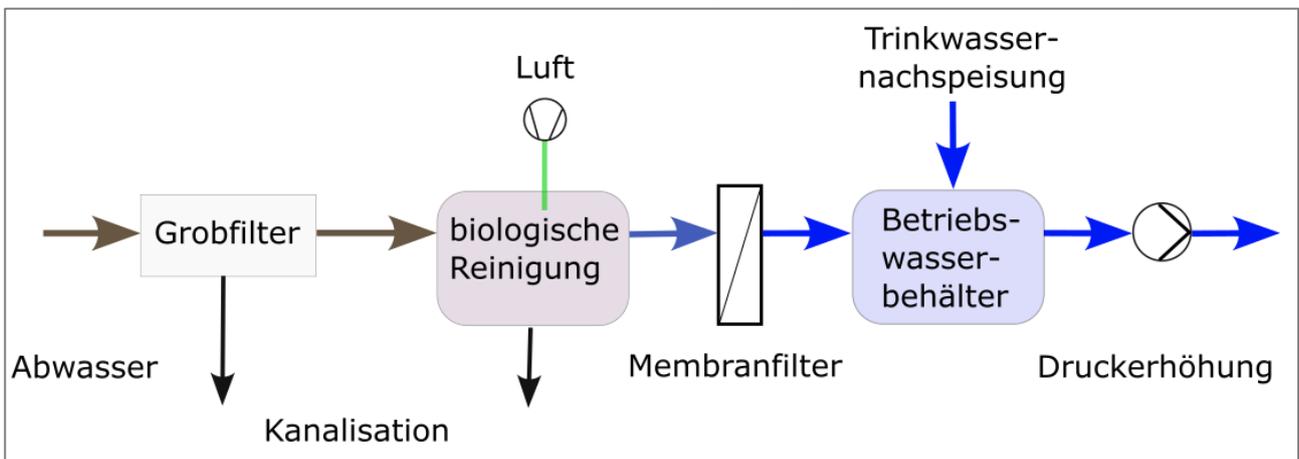


Grauwassernutzung

Die Gebäude verfügen zur Reduktion des Trinkwasserverbrauchs für die Toilettenspülung über eine gemeinsame Grauwasseraufbereitungsanlage. Hierfür wird gering verschmutztes Abwasser aus Duschen/Badewannen und Handwaschbecken im Badezimmer getrennt gesammelt und der Grauwasseraufbereitungsanlage zugeführt. Abwasser aus der Küche wurde wegen der dort zu erwartenden höheren Fettbelastung nicht für die Grauwasseranlage verwendet. Abwasser von den Waschmaschinen wurde nicht erfasst, da in der Planung davon ausgegangen wurde, dass die anderen Abwässer ausreichen.

Die Grauwasseranlage befindet sich im Keller des Bestandsgebäudes und besteht aus einem Grobfilter für ungelöste Stoffe (z. B. für Haare oder Flusen), einem Aufbereitungstank mit biologischer Reinigung von abbaubaren Substanzen (z. B. Duschgel) mit Hilfe von eingeblasener Luft, einem Membranfilter und einem Speichertank für aufbereitetes Betriebswasser (Bild 13).

**Bild 13:** Funktionsschema der Grauwasseraufbereitungsanlage



Das aufbereitete Betriebswasser entspricht laut Hersteller der EU-Badegewässer-Richtlinie und wird für die Toilettenspülung verwendet. Dafür werden die Toiletten mit einer separaten Wasserinstallation versorgt. Die Nachspeisung von Trinkwasser, wenn das Betriebswasser nicht ausreicht, erfolgt im Speichertank im Keller mit einem freien Auslauf, um eine Rückspeisung von Betriebswasser in das Trinkwassernetz zu verhindern. Neben der Druckerhöhungsanlage für das Betriebswasser befindet sich im Aufstellraum zusätzlich eine Hebeanlage für den Abtransport der abgeschiedenen Schmutzwasserbestandteile in den Kanal. Der Aufstellraum der Grauwasseranlage wird mechanisch mit einer Abluftanlage belüftet.

Die Anlage besitzt eine Aufbereitungsleistung von 3.000 l/d, was laut Hersteller einer Versorgung von ca. 75 Bewohnern entspricht. Der Energieeinsatz wird mit ca. 1,75 kWh/m<sup>3</sup> angegeben, die Leistungsaufnahme der Anlage mit 400 W, die der Druckerhöhungsanlage mit 2x 1.800 W. Die Grauwasseranlage muss beim Gesundheitsamt bzw. der zuständigen Behörde gemeldet werden.

**Bild 14:** Grauwasseraufbereitungsanlage – links: Vorratstank vorne, Druckerhöhungsanlage Mitte, Aufbereitungstank mit biologischer Reinigung hinten; rechts: Membranfilter und Hebeanlage



### Sonstige Anlagentechnik

Die Heizzentralen für die Wärmeversorgung sind vollständig mit Hocheffizienzpumpen ausgestattet. Die Kreise für die Frischwasserstationen sowie die Heizkreise besitzen eine Konstantdruckregelung.

Nur der Neubau besitzt einen Aufzug, da er barrierefrei ausgeführt ist. Dieser Aufzug wurde als energieeffiziente Anlage ausgeführt. Die Kabine besitzt eine LED-Beleuchtung und bei Bereitschaft werden die Türen nicht elektrisch geschlossen, um den Standby-Verbrauch zu reduzieren.

## 2.2 Umsetzung

Das Vorhaben wurde in drei Bauabschnitten umgesetzt. Zu Beginn wurde am Bestandsgebäude ein Hauseingang abgerissen und im dritten Bauabschnitt durch einen abgesetzten Neubau ersetzt. Im ersten und zweiten Bauabschnitt wurden die beiden verbleibenden Hauseingänge im Keller außen aufgedeckt, abgedichtet und gedämmt. Gleichzeitig wurde das alte Satteldach abgetragen und durch ein gemauertes Vollgeschoss ersetzt. Im Osten wurden zwei Anbauten über drei Geschosse ergänzt. Das Gesamtgebäude wurde anschließend mit Fenstern mit 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ausgestattet und mit Passivhaus-geeigneten Dämmstärken versehen. Ursprünglich war die Weiterverwendung des alten Estrichs geplant. Aus Schallschutzgründen wurde dieser jedoch durch einen neuen schwimmenden Estrich ersetzt. Gleichzeitig fand der Innenausbau mit der Verlegung der Leitungen, den Trockenbauarbeiten und der Installation der Lüftungsanlagen statt. Die Elektroinstallation erfolgte in den Wohnungen überwiegend in Sockelkanälen.

Der Neubau wurde als nicht unterkellertes Gebäude auf einer schwimmenden Dämmschicht ausgeführt. Es handelt sich um einen Massivbau mit Betondecken und Wänden in Kalksandstein. Der Aufzug befindet sich komplett innerhalb der thermischen Hülle und auch der Rest des Gebäudes wurde Wärmebrücken-optimiert ausgeführt.

Verschiedene Schritte aus der Bauphase sind in Bild 15 zu sehen.

**Bild 15:** Ansichten aus der Bauphase des Projekts: links Bestandsgebäude, rechts Neubau



#### Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen der verschiedenen Bauabschnitte

Die Luftdichtheit ist bei energieeffizienten Gebäuden von großer Bedeutung, um die Wärmeverluste durch Undichtigkeiten zu minimieren und die Effizienz der Lüftungsanlagen sicherzustellen. Bei der Planung muss die luftdichte Ebene definiert und konsequent ausgeführt werden – besonders an Anschlüssen und Durchdringungen. Die luftdichte Ebene bildet bei allen Bauabschnitten der alte Außenputz bzw. der Kleber des vollflächig verklebten neue Wärmedämmverbundsystems sowie die Kellerdecke und die oberste Geschossdecke.

Bei den drei Bauabschnitten des Vorhabens wurde jeweils kurz vor Bezug durch das Ingenieurbüro Engelhaupt die Luftdichtheit der Gebäudehülle nach Verfahren B der DIN EN 13829 bestimmt. Tab. 3 zeigt die Ergebnisse, die zwischen 0,24 1/h im Neubau und 0,54 1/h in Bauteil B (Bestand) liegen. Alle Gebäudeteile erreichen somit die Anforderungen an die Luftdichtheit für Passivhäuser ( $< 0,6$  1/h) sowie der EnEV/DIN V 18599 an Gebäude mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnungen ( $< 1,5$  1/h).

**Tab. 3: Ergebnisse Luftdichtheitsmessungen**

Bauteil und Messdatum	Messergebnis Unter-/Überdruck	Mittelwert und Unsicherheit
A (Bestand) (22.07.2019)	0,492 1/h / 0,473 1/h	0,480 1/h +/- 3,6 %
B (Bestand) (16.08.2019)	0,537 1/h / 0,571 1/h	0,540 1/h +/- 4,5 %
C (Neubau) (09.12.2019)	0,237 1/h / 0,249 1/h	0,240 1/h +/- 5,6 %

Sommerlicher Wärmeschutz

Die Gebäude sind kaum durch umgebende Gebäude oder Bäume verschattet. Da die Räume teilweise eine recht geringe Grundfläche aufweisen, ist ein guter sommerlicher Wärmeschutz für die Wohnungen wichtig. Aus diesem Grund besitzen fast alle Fenster elektrisch betriebene Rollläden. Wo diese für den zweiten Rettungsweg eine besondere Bedeutung besitzen, wurden mechanische Rollläden mit einer luftdicht ausgeführten Kurbel eingesetzt. In zwei Zimmern des Neubaus, in denen eine außen liegende Verschattung nicht möglich war, lag der Solareintrag gemäß Nachweisverfahren der DIN 4108-2 höher als erlaubt. In diesen Räumen wurde eine innen liegende, versilberte Verschattung mit einem Abminderungsfaktor  $f_c$  für die Solarstrahlung von 0,7 ergänzt.

**2.3 Energiebilanzen**

Im Planungsprozess wurden das Bestandsgebäude und der Neubau einerseits nach der damals gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) bilanziert, parallel auch nach dem PHPP. Für die Erreichung der Förderstandards der KfW war keine detaillierte Berechnung der Wärmebrücken erforderlich, so dass diese Nachweise mit pauschalen Wärmebrückenzuschlägen erstellt wurden (siehe Kapitel Gebäudehülle). Im Nachgang wurden die tatsächlichen Wärmebrücken-Verluste vom IWU berechnet und die Gebäude mit dem Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP) bilanziert sowie die Nutzung und weitere Randbedingungen, wie tatsächliche Wetterrandbedingungen und die mittlere Raumtemperatur, variiert.

Nach EnEV ergab sich mit pauschalen Wärmebrückenzuschlägen ein spezifischer Endenergiebedarf von 29,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) für das Bestandsgebäude und 39,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) für den Neubau (Tab. 4). Das Bestandsgebäude wurde nach DIN 4108-6/DIN V 4701-10 bilanziert, der Neubau nach DIN V 18599, wodurch sich sehr unterschiedliche Heizwärmebedarfe ergaben. Der Primärenergiebedarf lag bei 22,1 bzw. 21,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

**Tab. 4: Spezifische Transmissionswärmeverluste, Endenergie- und Primärenergiebedarfe der Gebäude nach EnEV**

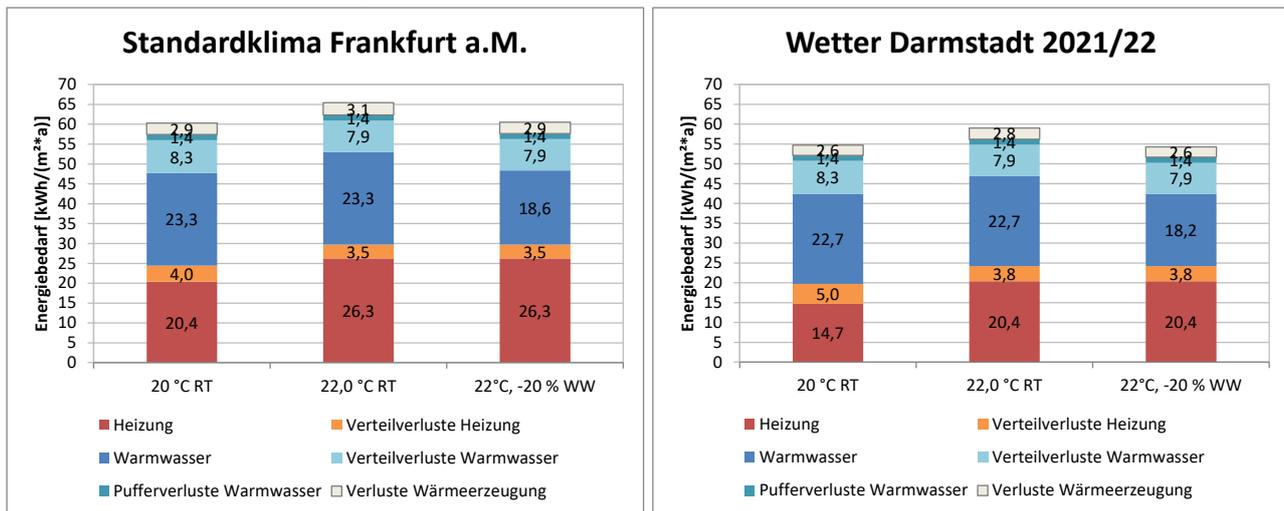
	Modernisiertes Bestandsgebäude (DIN 4108-6/DIN V 4701-10)	Neubau (DIN V 18599)
$H_{T'}$	0,267 W/(m <sup>2</sup> *K) (Wärmebrückenzuschlag: 0,10 W/(m <sup>2</sup> *K))	0,220 W/(m <sup>2</sup> *K) (Wärmebrückenzuschlag: 0,05 W/(m <sup>2</sup> *K))
<b>Spez. Endenergiebedarf nach EnEV</b>	29,4 kWh/(m <sup>2</sup> *a)	39,1 kWh/(m <sup>2</sup> *a)
<b>Spez. Primärenergiebedarf nach EnEV</b>	22,1 kWh/(m <sup>2</sup> *a)	21,5 kWh/(m <sup>2</sup> *a)

Die Bilanzierung mit dem PHPP (Version 9.7) erlaubte einerseits die Ausweisung des Heizwärmebedarfs der Gebäude als Vergleichswert für den Vergleich mit den Messwerten, andererseits auch die Untersuchung des Einflusses von äußeren (z. B. lokales Wetter) und inneren (Nutzerverhalten) Randbedingungen auf den

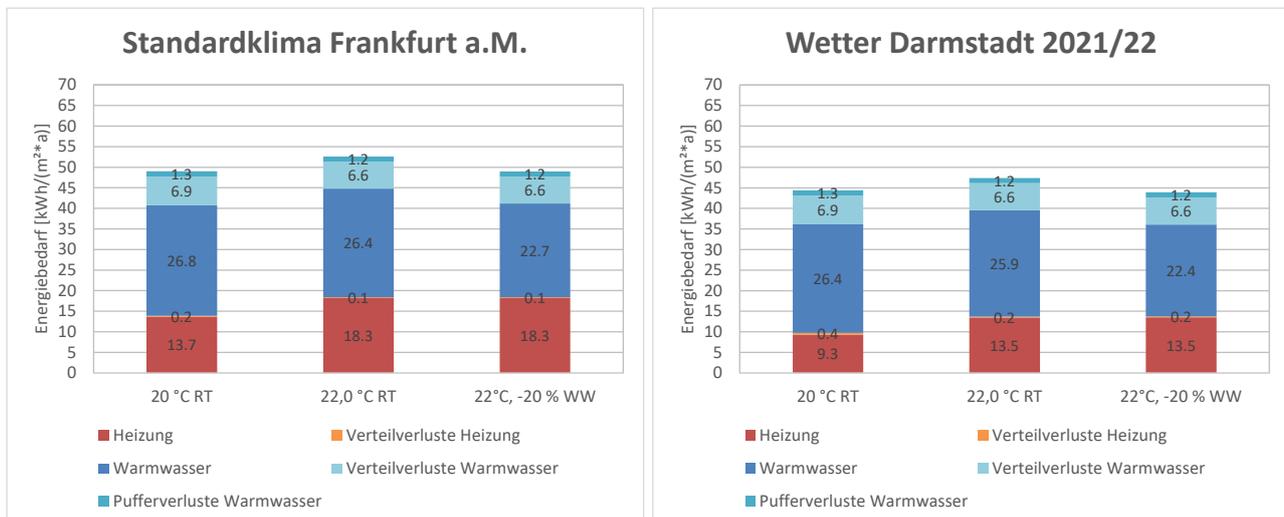
Energiebedarf der Gebäude. Mit PHPP-Standardrandbedingungen ergab sich ein Heizwärmebedarf von 16,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) beim Bestandsgebäude und 10,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) beim Neubau. Werden Raumtemperatur, Warmwasserverbrauch und innere Wärmequellen an die tatsächliche Nutzung angepasst, so ergeben sich die Werte in Bild 16 (mit Standardklima Frankfurt am Main) und Bild 17 (mit lokalem Wetter Darmstadt 2021/22). Durch den Anstieg der mittleren Raumtemperatur (RT) von 20 auf 22 °C steigt der Heizwärmebedarf um ca. 6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), bei Berücksichtigung des lokalen Wetters liegt der Heizwärmeverbrauch um ca. 6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) niedriger als bei der Berechnung mit Standardklima. Die PHPP-Berechnung mit einem um 20 % reduzierten Warmwasserverbrauch führt zudem zu einem um ca. 5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) reduzierten Wärmeverbrauch.

Als Verluste der Wärmeerzeugung fallen beim PassivhausSozialPlus die Verluste der Fernwärmeübergabestation an, da die gemeinsame Übergabestation beider Gebäude im Bestandsgebäude angeordnet ist. Verursachergerecht wäre jedoch eine anteilige Verteilung dieser Verluste auf beide Gebäude unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verteilverluste bis zum Neubau.

**Bild 16:** Wärmebilanz des Bestandsgebäudes bei Standardrandbedingungen nach PHPP sowie an die tatsächliche Nutzung angepasst für Standardklima Frankfurt am Main (links) und lokalem Wetter 2021/22 (rechts)



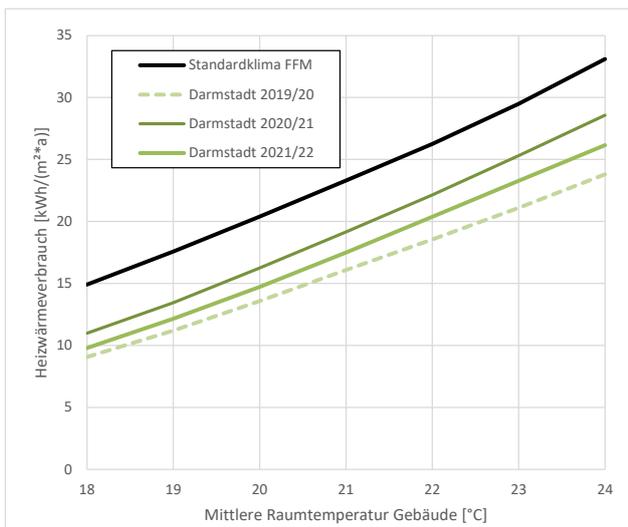
**Bild 17:** Wärmebilanz des Neubaus bei Standardrandbedingungen nach PHPP sowie an die tatsächliche Nutzung angepasst für Standardklima Frankfurt am Main (links) und lokalem Wetter 2021/22 (rechts)



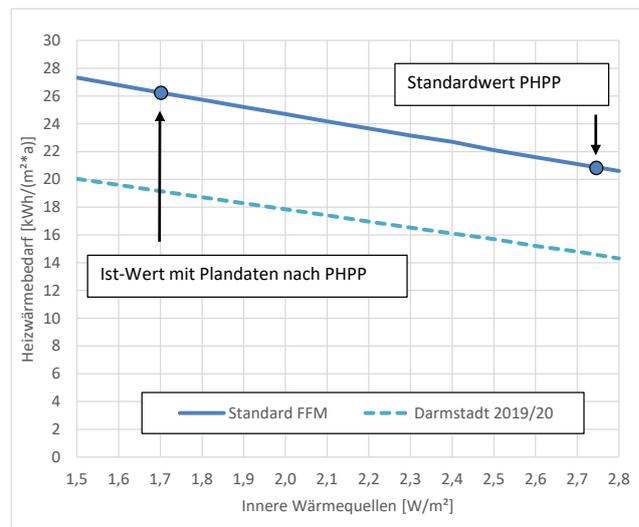
Die grundsätzliche Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von der Raumtemperatur ist in Bild 18 am Beispiel des Bestandsgebäudes für unterschiedliche Wetterjahre dargestellt. Mit dem Standardklima führt eine Veränderung der Raumtemperatur um ein Grad Celsius zu einer Veränderung des Heizwärmebedarfs um ca. 3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bzw. 14 %, bei dem deutlich wärmeren lokalen Wetter 2021/22 verändert sich der Heizwärmebedarf je Grad Celsius abweichender Raumtemperatur um ca. 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bzw. 19 % je Grad.

Bild 19 zeigt den Einfluss der inneren Wärmequellen auf den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes bei Standardklima Frankfurt am Main und dem lokalen Wetter in Darmstadt 2019/20. Der Standardwert des PHPP für die inneren Wärmequellen lag für dieses Gebäude mit den entsprechenden Plandaten für die Ausstattung und Nutzung bei 2,76 W/m<sup>2</sup>. Sinken die inneren Wärmequellen, z. B. durch einen geringen Haushaltsstromverbrauch oder eine höhere mittlere Raumtemperatur, so steigt der Heizwärmebedarf deutlich an. Beim Standardklima steigt z. B. der Heizwärmebedarf bei 22 °C Raumtemperatur rechnerisch von 20,4 auf 26,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Somit führt eine sparsame Nutzung beim Haushaltsstrom zu einem gewissen Anstieg des Heizwärmebedarfs. Primärenergetisch betrachtet wird dennoch eine Einsparung erreicht.

**Bild 18: Auswirkungen unterschiedlicher mittlerer Raumtemperaturen auf den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes mit Standardklima Frankfurt am Main und Wetterbedingungen vor Ort in den verschiedenen Messjahren**



**Bild 19: Einfluss der Höhe der inneren Wärmequellen auf den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes mit Standardklima Frankfurt am Main und Wetterbedingungen vor Ort 2019/20 bei 22 °C Raumtemperatur**



Der Gesamtwärmebedarf der Gebäude liegt mit Standardklima Frankfurt am Main, 20 °C Raumtemperatur und individuell berechneten inneren Wärmequellen bei 60,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) für das Bestandsgebäude und bei 51,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) für den Neubau (siehe Tab. 5).

**Tab. 5: Kennwerte der Gebäude nach PHPP für das Standardklima Frankfurt am Main**

	Modernisiertes Bestandsgebäude [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	Neubau [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
Spez. Heizwärmebedarf	20,4	13,7
Spez. Gesamtwärmebedarf	60,3	51,4
Spez. Hilfsstrombedarf	8,6	10,2
Spez. Haushaltsstrombedarf	21,4	16,2
Spez. Primärenergiebedarf	84,2	68,4

Die Treibhausgas-Emissionen der Gebäude können nicht ausgewiesen werden, da der lokale Fernwärmeversorger für den Untersuchungszeitraum zwar einen Primärenergiefaktor von 0,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>End</sub>, nicht jedoch die Treibhausgas-Emissionen der Fernwärmeversorgung in dem Konversionsareal angegeben hat. Der Bedarfskennwert für die Primärenergie liegt mit 84,2 bzw. 68,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) deutlich unter den Anforderungen des PHPP von maximal 120 kWh<sub>PE</sub>/(m<sup>2</sup>\*a).

## 2.4 Ausstattung der Wohnungen

Die Wohnungsgrundrisse wurden nach den Anforderungen der Hessischen Richtlinie für den geförderten Wohnungsbau [StAnz Hessen 2017] zugeschnitten. Aufgrund der Vorgaben der Richtlinie wurde auch die Vermietung der Wohnungen in Zusammenarbeit mit der Stadt Darmstadt vorgenommen. Alle Wohnungen verfügen über einen Balkon, ein Badezimmer und in den Bestandswohnungen des Bestandsgebäudes auch Einbauschränke in allen Zimmern, die noch aus dem Originalbestand der Kaserne stammen und für die neue Nutzung aufgearbeitet wurden. Die Bäder im Bestandsgebäude wurden überwiegend weiter genutzt, teilweise ergänzt um einzelne Komponenten. Im Neubau sind alle Wohnungen barrierefrei zugänglich und auch die Bäder sind ohne Schwellen zugänglich und nutzbar. Zusätzlich wurden sechs Wohnungen als rollstuhlge-rechte Wohnungen umgesetzt.

Alle Wohnungen besitzen vom Vermieter gestellte Küchen. Um die Kosten zu minimieren, kamen dabei teilweise Ausstellungsmodelle zum Einsatz, die an die Situation vor Ort angepasst wurden oder alte Küchen wurden aufbereitet. Als Küchengeräte (Kühlschrank, Herd, Geschirrspülmaschine, Dunstabzugshaube) wurden nur Geräte der Effizienzklassen A++ und A+++ (Stand 2019) unterschiedlicher Hersteller eingesetzt. Damit sollen die Stromkosten für die Mieter so weit wie möglich reduziert werden.

Alle Zimmer wurden mit einer energiesparenden LED-Beleuchtung versehen, die für die spätere Nutzung ausreichend ist. Damit wurden zusätzliche Vorkehrungen für einen niedrigen Stromverbrauch geschaffen. Zusätzlich können die Mieter aber auch eigene Beleuchtungen montieren.

In Bild 20 sind Details vom Innenausbau von Bestandsgebäude und Neubau zu finden.

**Bild 20:** Oben: Ansichten von Küchen im Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts, Bildquelle [Gängler 2020]), unten: Bad (links) und Einbauschränke (Mitte) im Bestandsgebäude sowie rollstuhlgerechtes Bad im Neubau (rechts, Bildquelle [Gängler 2020])



## 2.5 Reduktion der Nebenkosten und Budgetierungskonzept

Ein wichtiges Ziel des Projektes war die Minimierung der Betriebskosten, das sind vor allem verbrauchsabhängige Kosten für Wärme, Strom, Trink- und Abwasser sowie sonstige Wohnkosten. Ein Großteil der Nebenkosten entsteht in der Regel durch die Energieversorgung für Raumheizung und Warmwasserbereitung (vgl. Großklos et al. 2018). Aus diesem Grund wurde der Heizwärmeverbrauch mit dem Passivhaus-Konzept sehr stark reduziert. Der Heizwärmebedarf liegt bei  $13,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  im Mittel beider Gebäude (bei Normbedingungen) und somit unterhalb des Grenzwertes von  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  der Heizkostenverordnung ([HeizkostenV]), wodurch eine pauschale Abrechnung gesetzlich zulässig ist. In diesem Fall kann auch die Warmwasserbereitung in die Pauschale integriert werden. Die Verbrauchskosten für Wärme wurden daher je Quadratmeter Wohnfläche in der Nebenkostenpauschale berücksichtigt. Bauliche Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs sind bei der Warmwassernutzung kaum umzusetzen, so dass hier ein gewisses Kostenrisiko für den Vermieter besteht. Allerdings wird die Warmwassermenge gemessen und im Trinkwasserbudget als Wasservolumen berücksichtigt.

Die Höhe des Budgets für Trinkwasser richtet sich nach der Anzahl der Personen im Haushalt und sollte ausreichen, wenn sich die Mieter sparsam verhalten. Bei dem Budget wurden für die erste Person  $25 \text{ m}^3/\text{a}$ , für die zweite Person  $18 \text{ m}^3/\text{a}$  und für jede weitere Person  $17 \text{ m}^3/\text{a}$  angesetzt. Bei Überschreitung des Budgets muss zusätzlich ein Guthaben für Trinkwasser erworben werden. Das Budget soll zum sparsamen Umgang mit der Ressource Trinkwasser motivieren.

Durch drei Maßnahmen wurden der Trinkwasserverbrauch – inklusive Warmwasser – und damit die Nebenkosten gesenkt: durch den Einsatz wassersparender Armaturen, durch den Ersatz von Trinkwasser durch aufbereitetes Grauwasser für die Toilettenspülung und durch die Visualisierung des Verbrauchs in Bezug zum Budget, das für Trinkwasser in der Pauschalmiete enthalten ist.

Auch Haushaltsstrom, der in Deutschland in der Regel nicht vom Vermieter, sondern mit dem Energieversorger abgerechnet wird, ist im PassivhausSozialPlus über ein Budget ebenfalls in der Betriebs- bzw. Nebenkostenpauschale enthalten. Das Budget orientiert sich an der höchsten Effizienzklasse A des Stromspiegel Deutschland ([Stromspiegel 2019]) und sollte bei sparsamem Verhalten ausreichen. Je nach Personenanzahl pro Wohnung ergibt sich folgendes Budget: 850 kWh/a für die erste Person, 350 kWh/a für die zweite Person und 300 kWh/a für jede weitere Person.

Um den Stromverbrauch zu senken, wurden in den Küchen der Wohnungen energieeffiziente Küchengeräte mit den höchsten Energieeffizienzklassen (A++ und A+++), sowie eine energieeffiziente LED-Beleuchtung in allen Räumen vom Vermieter installiert. Auch bei der zentralen Anlagentechnik (Aufzug, Pumpen, LED-Beleuchtung in den Fluren) wurde auf Energieeffizienz geachtet. Zur Reduktion der Stromkosten wurden sowohl Photovoltaikanlagen als auch Stromspeicher installiert. Da sich die rechtlichen Hürden für die Lieferung von Strom an die Mieter durch den Vermieter als zu hoch herausstellten (vgl. [Behr, Großklos 2017]), wurde eine Energiegenossenschaft mit dem Betrieb der Anlagen und der Versorgung der Mieter beauftragt.

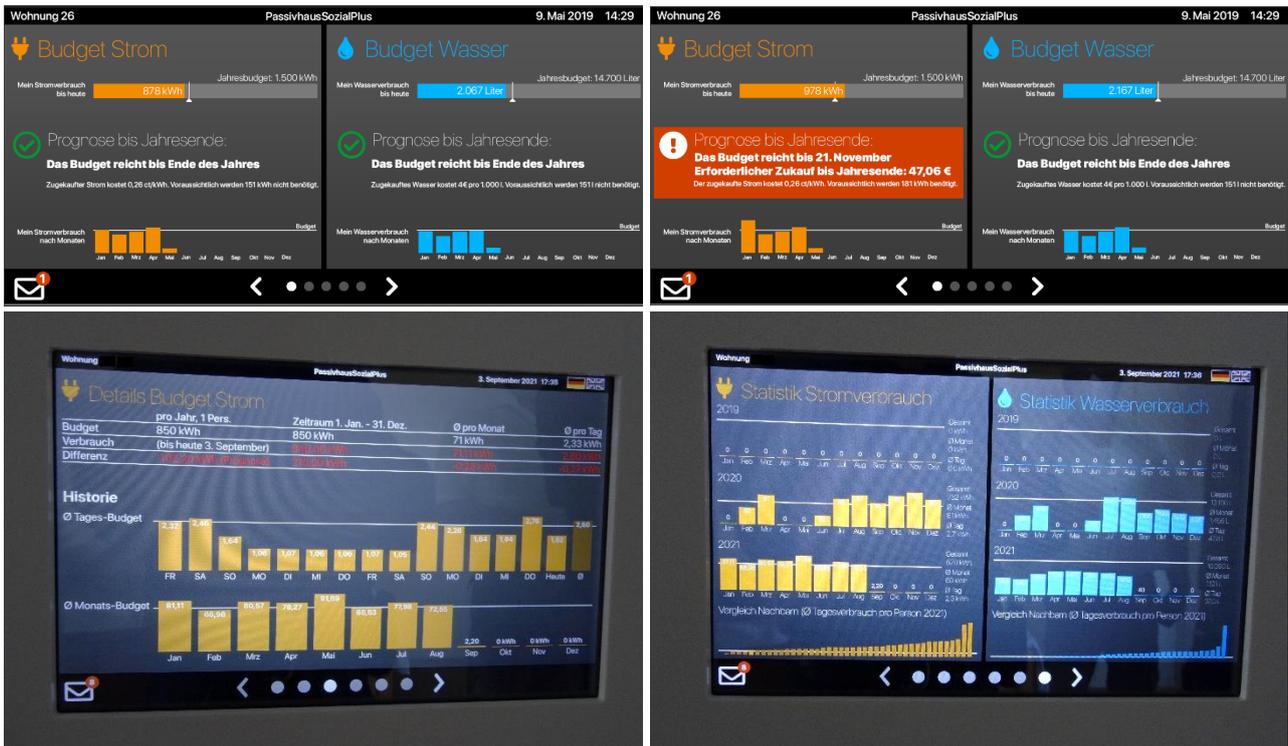
Die aktuelle Ausschöpfung des Budgets für Wasser und Strom, eine Prognose der Verbräuche bis zum Jahresende sowie historische Werte werden auf Displays in den Wohnungen angezeigt (Bild 21). Die Displays und die Visualisierung wurden im Projekt entwickelt. Diese sind jeweils im Flur oder Wohnzimmer jeder Wohnung montiert. Zur Verlängerung der Lebensdauer schalten sich die Displays nach kurzer Zeit dunkel. Mit einem kurzen Druck auf das Display können die Mieter das Display jederzeit wieder aktivieren.

Schließlich können die Mieter das für die Budgetabrechnung eingerichtete WLAN im Rahmen der Nebenkostenpauschale mit begrenzter Bandbreite nutzen, so dass kein separater Internetanschluss erforderlich ist.

Das System zur Budgetüberwachung und -visualisierung bietet dem Vermieter die Möglichkeit Wasser oder Strom automatisch abzuschalten, wenn ein Budget überschritten ist und keine zusätzlichen Verbrauchsmengen geordert wurden. Gleichzeitig sind aber der Weiterbetrieb des Kühlschranks und eine minimale Trinkwassermenge sichergestellt. Die Funktionalität der Fernabschaltung wurde zwar implementiert, wird aber von der Neuen Wohnraumhilfe nicht genutzt, da die Mieter über eine individuelle Beratung vor Abschaltungen geschützt werden sollen.

Die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Befragung zu den Erfahrungen mit den pauschalen Nebenkosten und den Budgets sind in einem separaten Bericht dokumentiert [Hacke, Großklos].

**Bild 21:** Ansichten verschiedener Darstellungen und Seiten auf dem Display



### 3 Messtechnik

#### 3.1 Messkonzept

Mit dem Verbrauchs- und Nutzungsmonitoring im PassivhausSozialPlus sollten u.a. folgende Fragen in der Betriebsphase der Gebäude untersucht werden:

- Wie hoch liegen die Verbräuche in den Wohnungen, insbesondere bei den budgetierten Größen Wasser und Haushaltsstrom und wie hoch liegen die pauschal abgerechneten Wärmeverbräuche?
- Wie kann das Nutzerverhalten beschrieben werden und wie ist es im Vergleich zu frei finanzierten Wohnungen einzuordnen?
- Wie verhält sich die Anlagentechnik für Wärmeversorgung, Belüftung sowie Stromerzeugung und -speicherung und wo gibt es Optimierungsmöglichkeiten bzw. -bedarf.

Um diese Fragen im Rahmen des Monitorings zu beantworten, wurden sowohl die Anlagentechnik als auch die Wohnungen mit Zählern und Sensoren ausgestattet. Als Grundausstattung erhielt jede Wohnung einen Kalt- und einen Warmwasserzähler, einen Haushaltsstromzähler sowie einen Wärmemengenzähler, der im Neubau die Summe des Wärmeverbrauchs erfasst, im Bestandsgebäude den Wärmeverbrauch der Frischwasserstation sowie ggf. des Badheizkörpers (siehe Bild 22). Zusätzlich besitzt jede Wohnung einen Temperatur-/Feuchtefühler im Wohnzimmer und die vom Nutzer eingestellte Stufe der Lüftungsanlage wird erfasst.

**Bild 22:** Ansicht verschiedener verwendeter Zähler und Sensoren



In 20 detailliert vermessenen Wohnungen wurden zusätzlich gemessen:

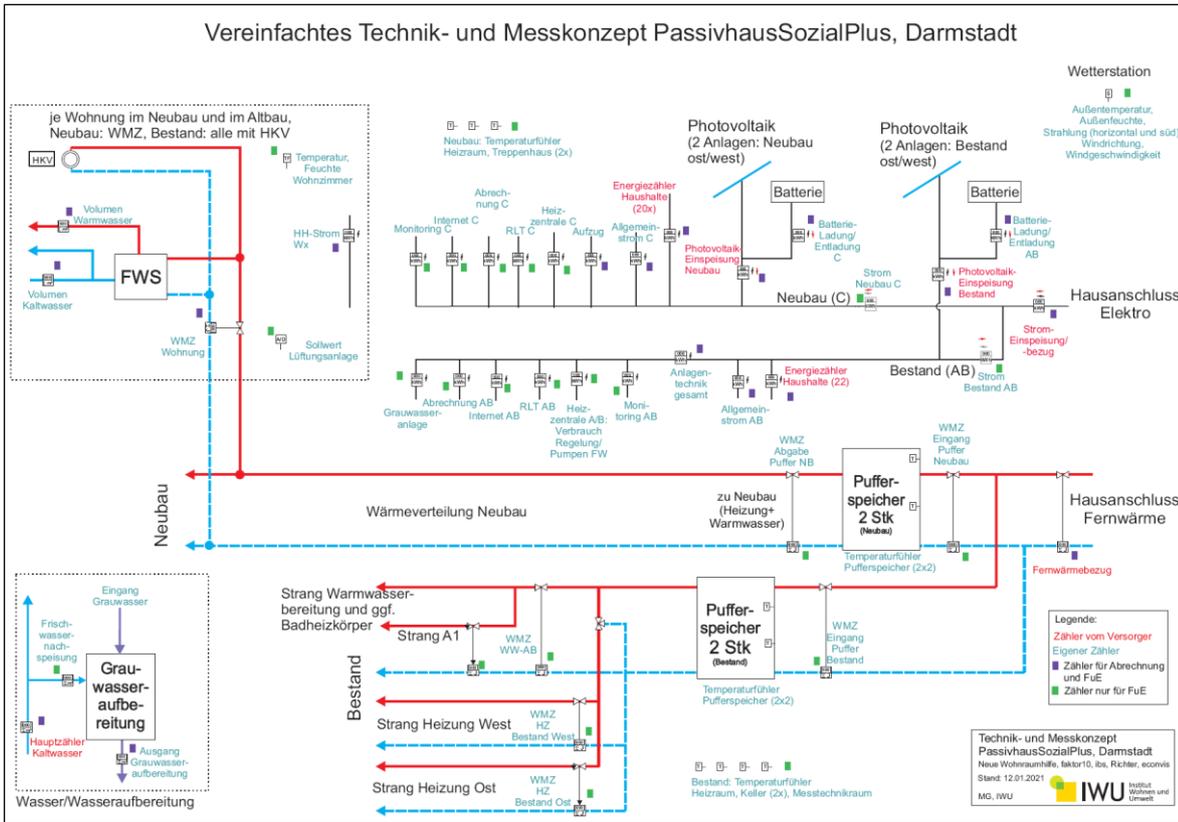
- Temperatur/Feuchte in jedem Raum
- CO<sub>2</sub>-Konzentration in Wohn- und Schlafzimmer
- Anwesenheit über Präsenzmelder im Wohnzimmer und bei großen Wohnungen auch im Flur
- Fensteröffnung an allen Fenstern getrennt nach „gekippt“ und „ganz geöffnet“
- Zusätzlich Stromverbrauch für Beleuchtung und Küche
- Warmwasserverbrauch in der Küche
- Wärmeverbrauch für Beheizung (nur im Neubau)

Im Bestandsgebäude sind die Heizkörper an die alten Bestandsheizstränge angeschlossen, so dass eine wohnungsweise Messung der Heizwärmeverbräuche nicht möglich ist. Um die Verbräuche den Wohnungen zuzuordnen zu können, wurden alle Heizkörper mit per Funk auslesbaren Heizkostenverteilern ausgestattet.

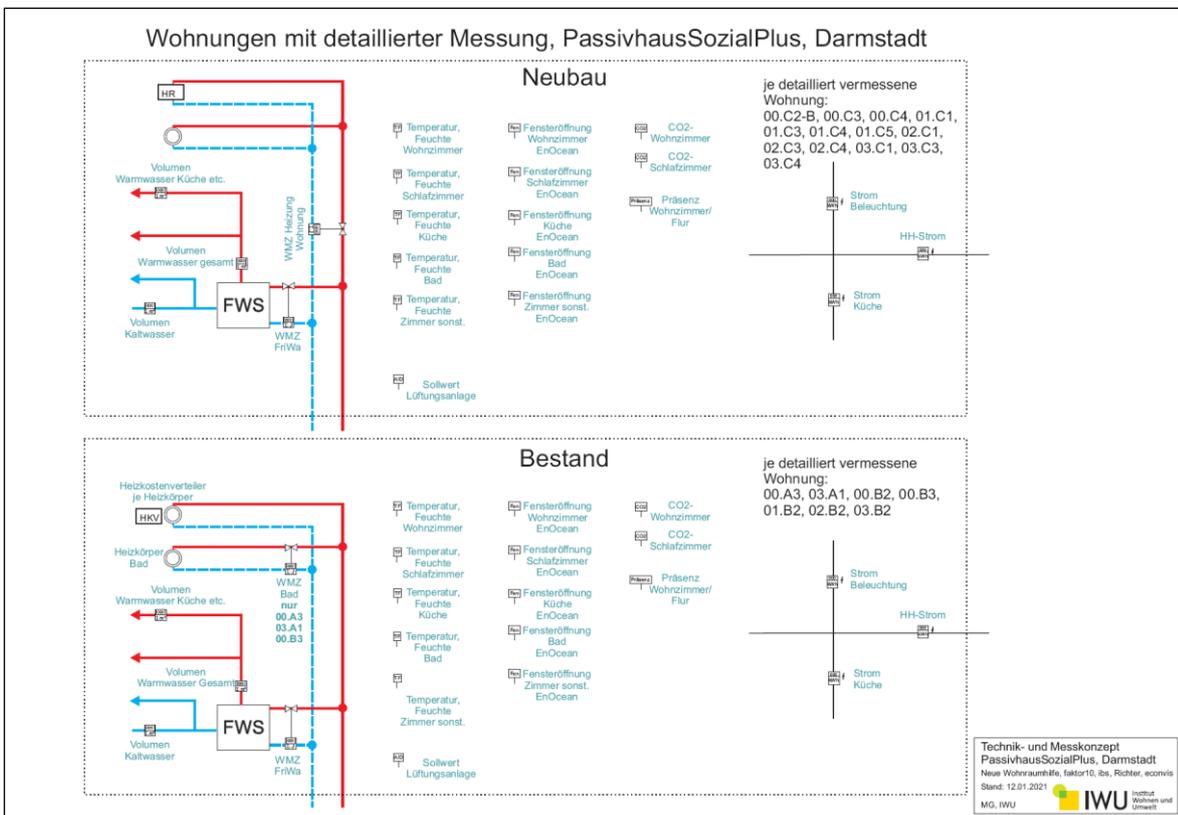
In der Anlagentechnik werden alle Erzeuger und alle wichtigen Verbraucher getrennt gemessen, zusätzlich werden typische Temperaturen im Keller (Bestandsgebäude), Heizräumen und im Treppenhaus (Neubau) erfasst. Auf dem Dach des Bestandsgebäudes befindet sich außerdem eine Wetterstation.

Bild 23 zeigt das Messkonzept für die Anlagentechnik und die Basismessungen in den Wohnungen für Wärme, Strom und sonstige Messgrößen. In Bild 24 sind die Erweiterungen in den detailliert vermessenen Wohnungen dargestellt.

**Bild 23: Übersicht Messkonzept PassivhausSozialPlus**



**Bild 24: Erweiterung in den detailliert vermessenen Wohnungen in Neubau und Bestand**



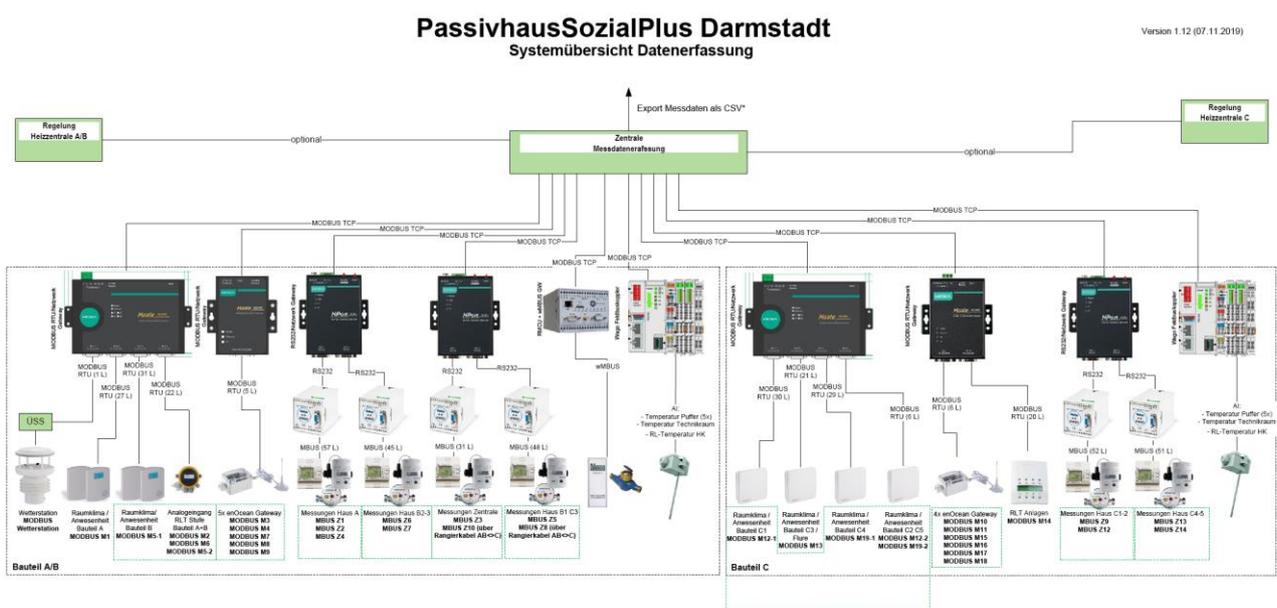
Die Sensoren wurden über unterschiedliche Bussysteme ausgelesen (Tab. 6), die über Ethernet-Gateways mit der zentralen Messdatenerfassung verbunden sind.

**Tab. 6: Übersicht der eingesetzten Bussysteme für die Auslesung der Sensoren und Zähler sowie deren Ausleseintervalle**

Fühlertyp	Bussystem	Ausleseintervall
Zähler (Wärme, Wasser, Strom)	M-Bus	5 min (zentrale Anlagentechnik) 60 min (Wohnungen)
Heizkostenverteiler	Wireless M-Bus	60 min
Übergabezähler für Wasser und Fernwärme des Versorgers	Wireless M-Bus	15 min
Temperatur-, Feuchte-, CO <sub>2</sub> - und Präsenzsensoren sowie Sollwert der Lüftungsanlage	Modbus	1 sek
Wetterstation	Modbus	5 min
Fensteröffnung	enOcean	1 Sekunde

In Bestandsgebäude und Neubau wurden je ein zentraler Verteilerschrank für die Messdatenerfassung montiert und über eine Ethernet-Verkabelung mit dem zentralen Mess-PC verbunden. Auf diesem Linux-Rechner werden Python-Skripte zur Abfrage der Messdaten aus den unterschiedlichen Quellen ausgeführt. Die Daten werden als CSV-Dateien für die Auswertung zur Verfügung gestellt. Bild 25 zeigt den Aufbau der Messdatenerfassung, die von der Firma econvis geplant und ausgeführt wurde.

**Bild 25: Schema zum Aufbau der Messdatenerfassung für Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) [Quelle: econvis]**



Die Messdaten wurden mit unterschiedlichen Zeitschritten erfasst. Daten der zentralen Anlagentechnik und der Wetterstation wurden alle 5 Minuten je nach Messwert als Mittelwert oder Summenwert gespeichert, wobei die Auslesung der Fühler (nicht der summierenden Zähler) sekundlich erfolgte (Tab. 6). Die Zähler der Wohnungen sowie die Verbrauchseinheiten der Heizkostenverteiler im Bestandsgebäude wurden stündlich ausgelesen und gespeichert. Die Temperatur-, Feuchte-, CO<sub>2</sub>- und Präsenzsensoren sowie die Fensterkontakte wurden sekundlich abgefragt und als 15-Minuten-Mittelwerte (Temperaturen, Feuchte und CO<sub>2</sub>) bzw. 15-Minuten-Summenwerte (Fensteröffnung und Präsenz) abgespeichert. Die eingestellten Sollwerte der Lüftungsanlagen wurden sekundlich ausgelesen und stündlich gespeichert.

Die Messdaten wurden in unterschiedliche CSV-Dateien und in einem geschützten Server-Bereich abgelegt, so dass sie für die wissenschaftliche Auswertung zur Verfügung standen.

### **3.2 Sensoren, Zähler und Fehlergrenzen**

Die verschiedenen verwendeten Zähler und Sensoren sind in Tab. 7 mit ihrer Bezeichnung, ihrem Messbereich, der Auflösung und den Fehlergrenzen aufgelistet.

**Tab. 7: Übersicht der eingesetzten Zähler und Sensoren, deren Messbereiche und Auflösungen sowie Fehlergrenzen**

Anzahl	Messgröße	Typ	Messbereich / Auflösung	Fehlergrenze
7	Wärme	Landis&Gyr UH50	Klasse 2	±2 %
66	Wärme	Landis&Gyr T230	Klasse 2	±2 %
5	Strom	NZR DHZ+ (Wandler-Zähler Liegenschaft, PV, Haus)	-   1 W	Cl. B
2	Strom	Wandlerzähler TIP Sinus 5//1	Klasse B	±2 %
2	Strom	TIP Sinus 85 Zähler direktmessend (Bat)	Klasse B	±2 %
68	Strom	ABB B23 (dreiphasig)	0,2 ... 65 A   10 W	±1 %
30	Strom	ABB B21 (einphasig)	0,2 ... 65 A   10 W	±1 %
108	Wasser	Diehl Corona E (Kalt- bzw. Warmwasser)	3 ... 3125 l/h   10 l	±2 % (ab 32 l/h)
1	Wasser	Sensus iPERL (Hauptwasserzähler)	8 ... 6300 l/h   10 l	±2 % (ab 20 l/h)
91	Temperatur/ Feuchte	Oppermann HT-MOD-R	0 ... 50°C   0,1 °C 0 ... 100 %   0,1 %	±0,5 K ±3 %
26	Temperatur/ Feuchte/Anwesenheit	Oppermann HT-MOD-R-PIR-LUX	0 ... 50°C   0,1 °C 0 ... 100 %   0,1 % 0 ... 3000 Lux	±0,5 K ±3 %
40	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	E&E EE800	0 ... 2000 ppm -30 ... 55 °C 10 ... 90 %	±50 ppm, 2 % MW ±0,3 °C (bei 20 °C) ±3 % (30 ...70 %)
22	Sollwert Lüftungsanlage Bestand	Oppermann AI1DI1	0 - 10 V   0,1 V (1) 0 - 100%   ca. 6%	≅ 6% <sup>(1)</sup>
20	Sollwert Lüftungsanlage Neubau	Direkte Auslesung aus der Lüftungsregelung	0 - 100%   1%	-
168	Fensterkontakt		-   1 sek	k. A.
1	Außentemperatur /- feuchte	Thies Klima Sensor US	-40 ... +80 °C   0,1 K 0 ... 100 %   0,1 %	±0,5 K ±1,8 % (10%-90%)
1	Windrichtung	Thies Klima Sensor US	0 -360°   1°	±2,0° (>2m/s)
1	Windgeschwindigkeit	Thies Klima Sensor US	0,01 – 60 m/s   0,1 m/s	±0,3 m/s (<5 m/s) ±3 % (>5 m/s)
2	Solarstrahlung	Kipp&Zonen SMP3	0 – 2000 W/m <sup>2</sup>   1 W/m <sup>2</sup>	Ca. ±10 % des Gesamttageswertes nach WMO Handbuch Class C nach ISO 9060

<sup>(1)</sup> Aufgrund zu geringer Eingangsimpedanz musste ein 1:6 Spannungsteiler vorgeschaltet werden, so dass die Auflösung mit ca. 6% des Messbereichs von 0% bis 100% deutlich reduziert ist.

## 4 Wetterdaten

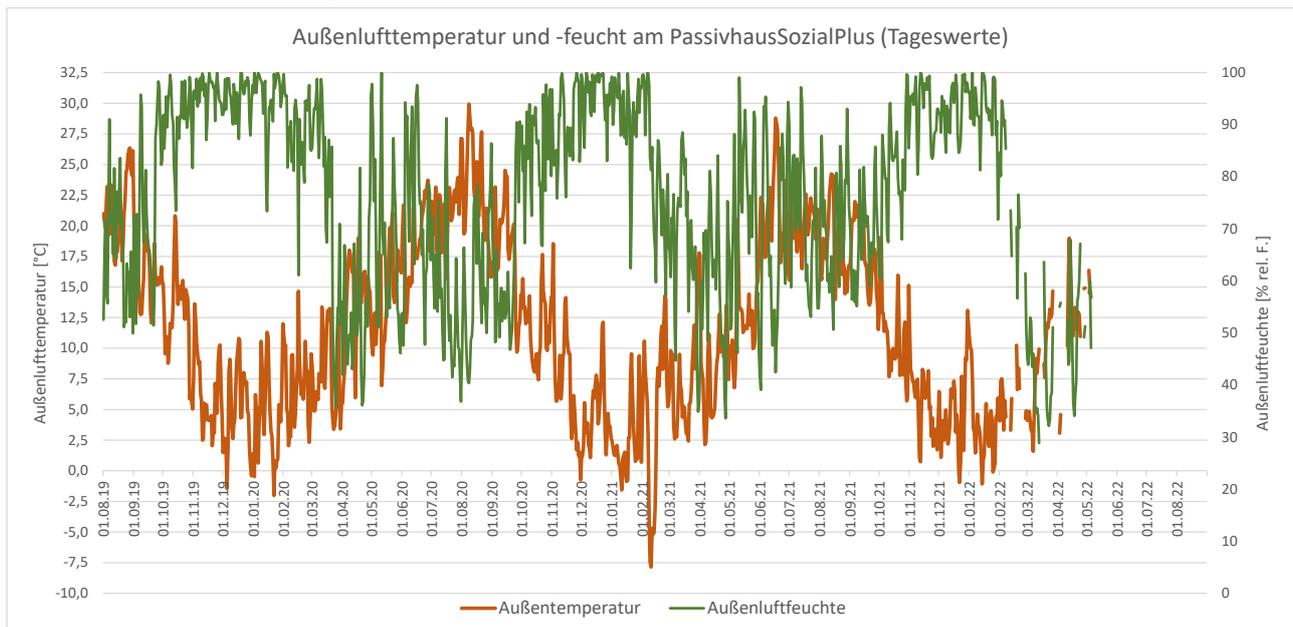
Auf dem Dach des Bestandsgebäudes ist eine Wetterstation zur Erfassung des lokalen Wetters am PassivhausSozialPlus angebracht (Bild 26). Der Mast ist am Dachausstieg zum Flachdach befestigt, die Sensoren ragen ca. 1,50 m über das Dach des Treppenhauses hinaus. Die Solarstrahlungssensoren horizontal und Süd sind auf der Südseite des Mastes montiert.

**Bild 26:** Wetterstation auf dem Dach des Bestandsgebäudes; links: Südsicht, rechts: Ostansicht



Der Verlauf der Tagesmittelwerte der Außentemperatur über den Messzeitraum von August 2019 bis August 2022 ist in Bild 27 zu sehen. Im Sommer 2020 stiegen die Außentemperatur im Tagesmittel bis auf 30 °C, im Februar 2021 sank die Außentemperatur bis auf -7,9 °C ab. Am Ende der Messphase im Jahr 2022 kam es zu nennenswerten Messdatenausfällen bei Temperatur und Luftfeuchte.

**Bild 27:** Außenlufttemperatur und -feuchte der Wetterstation des PassivhausSozialPlus



Die Jahreskennwerte für Außentemperatur und -feuchte, Solarstrahlung (horizontal und Süd) sowie die Windgeschwindigkeit sind in Tab. 8 zu finden.

**Tab. 8: Jahresmittelwerte der lokal gemessenen Wetterdaten**

	Außen- temperatur [°C]	Außen- luftfeuchte [% rel. F.]	Solarstrahlung horizontal [W/m <sup>2</sup> ]	Solarstrahlung Süd [W/m <sup>2</sup> ]	Windgeschwin- digkeit [m/s]
2020	12,7	75,4	137,3	99,9	2,9
2021	11,2	76,6	130,6	96,4	2,6

Zur Einordnung des Wetters in der Heizperiode und damit des Heizwärmeverbrauchs sind die Heizgradtage (HGT) von Bedeutung. Tab. 9 zeigt die Heizgradtage mit den Heizgrenztemperaturen 12 und 10 °C sowie zum Vergleich die Gradtagzahl GTZ 20/12 an der Wetterstation auf dem PassivhausSozialPlus und der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Darmstadt sowie das langjährige Mittel an dieser DWD-Station. Das Jahr 2021 fiel bei der Gradtagzahl der DWD-Station etwa 8 % kälter aus als das langjährige Mittel (höhere GTZ), das Jahr 2020 war ca. 10 % wärmer. Betrachtet man die Heizgradtage bei einer Heizgrenztemperatur von 10 °C, so war das Jahr 2021 ca. 7 % kälter und 2020 um 21 % wärmer als das langjährige Mittel.

