

Monitoring Mehrfamilienhäuser "Tonpfeifengasse"

S. Handler, G. Haslinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

18/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Monitoring Mehrfamilienhäuser "Tonpfeifengasse"

DI DI Dr. Simon Handler, DI (FH) Gernot Haslinger
Allplan GmbH / hacon GmbH

Eisenstadt, September 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Ausgangslage	11
3	Projekthalt	12
3.1.	Gebäudebeschreibung	12
3.1.1.	Gebäudestruktur	12
3.1.2.	Gebäudetechnik	17
(1)	Heizungswärmepumpe	18
(2)	Warmwasserwärmepumpe inkl. Speicher	19
(3)	Heizkreisverteiler und Stellantriebe	19
(4)	Raumthermostat	19
3.2.	Bauteilaktivierung zur Wärmespeicherung	19
3.2.1.	Photovoltaikanlagen	20
(1)	Nutzung PV-Überschuss im Heizfall:	20
(2)	Nutzung PV-Überschuss im Kühlfall:	21
(3)	Umsetzung im Projekt:	21
3.2.2.	Windkraftanlagen	21
(1)	Variante 1: Überschuss-Windsignal	22
(2)	Variante 2: Plug-and-Play-Control	22
(3)	Umsetzung im Projekt:	23
3.3.	Planungsbegleitende Maßnahmen und Monitoring	23
3.3.1.	Thermische Gebäudesimulation	23
3.3.2.	Monitoring	23
(1)	Anlagenschema und Zählkonzept	23
(2)	Messequipment	25
(a)	Stromzähler	25
(b)	Wärme- und Kältezähler	25
(c)	Raumtemperatur und -feuchtfühler	26
(d)	Wetterstation	26
4	Ergebnisse	28
4.1.	Monitoring Haus 2	28
4.1.1.	Wärme- und Kälteverbrauch	28
4.1.2.	Bauteilaktivierung - Raumheizung	31
4.1.3.	Bauteilaktivierung - Raumkühlung	32
4.1.4.	Energieverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe (Heizung, Kühlung, 1.Hub Warmwasser)	35
4.1.5.	Energieverbrauch Wasser-Wasser Wärmepumpe (2.Hub Warmwasser)	36

4.1.6.	Energieerzeugung Photovoltaikanlage	43
4.1.7.	Energiebilanz Haus 1 - 4.....	46
4.1.8.	Bauteilaktivierung als Speicher für Überschussstrom aus der PV-Anlage.....	48
4.2.	Thermische Gebäudesimulation	59
4.2.1.	Gebäudekonzept mit Bauteilaktivierung (Planungsphase)	59
4.2.2.	Bauteilaktivierung als Speicher für Überschussstrom aus erneuerbaren Energien (Exkurs Regelungsstrategie).....	59
5	Schlussfolgerungen	64
5.1.	Erfahrungen aus Anlagenbetrieb & Monitoring	64
5.1.1.	Inbetriebnahme und Betrieb	64
5.1.2.	Überschussregelung zur Speicherung von erneuerbarem Strom in den aktivierten Bauteilen	65
5.2.	Ausblick und Empfehlungen	65
6	Verzeichnisse.....	68
7	Anhang.....	71

1 Kurzfassung

Stromerzeugung aus alternativen Energiequellen kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen darstellen. Aus diesem Grund wird die Leistung der Sonnen- oder Windkraftanlagen in Österreich stetig ausgebaut. Während die Stromproduktion über fossile Brennstoffe relativ gut an den Bedarf anpassbar ist, kann Sonnen- oder Windstrom nur zu jenen Zeiten erzeugt werden, zu denen die entsprechende Energiequelle nutzbar ist. Aufgrund des schwankenden Energiedargebots ergeben sich Erzeugungsspitzen und -engpässe. Da massiv gebaute Mehrfamilienhäuser eine hohe thermische Speicherkapazität haben und bei entsprechender Qualität der thermischen Gebäudehülle zugleich geringe Wärmeverluste aufweisen, eignen sie sich hervorragend als Wärmespeicher.

Bei der Wohnhausanlage „Viertelhäuser“ in der Tonpfeifengasse in Theresienfeld werden thermisch aktivierte Bauteile als Energiespeicher genutzt. Die Wohnhausanlage besteht aus vier Mehrfamilienhäusern. Die Gebäude verfügen über eine Gebäudehülle in Passivhausqualität. Die Wohnhausanlage besitzt insgesamt vier gleichartige Baukörper mit jeweils 500 m² BGF.

Die Wärmeversorgung der Gebäude erfolgt über zentrale Luft-Wasser Wärmepumpen, welche am Dach des jeweiligen Gebäudes situiert sind. Die Luft-Wasser Wärmepumpe deckt dabei sowohl den Heizwärmeverbrauch als auch den ersten Hub der Warmwasserbereitung ab. Die Luft-Wasser Wärmepumpe wird zudem im Sommer zur aktiven Kühlung eingesetzt. Der zweite Hub der Warmwasserbereitung erfolgt mittels dezentraler Wasser-Wasser Wärmepumpen in den einzelnen Wohneinheiten. Die Wärmeabgabe in den Wohnungen erfolgt ausschließlich über Bauteilaktivierung. Für eine gezielte Beladung der aktivierten Bauteile mit Umweltenergie ist am Dach eine Photovoltaikanlage installiert. Bei Überschussstrom aus der PV-Anlage wird durch eine automatische Anpassung der Solltemperatur in den Räumen eine gezielte Beladung der aktivierten Bauteile erzielt.