**Tab. 9: Gradtagzahlen und Heizgradtage**

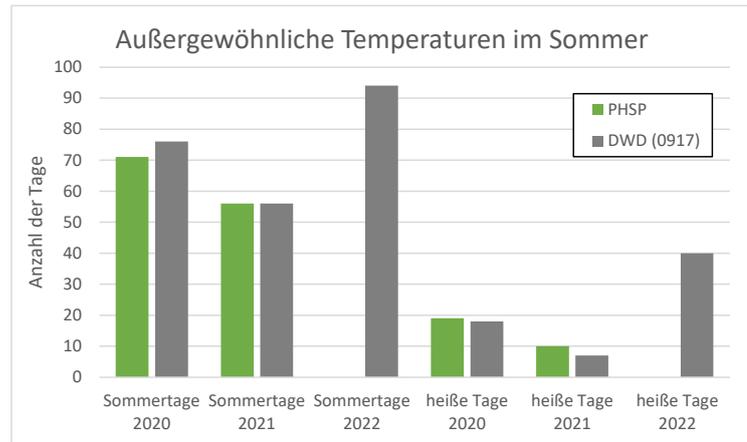
	Station PassivhausSozialPlus			DWD-Station Darmstadt (0917)		
	GTZ 20/12 [Kd]	HGT 12 [Kd]	HGT10 [Kd]	GTZ 20/12 [Kd]	HGT 12 [Kd]	HGT 10 [Kd]
2019/20	2.365	989	668	2.709	1.164	810
2020	2.349	981	660	2.730	1.162	807
2020/21	2.841	1.241	876	3.129	1.440	1.047
2021	2.981	1.301	919	3.272	1.512	1.096
2021/22	2.171*	947*	661*	2.939	1.315	930
Langjähriges Mittel				3.035	1.402	1.025

\*Messdaten unvollständig

Vergleicht man die Heizgradtage zwischen der DWD-Station und der Station auf dem Gebäude, so liegen die vor Ort gemessenen Werte ca. 17 % unter denen der Vergleichsstation, d.h. die auf dem Gebäude gemessenen Außentemperaturen liegen im Mittel höher (auf Basis von Tagesmittelwerten liegen die Differenzen zwischen -1,7 bis 5,2 K). Als Gründe sind die jeweilige Lage und der Messort zu vermuten. Die DWD-Station liegt ca. 3 km nordöstlich in einer Schrebergartensiedlung am Rande der Stadt und es wird die Temperatur 2 m über einer Wiese gemessen. Die Wetterstation auf dem PassivhausSozialPlus befindet sich in einem locker bebauten Gebiet in der Nähe von Wald, allerdings in ca. 14 m über Grund über einem Flachdach mit PV-Anlagen und Ziegeln auf dem Treppenhausdach, an dem sie befestigt ist. Eine Auswertung ergab, dass die Differenzen bei geringen Windgeschwindigkeiten am höchsten sind. Außerdem zeigte sich eine gewisse Abhängigkeit von der Horizontalstrahlung, so dass sich über dem Dach eine Zone mit höheren Temperaturen entwickeln kann. Da die Wetterstation die Situation auf dem Dach erfasst, die nicht zwangsläufig repräsentativ für das gesamte Gebäude ist, werden für vergleichende Energiebilanzberechnungen die Messdaten der DWD-Station Darmstadt (0917) verwendet.

Die Außentemperaturen wurden auch verwendet, um außergewöhnliche Temperaturen im Sommer zu berechnen. Bild 28 zeigt jeweils für die Messdaten am PassivhausSozialPlus und der DWD-Station Darmstadt die Sommertage (das Maximum der Außentemperatur liegt über 25 °C) 2020 bis 2022. Die Anzahl der Tage mit Sommertemperaturen lag zwischen 56 und 94 Tagen pro Jahr. Das langjährige Mittel der Sommertage in Frankfurt am Main liegt bei 52 Tage [DWD 2022a], es traten somit in jedem der drei Messjahre mehr oder deutlich mehr Sommertage auf. Heiße Tage, d. h. Tage mit Maximaltemperaturen von über 30 °C, traten im langjährigen Mittel in Frankfurt an 13,2 Tagen auf [DWD 2022a]. In den drei Messjahren in Darmstadt wurden zwischen 7 und 40 heiße Tage gemessen.

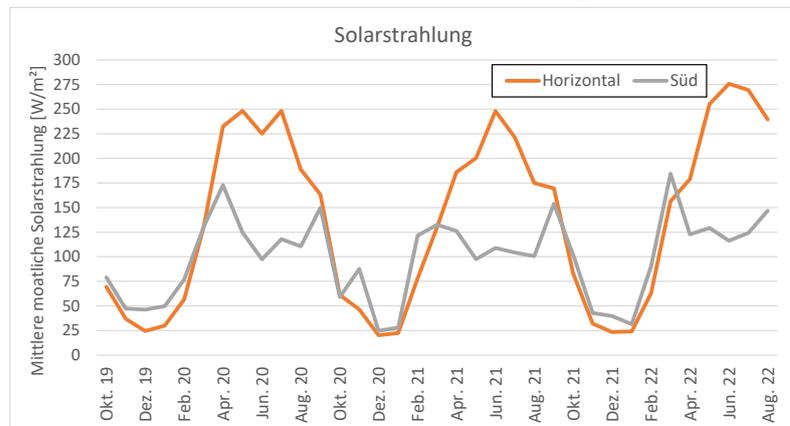
**Bild 28: Sommertage und heiße Tag im Messzeitraum**



Tropennächte, d. h. Nächte mit nächtlichen Minimaltemperaturen über 20 °C traten 2020 und 2021 nur jeweils an einem Tag auf, 2022 gab es keine Tropennacht. Frosttage mit Minimaltemperaturen unter 0 °C traten 2020 an 64 Tagen und 2021 an 89 Tagen auf. Das langjährige Mittel der Frosttage in Frankfurt am Main liegt bei 69,8 Tagen.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor sowohl auf den Energieverbrauch für die Beheizung als auch auf den PV-Stromertrag ist die solare Einstrahlung, deren Verlauf über die Messphase für die Horizontale und senkrecht nach Süden in Bild 29 dargestellt ist. Die mittlere monatliche horizontale Strahlungsleistung lag zwischen 20 W/m<sup>2</sup> im Winter und bis zu 276 W/m<sup>2</sup> im Sommer. Die senkrechte Strahlung aus Richtung Süd erreicht im Winter etwas höhere Einstrahlungswerte als in horizontaler Richtung, im Sommer ist die Solarstrahlung senkrecht-süd deutlich geringer als auf die Horizontale, da nur die Hälfte des Himmels erfasst wird.

**Bild 29: Mittlere monatliche Solarstrahlung am Standort**



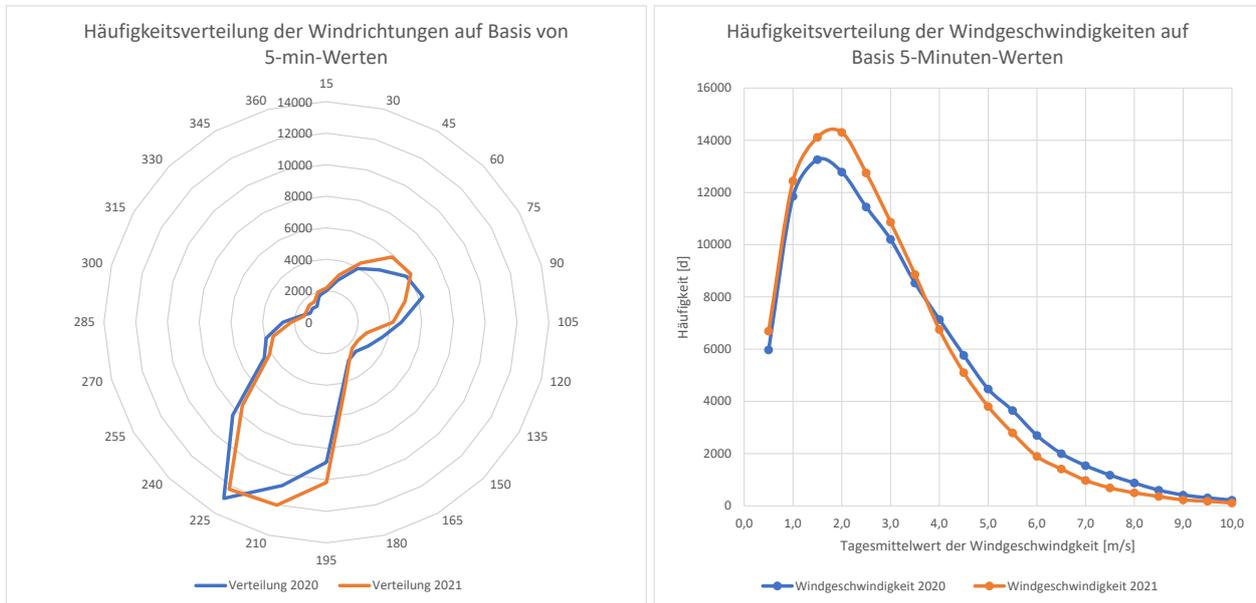
Die Jahreswerte sind in Tab. 10 im Vergleich zum Gradtagzahl-Tool des IWU [IWU 2022] sowie zu den Jahresstrahlungskarten des DWD [DWD 2022c] dargestellt. Für 2020 liegen die Werte für die horizontale Strahlung 4 % über dem langjährigen Mittelwert, 2021 wird der langjährige Wert minimal überschritten. Große Abweichungen von ca. 25 % gibt es bei der Solarstrahlung senkrecht Süd, die gegenwärtig nicht erklärt werden können. Betrachtet man nur die Einstrahlung im Winterhalbjahr (Oktober bis März), so liegt die Einstrahlung ca. 4 % unter dem langjährigen Mittel in den ersten beiden Wintern und 4 % über dem langjährigen Mittelwert im Winter 2021/22.

**Tab. 10: Jahreskennwerte der Solarstrahlung**

	PHSP horizontal [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	GTZ-Tool horizontal [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	DWD-Strahlungskarte horizontal [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	PHSP Süd [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	GTZ-Tool Süd [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
2020	1.209	1.227	1.230	878	1.122
2021	1.147	1.154	1.150	843	1.058
langj. Mittel Jahr		1.156	1.190		1.044
Okt '19 – Mrz '20	255	274		315	397
Okt '20 – Mrz '21	260	277		327	403
Okt '21 – Mrz '22	279	296		357	428
langj. Mittel Winterhalbjahr		268			287

Bild 30 zeigt die gemessene Verteilung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung. Die Hauptwindrichtung liegt bei süd-südwest und teilweise auch nord-nordost (Bild 30 links), was angesichts der Lage vor den Ausläufern des Odenwaldes in Nord-Süd-Richtung plausibel ist. Die Verteilung der Windgeschwindigkeit besitzt in beiden dargestellten Jahren ein ausgeprägtes Maximum zwischen 1 und 2 m/s (Bild 30 rechts). Der Mittelwert liegt 2020 bei 2,86 m/s und 2021 bei 2,58 m/s.

**Bild 30: Windrichtung und -geschwindigkeit an der Wetterstation auf dem PHSP**



## 5 Nutzungs- und Verbrauchsdaten der Wohnungen

Um zu untersuchen, wie sich die Konzepte zur Verbrauchsreduzierung und Kostensenkung in der Praxis bewährt haben, wurde ein dreijähriges Intensivmonitoring durchgeführt (siehe auch Kapitel 3). Damit sollten die detaillierten Verbräuche, die Nutzung durch die Mieter und ein Vergleich mit Plan- bzw. Standardwerten durchgeführt werden. Beim Bestandsgebäude lagen auswertbare Messdaten zwischen Oktober 2019 und August 2022 vor, beim Neubau konnten die Messdaten zwischen Januar 2020 und August 2022 verwendet werden.

Für die Auswertungen zu den Nutzungs- und Verbrauchsdaten in den Wohnungen werden die Kennwerte entweder auf die Energiebezugsfläche nach PHPP (siehe Tab. 1) oder nach der Anzahl der Personen berechnet. Die Personenbelegung hat sich im Laufe der Messphase verändert – aufgrund von Daten der Neuen Wohnraumhilfe für die Nebenkostenbudgets liegen hierzu genauere Angaben vor. Während bei den Planungen von insgesamt 132 Personen in den 42 Wohnungen ausgegangen wurde, waren es im Jahr 2020 insgesamt 137 Personen und 2021 insgesamt 143 Personen.

### 5.1 Raumtemperaturen

In jeder Wohnung im PassivhausSozialPlus werden im Wohnzimmer die Raumlufttemperaturen gemessen, außerdem in 20 Wohnungen die Temperaturen auch aller anderen Zimmer. In diesem Kapitel wird der wichtige Komfortparameter Raumtemperatur analysiert, der gleichzeitig auch Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch besitzt.

#### 5.1.1 Gewichtete Gebäudetemperaturen in der Heizperiode

Zur Berechnung von mittleren Raumtemperaturen bzw. gewichteten Gebäudetemperaturen wurden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Tab. 11 zeigt für die drei Heizperioden von 2019/20 bis 2021/22 die arithmetischen Mittelwerte der Raumtemperatur (alle Messwerte werden unabhängig von der Raumgröße gleich gewichtet) sowie die Mittelwerte, die mit der Raumfläche gewichtet wurden. Bei dieser Betrachtung werden nur die aktiv beheizten Bereiche der Obergeschosse berücksichtigt, die nicht beheizten Räume innerhalb der thermischen Hülle sowie der Besprechungsraum im Keller des Bestandsgebäudes sind nicht in die Mittelung eingeflossen.

**Tab. 11: Mitteltemperaturen in den Heizperioden – jeweils arithmetische und flächengewichtete Mittelwerte**

	HP 2019/20 *		HP 2020/21		HP 2021/22	
	arithm. Mittel	flächen-gewichtet	arithm. Mittel	flächen-gewichtet	arithm. Mittel	flächen-gewichtet
Bestandsgebäude	22,0 °C	22,0 °C	22,5 °C	22,4 °C	22,1 °C	22,1 °C
Neubau	22,3 °C	22,4 °C	22,5 °C	22,6 °C	22,3 °C	22,2 °C
Gesamtprojekt	22,1 °C	22,2 °C	22,4 °C	22,5 °C	22,0 °C	22,2 °C

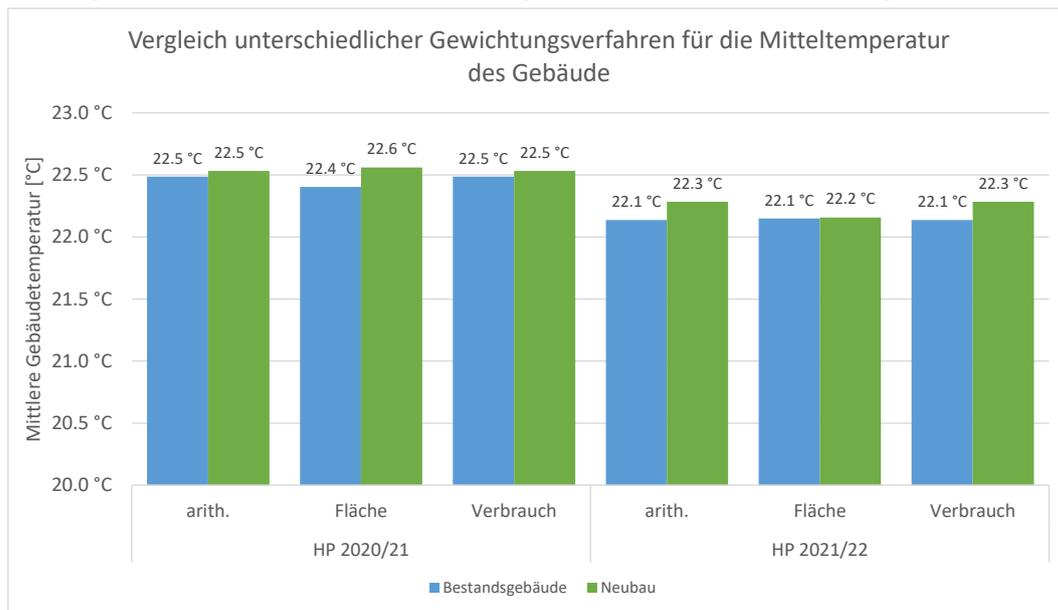
\* Neubau erst ab Januar 2020

In den Heizperioden lag die mittlere Gebäudetemperatur zwischen 22,0 und 22,6 °C, so dass keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Gebäuden und Heizperioden vorlagen (siehe Bild 31). Die gemessenen Temperaturen lagen somit über dem Standardansatz des PHPP von 20 °C für den Nachweis des Passivhaus-Standards, aber in einem üblichen Bereich, der auch in anderen energieeffizienten Gebäuden gemessen wurde (siehe Bild 60 in Kapitel 5.7.4).

Neben den Gewichtungen wie in Tab. 11, die eine feste Länge der Auswerteperiode von Oktober bis März unterstellte, können die Temperaturen auch mit dem (monatlichen) Heizwärmeverbrauch gewichtet werden<sup>2</sup>. Damit werden Monate mit hohem Heizwärmeverbrauch stärker berücksichtigt als Monate mit geringem Verbrauch. Dazu wurde zuerst monatsweise die flächengewichtete Mitteltemperatur des Gebäudes berechnet und die Monatswerte anschließend mit dem Heizwärmeverbrauch gewichtet.

Bild 31 zeigt den Vergleich der Mitteltemperatur für die drei Gewichtungsverfahren und für die beiden vollständig vorliegenden Heizperioden für Bestandsgebäude und Neubau. Es zeigt sich, dass die Unterschiede in Abhängigkeit des Verfahrens zur Mittelung innerhalb eines Gebäudes sehr gering ausfallen ( $\pm 0,1$  K), so dass für die weiteren Auswertungen die flächengewichteten Mittelwerte verwendet werden.

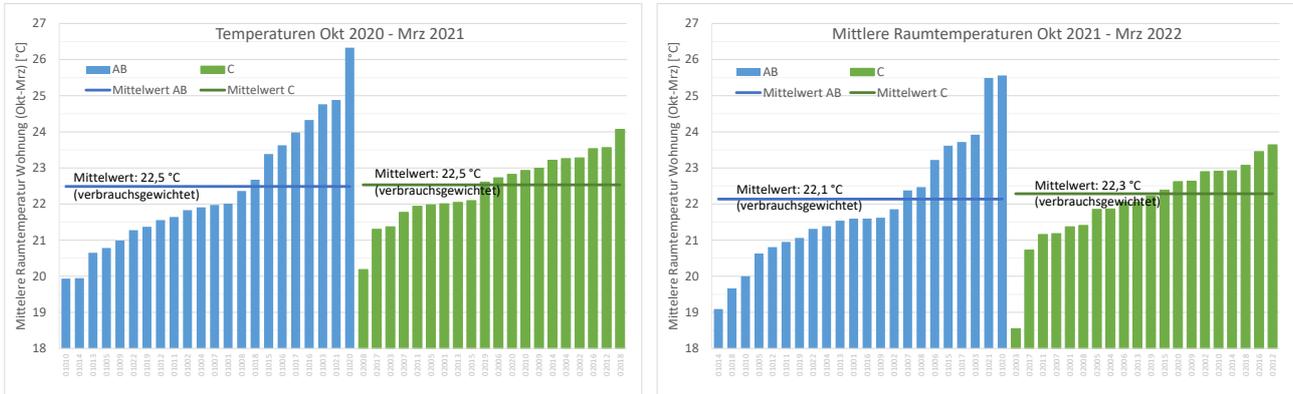
**Bild 31:** Vergleich unterschiedlicher Gewichtungsverfahren für die Mitteltemperatur des Gebäudes



Betrachtet man die mittleren, verbrauchsgewichteten Raumtemperaturen in den einzelnen Wohnungen in der Heizperiode (Bild 32), so zeigt sich eine große Streuung besonders innerhalb des Bestandsgebäudes. Hier gibt es Wohnungen mit Mitteltemperaturen unter 20 °C wie auch Wohnungen, bei denen die Temperatur im Mittel bei über 25 °C lag. Im Neubau fällt die Streuung zwischen den Wohnungen geringer aus. Die Mitteltemperaturen sind für beide Gebäude jedoch fast identisch.

<sup>2</sup> Dieses Verfahren wurde in [Loga et al. 2003] bereits angewendet

**Bild 32: Mitteltemperaturen der Wohnungen in der Heizperiode aufsteigend sortiert (Bestandsgebäude in blau, Neubau in grün) 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts)**



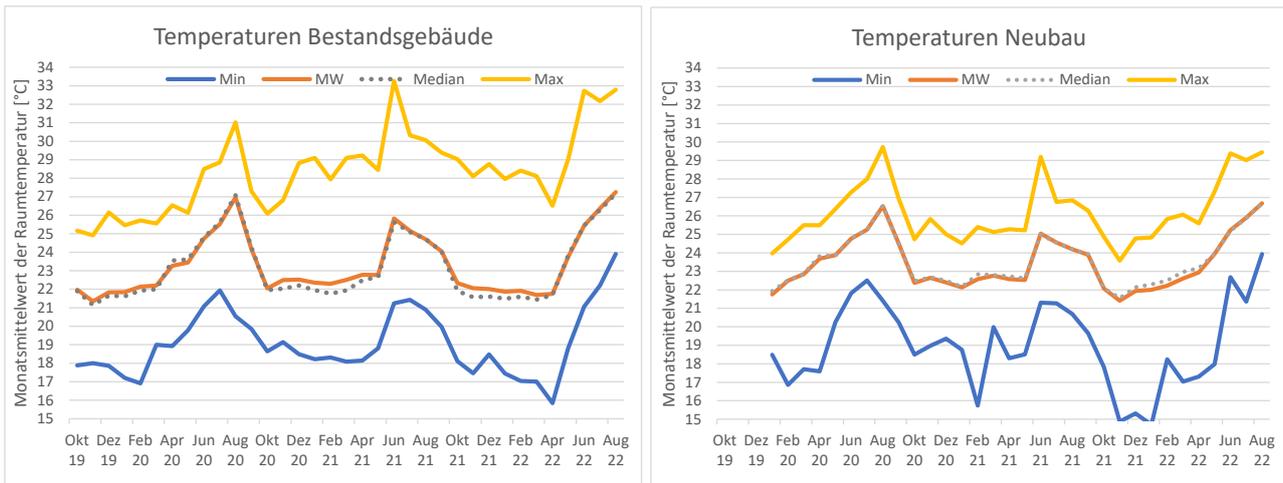
**5.1.2 Schwankungsbreite zwischen den Wohnungen**

In Bild 33 sind die minimalen, mittleren und maximalen Wohnungsmitteltemperaturen sowie der Median der Wohnungsmitteltemperaturen im Zeitverlauf für Bestandsgebäude und Neubau dargestellt. Auffällig sind die sehr hohen Temperaturen in einer Wohnung im Bestandsgebäude, die im ersten Winter bei ca. 25 °C lagen, im zweiten Winter auf bis zu 29 °C im Januar 2021 angestiegen sind. Im Sommer stiegen die Temperaturen dann bis auf bis zu 31 °C im August 2020 bzw. 33,3 °C im Juni 2021 an.

Im Neubau lagen die maximalen Temperaturen bei ca. 25 °C im Winter, im Sommer wurden in der Spitze 29,7 °C bzw. 29,2 °C erreicht.

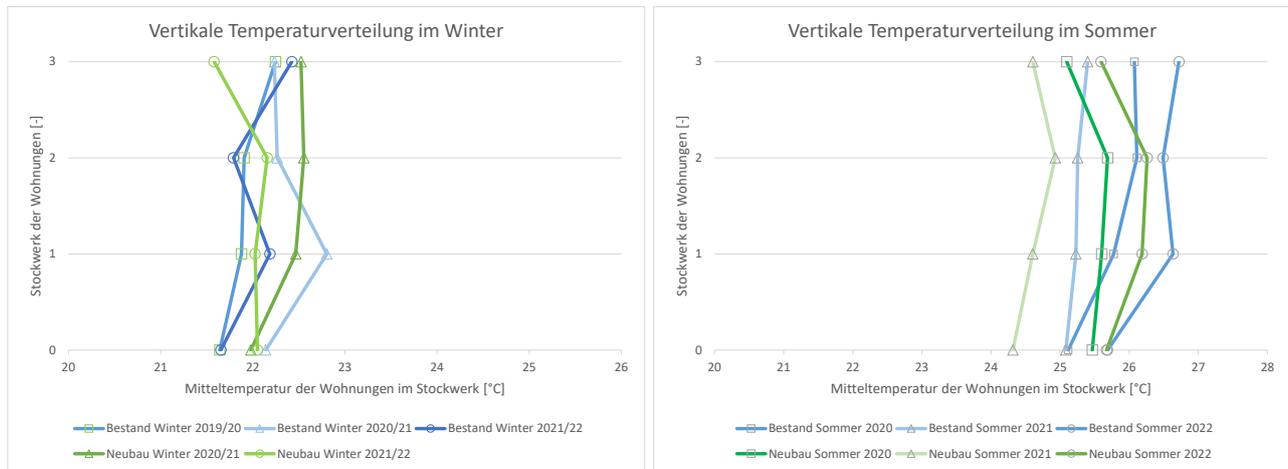
Sowohl im Winter als auch im Sommer lagen die Differenz der Wohnung mit den niedrigsten und der höchsten Monatsmitteltemperaturen im Bestandsgebäude zwischen 7,7 und 10 K beim Bestandsgebäude und zwischen 6,5 und 8,4 K im Neubau.

**Bild 33: Minimum, Maximum, Median und Mitteltemperaturen der Wohnungen von Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) im Projektverlauf**



Die vertikale Temperaturverteilung in den beiden Gebäuden ist für Winter und Sommer in Bild 34 dargestellt. Weder im Winter noch im Sommer zeigt sich eine eindeutige vertikale Temperaturverteilung zwischen den Stockwerken. Nur die Erdgeschosswohnungen sind im Winter tendenziell etwas kühler als die oberen Stockwerke. Im Neubau führt hier insbesondere eine Wohnung im 3. Obergeschoss mit sehr niedrigen Temperaturen dazu, dass sich kein einheitliches Bild ergibt.

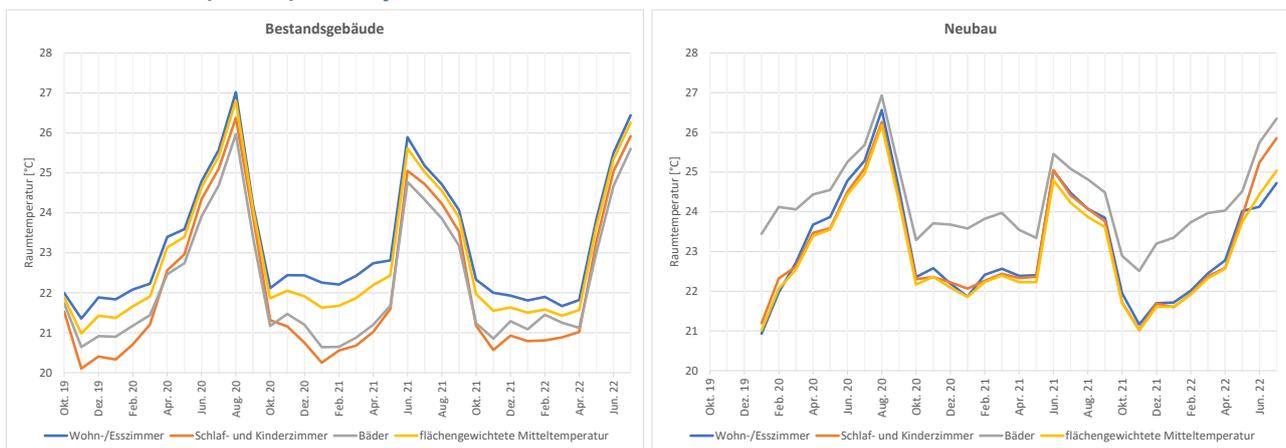
**Bild 34:** Vertikale Mitteltemperaturen der Wohnungen je Stockwerk von Bestandsgebäude und Neubau im Winter (links) und im Sommer (rechts) (Erdgeschoss=0)



### 5.1.3 Vergleich unterschiedlicher Räume im Winter

Im Folgenden soll untersucht werden, ob unterschiedliche Raumtemperaturen je nach Nutzung der Räume festgestellt werden können. Aus diesem Grund wurden alle Messwerte aus einzelnen Wohnräumen in die Gruppen Wohn-/Essräume, Bäder sowie Schlaf-/Kinderzimmer unterteilt. Für die Wohnzimmer liegen Messwerte aus jeder Wohnung vor, für alle anderen Zimmer nur aus den Wohnungen mit Intensivmonitoring. Bild 35 zeigt für Bestandsgebäude und Neubau getrennt die Monatsmitteltemperaturen dieser Raumtypen im Verlauf des Monitorings.

**Bild 35:** Mitteltemperaturen für unterschiedliche Raumtypen von Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) im Projektverlauf



Beim Bestandsgebäude (links) wurden in den Wohn-/Esszimmern im ersten Winterhalbjahr von Oktober 2019 bis Ende März 2020 im Mittel Temperaturen von 21,9 °C gemessen, in der zweiten Heizperiode 22,3 °C und in der dritten Heizperiode 21,9 °C. Im Neubau (rechts) wurden in den Wohnzimmern sehr ähnliche Temperaturen wie im Bestandsgebäude erreicht, wobei das Gebäude im ersten Winter noch aufgeheizt wurde. Bei den Schlaf- und Kinderzimmern, über deren reale Nutzung nichts bekannt ist, lagen die Temperaturen im Bestandsgebäude niedriger als im Neubau (siehe Tab. 12).

Auffällig unterscheiden sich die Temperaturen in den Badezimmern zwischen Bestandsgebäude und Neubau. Während im Bestandsgebäude ca. 21 °C in den Bädern gemessen wurden, waren es im Neubau im ersten

Winter 22,9 °C und im zweiten Winter 23,7 °C. Hintergrund ist vermutlich, dass der Neubau ausschließlich innenliegende Bäder ohne Fenster besitzt und die komplette Wärmeverteilung für Heizung und Warmwasserbereitung über die Steigstränge in den Bädern erfolgt, so dass hier deutlich höhere, unregelmäßige Abwärmquellen vorhanden sind, als in den Bestandswohnungen. Dort sind die Heizungsverteilung über die bereits bestehenden Steigstränge in den Fensterachsen der Außenwände geführt und die Abwärme verteilt sich gleichmäßiger über die Wohnung.

**Tab. 12: Mitteltemperaturen im Winterhalbjahr für unterschiedliche Raumnutzungstypen von Bestandsgebäude (oben) und Neubau (unten)**

	Bestandsgebäude				
	Wohnen/ Essen	Schlafen, Kinder	Bäder	nur Wohnzimmer- gemittelt*	gewichtete Mitteltemperatur Gebäude
Okt 2019 – Mrz 2020	21,9 °C	20,7 °C	21,1 °C	22,0 °C	21,5 °C
Okt 2020 – Mrz 2021	22,3 °C	20,8 °C	21,0 °C	22,5 °C	21,8 °C
Okt 2021 – Mrz 2022	21,9 °C	20,9 °C	21,2 °C	22,1 °C	21,6 °C

\* Wohnzimmer als Referenz für die gesamte Wohnung

	Neubau				
	Wohnen/ Essen	Schlafen, Kinder	Bäder	nur Wohnzimmer gemittelt*	gewichtete Mitteltemperatur Gebäude
Jan 2020 – Mrz 2020	21,9 °C	22,0 °C	23,9 °C	21,8 °C	21,9 °C
Okt 2020 – Mrz 2021	22,3 °C	22,3 °C	23,7 °C	22,4 °C	22,2 °C
Okt 2021 – Mrz 2022	21,8 °C	21,7 °C	23,3 °C	21,9 °C	21,7 °C

\* Wohnzimmer als Referenz für die gesamte Wohnung

Die flächengewichteten Mitteltemperaturen der beiden Gebäude unterscheiden sich in der Heizperiode 2021/22 mit ca. 21,7 °C nur wenig, wobei berücksichtigt werden muss, dass im Neubau 13 und im Bestandsgebäude nur 7 Wohnungen detailliert vermessen wurden und gleichzeitig die unterschiedlichen baulichen Situationen in den Bädern vorliegt.

Werden nur die Wohnzimmertemperaturen gemittelt und als Mittelwert für die gesamte Wohnung angesetzt, so ergeben sich ab dem zweiten Winter für Bestandsgebäude und Neubau mit ca. 22,4 °C bzw. 22,0 °C ebenfalls sehr ähnliche Werte. Im Neubau unterscheidet sich diese mittlere Temperatur auf Basis von einem Messpunkt im Wohnzimmer nur geringfügig von der Mitteltemperatur, die alle Sensoren mitberücksichtigt. Im Bestandsgebäude liegen die mittleren Wohnzimmertemperaturen mindestens 0,5 K über der gewichteten Mitteltemperatur des Gebäudes unter Berücksichtigung aller Sensoren.

#### 5.1.4 Raumtemperaturen im Sommer

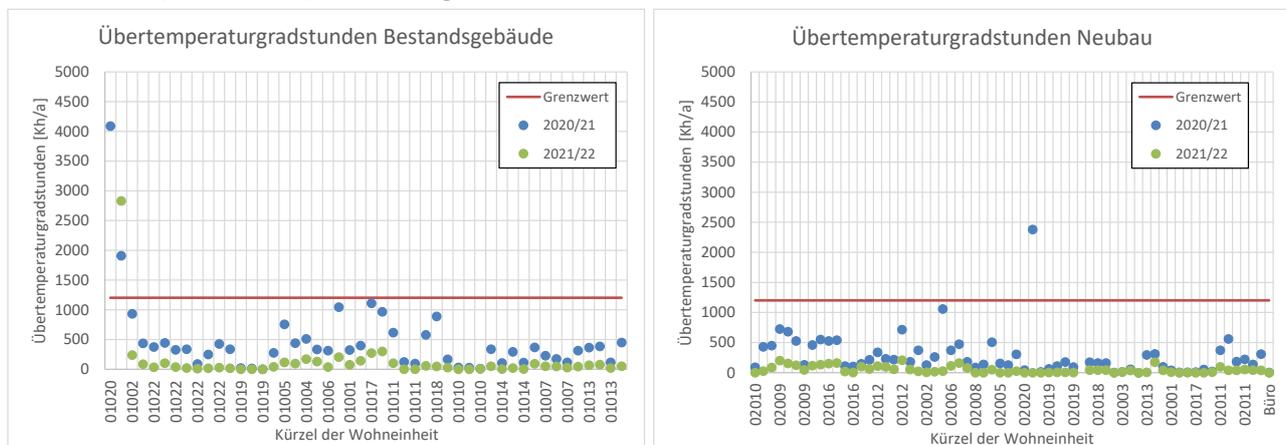
Die mittleren Raumtemperaturen im Sommer, hier wurde einheitlich der Zeitraum Anfang Juni bis Ende August berücksichtigt, liegen in den drei ausgewerteten Sommerperioden zwischen 24,3 °C und 26,2 °C (siehe Tab. 13) und somit grundsätzlich in einem noch komfortablen Bereich.

Um den sommerlichen Komfort in den Räumen besser beurteilen zu können, wurden die Übertemperaturgradstunden aller vermessenen Räume ausgewertet. Darmstadt gehört nach [DIN 4108-2] zur Sommerklima-region C, für die ein Bezugswert für die operative Innentemperatur von 27 °C anzusetzen ist. Um die

Anforderungen an den sommerlichen Komfort einzuhalten, muss die Anzahl der Übertemperaturgradstunden bei Wohngebäuden kleiner 1.200 h/a liegen (Tabelle 9 in [DIN 4108-2]).

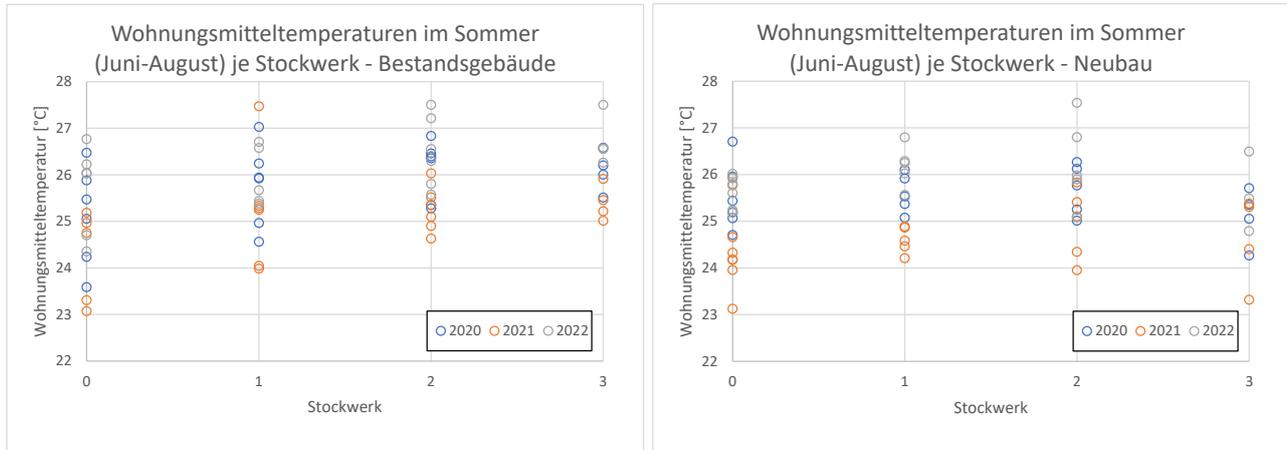
Bild 36 zeigt die Übertemperaturgradstunden für die beiden Auswertejahre 2020/21 und 2021/22 getrennt für Bestandsgebäude und Neubau sowie die Anforderungen nach [DIN 4108-2], die unterschritten werden sollten. Bis auf zwei Räume im Bestandsgebäude und einen Raum im Neubau unterschreiten alle Räume die Obergrenze für unkomfortable Temperaturen – zum Teil deutlich. Die Räume, die über dem Grenzwert liegen, überschreiten bereits im Winterhalbjahr aufgrund der hohen Raumtemperaturen (siehe Maximalwerte in Bild 33) bereits den Grenzwert von 1.200 Kh/a. Da im Winter die Raumtemperaturen durch die Einstellungen der Nutzer vorgegeben werden, ist davon auszugehen, dass dieses Temperaturniveau von den Nutzern so gewünscht wird. Insgesamt besitzen die Räume im Sommer einen sehr guten Komfort, insbesondere wenn man berücksichtigt, dass 2020 und 2022 mehr heiße Tage auftraten als im langjährigen Mittel (siehe Kapitel 4).

**Bild 36: Übertemperaturgradstunden (Referenztemperatur 27 °C) sowie Grenzwert nach [DIN 4108-2]: Bestandsgebäude (links), Neubau (rechts)**



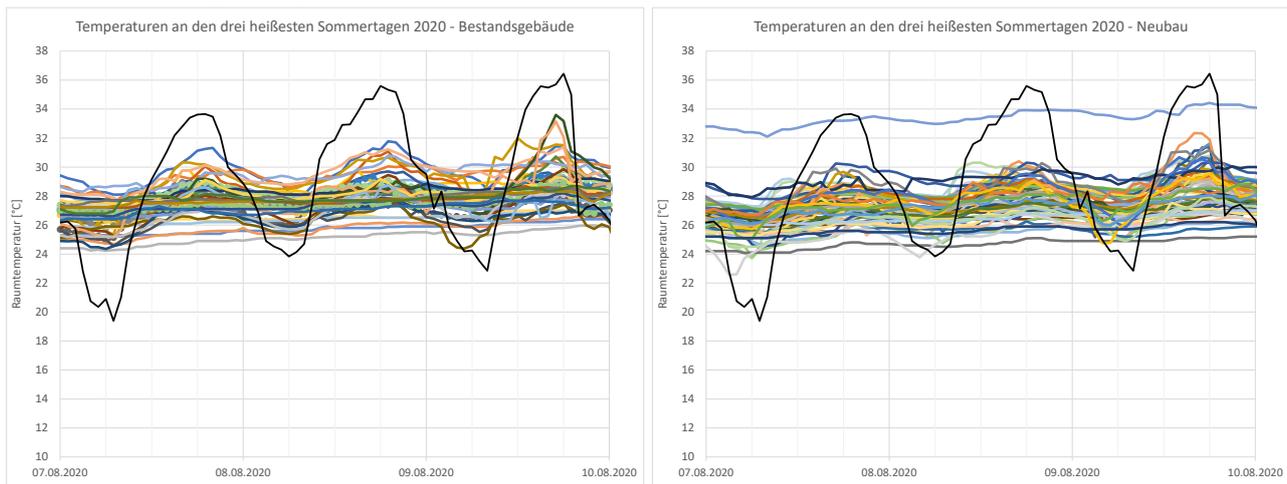
Die Verteilung der Raumtemperaturen im Sommer über die Stockwerke ist in Bild 37 dargestellt (Erdgeschoss entspricht Stockwerk 0). In allen Geschossen gibt es bei Bestandsgebäude und Neubau eine große Spanne der mittleren Raumtemperaturen. Im Bestandsgebäude ist ein leichter Anstieg der minimalen Temperaturen in den oberen Stockwerken zu erkennen, im Neubau und bei den maximalen Temperaturen ist das nicht festzustellen. Somit scheint es keinen Zusammenhang zwischen der vertikalen Lage der Wohnung und der sommerlichen Raumtemperatur zu geben.

**Bild 37: Wohnungsmitteltemperaturen der einzelnen Wohnungen im Sommer (Juni-August) in Abhängigkeit des Geschosses (Erdgeschoss= 0): Bestandsgebäude (links), Neubau (rechts)**



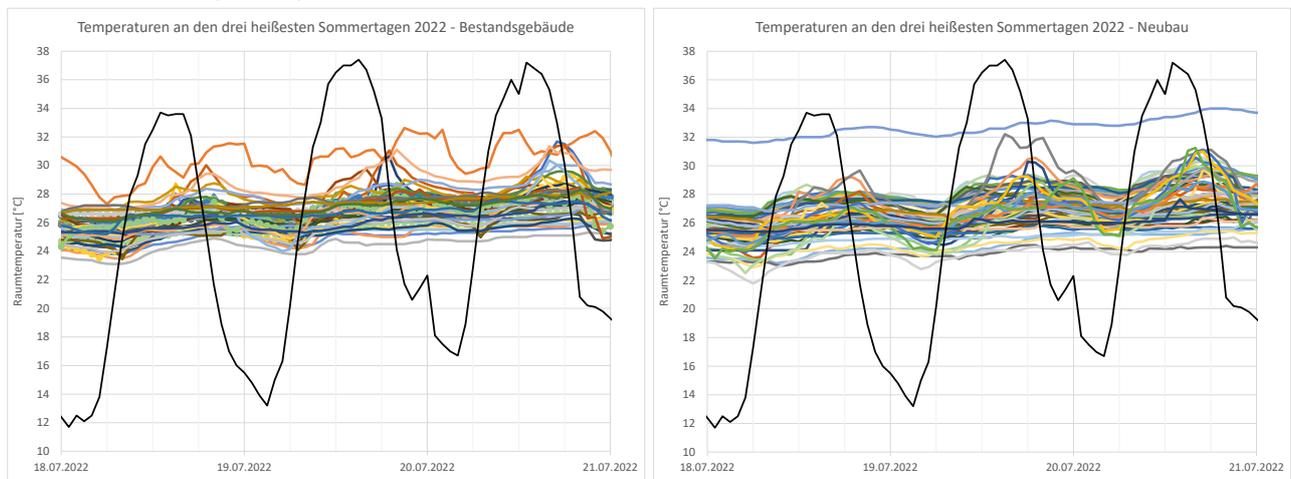
Betrachtet man einige sehr heiße Tage im Jahr 2020, so zeigt sich im Bestandsgebäude, dass auch bei Außentemperaturen von über 35 °C die Spitzenwerte der Raumtemperaturen zwischen 25,5 °C und 32 °C lagen (Bild 38links). Da in den Wohnungen mit besonders hohen Raumtemperaturen die gemessene Raumtemperatur der Außentemperatur folgt, scheint die Begründung im starken Lüften der Wohnungen tagsüber zu liegen. In anderen Wohnungen ist nur ein geringfügiger, langsamer Temperaturanstieg über die dargestellten drei Tage festzustellen. Im Neubau (Bild 38 rechts) ergeben sich vergleichbare Temperaturen, die bei den höchsten Werten (Ausnahme ein Badezimmer) allerdings ca. 2 K niedriger liegen als im Bestandsgebäude. Die niedrigsten Werte unterscheiden sich kaum zwischen beiden Gebäuden. Da, wie in Bild 37 dargestellt, auch die vertikale Lage der Wohnung im Gebäude keinen eindeutigen Einfluss auf die Raumtemperatur besitzt, scheint das Lüftungsverhalten einen wichtigen Einfluss auf den Temperaturkomfort im Sommer zu besitzen.

**Bild 38: Raumtemperaturen der einzelnen Räume vom 07.08. bis 09.08.2020 (heißeste Tage des Jahres) sowie Verlauf der Außentemperatur (schwarze Linie): Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts)**



In den Sommern 2021 und 2022 traten vergleichbar hohe Außentemperaturen tagsüber auf, nachts sanken die Temperaturen aber stärker ab, so dass die Möglichkeit für eine nächtliche Lüftung bestand und die Raumtemperaturen im Mittel etwas niedriger lagen (Bild 39).

**Bild 39: Raumtemperaturen der einzelnen Räume vom 18.07. bis 21.07.2022 (heißeste Tage des Jahres sowie Verlauf der Außentemperatur (schwarze Linie): Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts)**



### 5.1.5 Vergleich unterschiedlicher Räume im Sommer

Wertet man die unterschiedlichen Raumnutzungen in den Wohnungen im Sommer getrennt aus, so zeigt sich zwischen Bestandsgebäude und Neubau ein geringfügig unterschiedliches Bild. Im Bestandsgebäude wichen die Wohn-/Essräume und die Schlaf- bzw. Kinderzimmer nur wenig von den gewichteten Mitteltemperaturen der Wohnungen ab, die Bäder waren tendenziell etwas kühler (Tab. 13 oben). Im Neubau zeigt sich der vergleichbare Effekt wie im Winter, dass die Temperaturen der (innenliegenden) Bäder über der der anderen Räume und über der Mitteltemperatur der Wohnungen lagen (Tab. 13 unten). Insgesamt liegt das Temperaturniveau im Mittel aber in einem komfortablen Bereich.

**Tab. 13: Mitteltemperaturen im Sommer (Juni- August) für unterschiedliche Raumtypen von Bestandsgebäude (oben) und Neubau (unten)**

	Bestandsgebäude			
	Wohnen/Essen	Schlafen, Kinder	Bäder	gewichtete Mitteltemperatur Gebäude
Jun 20 - Aug 20	25,8 °C	25,3 °C	24,9 °C	25,6 °C
Jun 21 - Aug 21	25,3 °C	24,7 °C	24,3 °C	25,1 °C
Jun 22 - Aug 22	26,4 °C	25,9 °C	25,5 °C	26,2 °C

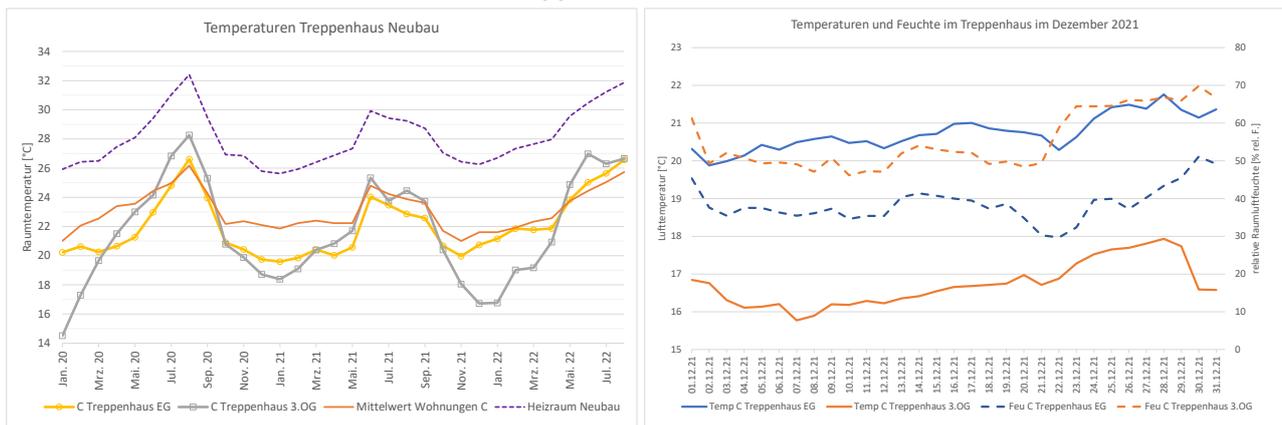
	Neubau			
	Wohnen/Essen	Schlafen, Kinder	Bäder	gewichtete Mitteltemperatur Gebäude
Jun 20 - Aug 20	25,5 °C	25,3 °C	26,0 °C	25,2 °C
Jun 21 - Aug 21	24,5 °C	24,5 °C	25,1 °C	24,3 °C
Jun 22 - Aug 22	24,8 °C	25,9 °C	26,4 °C	25,1 °C

Auffallend ist ein Badezimmer im Neubau (auch in Bild 38 und Bild 39 jeweils rechts), in dem im Mittel über die gesamte Messperiode Raumtemperaturen von 30,1 °C gemessen wurden, im Sommer lag der höchste Tagesmittelwert bei 34,4 °C. Diese Wohnung erreichte aber auch in der Heizperiode Mitteltemperaturen von bis zu 24 °C, so dass eine gezielte Einstellung durch die Nutzer wahrscheinlich ist.

### 5.1.6 Treppenhaustemperaturen im Neubau

Im Neubau wurden im Erd- und im 3. Obergeschoss jeweils ein Temperatur-/Feuchtefühler installiert, um vor allem die Temperaturen in dieser nicht beheizten Zone innerhalb der thermischen Hülle zu erfassen. Das Treppenhaus besitzt eine durchgängige Verglasung und kann über die Fenster auch gelüftet werden. Die Fensteröffnung im Treppenhaus wurde nicht erfasst. Gleichzeitig ist auch eine eigene Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorhanden. Im Erdgeschoss befindet sich in einem Nebenraum die Heizzentrale, in der durch die beiden Pufferspeicher vergleichsweise hohe Temperaturen vorherrschen (28,1 °C im Gesamtzeitraum, siehe Kapitel 5.1.5). Bild 40 links zeigt den Temperaturverlauf im Treppenhaus sowie im Heizraum im Erdgeschoss als Monatswerte im Vergleich zur mittleren flächengewichteten Raumtemperatur der Wohnungen.

**Bild 40:** Treppenhaustemperaturen im Neubau über die gesamte Messphase (links) und Temperaturen und relative Feuchte im Treppenhaus des Neubaus im Dezember 2021 (rechts)



Nach Inbetriebnahme des Neubaus Ende Dezember 2019 musste der Baukörper noch aufgeheizt werden, sodass insbesondere im 3. Obergeschoss die Temperaturen deutlich anstiegen. Die Temperaturen im Heizraum liegen immer ca. 5 K über der Mitteltemperatur der Wohnungen im Gebäude. Im Sommer 2020 lag die Temperatur im Treppenhaus im 3. OG mit 28 °C ca. 1 K über dem Gebäudemittel, im Erdgeschoss erreichte sie in der Spitze ca. 26 °C, die auch im Mittel für das Gesamtgebäude gemessen wurden. Im Winter 2020/21 sanken die Temperaturen im Erdgeschoss des Treppenhauses ca. 2 K unter die des Gebäudemittels, im 3. Obergeschoss sank die Temperatur bis zu 4 K unter die Mitteltemperatur der beheizten Räume. Die mittlere Treppenhaustemperatur im Zeitraum November 2020 bis Ende Februar 2021 lag bei 19,9 °C im Erdgeschoss und bei 19,0 °C im 3. Obergeschoss. Im gleichen Zeitraum im Winter 2021/22 erreichte die Temperatur im 3. Obergeschoss nur noch 17,6 °C, im Erdgeschoss dagegen 20,9 °C. Es kann vermutet werden, dass die Wärmeeinträge aus dem Heizraum im Erdgeschoss zu der dort höheren Treppenhaustemperatur führen. Als Grund für die niedrigen Temperaturen oben im Treppenhaus kann Fensterlüftung vermutet werden.

Bild 40 rechts zeigt für den Dezember 2021 die täglichen Mittelwerte der Temperaturen im Treppenhaus sowie die relativen Raumluftfeuchten. Das Treppenhaus ist im 3. Obergeschoss ca. 4 K kühler und die Temperaturen liegen zwischen 16 und 18 °C. Somit treten hier zusätzliche Wärmeverluste der angrenzenden Wohnungen auf.

Die Raumluftfeuchten sind durch die Temperaturen beeinflusst und liegen zwischen 30 und 50 % rel. F. im Erdgeschoss und zwischen 48 und 70 % rel. F. im 3. Obergeschoss.

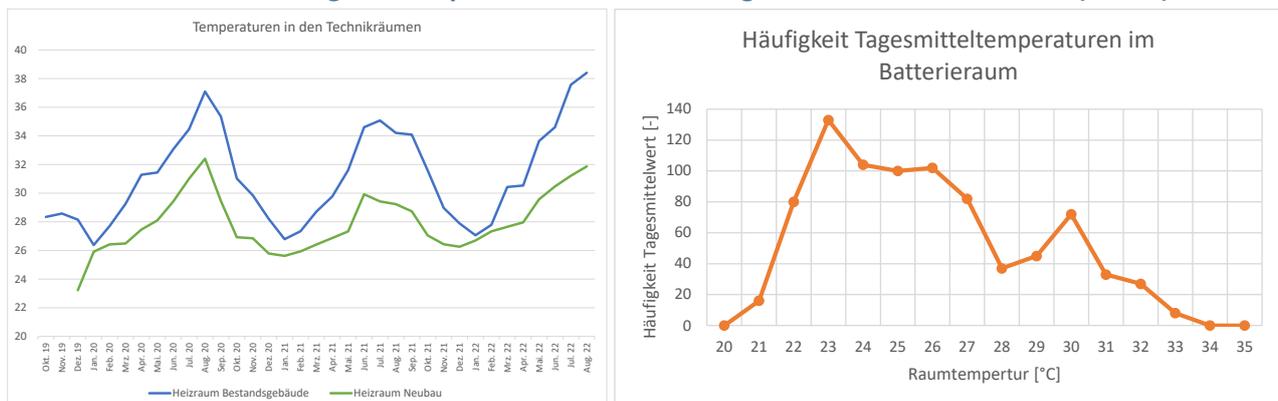
### 5.1.7 Temperaturen Heizräume

Die Temperaturen in den Heizräumen von Bestandsgebäude und Neubau sind in Bild 41 links dargestellt. Die Werte liegen zwischen 26 °C im Winter und bis zu 37 °C im Sommer – im Bestandsgebäude etwas höher, vermutlich weil hier auch die Wärmeversorgungsleitung für den Neubau durchgeführt wird. Die Maximalwerte der Tagesmitteltemperaturen lagen bei 44,0 °C im Bestandsgebäude und 33,3 °C im Neubau.

Bild 41 (rechts) zeigt weiterhin die Häufigkeitsverteilung der Temperatur im Schaltschrank für die Messtechnik. Diese ist im Keller des Bestandsgebäudes in dem Raum mit den Batteriespeichern untergebracht. Die Temperaturen schwankten zwischen 20 und 33 °C im Tagesmittel (Jahresmittel: 25,6 °C). In der Spitze wurden hier jedoch 44,9 °C gemessen, was außerhalb der Spezifizierung vieler PC-Komponenten liegt. Dies zeigt, dass bei der Planung von hoch technisierten Gebäuden auch die Betriebsbedingungen von elektronischen Komponenten berücksichtigt werden müssen.

Die Abwärme der Heizräume steht den angrenzenden Fluren und Wohnräumen als Wärmequelle zur Verfügung. In der Heizperiode fällt die Temperatur im Heizraum im Bestandsgebäude im Monatsmittel nicht unter 27 °C, im Neubau nie unter 26 °C.

**Bild 41:** Temperaturen in den Heizräumen von Bestandsgebäude und Neubau (links) sowie Häufigkeitsverteilung der Temperaturen im Monitoring-Schrank im Batterieraum (rechts)



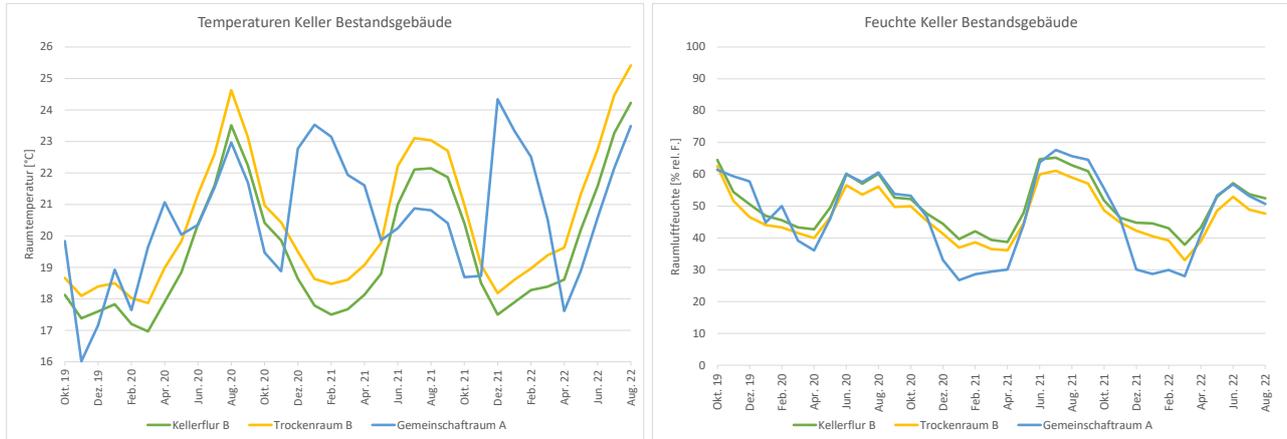
### 5.1.8 Kellertemperaturen

Der Keller des Bestandsgebäudes ist größtenteils unbeheizt, nur der Gemeinschaftsraum wird gelegentlich genutzt. Somit stellt er eine wichtige Zone zur Bestimmung der Wärmeverluste des Gebäudes dar.

Bild 42 zeigt links die Monatsmittelwerte der Temperaturen für zwei unbeheizte Kellerräume und den Gemeinschaftsraum. Die niedrigsten Kellertemperaturen wurden im November 2019 (Aufheizung Baukörper noch nicht abgeschlossen, laufende Restbauarbeiten) mit 16 °C im Gemeinschaftsraum festgestellt. Anschließend glichen sich die Temperaturen der drei Messstellen im Keller an und stiegen im Sommer bis auf Werte von 23 bis 25 °C. Im Winter sank die Temperatur in den unbeheizten Kellerräumen auf 17,5 bis 18,5 °C ab, d. h. der Keller ist aufgrund der Dämmung der Kelleraußenwände und der Wärmeabgabe der (gut gedämmten) Verteilungen recht warm. Der Gemeinschaftsraum kann aktiv über einen Heizkörper beheizt werden. Obwohl er in der Corona-Pandemie im Winter 2020/21 und 2021/22 wenig genutzt wurde, blieb die Raumtemperatur oft wochenlang auf Werten von 25 °C, da der Raumthermostat nicht heruntergedreht wurde. Dadurch ergibt sich im Winterhalbjahr ein entgegengesetzter Temperaturverlauf zu den anderen Kellerräumen.

Die relative Raumluftfeuchte schwankte in den unbeheizten Kellerräumen zwischen ca. 40 % im Winter und 65 % im Sommer (Bild 42 rechts). Im Winter lag die Feuchte im Gemeinschaftsraum aufgrund der deutlich höheren Raumtemperaturen ca. 10 % niedriger als in den unbeheizten Räumen, im Sommer glichen sich die Werte an. Insgesamt sind an den Messpunkten im Untersuchungszeitraum keine kritischen Raumluftfeuchten aufgetreten.

**Bild 42: Temperaturen (links) und relative Raumlufffeuchten (rechts) im Keller des Bestandsgebäudes im Projektverlauf (Monatsmittelwerte)**



## 5.2 Raumlufffeuchte

Modernisiertes Bestandsgebäude und Neubau verfügen über leicht unterschiedliche Lüftungsanlagen. Im Bestandsgebäude besitzt die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung keine Zuluftnachheizung, der Neubau wird fast vollständig über die Zuluft beheizt.

Tab. 14 zeigt die gemessenen flächengewichteten mittleren Raumlufffeuchten für drei Heizperioden. Es zeigt sich zwar, dass die Raumlufffeuchte im Neubau geringfügig niedriger ist als im Bestandsgebäude, allerdings liegt die Abweichung innerhalb der Messunsicherheit der verwendeten Sensoren. Außerdem ist gleichzeitig die Anzahl der Personen im Neubau niedriger als im Bestandsgebäude.

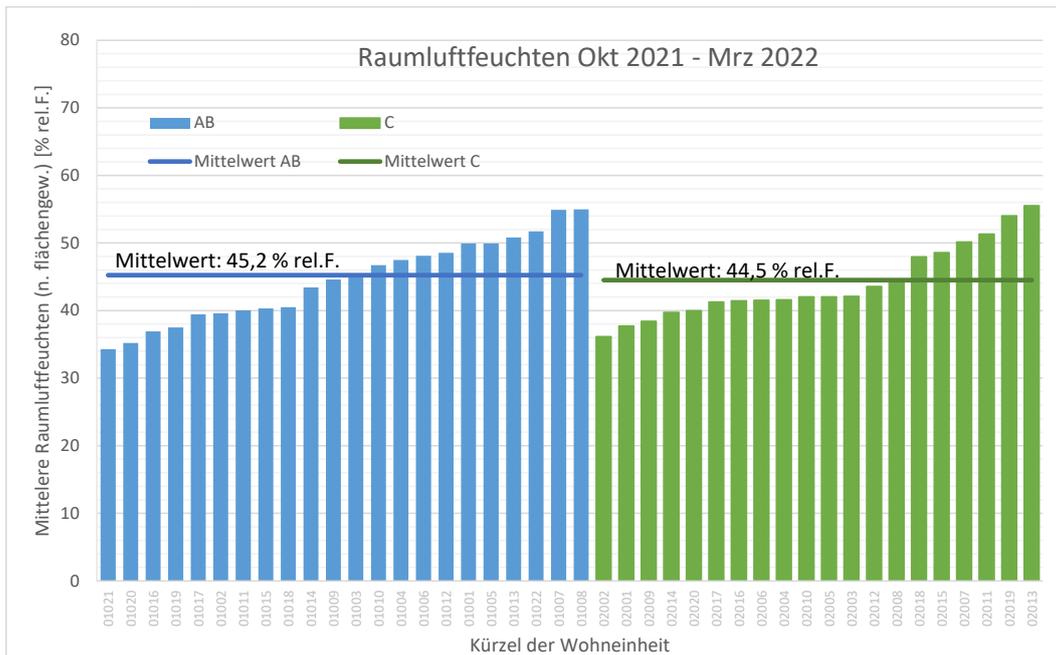
**Tab. 14: Mittlere relative Raumlufffeuchte in der Heizperiode (flächengewichtete Mittelwerte, jeweils für den Zeitraum Oktober bis März)**

	HP 2019/20 *	HP 2020/21	HP 2021/22
Bestandsgebäude	48,6 % rel. F.	45,1 % rel. F.	45,2 % rel. F.
Neubau	45,5 % rel. F.	42,0 % rel. F.	44,5 % rel. F.
Gesamtprojekt	47,1 % rel. F.	43,6 % rel. F.	44,9 % rel. F.

\* Neubau erst ab Jan 2020

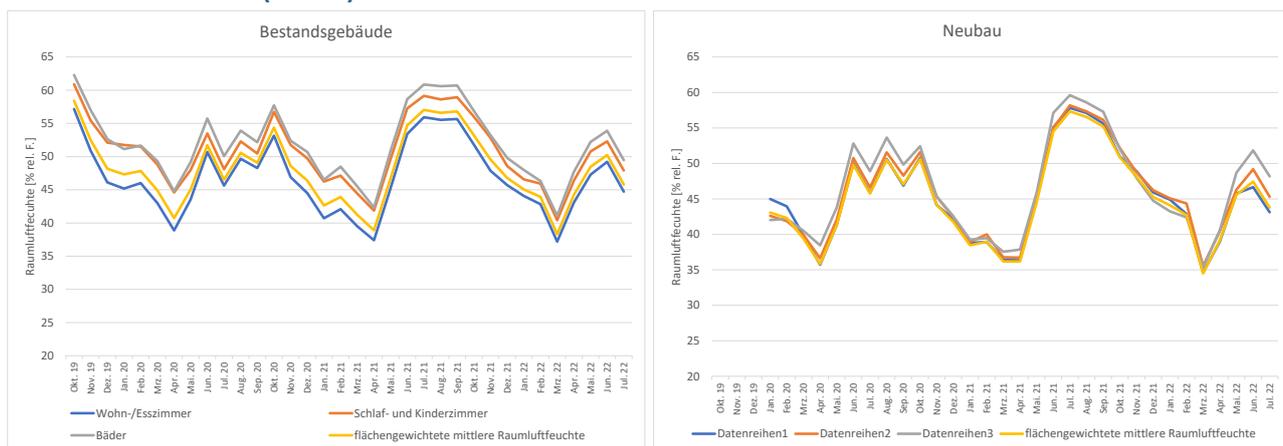
In Bild 43 sind die gemessenen relativen Raumlufffeuchten der einzelnen Wohnungen aufsteigend sortiert für Bestandsgebäude (links in blau) und Neubau (rechts in grün) für den Zeitraum Oktober 2021 bis März 2022 dargestellt. Bei beiden Gebäuden liegen die Raumlufffeuchten zwischen ca. 35 und 55 % rel. F. und der flächengewichtete Mittelwert unterscheidet sich nur minimal. Somit zeigt sich hier kein Unterschied zwischen einer Beheizung über Heizkörper und einer Zuluftheizung.

**Bild 43: Aufsteigend sortierte Raumlufffeuchten der Wohnungen in der Heizperiode 2021/22 für Bestandsgebäude und Neubau**



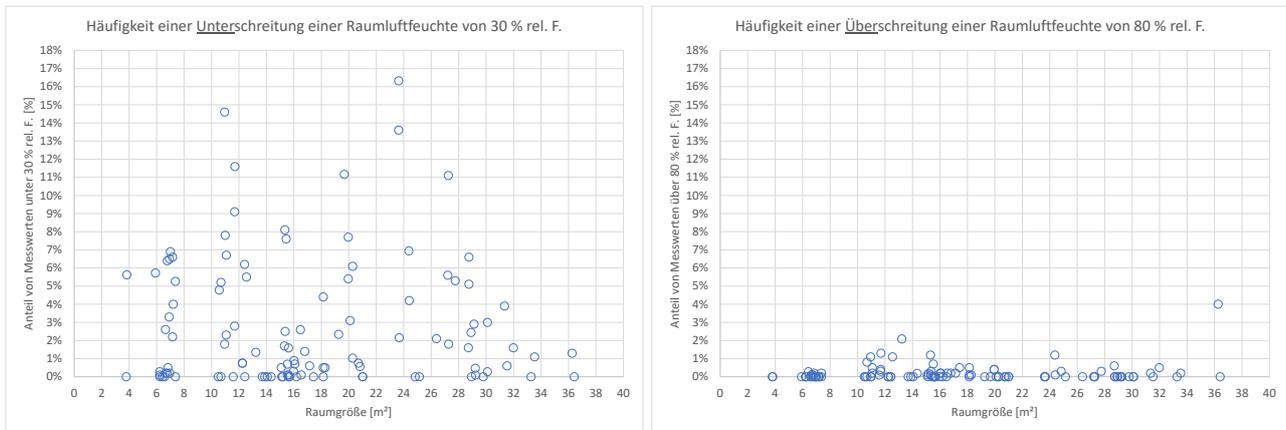
Betrachtet man die Monatsmittelwerte der Raumlufffeuchte getrennt nach Raumnutzung, so zeigt sich im Bestandsgebäude eine gewisse Differenzierung (Bild 44). In den Bädern des Bestandsgebäudes (Bild 44 links) lagen die höchsten Raumlufffeuchten vor, die niedrigsten Werte wurden in den Wohn- und Esszimmern gemessen. In der Heizperiode liegt die Feuchte in den Bädern ca. 5 % rel. F. höher. Die Raumlufffeuchte lag in den Schlaf- und Kinderzimmern nur geringfügig unterhalb der Werte der Bäder. Insgesamt wurde im Mittel in den Schlafräumen eine Feuchte von 40 % rel. F. nie unterschritten.

**Bild 44: Raumlufffeuchten unterschiedlicher Raumnutzungen im Bestandsgebäude (links) und im Neubau (rechts)**



Beim Neubau (Bild 44 rechts) fällt auf, dass die Messwerte der Raumlufffeuchte deutlich näher beieinander liegen und die Bäder sich kaum von den übrigen Räumen unterscheiden. Nur in den Sommermonaten wurde in den Bädern eine geringfügig höhere Raumlufffeuchte gemessen.

**Bild 45:** Häufigkeit der Unterschreitung einer Raumlufffeuchte von 30 % (links) und Häufigkeit einer Überschreitung von Raumlufffeuchten von 80 % (rechts), jeweils Tagesmittelwerte im Messzeitraum



Betrachtet man die Ausreißer bei den Raumlufffeuchten auf Basis von Tagesmittelwerten, so treten je nach Raum unterschiedlich häufig Werte kleiner 30 % rel. F. auf, die je nach gesundheitlichen Randbedingungen als ungünstig eingeordnet werden [Bux, von Hahn 2020]. Bild 45 links zeigt diese Häufigkeit für alle gemessenen Räume in Abhängigkeit der Fläche des Raumes. Während in einigen wenigen Räumen Raumlufffeuchten unter 30 % an mehr als 10 % aller Tage auftraten (Winter und Sommer sind hier gemeinsam betrachtet), so gibt es viele Räume, bei denen die Häufigkeit solch niedriger Messwerte bei kleiner 1 % lag. Die Gründe für die Unterschiede zwischen den Räumen könnten bei unterschiedlichem Lüftungsverhalten vor allem im Winter liegen, sind aber nicht im Detail bekannt. Raumlufffeuchten von 80 % traten nur in einzelnen Räumen und nur zu einem geringen Anteil auf (Bild 45 rechts).

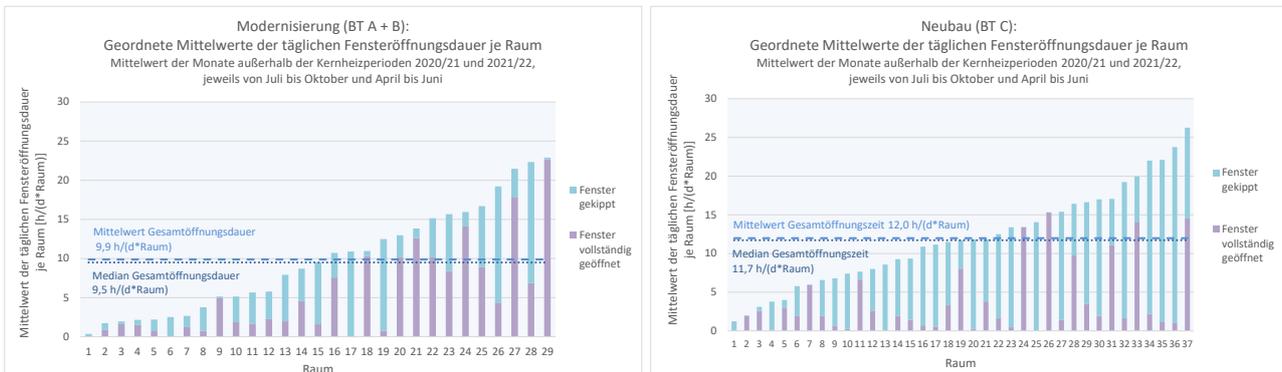
Insgesamt liegen die Raumlufffeuchten in beiden Gebäuden in einem komfortablen mittleren Bereich – auch im Winter.

### 5.3 Fensteröffnungen

Die Fensteröffnung in den Gebäuden wurde in 20 Wohnungen detailliert mit Fensterkontakten erfasst in 19 Wohnungen konnten die Ergebnisse ausgewertet werden (7 davon im Bestandsgebäude, 12 im Neubau). Die Auswertung der Ergebnisse wurde detailliert in einem separaten Bericht durchgeführt (siehe [Stein et al. 2023]). Deswegen werden an dieser Stelle nur die wichtigsten Daten zusammengefasst dargestellt.

Im Mittel über beide (Kern-)Heizperioden (jeweils von Anfang November bis Ende März) liegen die mittleren Öffnungszeiten sowohl in den modernisierten Wohnungen im Bestandsgebäude als auch im Neubau bei rund 5 Stunden je Tag und Raum, in den Monaten außerhalb der Heizperioden bei ca. 10 Stunden pro Tag und Raum im modernisierten Bestandsgebäude und bei 12 Stunden je Tag und Raum im Neubau (siehe Bild 46). Die Öffnungszeiten liegen damit höher als in anderen Messprojekten, allerdings ist beim PassivhausSozialPlus mit nennenswerten Messunsicherheiten durch die Funkübertragung zu rechnen.

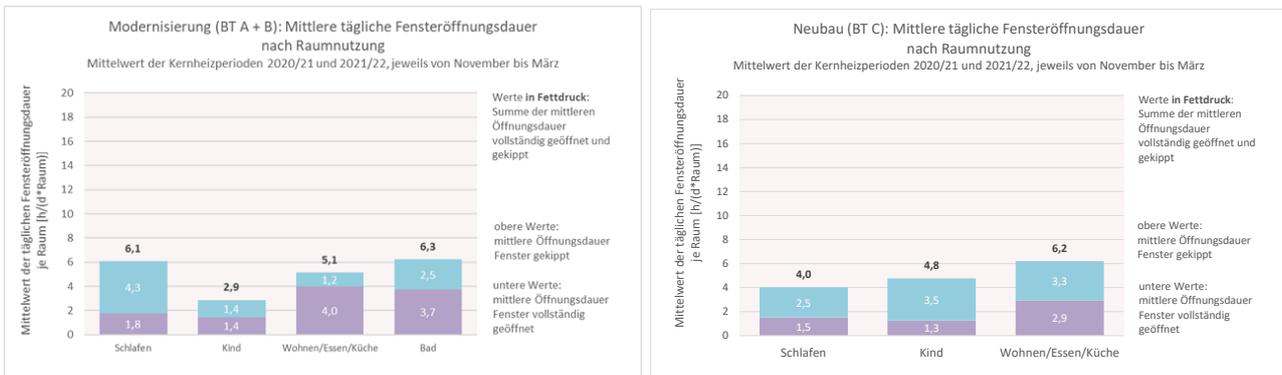
**Bild 46: Geordnete Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauer außerhalb der beiden betrachteten Kernheizperioden je Raum im Bestandsgebäude (Bauteile A und B) links und im Neubau rechts (Quelle: [Stein et al. 2023])**



Im Bestandsgebäuden wurden die Fenster im Mittel länger vollständig geöffnet als im Neubau (in den modernisierten Wohnungen im Mittel über beide Messjahre zu 55 %, im Neubau nur zu 33 %).

Die wohnungswesisen Betrachtungen zeigen eine hohe Spreizung und große Unterschiede bei den Fensteröffnungszeiten. Nach Raumnutzung betrachtet liegen die höchsten Öffnungszeiten in der Kernheizperiode über beide Messjahre in den meist im offenen Raumverbund vorliegenden Wohn-/Ess- und Küchenbereichen, in denen in der Regel mehr als ein Fenster pro Raum vorhanden ist, sowie in den Bädern der modernisierten Wohnungen vor (Bild 47). Sind in einem Raum mehrere Fenster vorhanden, wurden deren Öffnungszeiten addiert. Die niedrigsten Öffnungsdauern wurden in den Kinderzimmern der modernisierten Gebäude gemessen.

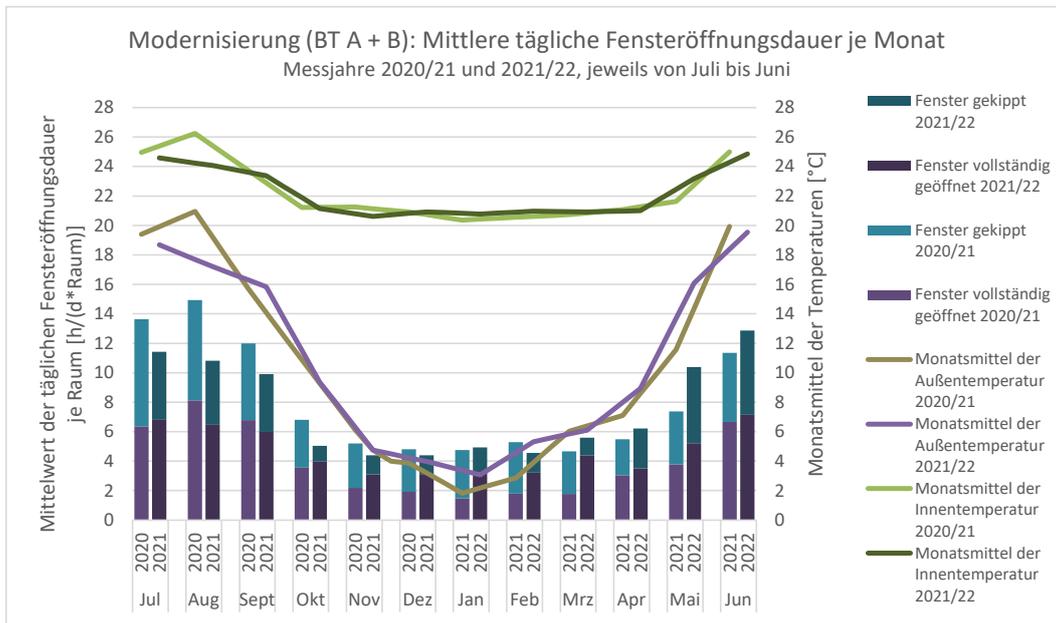
**Bild 47: Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauern nach Raumnutzungen in den beiden betrachteten Kernheizperioden in den modernisierten Gebäuden (Bauteile A und B, links) und im Neubau (Bauteil C, rechts) (Quelle: [Stein et al. 2023])**



Insbesondere in den modernisierten Gebäuden zeigen sich große Unterschiede bei der gesonderten Analyse von Tag- und Nachtlüfterwohnungen. Im Mittel über beide Messjahre lagen die mittleren Fensteröffnungszeiten der Nachtlüfterwohnungen in den modernisierten Wohnungen etwa dreimal so hoch wie in den Taglüfterwohnungen. Im Neubau lagen sie nur etwa 1,8-mal so hoch wie in den Taglüfterwohnungen.

Die Messergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Fensteröffnungsdauern und den Außenlufttemperaturen – je höher die Außenlufttemperatur, desto länger wurden die Fenster geöffnet (Bild 48).

**Bild 48: Monatliche Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauer je Raum in den modernisierten Gebäuden (Bauteile A und B) sowie Monatsmittel der Innen- und Außentemperaturen (Quelle: [Stein et al. 2023])**



Eine eindeutige Korrelation der wohnungsweisen Heizwärmeverbräuche mit den wohnungsweisen Fensteröffnungszeiten konnte hingegen nicht gefunden werden.

### 5.4 CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft

In allen 20 Wohnungen mit Detailmessungen wurden in Wohn- und Schlafzimmer (bei den Schlafzimmern ist jedoch nicht sichergestellt, dass diese von den Mietern auch als solches genutzt werden) zusätzlich CO<sub>2</sub>-Sensoren als Indikator für die Luftqualität installiert<sup>3</sup>. In den Wohnzimmern in der Regel in Verbindung mit einem Präsenzmelder.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft schwankt im Jahresverlauf, da im Sommer durch die Öffnung der Fenster der Luftaustausch höher ist und sich die Mieter häufiger im Freien aufhalten (Bestandsgebäude: 15 %, Neubau: 9 % weniger Aufenthalt in der Wohnung im Sommer im Vergleich zum Winter). Im Winterhalbjahr steigen im Mittel die Messwerte etwas an (Bild 49). Im Wohnzimmer (Bild 49 links) wurde im Gesamtzeitraum der niedrigste Mittelwert im August 2020 mit 549 ppm gemessen. Der Monat mit dem höchsten Mittelwert war der Januar 2022 mit 873 ppm. Der niedrigste Messwert schwankte zwischen 365 ppm im Februar 2020<sup>4</sup> und 579 ppm im Dezember 2020. Die Wohnung mit den höchsten CO<sub>2</sub>-Messwerten schwankte zwischen 655 ppm (August 2020) und 1.676 ppm (Januar 2022).

Im Schlafzimmer (Bild 49 rechts) lagen die Mittelwerte aller Wohnungen nur geringfügig höher als im Wohnzimmer. Im Jahresverlauf betrug die minimale mittlere Konzentration 590 ppm, der Mittelwert der mittleren Konzentration aller Wohnungen und der Maximalwert beliefen sich auf 765 bzw. 920 ppm. Die minimalen

<sup>3</sup> Die CO<sub>2</sub>-Sensoren besitzen einen Messbereich von 0 bis 2000 ppm, um bei üblichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei Wohnungen mit Lüftungsanlagen eine höhere Auflösung und Genauigkeit zu erreichen. In der Folge konnten die Sensoren bei sehr hohem CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Raumluft das Messbereichsende des Sensors erreichen, was zu Messwerten von 2000 ppm führt. Dieser Fall umfasst auf Basis von Stundenmittelwerten im gesamten Messzeitraum 0,89 % aller Messwerte.

<sup>4</sup> Diese Wohnung war zu diesem Zeitpunkt wohl noch nicht dauerhaft bezogen. Dass die Messwerte unter dem CO<sub>2</sub>-Gehalt in denen der Außenluft in urbanen Gegenden liegen (ca. 410 – 440 ppm), kann neben Messunsicherheiten (+/- 50 ppm) auch an der noch nicht vollständig abgeschlossenen Karbonatisierung des Betons [Nygaard, Leemann 2012] des Neubaus liegen.

Werte aller Wohnungen lagen auf vergleichbarem Niveau wie beim Wohnzimmer (Minimum: 376 ppm / Mittelwert: 465 ppm / Maximalwert: 582 ppm). Die höchsten jeweils gemessenen Werte über alle Schlafzimmer der im Detail vermessenen Wohnungen fallen in den Schlafzimmern aber höher aus als in den Wohnzimmern (Minimum: 829 ppm / Mittelwert: 1.251 ppm / Maximum: 1.774 ppm). In der Wohnung mit den höchsten Werten in Schlaf- und Wohnzimmer war zu diesem Zeitpunkt die Lüftungsanlage abgeschaltet bzw. ausgefallen.

Vergleicht man die Monatsmittelwerte mit der Kategorie II der Luftqualität nach DIN EN 16798-1, die für Neubauten anzulegen ist, so liegen alle Wohn- und Schlafräume im Mittel unter der zu erreichenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 950 ppm, d. h. eine hohe Luftqualität wird erreicht. Bei Betrachtung der Einzelwerte liegen 83,4 % unter dem Schwellwert.

**Bild 49: Mittelwert des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Wohn- (links) und Schlafzimmer (rechts) während der Messphase sowie minimale und maximale Monatsmittelwerte**

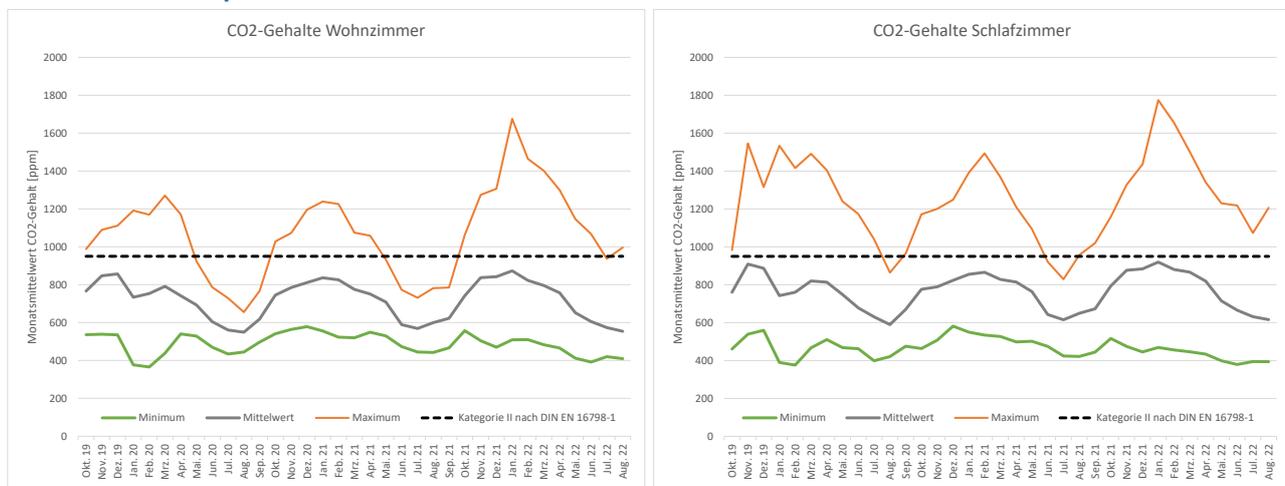
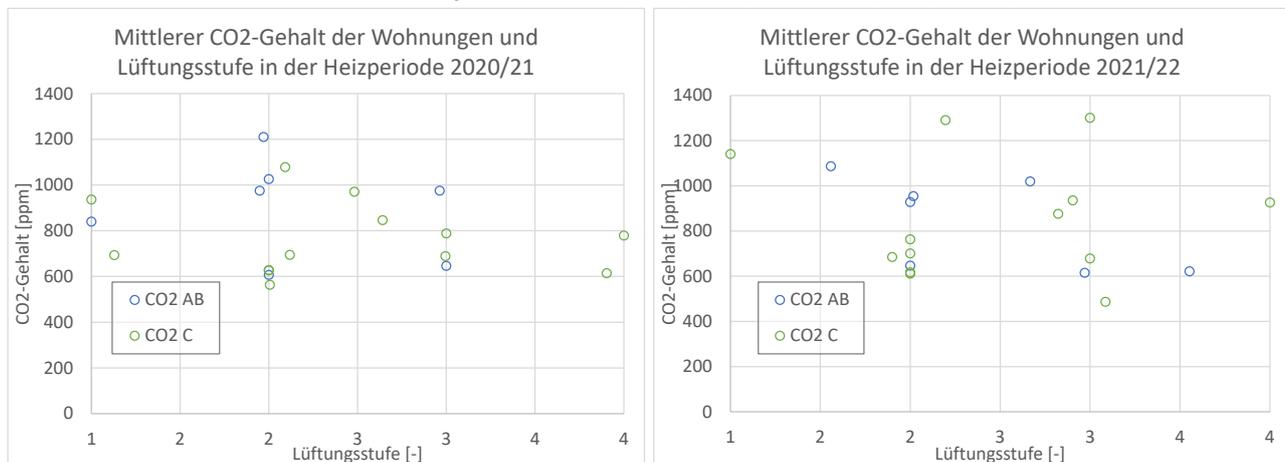


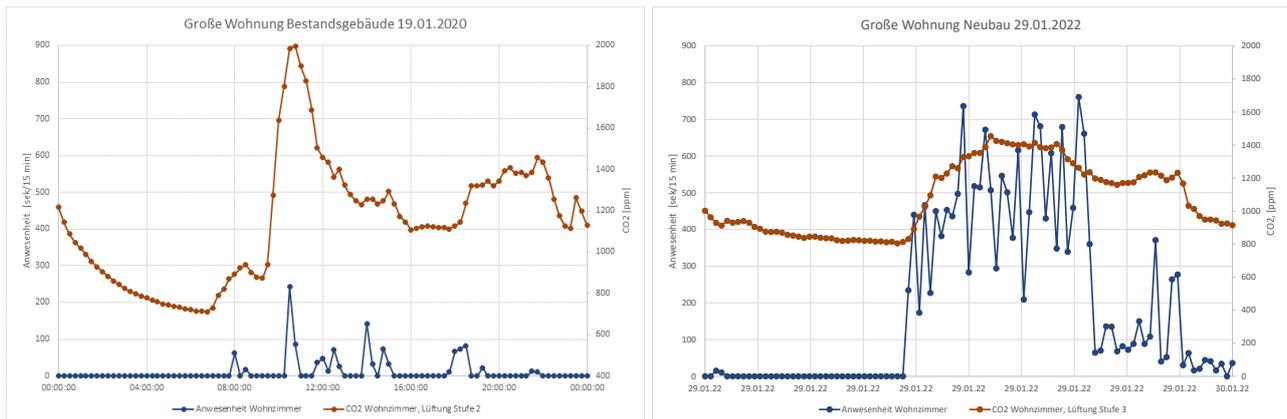
Bild 50 zeigt den Mittelwert des CO<sub>2</sub>-Gehalts der vermessenen Räume in der Heizperiode in Abhängigkeit der eingestellten Lüftungsstufe (siehe Kapitel 5.5). Bei Stufe 3 wird in allen Wohnungen der Auslegungsvolumenstrom erreicht. Beide Diagramme für 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts) lassen eine Abhängigkeit des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Raumluft von der Lüftungsstufe erkennen. Allerdings beeinflussen weitere Aspekte wie die Personenbelegung und das Lüftungsverhalten die CO<sub>2</sub>-Messwerte.

**Bild 50: Mittlerer CO<sub>2</sub>-Gehalt der Wohnungen in Abhängigkeit der eingestellten Lüftungsstufe; Mittelwerte für die Heizperioden 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts)**



Den Einfluss der Anwesenheit und der Lüftungsstufe auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration eines Wohnzimmers zeigt Bild 51. Das Bild zeigt links die CO<sub>2</sub>-Konzentration über den Tagesverlauf in einer Wohnung, in der die Lüftungsanlage auf Stufe 2 eingestellt ist (30 % unter Nennvolumenstrom), im rechten Teil des Bildes wird die Lüftungsanlage auf Auslegungsvolumenstrom betrieben. Links steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration trotz vergleichsweise kurzer Anwesenheiten stark an (die Anzahl der Personen ist nicht bekannt). In der rechten Abbildung ist eine Wohnung dargestellt, in der permanente Anwesenheiten ab der Mittagszeit erfasst wurde, die CO<sub>2</sub>-Konzentration aber nicht so stark anstieg.

**Bild 51: CO<sub>2</sub>-Verlauf im Wohnzimmer zweier großer Wohnungen über 1 Tag und Anwesenheit im Wohnzimmer**



Insgesamt wird in den Wohnungen eine gute bis sehr gute Luftqualität erreicht.

## 5.5 Betrieb der Lüftungsanlagen

Die Mieter besitzen zur Einstellung des Luftvolumenstroms in Ihren Wohnungen einen 4-Stufen-Schalter. Der Auslegungsvolumenstrom wird in Stufe 3 erreicht, in Stufe 2 wird die Spannung am Ventilator um 30 % abgesenkt, in Stufe 4 um 30 % angehoben. Bestandsgebäude und Neubau unterscheiden sich bei der Lüftung dadurch, dass im Bestandsgebäude keine Zuluftnachheizung stattfindet, da alle Räume mit Bestandsheizkörpern ausgestattet sind. Weiterhin gibt es hier kein elektrisches Frostschutz-Heizregister. Im Neubau erfolgt die Beheizung abgesehen von einem Heizkörper im Badezimmer ausschließlich über die Zuluft und zur Sicherstellung der Wärmeversorgung ist in jedem Lüftungsgerät ein elektrisches Frostschutzregister vorhanden.

Bild 52 zeigt die Heizperiodenmittelwerte der Lüftungsstufen im Bestandsgebäude sowie den Mittelwert für das gesamte Gebäude (rechts). Es gibt Wohnungen, in denen die Lüftung nahezu konstant betrieben wurden und solche, die die Lüftungsstufen im Laufe der Jahre reduziert haben. Nur in einer Wohnung wurde die Stufe 4 (+30 %) im Heizperiodenmittel eingestellt. Im Mittel über alle Wohnungen im Bestandsgebäude lag die Lüftung zwischen Stufe 2,5 und 2,2 d.h. ca. 15 bis 30 % unter dem Auslegungsvolumenstrom<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Die Nachkommastellen ergeben sich durch die unterschiedlichen zeitlichen Anteile der (ganzzahligen) Werte der Lüftungsstufen

**Bild 52: Heizperiodenmittelwerte der Lüftungsstufe im Bestandsgebäude**

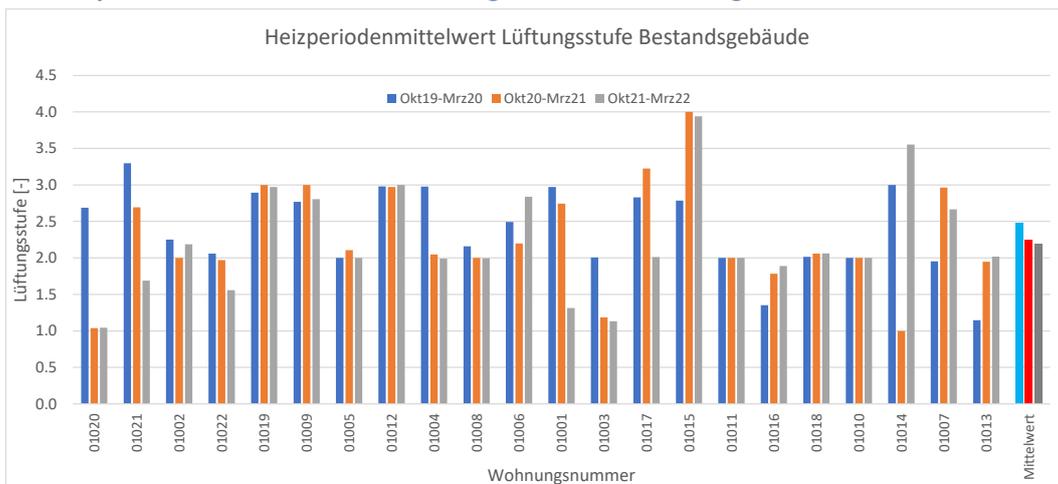
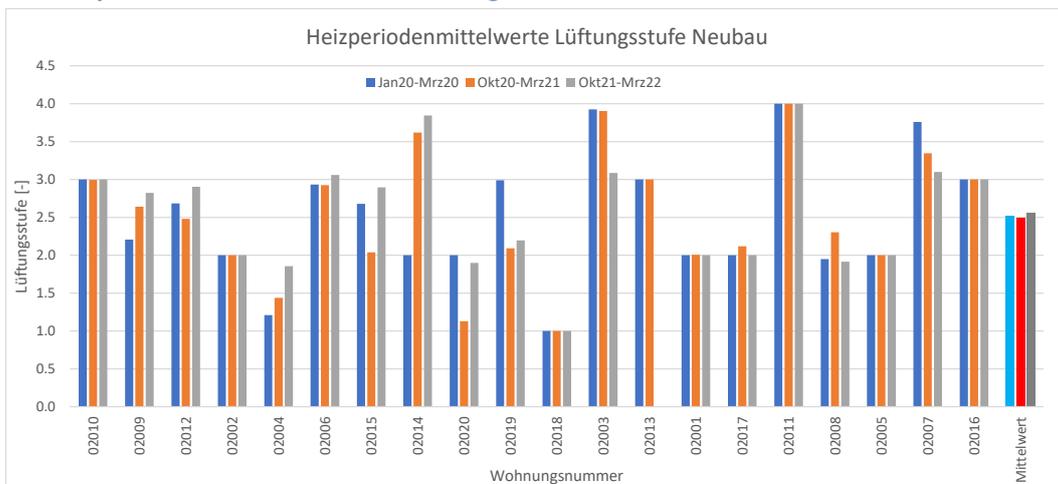


Bild 53 zeigt die Lüftungsstufen für den Neubau. Hier gibt es drei Wohnungen, bei denen die Lüftung auf Stufe 4 betrieben wurde und drei Wohnungen, bei denen die Lüftung niedriger als Stufe 2 eingestellt war. Im Mittel aller Wohnungen im Neubau wurde mit 2,5 ein geringfügig höherer Volumenstrom eingestellt, als im Bestandsgebäude.

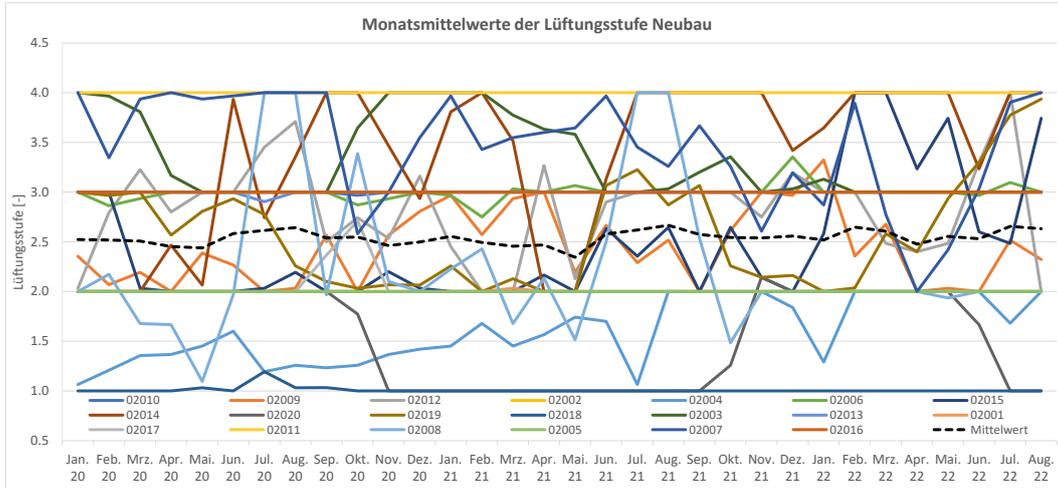
**Bild 53: Heizperiodenmittelwerte der Lüftungsstufe im Neubau**



Dass die Einstellung der Lüftungsanlagen von den meisten Mietern durchaus regelmäßig geändert wurde, zeigen die Verläufe der Monatsmittelwerte in Bild 54. Neben den Wohnungen, die ihre Einstellungen kaum verändern, wird in der Mehrzahl der Wohnungen die Lüftungsstufe häufig angepasst. Im Mittel aller

Wohnungen des Neubaus ergibt sich im Zeitverlauf nur eine geringfügige Variation bei der Lüftungsstufe (gestrichelte Linie), eine jahreszeitliche Abhängigkeit ist nicht zu erkennen.

**Bild 54: Monatlicher Verlauf der eingestellten Lüftungsstufe im Neubau**



Insgesamt zeigt sich, dass die individuelle Einstellmöglichkeit der Lüftungsanlage von den Mietern genutzt wird und der eingestellte Volumenstrom im Mittel leicht unter den (Auslegungs-)Planwerten liegt.

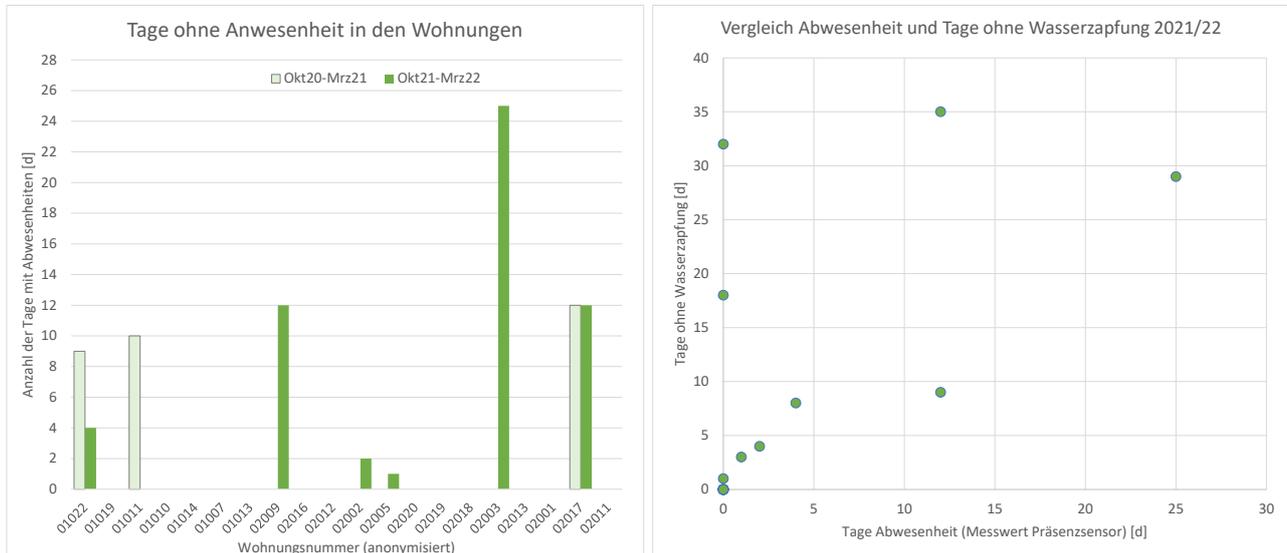
### 5.6 Nutzung der Wohnungen

Um Anhaltspunkte für die Nutzung der Wohnungen in der Heizperiode zu erhalten, wurden in den Wohnzimmern der detailliert vermessenen Wohnungen sowie in den Fluren bei großen Wohnungen mit Detailmessung Präsenzmelder installiert (als Kombisensoren mit Temperatur, Feuchte und Anwesenheit). Die Messwerte der Präsenzmelder wurde als Sekundenwerte mit Anwesenheit einer Person im 15 min-Messintervall erfasst und dann auf Stunden- bzw. Tagesmittelwerte umgerechnet. Ziel war es Information zu erhalten, ob Wohnungen in der Heizperiode ungewöhnlich lange nicht bewohnt/genutzt waren.

Bild 55 links zeigt die Auswertung dieser Daten als Anzahl an Tagen, in denen sich niemand in der Wohnung zwischen Anfang Oktober und Ende März aufgehalten hat (Anwesenheit kleiner 0,1 sek/h im Tagesmittel). Im Winter 2020/21 liegen die Werte dieses Parameters wahrscheinlich auch aufgrund des Lockdowns in der Pandemie sehr niedrig – nur in drei Wohnungen wurden Abwesenheiten zwischen 1 und 12 Tagen gemessen. Im Winterhalbjahr 2021/22 traten in 6 Wohnung Abwesenheiten über den gesamten Tag auf, die zwischen 2

und 25 Tagen liegen. Insgesamt scheint Abwesenheit der Bewohner jedoch kein Faktor zu sein, der den Energieverbrauch der Gebäude nennenswert beeinflussen würden.

**Bild 55:** Tage mit Abwesenheit von Personen in den Winterhalbjahren 2020/21 bzw. 2021/22 in den 20 Wohnungen mit Detailmessungen (links) und Vergleich der Messwerte aus dem Präsenzmelder und Tage mit Wasserzapfungen nahe null Liter (rechts)



Vergleicht man die Messwerte der Präsenzmelder mit den Trinkwasserverbräuchen in den entsprechenden Wohnungen (Bild 55 rechts, Annahme: bei Abwesenheit wird kein Trinkwasser gezapft), so zeigt sich, dass bei einigen Wohnungen die Werte recht gut übereinstimmen. Aber vor allem bei kleinen 1-Personen-Wohnungen mit niedrigem Wasserverbrauch gibt es immer wieder Tage, an denen der Wasserverbrauch (ohne Toilettenspülung, die nicht mit dem Trinkwasser erfasst wird) unterhalb der Auflösung der Wasserzähler (10 Liter) liegt. Die Präsenzmelder erlauben hier eine zuverlässigere Aussage über Zeiten mit längerer Abwesenheit der Bewohner.

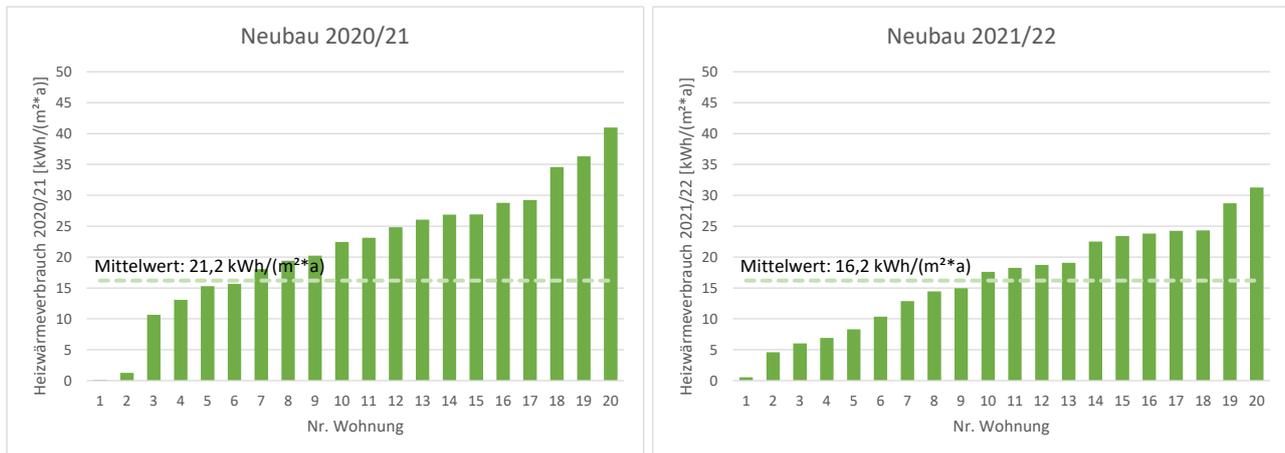
## 5.7 Heizung

Im Folgenden werden die Heizwärmeverbräuche in den einzelnen Wohnungen dargestellt und ausgewertet. In Kapitel 6.4 erfolgt dann die Betrachtung der Gesamtwärmeverbräuche der Gebäude. Aufgrund der unterschiedlichen Erfassung der Wärmeverbräuche in den Wohnungen, werden im Folgenden Neubau und Bestandsgebäude getrennt voneinander betrachtet.

### 5.7.1 Neubau

Für den Neubau sind in Bild 56 die aufsteigend sortierten wohnungsweise gemessenen Heizwärmeverbräuche dargestellt. In der Heizperiode 2020/21 (Bild 56 links) traten in zwei Wohnungen nahezu keine Heizwärmeverbräuche auf (siehe Erläuterungen dazu weiter unten), die Verbräuche der übrigen Wohnungen lagen zwischen 10 und 40 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Im Mittel ergab sich ein Heizwärmeverbrauchskennwert von 21,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Im Jahr 2021/22 (Bild 56 rechts) lagen die Verbräuche niedriger und der gemessene Kennwert für die einzelnen Wohnungen lag bei 16,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

**Bild 56: Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Neubau aufsteigend sortiert, 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts)**



Bei diesen Kennwerten muss beachtet werden, dass im Neubau die beheizte Wohnfläche bei ca. 1.582 m<sup>2</sup> liegt und die Energiebezugsfläche bei 1.768 m<sup>2</sup>, da ein Teil der Flure und Abstellräume innerhalb der beheizten Hüllfläche mit angerechnet werden. Dadurch liegt der Kennwert für das Gesamtgebäude (Kap. 6.1) niedriger als der Mittelwert der Wohnungen alleine.

### 5.7.2 Wohnungen mit auffälligen Heizwärmeverbräuchen

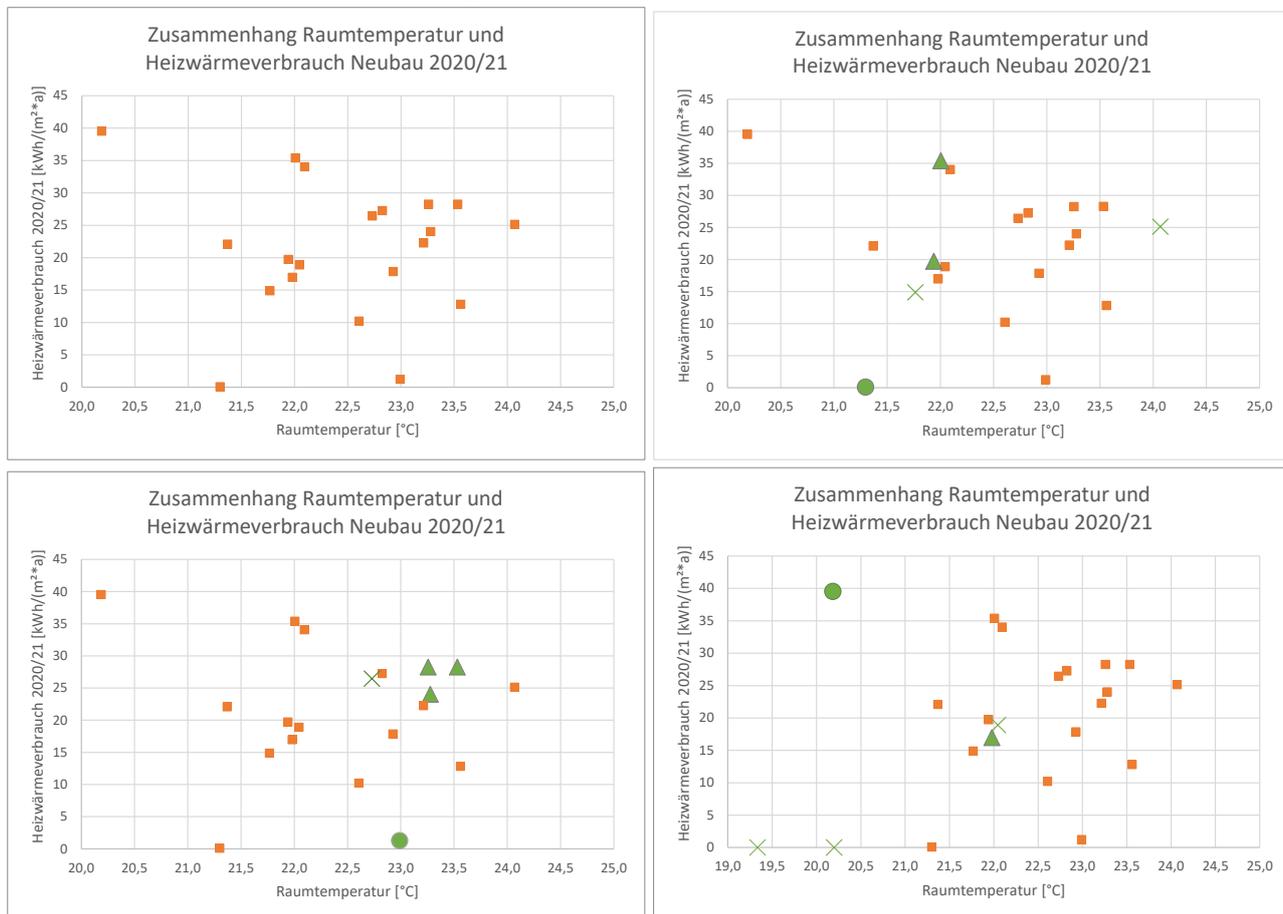
Einige Wohnungen fallen durch einen besonders hohen oder einen besonders niedrigen Heizwärmeverbrauch auf. Bild 57 oben links zeigt für den Neubau die Raumtemperatur und den Heizwärmeverbrauch der jeweiligen Wohnung. Dabei fallen drei Wohnungen auf: zwei Wohnungen mit keinem oder vernachlässigbarem Verbrauch und Raumtemperaturen von 21,3 bzw. 23,0 °C sowie eine Wohnung mit lediglich 20,2 °C aber 39,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Heizwärmeverbrauch. Für diese Wohnungen sind in Bild 57 oben rechts sowie unten die jeweilige Wohnung mit einem grünen Punkt markiert, die zugehörigen darüber bzw. darunter liegende Wohnung mit einem grünen Dreieck und die Nachbarwohnungen mit einem grünen Kreuz.

Bei der ersten Wohnungen ohne nennenswerten Verbrauch (Bild 57 oben rechts) sind alle Nachbarwohnungen wärmer, so dass von nennenswerten Wärmeströmen aus den betrachtete Nachbarwohnung ausgegangen werden kann und die Raumtemperatur von 21,3 °C ohne Heizung durchaus plausibel ist. Die zweite Wohnung mit fast keinem Heizenergieverbrauch (Bild 57 unten links) bei 23 °C Raumtemperatur ist von Nachbarwohnungen umgeben, die ein ähnliches Temperaturniveau aufweisen, so dass hier nur geringe

Wärmeströme vermutet werden können. Allerdings handelt es sich um eine Südwohnung, die bei entsprechender Nutzung mehr Solarenergiegewinne ermöglicht. Bei beiden Wohnungen mit minimalem Verbrauch besteht die Möglichkeit, dass die im Rahmen der halbjährlichen Wartung vorgenommene sommerliche Abschaltung der Heizkreise im Herbst 2020 nicht rückgängig gemacht wurde, da in beiden Wohnungen erst Mitte März 2022 innerhalb von 24 h nach über einem Jahr schlagartig wieder Verbräuche gemessen wurden. Dennoch lag durchgehend ein sehr komfortables Raumtemperaturniveau vor.

Die Wohnung mit niedrigen Temperaturen und dem höchsten Heizwärmeverbrauch (Bild 57 unten rechts) ist teilweise von Bereichen umgeben, die noch niedrigere Temperaturen aufweisen (nicht aktiv beheizte Räume) und die Wohnung damit Wärme an die Nachbarbereiche abgibt, teilweise grenzt sie an Wohnungen mit höheren Temperaturen. Für diese Wohnung liegen keine Messdaten zur Fensteröffnung vor, es besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Heizwärmeverbräuche durch individuelle Fensterlüftung verursacht werden.

**Bild 57:** Raumtemperatur und Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Neubau 2020/21 mit auffälligen „Ausreißer“-Wohnungen (Punkt) sowie zugehörige Nachbarwohnungen (Kreuz: links/rechts; Dreieck: oben/unten): alle Wohnungen (oben links), kein Verbrauch und niedrige Temperatur (oben rechts), kein Verbrauch und hohe Temperatur (unten links) sowie hoher Verbrauch und niedrige Temperatur (unten rechts)



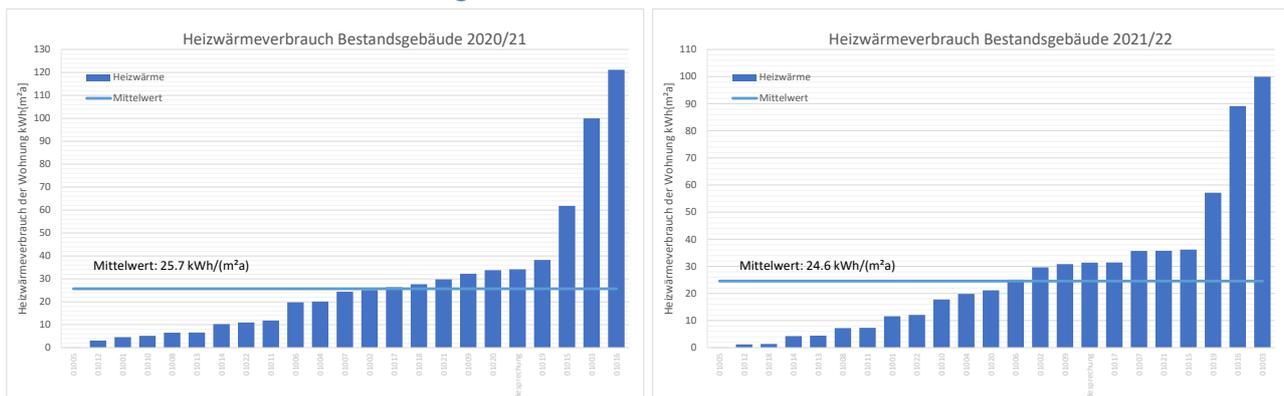
### 5.7.3 Bestandsgebäude

Im Bestandsgebäude sind die Heizkörper an die bestehenden alten Steigstränge angeschlossen, so dass eine direkte wohnungsweise Erfassung der Heizwärmeverbräuche nicht möglich war. Um den Verbrauch der einzelnen Wohnungen dennoch abschätzen zu können, wurden alle Heizkörper mit elektronischen Heizkostenverteiltern ausgestattet und die eingespeiste Wärme in den vier Heizkreisen damit verrechnet. Außerdem

musste teilweise der Heizwärmeverbrauch durch Badheizkörper, die an die Stränge der Frischwasserstationen angeschlossen waren, aus den ebenfalls erfassten Warmwasservolumina abgeschätzt werden<sup>6</sup>. Dadurch unterliegt die Aufteilung der Heizwärme auf die Wohnungen im Bestandsgebäude einer größeren Unsicherheit als im Neubau. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Verluste der Heizungsverteilung im Heizwärmeverbrauch enthalten sind, da die eingespeiste Gesamtwärme im Heizungsraum gemessen wird. Aus dem PHPP ergeben sich Verteilverluste von 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bei tatsächlicher Nutzung im Jahr 2021/22, die von den dargestellten Verbräuchen noch abgezogen werden können.

Bild 58 zeigt die Heizwärmeverbräuche für das Bestandsgebäude für die Jahre 2020/21 und 2021/22. Darin enthalten ist auch der Gemeinschaftsraum im Keller, der ebenfalls beheizt werden kann. In beiden Jahren wurde in manchen Wohnungen kaum geheizt, in anderen ergeben sich Heizwärmeverbräuche von über 90 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Die Mittelwerte lagen mit 25,7 bzw. 24,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) inklusive Verteilverluste aber jeweils sehr niedrig. Zu beachten ist hier, dass bei der Auswertung jeweils die beheizte Fläche der Wohnungen als Bezugsfläche für den Energieverbrauchskennwert verwendet wurde, die in Summe etwas kleiner ist als die Energiebezugsfläche nach PHPP. Dort wird die Grundfläche der Treppenhäuser (innerhalb der thermischen Hülle) mitberücksichtigt. Somit liegen die Mittelwerte, die wohnungsweise berechnet wurden, leicht über dem Mittelwert für das Gesamtgebäude (siehe Kapitel 6.4).