Durch ein umfassendes Anlagen- und Raumklimamonitoring wurde die Funktionsfähigkeit und Effizienz der Anlagentechnik sowie der Energiespeicherung analysiert und möglicher Weiterentwicklungsbedarf aufgezeigt. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst:

Einige technische Schwierigkeiten während und nach der Inbetriebnahme der technischen Anlage aber auch unerwartetes Nutzerverhalten führten dazu, dass der Energiebedarf für Raumheizung und Warmwasser in den ersten beiden Jahren nach Errichtung deutlich über den prognostizierten Bedarfswerten zu liegen kam. Besonders der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung über die dezentralen Wärmepumpen war aufgrund des häufigen Einsatzes der verbauten E-Heizstäbe unerwartet hoch.

Die Bauteilaktivierung als Wärmeabgabe- bzw. Wärmeentzugssystem zeigt sich als sehr robustes System. Nach Behebung diverser Startschwierigkeiten, stellte sich ein gleichmäßiger Betrieb ein. Komfortable Raumtemperaturen konnten mit niedrigen Vorlauftemperaturen erreicht werden. Die Vorteile der Bauteilaktivierung zeigten sich insbesondere im Kühlfall.

Die Realisierung der Überschussregelung zur Speicherung von Wärme aus erneuerbarem Strom in den aktivierten Bauteilen führte zu einer verbesserten Ausnutzung von erneuerbarem Strom, das Potenzial der Bauteilaktivierung konnte jedoch nicht vollständig genutzt werden.

Umgesetzt wurde die Speicherstrategie so, dass der Energieertrag aus der PV-Anlage vorrangig zur Abdeckung des Haushaltsstroms sowie des Stromverbrauchs für die Warmwasserbereitung herangezogen wurde. Verbleibender Überschuss wird über die Wärmepumpe in die Betonbauteile eingebracht. Dies wird über eine Verschiebung der Sollwerte der Raumthermostate erreicht.

Es zeigte sich, dass bei der installierten PV-Leistung von ca. 2,5 kWp je Wohneinheit während der Heizsaison nach Abdeckung des Haushaltsstroms inkl. Warmwasserbereitung zumeist kaum Überschüsse verbleiben, welche zur Beladung des Betonspeichers genutzt werden könnten. In der Übergangszeit geht ein hoher PV-Ertrag immer mit hohen solaren Gewinnen einher. Der resultierende Temperaturanstieg begrenzt dabei das Potenzial zur Wärmespeicherung.

Wird eine hohe Abdeckung des Wärmebedarfs über PV-Strom gewünscht, bedingt dies eine deutlich größere Dimensionierung der PV-Anlage. Für den Kühlfall ist die Kombination mit Photovoltaikstrom im Gegensatz dazu sehr gut geeignet. Hier wurden deutlich hohe Deckungsgrade erzielt.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass bei der Regelstrategie zur Wärmespeicherung in der Bauteilaktivierung im Zusammenhang mit Sonnenenergie noch Entwicklungspotenzial gegeben ist.

Die Sektorkopplung mit Windstrom (Wind Peak Shaving) wäre für den Heizfall vorteilhafter, da hier die Stromüberschüsse auch zu Zeiten ohne hohe solare Gewinne auftreten und das Erzeugungsprofil von Windenergie grundsätzlich besser zum Bedarfsprofil von Gebäuden im Heizfall passt.

2 Abstract

Power generation from alternative energy sources can make a significant contribution to reducing global CO₂ emissions. For this reason, the capacity of solar or wind power plants in Austria is constantly being expanded. While electricity production via fossil fuels can be adapted quite efficiently to the demand, solar or wind power can only be generated at those times when the corresponding energy source is usable. Due to the fluctuating energy supply, generation peaks and bottlenecks do occur. Since massive multi-family buildings have a high thermal storage capacity and, with the appropriate quality of the thermal building envelope, also have low heat losses, they are ideally suited as heat storage facilities.

In the "Viertelhäuser" residential complex in Tonpfeifengasse in Theresienfeld, thermally activated building components are used as energy storage units. The residential complex consists of four apartment buildings. The buildings have a building envelope in passive house quality. The residential complex has a total of four similar structures, each with a gross floor area of 500 m².

The heat supply of the buildings is provided by central air-water heat pumps, which are located on the roof of each building. The air-to-water heat pump covers the heating consumption as well as the first stroke of the hot water preparation. The air-water heat pump is also used for active cooling in summer. The second hub of the hot water preparation takes place by means of decentralized water-water heat pumps in the individual residential units. Heat transfer in the apartments takes place exclusively via building component activation. A photovoltaic system is installed on the roof for selective charging of the activated building components with environmental energy. In case of surplus power from the PV system, a targeted loading of the activated building components is achieved by an automatic adjustment of the set temperature in the rooms.

Comprehensive system and room climate monitoring was used to analyze the functionality and efficiency of the system technology as well as the energy storage system and to identify potential need for further development. The main findings are summarized below:

Some technical difficulties during and after the commissioning of the technical system but also unexpected user behavior led to the fact that the energy demand for space heating and hot water in the first two years after construction were significantly above the predicted demand values. In particular, the energy consumption for hot water preparation via the decentralized heat pumps was unexpectedly high due to the frequent use of the installed electric heating rods.

The component activation as a heat dissipation or heat extraction system proves to be a very robust system. After solving various start-up problems, the system operated smoothly. Comfortable room temperatures could be achieved with low flow temperatures. The advantages of component activation were particularly evident in the cooling mode.

The implementation of the surplus control for the storage of heat from renewable electricity in the activated building components led to an improved utilization of renewable electricity, but the potential of the building component activation could not be fully utilized.

The storage strategy was implemented in such a way that the energy yield from the PV system was primarily used to cover household electricity and electricity consumption for water heating. Any

remaining surplus is fed into the concrete components via the heat pump. This is achieved by shifting the setpoints of the room thermostats.

It was shown that with the installed PV power of approx. 2.5 kWp per residential unit during the heating season, after covering the household electricity including hot water preparation, there is mostly hardly any surplus remaining which could be used to load the concrete storage tank. In the transition period, a high PV yield is always accompanied by high solar gains. The resulting temperature rise limits the potential for heat storage.

If a high coverage of the heat demand via PV electricity is desired, this requires a significantly larger dimensioning of the PV system. In contrast, the combination with photovoltaic electricity is very well suited for the cooling case. Here, significantly high coverage rates were achieved.

The analyses carried out show that there is still potential for development in the control strategy for heat storage in building activation in combination with solar energy.

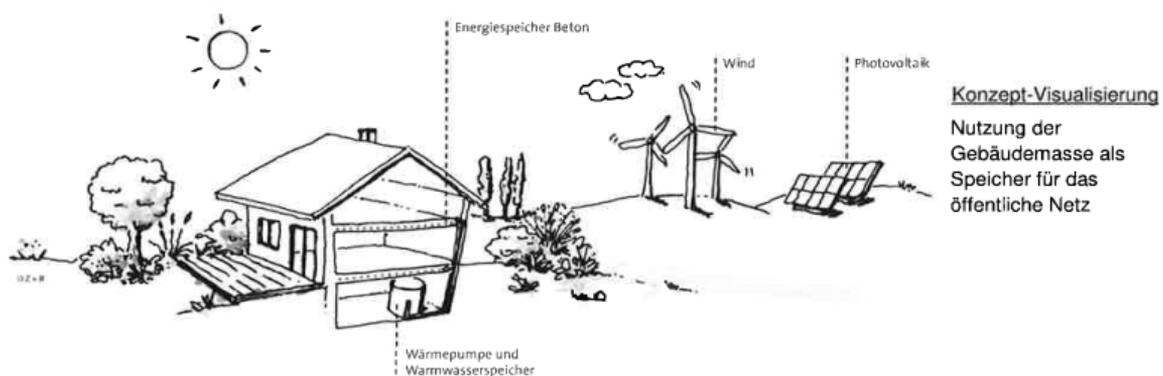
The sector coupling with wind power (wind peak shaving) would be more advantageous for the heating case, since the power surpluses also occur at times without high solar gains and the generation profile of wind power basically fits better to the demand profile of buildings in the heating case.

3 Ausgangslage

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen kann einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der weltweiten CO₂-Emissionen darstellen. Aus diesem Grund wird die Leistung der Sonnen- oder Windkraftanlagen in Österreich stetig ausgebaut. Während die Stromproduktion über z.B. fossile Brennstoffe relativ gut an den Bedarf anpassbar ist, kann Sonnen- oder Windstrom nur zu jenen Zeiten erzeugt werden zu denen die entsprechende Energiequelle nutzbar ist. Aufgrund des schwankenden Energiedargebots ergeben sich Erzeugungsspitzen und -engpässe. Die Schwankungen zwischen Strombedarf und Stromerzeugung spiegelt sich auch in den Strompreisen wider. Zu Zeiten hoher Stromproduktion aus erneuerbaren Energien sinkt der Strompreis an der Börse.

Da massiv gebaute Mehrfamilienhäuser eine hohe thermische Speicherkapazität haben und bei entsprechender Qualität der thermischen Gebäudehülle zugleich geringe Wärmeverluste aufweisen, eignen sie sich hervorragend als Energiespeicher. Wird dieser Energiespeicher mit Hilfe von Wärmepumpen zu jenen Zeiten beladen zu denen Überschussstrom aus Photovoltaikanlagen zur Verfügung steht, so ergibt sich eine geringere Belastung des Stromnetzes durch einen erhöhten Eigenverbrauchsanteil des PV-Stroms.

Abbildung 1: Konzept – Gebäude als Energiespeicher für PV-Strom [Quelle: Friembichler F., Handler S., Krec K., Kuster H.: Planungsleitfaden Thermische Bauteilaktivierung, 2016, BMVIT, 2016]



Untersuchungen zeigen, dass sich bei entsprechend hoher thermischer Qualität des Gebäudes in Kombination mit den zur Verfügung stehenden Speichermassen im Winter Zeiträume von mehreren Tagen überbrücken lassen.

Da die verbaute Speichermasse in der Regel davon unabhängig ist, ob diese auch als thermischer Speicher genutzt wird, fallen bei der standardisierten Umsetzung des oben beschriebenen Konzepts praktisch keine Mehrkosten an. Die Speicherung von Strom innerhalb von Gebäuden in Form von thermischer Energie stellt somit eine äußerst kostengünstige und einfache Möglichkeit der Energiespeicherung und Entlastung des Stromnetzes dar.

4 Projektinhalt

Das in Kapitel 1 beschriebene Konzept, zur Nutzung des Gebäudes als Energiespeicher für überschüssigen Photovoltaikstrom, wird bei einer Wohnhausanlage in der Tonpfeifengasse 5 – 11 in 2604 Theresienfeld umgesetzt und gemonitort, um die Funktionsfähigkeit dieser Form der Energiespeicherung zu demonstrieren und mögliches Entwicklungspotenzial für zukünftige Projekte aufzuzeigen.

4.1. Gebäudebeschreibung

4.1.1. Gebäudestruktur

Es wurden insgesamt 4 Mehrfamilienhäuser in der Wohnhausanlage „Viertelhäuser“ errichtet. Um der starken Zersiedlung durch Einfamilienhäuser entgegenzuwirken, sollen die Viertelhäuser ein verdichtetes Wohnangebot schaffen. Gleichzeitig wird in diesem Projekt darauf geachtet, die Qualität eines Einfamilienhauses in die Mehrfamilienhäuser zu integrieren, um neue Zielgruppen anzusprechen. Die Anschlussfähigkeit an bestehende Einfamilienhaussiedlungen ist durch die Gebäudegröße jedes Mehrfamilienhauses gegeben und trägt zur Nachverdichtung bei. Diese, mittels geförderten Wohnbaus finanzierte, Gebäude weisen eine Gebäudehülle in Passivhausqualität auf.