**Bild 58: Heizwärmeverbrauch (inklusive Verteilverluste Heizung) der Wohnungen im Bestandsgebäude und wohnflächengewichteter Mittelwert: 2020/21 links, 2021/22 rechts**



Der Besprechungsraum wurde während der Pandemie wenig genutzt, allerdings wurde die Raumtemperatur nach der Nutzung teilweise nicht wieder abgesenkt, so dass der ungenutzte Raum über Wochen auf 25 °C temperiert war und Verbräuche von über 30 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angefallen sind.

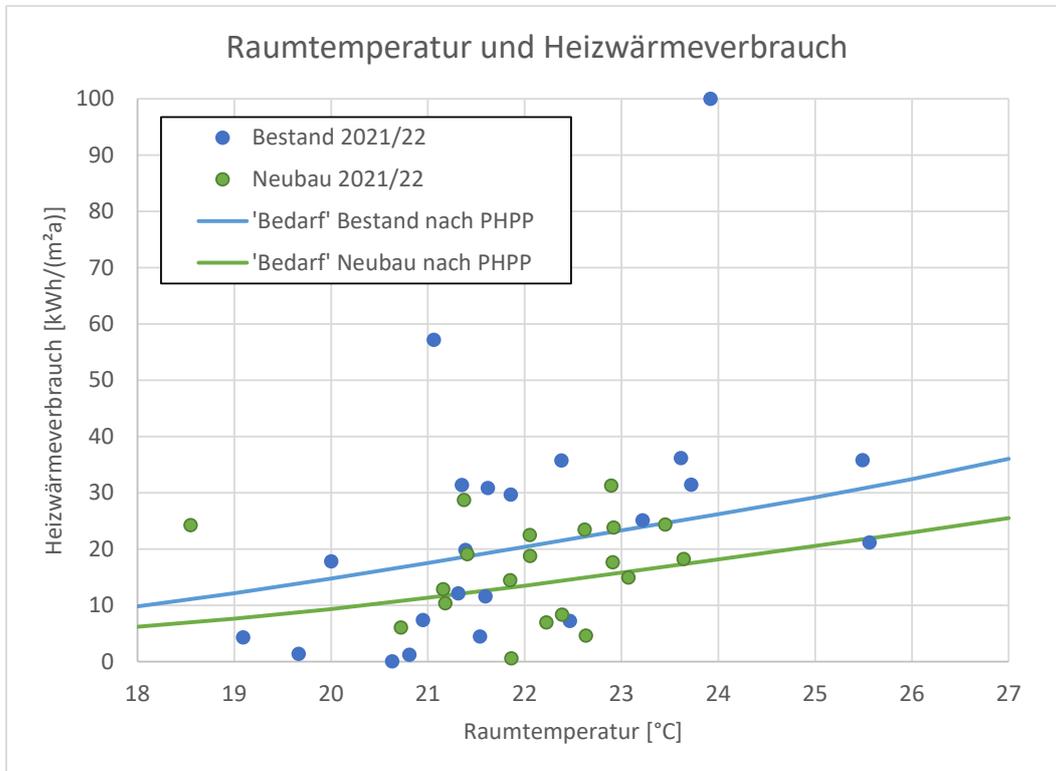
### 5.7.4 Einordnung der gemessenen Verbräuche

Betrachtet man den Zusammenhang von Raumtemperatur und spezifischem Heizwärmeverbrauch in der Wohnung, ohne dass weitere Einflussfaktoren wie Lage im Gebäude und mögliche solare Gewinne berücksichtigt werden, ergibt sich der in Bild 59 dargestellte Zusammenhang (blau: Bestandsgebäude, grün: Neubau) für das Auswertejahr 2021/22. Als durchgezogene Linie ist für das Wetter in diesem Jahr der „nominelle“, d.h mit PHPP bilanzierte, Heizwärmebedarfskennwert des gesamten Gebäudes in Abhängigkeit der Raumtemperatur dargestellt. Es fallen Wohnungen mit niedrigen Temperaturen und deutlich erhöhten Heizwärmeverbräuchen auf, aber auch Wohnungen, deren Heizwärmeverbrauch unter dem nominellen Bedarfswert liegt. Bei den extremen Ausreißern ist eine starke Fensterlüftung zu vermuten. Liegt eine Wohnung deutlich unter der Linie der Bedarfswerte, so können Wärmeströme aus Nachbarwohnungen vorliegen.

<sup>6</sup> Die Abweichung liegt bei ca. 5 % des Heizwärmeverbrauchs.

Insgesamt ergibt sich mit Ausnahme von 2 Ausreißern beim Bestandsgebäude aber nur eine mäßige Abweichung von den Bedarfswerten.

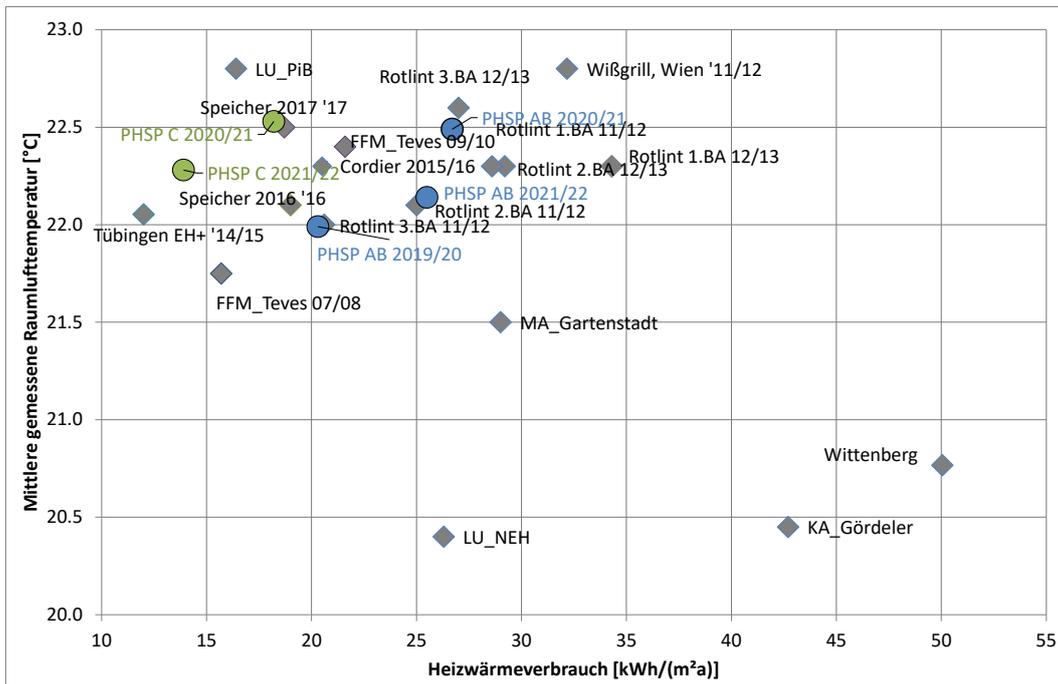
**Bild 59:** Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Bestandsgebäude und Raumtemperatur in der Heizperiode für die Jahre 2020/21 und 2021/22



Um die gemessenen Raumtemperaturen und die gemessenen Heizwärmeverbräuchen einzuordnen, wurden die Messdaten mit Daten aus anderen energieeffizienten Gebäuden mit einem detaillierten energetischen Monitoring vergleichend grafisch dargestellt. Bild 60 zeigt von 13 anderen Mehrfamilienhäusern und dem PassivhausSozialPlus (PHSP) die gemessene Raumtemperatur über dem gemessenen Heizwärmeverbrauch aufgetragen (teilweise mehrere Messjahre). Bei einem Teil der Projekte werden die Heizkosten nach Verbrauch abgerechnet, bei einem anderen Teil werden diese pauschal, wie im PHSP nach Wohnfläche berücksichtigt. Die Definitionen der Wohnflächen können sich im Detail unterscheiden.

Grundsätzlich handelt es sich um sehr energieeffiziente Gebäude, da die Heizwärmeverbräuche unter 35 kWh/(m²\*a) liegen. Die Raumtemperaturen liegen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, zwischen 21,5 und 22,8 °C im Mittel. Die farbig markierten Messpunkte des PHSP liegen im unteren Bereich der Heizwärmeverbräuche und im mittleren Bereich bei den Raumtemperaturen, so dass aus diesem Vergleich kein Einfluss der pauschalen Heizkostenabrechnung auf die Höhe der Verbräuche abgeleitet werden kann.

**Bild 60: Auswertung unterschiedlicher energieeffizienter Gebäude: gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs**



## 5.8 Trinkwasserverbräuche

Trinkwasser wird in den Wohnungen als Kaltwasser und Warmwasser getrennt gemessen, wobei die Kaltwasserverbräuche den gesamten Trinkwasserverbrauch kalt und warm umfassen, nicht jedoch den Wasserverbrauch für die Toilettennutzung.

### 5.8.1 Trinkwasserverbräuche

Der gesamte abgerechnete Trinkwasserverbrauch in den Wohnungen (Trinkwasser kalt inklusive Volumina für Warmwasserbereitung) lag im Bestandsgebäude in den ersten beiden Auswertejahren bei ca. 1.600 m³/a und ist im Zeitraum Juli 2021 bis Juni 2022 auf 1.700 m³/a angestiegen (Tab. 15). Im Neubau ergab sich ein gegenläufiger Trend: hier sind vom ersten vollständigen Messjahr 2020/21 die Verbräuche von 1.200 auf 1.076 m³/a gesunken. Betrachtet man die flächenbezogenen Kennwerte, so liegen die Verbräuche zwischen 669 l/(m²\*a) (Neubau 2021/22) und 1.015 l/(m²\*a) (Bestand 2021/22). Aussagekräftiger sind aufgrund der unterschiedlichen Belegungsdichten jedoch die personenbezogenen Kennwerte. Diese liegen zwischen 16,8 m³/(Person\*a) (Neubau 2021/22) und 21,6 m³/(Person\*a) (Bestand 2021/22). Für das Gesamtprojekt ergeben sich ca. 19,5 m³/(Person\*a). Bei den Werten ist zu berücksichtigen, dass hier die Kennwertbildung auf Basis der Gesamtverbräuche und der Summe der Flächen bzw. Personen erfolgte. Diese Mittelwerte unterscheiden sich von den im Folgenden dargestellten wohnungsweise berechneten Mittelwerten, da einzelne Ausreißer bei einer wohnungsbezogenen Betrachtung stärker gewichtet werden.

Der Trinkwasserverbrauch lag in Deutschland im Jahr 2020 bei 129 l/(Person\*d), 2021 bei 127 l/(Person\*d) [BDEW 2022a]. Das entspricht einem Jahreswert von 47,2 m³/(Person\*a) 2020 und 46,4 m³/(Person\*a) 2021. Davon werden laut [BDEW 2022b] 27 % für die Toilettenspülung und 9 % für Kleingewerbe verwendet. Rechnet man diese beiden Größen aus dem Jahreswert heraus, so ergeben sich Vergleichswerte (ohne Toilettenspülung) von 30,2 bzw. 29,7 m³/(Person\*a). Stellt man diesen Mittelwert den Verbräuchen im PassivhausSozialPlus gegenüber, so liegen die gemessenen Verbräuche um 35 % unter dem umgerechneten Vergleichswert. Der gesamte Trinkwasserverbrauch der Gebäude inklusive Toilettenspülung wird in Kapitel 6.6 dargestellt.

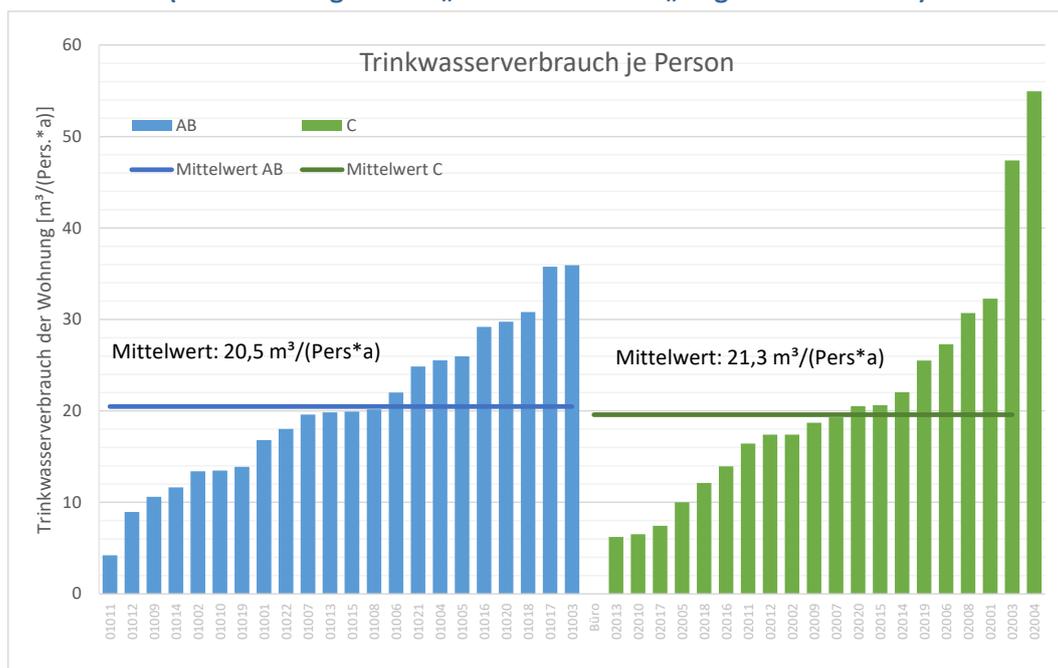
**Tab. 15: Messwerte des Trinkwasserverbrauchs in den Wohnungen für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte) sowie flächen- und personenbezogene Kennwerte**

	Okt 2019 – Sept 2020*			Juli 2020 – Juni 2021			Juli 2021 – Juni 2022		
	Jahres-summe [m³/a]	Kennwerte [l/(m²*a)]   [m³/(P*a)]		Jahres-summe [m³/a]	Kennwerte [l/(m²*a)]   [m³/(P*a)]		Jahres-summe [m³/a]	Kennwerte [l/(m²*a)]   [m³/(P*a)]	
Bestandsgebäude	1.600	951	20,3	1.607	955	20,3	1.706	1.015	21,6
Neubau	829	515	12,9	1.201	746	18,8	1.076	669	16,8
Gesamtprojekt	2.429	738	17,0	2.808	853	19,6	2.782	845	19,5

\* Neubau erst ab Jan 2020

Bild 61 zeigt die aufsteigend sortierten Trinkwasserverbräuche pro Wohnung und Person sowie den Mittelwert getrennt für Bestandsgebäude und Neubau (nur Wohnungen, ohne Büro). Die Mittelwerte<sup>7</sup> liegen mit 20,5 bzw. 21,3 m³/(Person\*a) bei beiden Gebäuden in einer ähnlichen Höhe, es ergibt sich aber eine starke Streuung zwischen den Wohnungen. Beim Bestandsgebäude wurden 2020/21 4,2 m³/(Person\*a) als geringster und 35,9 m³/(Person\*a) als höchster Verbrauchswert gemessen. Beim Neubau lag der niedrigste Wert bei 6,2 m³/(Person\*a) und der höchste Wert bei 54,9 m³/(Person\*a). Für beide Gebäude ergibt sich ein Verhältnis zwischen größtem und kleinsten Verbrauchswert von ca. 8,5.

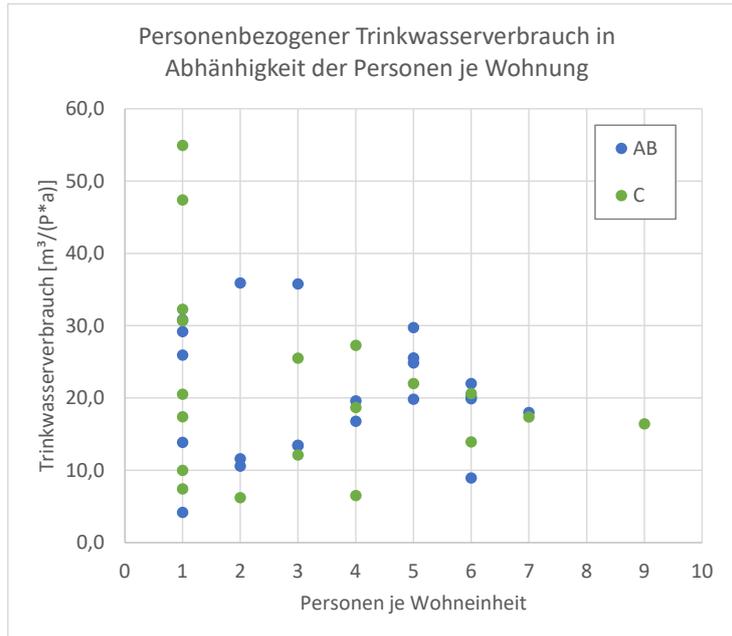
**Bild 61: Aufsteigend sortierte Trinkwasserverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt sortiert)**



Betrachtet man, in welchen Wohnungsarten die Kennwerte auftreten, so ist die Streuung bei 1-Personen-Wohnungen am Höchsten (Bild 62). Mit zunehmender Anzahl an Personen je Wohnung sinkt der personenbezogene Verbrauchswert und die Streuung zwischen den Wohnungen gleicher Personenbelegung.

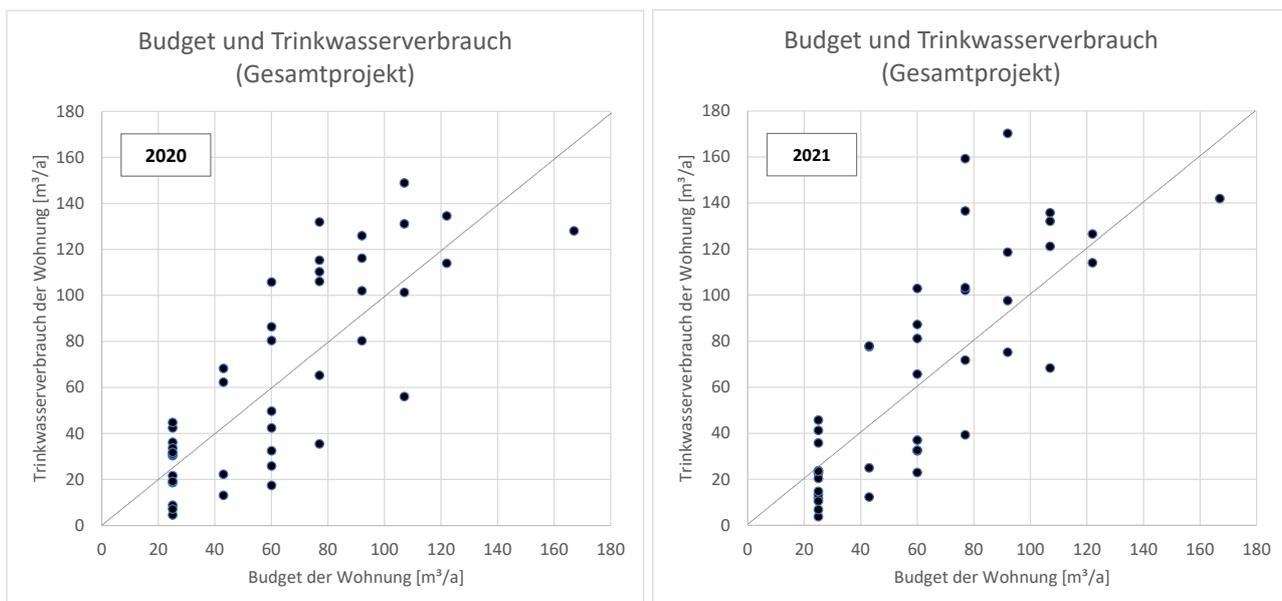
<sup>7</sup> Die Mittelwerte im Diagramm unterscheiden sich von den Mittelwerten in Tab. 15, da in Bild 61 über die Wohnungen gemittelt wurde, in der Tabelle über die Anzahl der Personen

**Bild 62: Personenbezogener Trinkwasserverbrauch gesamt in Abhängigkeit der Anzahl der Personen der Wohnung**



Abhängig von der Personenanzahl in der Wohnung wurden die Budgets für Trinkwasser festgelegt. Bild 63 zeigt für die Jahre 2020 (links) und 2021 (rechts) die Höhe der Budgets sowie den gemessenen Trinkwasserverbrauch je Wohnung in m³/a. Liegt ein Punkt unter der eingezeichneten Diagonalen, so wurde in der Wohnung weniger verbraucht, als im Budget vorgesehen. Liegt der Punkt darüber, überschritten die Mieter ihr Budget. Auch hier zeigt sich eine große Streuung der Messwerte um die Diagonale herum. Neben deutlichen Überschreitungen treten auch Unterschreitungen auf. Im Mittel aller Wohnungen wird im Jahr 2020 das Gesamtbudget aller Wohnungen um 3 % überschritten, im Jahr 2021 liegt die Überschreitung bei 8 %.

**Bild 63: Trinkwasserbudget und Trinkwasserverbrauch für das Gesamtprojekt für die Jahre 2020 und 2021**



Insgesamt liegen die Trinkwasserverbräuche sehr niedrig und die Budgets waren im Mittel aller Wohnungen auskömmlich für die Mieter.

## 5.8.2 Warmwasserverbräuche

Warmwasser wird in den Wohnungen direkt mit Frischwasser- bzw. Wohnungsstationen erwärmt. Die im folgenden genannten Volumina sind in den in Kapitel 5.8.1 genannten (Gesamt-)Wasserverbräuchen bereits enthalten.

Die Gesamtverbräuche für Warmwasser in den Wohnungen lagen für beide Gebäude zusammen bei ca. 1.430 m<sup>3</sup>/a. In Tab. 16 sind außerdem die flächen- und personenbezogenen Daten dargestellt (zu den Abweichungen zwischen Mittelwerten für das Gesamtgebäude und solchen, die aus Wohnungswerten berechnet werden, siehe die Anmerkung am Ende des ersten Absatzes von Kapitel 5.8.1).

**Tab. 16: Messwerte des Warmwasserverbrauchs für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte) sowie flächen- und personenbezogene Kennwerte**

	Okt 2019 – Sept 2020*			Juli 2020 – Juni 2021			Juli 2021 – Juni 2022		
	Jahres- summe [m <sup>3</sup> /a]	Kennwerte [l/(m <sup>2</sup> *a)]   [m <sup>3</sup> /(P*a)]		Jahres- summe [m <sup>3</sup> /a]	Kennwerte [l/(m <sup>2</sup> *a)]   [m <sup>3</sup> /(P*a)]		Jahres- summe [m <sup>3</sup> /a]	Kennwerte [l/(m <sup>2</sup> *a)]   [m <sup>3</sup> /(P*a)]	
Bestandsgebäude	806	480	10,2	877	521	11,1	938	558	11,9
Neubau	374	232	5,8	551	342	8,6	500	311	7,8
Gesamtprojekt	1.180	359	8,2	1.428	434	9,9	1.438	437	10,0

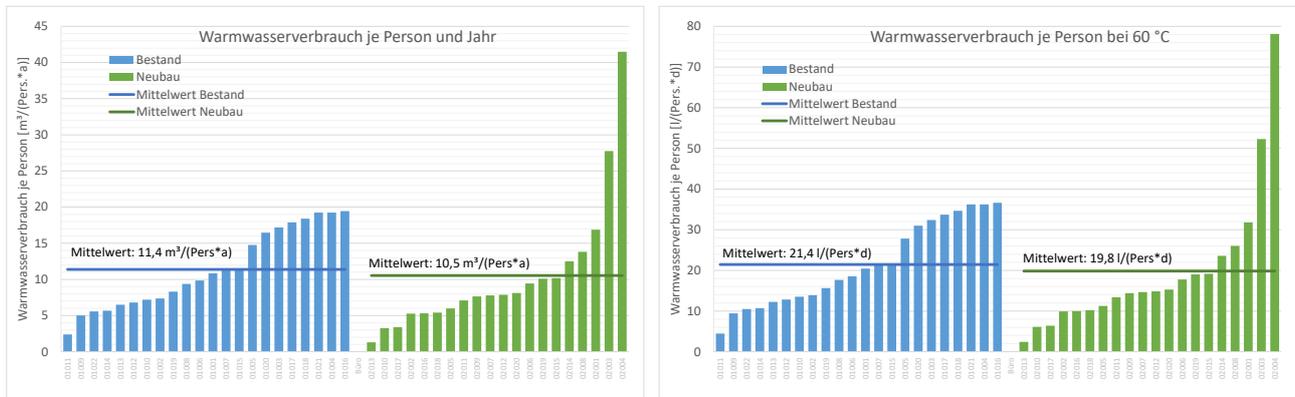
\* Neubau erst ab Jan 2020

Bild 64 links zeigt die aufsteigend sortierten Warmwasserverbräuche der einzelnen Wohnungen als Kennwerte pro Person für den Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021. Die gemessenen Verbräuche liegen beim Bestandsgebäude zwischen 2,1 und 19,5 m<sup>3</sup>/(Person\*a), der Mittelwert liegt bei 11,4 m<sup>3</sup>/(Person\*a). Beim Neubau wurden Verbräuche zwischen 1,3 und 41,5 m<sup>3</sup>/(Person\*a) gemessen, im Mittel 10,5 m<sup>3</sup>/(Person\*a).

Der Pauschalwert für den mittleren Warmwasserverbrauch nach [PHPP 2017] und somit gleichzeitig der Planungswert beim PassivhausSozialPlus liegt bei 25 l/Person\*d bei 60 °C Zapftemperatur. Rechnet man die oben genannten, gemessenen Jahreswerte auf Tagesverbräuche bei 60 °C um<sup>8</sup>, so ergibt sich die Verteilung in Bild 64 rechts. Beim Bestandsgebäude liegen die Verbräuche dann zwischen 4,5 und 36,6 l/(Person\*d) und der Mittelwert bei 21,4 l/(Person\*d). Beim Neubau ist die Streuung deutlich größer und die Kennwerte liegen zwischen 2,4 und 78,1 l/(Person\*d), im Mittel ergeben sich 19,8 l/(Person\*d). Somit liegen die Warmwasserverbräuche 15 % (Bestandsgebäude) bzw. 20 % (Neubau) unter dem Pauschalwert der PHPP-Bilanzierung. Ob die höheren Verbräuche im Bestandsgebäude mit den dort vorhandenen Badewannen zusammenhängen, kann nur vermutet werden (Neubau besitzt nur Duschen).

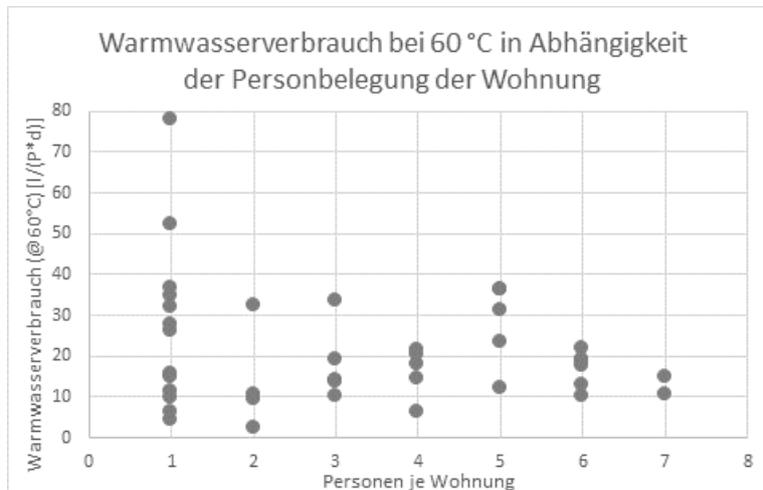
<sup>8</sup> Die Zapftemperatur ist auf einen Bereich zwischen 42 und 45 °C eingestellt. Für die Umrechnung wurden 45 °C Zapftemperatur und 12 °C Kaltwassertemperatur angesetzt.

**Bild 64:** Aufsteigend sortierte Warmwasserverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude AB und Neubau C getrennt sortiert), links: Jahreswerte pro Person, rechts: Tageswerte auf 60 °C Zapftemperatur umgerechnet



In Bild 65 ist der auf eine Zapftemperatur von 60 °C umgerechnete personenbezogene Warmwasserverbrauch in Abhängigkeit der Personenbelegung der Wohnung dargestellt. Bei 1-Personen-Wohnungen gibt es eine sehr starke Streuung zwischen 4,5 und 80 l/(Person\*d). Bei Wohnungen mit mehreren Personen reduziert sich die Streuung der Verbrauchswerte für identische Personenbelegungen deutlich. Im Mittel werden 20,7 l bei 60 °C bzw. 27,4 l pro Person und Tag bei Zapftemperatur verbraucht (über die Wohnungen gemittelte Werte).

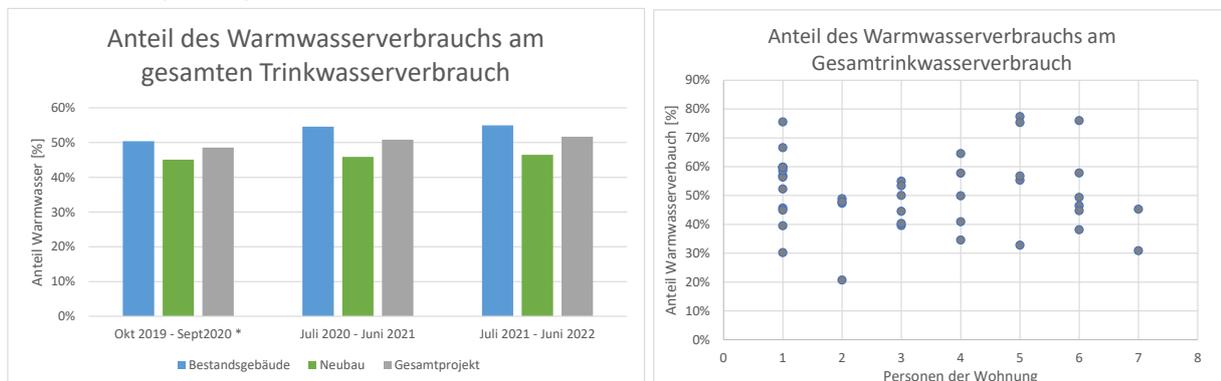
**Bild 65:** Warmwasserverbrauch je Person umgerechnet auf 60 °C Zapftemperatur in Abhängigkeit der Personenbelegung in der Wohnung



Warmwasser hatte 2019/20 einen Anteil am gesamten Trinkwasserverbrauch in den Wohnungen von 50 % beim Bestandsgebäude (Bild 66 links). Dieser Anteil ist in den Folgejahren auf 55 % gestiegen. Beim Neubau liegt der Warmwasseranteil konstant bei 46 %. Je nach Personenbelegungen in den Wohnungen (Bild 66 rechts) zeigt sich ebenfalls eine große Streuung beim Anteil des Warmwasserverbrauchs. Dieser reicht von ca. 30 % bis fast 80 %. Absolut liegt der Warmwasserverbrauch z. B. 2021/22 zwischen 21,4 (Neubau) und 32,6 l/(Person\*d) (Bestand).

Im Vergleich dazu wird in [Statista 2016] für das Jahr 2015 ein Warmwasseranteil von 28,7 % am Gesamtwasserverbrauch in vergleichbar großen Mehrfamilienhäusern genannt. Bei einem pro Kopf-Verbrauch von 129 l/(Person\*d) entspricht dies 37,0 l/(Person\*d) für Warmwasser, so dass die absolute Höhe des Warmwasserverbrauchs im PHSP als niedrig einzustufen ist, obwohl durch die pauschale Abrechnung der Wärme kein Anreiz besteht vermehrt Kaltwasser einzusetzen.

**Bild 66:** Anteil des Warmwassers am gesamten Trinkwasserverbrauch in den Wohnungen als Mittelwerte für das gesamte Gebäude (links) und je nach Personenbelegung in der Wohnung (rechts)



## 5.9 Haushaltsstrom

Der Haushaltsstromverbrauch der Wohnungen lag im zweiten und dritten Messjahr in Summe bei etwa 80.000 kWh/a (siehe Tab. 17). In der ersten Heizperiode war der Neubau erst ab Januar 2020 und ab dann auch nur teilweise vermietet, weshalb diese Kennwerte noch kein belastbares Bild liefern. Im Bestandsgebäude ist der Verbrauch von 21,8 auf 24,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) leicht angestiegen, im Neubau dagegen von 25,5 auf 24,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) gesunken.

**Tab. 17:** Messwerte des Haushaltsstromverbrauchs für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte sowie flächenbezogene Kennwerte), Flächenbezug mit beheizter Fläche der Wohnungen

	Okt 2019 – Sept 2020 *		Juli 2020 – Juni 2021		Juli 2021 – Juni 2022	
	Jahressumme [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	Jahressumme [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	Jahressumme [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
Bestandsgebäude	36.624	21,8	39.050	23,2	41.061	24,4
Neubau	25.982	16,1	40.979	25,5	38.755	24,1
Gesamtprojekt	62.606	19,0	80.029	24,3	79.817	24,3

\* Neubau erst ab Jan 2020

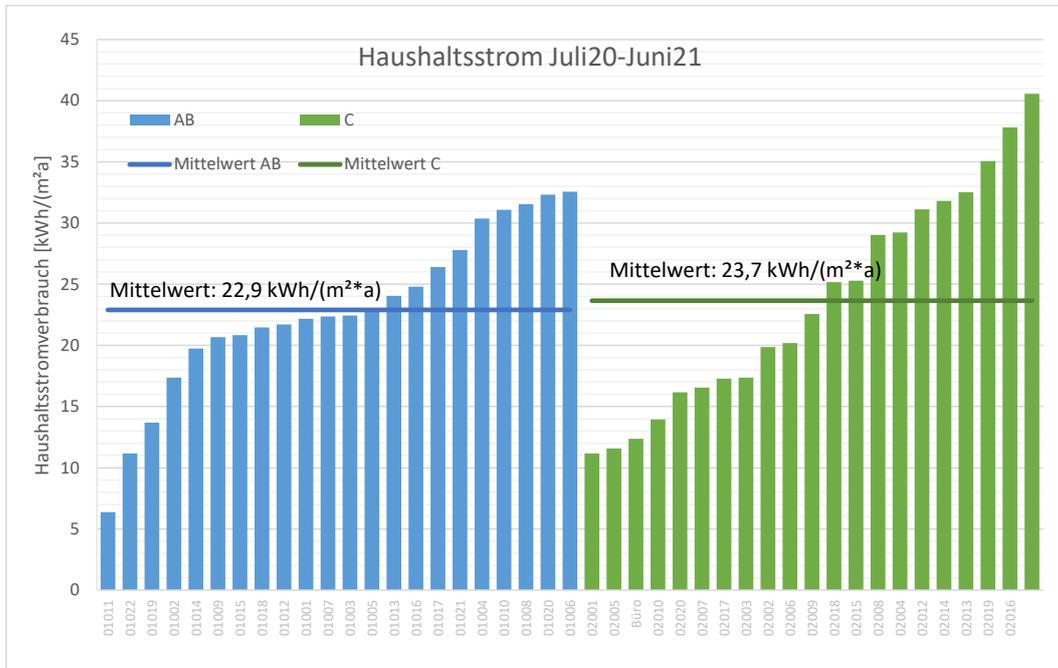
Bild 67 zeigt die aufsteigend sortierten Kennwerte<sup>9</sup> für den Haushaltsstromverbrauch 2020/21. Die Spanne der Einzelkennwerte liegt zwischen 6,4 und 40,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

Ordnet man die Haushaltsstromverbräuche der einzelnen Wohnungen in die Effizienzklassen des [Stromspiegel 2022] ein, so zeigt sich, dass im Bestandsgebäude 32 % der Wohnungen in die Klasse A einzuordnen sind, 36 % in die Klasse B und 32 % in die Klasse C (siehe Bild 68). Wohnungen mit höherem Verbrauch (Klassen D bis G) traten nicht auf. Somit sind die Haushalte des Bestandsgebäudes als sparsam bis sehr sparsam einzuordnen. Beim Neubau liegen insgesamt 70 % der Wohnungen in den Klassen A bis C, hier sind aber jeweils 10 % bzw. 2 Wohnungen in die Klassen D, E und F einzuordnen. Die Klasse G wird auch im Neubau von keiner

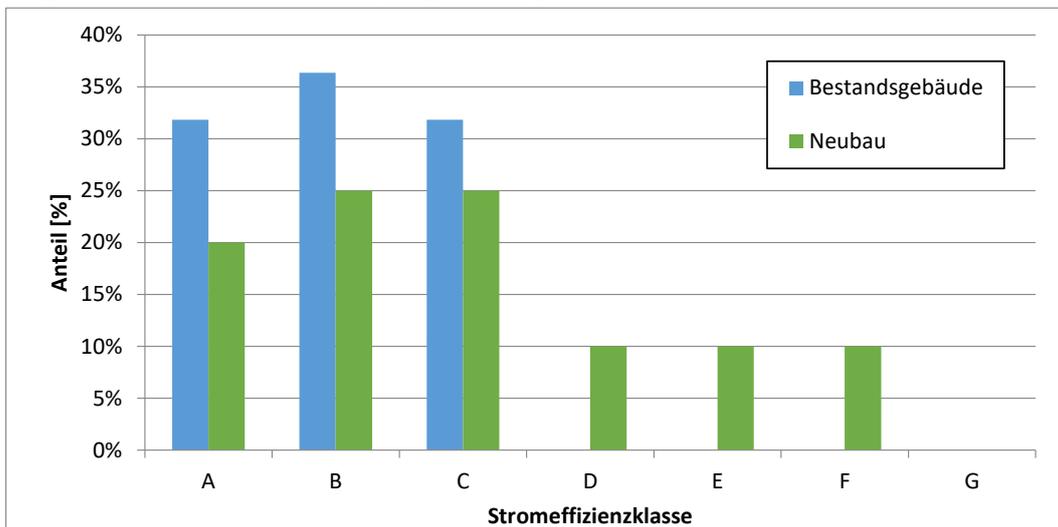
<sup>9</sup> Die Unterschiede der Kennwerte zwischen Tab. 17 und Bild 67 entstehen durch die Art der Mittelung: in Tab. 17 wird der Gesamtverbrauch aller Wohnungen durch die gesamte Wohnfläche dividiert, in Bild 67 werden die Kennwerte der einzelnen Wohnungen gemittelt, so dass sich eine abweichende Gewichtung der Einzelwerte ergibt.

Wohnung erreicht. Insgesamt liegt der Haushaltsstromverbrauch der Wohnungen aber deutlich unter dem mittleren Verbrauch in Deutschland (entsprechend Klasse D; siehe unten).

**Bild 67:** Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt sortiert), Flächenbezug mit beheizter Fläche der Wohnungen

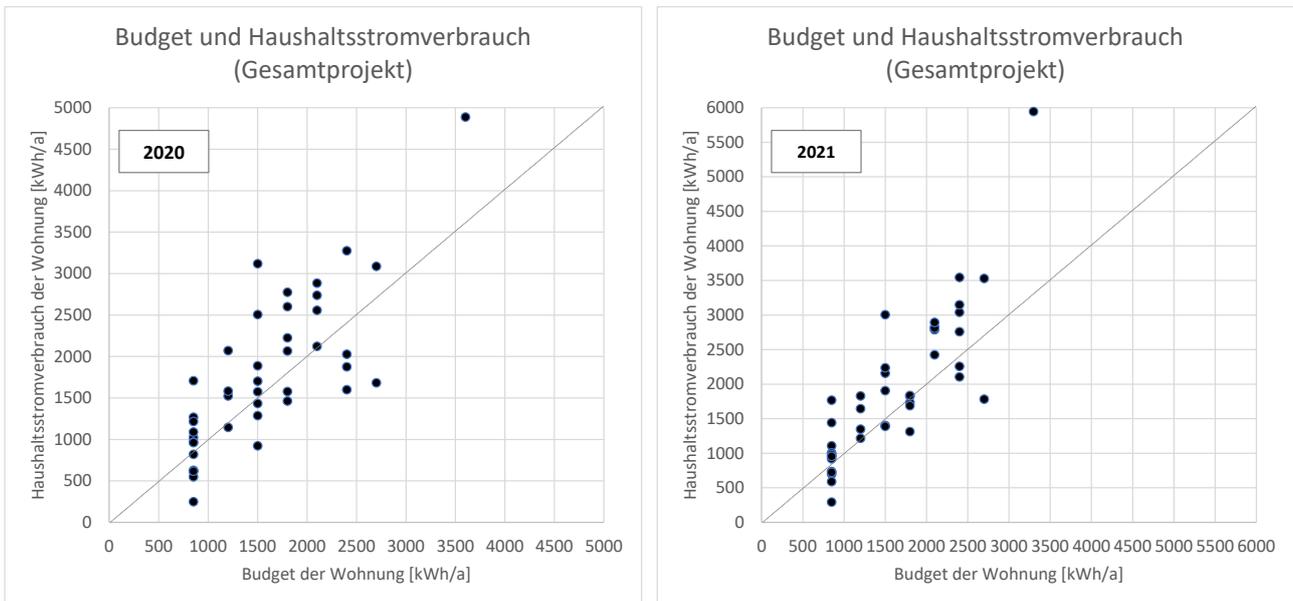


**Bild 68:** Einordnung der Wohnungen in die Effizienzklassen des Stromspiegel 2021/22 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt)



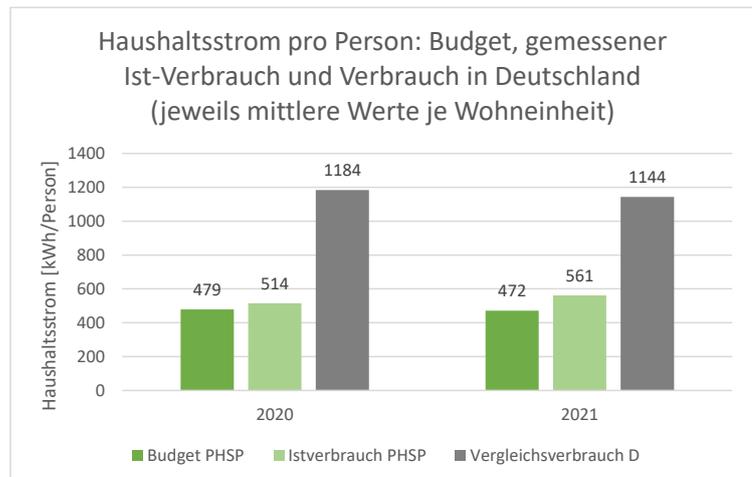
Wie auch beim Trinkwasser (siehe Kapitel 5.8.1) wurden Haushaltsstrombudget und -verbrauch ausgewertet. Bild 69 zeigt für die Jahre 2020 und 2021 den Zusammenhang der beiden Größen. Auch hier zeigt sich eine große Streuung der Messwerte um die Diagonale herum. Es treten mehr Überschreitungen als Unterschreitungen auf. Der Gesamtstromverbrauch aller Wohnungen überschreitet im Jahr 2020 die Summe der Einzelbudgets aller Wohnungen um 13 %, im Jahr 2021 liegt die Überschreitung des Budgets für alle Wohnungen bei 19 %. In beiden Jahren lag insbesondere im Neubau eine deutliche Überschreitung vor.

**Bild 69: Haushaltsstrombudget und Haushaltsstromverbrauch für das Gesamtprojekt für die Jahre 2020 und 2021**



Zwar wurde des Budget, das in Anlehnung an die Effizienzklasse A des [Stromspiegel 2019] festgelegt wurde, 2020 um 13 % und 2021 um 19 % überschritten, vergleicht man den gemessenen Verbrauch mit dem durchschnittlichen Haushaltsstromverbrauch in Deutschland nach [BDEW 2021], so unterschreiten die Mieter im Jahr 2020 den Vergleichswert 2020 um 57 % und 2021 um 51 % (Bild 70). Die Mieter verhalten sich somit insgesamt sehr sparsam.

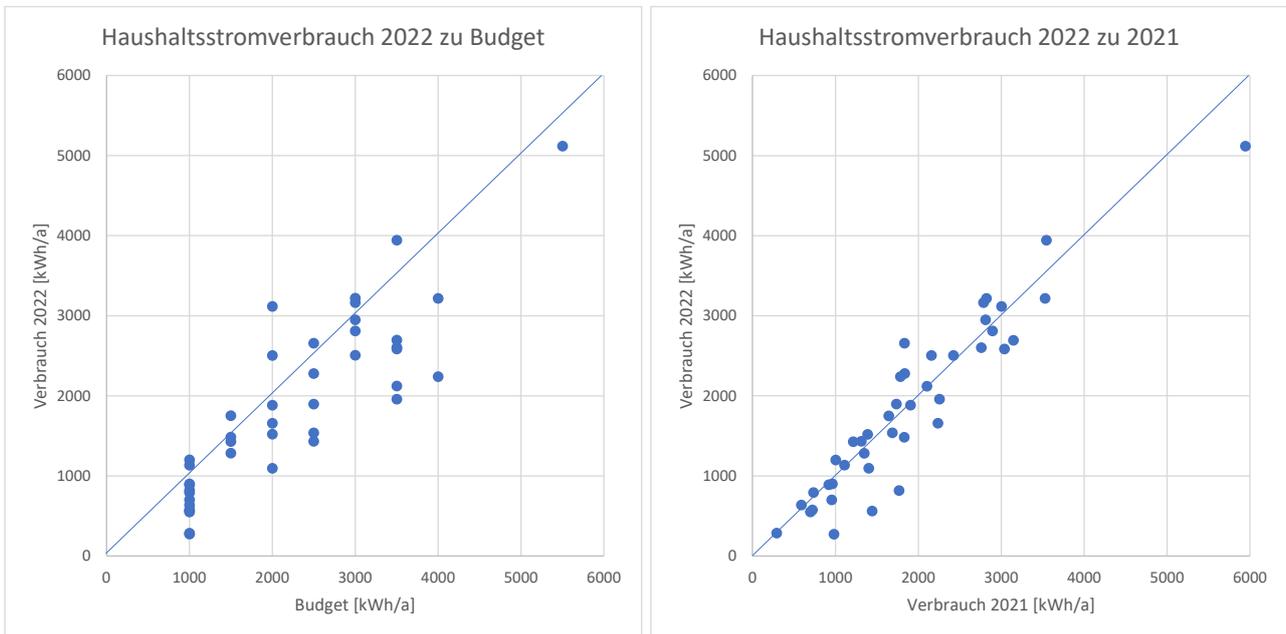
**Bild 70: Haushaltsstrombudget und -verbrauch für 2020 und 2021 sowie mittlerer Verbrauch je Person in Deutschland nach [BDEW 2021]**



Da die Überschreitungen der Budgets bei manchen Mietern sehr hoch waren, wurden die Budgets für Haushaltsstrom im Jahr 2022 angepasst. Für einen 1-Personen-Haushalt wurden 2022 1000 kWh/a angesetzt, und für jede weitere Person 500 kWh/a. Das Gesamtbudget wurde damit um ca. 38 % angehoben. Die Auswertung der von der Neuen Wohnraumhilfe bereitgestellten Verbrauchswerte für das gesamte Jahr 2022 zeigt, dass mit den neuen Budgets die Mehrzahl der Wohnungen ihr Budget einhält (Bild 71 links). Die Mieter unterschreiten das Budget im Mittel jetzt um ca. 16 %, im Jahr 2021 wurde dieses noch um ca. 19 % überschritten.

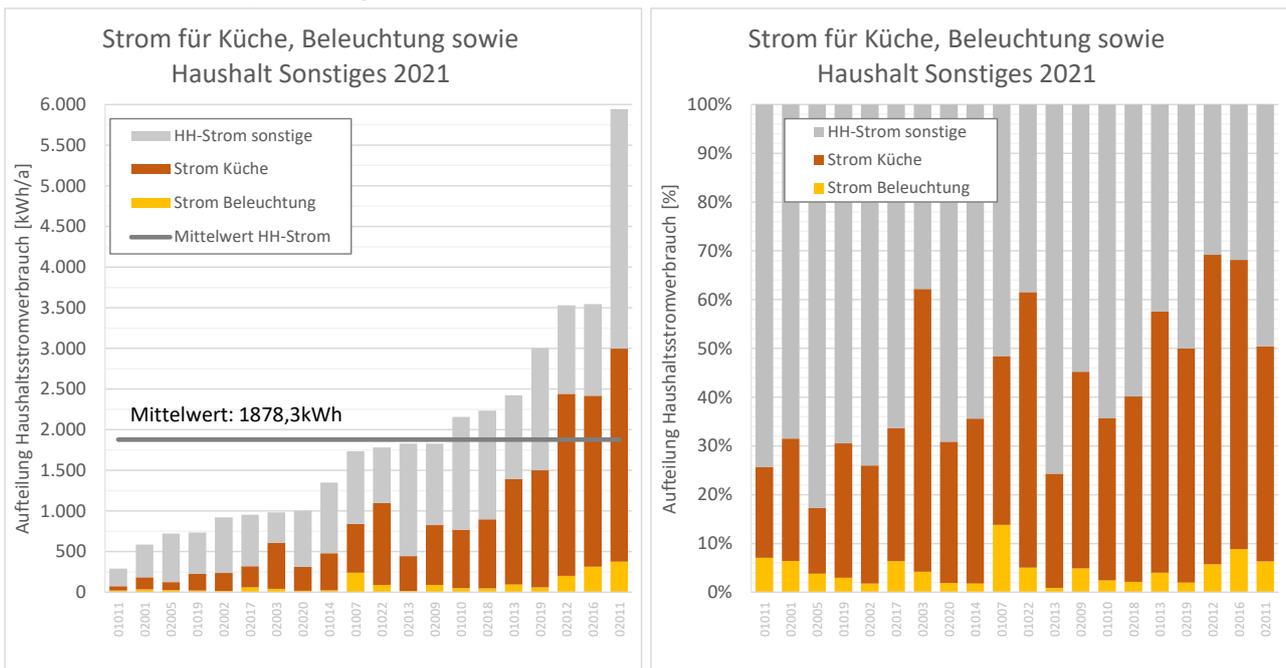
Der Vergleich der beiden Jahre 2022 (neue Budgethöhe) und 2021 (alte Budgethöhe) in Bild 71 rechts zeigt, dass die meisten Mieter unterhalb der Diagonalen liegen und somit weniger Haushaltsstrom verbrauchen als im Jahr zuvor. Der Verbrauch ist von 80.560 kWh/a auf 77.981 kWh/a bzw. um 3 % gesunken. Es liegen keine Angaben über die Veränderung der Personenbelegung im Gesamtprojekt von 2021 auf 2022 vor. Zum Zeitpunkt der Bewohnerbefragung im März 2023 [Hacke, Großklos] ergab sich bei 33 der 42 Wohnungen eine Reduktion von 119 auf 117 Personen in diesen Wohnungen – entsprechend -1,7 %. Somit hat die Anhebung der Budgets nicht zu einem Anstieg des Haushaltsstromverbrauchs geführt.

**Bild 71:** Haushaltsstrombudget und Haushaltsstromverbrauch für das Gesamtprojekt für das Jahr 2022 (mit angehobenen Budgets) (links) sowie Vergleich des Stromverbrauchs 2022 zu 2021 (rechts)



In 20 Wohnungen wurde der Stromverbrauch für die Küche sowie die Beleuchtung getrennt gemessen. Der Stromverbrauch für die Beleuchtung lag 2021 im Mittel bei 93 kWh/a (5 %), für die Küchengeräte wurden 817 kWh/a verbraucht (38 %) und für die sonstigen Verbraucher in der Wohnung waren es 968 kWh/a (58 %) (Bild 72 links). Der Anteil der Beleuchtung in den einzelnen Wohnungen lag zwischen 0,9 und 23,8 %, der Anteil für die Küche zwischen 13,5 und 63,5 % (Bild 72 rechts).

**Bild 72:** Aufteilung Haushaltsstromverbrauch für das Jahr 2021; links: Absolutwerte (aufsteigend sortiert), rechts: prozentualer Anteil



## 6 Verbrauchs- und Nutzungsdaten des Gesamtgebäudes

Für die Berechnung der Verbrauchskennwerte wird in diesem Kapitel die Energiebezugsfläche des Gesamtvorhabens nach PHPP verwendet (siehe Tab. 1), die beim Bestandsgebäude 4 % und beim Neubau 11,8 % höher liegt als die beheizte Wohnfläche. Grund sind nicht aktiv beheizte Flure und Abstellräume innerhalb der thermischen Hülle, die prozentual mit angerechnet werden.

### 6.1 Gesamtwärmeabnahme im Projekt

Im gesamten Projekt – also modernisiertes Bestandsgebäude und Neubau zusammen – wurden im Jahr 2020/21 166.374 kWh/a am Fernwärmeanschluss abgenommen (siehe Tab. 18). Dies entspricht einem Wärmeverbrauchs-kennwert (inkl. aller Verluste) von 48,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Im Jahr 2021/22 lag die Wärmeabnahme am Fernwärmeanschluss bei 156.533 kWh/a bzw. 45,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

Der Anteil der Verteilverluste zwischen Fernwärmeanschluss und dem Eingang der Pufferspeicher in den beiden Gebäuden lag über den Messzeitraum bei 2,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bzw. 6 % der Fernwärmeabnahme. Die Verluste entstehen vor allen durch die Anbindeleitung des Neubaus, die ca. 47 m im Keller des Bestandsgebäudes (zwei Leitungen) und 52 m im Erdreich (Duo-Rohr) verlegt ist.

**Tab. 18: Absolute Wärmeverbräuche für beide Gebäude und Fernwärmebezug sowie Kennwerte (mit der jeweiligen Energiebezugsfläche berechnet)**

	Fernwärmebezug absolut [kWh/a]		Kennwert Fernwärmebezug [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	
	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
Bestand	88.489	88.171	52,4	52,2
Neubau	67.778	58.960	38,3	33,4
Verteilverluste	10.107	9.402	2,9	2,7
Summe Fernwärmeabnahme	166.374	156.533	48,1	45,3

Die Wärmeverbräuche der beiden Gebäudeteile sind in Tab. 19 nach deren Verwendung aufgeschlüsselt. Im Bestandsgebäude wurden zwischen 43 und 50 % für die Beheizung verwendet, wobei hier auch die Verteilverluste der Steigleitungen mit enthalten sind, da diese nicht separat messtechnisch bestimmt werden konnten. In der ersten Heizperiode 2019/20 waren Teile der Heizungsregelung noch nicht einjustiert, was zu höheren Verteilverlusten führte. Beim Neubau lag der Anteil der Beheizung zwischen 42 und 47 %. Der Anteil für die Warmwasserbereitung erreicht im Bestandsgebäude Werte zwischen 34 und 37 %, im Neubau von ca. 32 %. Die Verteilverluste lagen im Bestandsgebäude (Pufferspeicher, Verteilung Warmwasserbereitung, ohne Verluste Bestandssteigstränge der Heizungsverteilung) zwischen 15 und 20 % und im Neubau (alle Verluste zwischen Eingang Puffer und Abnahme in den Wohnungen) zwischen 21 und 27 % der Gesamtwärmeabnahme am Pufferspeicher.

**Tab. 19: Absolute Wärmeverbräuche der beiden Gebäude**

kWh/a	Bestand			Neubau	
	2019/20	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
Heizung*	34.224	45.038	42.982	32.153	24.535
Warmwasser	29.775	30.162	31.725	21.386	18.653
Verteilverluste	15.645	13.289	13.464	14.239	15.772
Summe Wärmeabnahme	79.644	88.489	88.171	67.778	58.960

\* Bestand inkl. Verteilverluste der Bestandssteigleitungen

Die Verbrauchskennwerte für die beiden Gebäude und die einzelnen Messjahre sind in Tab. 20 dargestellt. Die Gesamtwärmeabnahme lag im Bestandsgebäude zwischen 47,2 und 52,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), im Neubau zwischen 33,4 und 38,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Der Heizwärmeverbrauch (inkl. Verteilverluste) erreichte beim Bestandsgebäude Werte zwischen 20,3 und 26,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), beim Neubau lag er bei 18,2 bzw. 13,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Der Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung ist von der Personenbelegung abhängig und lag beim Bestandsgebäude zwischen 17,6 und 18,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), im Neubau zwischen 12,1 und 10,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a).

Die Verteilverluste innerhalb des Gebäudes (ohne die Anbindung an das Fernwärmenetz) lagen beim Bestandsgebäude zwischen 7,9 und 9,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). In diesen Werten sind die Verteilverluste für die Beheizung nicht mit enthalten (bei der Heizwärme berücksichtigt), da diese nicht messtechnisch erfasst werden konnten. Der höchste Wert der Verteilverluste wurde im ersten Messjahr 2019/20 erreicht, in dem die Wärmeversorgung noch teilweise ungeregelt betrieben wurde, da die Anlagen und der Neubau teilweise noch nicht fertiggestellt waren. Im Neubau lagen die Verteilverluste zwischen 8,1 und 8,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Diese Werte umfassen alle Verteilverluste, die im Gebäude angefallen sind, nicht jedoch die Anbindeleitung an den Fernwärmeanschluss.

**Tab. 20: Verbrauchskennwerte Wärme für beide Gebäude**

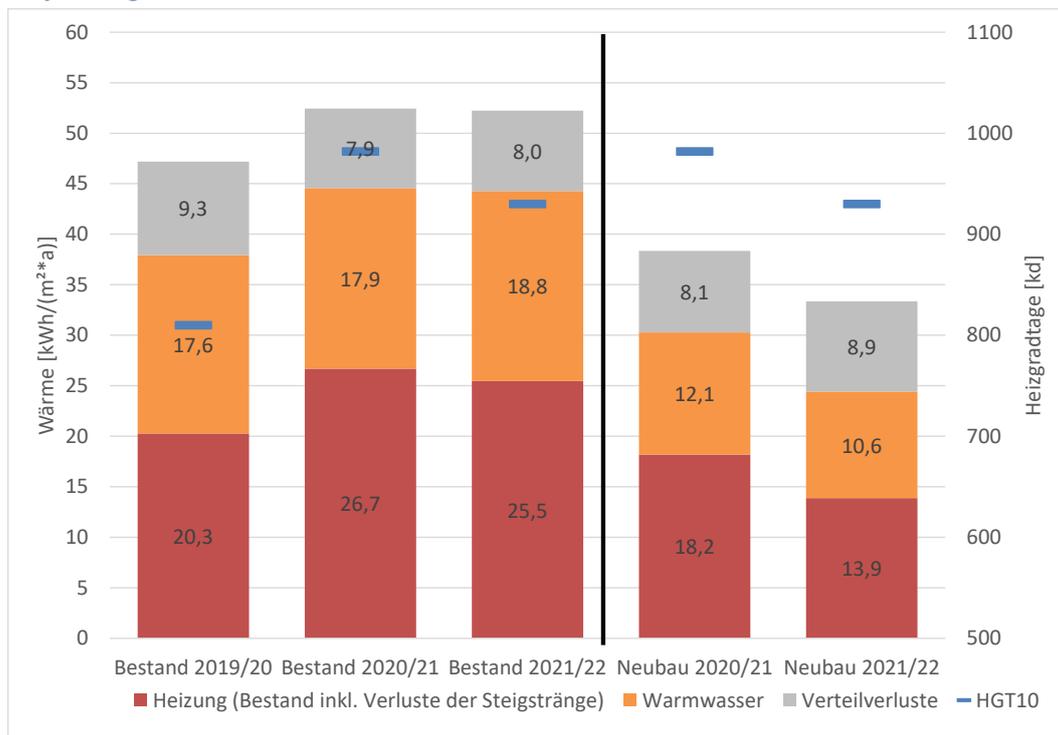
[kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	Bestand			Neubau	
	2019/20	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
Heizung*	20,3	26,7	25,5	18,2	13,9
Warmwasser	17,6	17,9	18,8	12,1	10,6
Verteilverluste	9,3	7,9	8,0	8,1	8,9
Summe Wärmeabnahme	47,2	52,4	52,2	38,3	33,4

\* Bestand inkl. Verteilverluste der Bestandssteigleitungen

In Bild 73 sind die Verbrauchskennwerte für das Bestandsgebäude und den Neubau noch einmal grafisch dargestellt. Zusätzlich sind die Heizgradtage des jeweiligen Auswertezitraums zur Einordnung der Wetterbedingungen dargestellt.