Die Wohnhausanlage besitzt insgesamt vier gleichartige Baukörper mit jeweils 500 m² BGF. Die Grundrisse von Haus 1 und Haus 2, sowie von Haus 3 und Haus 4 sind ident. Der einzige Unterschied besteht darin, dass Haus 1 und Haus 2 insgesamt sechs Wohnungen und Haus 3 und Haus 4 in Summe acht Wohnungen besitzen und die Orientierung der Gebäude um 90 Grad gedreht ist. Haus 3 und Haus 4 haben jeweils drei Wohnungen im Erdgeschoss und Obergeschoss, sowie zwei Wohnungen im Dachgeschoss.

Für alle vier Mehrfamilienhäuser werden im Zuge des Monitorings die relevanten Energieströme erfasst, eine Detailanalyse des Raumklimas erfolgt durch Messung von Raumtemperatur und -feuchte in den einzelnen Räumen im Haus 2. Haus 2 ist charakterisiert durch vier Maisonette-Wohnungen im Erdgeschoss beziehungsweise Obergeschoss und zwei Wohnungen im Dachgeschoss. Grundsätzlich werden die Maisonette-Wohnungen trennbar gebaut, womit bei Bedarf acht einzelne Wohnungen entstehen können. Dies ist über eine rückbaubare Stiege und jeweils einem Bad und WC im Erdgeschoss sowie Obergeschoss sichergestellt.

Die Raumaufteilung der Maisonette-Wohnungen wird folglich beschrieben. Im Erdgeschoss befinden sich eine Wohnküche, ein Zimmer und ein Bad/WC und ein Vorraum mit Stiege. Das Obergeschoss besteht aus drei Zimmern, einem Bad und einem WC sowie einem Vorraum und der Stiege. Die Wohnungen im Dachgeschoss besitzen jeweils eine Wohnküche, zwei Zimmer, ein Bad, ein WC und einen Vorraum. Die Energiezentrale für die zentrale Wärmepumpe und die PV-Anlage befinden sich am Dach.

Die folgende Abbildung zeigt den Lageplan der 4 Mehrfamilienhäuser in der Tonpfeifengasse, in 2604 Theresienfeld.

Abbildung 2: Luftbild, Haus 1 – 4 (Quelle: Google Maps)



Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss, Haus 2

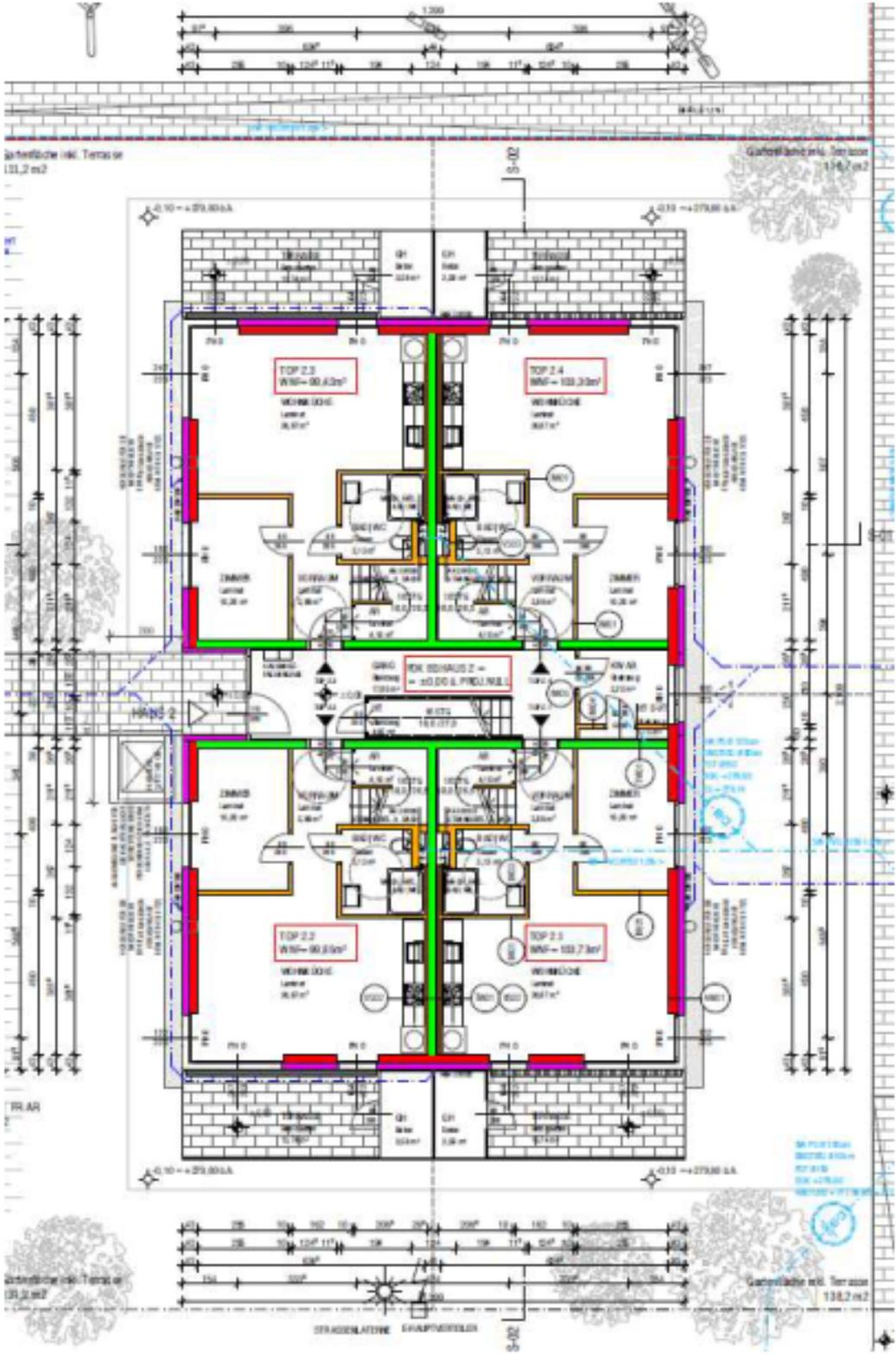


Abbildung 4: Grundriss Obergeschoss, Haus 2

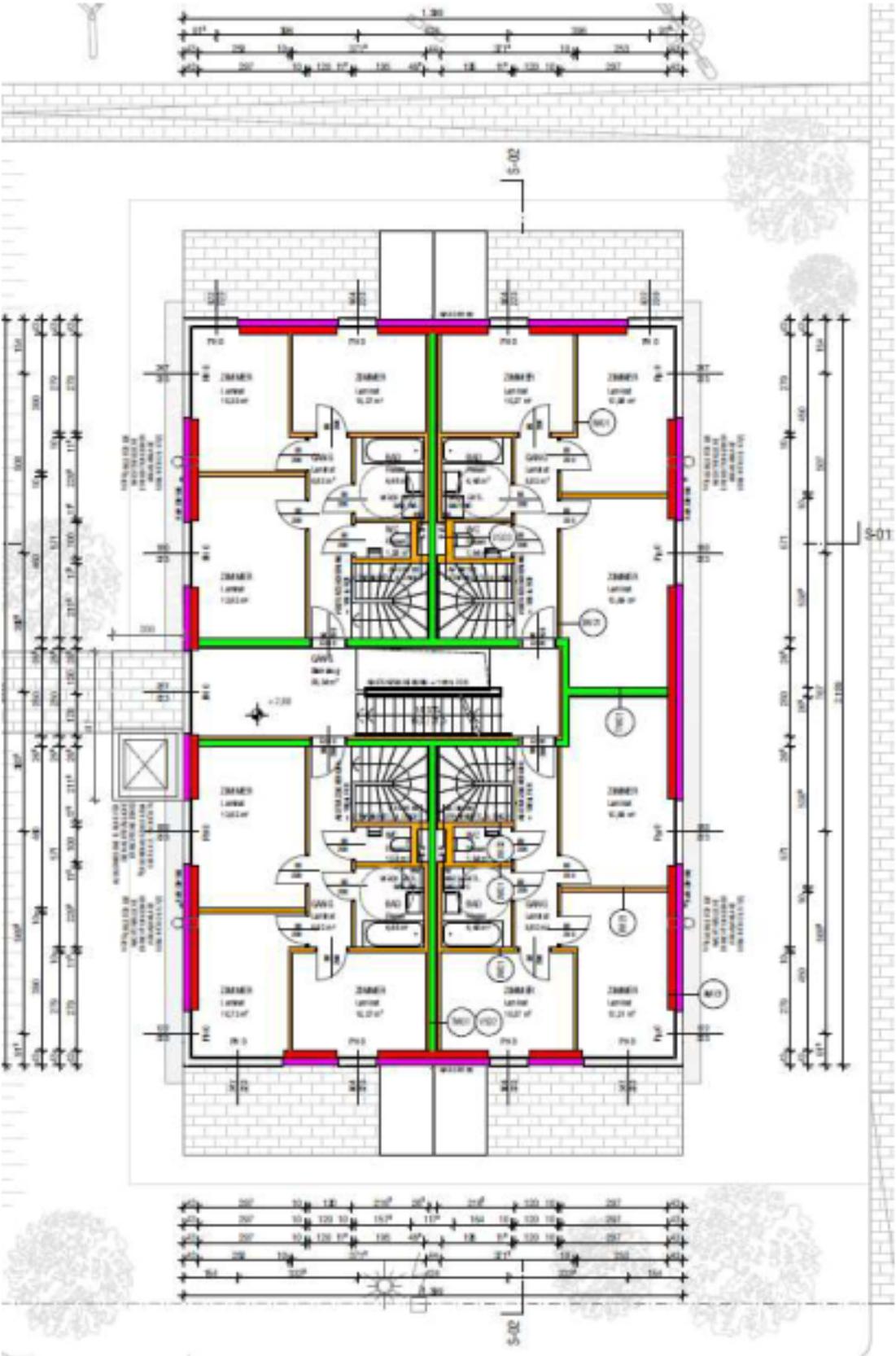


Abbildung 5: Grundriss Dachgeschoss, Haus 2

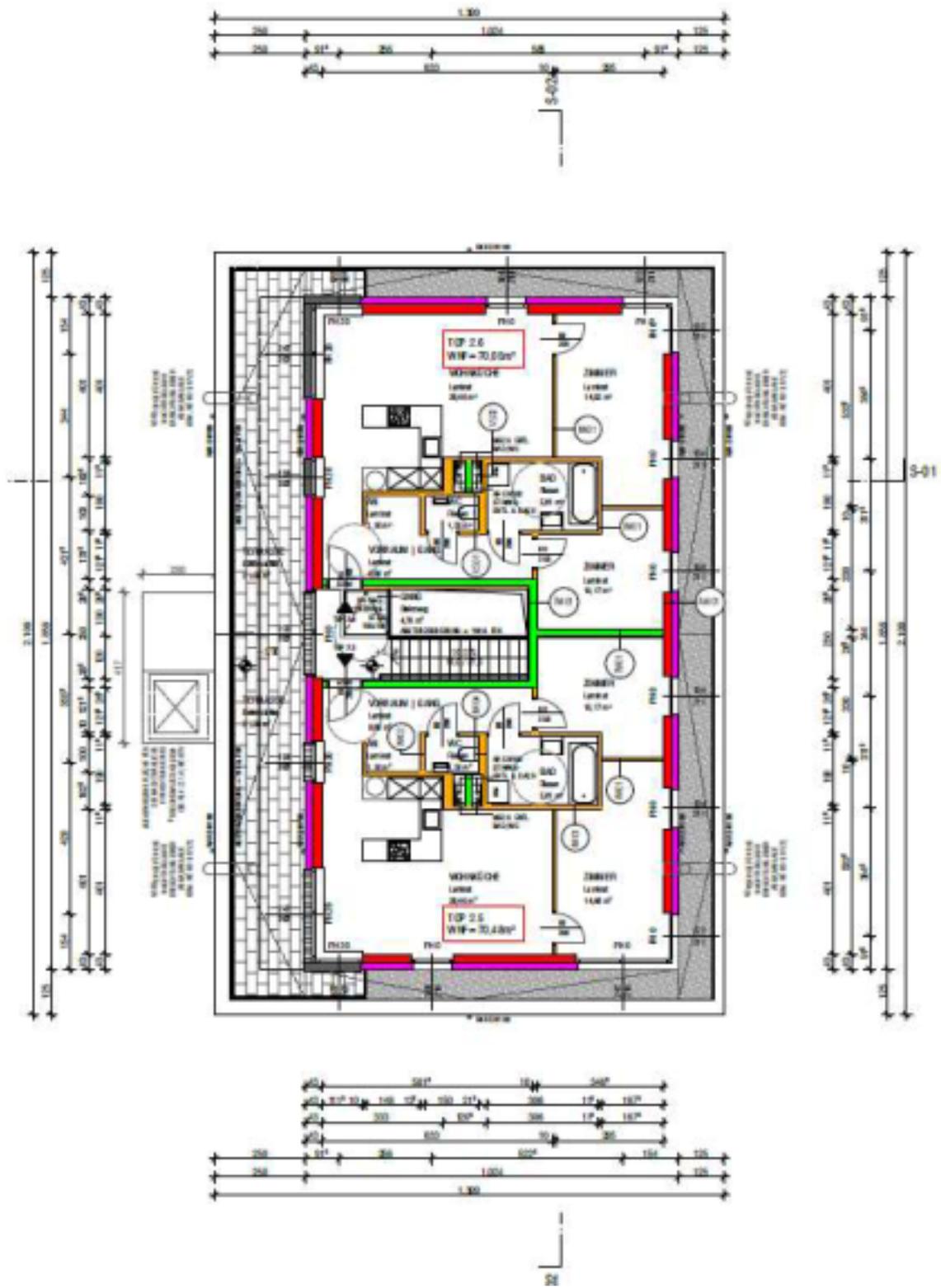
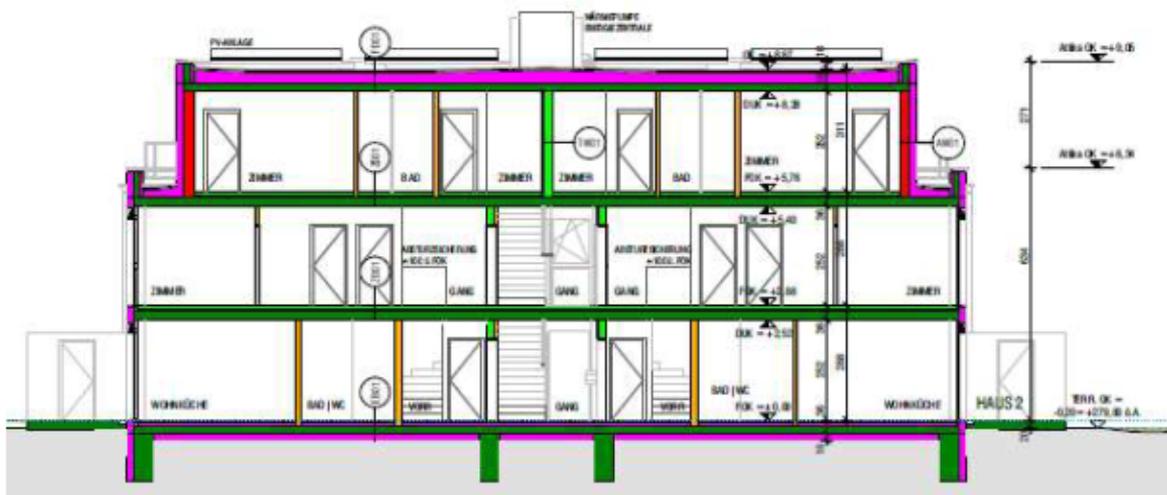


Abbildung 6: Schnitt 1, Haus 2



Abbildung 7: Schnitt 2, Haus 2



4.1.2. Gebäudetechnik

Die Wärmeversorgung des Gebäudes erfolgt über eine Luft-Wasser Wärmepumpe, welche am Dach des Gebäudes situiert ist. Die Luft-Wasser Wärmepumpe deckt dabei sowohl den Heizwärmebedarf wie auch den ersten Hub der Warmwasserbereitung, bis zu einer Temperatur von max. 35°C ab. Die Luft-Wasser Wärmepumpe wird zudem im Sommer zur aktiven Kühlung eingesetzt.

Der zweite Hub der Warmwasserbereitung bis ca. 55°C erfolgt mittels dezentraler Wasser-Wasser Wärmepumpen je Wohneinheit, welche den Rücklauf des Heizsystems als Quelle nutzen. Die Einbindung der Warmwasser-Wärmepumpen erfolgt am Heizkreisverteiler.

Während der Heizperiode wird der Rücklauf der Heizung direkt als Quelle für die Wasser-Wasser Wärmepumpe genutzt, wobei der Durchfluss in den anderen Heizkreisen etwas reduziert wird. Aufgrund der großen Speichermasse bei den aktivierten Bauteilen, zeigt der geringfügig reduzierte Durchfluss in den anderen Heizkreisen keinen merklichen Einfluss auf die Raumtemperaturen.