Insgesamt liegen die Gesamtwärmeverbräuche (Fernwärmeabnahme) mit 45,3 bzw. 48,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) sehr niedrig und erreichen im Vergleich zu anderen Mehrfamilienhäusern mit die niedrigsten gemessenen Gesamtwärmeverbräuche (siehe [Loga et al. 2022]).

**Bild 73: Verbrauchskennwerte der beiden Gebäude im Messzeitraum sowie Heizgradtage des jeweiligen Jahres**



## 6.2 Fernwärmebezug und Lastgänge

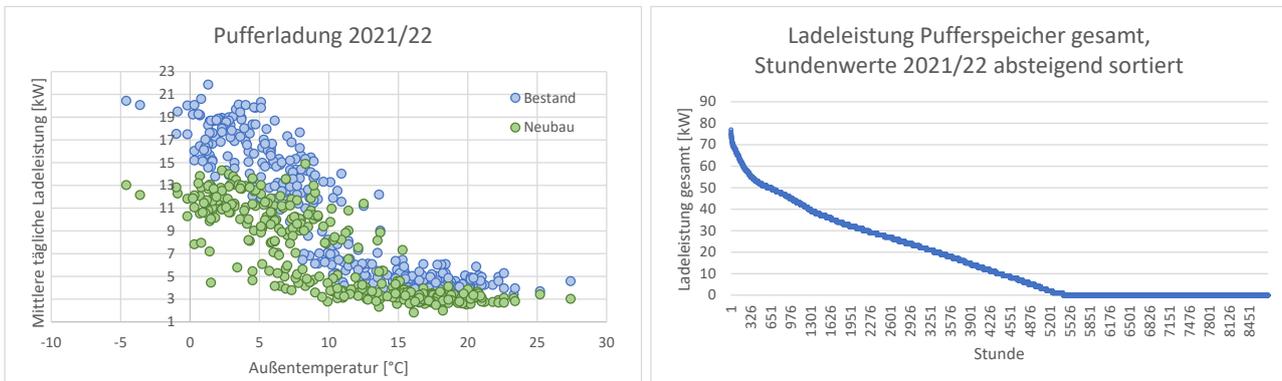
Die Pufferspeicher in den jeweiligen Technikräumen sollen den Leistungsbedarf für die Warmwasserbereitung über die Frischwasserstationen in den Wohnungen abpuffern und gleichzeitig auch die Wärme für die Beheizung bereitstellen. Ziel der Dimensionierung war eine Reduzierung der maximalen Fernwärme-Anschlussleistung, so dass die laufenden Kosten für die Mieter reduziert werden können. Die Fernwärme-Übergabestation besitzt eine maximale Leistung von 90 kW, wurde aber zur Versorgung beider Gebäude auf maximal 60 kW begrenzt.

Bild 74 links zeigt die mittlere tägliche Ladeleistung der Pufferspeicher in Bestandsgebäude und Neubau für das Auswertejahr 2021/22. Der Maximalwert liegt beim Bestandsgebäude bei 21,9 kW, beim Neubau bei 14,9 kW. Berücksichtigt man die Gleichzeitigkeit der Ladungen, so liegt der Maximalwert für das Gesamtprojekt bei 34,8 kW im Tagesmittel.

Untersucht man die Stundenwerte, so ergeben sich deutlich höhere Leistungen beim Fernwärmebezug<sup>10</sup>. In Bild 74 rechts ist die absteigend geordnete Dauerlinie für die Ladung der Pufferspeicher beider Gebäude dargestellt. Die maximale Ladeleistung auf Stundenebene lag bei 77 kW und damit 28 % über der eingestellten Begrenzung der Fernwärme-Übergabestation auf 60 kW. Dies deutet darauf hin, dass die Leistungsbegrenzung der Fernwärmeübergabestation gerade bei großen Lastschwankungen nicht optimal funktioniert. Insgesamt sind an 192 Stunden eines Jahres 2021/22 im Stundenmittel beider Gebäude Leistungen über 60 kW angefallen. Danach sinkt die geordnete Dauerlinie nahezu linear ab und an 3.341 h des Jahres wurde keine Fernwärme bezogen.

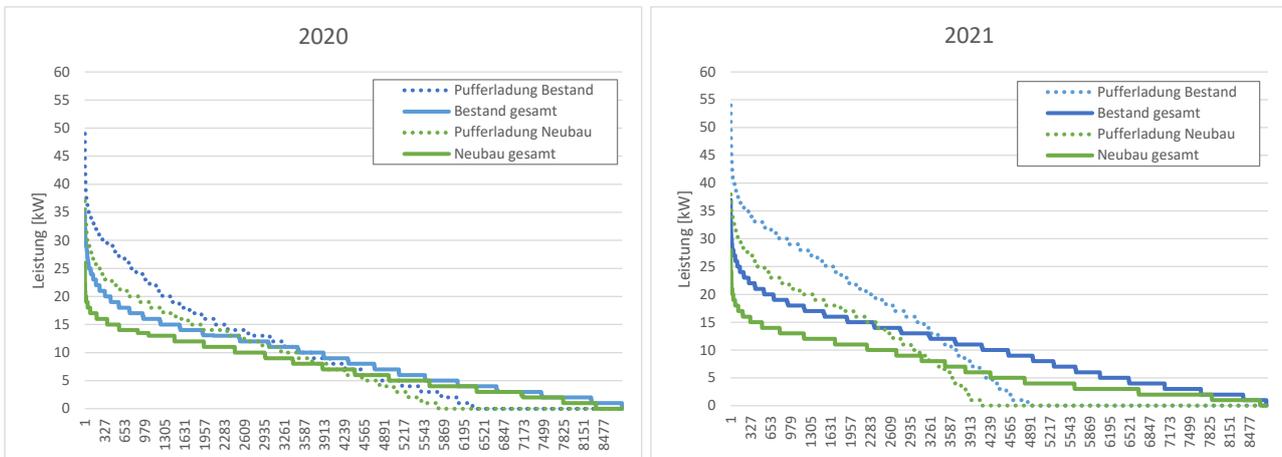
<sup>10</sup> Hier wurden die Ladeleistungen der Pufferspeicher ausgewertet, da die Daten des Fernwärmeanschlusses ab Oktober 2020 nur noch in geringerer zeitlicher Auflösung zur Verfügung standen. Die Abweichungen sollten im Bereich von ca. -6 % liegen, da die Verteilverluste insbesondere zum Neubau nicht in die Auswertungen eingeflossen sind.

**Bild 74:** Mittlere tägliche Ladeleistung der Pufferspeicher im Bestandsgebäude und im Neubau 2021/22 in Abhängigkeit der Außentemperatur (links) sowie stündliche gesamte Ladeleistung 2021/22 absteigend sortiert



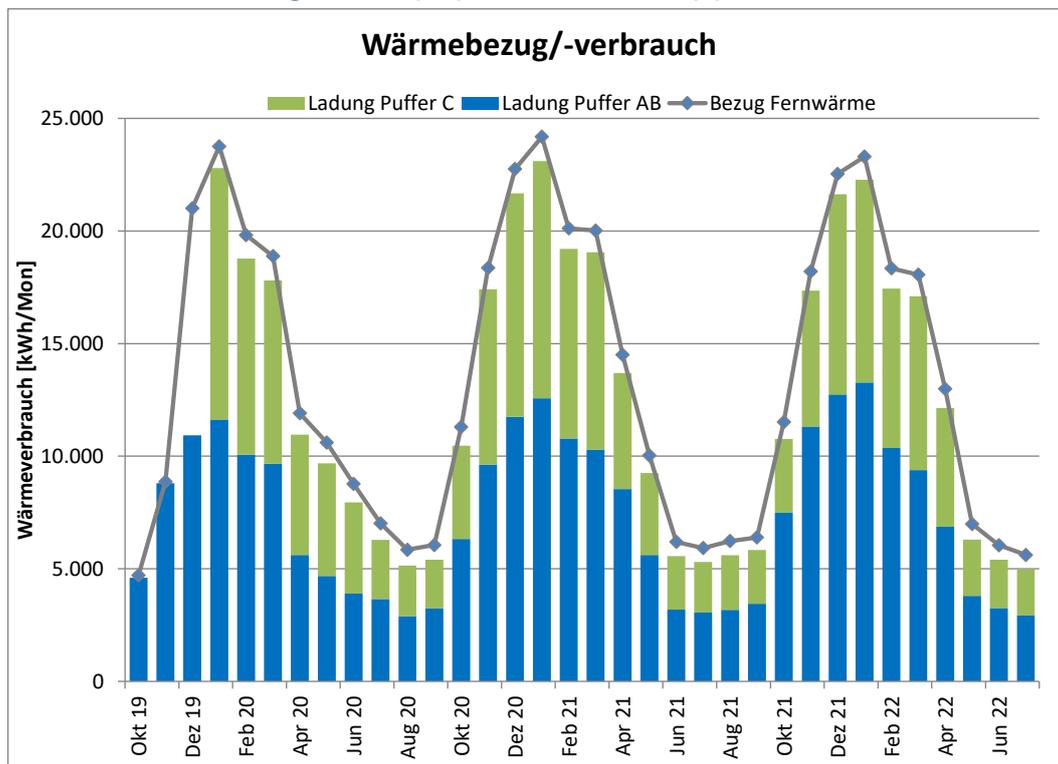
Betrachtet man die Jahresdauerlinien (absteigend geordnete stündliche Leistungen) der beiden Gebäude einzeln, so ergaben sich in 2020 (siehe Bild 75 links) im Bestandsgebäude eine maximale Leistung von 49 kW für die Pufferladung, im Neubau waren es 37 kW. Die gesamte Wärmeabnahme im Bestandsgebäude lag bei 35 kW, wobei die Lastspitze für Warmwasser bei 23 kW lag, für die Beheizung bei 20 kW (diese Spitzen traten zu unterschiedlichen Zeiten auf) – im Neubau bei 26 kW. Im Jahr 2021 (Bild 75 rechts) lag die maximale Pufferladeleistung bei 54 kW im Bestandsgebäude und 38 kW im Neubau. Die gesamte Wärmeabnahme lag im Bestandsgebäude bei 37 kW und im Neubau bei 28 kW.

**Bild 75:** Jahresdauerlinien für die Jahre 2020 (links) und 2021 (rechts) für Pufferladung (Gesamtwärmeabnahme Gebäude) und Abnahme beider Gebäude



Die monatliche Verteilung des gesamten Fernwärmebezugs sowie die Ladung der Puffer in den beiden Gebäude ist in Bild 76 dargestellt. Die Differenz zwischen dem Bezug der Fernwärme und der Abnahme im Dezember 2019 ist durch den Anschluss des Neubaus in diesem Zeitraum vor Montage der Wärmezähler entstanden.

**Bild 76:** Monatlicher Gesamtfernwärmebezug im gesamten Messzeitraum sowie Ladung in den Puffer des Bestandsgebäudes (AB) und des Neubaus (C)



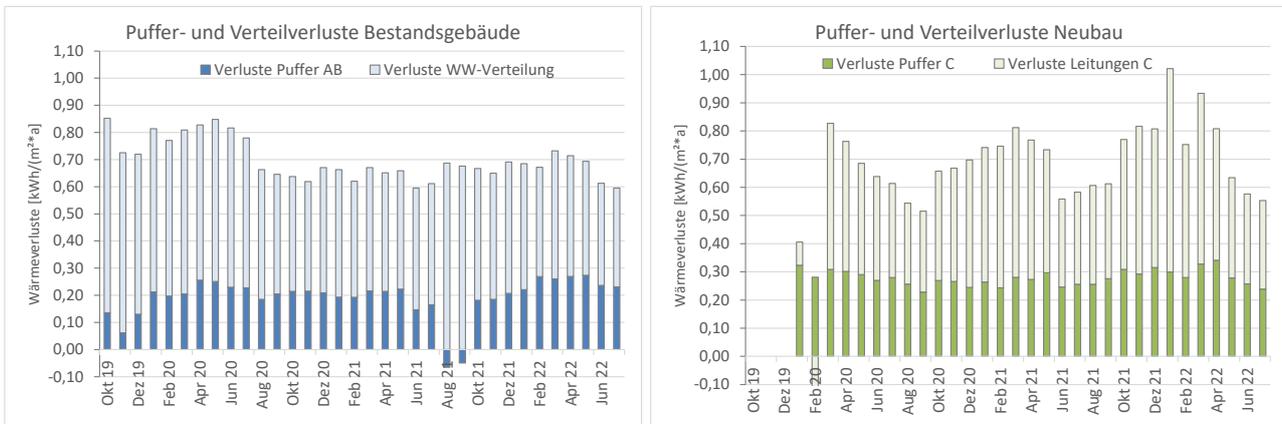
### 6.3 Wärmespeicherung und -verteilung

Bild 77 zeigt die monatlichen Puffer- und Verteilverluste für Bestandsgebäude und Neubau. Die Pufferverluste liegen im Bestandsgebäude bei ca. 2,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), im Neubau aufgrund der etwas höheren Puffertemperaturen besonders im Winter bei ca. 3,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Im wärmeren Winter 2021/22 lagen die Verluste etwas höher, da bei vergleichbarer Puffertemperatur weniger Wärme abgenommen wurde.

Die Verteilverluste im Bestandsgebäude lagen bei ca. 5,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), enthalten aber nur die Verluste der Warmwasserverteilung und nicht die Verluste der Bestandssteigstränge für die Beheizung, die nicht getrennt gemessen werden konnten und im Heizwärmeverbrauch enthalten sind. Aufgrund der vergleichsweise konstanten Vorlauftemperaturen für die Warmwasserbereitung (ca. 47 °C, siehe Bild 78) unterschieden sich die Verluste im Jahresverlauf im Bestandsgebäude kaum. Im September 2020 sind die Verluste durch eine Optimierung des Betriebs der Warmwasserbereitung (Korrektur des Überströmventils an einer Frischwasserstation und dadurch geringerer Volumenstrom und höhere Temperaturspreizung) deutlich gesunken.

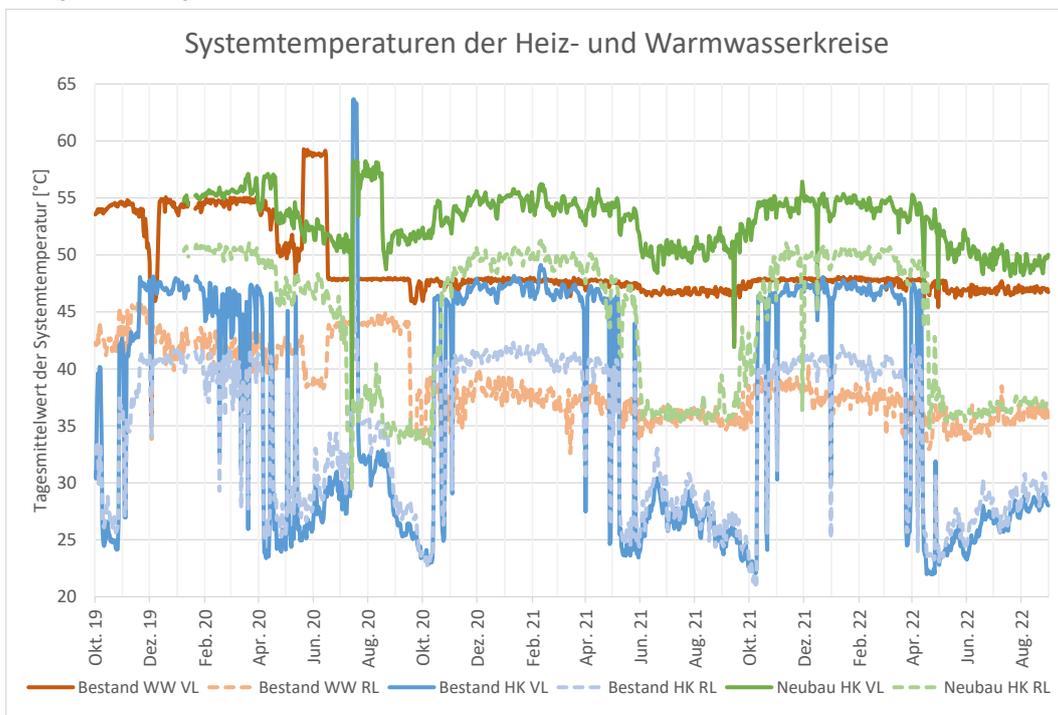
Im Neubau wird die Vorlauftemperatur innerhalb bestimmter Grenzen der Außentemperatur angepasst. Im Winter liegen die Vorlauftemperaturen bei ca. 54 °C, im Sommer nur bei 50 °C (Bild 78). Entsprechend schwanken auch die Verluste im Jahresverlauf. Die gesamten Puffer- und Verteilverluste lagen im Neubau bei 8 bis 9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und enthalten alle Wärmeverluste ab Wärmeübergabe im Gebäude (also ohne Anbindung an die Fernwärmeübergabestation). Im Bestandsgebäude liegen die Puffer- und Verteilverluste bei 8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), hier müssen aber die Verluste der Heizungsverteilung noch hinzugerechnet werden, die nach PHPP bei ca. 4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) liegen.

**Bild 77: Monatliche spezifische Puffer- und Verteilverluste im gesamten Messzeitraum des Bestandsgebäudes (links) und des Neubaus (rechts) (negative Werte sind durch Datenlücken entstanden)**



Die Tagesmittelwerte der Systemtemperaturen im Heiz- und Warmwasserkreis des Bestandsgebäudes bzw. des Heizkreises im Neubau zeigt Bild 78. Zu Beginn der Auswertungen waren die Heizkreise noch ungeregelt bzw. es traten anfangs Störungen und Fehlfunktionen auf. Ab der Heizperiode 2020/21 waren die Regelungen abgesehen von wenigen Ausnahmen im Normalbetrieb. Der Warmwasserkreis im Bestandsgebäude lag bei ca. 47 °C, ebenso die Heizkreise des Bestandsgebäudes in der Heizperiode. Im Sommer wurden die Heizkreise im Bestandsgebäude abgeschaltet, im Neubau war dies aufgrund der Warmwasserbereitung in den Wohnungen (2-Leiter-System) nicht möglich. Im Neubau schwanken die Vorlauftemperaturen zwischen 50 °C im Sommer und 55 °C in der Heizperiode.

**Bild 78: Systemtemperaturen in den Heiz- und Warmwasserkreisen**

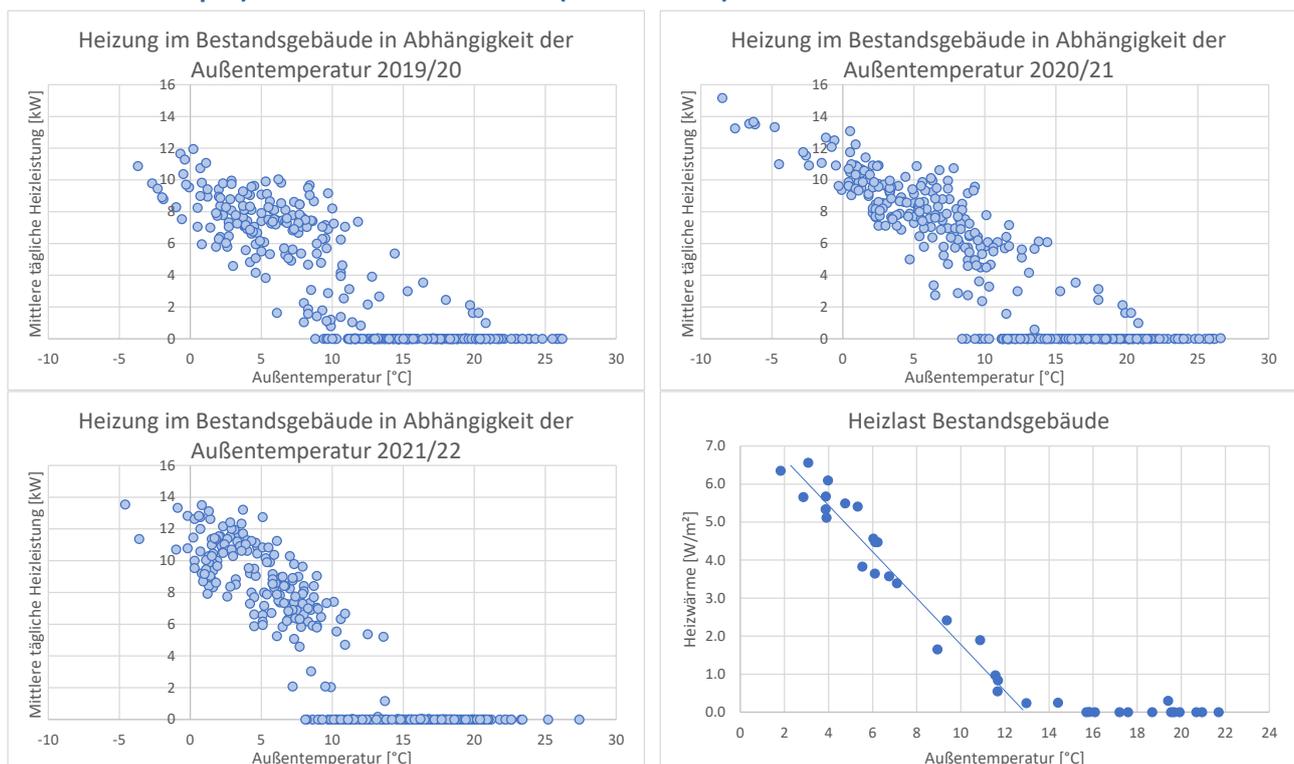


## 6.4 Heizleistungen im Bestandsgebäude

Im Bestandsgebäude sind die Kreise für Heizung und Warmwasserbereitung getrennt, so dass hier für die drei ausgewerteten Heizperioden die mittlere tägliche Heizleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur ausgewertet werden kann (Bild 79). Da teilweise abhängig vom Wetter händisch in die Regelung der Heizkreise eingegriffen wurde, ist keine eindeutige Heizgrenztemperatur zu erkennen. Außerdem waren die Heizkreise besonders in den ersten beiden Jahren durch Serviceeinsätze<sup>11</sup> zeitweise auch im Frühjahr/Sommer in Betrieb, so dass auch eine geringe Heizwärmeabnahme bei Außentemperaturen bis 20 °C auftraten. Grundsätzlich lag die Heizgrenztemperatur zwischen 8 und 11 °C. Die maximale mittlere tägliche Heizleistung trat am 10.02.2021 mit 15,2 kW bei einer Außentemperatur von -8,5 °C auf (Bild 79 oben rechts). Bei einer Energiebezugsfläche von 1.687,7 m<sup>2</sup> entspricht dies einer Heizleistung von 8,9 W/m<sup>2</sup>, die Badheizkörper sind in diesem Wert aber noch nicht enthalten, da diese an den Strängen für die Frischwasserstationen angeschlossen sind.

Betrachtet man die Monatsmittelwerte (Bild 79 unten rechts), so ergibt sich eine Heizgrenztemperatur von ca. 12,5 °C. Die Steigung der Ausgleichsgeraden liegt bei -0,6 kW/K, so dass sich eine Heizlast von 13,9 kW bei -10 °C (Norm-Auslegungstemperatur für Darmstadt nach DIN/TS EN 12831-1) ergibt.

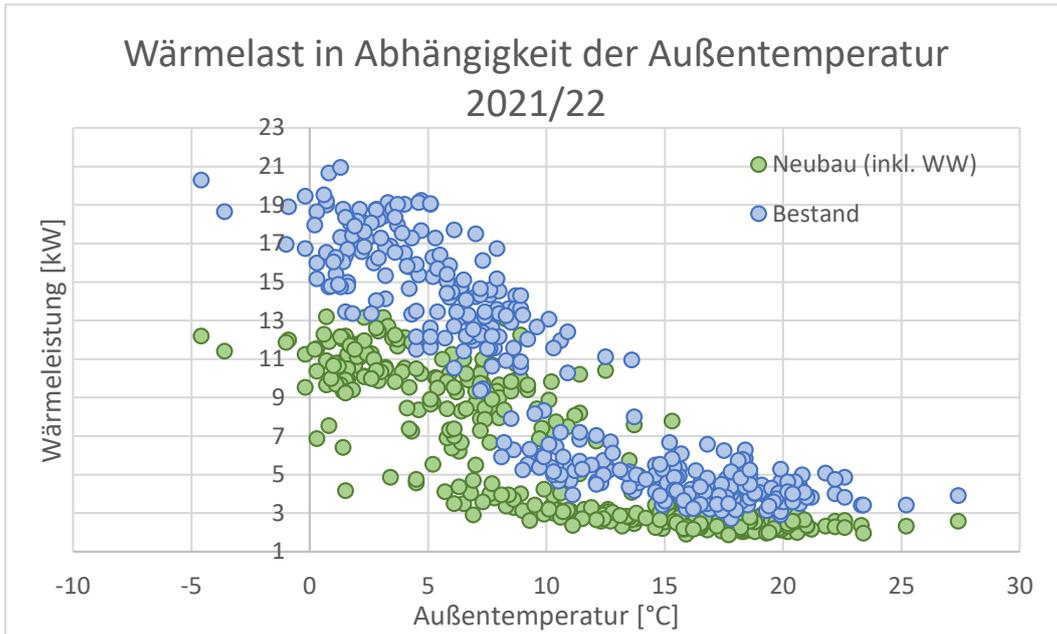
**Bild 79:** Mittlere tägliche Leistungen für die Heizung im Bestandsgebäude 2019 -2022 (ohne Badheizkörper) und Monatsmittelwerte (unten rechts)



Betrachtet man Heizung, Warmwasserbereitung und Verteilverluste zusammen, so lag im Bestandsgebäude die maximale mittlere tägliche Leistung bei 21,0 kW im gesamten Messzeitraum. Im Neubau lag die maximale mittlere tägliche Wärmeabnahme bei 17,5 kW (Bild 80).

<sup>11</sup> Aufgrund einer Störung wurden alle Pumpen – auch die für die Heizkreise – in den Handbetrieb geschaltet.

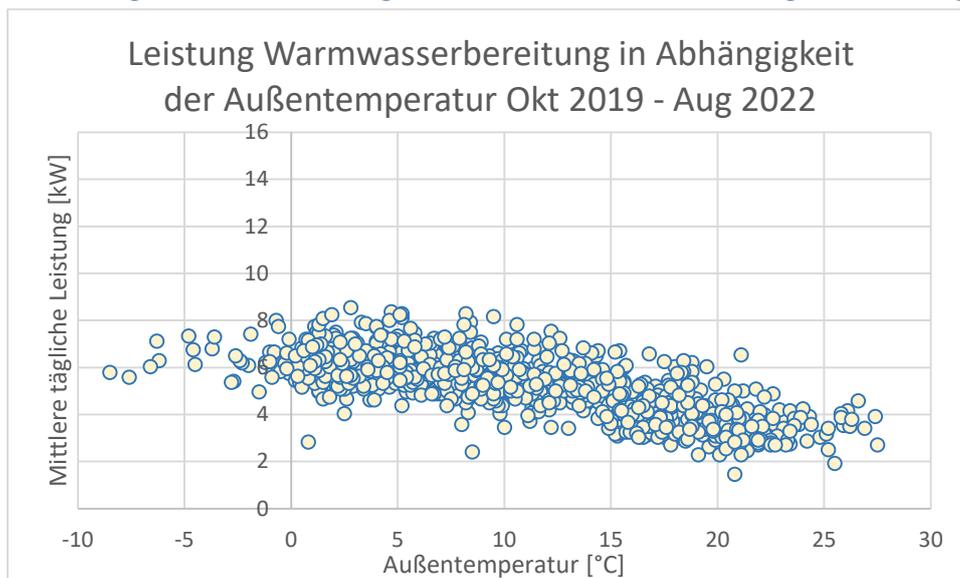
**Bild 80:** Mittlere tägliche der Wärmeabnahme im Bestandsgebäude und im Neubau 2021/22

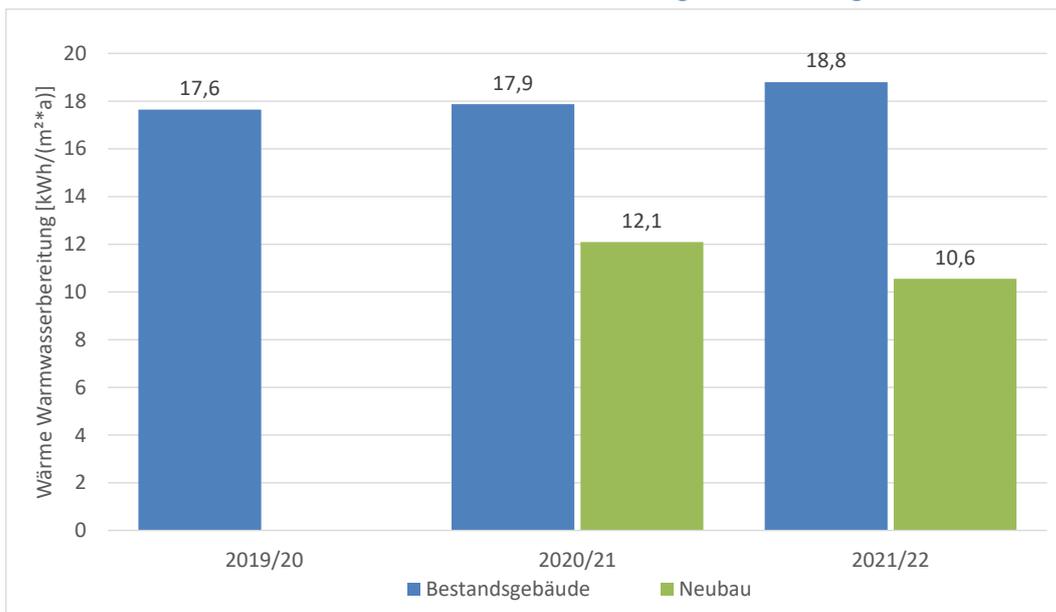


### 6.5 Warmwasserbereitung

Beim Bestandsgebäude kann die Warmwasserbereitung ebenfalls separat ausgewertet werden. Das Bild 81 zeigt für den Gesamtzeitraum die Leistung für die Warmwasserbereitung. Hier gibt es keine nennenswerte Abhängigkeit von der Außentemperatur. Die leicht geringeren Wärmeleistungen bei höheren Außentemperaturen sind vermutlich dadurch zu erklären, dass an dem Strang für die Frischwasserstationen auch die Heizkörper in den Badezimmern angeschlossen sind, die bei höheren Außentemperaturen kaum noch genutzt werden. Im Sommer 2021 lag die mittlere tägliche Wärmeleistung für die Warmwasserbereitung bei 4,7 kW für das Bestandsgebäude bzw. 0,21 kW pro Wohneinheit.

**Bild 81:** Mittlere tägliche Wärmeleistungen für die Warmwasserbereitung im Bestandsgebäude



**Bild 82: Verbrauchskennwerte für die Warmwasserbereitung für Bestandsgebäude und Neubau**

Der Wärmeverbrauch für die Warmwasserbereitung lag im Bestandsgebäude (mit der höheren Personenbelegungsdichte von 20,5 m<sup>2</sup>/Person im Vergleich zu 24,7 m<sup>2</sup>/Person im Neubau für das Jahr 2021) zwischen 17,6 und 18,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (siehe Bild 82). Im Neubau lag der Kennwert zwischen 10,6 und 12,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Somit lag das Bestandsgebäude über dem Planungswert für den Warmwasserenergiebedarf nach [BBSR 2017] von ca. 11 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) – allerdings wohnen im PassivhausSozialPlus deutlich mehr Menschen als im Durchschnitt. Der Neubau erreichte trotz im Vergleich zu den Planungsdaten höherer Personenanzahl den Planungswert des flächenspezifischen Warmwasserverbrauchs.

## 6.6 Grauwasseranlage

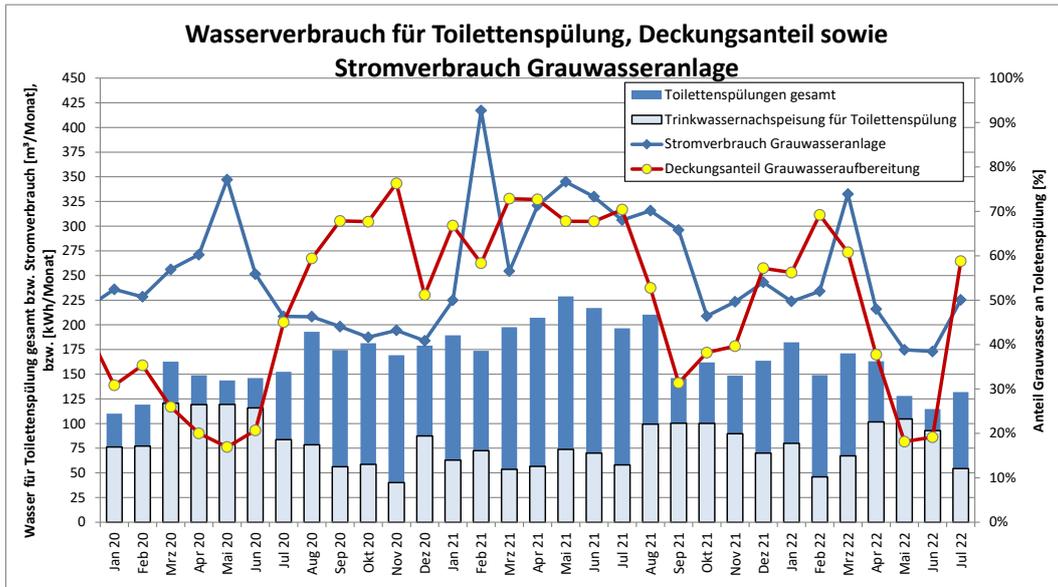
Die Grauwasseranlage soll einen möglichst großen Teil des Wasserverbrauchs für die Toilettenspülung durch aufbereitetes Grauwasser (Betriebswasser) zur Verfügung stellen. Dazu wird gering verschmutztes Abwasser aus Dusche und Handwaschbecken im Bad getrennt gesammelt und aufbereitet.

Die Wassermengen für die Toilettenspülung lagen für Bestandsgebäude und Neubau in Summe zwischen 1.880 (2020) und 2.240 (2021) m<sup>3</sup>/a, je Person lagen die Wasserverbräuche zwischen 13,15 und 15,67 m<sup>3</sup>/(Person\*a). Der mittlere Wasserverbrauch für die Toilettenspülung in Deutschland betrug in 2021 ca. 12,5 m<sup>3</sup>/(Person\*a) [BDEW 2022a]. Somit lagen die Verbräuche im PHSP um 8 bis 25 % über dem mittleren Verbrauch in Deutschland.

Der Deckungsgrad der Grauwasseranlage berechnet sich aus dem Verhältnis der aufbereiteten Grauwassermenge zur Gesamtwassermenge zur Toilettenspülung. Dieser schwankte im Zeitverlauf deutlich (siehe Bild 83). Die Betriebswasserabgabe und somit der Wasserverbrauch für die Toilettenspülung stiegen seit Anfang 2020 bis zum Mai 2021 fast kontinuierlich an. Seit Juni 2021 sinkt der Gesamtwasserverbrauch tendenziell wieder. Als hellblaue Säulen ist die Trinkwassernachspeisung in die Anlage dargestellt, die erforderlich ist, wenn die Betriebswassermenge nicht ausreicht. Aus diesen Werten ergibt sich der monatliche Deckungsgrad für die Grauwasseraufbereitungsanlage (rote Linie). In den ersten Betriebsmonaten (Bestand und Neubau vermietet) lag der Deckungsgrad unter 40 %, was deutlich unter den erwarteten Werten lag. Im Juli 2020 wurde ein zusätzlicher Filter als Test der Herstellerfirma nachgerüstet und in der Folge stieg der Deckungsgrad deutlich an und erreichte Werte zwischen 60 und über 70 %. Die Anlage wurde in der Folge vom Hersteller fortwährend optimiert, so dass sich für den Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 ein mittlerer Deckungsgrad von 65 % ergab. Wenn aufgrund der Optimierung die Betriebswassermenge zu stark absank, wurde die

Verweilzeit in der Anlage erhöht und damit die Betriebswasserqualität gesteigert, gleichzeitig aber der Deckungsgrad wieder leicht abgesenkt. Kleinere Einbrüche im Deckungsgrad entstanden u. a. durch Software-Updates oder Defekte in der Verrohrung oder an Pumpen, wodurch die Anlage zeitweise außer Betrieb war. Nach etwa einem Jahr sank der Deckungsgrad deutlich ab, was durch die Verschmutzung des Filters verursacht wurde. Nach einem Austausch verbesserte sich die Reinigungsleistung wieder deutlich.

**Bild 83: Betriebsdaten der Grauwasseranlage: Betriebswasserabgabe, Trinkwassernachspeisung sowie Deckungsanteil Betriebswasser und Stromverbrauch der Anlage**



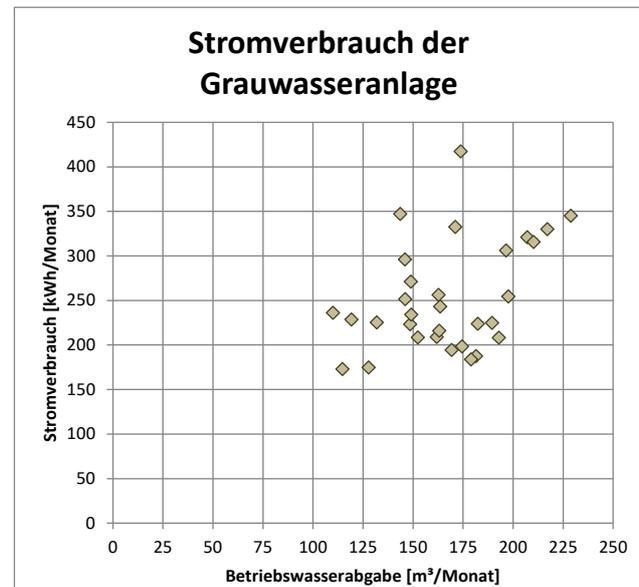
In den angegebenen Deckungsgraden sind nach Herstellerangaben die Wassermengen für die Rückspülung der Filter in der Grauwasseranlage nicht mit enthalten. Ein Abgleich der Summen aller Wasserzähler in den Wohnungen und für die Trinkwassernachspeisung der Grauwasseranlage mit dem Hauptwasserzähler ergab im Zeitraum Juli 2021 bis Juni 2022 Differenzen von 0,7 % im Mittel, was im Bereich der Messunsicherheiten der Summierung der zahlreichen Zähler liegt. Somit ist nicht von einem hohen Anteil von nicht erfasstem Trinkwasser für die Rückspülung der Filter auszugehen.

Der Stromverbrauch der Grauwasseranlage hängt vor allem von der aufbereiteten Grauwassermenge und dem Zustand der Filter ab. Da die Grauwassermenge nicht direkt gemessen werden konnte, ist in Bild 84 der Stromverbrauch in Abhängigkeit der abgegebenen Betriebswassermenge dargestellt. Durch Verschmutzungen der Filter und andere Faktoren schwankt der Stromverbrauch. In den ersten Monaten des Betriebs war der Neubau noch nicht belegt, so dass hier nur die Verbrauchswerte ab Januar 2020 dargestellt sind.

Im Jahr 2020 lag der Stromverbrauch bei 2.771 kWh/a, im Jahr 2021 bei 3.485 kWh/a. Diesem Anstieg um 26 % steht ein Anstieg der abgegebenen Trinkwassermenge um 19 % gegenüber.

Herstellerangaben zu Reinigungsleistung oder Stromverbrauch stehen nicht zur Verfügung, so dass hier kein Vergleich gezogen werden kann.

**Bild 84: Stromverbrauch der Grauwasseranlage in Abhängigkeit der Betriebswasserabgabe**



## 6.7 Stromerzeugung

Die Ost-/West-orientierten PV-Anlagen speisen den erzeugten Strom in das jeweilige Gebäude ein. Das Energiemanagement der Anlage kontrolliert den Energiefluss am Hausübergabepunkt und lädt den Batteriespeicher, wenn die Erzeugung den Hausverbrauch übersteigt. Nur PV-Strom, der dann immer noch nicht im Gebäude verbraucht wird, wird in das Netz eingespeist. Da beide Gebäude einen gemeinsamen Netzanschlusspunkt besitzen, kann auch noch Energie zwischen den Gebäuden ausgetauscht werden, bevor ins öffentliche Netz eingespeist wird.

Die PV-Stromerzeugung lag im Jahr 2020 beim Bestandsgebäude mit ca. 40.700 kWh um ca. 1.700 kWh über dem Wert des Jahres 2021 (siehe Tab. 21). Beim Neubau lag die Erzeugung 2020 mit 42.050 kWh etwas höher als beim Bestandsgebäude und um ca. 2.580 kWh über der Erzeugung im Jahr 2021. Bezogen auf die installierte PV-Leistung erreichte das Bestandsgebäude 2020 994 kWh/kWp, der Neubau aber nur 970 kWh/kWp. 2021 wurden 952 bzw. 911 kWh/kWp erzeugt, d. h. die Differenz zwischen den beiden Anlagen stieg an. Eine mögliche Ursache der geringeren spezifischen Erzeugungsleistung im Neubau könnte der geringere Abstand des Treppenhauses/Dachausstiegs zu den nördlichen Modulreihen sein, so dass in den Abendstunden Teile der nördlich gelegenen Modulreihen zeitweise verschattet werden. Die monatliche Erzeugung der beiden PV-Anlagen ist in Bild 85 dargestellt<sup>12</sup>.

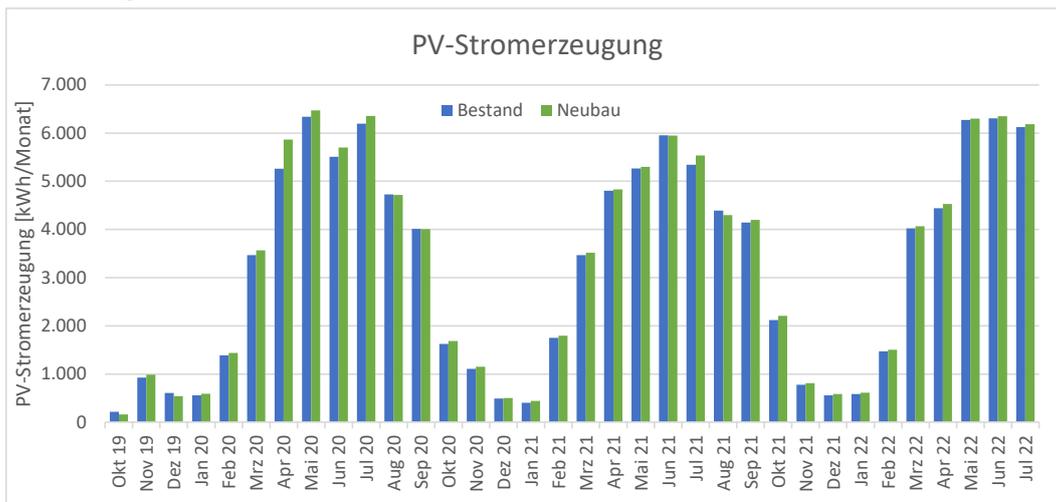
<sup>12</sup> Für diese Auswertungen standen zusätzlich zum wissenschaftlichen Monitoring auch noch die Werte der PV-Erzeugungszähler der Energiegenossenschaft Darmstadt (EG-DA) zur Verfügung. Somit konnte zwischen der PV-Gesamterzeugung und der Erzeugung nach Batterieladung messtechnisch differenziert werden.

**Tab. 21: Jahressummen und -kennwerte der PV-Stromerzeugung für die Jahre 2020 und 2021 sowie Prognose nach PHPP**

	Bestand			Neubau		
	absolut [kWh/a]	je qm EBF [kWh/m²/a]	je kWp [kWh/kWp]	absolut [kWh/a]	je qm EBF [kWh/m²/a]	je kWp [kWh/kWp]
2020	40.688	24,1	994	42.050	23,8	970
2021	38.982	23,1	952	39.471	22,3	911
Prognose PHPP	33.272	19,7	813	35.224	19,9	813

Die Prognose der PV-Erzeugung nach PHPP von 33.272 (Bestand) bzw. 35.224 kWh/a (Neubau) wurde im Jahr 2020 um 22 % beim Bestandsgebäude und um 19 % beim Neubau überschritten. Im Jahr 2021 lagen die PV-Erzeugungen 17 % bzw. 12 % über dem Prognosewert.

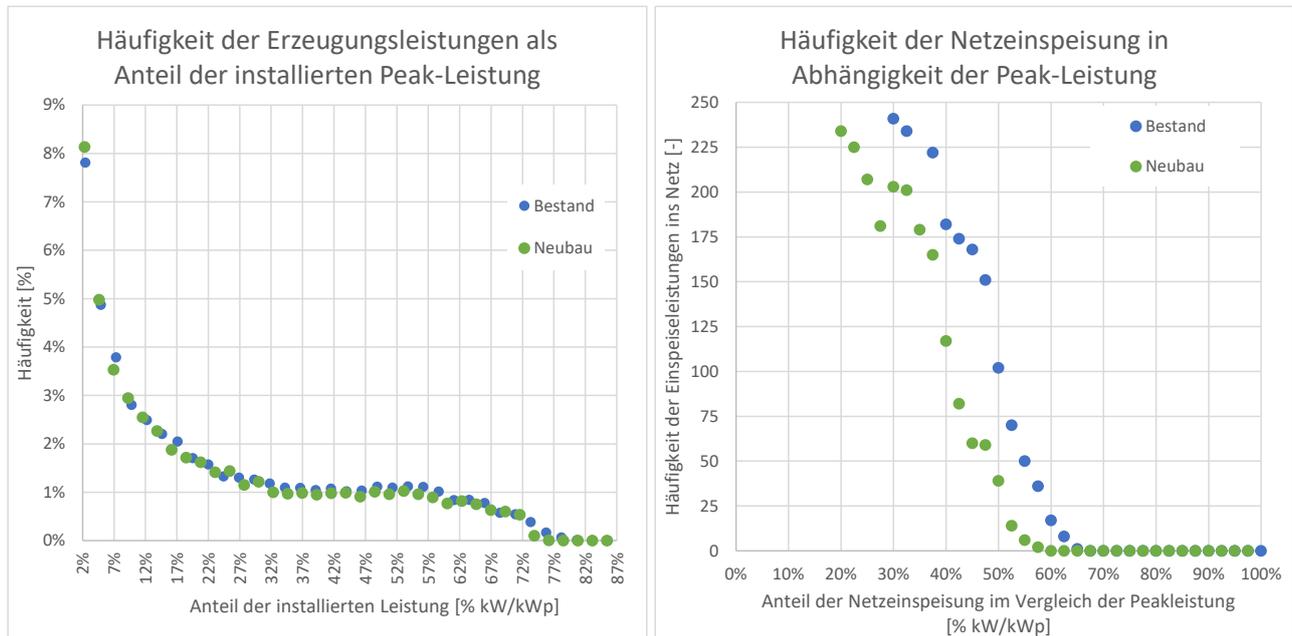
**Bild 85: Monatswerte der PV-Stromerzeugung über den gesamten Messzeitraum getrennt nach Bestandsgebäude und Neubau**



Die Begrenzung der Einspeisung auf 70 % der installierten Nennleistung, die nach EEG 2017 als Alternative zur Abregelung durch den Netzbetreiber bis 30 kW installierter Leistung vorgesehen war ([EEG 2017] § 9 (2) 2b), spielte bei den Gebäuden keine Rolle. Nur an 149 bis 352 Stunden im Jahr gab es eine höhere Erzeugungsleistung der Anlagen (siehe Bild 86 links). Da aber noch der Eigenverbrauch und die Batterieladung aus der PV-Erzeugung gedeckt wurden, lag die tatsächliche Netzeinspeisung deutlich niedriger.

Beim Neubau musste aufgrund der KfW-Effizienzhaus 40 Plus-Anforderungen die Einspeiseleistung auf maximal 60 % der Peak-Leistung begrenzt werden. Wie in Bild 86 rechts zu sehen ist, wurde beim Neubau der Wert von 60 % der Peak-Leistung immer unterschritten, aber auch das Bestandsgebäude, für das keine solchen Anforderungen gelten, hat die 60 %-Schwelle nur an 9 Stunden im gesamten Auswertzeitraum von Januar 2020 bis Ende August 2022 überschritten.

**Bild 86:** Links: Häufigkeit der PV-Erzeugungsleistungen von Juli 2021 bis Juni 2022, dargestellt als Anteil der installierten PV-Peak-Leistung (Nullwerte ausgeblendet); rechts: Häufigkeit der Netzeinspeisungsleistungen von Januar 2020 bis August 2022, dargestellt als Anteil der installierten PV-Peak-Leistung (Nullwerte ausgeblendet, Skalierung angepasst)

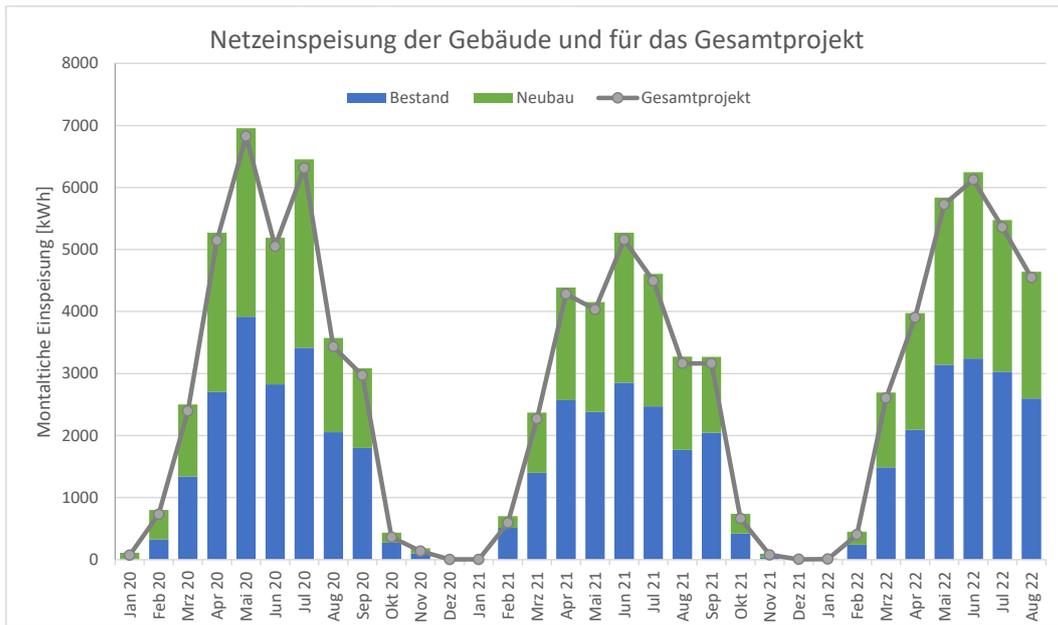


Der Eigenverbrauch der PV-Anlage des Neubaus konnte aus einem verfügbaren Zähler abgeleitet werden. Im Jahr ergeben sich ca. 12 kWh an Stromverbrauch durch die PV-Anlage (siehe auch Kapitel 6.8).

Die nicht im Gebäude nutzbare PV-Stromerzeugung, die ins öffentliche Netz eingespeist wurde, lag im Jahr 2020 bei 33.448 kWh bzw. 9,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), im Jahr 2021 bei 27.906 kWh bzw. 8,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Bild 87 zeigt die monatlichen Verläufe der Netzeinspeisung. Die Unterschiede zwischen den Jahren liegen u. a. an der unterschiedlichen Brutto-PV-Stromerzeugung und den Schwankungen im Stromverbrauch – aber auch am verbesserten Betrieb der Batteriespeicher im 2. Messjahr (siehe Kapitel 6.8).

Die Einspeisung der beiden Häuser liegt geringfügig höher als die Einspeisung am Netzverknüpfungspunkt (ca. 3,5 %). Da die Stromzähler zur Klasse B mit einer Genauigkeit von ±2 % gehören, ist zwar ein Austausch von PV-Erzeugung zwischen den beiden Gebäuden wahrscheinlich (vergleichbare Erzeugungsprofile bei unterschiedlichen Lastprofilen), aber messtechnisch im Rahmen der Messgenauigkeit kaum zu belegen. Die Nutzung der PV-Stromerzeugung ist in Kapitel 6.10 dargestellt.

**Bild 87: Monatliche Netzeinspeisung von Bestandsgebäude und Neubau sowie für das Gesamtprojekt**



## 6.8 Batteriespeicher

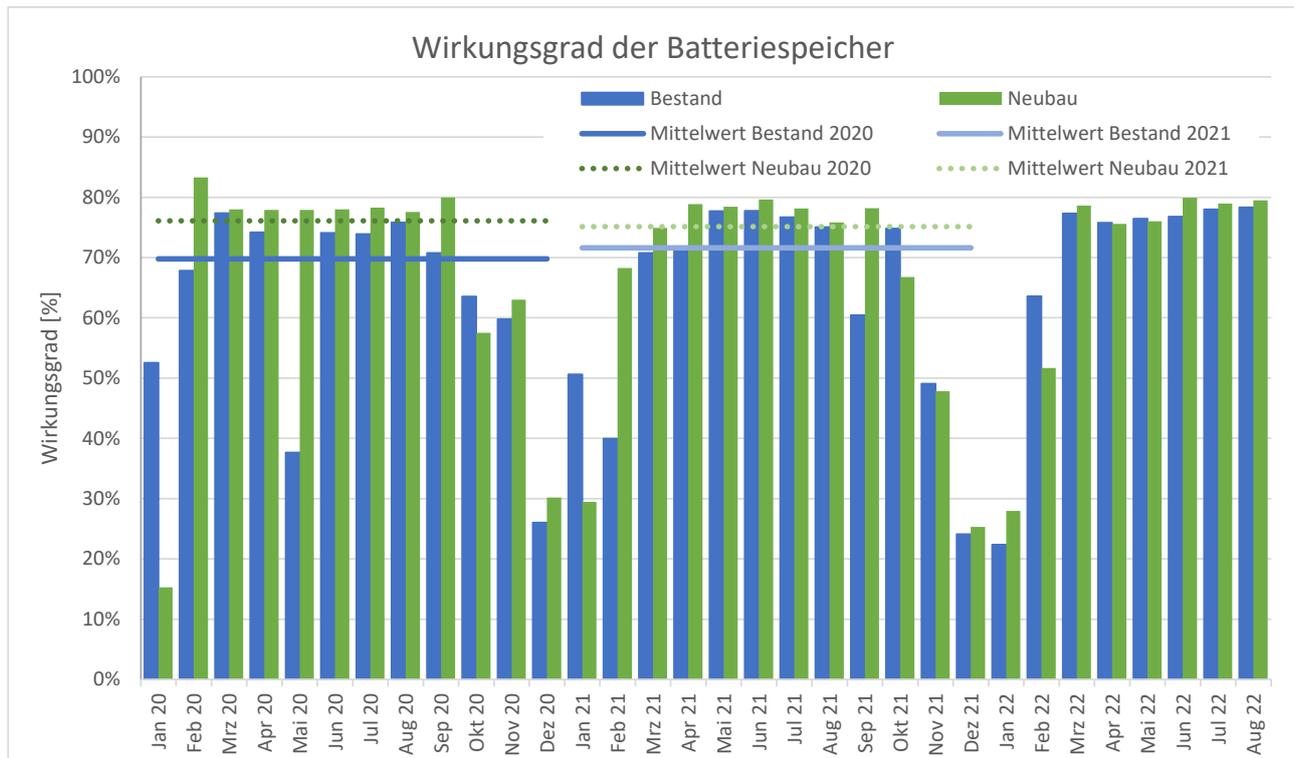
Die Batteriespeicher werden mit PV-Strom geladen, wenn dieser nicht vollständig im Gebäude verbraucht werden kann. Die maximale gemessene Ladeleistung beträgt beim kleineren Speicher des Bestandsgebäudes 4,7 kW (Herstellerangabe 3\*3 kVA), beim größeren Speicher im Neubau 10,3 kW (Herstellerangabe 3\*5 kVA). Die maximalen gemessenen Entladeleistungen liegen bei 5,0 kW im Bestandsgebäude und 9,7 kW im Neubau.

Berechnet man aus Batterieladung und -einspeisung den monatlichen Batteriewirkungsgrad, so ergeben sich die Werte in Bild 88. Im Winter wird der größte Teil der (geringeren) PV-Stromerzeugung direkt verbraucht und es steht nur wenig Energie zur Batterieladung zur Verfügung. Der Eigenverbrauch des kleinen Batteriespeichers (18 kWh Nutzkapazität) kann in den Nachtstunden im Winter, wenn die Einspeisung der Batterie zuverlässig beendet ist, auf ca. 25 W abgeschätzt werden. Beim großen Speicher liegt der Eigenverbrauch bei ca. 57 W. Im Winter bekommt dem Batterie-Eigenverbrauch eine hohe Bedeutung, was zu geringen Wirkungsgraden zwischen 20 und 30 % führt.

Teilweise traten auch technische Probleme bei den Speichern auf, so z. B. im Mai und September 2020 im Bestandsgebäude (Probleme mit dem Zellausgleich bzw. Batteriemangement) oder im Neubau z. B. im Februar 2021.

Im Mittel ergaben sich in den Jahren 2020 und 2021 Batteriewirkungsgrade von 70 bzw. 72 % beim Bestandsgebäude und 76 % bzw. 74 % beim Neubau (Tab. 22). Vom Hersteller gab es keine Angaben über den Gesamtwirkungsgrad der Speicher, so dass hier keine Vergleichsgrößen zur Verfügung stehen. Auf die nutzbare Speicherkapazität bezogen, ergaben sich 171 bzw. 176 Vollladezyklen beim Speicher im Bestandsgebäude und 182 bzw. 186 Vollladezyklen im Neubau (Tab. 22).

**Bild 88:** Monatlicher Wirkungsgrad der beiden Batteriespeicher sowie Jahresmittelwerte für 2020 und 2021



**Tab. 22:** Batteriekenndaten für beide vollständigen Messjahre

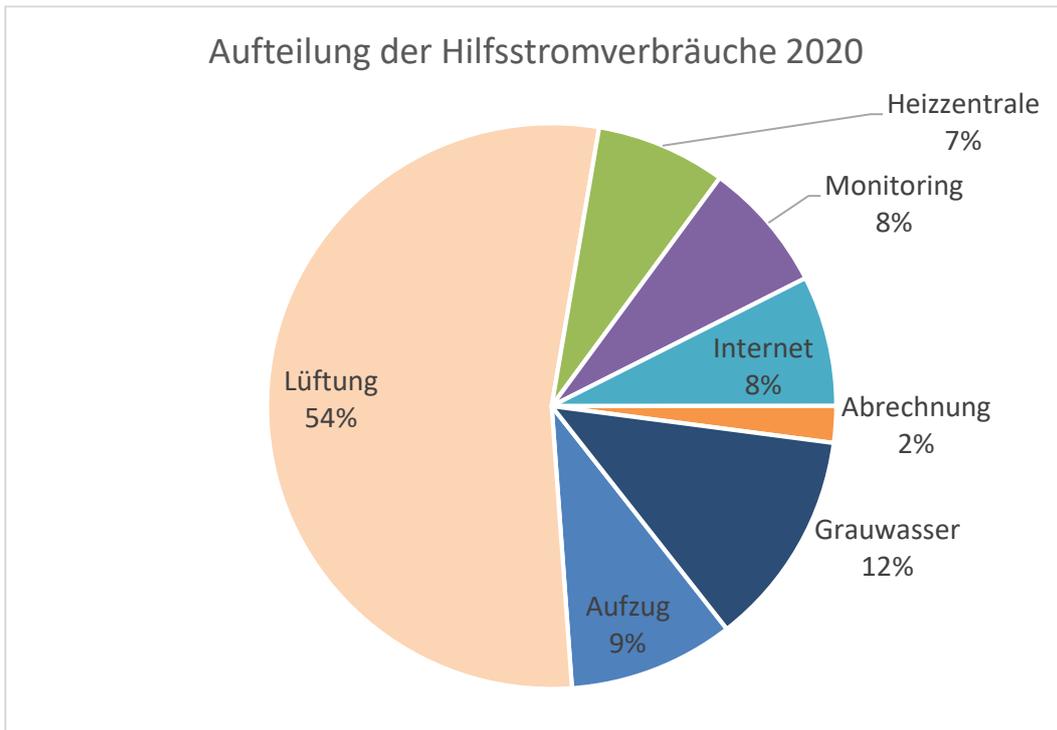
	Bestand		Neubau	
	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
Nominale Speicherzyklen	170,8	176,4	185,7	181,8
Batteriewirkungsgrad	70 %	72 %	76 %	74 %

## 6.9 Allgemein- und Hilfsstromverbräuche

Der Allgemeinstromverbrauch (vor allem Flur-, Treppen- und Außenbeleuchtung) lag beim Bestandsgebäude bei ca. 1,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und beim Neubau bei 1,1 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Die Hilfsstromverbräuche lagen für das Gesamtprojekt im Jahr 2020 bei 6,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Der größte Anteil mit 54 % bzw. 3,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) entfiel dabei auf die Lüftungsstromverbräuche in den Wohnungen, gefolgt von der Grauwasseranlage 12 %, dem Aufzug im Neubau (9 %) und der Heizzentrale mit 7 % (siehe Bild 89). Sonderaufwände speziell für das Projekt waren das Monitoring und die Internetversorgung (je 8 %) und die Budgeterfassung und Abrechnung (2 %), wobei die Abgrenzung zwischen Internetversorgung und Abrechnung schwerfällt, da diese zusammengehören (das WLAN-Netz wurde zur Kommunikation mit den Displays aufgebaut).

Zwischen den Messjahren gab es mit Ausnahme der Lüftungsanlagen (siehe Kapitel 6.9.1) nur geringe Unterschiede bei den Hilfsstromverbräuchen. Die Verbrauchswerte für die einzelnen Bestandteile des Hilfsstroms sind in Tab. 23 (für 2020) und Tab. 24 (für 2021) dargestellt.

**Bild 89: Prozentuale Aufteilung der Hilfsstromverbräuche für das Jahr 2020**



**Tab. 23: Jahressummen und -kennwerte der verschiedenen Bestandteile für Allgemein- und Hilfsstrom für das Jahr 2020**

2020	Bestand		Neubau	
	absolut [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	absolut [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
Lüftung	4.538,5	2,7	7.526,0	4,3
Heizzentrale	884,4	0,5	771,8	0,4
Internet	987,7	0,6	685,8	0,4
Abrechnung	259,5	0,2	209,9	0,1
Monitoring	1.041,9	0,6	632,2	0,4
Aufzug			2.111,0	1,2
Grauwasseranlage	2.771,1	1,6		
<b>Summe Hilfsstrom</b>	<b>10.483,1</b>	<b>6,2</b>	<b>11.936,7</b>	<b>6,8</b>
Allgemeinstrom	3.429,1	2,0	1.924,0	1,1

**Tab. 24: Jahressummen und -kennwerte der verschiedenen Bestandteile für Allgemein- und Hilfsstrom für das Jahr 2021**

2021	Bestand		Neubau	
	absolut [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]	absolut [kWh/a]	Kennwert [kWh/(m <sup>2</sup> *a)]
Lüftung	4.514,1	2,7	7.041,1	4,0
Heizzentrale	830,7	0,5	666,5	0,4
Internet	1.018,6	0,6	728,2	0,4
Abrechnung	354,8	0,2	299,4	0,2
Monitoring	1.037,1	0,6	634,3	0,4
Aufzug			2.105,0	1,2
Grauwasseranlage	3.485,3	2,1		
Summe Hilfsstrom	11.240,7	6,5	11.474,5	6,3
Allgemeinstrom	3.429,1	1,8	1.888,8	1,1

Im Folgenden werden die verschiedenen Verbrauchsbestandteile des Hilfsstroms dargestellt, die Stromverbräuche der Grauwasseranlage sind in Kapitel 6.6 dokumentiert.

### 6.9.1 Lüftung

In den beiden Gebäuden sind unterschiedliche Ausführungen des grundsätzlich gleichen Typs von Lüftungsanlagen eingebaut. Das Bestandsgebäude besitzt eine Ausführung ohne elektrisches Frostschutzregister und ohne elektronisch auslesbare Steuerung, da durch die Heizkörper in den Räumen ein Takten der Anlagen bei starkem Frost nicht verhindert werden muss. Der Neubau besitzt eine Ausführung mit elektrischem Frostschutzregister, um die Wärmeversorgung über die Zuluft auch bei Frosttemperaturen sicher zu stellen. Gleichzeitig besitzt die Regelung eine aufwändigere Elektronik, die fernausgelesen werden kann.

Beim Neubau lagen die Stromverbräuche in den ersten Betriebsmonat auffällig hoch. Eine detaillierte Analyse ergab, dass die Einschalttemperatur der Frostschutzregister zwischen 4 und 8 °C lag, was viel zu hoch eingestellt war (siehe Bild 90 links). Hintergrund war eine Kombination der Zuluft-Temperatur mit der Einschalttemperatur des Frostschutzregisters, die nicht getrennt eingestellt werden konnten. Lag die Zulufttemperatur zu gering, da das Gebäude noch aufgeheizt wurde, wurde das elektrische Frostschutzregister aktiviert. Am 24. November 2020 wurde im Rahmen der Wartung der Lüftungsanlagen eine neue Software eingespielt, die die getrennte Einstellung von Frostschutz- und minimaler Zuluft-Temperatur erlaubt. Nach dem Update wurde die Frostschutztemperatur auf +1 °C eingestellt. Anschließend reduzierten sich die Stromverbräuche der Lüftungsanlagen im Neubau bei vergleichbarer Außentemperatur deutlich (siehe Bild 90 rechts). Allerdings erhöhen sehr niedrige Außentemperaturen weiterhin den Lüftungsstromverbrauch (durch die gewollte Einschaltung des Frostschutzregisters).

**Bild 90:** Lüftungsstromverbrauch je Woche in Abhängigkeit der Außentemperatur im Neubau vor dem Update der Lüftungsanlagen im Januar 2020 (links) und nach dem Update im Januar 2021 (rechts)

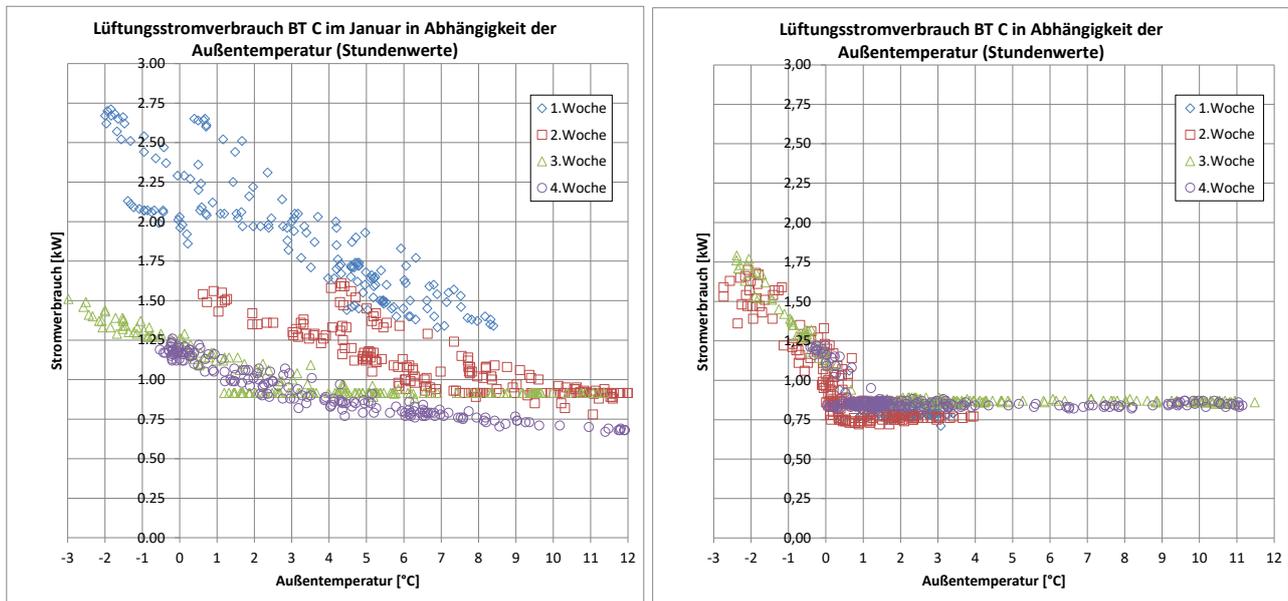
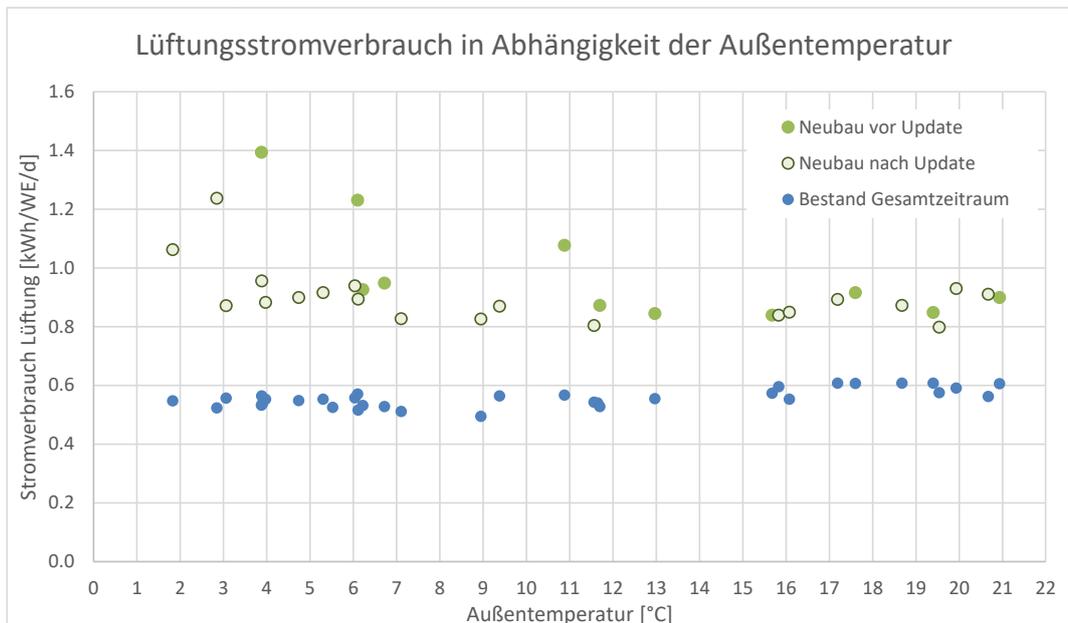


Bild 91 zeigt die Lüftungsstromverbräuche der beiden Gebäude je Wohneinheit und Monat in Abhängigkeit der Außentemperatur. Beim Bestandsgebäude schwanken die monatlichen Verbräuche nur wenig<sup>13</sup> und liegen bei ca. 0,56 kWh/WE/d. Der Grund-Stromverbrauch im Neubau (im Sommer) liegt aufgrund der abweichenden Elektronik mit ca. 0,86 kWh/WE/d um ca. 50 % über dem Wert des Bestandsgebäudes.

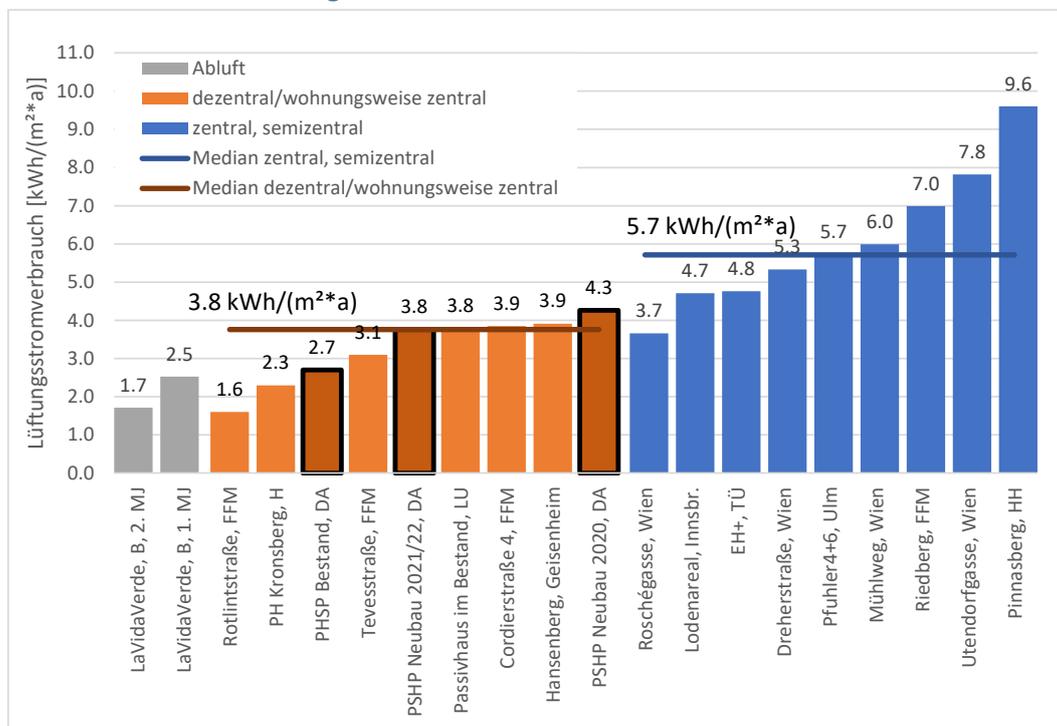
**Bild 91:** Lüftungsstromverbrauch je Monat in Abhängigkeit der Außentemperatur



<sup>13</sup> Die Schwankung des Stromverbrauchs wird außerhalb von Frostperioden hauptsächlich durch den eingestellten Luftvolumenstrom in den Wohnungen verursacht, beim Bestandsgebäude gilt dies ganzjährig.

Die Einordnung der Lüftungsstromverbräuche der beiden Gebäude im Vergleich zu anderen Mehrfamilienhäusern mit Lüftungsanlagen unterschiedlicher Bauart (nur Abluft, wohnungsweise „dezentral“, zentral) sind in Bild 92 zu sehen<sup>14</sup>. Für Abluftanlagen liegen nur aus einem Projekt (2 Messjahre) Messdaten vor, die Kennwerte liegen zwischen 1,7 und 2,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Bei den dezentralen bzw. wohnungsweise zentralen Anlagen, zu denen auch die im PassivhausSozialPlus gehören, schwanken die Messwerte zwischen 1,6 und 4,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Der Median liegt bei 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Das Bestandsgebäude des PassivhausSozialPlus erreicht in allen vermessenen Jahren vergleichsweise konstant 2,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und liegt damit unter den Verbräuchen anderer Gebäude mit diesem Lüftungsanlagentyp. Grund ist vermutlich hauptsächlich das nicht vorhandene Frostschutzregister. Beim Neubau des PHSP lag der Verbrauch im ersten Messjahr bei 4,3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), nach dem Software-Update und der veränderten Einstellung ist der Verbrauch auf 3,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) gesunken und liegt danach im Bereich des Median der ausgewerteten Lüftungsanlagen. Bei den zentralen Anlagen liegen die gemessenen Verbrauchswerte zwischen 3,7 und 9,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), der Median bei 5,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und somit etwa 1,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) über den dezentralen Anlagen. Die Streuung zwischen dem niedrigsten und dem höchsten Wert liegt fast beim Faktor 3.

**Bild 92: Lüftungsstromverbräuche verschiedener Mehrfamilienhäuser mit Lüftungsanlagen unterschiedlicher Ausführung**



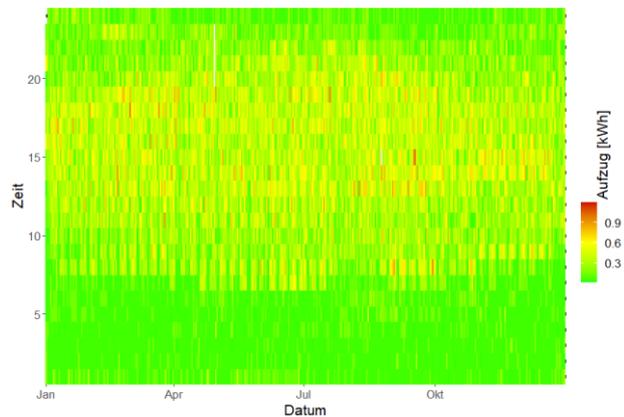
<sup>14</sup> Die Energiebezugsflächen können bei den verschiedenen Projekten unterschiedlich definiert sein.

### 6.9.2 Aufzug

Nur der Neubau besitzt beim PassivhausSozialPlus einen Aufzug. Dessen Stromverbrauch lag zwischen 121 und 191 kWh/(m<sup>2</sup>\*Monat), im Mittel bei 178 kWh/(m<sup>2</sup>\*Monat). Der niedrigste Wert trat im Januar 2020 auf, als noch nicht alle Mieter eingezogen waren. Die Schwankungsbreite der Verbräuche ist danach recht gering. In der Summe wurden im Jahr 2020 2.111 kWh/a verbraucht, im Jahr 2021 war der Verbrauch mit 2.104 kWh/a nahezu identisch. Flächenbezogen ergab sich ein Stromverbrauch von 1,19 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). In [Peper 2021] wird ein Passivhaus mit 16 Wohneinheiten bezüglich des Stromverbrauchs für den Aufzug ausgewertet, der dort mit 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) angegeben wird. Im Vergleich liegt der Verbrauch im Neubau des PassivhausSozialPlus somit mehr als doppelt so hoch. Da die Anzahl der Personen im Vergleichsobjekt nicht bekannt ist, kann ein Vergleich über die Anzahl der Nutzer nicht durchgeführt werden. Zudem sind im Neubau des PassivhausSozialPlus sechs Wohnungen rollstuhlgerecht gebaut und es kann vermutet werden, dass die Nutzer dieser rollstuhlgerechten Wohnungen zur Erschließung der Wohnungen in einem höheren Maße auf den Aufzug angewiesen sind.

In Bild 93 ist für alle Stunden des Jahres 2021 der stündliche Stromverbrauch des Aufzugs dargestellt. Auf der X-Achse sind die Tage des Jahres und auf der Y-Achse die Stunden des Tages zu sehen. Anhand der Farbverteilung (rot = hoher Verbrauch) ist erkennbar, dass der Aufzug überwiegend tagsüber und bis in die Abendstunden genutzt wird, nachts dagegen selten.

**Bild 93: Stromverbrauch Aufzug 2021: Stundenwerte des gesamten Jahres**

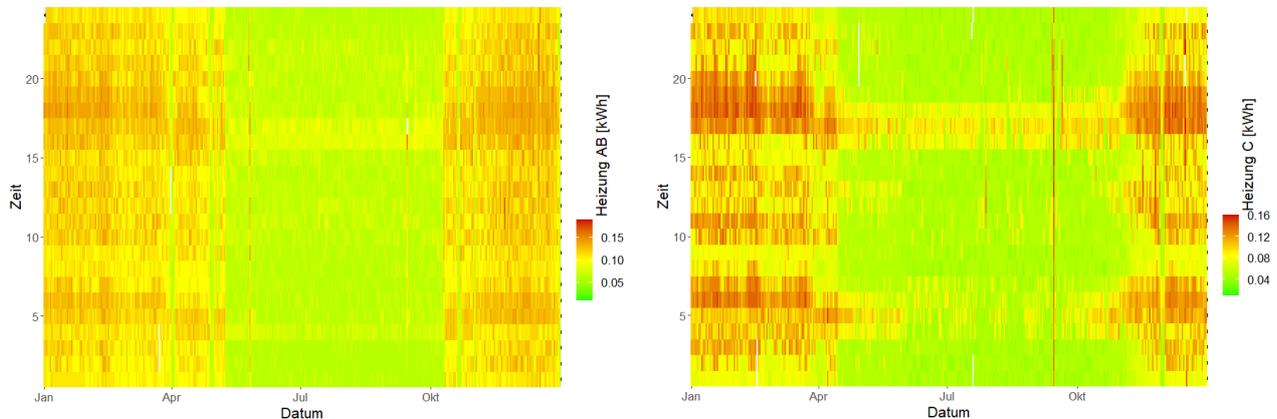


### 6.9.3 Heizzentralen

Die Stromverbräuche der beiden Heizzentralen lagen zwischen 666 und 884 kWh/a, was spezifischen Verbräuchen von 0,38 bis 0,52 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) entspricht. Im Bestandsgebäude ist das Leitungsnetz für die Beheizung größer, so dass auch eine höhere Pumpenleistung erforderlich ist, außerdem ist dort auch die zentrale Druckhaltungsanlage für das Gesamtprojekt installiert, deren Stromverbrauch aber nicht separat erfasst wurde.

Bei der Betrachtung der Stromverbräuche über ein Jahr erkennt man die Heizperiode mit höheren Stromverbräuchen sowie typische Tagesprofile, die hauptsächlich durch die Nachladezeiten der Pufferspeicher bestimmt werden. Beim Vergleich zwischen Bestandsgebäude (Bild 94 links) und Neubau (Bild 94 rechts) fallen außerdem die unterschiedlichen Zeitpunkte für die Abschaltung der Heizkreise auf. Beim Bestandsgebäude erfolgt dies außentemperaturgesteuert (Heizgrenztemperatur ca. 10 °C) später als im Neubau, bei dem im Zuge der Frühjahrswartung die Heizkreise händisch abgeschaltet werden. Aus diesem Grund werden die Heizkörper im Neubau auch später freigeschaltet, da die Herbstwartung der Anlagen erst Ende Oktober/Anfang November erfolgte.

**Bild 94: Stromverbrauch der Heizzentralen 2021 (Stundenwerte des gesamten Jahres), links Bestandsgebäude, rechts Neubau**



#### 6.9.4 Internet, Abrechnung und Monitoring

Für die Budgeterfassung und -abrechnung wurde zusätzliche Messtechnik in den Wohnungen installiert, deren Stromverbrauch getrennt gemessen wurde. Die Verbräuche lagen zwischen 259 und 414 kWh/a bzw. bei ca. 0,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Je Wohneinheit wurden 2020 pro Jahr 11,2 kWh/a verbraucht, im Jahr 2021 waren es 15,6 kWh/a.

Für die Displays in den Wohnungen wurde ein WLAN-Netz aufgebaut, das die Mieter mit begrenzter Bandbreite auch für private Zwecke mitnutzen können. Der Stromverbrauch für dieses WLAN-Netz lag bei ca. 1.000 kWh/a im Bestandsgebäude und 700 kWh/a im Neubau. Pro Wohneinheit ergaben sich Jahresverbräuche von ca. 40 kWh/(WE\*a) für die WLAN-Anbindung.

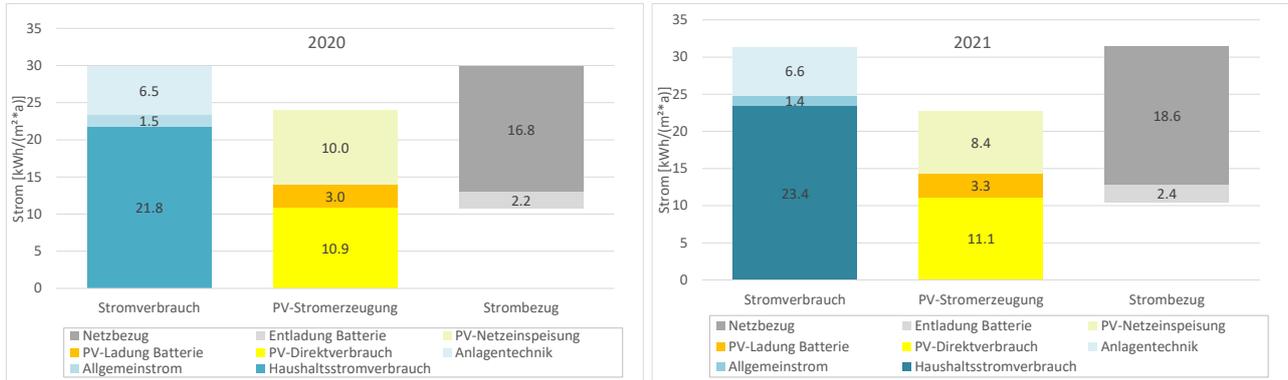
Für das wissenschaftliche Monitoring, das nur in den ersten drei Jahren durchgeführt wurde, lagen die Stromverbräuche bei 1.040 kWh/a bzw. 0,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Bestandsgebäude und bei 640 kWh/a bzw. 0,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) im Neubau. Einen nennenswerten Anteil am Mehrverbrauch im Bestandsgebäude verursacht vermutlich die Wetterstation durch die Beheizung ihrer Sensoren. Je Wohneinheit lagen die Stromverbräuche für das Monitoring bei ca. 40 kWh/(WE\*a).

### 6.10 Elektroenergiebilanz

Im Jahr 2020 lag der Stromverbrauch für das Gesamtprojekt bei 29,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (Bild 95 links). Der Haushaltsstromverbrauch besitzt davon einen Anteil von 73 %, der Allgemeinstrom 5 % und die Hilfsenergie 22 %. Die Stromerzeugung lag insgesamt bei 23,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a), davon konnten 10,9 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (46 %) direkt im Gebäude verbraucht werden, 3,0 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) wurden in die Batteriespeicher geladen und 10,0 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (42 %) ins öffentliche Netz eingespeist. Der Strombezug unterteilt sich in 2,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) durch die Entladung der Batteriespeicher (gespeicherter PV-Strom) und 16,8 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) Netzbezug.

Im Jahr 2021 lag der Haushaltsstromverbrauch mit 23,4 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) um 1,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) höher als in 2020, Allgemein- und Hilfsstrom waren nahezu unverändert. Die Stromerzeugung lag nur bei 22,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) (-1,2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a)) (Bild 95 rechts), gleichzeitig wurde weniger elektrische Energie ins Netz eingespeist und der Direktverbrauch lag mit 49 % (siehe Tab. 25) etwas höher. Aufgrund des höheren Verbrauches und der geringeren Erzeugung mussten 2021 18,6 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) bzw. 1,7 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) mehr aus dem Netzbezogen werden.

**Bild 95: Bilanz Stromverbrauch, Stromerzeugung und Strombezug des Gesamtprojekts für die Jahre 2020 und 2021**



Im Jahr 2020 wurden 58,1 % der erzeugten elektrischen Energie aus der PV-Anlage im Gebäude verbraucht (Tab. 25). Der Direktverbrauch erreichte 45,5 %, die direkt (und ohne Zwischenspeicherung in den Batterien) im Gebäude genutzt wurden. Der Deckungsgrad der PV-Erzeugung am Gesamtverbrauch des Gebäudes lag bei 43,6 %. Im Jahr 2021 ist aufgrund des höheren absoluten Stromverbrauchs der Eigenverbrauch auf 63,2 % gestiegen (Direktverbrauch 48,9 %), gleichzeitig ist der Deckungsgrad auf 40,9 % gesunken.

**Tab. 25: Eigenverbrauch, Deckungsgrad und Direktverbrauch der PV-Stromerzeugung für die Jahre 2020 und 2021**

	Eigenverbrauch [%]	Deckungsgrad [%]	Direktverbrauch [%]
2020	58,1	43,6	45,5
2021	63,2	40,9	48,9

Tab. 26 zeigt die Absolutwerte für PV-Stromerzeugung sowie den zugehörigen PV-Direktverbrauch, die Batterieladung und die Netzeinspeisung. Tab. 27 zeigt die Elektroenergieverbräuche der Haushalte, für Anlagentechnik und Allgemeinstrom sowie die Deckung dieser Verbräuche über PV-Direktverbrauch, Entladung der Batterie sowie Netzbezug. Aus den Zählerwerten ergibt sich eine Differenz von ca. 1.000 kWh/a im Bestandsgebäude und fast 2.000 kWh/a im Neubau, die jedoch im Bereich von 2 bis 4 % liegt und damit teilweise auch durch Messunsicherheiten begründet sein kann.

**Tab. 26: Jahressummen der PV-Stromerzeugung und deren Verwendung**

kWh/a Erzeugung	Bestand		Neubau	
	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
PV Direktverbrauch	19.292	19.821	18.858	18.787
PV Ladung Batterie	3.151	3.648	8.134	7.961
PV Netzeinspeisung	17.368	16.966	13.264	14.252
Summe PV-Erzeugung	39.810	40.436	40.257	41.000

**Tab. 27: Jahressummen des Stromverbrauchs und dessen Deckung**

kWh/a Verbrauch/Bezug	Bestand		Neubau	
	2020/21	2021/22	2020/21	2021/22
Verbrauch Wohnungen	38.934	41.061	40.934	38.758
Verbrauch Anlagentechnik	10.795	10.737	11.839	11.094
Verbrauch Allgemeinstrom	3.302	2.976	1.856	1.884
<b>Summe Verbrauch</b>	<b>53.030</b>	<b>54.774</b>	<b>54.630</b>	<b>51.736</b>
PV-Direktverbrauch	19.292	19.821	18.858	18.787
Entladung Batterie	2.245	2.649	6.142	5.897
Netzbezug	32.512	33.260	30.890	28.988
<b>Summe Deckung Stromverbrauch</b>	<b>54.048</b>	<b>55.730</b>	<b>55.891</b>	<b>53.672</b>
Differenz	1.018	956	1.261	1.936

## 7 Auswertung der Nebenkosten

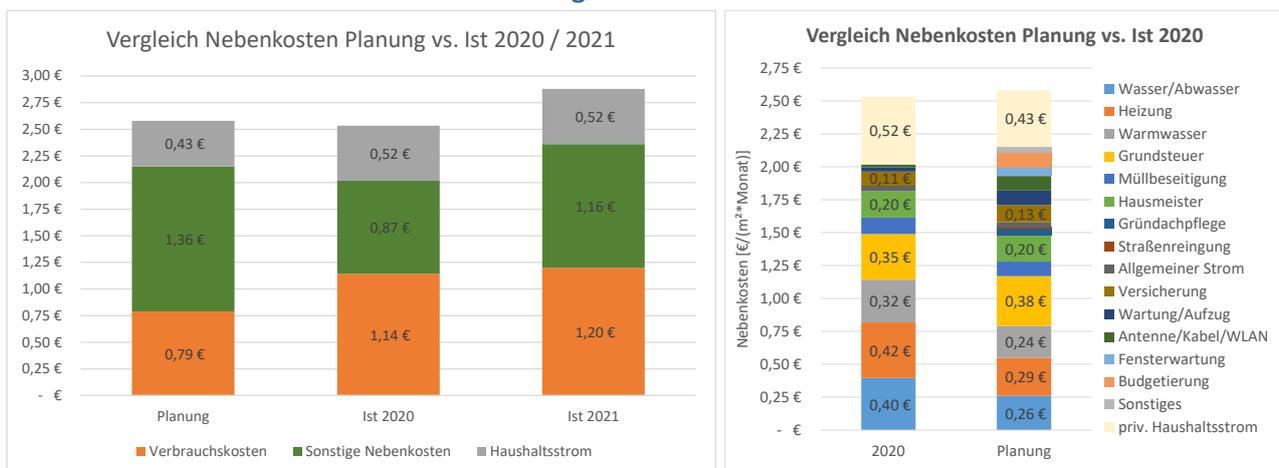
Ein wichtiger Aspekt im Bauvorhaben PassivhausSozialPlus (PHSP) war die Reduktion der Nebenkosten. Die Konzepte, die beim PHSP umgesetzt wurden, sind in [Großklos et al. 2018] und in Kapitel 2.5 dokumentiert. Bei der Analyse der gesamten Wohnkosten der Mieter muss zwischen der Nettokaltmiete, den Betriebskosten und den gesamten Nebenkosten unterschieden werden.

Das PHSP schuf insgesamt 42 geförderte Wohnungen auf der Grundlage der Richtlinien für den geförderten Wohnungsbau in Hessen. Die Netto-Kaltmieten im PassivhausSozialPlus dürfen 6,50 €/m<sup>2</sup>\*Monat nicht überschreiten. Die Mieten in den Wohnungen liegen damit deutlich unter der örtüblichen Vergleichsmiete im Jahr 2020 [MSP DA 2020], die in diesem Stadtteil bei vergleichbarer Ausstattung zwischen 12,15 €/m<sup>2</sup>\*Monat (4-Zimmerwohnung im Bestandsgebäude mit 93 m<sup>2</sup>) und 13,90 €/m<sup>2</sup>\*Monat (2-Zimmerwohnung mit 41,2 m<sup>2</sup> im Bestandsgebäude) liegt. Gleichzeitig wurden bei den Gebäuden der Passivhaus-Standard, PV-Stromerzeugung und ein sehr guter Ausstattungsstandard (inkl. Küchen, Batteriespeicher, ...) umgesetzt.

Zu den Betriebskosten werden alle Kosten der Nutzung der Wohnung gezählt, die in der Betriebskostenverordnung [BetriebKV] aufgezählt sind und in der Wohnung auch tatsächlich anfallen. Dazu gehören verbrauchsabhängige Kosten wie Wärme und Trinkwasser, Kosten die nach der Anzahl der Personen in der Wohnung umgelegt werden (z. B. Müllentsorgung) sowie sonstige Kosten wie Versicherungen oder Grundsteuer. Die Nebenkosten umfassen die Betriebskosten und weitere Kosten für die Nutzung der Wohnung, die aber nicht Bestandteil der BetriebsKV sind. Dazu gehören auch Kosten für Haushaltsstrom oder auch für einen Internetanschluss.

Bei den in Bild 96 links dargestellten Nebenkosten des PHSP sind auch der Haushaltsstrom und eine Grundversorgung mit Internet enthalten, die nicht zu den Betriebskosten zählen. Der Planungswert ohne Haushaltsstrom lag im Mittel über alle Wohnungen bei 2,15 €/m<sup>2</sup>\*Monat, mit Haushaltsstrom bei 2,58 €/m<sup>2</sup>\*Monat. Die abgerechneten Nebenkosten im Jahr 2020 betragen 1,14 €/m<sup>2</sup>\*Monat bei den Verbrauchskosten für Wärme und Trinkwasser, 0,87 €/m<sup>2</sup>\*Monat für sonstige Nebenkosten wie Grundsteuer, Gebäudereinigung oder Müllentsorgung und 0,52 €/m<sup>2</sup>\*Monat für Haushaltsstrom. Somit lag die Summe der abgerechneten Nebenkosten ohne Haushaltsstrom 2020 bei 2,02 €/m<sup>2</sup>\*Monat und 2021 bei 2,36 €/m<sup>2</sup>\*Monat.

**Bild 96: Vergleich der geplanten und der tatsächlichen Nebenkosten beim PHSP (links) und Vergleich der NK-Positionen zwischen Planung und Werten 2020**



Die vereinbarte Nebenkostenpauschale und die abgerechneten Kosten lagen im Jahr 2020 somit etwa in der gleichen Größenordnung, sodass die Ausgaben des Vermieters gedeckt waren. Allerdings fehlten die notwendigen Sicherheitszuschläge für Kostenschwankungen. Aus diesem Grund musste die Nebenkosten-

pauschale (ohne Haushaltsstrom) von ca. 2,10 €/m<sup>2</sup>\*Monat) zu Mietbeginn auf 2,50 €/m<sup>2</sup>\*Monat) erhöht werden.

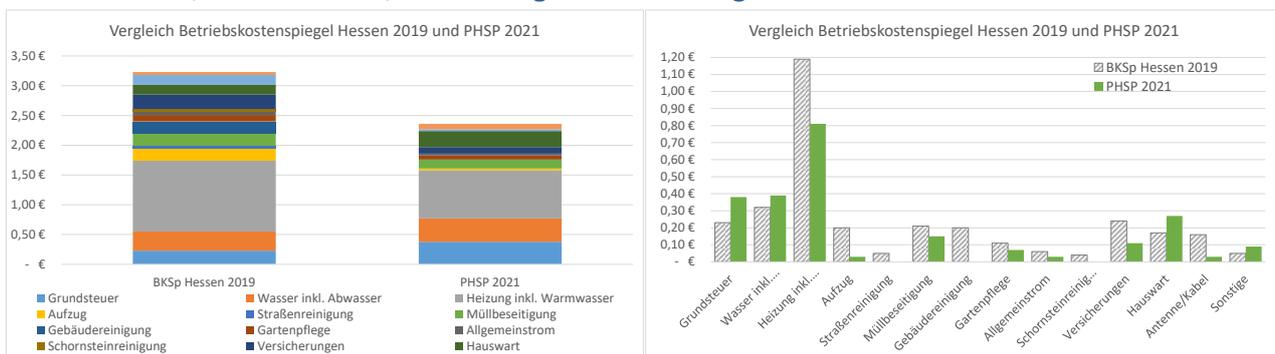
Auch beim PassivhausSozialPlus sind die Nebenkosten im Auswertzeitraum gestiegen. Da ein Teil der Mieter besonders bei Strom zukaufen musste, wurde das Budget für Strom von 0,52 € auf 0,68 € erhöht. Dennoch bieten der Passivhaus-Standard und ca. 40 % Eigendeckungsanteil durch die PV-Stromerzeugung eine deutliche Kostenbremse für die Mieter.

Bild 96 rechts zeigt den Vergleich zwischen Planung und Ist-Wert 2020 für die verschiedenen Nebenkostenpositionen. Hier sind insbesondere bei Wasser/Abwasser sowie Heizung nennenswerte Unterschiede festzustellen, da bei der Festsetzung der Pauschale verschiedene Aspekte womöglich vergessen wurden (Trinkwassernachspeisung Grauwasseranlage, Verteil- und Speicherverluste für Wärme im Gebäude). Da an anderen Stellen Kosten geringer ausgefallen sind, haben sich die Mehr- und Minderkosten in etwa ausgeglichen.

Auf die Ausnutzung der Budgets wurde bereits in den Kapiteln 5.8 und 5.9 eingegangen. Dort hat sich gezeigt, dass es in einigen Wohnungen Überschreitungen der Budgets gab. Mit allen Mietern, die ihre Budgets überschritten hatten, wurden im Juni/Juli 2020 Gespräche geführt. Die Displays in den Wohnungen waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht (durchgehend) in Betrieb. Alle Mieter zeigten sich interessiert – obwohl ein Teil von ihnen die Mehrkosten beim Wasserverbrauch nicht selbst tragen müssen – und es wurde besprochen, ob äußere Umstände für den Mehrverbrauch verantwortlich sind und wie diese reduziert werden können. Seit dem Dauerbetrieb der Displays wird den Mietern der Zukauf von Budgets in Rechnung gestellt. Eine automatische Abrechnung wäre softwaretechnisch möglich, wurde von der NWH aber nicht gewünscht, um auf die besonderen Randbedingungen einiger Mieter eingehen zu können. Im Jahr 2022 wurde das Budgets für Strom erhöht, damit sich der Aufwand für den Zukauf von zusätzlichen Budgets verringert. Wie in Kapitel 5.9 gezeigt, hat sich der Stromverbrauch trotz der Budgeterhöhung nicht signifikant erhöht.

Der Vergleichswert für die Betriebskosten des Deutschen Mieterbundes für 2019 lag ohne Internet und Haushaltsstrom bei 3,19 €/m<sup>2</sup>\*Monat) (anzurechnende Kosten im PHSP nach [DMB 2021]) (siehe Bild 97 links). In Bild 97 rechts sind die einzelnen Positionen bei den Betriebskosten miteinander verglichen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass im geförderten Wohnungsbau die Fläche je Person geringer ist und damit vor allem die Verbrauchskosten höher ausfallen. Zieht man die mittleren Betriebskosten nach SGB II zum Vergleich heran ([Arbeitsagentur 2021]), so lagen diese im sozialen (geförderten) Wohnungsbau in Darmstadt im Jahr 2020 bei 3,54 €/m<sup>2</sup>\*Monat) und 2021 bei 3,60 €/m<sup>2</sup>\*Monat), so dass sich beim PassivhausSozialPlus eine Einsparung um 43 % im Jahr 2020 ergeben hat.

**Bild 97: Vergleich Betriebskosten nach Betriebskostenspiegel Hessen 2019 ([DMB 2021]) und im PHSP 2021; links: Summen, rechts: Vergleich nach Kategorie**



Auch wenn das Abrechnungsjahr 2022 bei den Betriebskosten nicht mehr in den Auswertzeitraum dieses Berichts fällt, so kann erwartet werden, dass die umgesetzten Effizienzkonzepte und die Nutzung von PV-Strom den extremen Energiekostenanstieg Ende 2021 und vor allem im Jahr 2022 abgebremst haben.

## 8 Auswertung der Baukosten

Die Baukosten des Vorhabens wurden in [Großklos et al. 2021] detailliert ausgewertet und dokumentiert. Hier werden die wesentlichen Kenndaten noch einmal zusammengefasst.

Das Bauvorhaben PassivhausSozialPlus wurde in den Jahren 2018/19 umgesetzt. Bei den ausgewerteten Kosten handelt es sich um Bruttokosten inkl. Mehrwertsteuer. Es wurde in der Regel die vermietete Wohnfläche als Bezugsgröße verwendet, d.h. Balkone sind mit 25 % ihrer Fläche berücksichtigt.

Die Gesamtkosten für Bestandsgebäude und Neubau sind in Tab. 28 dargestellt und lagen für die Kostengruppen 100 bis 700 bei 10,36 Mio. € bzw. 3.174,77 €/m<sup>2</sup> Wfl.). Die Kosten für die Budgetvisualisierung und das wissenschaftliche Monitoring sind hier nicht enthalten und werden in Kapitel 8.1 ausgewiesen.

**Tab. 28: Kosten des Gesamtvorhaben nach Kostengruppen nach [DIN 276] (inklusive MWSt.) (Quelle: [Großklos et al. 2021])**

	Gesamtprojekt (Bestandsgebäude und Neubau)	
	absolute Kosten [€]	spezifische Kosten [€/m <sup>2</sup> Wfl.]
KG 100 (Grundstück)	2.832.660,77	868,04
KG 200 (Vorbereitende Maßnahmen)	218.732,74	67,03
KG 300 (Bauwerk - Baukonstruktion) *	3.916.935,98	1.200,31
KG 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) *	1.318.355,25	404,00
KG 500 (Außenanlagen und Freiflächen)	191.553,07	58,70
KG 600 (Ausstattung und Kunstwerke)	221.598,20	67,91
KG 700 (Baunebenkosten)	1.660.305,64	508,79
Gesamtkosten	10.360.141,65	3.174,77

\* ohne Monitoring und Visualisierung

Da die Randbedingungen für Bestandsgebäude und Neubau sehr unterschiedlich waren, sind in Tab. 29 die Kostengruppen 300, 400 und 600 getrennt ausgewiesen. Beim Bestandsgebäude entstanden in KG 300 (Baukonstruktion) Kosten von 1.090,30 €/m<sup>2</sup> Wfl.), in KG 400 (Technische Anlagen) lagen diese bei 378,33 €/m<sup>2</sup> Wfl.) und bei KG 600 (Ausstattungen) bei 70,19 €/m<sup>2</sup> Wfl.). Insgesamt lagen die Kosten bei KG 300 und KG 400, die häufig für Vergleiche mit anderen Bauvorhaben herangezogen werden, bei 1.468,63 €/m<sup>2</sup> Wfl.).

Beim Neubau sind in KG 300 Kosten von 1.314,34 €/m<sup>2</sup> Wfl.) angefallen, in KG 400 waren es 430,60 €/m<sup>2</sup> Wfl.) und in KG 600 65,78 €/m<sup>2</sup> Wfl.). In der Summe der KG 300 und 400 lagen die Kosten beim Neubau bei 1.744,94 €/m<sup>2</sup> Wfl.).

**Tab. 29: Aufteilung der Kostengruppen 300, 400 und 600 auf Bestandsgebäude und Neubau (Quelle: [Großklos et al. 2021])**

	Bestandsgebäude	Neubau
KG 300*	1.090,30 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)	1.314,34 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)
KG 400*	378,33 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)	430,60 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)
Summe KG 300+400	1.468,63 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)	1.744,94 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)
KG 600	70,19 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)	65,78 €/ (m <sup>2</sup> Wfl.)

\* ohne Monitoring und Visualisierung

## 8.1 Kosten einzelner technischer Anlagen

In Tab. 30 sind die Kosten für diejenigen Positionen in KG 400 dokumentiert, für die separate Kosten für Bestandsgebäude und Neubau vorlagen.

Die Kosten der Heizzentralen liegen mit 13,94 beim Bestandsgebäude bzw. 11,74 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) im Neubau in der gleichen Größenordnung, wobei in der Heizzentrale des Bestandsgebäudes der Anschluss an die Fernwärmeübergabestation und die Druckhaltung/Wassernachspeisung beide Gebäude versorgt. Die Wohnungs- bzw. Frischwasserstationen kosteten (ohne Leitungsnetz) 29,66 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 26,73 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.). Je Wohneinheit sind ca. 2.200 € an Kosten angefallen. Die Mehrkosten im Bestandsgebäude liegen an den geringfügig kleineren Wohnungen und einer großen Wohnung im Dachgeschoss, die über zwei Frischwasserstationen verfügt.

Für die Ertüchtigung der vorhandenen Heizungsverteilung und der Heizkörper in den Wohnungen des Bestandsgebäudes sind 18,85 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) angefallen. Darin enthalten ist die neue Anbindung der Steigstränge mit Volumenstromreglern, die horizontale Verteilung im Keller sowie die Einlagerung, Reinigung und Wiedermontage der Bestandsheizkörper. Im Dachgeschoss wurde außerdem eine neue Heizungsverteilung mit Heizkörpern installiert. Im Neubau lagen die Kosten mit 22,78 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) für die Beheizung (Nachheizregister und Badheizkörper) 17 % über denen des Bestandsgebäudes.

Die Lüftungsanlagen in den Wohnungen des Bestandsgebäudes verursachten Kosten von 76,90 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 5.805,50 €/ Wohneinheit. Darin enthalten sind die Lüftungsgeräte (48 % der Gesamtkosten), die Verlegung der Kanäle (50 % der Gesamtkosten) und die Leitungsdämmung. Die Verkleidung der Lüftungskanäle ist Bestandteil des Trockenbaus und konnte nicht separat ausgewiesen werden. Im Neubau entstand für die Lüftungsanlagen insgesamt Kosten von 89,47 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 7.168,41 €/ WE. Die Lüftungsgeräte besitzen im Neubau eine aufwändigere Regelung und ein Frostschutzregister, um die Beheizung der Wohnungen auch bei Frostgefahr sicherstellen zu können. Aus diesem Grund waren die Lüftungsgeräte mit 3.275 €/ WE ca. 500 € teurer als im Bestandsgebäude. Aber auch die Verlegung der Lüftungsleitungen verursachte Mehrkosten von 563 €/ WE. Ursache ist hier u.a. die größere Wohnfläche je Wohnung im Neubau. Für die Geräte für Treppenhauslüftung und Kellerlüftung sowie im Gemeinschaftsraum des Bestandsgebäude sind Kosten von 3,14 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) angefallen, anteilig umgelegt auf die Wohnungen lagen diese bei 237,25 €/ WE. Im Neubau entstanden Kosten für das Treppenhauslüftungsgerät sowie die Lüftung im Büro von 2,82 €/ (m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 225,89 €/ WE.

**Tab. 30: Kosten der technischen Ausstattung (KG 400) getrennt nach Bestandsgebäude und Neubau**

	Bestandsgebäude			Neubau		
	Gesamt-Kosten [€]	Kosten je m <sup>2</sup> Wfl. [€/(m <sup>2</sup> Wfl.)]	Kosten je Wohneinheit [€/WE]	Gesamt-Kosten [€]	Kosten je m <sup>2</sup> Wfl. [€/(m <sup>2</sup> Wfl.)]	Kosten je Wohneinheit [€/WE]
Heizzentralen	23.156,89	13,94	1.052,59	18.812,02	11,74	940,60
Frischwasserstationen	49.254,78	29,66	2.238,85	42.830,24	26,73	2.141,51
Heizungen	31.304,40	18,85	1.422,93	36.499,78	22,78	1.824,99
Lüftungsanlagen (inkl. Leitungen und Verkleidung)	127.720,93	76,90	5.805,50	143.368,12	89,47	7.168,41
Lüftungsgeräte Treppenhäuser + Keller	5.219,57	3,14	237,25	4.517,72	2,82	225,89
PV-Anlagen	50.513,51	30,41	2.296,07	50.812,43	31,71	2.540,62
Batteriespeicher	22.608,78	13,61	1.027,67	53.560,68	33,43	2.678,03
Aufzug				47.336,64	29,54	2.366,83
Küchen	112.263,21	67,59	5.102,87	100.950,90	63,00	5.047,55
Beleuchtung Wohnungen	11.169,00	6,72	507,68	9.704,00	6,06	485,20

Die PV-Anlagen kosteten 30,41 €/m<sup>2</sup> Wfl.) im Bestandsgebäude und 31,71 €/m<sup>2</sup> Wfl.) im Neubau, wobei die Anlage im Neubau eine um 6 % höhere Peakleistung besitzt. Eine detaillierte Auswertung hierzu findet sich weiter unten.

Für den Batteriespeicher im Bestandsgebäude ergaben sich Kosten von 13,61 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 1.291,93 €/kWh Nettokapazität. Im Neubau lagen die Kosten mit 1.222,85 €/kWh Nettokapazität leicht darunter, da die installierte Nettokapazität mit 43,8 kWh aufgrund der Anforderungen für das KfW-Effizienzhaus 40 Plus deutlich größer war. Die flächenbezogenen Kosten liegen bei 33,43 €/m<sup>2</sup> Wfl.). Bezieht man die Kosten auf die Bruttokapazität – die Nettokapazität ist immer auch von der Betriebsweise des Herstellers abhängig und kann variieren – so ergeben sich Werte von 1.023 €/kWh im Bestandsgebäude und 970 €/kWh im Neubau.

Der Aufzug im Neubau wurde mit 29,54 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 2.366,83 €/WE abgerechnet.

Alle Wohnungen wurden mit Einbauküchen und sehr energieeffizienten Küchengeräten ausgestattet. Im Bestandsgebäude ergaben sich Kosten von 67,59 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 5.102,87 €/WE. Im Neubau lagen die Kosten mit 63,00 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 5.047 €/WE leicht niedriger, obwohl in den sechs Rollstuhlwohnungen Zusatzkosten für die Anpassung der Küchen von 1.500 bis 2.000 € angefallen sind. Zusätzlich sind in den Rollstuhlwohnungen 2.251,60 €/WE für zusätzliche Objekte und andere Ausstattung in den Bädern angefallen (nicht in Tab. 30 dargestellt).

Die flächendeckende Installation einer LED-Beleuchtung in allen Räumen der Wohnungen verursachte im Bestandsgebäude Kosten von 6,72 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 507,68 €/WE. Im Neubau lagen die Kosten bei 6,06 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 485,20 €/WE.

Die in Tab. 31 dargestellten Anlagen bzw. Technikkomponenten konnten nicht auf die einzelnen Gebäudeteile aufgeteilt werden und werden aus diesem Grund für das Gesamtprojekt dargestellt. Die Grauwasseranlage, die das gesamte PassivhausSozialPlus versorgt, verursachte Kosten von 8,24 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw.

640,22 €/WE. In den Kosten ist die Erweiterung der Anlage im Sommer 2020 nicht berücksichtigt, da es sich um eine Testanlage des Herstellers handelt, die hier getestet wurde, ohne dass Kosten für die Neue Wohnraumhilfe angefallen sind.

Die Installation der WLAN-Versorgung, die für die Budget-Visualisierungs-Displays in den Wohnungen benötigt wurde und außerdem den Mietern in Form einer Internet-Grundversorgung kostenfrei zur Verfügung gestellt wurde, verursachte Kosten von 3,01 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 233,85 €/WE.

Das Budgetabrechnungs- und Visualisierungssystem inklusive Displays in den Wohnungen erzeugte Kosten von 38,02 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 2.954 €/WE. Hier muss berücksichtigt werden, dass es sich teilweise um Technik handelt, die für das Vorhaben speziell (weiter-)entwickelt wurde und somit kein Serienprodukt darstellt.

Schließlich lagen die Kosten für das wissenschaftliche Intensivmonitoring bei 91,12 €/m<sup>2</sup> Wfl.) bzw. 7.080,12 €/WE. Diese Kosten sind aufgrund der umfangreichen Anforderungen der Begleitforschung entstanden, wurden wie die Budgetabrechnung vom Bundeswirtschaftsministerium gefördert und fallen bei normalen Bauvorhaben nicht an.

**Tab. 31: Kostenpositionen der technischen Ausstattung (KG 400) für das Gesamtvorhaben**

	Anlagen für das gesamte PassivhausSozialPlus		
	Gesamtkosten [€]	Kosten je m <sup>2</sup> Wfl. [€/m <sup>2</sup> Wfl.]	Kosten je Wohneinheit [€/WE]
Grauwasseranlage	26.889,31	8,24	640,22
WLAN/Internet	9.821,78	3,01	233,85
Budgetabrechnung und Visualisierung	124.067,78	38,02	2.953,99
Monitoring (inkl. Planungskosten)	297.365,24	91,12	7.080,12
Zusatzkosten Küchen in Rollstuhlwohnungen	10.500,00		1.750,00
Zusatzkosten Ausstattung Bäder in Rollstuhlwohnungen	13.509,57		2.251,60

## 8.2 PV-Anlagen

Sowohl das Bestandsgebäude wie auch der Neubau wurden je mit einer PV-Anlagen ausgestattet. Die Anlage auf dem Bestandsgebäude wurde im Frühjahr 2019 installiert. Hier wurden 132 monokristalline Module à 310 W<sub>p</sub> in Ost/West-Ausrichtung verlegt (insgesamt 40,92 kWp). Im Sommer 2019 wurde die PV-Anlage auf dem Neubau installiert. Zu diesem Zeitpunkt waren nur noch Module des Herstellers mit 305 W<sub>p</sub> Leistung verfügbar, von denen 142 montiert wurden (insgesamt 43,31 kWp). Eine Besonderheit der Anlage stellt die Montage auf einem Gründach dar. Um für die Dachbegrünung ausreichend Freiraum unter den Modulen zu erhalten, wurden spezielle Halterungen des Gründach-Systemanbieters verwendet, die die Module bei 15 ° Neigung über dem Gründach aufständern und die Ballastierung in das Gründach integrieren.

Da beide Gebäude einen gemeinsamen Hausanschluss besitzen, erfolgt die elektrische Einbindung im Hausanschlussraum im Keller des Bestandsgebäudes. Dort ist auch der gemeinsame Netz- und Anlagenschutz (NASchutz) für die PV-Anlagen installiert, der aber bei den Kosten des Bestandsgebäudes enthalten ist. Kosten für das Messkonzept und die Zähler sind nicht in der Aufstellung der Kosten der PV-Anlage enthalten.

Tab. 32 zeigt die einzelnen Positionen der beiden Anlagen. Die Gesamtkosten lagen bei 1.234,45 €/kWp beim Bestandsgebäude und 1.173,23 €/kWp beim Neubau. Die Kosten der speziellen Unterkonstruktion lagen dabei über denen der PV-Module.