Außerhalb der Heizperiode, wenn die Luft-Wasser Wärmepumpe im Kühlbetrieb ist, wird der Rücklauf der Kühlung ebenso als Quelle für die Warmwasserbereitung herangezogen. Ist die Luft-Wasser Wärmepumpe im Sommer nicht in Betrieb, so wird die zur Wärmeabgabe in den Räumen eingesetzte Bauteilaktivierung als Quelle herangezogen. Dadurch wird bei Warmwasserbereitung im Sommer gleichzeitig der Raum bei geringer Leistung etwas gekühlt, indem den aktivierten Bauteilen die Wärme entzogen wird.

Die Wärmeabgabe in den Wohnungen erfolgt dabei ausschließlich über Bauteilaktivierung, weitere Abgabesysteme wie z.B. Fußbodenheizung im Erdgeschoss wurden nicht vorgesehen. Die Wohnungen sind mit einer Einzelraumregelung ausgestattet, die Bedienung erfolgt raumweise über analoge Raumthermostate. In den innenliegenden Bädern sind zusätzlich elektrische Handtuchheizkörper installiert.

Für eine gezielte Überladung der aktivierten Bauteile mittels Wärmepumpenanlage, und somit Ausnutzung der Gebäudespeichermasse als Speicher bei Stromüberschuss aus regenerativer Erzeugung (Solar- oder Windstrom), ist am Dach eine Photovoltaikanlage installiert. Bei Überschussstrom aus der PV-Anlage soll durch automatische Anpassung des Raumtemperatursollwerts bei den einzelnen Raumthermostaten, eine gezielte Überladung der aktivierten Bauteile erfolgen.

(1) Heizungswärmepumpe

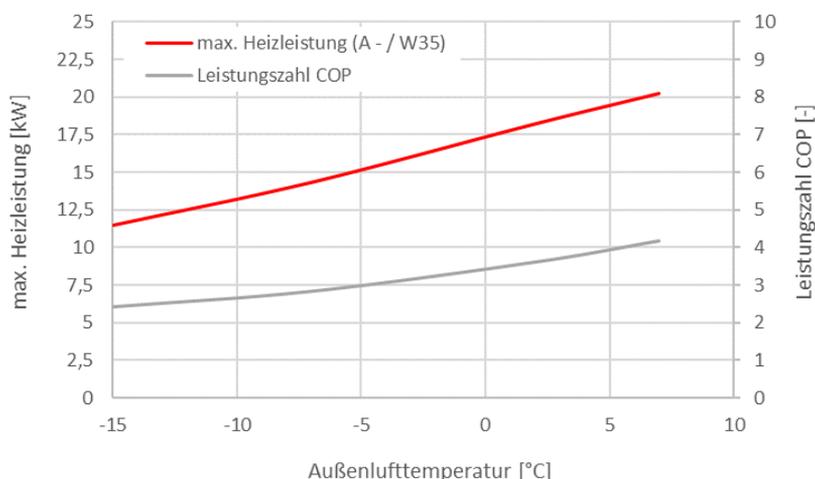
Luft-Wasser Wärmepumpe Typ Ovum AIR M2 (Kältemittel R410A)

Quelle: Außenluft

max. Heizleistung: 20,21 kW

max. Leistungsaufnahme: 13 kW inkl. Heizstab

Abbildung 8: Heizleistung und Leistungszahl der Luft-Wasser Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperatur auf der Quellenseite [Ovum]



(2) Warmwasserwärmepumpe inkl. Speicher

Wasser-Wasser Wärmepumpe Typ Ovum XR 150 (Kältemittel R290)

Quelle: Rücklauf des Heizsystems (18 – 35°C)

max. Heizleistung: 2,5 kW (1,3 kW Wärmepumpe + 1,2 kW el. Heizstab)

max. Leistungsaufnahme: 1,55 kW (350 W Wärmepumpe + 1,2 kW el. Heizstab)

COP (W25 / W55): 3,7

Bereitschaftswärmeverlust 150 Liter Speicher bei 55°C: 0,9 kWh/Tag

(3) Heizkreisverteiler und Stellantriebe

Heizkreisverteiler Typ IMI Heimeier Dynacon Eclipse mit automatischer Durchflussregelung

Stellantrieb Typ IMI Heimeier EMOtec

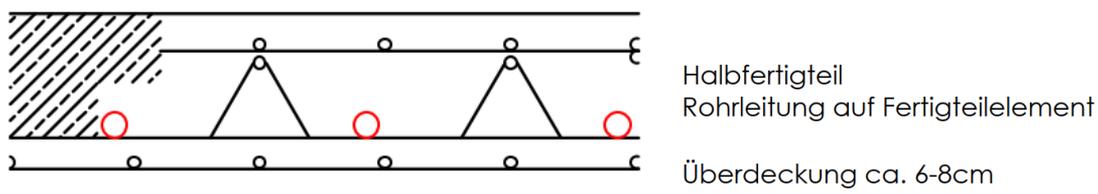
(4) Raumthermostat

Analoges Raumthermostat Typ Ovum 230V für Passivraumregelung (Einzelraumregelung in Kombination mit Passivwarmwasserbereitung über den Rücklauf des Heizsystems)

4.2. Bauteilaktivierung zur Wärmespeicherung

Als Wärmeabgabesystem dienen thermisch aktivierte Bauteile. Die Betondecken wurden als Halbfertigteile ausgeführt. Die Rohrleitungen wurden auf den Fertigteilelementen verlegt.

Abbildung 9: Systemskizze aktiviertes Halbfertigteil mit Rohrleitungen auf der Elementdecke



Bei dem Projekt soll die Speichermasse der Bauteilaktivierung als Speicher für erneuerbare Energien genutzt werden. Im Rahmen des Projekts sollte die Implementierung von zwei unterschiedlichen Energiequellen - Photovoltaik und Windkraft - analysiert und ggf. umgesetzt werden. Die Charakteristik der beiden technologischen Ansätze sowie die Umsetzung im Projekt wird nachfolgend beschrieben.