**Tab. 32: Absolute und spezifische Kosten für das Dach im Neubau (inkl. MwSt.)**

	Bestand		Neubau	
	absolut [€]	Kosten je kWp [€]	absolut [€]	Kosten je kWp [€]
Module	19.317,70	472,08	20.446,58	472,10
Wechselrichter	6.182,76	151,05	6.180,76	142,71
Solargeneratorkabel	797,30	19,48	571,20	13,19
Kabelkanal	464,10	11,34	45,70	1,06
Modulklemmen	944,19	23,07	0,00	0,00
Montagekosten	1.904,00	46,53	1.904,00	43,96
NA-Schutz	352,25	8,61	0,00	0,00
Unterkonstruktion	20.553,20	502,28	21.664,19	500,21
<b>Summe</b>	<b>50.513,51</b>	<b>1.234,45</b>	<b>50.812,43</b>	<b>1.173,23</b>

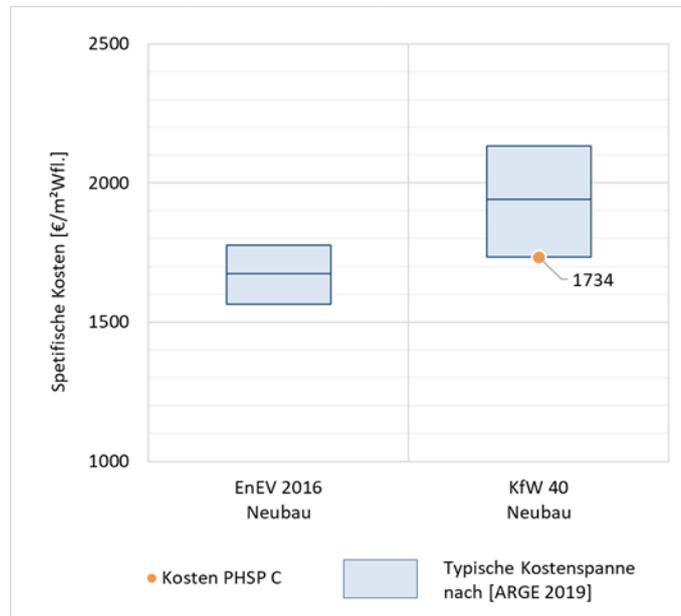
Für die PV-Anlage lag ein separates Angebot mit einer Standard-Unterkonstruktion für die Montage der PV-Module auf den Flachdächern vor, so dass die Mehrkosten der Konstruktion für das Gründach ausgewiesen werden können. Mit Standard-Unterkonstruktion hätten die Gesamtkosten für die PV-Anlagen bei 950 €/kWp gelegen. Die spezielle Gründachkonstruktion führte somit zu Mehrkosten von 284,42 €/kWp (Bestand) bzw. 223,21 €/kWp (Neubau) und erhöhen den Anlagenpreis um 30 bzw. 23 %.

### 8.3 Einordnung der Kosten

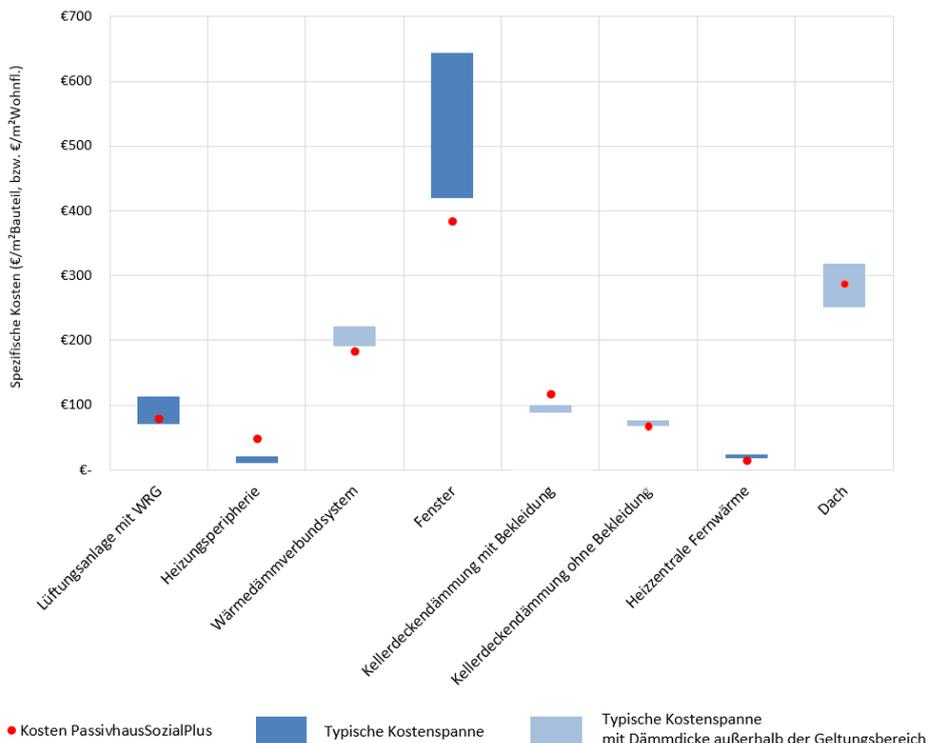
Vergleicht man die Baukosten des Passivhaus-SozialPlus (KG 300 und KG 400) mit Kostenspannen für Bauwerkskosten aus [ARGE 2014] und [ARGE 2019], so liegt der Neubau des Passivhaus-SozialPlus mit 1.734 €/m<sup>2</sup> Wfl.) ohne PV-Anlage (Module und Unterkonstruktion) im untersten Kostenbereich der ARGE für den KfW-Effizienzhaus 40-Standard und sogar noch innerhalb der Kostenspanne von EnEV Neubauten, wie auf Bild 98 zu sehen ist.

Das Bestandsgebäude des Passivhaus-SozialPlus wurde mit Kostenfunktionen aus [Hinz 2015] bzw. [Koch et al. 2021] verglichen (angepasst auf den Kostenstand 2019). Das folgende Bild 99 zeigt die Einordnung der Kosten des Passivhaus-SozialPlus grafisch. Beim modernisierten Bestandsgebäude liegen die Kosten für Lüftungsanlage mit WRG und Dachmodernisierung innerhalb der zu erwartende Kostenspanne. Die Kosten für WDVS, Fenster, Heizzentrale und Kellerdeckendämmung ohne Bekleidung, liegen leicht darunter, und die Kosten für die Ertüchtigung der bestehenden Heizungsperipherie sowie für die Kellerdeckendämmung mit Bekleidung liegen leicht darüber.

**Bild 98: Vergleich der spezifische Brutto-Bauwerkskosten des Neubaus des Passivhaus-SozialPlus mit typische Kostenspannen von [ARGE 2019]**



**Bild 99: Grafischer Vergleich der spezifischen Kosten von Modernisierungsmaßnahmen mit typischen Kostenspannen nach [Hinz 2015] für das modernisierte Bestandsgebäude**



## 9 Erfahrungen aus Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung

Vor Übergabe und Bezug der Wohnungen sollte die Anlagentechnik auf ihre Funktion getestet und gemäß den Planungsdaten parametrisiert werden. In der Praxis zeigt sich jedoch häufig, dass die Inbetriebnahme – oft wegen Zeitdruck – nicht gründlich durchgeführt wird und sich Abweichungen vom geplanten Betrieb ergeben oder die Anlagentechnik doch nicht optimal für die tatsächliche Nutzung eingestellt ist. Aus diesem Grund sollte – vor allem bei Gebäuden mit komplexerer Anlagentechnik – auch immer eine Optimierung zumindest am Anfang der Betriebsphase durchgeführt werden.

Beim PassivhausSozialPlus wurden über einen Zeitraum von ca. 30 Monaten die Betriebsweise der technischen Komponenten auf Basis der Messdaten analysiert, mit dem Sollbetrieb und der tatsächlichen Nutzung abgeglichen und Optimierungsvorschläge unterbreitet. Einige Ergebnisse sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

### 9.1 Inbetriebnahmephase und Fehlerbehebung

In Bauteil B des Bestandsgebäudes war zu Beginn der Heizperiode 2019/20 ein Heizungsstrang falsch angeschlossen, so dass die Temperaturen an den Heizkörpern zu niedrig waren. Dies wurde nachträglich korrigiert.

Bei der Budgetrückmeldung gab es in der Anfangszeit wegen Problemen in der Verkabelung, mit der Messdatenerfassung und des Ausfalls von Komponenten öfters Betriebsunterbrechungen, so dass sie nicht flächendeckend funktionierte. Aus diesem Grund wurde sie von Anfang April 2020 für einige Zeit komplett abgeschaltet, bis eine elektrische Schutzschaltung vor Ort montiert werden konnte. Bei der Montage wurde auch die Helligkeit der Displays in den Wohnungen kontrolliert, da diese sehr unterschiedlich aufgefallen war. Vor allem im Neubau hatten die Bewohner kaum Zugriff auf das System, so dass ihnen auch keine Rückmeldungen zum aktuellen Verbrauch bei den Bewohnern vorlagen.

Bei der PV-Anlage fiel im ersten Messjahr ein Wechselrichter aus, wodurch die PV-Erzeugung reduziert wurde. Aufgrund der Fernüberwachung der Energiegenossenschaft Darmstadt wurde dieser Fehler schnell entdeckt und behoben. Danach funktionierte die PV-Anlagen fast über den gesamten Berichtszeitraum problemlos.

Bei den Batteriespeichern traten in der Anfangszeit eine Reihe von Problemen und Ausfällen auf. Zu Beginn des Speicherbetriebs waren die Messwandler, die die PV-Stromerzeugung und die Rückspeisung ins öffentliche Netz erfassen nicht korrekt verdrahtet, so dass dies im Februar 2020 geändert werden musste. Danach scheint es Wackelkontakte an den Speicherzellen gegeben zu haben, wodurch ein Speicher ausgefallen war. Weiterhin zeigte sich, dass der Speicherwirkungsgrad zu gering war (deutlich unter den vom Hersteller abgeschätzten 80 %), was auf einen defekten Batterieblock zurückzuführen war, der anschließend ausgetauscht wurde. Beim größeren Batteriespeicher im Neubau war nach einige Monaten der Wechselrichter defekt, was durch ein Firmwareproblem des Wechselrichterherstellers entstanden zu sein scheint. Der Wechselrichter wurde im Oktober 2020 getauscht und die übrigen mit neuer Firmware ausgestattet. Immer wieder mussten die Speicher einen internen Zellausgleich vornehmen, so dass er nicht für die Energieabgabe zur Verfügung stand. Ab Februar 2021 waren dann beide Speicher nahezu durchgehend in Betrieb.

Auch bei der Grauwasseranlage sind Probleme nach der Inbetriebnahme aufgetreten. Außer der zu geringen Reinigungsleistung, die durch die Installation eines zusätzlichen Filters deutlich verbessert wurde (siehe Kapitel 6.6), gab es gelegentlich Beschwerden wegen Geruchsbelästigung, wenn die Anlagenleistung zu hoch eingestellt war. Dies konnte aber über den Fernzugriff des Herstellers leicht korrigiert werden. Außerdem drehte der Abluftventilator im Aufstellungsraum anfangs falsch herum, so dass die Luft nicht abgesaugt, sondern in den Raum eingeblasen wurde und die Anlage auch im angrenzenden Keller zu riechen war. Nach Anpassung der Drehrichtung konnte dieses Problem behoben werden.

Bei der Budgetabrechnung gab es zu Beginn Probleme mit der Verkabelung, da die Farben der verwendeten Adern nicht einheitlich belegt und die Verkabelung schlecht dokumentiert waren. Außerdem gab es Probleme mit der galvanischen Trennung zwischen dem Bussystem der Budgeterfassung und der Messdatenerfassung des Monitorings, wenn diese auf unterschiedliche Schnittstellen des gleichen Zählers zugriffen. Diese

wurde durch den Einbau von Platinen zur galvanischen Trennung gelöst. Die Displays, die speziell für die Anwendung im PassivhausSozialPlus entwickelt wurden, sind in der Anfangszeit öfter ausgefallen. Aufgrund der Pandemie und von Lieferschwierigkeit von Ersatzteilen konnten die Displays erst im Verlauf des Jahres 2020 in den Regelbetrieb gehen.

Generell zeigten sich in der Inbetriebnahmephase auch die Nachteile moderner, mikroprozessorgesteuerter Technik. Bei Lüftungsanlage, Batteriespeicher, Grauwasseranlage und auch z. B. Heizungspumpen waren Softwareupdates für eine korrekte Funktion erforderlich. Aus diesem Grund sind Anlagenüberwachung und Verantwortlichkeiten für die Fehlerbehebung für einen reibungslosen Betrieb der Technik sehr wichtig.

Es bestand in der Anfangszeit kein Überblick über den Zugriff von Handwerkern oder Firmen auf die unterschiedlichen anlagentechnischen Systeme. So wurde mehrmals ein demontierter Stellmotor des Warmwasserkreises in der Heizzentrale des Bestandsgebäudes entdeckt, ohne das nachvollzogen werden konnte, wer diesen aus welchem Grund wann, demontiert hat. Auch die Eingriffe des Elektrospeicheranbieters in die Software der Anlage, was zu abweichenden Betriebsweisen oder Abschaltungen der Speicher führte, wurden nicht dokumentiert. Aus diesem Grund wurde nach einiger Zeit ein physisches/elektronisches Wartungsbuch eingeführt, in dem alle Arbeiten dokumentiert wurden. Hier ist es jedoch wichtig die beteiligten Firmen auf eine gewissenhafte Dokumentation zu verpflichten.

Der Batteriespeicher ist Eigentum der Neuen Wohnraumhilfe, die PV-Anlage wurde von der Energiegenossenschaft Darmstadt errichtet und sie betreibt diese auch. Der Batteriespeicher erhöht den Eigenverbrauch aus der PV-Stromerzeugung und somit den Ertrag des Betreibers. Da getrennte Strompreise für PV- und Netzstrom vereinbart wurden, ergaben sich im Jahr 2020 bei einer etwa hälftigen Aufteilung der beiden Bezugsquellen ein mittlerer Strompreis von ca. 25 ct/kWh. Verluste des Speichers gehen hierbei zu Lasten der Neuen Wohnraumhilfe. Für zukünftige Projekte ist es ratsam, dass Eigentum und Betrieb in einer Hand liegen und ggf. ein Baukostenzuschuss gezahlt wird. Dadurch liegen Aufwand und Nutzen der Batteriespeicher beim gleichen Partner.

## 9.2 Betriebsoptimierung

### Wärmeversorgung

Die Heizgrenztemperatur sollte in den Gebäuden ursprünglich auf 8 °C eingestellt sein, tatsächlich waren aber 12 °C in der Regelung hinterlegt. Außerdem zeigte sich, dass bei Gebäuden mit einem sehr hohen energetischen Standard zwei unterschiedliche Heizgrenztemperaturen sinnvoll sein können. Im Herbst kann diese in der Regel niedriger liegen, die die Gebäude noch Wärme aus dem Sommer gespeichert haben, so dass hier 8 °C Heizgrenztemperatur ausreichen können. Im Frühjahr wäre dagegen eine Abschaltung bei dieser Temperatur zu früh, hier sind dann 10 °C oder auch 12 °C Heizgrenztemperatur erforderlich. Da eine manuelle Umstellung der Schwellwerte leicht vergessen wird, sollte in die Regelung die Einstellung von zwei getrennten Heizgrenztemperaturen je nach Jahreszeit möglich sein. Die hierfür erforderliche nachträgliche Umprogrammierung der Regelung wurde aus Kostengründen beim PassivhausSozialPlus nicht umgesetzt.

Weiterhin ist wichtig die Zuständigkeiten für Anpassungen bei der Anlagentechnik klar zu regeln. Diese können vom Fachplaner, der Handwerksfirma, dem Hausmeister des Eigentümers oder ggf. einem weiteren Dritten vorgenommen werden. Da damit immer auch Verantwortung für die korrekte Funktion der Anlagentechnik, Gewährleistungsfragen sowie Beschwerden der Mieter verbunden sein können, ist die klaren Zuordnung wichtig. Ggf. sind hier zusätzlich Aufträge für die entsprechende Organisation erforderlich.

Der Fernwärmeversorger fordert in seinen Technischen Anschlussbedingungen eine maximale Rücklauftemperatur von 50 °C, die im Sommer 2020 bei Nachladung der Pufferspeicher häufig überschritten wurden. Es zeigte sich, dass vor allem im Bestandsgebäude die Temperaturspreizung im Warmwasserkreis zu den Frischwasserstationen der Wohnungen sehr gering war, so dass über die Pufferspeicher in der Heizzentrale kaum eine Temperaturabsenkung unter 50 °C erreicht wurde und somit auch die Rücklauftemperatur der Fernwärme zu hoch lag.

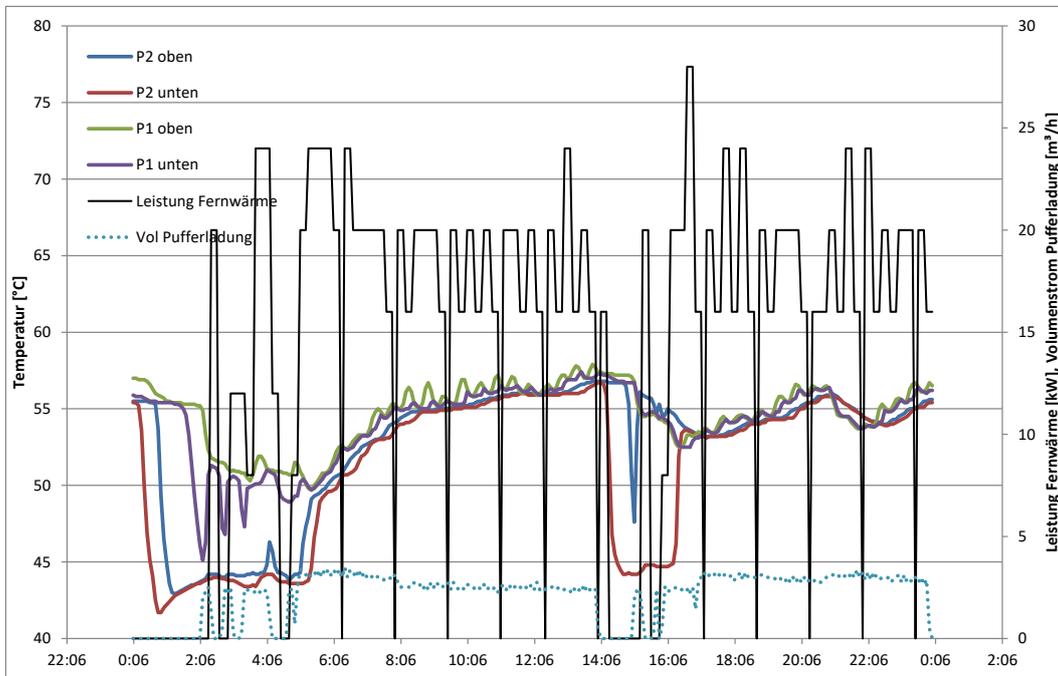
Alle Frischwasserstationen an den oberen Enden der Steigstränge der Warmwasserversorgung besitzen thermostatische Überströmventile, die auf eine Mindesttemperatur eingestellt sind, damit in den Wohnungen

schnell warmes Wasser zur Verfügung steht. Eine Auswertung der nächtlichen Temperaturen (kaum Warmwasserzapfung) an den Wärmemengenzählern dieser oberen Frischwasserstationen ergab, dass bei einer relativ weit von der Einspeisung entfernten Frischwasserstation nahezu die Einspeisetemperatur im Rücklauf erreicht wurde. Die Kontrolle vor Ort zeigte, dass das Ventil auf ca. 65 °C Überströmtemperatur eingestellt war. Da die Vorlauftemperatur für die Frischwasserstationen nur ca. 50 °C betrug, war es vollständig geöffnet und bildete einen thermischen Kurzschluss im Warmwasserkreis, wodurch die Temperaturspreizung nur bei ca. 3 K lag. Gleichzeitig stieg der Volumenstrom im Warmwasserkreis stark an, da der Rücklauf im Warmwasserkreis für die Mischung der Vorlauftemperatur verwendet wurde. Nach korrekter Einstellung des Überströmventils stieg die Temperaturspreizung von ca. 3 auf über 10 K an, gleichzeitig sank der Volumenstrom im Warmwasserkreis besonders nachts, wenn kaum warmes Wasser gezapft wurde, auf ein Drittel. Weiterhin wurden die Hysterese bei der Puffernachladung deutlich erhöht, so dass insgesamt die maximale Rücklauftemperatur von 50 °C regelmäßig unterschritten wurde.

Pufferladung

Im ursprünglichen Konzept für die Beladung der beiden Pufferspeicher je Gebäude wurden für die Pufferspeicher Temperatur-Sollwerte (T\_Puffer\_1 (hoch) bzw. \_2(niedrig)) und fünf Zeitscheiben für die Nachladung über den Tag verteilt definiert. Je nach Niveau (Höhe am Pufferspeicher) wurden in der entsprechenden Zeitscheibe die Solltemperatur über den Anteil der beiden Sollwerte berechnet (z. B.: Niveau3: Pufferschnitt =  $(3 \cdot T_{Puffer1} + 2 \cdot T_{Puffer2}) / 5$ ). Dies sollte die differenzierte Nachladung je nach voraussichtlicher Last ermöglichen (z. B. geringere Sollwerte in der Nacht zwischen 0:00 und 5:00 Uhr). Bei der Auswertung im ersten Jahr zeigte sich aber, dass diese nächtliche Sollwertabsenkung zu einem starken Absinken der Puffertemperatur (vor allem rote und blaue Linie in Bild 100) und hohen Nachladeleistungen bei Wiederinbetriebnahme führte.

**Bild 100: Beispielhafte Darstellung der Pufferladung im Bestandsgebäude am 30.11.2019 vor Optimierung des Betriebs**



Die nächtliche und nachmittägliche Abschaltung der Pufferladung wurden später durch einen gleichmäßigeren Betrieb ersetzt. Die angedachte Umprogrammierung der Heizungsregelung, um im Sommer zur Reduktion der Speicherverluste einen der beiden Pufferspeicher je Gebäude nicht zu beladen, konnte aus Kostengründen nicht umgesetzt werden.

### Lüftungsanlagen

Aufgrund der Corona-Beschränkungen wurde die im April 2020 geplante Lüftungswartung mit mechanischem Abstellen der Heizkreise in den Wohnungen im Neubau nicht umgesetzt, so dass auch bei hohen Raum- und Außentemperaturen teilweise noch Heizwärme abgenommen werden konnte. Diese Wartung mit Austausch der Grobfilter wurde Ende Mai/Anfang Juni 2020 von den Hausmeistern der NWH nachgeholt. Bei der regulären Wartung durch die Handwerksfirma im Oktober 2020 wurden Grob- und Feinfilter ausgetauscht. Gleichzeitig war beim Einsetzen der Heizperiode im Oktober 2020 die Wärmerückgewinnung bereits aktiv, da diese 2020 durch den Ausfall der Sommerumschaltung in diesem Jahr ganzjährig betrieben wurde. Generell ist eine rechtzeitige Wartung der Lüftungsanlagen vor Beginn der Heizperiode wichtig und muss mit den ausführenden Firmen fest vereinbart werden.

In den Wohnungen des Bestandsgebäudes wurden unterschiedliche Lüftungsanlagen eingebaut (wandhängende Geräte und Deckengeräte in der Küche in den kleineren Wohnungen). Da die Geräusentwicklung der Deckengeräte durchaus wahrnehmbar war, wurden die Volumenströme reduziert und dann vergleichsweise niedrig eingestellt.

Außerdem konnte durch die Messdatenauswertung und Betriebsoptimierung die Frostschutztemperatur der Lüftungsgeräte im Neubau reduziert werden (siehe Kapitel 6.9.1).

### Grauwasseranlage

Die Grauwasseranlage war Anfang Mai 2020 außer Betrieb und der Hersteller führte eine Wartung durch. Im Februar 2020 hatte der Hersteller bereits die Biologie der Anlage optimiert. Grundsätzlich müssen die Filter der Anlage monatlich kontrolliert werden. Der Grauwasseranfall scheint im Verhältnis zur Wassermenge zur Toilettenspülung zu gering zu sein. Um das Verhältnis von Grauwasser zu Betriebswasser zu verbessern, könnten grundsätzlich im Neubau die Waschmaschinen nachträglich an die Grauwasseranlage angeschlossen werden – die Möglichkeit dieser Installationen wurde bei der Planung entsprechend vorbereitet. Allerdings muss dann die Biologie auf die neue Zusammensetzung des Grauwassers eingestellt werden. Stattdessen wurde vom Hersteller im Juli 2020 ein zusätzlicher Filter installiert. Dieser besitzt im Gegensatz zur Bestandsanlage einen Trockenfilter. Für die Belüftung des Grauwassers wird die vorhandene Technik gemeinsam genutzt. Zur Verbesserung der Aufbereitungsleistung wurde über einen begrenzten Zeitraum täglich eine kleine Menge Mikroorganismen (EM) dem Grauwasser zugesetzt. Durch diese Maßnahmen konnte die Reinigungsleistung der Anlage deutlich verbessert werden (siehe Kapitel 6.6).

Die weitere Optimierung der Grauwasseranlage erfolgte schrittweise durch den Hersteller. Anfangs betrug die Verweildauer des Grauwassers 3 Stunden, in einem Test wurde diese auf 90 Minuten reduziert, was jedoch zu Geruchsbelästigungen und Schaumbildung geführt hat. Anschließend wurde die Anlage wieder auf längere Verweildauern zurückgestellt.

Da die gemessenen Mengen an Toilettenspülwasser vergleichsweise hoch lagen (siehe Kapitel 6.6) sollte im Rahmen der Wartung der Lüftungsanlagen auch überprüft werden, ob die Spar-Spülmengen evtl. zu gering eingestellt sind und deswegen häufig die große Spültaste verwendet wird. Von einigen Mietern gab es entsprechende Hinweise. Eine Rückmeldung, ob in nennenswertem Umfang die Spülmengen verändert wurden, liegt den Autoren nicht vor. In den Messdaten zeigte sich keine eindeutige Änderung der Verbrauchsmengen für die Toilettenspülung.

### Batteriespeicher

Die Batteriespeicher besaßen anfangs eine geringere nutzbare Kapazität, als vom Hersteller angegeben, da dieser zu Beginn des Betriebs die mögliche Entladetiefe nicht ausnutzte. Nach Rücksprache mit dem Hersteller konnte die Entladetiefe und damit die nutzbare Kapazität vergrößert werden.

### 9.3 Erfahrungen aus der Umsetzung des Vorhabens

Um die Erfahrungen der beteiligten Planer nach Abschluss der Bauphase zusammenzutragen und zu dokumentieren, wurde am 08.10.2020 ein Workshop mit Bauherrenvertretern, Projektsteuerung, Fachplanern und einigen Herstellern von innovativen Komponenten durchgeführt. Dabei sollten die Erfahrungen der verschiedenen Gewerke bei Technik, Planung, Ausführung und Inbetriebnahme diskutiert werden. Außerdem waren bestehende Verbesserungsmöglichkeiten, die Identifizierung von Schnittstellen und Reibungsverlusten sowie Erfahrungen des Bauherrn als Vermieter weitere Inhalte des Termins. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (zusammengefasst aus der ausführlichen Darstellung in [Großklos et al. 2021]):

Die Elektroinstallation besitzt aufgrund der steigenden Technisierung der (Wohn-)Gebäude eine zunehmende Bedeutung im Bauwesen und es bestehen wichtige Verknüpfungen und Schnittstellen zu weiteren Gewerken. Neben der klassischen Elektroinstallation sind auch spezielle Aufgaben wie Regelungstechnik, PV- und Batterietechnik, Aufzugstechnik oder Daten- und IT-Technik in den Bauablauf zu integrieren. Diese speziellen Komponenten werden teilweise von den Fachfirmen direkt geplant. Die Anforderungen sind dann an die Elektroplanung und -installation zurück zu koppeln und mit dieser abzustimmen. Hier hilft ein Schnittstellenkoordinator, der die Anforderungen der unterschiedlichen Parteien zusammenträgt, in der Planungsrunde kommuniziert und nachvollziehbar dokumentiert. Ist eine solche Institution nicht im Planungs- und Bauprozess vorhanden, muss in der Planungs- und Bauphase der direkte Kontakt zwischen den ausführenden Firmen sichergestellt werden. Bei Schwierigkeiten müssen die (Fach-)Planer den Kontakt koordinieren.

Beim Einsatz von Komponenten, die (noch) nicht zum üblichen Umfang von Wohngebäuden gehören (PV-Anlagen, Batteriespeicher, ...) ist eine sehr frühzeitige Absprache mit dem Netzbetreiber erforderlich, um Hausanschluss und Messkonzept rechtzeitig klären und planen zu können.

Nicht nur bei besonders innovativen, neuen Techniken ist bei der Planung zu prüfen, wie ein Betrieb der Technik dauerhaft sicherzustellen ist. Dies betrifft Fragen der Ersatzteilversorgung über 10 bis 20 Jahre, der Wartung (besonders im IT-Bereich) oder wie bei einer Insolvenz eines Anbieters der Weiterbetrieb sichergestellt werden kann, wenn dieser z. B. Cloud-Dienste anbietet oder Dienstleistungen über ein Portal des Anbieters bereitgestellt werden.

Es empfiehlt sich die Abteilung des Bauherrn, durch die die Anlagen später betrieben werden, in der Planungsphase mit zu beteiligen. Dadurch können die Planungsziele für den späteren Betrieb besser kommuniziert werden und Ansprechpartner sind bei Planern und ausführenden Firmen frühzeitig bekannt. Wenn nach Bezug des Objekts noch Probleme auftreten, ist es wichtig, dass die Ansprechpartner in der Vermietungsabteilung bzw. technischen Abteilung Kenntnisse über den Stand der Fehlerbehebung bekommen. Auch die Frage, wie Gewährleistungen und Wartungsverträge zu handhaben sind, muss rechtzeitig im Planungsprozess geklärt werden. Werden Küchen vom Vermieter gestellt, so hat sich ein Küchenhandbuch mit den Bedienungsanleitungen der Geräte bewährt. Der Vermieter benötigt dazu auch eine Verwaltung der Elektrogeräte, um den Austausch defekter Geräte nachverfolgen zu können.

Generell lässt sich zusammenfassen, dass zu Beginn der Planungen festgehalten werden sollte, welcher Planer und welche Firma welche Teilaufgaben plant und ausführt, welche Informationen über das Gesamtprojekt dafür erforderlich sind und wo hier Schnittstellen abzustimmen sind. Werden Vergaben oder Abläufe geändert, so muss das auch in dieser Schnittstellenliste angepasst und kommuniziert werden. Analog gilt dies für die Bauausführung und -überwachung. Da das Brandschutzkonzept eine Reihe von Gewerken betrifft, sollte dies neben der ausführlichen Fassung auch zusammengefasst an alle Beteiligte verteilt werden. Die Häufigkeit der Bauteamsitzungen ist der Arbeitsphase auf der Baustelle anzupassen, darüber hinaus ist ein enger Kontakt zwischen Planer und ausführenden Firmen erforderlich, an die die Planungsvorgaben kommuniziert werden müssen. Schließlich muss bei der Inbetriebnahme die Zusammenführung der unterschiedlichen Teilaufgaben sichergestellt werden. Hierfür sind Checklisten erforderlich, die auch die Gewerke- und Firmen-übergreifenden Anforderungen berücksichtigen. Die einzustellenden Parameter bzw. die Funktionsweise müssen vorab festgehalten werden.

Vor Fertigstellung der Wohnungen, wenn diese bereits verschlossen sind und einzelne Firmen noch Restarbeiten ausführen, reicht ein Schlüsselsatz für den Zugang zu den Wohnungen u.U. nicht aus. In dieser Phase kann eine elektronische Schließung, die auch den Zutritt protokolliert, hilfreich sein. Generell ist eine personell gut besetzte und engagierte Bauleitung für das Gelingen des Vorhabens von großer Bedeutung.

In der Übergabephase muss ausreichend Zeit für die Inbetriebnahme und Einregulierung eingeplant werden, die Einregulierung darf nicht in die Betriebsphase verlegt werden. Für die Zeit direkt nach Übergabe der Anlagen ist festzuhalten, wer diese betreibt und optimiert. Dies kann durch die ausführende Firma, den Fachplaner oder ggf. den Bauherrn/Vermieter erfolgen. Eine Betriebsoptimierung ist für den wirtschaftlichen Betrieb in der Regel immer sinnvoll. Für den kontinuierlichen Dauerbetrieb sind die Planungsziele und -werte, aber auch die Veränderungen während der Betriebsoptimierungsphase zu dokumentieren.

## 10 Übertragbarkeit der Ergebnisse und offene Forschungsfragen

Mit dem PassivhausSozialPlus wurden in mehreren Bereichen neue Konzepte entwickelt, umgesetzt und erprobt (z. B. Nebenkostenabrechnung, Budgets, Visualisierung, Grauwasseranlage im Wohnungsbau, ...). Hier stellt sich die Frage, wie sich diese in der Praxis bewähren und welche Schlüsse sich für die Übertragbarkeit auf andere Gebäude und Unternehmen ziehen lassen. Diese Aspekte sollen im Folgenden diskutiert werden.

### 10.1 Umsetzung PassivhausSozialPlus unter anderen Randbedingungen

Das PassivhausSozialPlus wurde mit besonderen Randbedingungen umgesetzt:

- Die Neue Wohnraumhilfe in Darmstadt als Bauherr ist eine gemeinnützige soziale Einrichtung und kein Wohnungsunternehmen und besaß damit nicht die organisatorischen Strukturen, die Wohnungsunternehmen oder Immobilienentwicklern zur Verfügung stehen
- Die Gebäude wurden auf einer Konversionsfläche mit einem bestehenden Gebäuderiegel umgesetzt.
- Umsetzung im Passivhaus-Standard bzw. mit Passivhaus-Komponenten
- Mit dem Jobcenter Darmstadt wurde abgesprochen, dass die pauschale Nebenkostenabrechnung mit Budgets für Wasser und Strom akzeptiert werden
- Mit dem Büro faktor10 haben erfahrene Architekten bei den Themen kostensparendes Bauen und Passivhaus die Planungen geleitet und teilweise auch die Bauleitung übernommen
- Umsetzung als geförderter Wohnungsbau mit den entsprechenden Anforderungen an Kaltmieten und Wohnflächen
- Zahlreiche Mieter, die staatliche Transferleistungen beziehen
- Zahlreiche Mieter mit teilweise geringen Deutschkenntnissen

Somit stellt sich die Frage, inwieweit das Konzept und die entwickelten Lösungen auf andere Bauherren, andere Nutzer, den frei finanzierten Wohnungsbau oder Projekte „auf der grünen Wiese“ übertragen werden können.

#### Unternehmensstruktur

Für die Neue Wohnraumhilfe war aufgrund ihrer Unternehmensstruktur als gemeinnützige soziale Einrichtung und ohne Vorerfahrung bei der Errichtung von Mehrfamilienhäusern die Umsetzung des PassivhausSozialPlus eine Herausforderung. Wohnungsunternehmen, Immobilienentwickler oder auch größere private Vermieter sollten die Aufgabe einer Umsetzung eines solchen Konzeptes leichter realisieren können, so dass hier eine Übertragbarkeit gegeben ist.

#### Umsetzung auf einem Konversionsareal mit bestehenden Gebäuden

Das Bestandsgebäude war ein typischer Vertreter dieses Gebäudetyps mit nur wenig Besonderheiten als Armeegebäude. Durch die Nutzung eines Teils der bestehenden Gebäude konnten zwar Kosten für den Rohbau eingespart werden, gleichzeitig gab es durch die bestehende Bausubstanz auch Begrenzungen z. B. bezüglich der Barrierefreiheit. Da Teile der Infrastruktur des Bestandsgebäudes vom Neubau des PHSP mit genutzt werden konnten (Grauwasseranlage, Elektro-Hausanschluss, ...), konnten bei diesem auch Komponenten eingespart werden. Einen wesentlichen Einfluss durch die Nutzung des Konversionsgebäudes wird aber nicht erwartet. Auf einem weiteren Grundstück direkt neben dem PHSP ist auch ein Nachfolgeprojekt PassivhausSozialPlus2 geplant, das auf einem unbebauten Grundstück umgesetzt werden soll und somit keine weiteren Vor- oder Nachteile durch ein Bestandsgebäude besitzt.

### Umsetzung energetische Standards

Hohe energetische Standards sind mittlerweile in der Baubranche eingeführt, das KfW-Effizienzhaus 40 wurde in den letzten Jahren immer stärker als Förderstandard genutzt. Auch der Passivhaus-Standard hat eine größere Verbreitung gefunden, auch wenn er aufgrund seiner höheren Anforderungen – insbesondere an die Lüftungsanlagen und Fenster – bisher deutlich weniger in der Breite umgesetzt wurde. Insgesamt ist das Know-how vorhanden und die technischen Randbedingungen für die Übertragung und Adaption der Konzepte sind als gut zu bezeichnen.

Als Herausforderung für eine Übertragung der energetischen Aspekte des PassivhausSozialPlus müssen die veränderten Förderbedingungen (Stand September 2023) besonders im Neubau gelten, da das KfW-Effizienzhaus 40 Plus als Förderstandard nicht mehr existiert und insbesondere PV-Anlagen und Batteriespeicher über ein separates, weniger attraktives Förderprogramm abgewickelt werden. Der QNG-Standard als neue zusätzlichen Anforderungen im Neubau, um die Förderung zu erhalten, bedeuten einen gewissen zusätzlichen Aufwand und kann bei Konzepten mit einem hohen Anteil an Beton oder Stahl behindern.

Für Bestandsgebäude wurden die Förderstandards zwischenzeitlich noch erweitert. Gab es zum Zeitpunkt der Umsetzung des PassivhausSozialPlus das KfW-Effizienzhaus 55 als höchsten Förderstandard im Bestand, so ist eine Erweiterung um das Effizienzhaus 40 (mit EE-Klasse) durchgeführt worden, so dass hier eine breitere Förderlandschaft vorliegt (das modernisierte Bestandsgebäude des PassivhausSozialPlus hätte diese höchste Stufe ebenfalls erreichen können).

Die soziale Wohnraumförderung liegt im Aufgabenbereich der Bundesländer, so dass hier jeweils eigene Regelungen gelten. Auch hier haben sich in Hessen die Förderrandbedingungen zwischenzeitlich verändert. Die Miete darf nun maximal bei 75 % der ortsüblichen Vergleichsmiete liegen und für Gebäude, die mindestens den Effizienzhausstandard 40 erreichen, kann diese Miete um 0,30 €/m<sup>2</sup> und Monat erhöht werden [Hessen 2023]. Modellprojekte zur Reduktion von Nebenkosten können eine zusätzliche Darlehenspauschale von bis zu 100 €/m<sup>2</sup> Wfl. erhalten. Auf Seiten der hessischen Förderung haben sich die Randbedingungen somit ungeachtet der Kostensteigerungen im Baubereich (siehe unten) deutlich gegenüber dem Zeitpunkt der Umsetzung des PassivhausSozialPlus verbessert.

### Pauschalierung der Nebenkosten

Die Pauschalierung der Nebenkosten bietet für Vermieter den Vorteil, dass die Betriebskostenabrechnung eingespart werden kann, was vor allem bei Wohnungseigentümern mit nur wenigen Wohnung und ohne eigene Abteilung für die Nebenkostenabrechnung von Vorteil sein kann. Außerdem können Streitigkeiten über die korrekte Abrechnung der Nebenkosten so (überwiegend) vermieden werden, was im Interesse aller Beteiligten liegt. Mieter profitieren darüber hinaus von planbaren Betriebs- und Wohnkosten.

Für eine Pauschalierung sind aus Sicht eines Vermieters vor allem planbare Kosten von Vorteil, wie z. B. die jährlich festgesetzten kommunale Gebühren/Abgaben (z. B. Straßenreinigung, Grundsteuer). Für stark variierende, individuelle Verbrauchskosten sollten bauliche oder organisatorische Vorkehrungen getroffen werden, damit die Pauschalierung nicht zu einem deutlichen Kostenanstieg für alle Mieter führt. Für die Heizwärme sieht die [HeizkostenV] aus diesem Grund die Pauschalierung nur für Gebäude mit einem sehr niedrigen Heizwärmebedarf von weniger als 15 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) vor. Hier fördern die gesetzlichen Randbedingungen die Planbarkeit für die Vermieter. Für Trinkwasser und Haushaltsstrom ist eine solch starke Reduktion der Verbräuche baulich kaum möglich bzw. für Haushaltsstrom nicht ohne weiteres zulässig. Dies kann aber so wie beim PHSP als Budget in der Pauschale gelöst werden (siehe unten).

Sinken die Verbrauchskosten durch baulichen Wärmeschutz deutlich, so steigt gleichzeitig prozentual der finanzielle Aufwand für Zähler und Abrechnung, so dass bei energieeffizienten Gebäuden die pauschale Abrechnung auch für die Mieter kostengünstiger wird als die verbrauchsabhängige Abrechnung.

Der starke, zuvor nicht absehbare Anstieg der Energiekosten im Jahr 2022 zeigte jedoch die Grenzen einer Pauschalierung von Energie- bzw. Verbrauchskosten auf. Zwar können Nebenkostenpauschalen maximal bis zum Vorjahr rückwirkend angepasst werden, was das Risiko für den Vermieter stark begrenzt, eine rückwirkende Anpassung über längere Zeiträume ist aber nicht möglich.

Voraussetzung für eine Pauschalierung der Nebenkosten ist eine entsprechende Vereinbarung im Mietvertrag, was für Gebäude mit bestehenden Mietverträgen eine Hürde darstellt. Auch eine nachträgliche Anpassung der Pauschale muss im Mietvertrag vereinbart werden. Grundsätzlich bietet die Pauschalierung der Nebenkosten – aller oder auch nur teilweise – die Möglichkeit, dass sowohl Mieter als auch Vermieter davon profitieren.

Mit der Pauschalierung von Energie verschiebt sich gleichzeitig auch die Interessenlage für den Vermieter. Er profitiert von einer guten Betriebsführung und niedrigen Verbräuchen, da diese seine Ausgaben bei gleichbleibenden Einnahmen reduzieren können. Damit können Pauschalmieten auch ein Anreiz für die Errichtung bzw. Erreichung energetisch verbesserter Gebäude mit niedrigem Verbrauch sein.

Grundsätzlich ist die Übertragbarkeit der Pauschalierung bei Neubauten gegeben, bei Gebäuden mit Bestandsmietverträgen müssten entsprechende Regelungen mit den Mietern nachträglich vereinbart werden.

### Nutzung von Budgets für Betriebs- bzw. Nebenkosten

Das Einbeziehen von Budgets in die Nebenkosten ist bisher noch wenig verbreitet und setzt eine Verbrauchs- bzw. Kostenrückmeldung an die Nutzer voraus. Für letzteres haben sich die Randbedingungen dahingehend verbessert, dass für Wärme in neuen Gebäuden monatliche Verbrauchsrückmeldungen zwischenzeitlich vorgeschrieben sind [HeizkostenV] und dies schrittweise in den nächsten Jahren auch auf Bestandsgebäude ausgeweitet wird. Damit verringert sich der Mehraufwand für eine zeitlich noch höher aufgelöste Verbrauchsrückmeldung, da bereits die monatliche Rückmeldung/Abrechnung quasi eine automatisierte Datenerfassung fast unumgänglich macht. Auch viele Abrechnungsunternehmen bieten hierfür bereits entsprechende Lösungen und Portale an. Im Bereich Haushaltsstrom stiegen die gesetzlichen Anforderungen an die Verbrauchserfassung in den vergangenen Jahren ebenfalls. Mit dem Einbau moderner Messeinrichtungen wird die Voraussetzung für eine kontinuierlich Auslesung der Verbrauchsdaten geschaffen. Die Erweiterung hin zu intelligenten Messsystemen (iMS) mit kontinuierlicher Datenerfassung und -übertragung ist bei Haushaltsstromkunden in den nächsten Jahren nicht in der Fläche wahrscheinlich (erst ab 6.000 kWh/a verpflichtend), außerdem stellt sich besonders hier die Frage nach der Zugänglichkeit der Daten der Zähler, da diese vom Messstellenbetreiber erfasst und verarbeitet werden. Da der Stromlieferant als Energieversorgungsunternehmen eingestuft wird, kann die Übertragung der Zählerdaten im Rahmen der üblichen Strommarktprozesse erfolgen. Dennoch ist die Aufteilung in die unterschiedlichen Akteure gegenwärtig als Hemmnis anzusehen.

Die im PHSP umgesetzte Visualisierung mit Displays in den Wohnungen stellte einen nicht unwesentlichen Aufwand dar. Hier können Smartphone-Apps oder Internet-Portale die Mieter deutlich kostengünstiger über die aktuelle Ausnutzung ihres Budgets informieren. Da die Displays im PHSP von den Mietern häufig genutzt wurden (siehe auch [Hacke et al. 2023]), sollte jedoch evaluiert werden, ob die Mieter ein Portal oder eine App im gleichen Umfang nutzen und diese im gleichen Umfang zur Verbrauchsreduktion motivieren.

Bisher verursachen Budgetüberschreitungen bei der Neuen Wohnraumhilfe einen zusätzlichen Verwaltungsaufwand, da diese händisch verarbeitet werden. Dies war allerdings explizit von der Neuen Wohnraumhilfe gewünscht, da gezielt eine Kommunikation mit den Mietern und Gespräche über die Gründe der Budgetüberschreitung oder Ratenzahlungsmodelle geführt werden sollten. Bei einer Übertragung auf andere Vermieter stellt dies jedoch kein Hinderungsgrund da, da das Budgetierungssystem auch die automatische Rechnungsstellung vorsieht. In einem Studentenwohnheim in Rostock wurde frei finanziert zwischenzeitlich ein vergleichbares Budgeterfassungs- und Abrechnungssystem umgesetzt, bei dem jedoch ein Internet-Portal und automatische Abrechnungen genutzt werden.

### Stromlieferung an die Mieter

Photovoltaikanlagen sind Stand der Technik, aufgrund der Herausforderungen an Mieterstrommodelle bisher jedoch nur wenig in Mehrfamilienhäusern verbreitet. Bei einer Lieferung von elektrischer Energie an die Mieter durch den Vermieter („Mieterstrom“) haben sich die Randbedingungen zwar grundsätzlich gegenüber dem PHSP verbessert (z. B. Absenkung der EEG-Umlage auf 0 ct/kWh, Lieferkettenmodell, Quartierbezug, ...)

[BNetzA 2023], die Hürden für Wohnungsunternehmen sind aber weiterhin hoch (energiewirtschaftliche Pflichten, steuerliche Behandlung von Erträgen aus Stromlieferung), so dass für Einzelprojekte von Wohnungsunternehmen die Einschaltung eines Dienstleisters geprüft werden sollte. Da hier aber neben Energieversorgern auch zahlreiche kleinere Firmen Dienstleistungen anbieten, haben sich bezüglich der Übertragbarkeit die Randbedingungen grundsätzlich verbessert.

Für Haushaltstrom ist eine verpflichtende Nutzung des Mieterstroms rechtlich nicht zulässig. Bei Neuvermietungen und wenn die Strompreise attraktiv für Mieter sind, sind jedoch hohe Teilnahmequoten zu erwarten. Wenn ein Strombudget Bestandteil der Mietpauschale ist, was mietrechtlich wohl nicht zu beanstanden ist (siehe [Behr, Großklos 2019]), ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Mieter für die Nutzung des Mieterstromangebotes entscheiden, sehr hoch. Dies reduziert auch den Aufwand bei der technischen Umsetzung von Mieterstrom. In [eG Cottbus] werden im freifinanzieren Wohnungsbau zwei Gebäude beschrieben, bei denen in der Energiekostenpauschale auch Haushaltsstrom enthalten ist. Die Pauschale für Haushaltsstrom ist dort mit ca. 3.500 kWh/WE für eine Wohnung mit 3 Personen so hoch kalkuliert, dass diese sehr wahrscheinlich von den Mietern unterschritten wird. Bei diesem Vorgehen wird aber der Aufwand für eine Budgeterfassung und -visualisierung eingespart, gleichzeitig reduziert sich aber auch der Kostenvorteil für die Mieter. Dennoch scheinen die Mieter in den Gebäuden die Vorteilhaftigkeit für sich selbst auch erkannt zu haben [EVERSOL 2020].

#### Maßnahmen zur Reduktion der Haushaltsstromverbräuche

Die Wohnungen im PHSP waren mit besonders stromsparenden Küchengeräten ausgestattet und alle Räume haben eine energieeffiziente LED-Grundbeleuchtung erhalten. Diese Investitionen haben zu sehr niedrigen Haushaltsstromverbräuchen bei den Mietern geführt, erhöhen jedoch – wie bei vielen Effizienztechniken (Investor-Nutzer-Dilemma) – die Kosten für die Vermieter. Außerdem erhöht sich auch der Aufwand für die Verwaltung und ggf. Reparatur von defekten Geräten. Grundsätzlich stehen einer Übertragung dieser Ansätze aber keine rechtlichen Hürden im Wege. Ggf. können die Mehrkosten bei den Investitionen durch eine höhere Kaltmiete gedeckt werden, wenn der Markt die zusätzliche Kaltmiete erlaubt bzw. die Obergrenze des Mietpiegels noch nicht erreicht ist, was aber in der Regel nur für Bestandswohnungen eine Rolle spielt.

#### Entwicklung der Baukosten

Die Rentabilität eines Bauprojekts wird u. a. von den Baukosten und dem Zinsniveau beeinflusst. Die Baukosten beim PHSP lagen durch entsprechende Planung und Umsetzung/Bauleitung im Vergleich mit anderen Gebäuden mit vergleichbarem oder schlechterem energetischem Standard sehr niedrig (siehe Kapitel 8). Allerdings sind die Baukosten in den letzten Jahren sehr stark angestiegen, wodurch zahlreiche Gebäude in ihrer Wirtschaftlichkeit gefährdet sind oder nicht mehr umgesetzt werden. Parallel sind auch die Hypothekenzinsen sehr deutlich angestiegen, wodurch die Finanzierung neuer Projekte immer schwieriger wird. Diese veränderte Marktsituation betrifft auch eine Übertragung des PHSP-Konzepts auf andere Unternehmen und Orte, ist aber nicht spezifisch für das spezielle Konzept des PHSP.

#### Absprachen mit Jobcenter zur Pauschalierung

Absprachen mit den lokalen Trägern von Grundsicherung erhöhen den Aufwand im Vorfeld der Umsetzung von Projekten. Sie sind vor allem wichtig, wenn im sozialen Wohnungsbau viele Mieter mit Unterstützungsleistungen zur erwarten sind. Hier wären Regelungen wünschenswert, die eine generelle Akzeptanz von Pauschalmietten erlaubt, wenn gewisse Anerkennungsgrenze unterschritten werden. Hier können somit auch gesetzgeberische Maßnahmen eine Umsetzung vereinfachen.

#### Weitere technische Komponenten

Gebäude mit einer hohen Technisierung benötigen einen etwas höheren Betreuungsaufwand, um die Anlagen dauerhaft effizient betreiben zu können. Grauwasseranlagen sind im Wohnungsbau noch wenig

verbreitet, sind aber besonders bei hohen Wasserpreisen interessant<sup>15</sup>. Hier sollten vor einer flächendeckenden Verbreitung Erfahrungen aus weiteren Projekten zusammentragen und ausgewertet werden. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Wasserknappheit im Sommer und den damit verbundenen steigenden Trinkwasserpreisen kann dies einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneinsparung darstellen.

Die Erfahrungen mit Batteriespeicher sind in den letzten Jahren auch in Mehrfamilienhäusern angestiegen – insbesondere aufgrund der bisherigen Förderung über des KfW-Effizienzhaus 40 Plus. Ob diese Speicher wirtschaftlich sind, ist im Einzelfall zu prüfen, sie können aber den Eigenverbrauch aus PV-Anlagen erhöhen. Auch Batteriespeicher sollten kontinuierlich betreut werden, um ihre Einsatzfähigkeit sicherzustellen.

## 10.2 Abgleich Nebenkosten mit Planungen

Bei dem Vorhaben konnten die Nebenkosten tatsächlich deutlich gesenkt werden (siehe Kapitel 7). Der ursprünglich angestrebte Zielwert von einer Nebenkostenpauschale von 2 €/m<sup>2</sup>\*Monat konnte aber nicht erreicht werden. Die Gründe dafür liegen in unterschiedlichen Bereichen, die sich wie folgt zusammenfassen lassen:

### Grundsätzliche Erreichbarkeit der Ziele

Für jedes Gebäude liegen regional individuelle Randbedingungen für die Reduktion der Betriebs- und Nebenkosten vor. Dies sind einerseits die Grundsteuer, die aufgrund unterschiedlicher Hebesätze in jeder Kommune unterschiedlich sein können, aber auch kommunale Gebühren für Müllentsorgung, Wasser und Abwasser oder Straßenreinigung (siehe Bild 97). Diese Positionen können kaum beeinflusst werden. Ein größerer Spielraum besteht bei den Verbrauchskosten durch bauliche (Wärmeschutz, Sparmaßnahmen) oder organisatorische Maßnahmen (Nutzung regenerativer Energien). Schließlich fallen Versicherungen oder Wartungs-, Reinigungs-, Hausmeister und Reparaturkosten an. Hier bestehen Kostensenkungspotenziale durch Bündelung von Verträgen oder dadurch, dass die Mieter erforderliche Arbeiten selbst durchführt (Reinigung, Gartenpflege, ...).

### Rechtliche Rahmenbedingungen

Insbesondere im Bereich der Stromerzeugung und -lieferung an die Mieter standen einer weiteren Senkung der Nebenkosten bedeutende rechtliche Hürden im Wege. Da die Neue Wohnraumhilfe als gemeinnützige Organisation keine Einnahmen aus Gewerbebetrieb erzielen durfte, musste der Betrieb der PV-Anlage und die Stromlieferung an die Mieter an einen Dritten übertragen werden (hier die Energiegenossenschaft Darmstadt EG DA). Diese ist zwar kein profitorientiertes Unternehmen, sondern sie strebt vorrangig den Ausbau der Solarenergienutzung und die Mitarbeit bei der Umsetzung der Energiewende an, dennoch sind in der Regel zusätzliche Einnahme/Profite für die Arbeit erforderlich.

Weiterhin sind die rechtlichen Anforderungen sowie die Berichtspflichten in der Stromwirtschaft hoch, so dass es für ein kleines Unternehmen wie die Neue Wohnraumhilfe kaum darstellbar ist, ihren Mietern selbst Strom zu liefern.

Diese Randbedingungen gelten vergleichbar auch für viele Wohnungsunternehmen, so dass insbesondere im Bereich Haushaltsstrom einer weiteren Reduktion der Stromkosten enge Grenzen gesetzt sind.

---

<sup>15</sup> Im frei finanzierten Wohnungsbau könnte im Vergleich zu Mietern in der Grundsicherung sogar ein größerer Anreiz zu sparsamer Wassernutzung entstehen, da der Wasserverbrauch in der Grundsicherung enthalten ist und damit vermutlich kaum ein Anreiz zu sparsamem Verhalten geschaffen wird. Dennoch lagen die gemessenen Wasserverbräuche im PHSP mit einem nennenswerten Anteil von Mietern in der Grundsicherung deutlich unter dem deutschen Mittelwert.

### Veränderungen bei der Umsetzung

Bei der Planung der Nebenkosten wurden, da es sich um ein neues Konzept handelte, einige Verbrauchs- bzw. Kostenaspekte nicht berücksichtigt. Dies betrifft z. B. die Verteil- und Speicherverluste bei der Wärmeversorgung, aber auch Mehrverbräuche aufgrund der höheren Personenbelegung im sozialen Wohnungsbau. Außerdem funktionierten einige technische Anlagen nicht so wie vom Hersteller versprochen (Batteriespeicher mit Schwierigkeiten zu Beginn und damit geringerem Eigenverbrauch von PV-Strom) bzw. es lagen keine Planungsgrundlagen vor. Dies betraf z. B. die Grauwasseranlage, von der nicht bekannt war, wie hoch die Grauwassermenge und der Deckungsgrad bei der Aufbereitung sein wird. Da der Deckungsgrad schließlich zwischen 60 und 70 % lag, musste mehr Trinkwasser nachgespeist werden.

### Allgemeine Preisentwicklung

Die deutliche Steigerung der Energiekosten seit 2021 hat auch das Projekt PassivhausSozialPlus beeinflusst. Der Bezugspreis für Strom, der aus dem elektrischen Netz bezogen wird, wurde erhöht, gleiches gilt für die Fernwärme. Dennoch konnten die Auswirkungen dieser Preiserhöhungen durch den Effizienzstandard der Gebäude und die Nutzung des Stroms aus den PV-Anlagen auf den Dächern der Gebäude in Verbindung mit den Batteriespeichern abgemildert werden.

## **10.3 Offene Forschungsfragen**

Das PassivhausSozialPlus war ein Umsetzungsprojekt und konnte nicht alle Fragen abschließend beantworten, die sich rund um die bearbeiteten Themen stellten. Insbesondere bei folgenden Aspekten sehen die Autoren weiteren Forschungsbedarf:

- Vereinfachungen bei der hochwertigen energetischen Modernisierung von Gebäuden  
Die energetische Modernisierung und der Neubau wurden mit einem klassischen Wärmedämmverbundsystem ausgeführt. Hier sollten Möglichkeiten der Vorfertigung (serielle Sanierung) bzw. elementiertes Bauen (Neubau) weiter geprüft und entwickelt werden, um die Baukosten zu minimieren und eine hohe Ausführungsqualität sicherzustellen.
- Reduktion des Herstellungsenergieaufwandes von Gebäuden  
Grundsätzlich sollte so viel vorhandene Bausubstanz erhalten werden wie möglich, um die Treibhausgasemissionen durch den Bauprozess zu begrenzen. Für den nicht zu vermeidenden Neubau müssen Konzepte und Hilfsmittel entwickelt werden, um den Herstellungsenergieaufwand zu minimieren und die unkomplizierte und schnelle Optimierung in der Planung zu ermöglichen.
- Baukostenentwicklung  
Durch die gestiegenen Baukosten sind die Randbedingungen für energetische Modernisierungen schlechter geworden. Ziel muss eine weitere Reduktion von Materialaufwand und Arbeitszeiten sein, damit energetische Modernisierungen wieder an Attraktivität gewinnen.
- Versorgungskonzepte mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien  
Die Gebäude des PassivhausSozialPlus sind an das lokale Fernwärmenetz angeschlossen. Wenn ein Fernwärmenetz aber nicht zur Verfügung steht oder die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung schneller vorangetrieben werden soll, als dies im Fernwärmenetz erfolgt, dann müssen Versorgungslösungen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien entwickelt werden, bevorzugt über den Einsatz von hohen Anteilen von Wärme aus Wärmepumpen und abhängig von den lokal zur Verfügung stehenden Wärmequellen.
- Erfahrungen Warmmiete  
Pauschale Warmmieten wurden in einzelnen Projekten bereits von unterschiedlichen Wohnungsunternehmen erfolgreich umgesetzt. Die konkreten Erfahrungen von Vermietern mit der Warmmiete, aber auch die Mieterperspektive, sollten wissenschaftlich untersucht und aufbereitet werden.

- **Pauschalisierung der Warmwasserbereitung ohne erneuerbare Energien**  
Im PassivhausSozialPlus wurde auf Basis der Heizkostenverordnung die Warmwasserbereitung ebenfalls pauschal abgerechnet, obwohl hier kaum bauliche Vorkehrungen zur Minimierung des Warmwasserverbrauchs getroffen werden konnten. Besonders attraktiv ist die Pauschalierung, wenn die Wärme zu einem hohen Anteil aus erneuerbaren Energien gewonnen wird (z. B. Wärmepumpen oder Solarenergie). Die Grenzen der pauschalen Abrechnung sollten vor dem Hintergrund des Einsatzes erneuerbarer Energien untersucht werden.
- **Bessere Anpassung der Grauwasseranlage an Bedarf und Angebot**  
Die Grauwasseranlage stellte eine der ersten Anlagen in einem Wohngebäude in Deutschland dar. Die Messdaten haben gezeigt, dass sowohl bei der Grauwassererfassung als auch bei den Konzepten zur optimierten Aufbereitung noch Lücken bestehen bzw. Planungs- und Auslegungsdaten noch nicht ausreichend zur Verfügung stehen.
- **Akzeptanz von Pauschalen und Budget im frei finanzierten Wohnungsbau überprüfen**  
Für die Anwendung von Pauschalen und Budget im frei finanzierten Wohnungsbau gibt es bisher nur wenig Vergleichsbeispiele. Hier sollte geprüft werden, wie diese Konzepte von anderen Nutzergruppen akzeptiert werden und wie hoch die Auswirkungen auf die Verbräuche sind.
- **Display, App oder Internetseite**  
Im PassivhausSozialPlus wurde die Verbrauchsrückmeldung über ein Display in der Wohnung realisiert. Um an dieser Stelle Aufwand und Kosten einzusparen, können Internetportale eine einfachere Lösung darstellen. Die Akzeptanz und die Lenkungswirkung von solchen Angeboten, die nicht in der Wohnung präsent sind, sollte mit den Displays verglichen werden.

## 11 Literatur

- [Arbeitsagentur 2021] Jobcenter Darmstadt: Statistik der Wohn- und Wohnkostensituation SGB II (Monatszahlen), Tabelle 1b HH. URL: [https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Einzelheftsuche\\_Formular.html?r\\_f=he\\_Darmstadt&topic\\_f=kdu-kdu](https://statistik.arbeitsagentur.de/SiteGlobals/Forms/Suche/Einzelheftsuche_Formular.html?r_f=he_Darmstadt&topic_f=kdu-kdu)
- [ARGE 2014] ARGE Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.: Untersuchung und Umsetzungsbetrachtung zum bautechnisch und kostenoptimierten Mietwohnungsbau in Deutschland. Bauforschungsbericht Nr. 66. Kiel, 2014.
- [ARGE 2019] ARGE Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.: Auswirkungen energetischer Standards auf die Bauwerkskosten und die Energieeffizienz im Geschosswohnungsneubau in Deutschland. Bauforschungsbericht Nr. 78. Kiel, 2019.
- [BBSR 2017] Nutzenergiebedarf für Warmwasser in Wohngebäuden. BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2017. ISSN 1868-0097. URL: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2017/bbsr-online-17-2017-dl.pdf?blob=publicationFile&v=1>
- [Behr, Großklos 2019] Behr, I.; Großklos, M.: Mieterstrom. (Rechtliche) Rahmenbedingungen und Möglichkeiten für eine regenerative Stromerzeugung und -versorgung in Gebäuden und Quartieren. Wohnungswirtschaft und Mietrecht (WuM) 72 (2019) 8: 409-417. Berlin, 2019.
- [Behr, Großklos 2017] Behr, I.; Großklos, M.: Praxishandbuch Mieterstrom. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2017.
- [BetriebKV] Verordnung über die Aufstellung von Betriebskosten. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/betrkv/>
- [BDEW 2021] Strombedarf der Haushalte. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 2021. URL: [https://www.bdew.de/media/documents/Grafik\\_BDEW\\_Stromverbrauch\\_Haushalte\\_nach\\_Gr%C3%B6%C3%9Fe.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Grafik_BDEW_Stromverbrauch_Haushalte_nach_Gr%C3%B6%C3%9Fe.pdf)
- [BDEW 2022a] Entwicklung des personenbezogenen Wasserverbrauchs in Deutschland. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Berlin, 2022. URL: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/entwicklung-des-personenbezogenen-wassergebrauches/>
- [BDEW 2022b] Entwicklung des personenbezogenen Wasserverbrauchs. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Berlin, 2022. URL: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/trinkwasser Verwendung-im-haushalt/>
- [BNetzA 2023] Bundesnetzagentur: Solaranlagen auf Mehrparteiengebäuden: Mieterstromzuschlag und Einspeisevergütung. URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEGAufsicht/Mieterstrom/start.html> (Stand 11.09.2023)
- [Bux, von Hahn 2020] Bux, Kersten; von Hahn, Nadja: „Trockene Luft“ – Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund/Berlin/Dresden, 2020. URL: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/Gd102.pdf?blob=publicationFile&v=6>
- [DIN 276] Deutsches Institut für Normung e.V.: Kosten im Bauwesen. DIN 276:2018-12. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [DIN 4108-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. DIN 4108-2:2013-02. Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- [DMB 2021] Deutscher Mieterbund: Betriebskostenspiegel für Hessen. Datenstand 2019. URL: [https://www.dmb-hessen.de/fileadmin/vereine/lv\\_hessen/pdf/BKS\\_AJ2019\\_Hessen.jpeg](https://www.dmb-hessen.de/fileadmin/vereine/lv_hessen/pdf/BKS_AJ2019_Hessen.jpeg)

- [DVGW 551] Arbeitsblatt W 551 - Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 2004.
- [DWD 2022a] Deutscher Wetterdienst: Sommertage: vieljährige Mittelwerte 1981 - 2010. DWD, Offenbach, 2022. URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/sommertage\\_8110\\_fest.html.html?view=naPublication&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/sommertage_8110_fest.html.html?view=naPublication&nn=16102)
- [DWD 2022b] Deutscher Wetterdienst: Heiße Tage: vieljährige Mittelwerte 1981 - 2010. DWD, Offenbach, 2022. URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/heissetage\\_8110\\_fest.html.html?view=naPublication&nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/heissetage_8110_fest.html.html?view=naPublication&nn=16102)
- [DWD 2022c] Deutscher Wetterdienst: Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen). DWD, Offenbach, 2022. URL: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten\\_sum.html?nn=16102](https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html?nn=16102)
- [EEG 2017] Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten, Fassung 2021. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2014/EEG\\_2017.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf)
- [eG Wohnen 2023] Internetseite eG Wohnen 1902: ERSTE ENERGIEAUTARKE MEHRFAMILIENHÄUSER IN COTTBUS. URL: <http://www.cottbus-sonne.de/#toggle-id-3-closed>, abgerufen am 20.09.2023
- [EVERSOL 2020] TU Freiberg: Sommerworkshop EVERSOL, Cottbus, 27./28.08.2020
- [faktor10/dga] Planungsunterlagen des Büro faktor10, Gesellschaft für Hochbauplanung mbH bzw. von dörfer grohnmeier architekten, Darmstadt, 2019.
- [Gängler 2020] Perspektive Studio D, Dominique Gängler- Architektur fotografie Plus, Darmstadt, 2020.
- [Großklos et al. 2018] Großklos, M.; Krapp, M.-C.; v Malotki, C.; Stein, B.: Ansätze zur Reduktion der Nebenkosten im sozialen Wohnungsbau am Beispiel des Vorhabens „PassivhausSozialPlus“ in Darmstadt, Untersuchung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2018. URL: [www.iwu.de/forschung/handlungslogiken/passivhaussozialplus/](http://www.iwu.de/forschung/handlungslogiken/passivhaussozialplus/)
- [Großklos et al. 2021] Großklos, M.; Behem, G.; Müller, A.; Swiderek, S.; Stein, B.: PassivhausSozialPlus – Konzept, Umsetzung, Kosten und Ergebnisse des ersten Messjahres. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2021. URL: [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2021\\_IWU\\_GrossklosEtAL\\_PassivhausSozialPlus-Konzept-Umsetzung-Kosten-Ergebnisse-erstes-Messjahr.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/energie/mobasy/2021_IWU_GrossklosEtAL_PassivhausSozialPlus-Konzept-Umsetzung-Kosten-Ergebnisse-erstes-Messjahr.pdf)
- [Hacke, Großklos ] Hacke, U.; Großklos, M.: „PassivhausSozialPlus - Pauschalmiete, Nebenkostenbudgets und Wohnverhalten - Ergebnisse einer Mieterbefragung“. MOBASY-Teilbericht, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt. (in Bearbeitung)
- [HeizkostenV] Verordnung über die verbrauchsabhängige Abrechnung der Heiz- und Warmwasserkosten, Fassung 2022. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/heizkostenv/>
- [Hessen 2023] Richtlinie des Landes Hessen zur sozialen Mietwohnraumförderung. Wiesbaden, Mai 2023. URL: [https://wohnungsbau.hessen.de/sites/wohnungsbau.hessen.de/files/2023-06/rili\\_soz\\_mietwohnraumfoerderung2023.pdf](https://wohnungsbau.hessen.de/sites/wohnungsbau.hessen.de/files/2023-06/rili_soz_mietwohnraumfoerderung2023.pdf)
- [Hinz 2015] Hinz, E.: Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2015.
- [IWU 2022] Institut Wohnen und Umwelt: Gradtagzahlen Deutschland. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2022. URL: <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205>
- [Klimaschutz 2023] Webseite: Mein Klimaschutz. URL: <https://www.mein-klimaschutz.de/zu-hause/d/wasser-sparen/wasserverbrauch/durchschnittlicher-wasserverbrauch/>, abgerufen am 06.03.2023

- [Koch et al. 2021] Koch, T.; Achenbach, S.; Müller, A.: Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. Werkstattpapier. Institut Wohnen und Umwelt, 2021.
- [ibs Energie 2019] Planungsunterlagen Ingenieurbüro Schäfer (Stromberg) auf Basis von Plänen von dörfer grohnmeier architekten (Darmstadt). Stromberg/Darmstadt 2019.
- [Loga et al. 2003] Loga, T.; Großklos, M.; Knissel, J.: Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2003.
- [Loga et al. 2022] Loga, T.; Behem, G.; Swiderek, S.; Stein, B.: Verbrauchsbenchmarks für unterschiedliche Dämmstandards bei vermieteten Mehrfamilienhäusern. Statistische Auswertung der MOBASY-Mehrfamilienhaus-Stichprobe. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2022.
- [MSP DA 2020] Wissenschaftsstadt Darmstadt: Mietspiegel Darmstadt 2020. URL: [https://www.darmstadt.de/fileadmin/PDF-Rubriken/Leben\\_in\\_Darmstadt/wohnen/Mietspiegel\\_2020.pdf](https://www.darmstadt.de/fileadmin/PDF-Rubriken/Leben_in_Darmstadt/wohnen/Mietspiegel_2020.pdf)
- [NWH 2020] Wohnungszuschnitte des PassivhausSozialPlus. Neue Wohnraumhilfe, Darmstadt, 2020. URL: <https://www.passivhaussozialplus.de/wohnen.html>
- [Nygaard, Leemann 2012] Nygaard, P.; Leemann, A.: Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung. EMPA, Dübendorf 2012.
- [Peper 2021] Peper, S.: Passivhaus BuildTog Bremen-Findorff – Energetische Untersuchung – Endbericht. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2021.
- [PHPP 2017] Passivhaus Institut: Passivhaus Projektierungs-Paket. Version 9.7. Passivhaus Institut, Darmstadt, 2017.
- [Schaede, Großklos 2013] Schaede, M.; Großklos, M.: Mehrfamilienhäuser als Passivhäuser mit Energiegewinn (PH+E), Endbericht. — Untersuchung i. Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung: 119 S.; Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, 2014.
- [StAnz Hessen 2017] Staatsanzeiger Hessen: Soziale Wohnraumförderung, Erwerb von Belegungsrechten. StAnz. 17/2017 S. 466. URL: <https://www.staatsanzeiger-hessen.de/download/StAnz-Hessen-Ausgabe-2017-17.pdf#page=2>
- [Statista 2016] Anteil von Warmwasser am Gesamtwasserverbrauch in Mehrfamilienhäusern in Deutschland nach Gebäudegröße im Jahr 2015. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585066/umfrage/warmwasseranteil-am-verbrauch-in-mehrfamilienhaeusern-nach-gebaeudegroesse-in-deutschland/>
- [Statista 2023] Brandt, M.: Der Wohnungsmarkt wird immer unsozialer. Statista, 2023. URL: <https://de.statista.com/infografik/12473/immer-weniger-sozialwohnungen-in-deutschland/>
- [Stein et al. 2023] Stein, B.; Großklos, M.; Müller, A.; Loga, T.: MOBASY-Teilbericht PassivhausSozialPlus – Messergebnisse der Fensteröffnungszeiten aus zwei Messjahren. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2023. (in Bearbeitung)
- [Stromspiegel 2022] co2online [Hrsg.]: Stromspiegel für Deutschland 2021/22. co2online, Berlin, 2022. URL: <https://www.stromspiegel.de/>
- [Stromspiegel 2019] co2online [Hrsg.]: Stromspiegel für Deutschland 2019. co2online, Berlin, 2019. URL: <https://www.stromspiegel.de/>

## Anhang A - Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Verbrauchskennwerte der beiden Gebäude im Messzeitraum.....	3
Bild 2:	Lincoln-Quartier mit Lage des PassivhausSozialPlus (Kartenausschnitt: [OpenStreetMap]).....	7
Bild 3:	Ansichten der Gebäude vor der Modernisierung (Straßenansicht links), Rückseite (rechts).....	8
Bild 4:	Straßenansichten des modernisierten Gebäudes (links) und des Ersatzneubaus (rechts) .....	8
Bild 5:	Rückansichten des modernisierten Gebäudes (links) und des Ersatzneubaus (rechts, Bildquelle [Gängler 2020]) .....	8
Bild 6:	Wohnungszuschnitte im Bestandsgebäude (Dachgeschoss Bauteile A und B, oben) und Neubau (Bauteil C, unten) (Bildquelle: [NWH 2020]) .....	9
Bild 7:	Ausführung der Details an Terrassentür und Fensters am Aufsatzrollladen im Bestandsgebäude [Quelle: faktor10/dga].....	11
Bild 8:	Grundsätzliches Anlagenschema für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Strom und Grauwasseraufbereitung (auch im Bestandsgebäude vorhanden) .....	12
Bild 9:	Lüftungsanlagen in den Gebäuden: Einbau in der abgehängten Decke in einer Küche des Bestandsgebäudes (links), Einbau in einer Nische im Bestandsgebäude (Mitte), Stufenschalter der Lüftung .....	14
Bild 10:	Lüftungsanlage für das Treppenhaus (links) und im Keller (rechts) .....	14
Bild 11:	PV-Anlage auf dem Neubau (links) und Wechselrichter der PV-Anlage des Bestandsgebäudes (rechts) .....	15
Bild 12:	Elektrospeicher für beide Gebäudeteile: links Bestandsgebäude (17,5 kWh Nettokapazität), rechts Neubau (43,8 kWh Nettokapazität) .....	16
Bild 13:	Funktionsschema der Grauwasseraufbereitungsanlage .....	16
Bild 14:	Grauwasseraufbereitungsanlage – links: Vorrattank vorne, Druckerhöhungsanlage Mitte, Aufbereitungstank mit biologischer Reinigung hinten; rechts: Membranfilter und Hebeanlage .....	17
Bild 15:	Ansichten aus der Bauphase des Projekts: links Bestandsgebäude, rechts Neubau .....	18
Bild 16:	Wärmebilanz des Bestandsgebäudes bei Standardrandbedingungen nach PHPP sowie an die tatsächliche Nutzung angepasst für Standardklima Frankfurt am Main (links) und lokalem Wetter 2021/22 (rechts)....	20
Bild 17:	Wärmebilanz des Neubaus bei Standardrandbedingungen nach PHPP sowie an die tatsächliche Nutzung angepasst für Standardklima Frankfurt am Main (links) und lokalem Wetter 2021/22 (rechts) .....	20
Bild 18:	Auswirkungen unterschiedlicher mittlerer Raumtemperaturen auf den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes mit Standardklima Frankfurt am Main und Wetterbedingungen vor Ort in den verschiedenen Messjahren.....	21
Bild 19:	Einfluss der Höhe der inneren Wärmequellen auf den Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes mit Standardklima Frankfurt am Main und Wetterbedingungen vor Ort 2019/20 bei 22 °C Raumtemperatur .	21
Bild 20:	Oben: Ansichten von Küchen im Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts, Bildquelle [Gängler 2020]), unten: Bad (links) und Einbauschränke (Mitte) im Bestandsgebäude sowie rollstuhlgerechtes Bad im Neubau (rechts, Bildquelle [Gängler 2020]) .....	23
Bild 21:	Ansichten verschiedener Darstellungen und Seiten auf dem Display .....	25
Bild 22:	Ansicht verschiedener verwendeter Zähler und Sensoren.....	26
Bild 23:	Übersicht Messkonzept PassivhausSozialPlus .....	28
Bild 24:	Erweiterung in den detailliert vermessenen Wohnungen in Neubau und Bestand .....	28
Bild 25:	Schema zum Aufbau der Messdatenerfassung für Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) [Quelle: econvis].....	29
Bild 26:	Wetterstation auf dem Dach des Bestandsgebäudes; links: Südansicht, rechts: Ostansicht .....	32
Bild 27:	Außenlufttemperatur und -feuchte der Wetterstation des PassivhausSozialPlus .....	32
Bild 28:	Sommertage und heiße Tag im Messzeitraum .....	34
Bild 29:	Mittlere monatliche Solarstrahlung am Standort.....	34
Bild 30:	Windrichtung und -geschwindigkeit an der Wetterstation auf dem PHSP .....	35
Bild 31:	Vergleich unterschiedlicher Gewichtungverfahren für die Mitteltemperatur des Gebäudes .....	37
Bild 32:	Mitteltemperaturen der Wohnungen in der Heizperiode aufsteigend sortiert (Bestandsgebäude in blau, Neubau in grün) 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts).....	38

Bild 33:	Minimum, Maximum, Median und Mitteltemperaturen der Wohnungen von Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) im Projektverlauf .....	38
Bild 34:	Vertikale Mitteltemperaturen der Wohnungen je Stockwerk von Bestandsgebäude und Neubau im Winter (links) und im Sommer (rechts) (Erdgeschoss=0) .....	39
Bild 35:	Mitteltemperaturen für unterschiedliche Raumtypen von Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) im Projektverlauf .....	39
Bild 36:	Übertemperaturgradstunden (Referenztemperatur 27 °C) sowie Grenzwert nach [DIN 4108-2]: Bestandsgebäude (links), Neubau (rechts) .....	41
Bild 37:	Wohnungsmitteltemperaturen der einzelnen Wohnungen im Sommer (Juni-August) in Abhängigkeit des Geschosses (Erdgeschoss= 0): Bestandsgebäude (links), Neubau (rechts) .....	42
Bild 38:	Raumtemperaturen der einzelnen Räume vom 07.08. bis 09.08.2020 (heißeste Tage des Jahres) sowie Verlauf der Außentemperatur (schwarze Linie): Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) .....	42
Bild 39:	Raumtemperaturen der einzelnen Räume vom 18.07. bis 21.07.2022 (heißeste Tage des Jahres sowie Verlauf der Außentemperatur (schwarze Linie): Bestandsgebäude (links) und Neubau (rechts) .....	43
Bild 40:	Treppenhaustemperaturen im Neubau über die gesamte Messphase (links) und Temperaturen und relative Feuchte im Treppenhaus des Neubaus im Dezember 2021 (rechts).....	44
Bild 41:	Temperaturen in den Heizräumen von Bestandsgebäude und Neubau (links) sowie Häufigkeitsverteilung der Temperaturen im Monitoring-Schrank im Batterieraum (rechts).....	45
Bild 42:	Temperaturen (links) und relative Raumluftfeuchten (rechts) im Keller des Bestandsgebäudes im Projektverlauf (Monatsmittelwerte) .....	46
Bild 43:	Aufsteigend sortierte Raumluftfeuchten der Wohnungen in der Heizperiode 2021/22 für Bestandsgebäude und Neubau.....	47
Bild 44:	Raumluftfeuchten unterschiedlicher Raumnutzungen im Bestandsgebäude (links) und im Neubau (rechts) .....	47
Bild 45:	Häufigkeit der Unterschreitung einer Raumluftfeuchte von 30 % (links) und Häufigkeit einer Überschreitung von Raumluftfeuchten von 80 % (rechts), jeweils Tagesmittelwerte im Messzeitraum .....	48
Bild 46:	Geordnete Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauer außerhalb der beiden betrachteten Kernheizperioden je Raum im Bestandsgebäude (Bauteile A und B) links und im Neubau rechts (Quelle: [Stein et al. 2023]).....	49
Bild 47:	Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauern nach Raumnutzungen in den beiden betrachteten Kernheizperioden in den modernisierten Gebäuden (Bauteile A und B, links) und im Neubau (Bauteil C, rechts) (Quelle: [Stein et al. 2023]) .....	49
Bild 48:	Monatliche Mittelwerte der gemessenen täglichen Fensteröffnungsdauer je Raum in den modernisierten Gebäuden (Bauteile A und B) sowie Monatsmittel der Innen- und Außentemperaturen (Quelle: [Stein et al. 2023]).....	50
Bild 49:	Mittelwert des CO <sub>2</sub> -Gehalts der Wohn- (links) und Schlafzimmer (rechts) während der Messphase sowie minimale und maximale Monatsmittelwerte .....	51
Bild 50:	Mittlerer CO <sub>2</sub> -Gehalt der Wohnungen in Abhängigkeit der eingestellten Lüftungsstufe; Mittelwerte für die Heizperioden 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts) .....	51
Bild 51:	CO <sub>2</sub> -Verlauf im Wohnzimmer zweier großer Wohnungen über 1 Tag und Anwesenheit im Wohnzimmer .	52
Bild 52:	Heizperiodenmittelwerte der Lüftungsstufe im Bestandsgebäude.....	53
Bild 53:	Heizperiodenmittelwerte der Lüftungsstufe im Neubau .....	53
Bild 54:	Monatlicher Verlauf der eingestellten Lüftungsstufe im Neubau .....	54
Bild 55:	Tage mit Abwesenheit von Personen in den Winterhalbjahren 2020/21 bzw. 2021/22 in den 20 Wohnungen mit Detailmessungen (links) und Vergleich der Messwerte aus dem Präsenzmelder und Tage mit Wasserzapfungen nahe null Liter (rechts).....	55
Bild 56:	Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Neubau aufsteigend sortiert, 2020/21 (links) und 2021/22 (rechts) .....	56
Bild 57:	Raumtemperatur und Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Neubau 2020/21 mit auffälligen „Ausreißer“-Wohnungen (Punkt) sowie zugehörige Nachbarwohnungen (Kreuz: links/rechts; Dreieck: oben/unten): alle Wohnungen (oben links), kein Verbrauch und niedrige Temperatur (oben rechts), kein Verbrauch und hohe Temperatur (unten links) sowie hoher Verbrauch und niedrige Temperatur (unten rechts).....	57
Bild 58:	Heizwärmeverbrauch (inklusive Verteilverluste Heizung) der Wohnungen im Bestandsgebäude und wohnflächengewichteter Mittelwert: 2020/21 links, 2021/22 rechts .....	58

Bild 59:	Heizwärmeverbrauch der Wohnungen im Bestandsgebäude und Raumtemperatur in der Heizperiode für die Jahre 2020/21 und 2021/22 .....	59
Bild 60:	Auswertung unterschiedlicher energieeffizienter Gebäude: gemessene Raumtemperatur in Abhängigkeit des gemessenen Heizwärmeverbrauchs .....	60
Bild 61:	Aufsteigend sortierte Trinkwasserverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt sortiert).....	61
Bild 62:	Personenbezogener Trinkwasserverbrauch gesamt in Abhängigkeit der Anzahl der Personen der Wohnung .....	62
Bild 63:	Trinkwasserbudget und Trinkwasserverbrauch für das Gesamtprojekt für die Jahre 2020 und 2021.....	62
Bild 64:	Aufsteigend sortierte Warmwasserverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude AB und Neubau C getrennt sortiert), links: Jahreswerte pro Person, rechts: Tageswerte auf 60 °C Zapftemperatur umgerechnet .....	64
Bild 65:	Warmwasserverbrauch je Person umgerechnet auf 60 °C Zapftemperatur in Abhängigkeit der Personenbelegung in der Wohnung.....	64
Bild 66:	Anteil des Warmwassers am gesamten Trinkwasserverbrauch in den Wohnungen als Mittelwerte für das gesamte Gebäude (links) und je nach Personenbelegung in der Wohnung (rechts) .....	65
Bild 67:	Aufsteigend sortierte Haushaltsstromverbräuche der Wohnungen im Zeitraum Juli 2020 bis Juni 2021 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt sortiert), Flächenbezug mit beheizter Fläche der Wohnungen .....	66
Bild 68:	Einordnung der Wohnungen in die Effizienzklassen des Stromspiegel 2021/22 (für Bestandsgebäude „AB“ und Neubau „C“ getrennt).....	66
Bild 69:	Haushaltsstrombudget und Haushaltsstromverbrauch für das Gesamtprojekt für die Jahre 2020 und 2021 .....	67
Bild 70:	Haushaltsstrombudget und -verbrauch für 2020 und 2021 sowie mittlerer Verbrauch je Person in Deutschland nach [BDEW 2021].....	67
Bild 71:	Haushaltsstrombudget und Haushaltsstromverbrauch für das Gesamtprojekt für das Jahr 2022 (mit angehobenen Budgets) (links) sowie Vergleich des Stromverbrauchs 2022 zu 2021 (rechts) .....	68
Bild 72:	Aufteilung Haushaltsstromverbrauch für das Jahr 2021; links: Absolutwerte (aufsteigend sortiert), rechts: prozentualer Anteil .....	68
Bild 73:	Verbrauchskennwerte der beiden Gebäude im Messzeitraum sowie Heizgradtage des jeweiligen Jahres	71
Bild 74:	Mittlere tägliche Ladeleistung der Pufferspeicher im Bestandsgebäude und im Neubau 2021/22 in Abhängigkeit der Außentemperatur (links) sowie stündliche gesamte Ladeleistung 2021/22 absteigend sortiert .....	72
Bild 75:	Jahresdauerlinien für die Jahre 2020 (links) und 2021 (rechts) für Pufferladung (Gesamtwärmeabnahme Gebäude) und Abnahme beider Gebäude.....	72
Bild 76:	Monatlicher Gesamtfernwärmebezug im gesamten Messzeitraum sowie Ladung in den Puffer des Bestandsgebäudes (AB) und des Neubaus (C).....	73
Bild 77:	Monatliche spezifische Puffer- und Verteilverluste im gesamten Messzeitraum des Bestandsgebäudes (links) und des Neubaus (rechts) (negative Werte sind durch Datenlücken entstanden).....	74
Bild 78:	Systemtemperaturen in den Heiz- und Warmwasserkreisen.....	74
Bild 79:	Mittlere tägliche Leistungen für die Heizung im Bestandsgebäude 2019 -2022 (ohne Badheizkörper) und Monatsmittelwerte (unten rechts).....	75
Bild 80:	Mittlere tägliche der Wärmeabnahme im Bestandsgebäude und im Neubau 2021/22 .....	76
Bild 81:	Mittlere tägliche Wärmeleistungen für die Warmwasserbereitung im Bestandsgebäude .....	76
Bild 82:	Verbrauchskennwerte für die Warmwasserbereitung für Bestandsgebäude und Neubau .....	77
Bild 83:	Betriebsdaten der Grauwasseranlage: Betriebswasserabgabe, Trinkwassernachspeisung sowie Deckungsanteil Betriebswasser und Stromverbrauch der Anlage .....	78
Bild 84:	Stromverbrauch der Grauwasseranlage in Abhängigkeit der Betriebswasserabgabe .....	79
Bild 85:	Monatswerte der PV-Stromerzeugung über den gesamten Messzeitraum getrennt nach Bestandsgebäude und Neubau .....	80
Bild 86:	Links: Häufigkeit der PV-Erzeugungsleistungen von Juli 2021 bis Juni 2022, dargestellt als Anteil der installierten PV-Peak-Leistung (Nullwerte ausgeblendet); rechts: Häufigkeit der Netzeinspeiseleistungen von Januar 2020 bis August 2022, dargestellt als Anteil der installierten PV-Peak-Leistung (Nullwerte ausgeblendet, Skalierung angepasst) .....	81
Bild 87:	Monatliche Netzeinspeisung von Bestandsgebäude und Neubau sowie für das Gesamtprojekt.....	82
Bild 88:	Monatlicher Wirkungsgrad der beiden Batteriespeicher sowie Jahresmittelwerte für 2020 und 2021 .....	83

Bild 89:	Prozentuale Aufteilung der Hilfsstromverbräuche für das Jahr 2020 .....	84
Bild 90:	Lüftungsstromverbrauch je Woche in Abhängigkeit der Außentemperatur im Neubau vor dem Update der Lüftungsanlagen im Januar 2020 (links) und nach dem Update im Januar 2021 (rechts) .....	86
Bild 91:	Lüftungsstromverbrauch je Monat in Abhängigkeit der Außentemperatur .....	86
Bild 92:	Lüftungsstromverbräuche verschiedener Mehrfamilienhäuser mit Lüftungsanlagen unterschiedlicher Ausführung .....	87
Bild 93:	Stromverbrauch Aufzug 2021: Stundenwerte des gesamten Jahres.....	88
Bild 94:	Stromverbrauch der Heizzentralen 2021 (Stundenwerte des gesamten Jahres), links Bestandsgebäude, rechts Neubau .....	89
Bild 95:	Bilanz Stromverbrauch, Stromerzeugung und Strombezug des Gesamtprojekts für die Jahre 2020 und 2021 .....	90
Bild 96:	Vergleich der geplanten und der tatsächlichen Nebenkosten beim PHSP (links) und Vergleich der NK-Positionen zwischen Planung und Werten 2020 .....	92
Bild 97:	Vergleich Betriebskosten nach Betriebskostenspiegel Hessen 2019 ([DMB 2021]) und im PHSP 2021; links: Summen, rechts: Vergleich nach Kategorie.....	93
Bild 98:	Vergleich der spezifische Brutto-Bauwerkskosten des Neubaus des PassivhausSozialPlus mit typische Kostenspannen von [ARGE 2019] .....	99
Bild 99:	Grafischer Vergleich der spezifischen Kosten von Modernisierungsmaßnahmen mit typischen Kostenspannen nach [Hinz 2015] für das modernisierte Bestandsgebäude .....	99
Bild 100:	Beispielhafte Darstellung der Pufferladung im Bestandsgebäude am 30.11.2019 vor Optimierung des Betriebs.....	102
Bild 101:	Verlegung der Lüftungskanäle im 1. Obergeschoss des Bestandsgebäudes, linkes Treppenhaus (Plan: [ibs Energie 2019]) .....	129
Bild 102:	Verlegung der Lüftungskanäle im 1. Obergeschoss des Neubaus (Plan: [ibs Energie 2019]) .....	129

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Flächen und energetische Kenndaten der Gebäude .....	10
Tab. 2:	Dimensionierung von PV-Anlage und Batteriespeicher .....	15
Tab. 3:	Ergebnisse Luftdichtheitsmessungen .....	19
Tab. 4:	Spezifische Transmissionswärmeverluste, Endenergie- und Primärenergiebedarfe der Gebäude nach EnEV .....	19
Tab. 5:	Kennwerte der Gebäude nach PHPP für das Standardklima Frankfurt am Main .....	22
Tab. 6:	Übersicht der eingesetzten Bussysteme für die Auslesung der Sensoren und Zähler sowie deren Ausleseintervalle .....	29
Tab. 7:	Übersicht der eingesetzten Zähler und Sensoren, deren Messbereiche und Auflösungen sowie Fehlergrenzen .....	31
Tab. 8:	Jahresmittelwerte der lokal gemessenen Wetterdaten .....	33
Tab. 9:	Gradtagzahlen und Heizgradtage .....	33
Tab. 10:	Jahreskennwerte der Solarstrahlung .....	35
Tab. 11:	Mitteltemperaturen in den Heizperioden – jeweils arithmetische und flächengewichtete Mittelwerte .....	36
Tab. 12:	Mitteltemperaturen im Winterhalbjahr für unterschiedliche Raumnutzungstypen von Bestandsgebäude (oben) und Neubau (unten).....	40
Tab. 13:	Mitteltemperaturen im Sommer (Juni- August) für unterschiedliche Raumtypen von Bestandsgebäude (oben) und Neubau (unten).....	43
Tab. 14:	Mittlere relative Raumluftfeuchte in der Heizperiode (flächengewichtete Mittelwerte, jeweils für den Zeitraum Oktober bis März) .....	46
Tab. 15:	Messwerte des Trinkwasserverbrauchs in den Wohnungen für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte) sowie flächen- und personenbezogene Kennwerte .....	61
Tab. 16:	Messwerte des Warmwasserverbrauchs für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte) sowie flächen- und personenbezogene Kennwerte .....	63
Tab. 17:	Messwerte des Haushaltsstromverbrauchs für beide Gebäude und drei Messjahre (Absolutwerte sowie flächenbezogene Kennwerte), Flächenbezug mit beheizter Fläche der Wohnungen .....	65

Tab. 18:	Absolute Wärmeverbräuche für beide Gebäude und Fernwärmebezug sowie Kennwerte (mit der jeweiligen Energiebezugsfläche berechnet) .....	69
Tab. 19:	Absolute Wärmeverbräuche der beiden Gebäude.....	70
Tab. 20:	Verbrauchskennwerte Wärme für beide Gebäude .....	70
Tab. 21:	Jahressummen und -kennwerte der PV-Stromerzeugung für die Jahre 2020 und 2021 sowie Prognose nach PHPP .....	80
Tab. 22:	Batteriekenndaten für beide vollständigen Messjahre .....	83
Tab. 23:	Jahressummen und -kennwerte der verschiedenen Bestandteile für Allgemein- und Hilfsstrom für das Jahr 2020.....	84
Tab. 24:	Jahressummen und -kennwerte der verschiedenen Bestandteile für Allgemein- und Hilfsstrom für das Jahr 2021.....	85
Tab. 25:	Eigenverbrauch, Deckungsgrad und Direktverbrauch der PV-Stromerzeugung für die Jahre 2020 und 2021 .....	90
Tab. 26:	Jahressummen der PV-Stromerzeugung und deren Verwendung .....	90
Tab. 27:	Jahressummen des Stromverbrauchs und dessen Deckung .....	91
Tab. 28:	Kosten des Gesamtvorhaben nach Kostengruppen nach [DIN 276] (inklusive MWSt.) (Quelle: [Großklos et al. 2021]).....	94
Tab. 29:	Aufteilung der Kostengruppen 300, 400 und 600 auf Bestandsgebäude und Neubau (Quelle: [Großklos et al. 2021]).....	95
Tab. 30:	Kosten der technischen Ausstattung (KG 400) getrennt nach Bestandsgebäude und Neubau .....	96
Tab. 31:	Kostenpositionen der technischen Ausstattung (KG 400) für das Gesamtvorhaben .....	97
Tab. 32:	Absolute und spezifische Kosten für das Dach im Neubau (inkl. MwSt.) .....	98
Tab. 33:	Übersicht der Projektbeteiligten (ohne Ausführende und Handwerksfirmen) .....	121
Tab. 34:	Flächen, U- und H <sub>T</sub> -Werte des Neubaus .....	122
Tab. 35:	Flächen, U- und H <sub>T</sub> -Werte des Neubaus .....	125
Tab. 36:	Wohnungsweise Auslegung der Lüftungsanlagen Bestandsgebäude .....	127
Tab. 37:	Wohnungsweise Auslegung der Lüftungsanlagen Neubau .....	128

## Anhang B - Projektbeteiligte

**Tab. 33: Übersicht der Projektbeteiligten (ohne Ausführende und Handwerksfirmen)**

Bauherr, Konzeptentwicklung	Neue Wohnraumhilfe Darmstadt gGmbH
Konzeptentwicklung, wirtschaftliche Baubetreuung, Projektsteuerung, Architektur Leistungsphasen 1-3	faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH, Darmstadt
Architektur Leistungsphasen 4-9, Bauleitung	Dörfer Grohnmeier Architekten Partnerschaft mbB, Darmstadt
Tragwerksplanung	Bestand: Ingenieurbüro Peter, Darmstadt Neubau: Bauart Konstruktions GmbH, Darmstadt
Prüfingenieur	Ingenieurbüro für Bauwesen Lothar Strutt, Dreieich-Götzenhain
Brandschutz und Wärmeschutz	Bauart Konstruktions GmbH, Darmstadt
Haustechnikplanung	ibs Energie, Stromberg
Elektroplanung	Ingenieurbüro Richter Elektrotechnik, Mainhausen
Schallschutzkonzept	ITA Ingenieurgesellschaft für technische Akustik GmbH, Wiesbaden
Technische Schnittstellenkoordination	Econvis Ingenieurbüro für Energiemanagement, Münster
Förderung Bauvorhaben	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen (Förderung im sozialen Wohnungsbau) über WI Bank, Wiesbaden Stadt Darmstadt (Komplementärmittel und Eigenkapitalersatzmittel)
Finanzierung	Umweltbank eG, Nürnberg KfW, Frankfurt: Energieeffizient Sanieren bzw. Energieeffizient Bauen 40plus
Förderung Begleitforschung	Vorstudie: Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Monitoring: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Projekt MOBASY, FKZ 03SBE0004A)
Begleitforschung (Vorstudie, Monitoring)	Institut Wohnen und Umwelt GmbH
PV-Anlage, Stromlieferung an die Mieter	Energiegenossenschaft Darmstadt eG
Budgeterfassung und -abrechnung	isatech Water, Berlin und Comfine, Darmstadt

## Anhang C - U-Werte Bestandsgebäude

Tab. 34: Flächen, U- und H<sub>T</sub>-Werte des Neubaus

Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nettofläche [m <sup>2</sup> ]	Ausrichtung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Fx-Wert [-]
Bodenfläche KG Altbau Teil A	25,47	25,47	horizontal	0,27	0,60
Bodenfläche KG Anbau Teil A	38,95	38,95	horizontal	0,11	0,60
Kellerdecke Anbau Teil B	28,84	28,84		0,14	0,70
Kellerdecke Altbau	434,74	434,74		0,13	0,50
Treppenhäuser Treppenläufe	13,50	13,50	horizontal	0,35	0,50
Treppenhäuser Podeste	19,84	19,84	horizontal	0,18	0,50
Außenwand KG Gemeinschaftsraum (Ost)	23,91	14,20	Ost	0,11	1,00
Tür Gemeinschaftsraum		2,61		0,71	1,00
Fenstertür Gemeinschaftsraum		2,54		0,70	1,00
Fenster Gemeinschaftsraum, festverglast		2,58		0,75	1,00
Fenster Gemeinschaftsraum		1,98		0,71	1,00
Außenwand KG gegen Erdreich (Nord)	3,04	3,04		0,15	0,60
Außenwand KG gegen Fahrradhaus (Nord)	7,63	7,63		0,11	1,00
Außenwand KG gegen Fahrradhaus (Süd)	10,68	10,68		0,11	1,00
Außenwand Altbau West	377,50	267,54	West	0,11	1,00
Kind		32,89		0,71	1,00
Balkontür		29,28		0,70	1,00
Balkonfenster		47,78		0,71	1,00
Außenwand Treppenhäuser West (Altbau und DG)	67,56	45,64	West	0,13	1,00
Treppenhausfenster offenbar 1. Podest		3,49		0,72	1,00
Treppenhausfenster festverglast und Paneel 1. Podest		3,16		0,77	1,00
Treppenhausfenster offenbar 2. Podest		3,53		0,72	1,00
Treppenhausfenster festverglast und Paneel 2. Podest		3,02		0,78	1,00
Treppenhausfenster offenbar 3. Podest		3,59		0,72	1,00
Eingangstüren		5,14		0,71	1,00
Außenwand Altbau Ost	281,32	228,96	Ost	0,11	1,00
A Schlafen		5,48		0,71	1,00
A Bad		3,60		0,76	1,00
Küche		3,54		0,76	1,00
Küche		3,54		0,76	1,00
Kind		5,48		0,71	1,00
Schlafen		5,48		0,71	1,00
Kind		5,48		0,71	1,00
Bad		3,60		0,76	1,00
Küche		3,54		0,76	1,00
Küche		3,54		0,76	1,00

Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nettofläche [m <sup>2</sup> ]	Aus- richtung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Fx-Wert [-]
Bad		3,60		0,76	1,00
Kind		5,48		0,71	1,00
Außenwand Altbau Nord	83,41	83,41	Nord	0,11	1,00
Außenwand Altbau Süd	83,41	83,41	Süd	0,11	1,00
Außenwand Dachaufstockung West	161,56	129,81	West	0,11	1,00
Kind		10,96		0,71	1,00
Balkonfenster		1,50		0,73	1,00
Balkontür		9,76		0,70	1,00
Balkonfenster		9,52		0,71	1,00
Außenwand Dachaufstockung Ost	117,35	99,59	Ost	0,11	1,00
03.A1 Schlafen		1,83		0,71	1,00
03.A1 Bad		1,20		0,76	1,00
03.A1 Kind		1,26		0,76	1,00
03.A2 Küche		1,26		0,76	1,00
03.A2 Kind		1,83		0,71	1,00
03.A2 Schlafen		1,83		0,71	1,00
03.B1 Kind		1,83		0,71	1,00
03.B1 Bad		1,20		0,76	1,00
03.B1 Küche		1,26		0,76	1,00
03.B2 Küche		1,26		0,76	1,00
03.B2 Bad		1,20		0,76	1,00
03.B2 Kinder		1,83		0,71	1,00
Außenwand Dachaufstockung Nord	34,61	34,61	Nord	0,11	1,00
Außenwand Dachaufstockung Süd	34,61	34,61	Süd	0,11	1,00
Außenwand Anbauten Ost	186,36	119,74	Ost	0,11	1,00
Fenstertüren EG - 2. OG		7,63		0,70	1,00
Fenstertüren EG - 2. OG		7,63		0,70	1,00
Balkonfenster festverglast EG - 2. OG		7,73		0,75	1,00
Fenstertüren EG - 2. OG		7,63		0,70	1,00
Fenstertüren EG - 2. OG		7,63		0,70	1,00
Fenstertüren EG - 2. OG		7,63		0,70	1,00
Balkonfenster EG - 2. OG		3,27		0,87	1,00
03.A1 Fenstertür 3. OG Essen		2,54		0,70	1,00
03.A1 Balkonfenster 3. OG Essen		2,54		0,75	1,00
03.A1 Fenstertür 3. OG Wohnen		2,54		0,70	1,00
03.A1 Balkonfenster 3. OG Wohnen		2,54		0,75	1,00
03. B1 Fenstertür 3. OG		2,54		0,70	1,00
03. B1 Balkonfenster 3. OG		1,11		0,87	1,00
03. B2 Fenstertür 3. OG		2,54		0,70	1,00
03. B2 Balkonfenster 3. OG		1,11		0,87	1,00
Außenwand Anbauten Nord	88,05	88,05	Nord	0,11	1,00
Außenwand Anbauten Süd	88,05	88,05	Süd	0,11	1,00
Innenwand gegen unbeheizt alte Außenwand	10,39	10,39		0,16	0,50
Innenwand gegen unbeheizt	22,41	22,41		0,17	0,50
Innenwand gegen unbeheizt Flur	13,75	13,75		0,28	0,50
Innenwände TRH gegen unbeheizt	10,66	10,66		0,34	0,50

Bezeichnung	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nettofläche [m <sup>2</sup> ]	Ausrichtung	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Fx-Wert [-]
neue Innenwände TRH gegen unbeheizt	12,36	8,74		0,35	0,50
Tür zum KG		3,62		1,5	0,50
Innenwände Wohnung gegen unbeheizt	3,14	3,14		0,34	0,50
Außenwände TRH über Dach Teil A West	1,99	1,99	West	0,14	1,00
Außenwände TRH über Dach Teil A Ost	11,22	9,19	Ost	0,14	1,00
Tür		2,03		0,74	1,00
Außenwände TRH über Dach Teil A Nord	12,27	12,27	Nord	0,14	1,00
Außenwände TRH über Dach Teil A Süd	12,27	12,27	Süd	0,14	1,00
Dachfläche Aufstockung	471,38	471,38	horizontal	0,09	1,00
Dachfläche Anbauten	62,39	62,39	horizontal	0,10	1,00
Dachfläche TRH über Dach	24,34	24,34	Nord	0,10	1,00
<b>Thermische Hüllfläche</b>		<b>2.878,93</b>			

## Anhang D - U-Werte Neubau

Tab. 35: Flächen, U- und H<sub>T</sub>-Werte des Neubaus

Bezeichnung	Nettofläche [m <sup>2</sup> ]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Fx-Wert [-]	H <sub>T</sub> [W/K]	abw. ΔU <sub>w</sub> <sub>B</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]
Bodenplatte	571,71	0,10	0,35	20,01	
Bodenplatte Aufzugsschacht	10,53	0,11	0,35	0,41	
Wände gegen Erdreich (Aufzugsschacht)	15,74	0,11	0,80	1,04	
Außenwand West	291,56	0,11	1,00	32,07	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	7,59	0,70	1,00	5,29	
Balkonfenster (festverglast) (0,875 m x 2,25 m)	5,91	0,70	1,00	4,10	
Terrassentüren EG (1,125 m x 2,25 m)	5,06	0,70	1,00	3,53	
Terrassenfenster EG (festverglast) (0,675 m x 2,25 m)	2,59	0,77	1,00	1,98	
Fenster und Paneel (1,7 m x 2,25 m)	49,73	0,76	1,00	37,84	
Fenster und Paneel ohne Sonnenschutz (1,7 m x 2,25 m)	3,83	0,76	1,00	2,91	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	10,13	0,70	1,00	7,06	
Balkonfenster (festverglast) (1,625 m x 2,25 m)	14,63	0,71	1,00	10,33	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	7,59	0,70	1,00	5,29	
Balkonfenster (festverglast) (0,625 m x 2,25 m)	4,22	0,75	1,00	3,16	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	2,53	0,70	1,00	1,76	
Balkonfenster (festverglast) (1,125 m x 2,25 m) 3. OG	2,53	0,67	1,00	1,68	
Fenster und Paneel 1,45 m x 2,25 m	26,10	0,79	1,00	20,54	
Außenwand Ost	304,26	0,11	1,00	33,47	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	10,13	0,70	1,00	7,06	
Balkonfenster (festverglast) (0,875 m x 2,25 m)	7,88	0,70	1,00	5,47	
Fenster und Paneel (1,7 m x 2,25 m)	61,20	0,76	1,00	46,57	
Treppenhaus Fenstertür	5,82	0,71	1,00	4,14	
Treppenhaus Fenster 1. und 2. OG (1,215 m x 0,91 m) (festverglast)	2,21	0,80	1,00	1,78	
Treppenhaus Fenster 1. und 2. OG (1,215 m x 1,35 m)	3,28	0,72	1,00	2,37	
Treppenhaus Fenster 1. und 2. OG (1,215 m x 0,59 m) (festverglast)	1,43	0,86	1,00	1,23	
Treppenhaus Fenster 1. und 2. OG (1,025 m x 2,85 m) (festverglast)	5,84	0,75	1,00	4,36	
Treppenhaus Fenster 3. OG (1,215 m x 1,05 m) (festverglast)	1,28	0,79	1,00	1,01	
Treppenhaus Fenster 3. OG (1,215 m x 1,35 m)	1,64	0,72	1,00	1,19	

Bezeichnung	Nettofläche [m <sup>2</sup> ]	U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]	Fx-Wert [-]	H <sub>T</sub> [W/K]	abw. ΔU <sub>W</sub> <sub>B</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]
Treppenhaus Fenster 3. OG (1,025 m x 2,40 m) (festverglast)	2,46	0,75	1,00	1,85	
Fenster und Paneel (1,45 m x 2,25 m)	26,10	0,79	1,00	20,54	
Außenwand Nord	230,13	0,11	1,00	25,31	
EG Fenster (öffnbar) (1,06 m x 1,16 m)	1,23	0,75	1,00	0,92	
EG Fenster (festverglast) (0,64 m x 1,16 m)	0,74	0,78	1,00	0,58	
1.-2. OG (1,125 m x 1,40 m)	6,30	0,73	1,00	4,59	
3. OG (2,25 m x 1,40 m)	3,15	0,73	1,00	2,29	
3. OG (1,125 m x 1,40 m)	1,58	0,73	1,00	1,15	
Tür Büro	2,26	0,73	1,00	1,64	
Außenwand Süd	200,52	0,11	1,00	22,06	
Türen Wohnungen 00.C2-A und B EG	5,06	0,72	1,00	3,63	
Terrassentüren (2 x EG, 1 x 3.OG)	7,43	0,70	1,00	5,19	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m)	7,59	0,70	1,00	5,29	
Balkontüren (1,125 m x 2,25 m) ohne Rollläden	5,06	0,70	1,00	3,53	
Balkonfenster (festverglast) (1,75 m x 2,25 m)	19,69	0,70	1,00	13,70	
Außenwand TRH West	20,50	0,12	1,00	2,46	
Tür zum Dach	2,03	0,74	1,00	1,50	
Außenwand TRH Ost	6,25	0,13	1,00	0,81	
Außenwand TRH Nord	11,78	0,12	1,00	1,41	
Außenwand TRH Süd	11,78	0,12	1,00	1,41	
Flachdach	535,75	0,09	1,00	48,22	
Dach TRH	49,26	0,10	1,00	4,93	
Wärmebrücken (H <sub>T</sub> = A * ΔU <sub>WB</sub> = 2.593,6 * 0,050)				129,68	
<b>Gesamt</b>	<b>2.593,58</b>			<b>570,37</b>	

## Anhang E - Lüftungsanlagen

Tab. 36: Wohnungsweise Auslegung der Lüftungsanlagen Bestandsgebäude

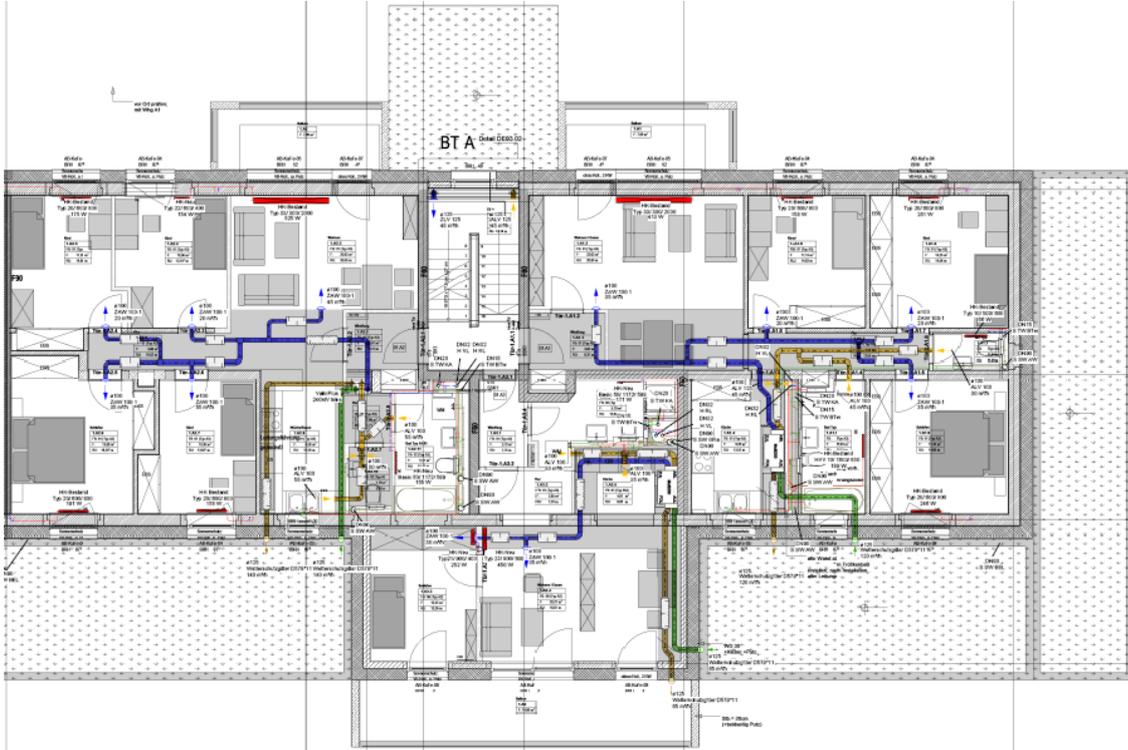
Wohnung/ Bereich	Lüftungsgerät	Wärmebereit- stellungsgrad nach DIBt	$P_{el}$ nach ERP [W/(m <sup>3</sup> /h)]	Versorgte Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nenn- volumen- strom Lüftung- anlage [m <sup>3</sup> /h]	energetisch wirksamer Volumen- strom [m <sup>3</sup> /h]	Auslegungs- luftwechsel [1/h]	energetisch wirks. Luftwechsel [1/h]
00.A1	ValloMulti200SC	81%	0,34	87,0	110	20,90	0,50	0,10
00.A2	ValloPlus240SC	80%	0,33	91,0	140	28,00	0,61	0,12
00.A3	ValloMulti200SC	81%	0,34	47,0	65	12,35	0,55	0,10
01.A1	ValloMulti200SC	81%	0,34	87,0	110	20,90	0,50	0,10
01.A2	ValloPlus240SC	80%	0,33	91,0	140	28,00	0,61	0,12
01.A3	ValloMulti200SC	81%	0,34	47,0	65	12,35	0,55	0,10
02.A1	ValloMulti200SC	81%	0,34	86,0	110	20,90	0,51	0,10
02.A2	ValloPlus240SC	80%	0,33	90,0	140	28,00	0,62	0,12
02.A3	ValloMulti200SC	81%	0,34	47,0	65	12,35	0,55	0,10
03.A1	ValloMulti300SC	83%	0,33	136,0	185	31,45	0,44	0,08
03.A2	ValloMulti300SC	83%	0,33	92,0	140	23,80	0,50	0,08
00.B1	ValloMulti200SC	81%	0,34	68,0	90	17,10	0,53	0,10
00.B2	ValloMulti200SC	81%	0,34	69,0	90	17,10	0,52	0,10
00.B3	ValloMulti200SC	81%	0,34	38,0	65	12,35	0,68	0,13
01.B1	ValloMulti200SC	81%	0,34	68,0	90	17,10	0,53	0,10
01.B2	ValloMulti200SC	81%	0,34	69,0	90	17,10	0,52	0,10
01.B3	ValloMulti200SC	81%	0,34	38,0	65	12,35	0,63	0,12
02.B1	ValloMulti200SC	81%	0,34	67,0	90	17,10	0,49	0,09
02.B2	ValloMulti200SC	81%	0,34	68,0	90	17,10	0,48	0,09
02.B3	ValloMulti200SC	81%	0,34	38,0	65	12,35	0,63	0,12
03.B1	ValloMulti300SC	83%	0,33	90,0	135	22,95	0,49	0,08
03.B2	ValloMulti300SC	83%	0,33	91,0	135	22,95	0,48	0,08
Treppenhaus A	Vallox B340SC	87%	0,28	11,0	45	5,85	0,31	0,04
Treppenhaus B	Vallox B340SC	87%	0,28	11,0	45	5,85	0,36	0,05
Gemeinschafts- raum	Aerex Reco-Boxx 600	75%	0,31	45,0	90	22,50	0,80	0,20
<b>Summe</b>				<b>1.672,0</b>	<b>2455</b>			
<b>Mittelwert (flächengewichtet)</b>						<b>20,9</b>	<b>0,54</b>	<b>0,10</b>

**Tab. 37: Wohnungsweise Auslegung der Lüftungsanlagen Neubau**

Wohnung/ Bereich	Lüftungsgerät	Wärmebereit- stellungsgrad nach DIBt	$P_{el}$ nach ERP [W/(m <sup>3</sup> /h)]	Versorgte Fläche [m <sup>2</sup> ]	Nenn- volumen- strom Lüftungs- anlage [m <sup>3</sup> /h]	energetisch wirksamer Volumen- strom [m <sup>3</sup> /h]	Auslegungs- luftwechsel [1/h]	energetisch wirks. Luftwechsel [1/h]
00.C1	ValloMulti200MV	86%	0,35	85,0	105	14,70	0,45	0,06
00.C2A	ValloMulti200MV	86%	0,35	50,4	80	11,20	0,58	0,08
00.C2B	ValloMulti200MV	86%	0,35	50,3	80	11,20	0,58	0,08
00.C3	ValloMulti200MV	86%	0,35	58,2	75	10,50	0,47	0,07
00.C4	ValloMulti200MV	86%	0,35	56,5	105	14,70	0,68	0,09
00.C5	ValloMulti200MV	86%	0,35	62,1	75	10,50	0,44	0,06
01.C1	ValloPlus 270MV	89%	0,39	90,2	125	13,75	0,50	0,06
01.C2	ValloPlus 270MV	89%	0,39	93,9	125	13,75	0,48	0,05
01.C3	ValloMulti200MV	86%	0,35	82,5	100	14,00	0,44	0,06
01.C4	ValloMulti200MV	86%	0,35	51,8	80	11,20	0,56	0,08
01.C5	ValloMulti200MV	86%	0,35	61,9	80	11,20	0,47	0,07
02.C1	ValloPlus 270MV	89%	0,39	90,3	125	13,75	0,50	0,06
02.C2	ValloPlus 270MV	89%	0,39	93,7	125	13,75	0,49	0,05
02.C3	ValloPlus 270MV	89%	0,39	81,9	100	11,00	0,44	0,05
02.C4	ValloMulti200MV	86%	0,35	52,0	80	11,20	0,56	0,08
02.C5	ValloMulti200MV	86%	0,35	78,5	100	14,00	0,46	0,06
03.C1	ValloPlus 270MV	89%	0,39	115,8	170	18,70	0,54	0,06
03.C2	ValloPlus 270MV	89%	0,39	89,2	145	15,95	0,60	0,07
03.C3	ValloMulti200MV	86%	0,35	58,9	85	11,90	0,53	0,07
03.C4	ValloPlus 350MV	88%	0,33	138,0	170	20,40	0,45	0,05
00.C6 (Büro)	Cosmo Eco EL	90%	0,09	18,5	30	3,00	0,59	0,06
Treppenhaus	Vallox B340SC	87%	0,28	184,7	180	23,40	0,39	0,05
Nebenträume	ohne Lüftungsanlage	0%	0	189,6		0,00		0,00
<b>Summe</b>				<b>1.934,0</b>	<b>2340</b>			
<b>Mittelwert (flächengewichtet)</b>						<b>13,5</b>	<b>0,44</b>	<b>0,06</b>

Im Folgenden ist exemplarisch die Verlegung der Lüftungsleitungen in Bestandsgebäude und Neubau dargestellt.

**Bild 101: Verlegung der Lüftungskanäle im 1. Obergeschoss des Bestandsgebäudes, linkes Treppenhaus (Plan: [ibs Energie 2019])**



**Bild 102: Verlegung der Lüftungskanäle im 1. Obergeschoss des Neubaus (Plan: [ibs Energie 2019])**