Abbildung 10: Verlegung der Rohrleitungen auf der Elementdecke Tonpfeifengasse (Foto: Handler)



4.2.1. Photovoltaikanlagen

Die Nutzung des am eigenen Gebäude produzierten Stroms mittels PV-Anlage stellt anlagentechnisch die einfachste Variante zur Stromüberschussnutzung aus erneuerbaren Energien dar. Je nach umgesetzter Überschussregelung, z.B. entweder über die ohnehin installierten geeigneten Raumthermostate mit einer Sollwertverschiebung um 2 K für den Heiz- und Kühlfall oder über zusätzliche Kerntemperaturfühler in den aktivierten Decken, ergibt sich bei der Nutzung von PV-Strom ein mehr oder weniger begrenztes Potenzial für die Sektorkopplung.

(1) Nutzung PV-Überschuss im Heizfall:

Bei einer Überschussregelung über die Raumthermostate führen die solaren Gewinne häufig dazu, dass die Raumtemperaturen für eine weitere Einspeicherung von Wärme, bereitgestellt von Wärmepumpen mit erneuerbarem Strom, bereits zu hoch liegen. Dies liegt daran, dass zu Zeiten mit hohem PV-Ertrag auch die solaren Wärmegewinne über die Fensterflächen relativ hoch sind und zu einer Erwärmung der Räume führen. Einer möglichen Überwärmung von Räumen kann durch Betätigung des Sonnenschutzes bzw. durch kurzes Lüften entgegengewirkt werden.

Der Ertrag aus der PV-Anlage läuft zudem über das Jahr betrachtet grundsätzlich gegenläufig zum Strombedarf der Heizwärmepumpe. Die Nutzung von PV-Überschüssen zur Wärmespeicherung in Gebäudestrukturen ist aus diesem Grund nur eingeschränkt möglich.

(2) Nutzung PV-Überschuss im Kühlfall:

Im Kühlfall verhält es sich genau gegenläufig. Hohe Raumtemperaturen und somit vorhandener Kühlbedarf stellen sich üblicherweise bei hohen solaren Einstrahlungen und in weiterer Folge hohen PV-Erträgen ein. Dies ist einerseits positiv im Hinblick auf die Abdeckung des Energiebedarfs der Raumkühlung, andererseits entsteht in diesem Fall auch nicht das Problem, dass die Raumthermostate die Versorgung der Bauteilaktivierung aufgrund hoher solarer Einträge unterbrechen. Im Gegenteil werden die Raumthermostate selbst ohne Verschiebung der Sollwerte zu Zeiten hoher PV-Erträge vorhandenen Kühlbedarf melden, da die solare Einstrahlung die Raumtemperaturen über die eingestellten Sollwerte ansteigen lässt. Die Nutzung von PV-Überschüssen zur Kühlung des Gebäudes ist somit sehr gut geeignet. Die Bauteile werden untertags entwärmt und entziehen den Räumen über den Tag verteilt Wärme.

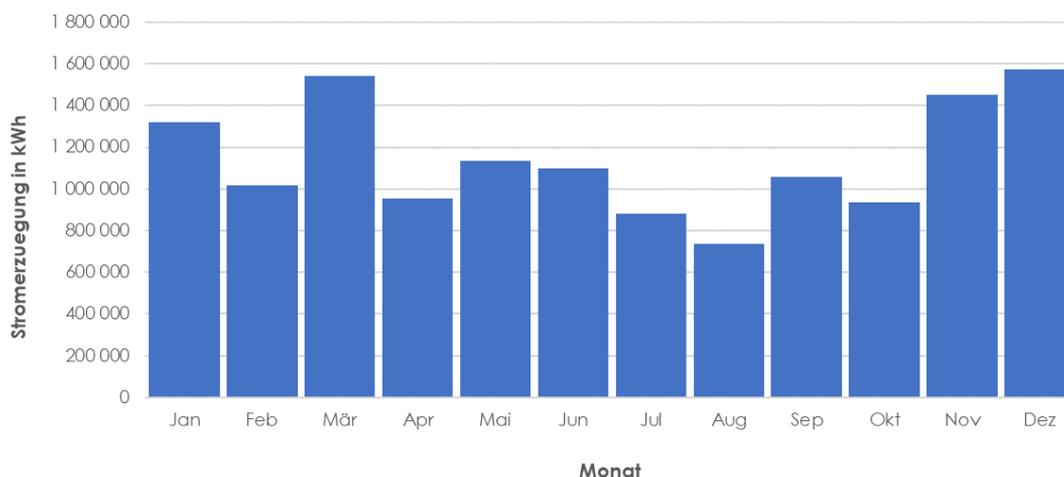
(3) Umsetzung im Projekt:

Die Nutzung und Speicherung von am Standort erzeugtem Strom aus Photovoltaikanlagen wurde für das Projekt umgesetzt und kann daher über das Monitoring analysiert werden.

4.2.2. Windkraftanlagen

Das Stromerzeugungsprofil von PV-Anlagen in Verbindung mit dem Bedarfsprofil der Raumheizung zeigt die Grenzen der Kombination PV und Wärmepumpe zur Speichernutzung der Bauteilaktivierung im Heizfall sowie das Potenzial im Kühlfall. Die Sektorkopplung mit Windkraft zeigt auf Basis des in der folgenden Abbildung dargestellten monatlichen Stromerzeugungsprofils einer 5,6 MW Windkraftanlage, eine wesentlich bessere Eignung für die Kombination Wind und Wärmepumpe im Winterfall. Die Sektorkopplung mit Windstrom wäre daher für den Heizfall wesentlich vorteilhafter, da hier die Stromüberschüsse auch zu Zeiten ohne hohe solare Gewinne auftreten. Der Einsatz der ohnehin installierten und geeigneten Raumthermostate zur Überschussregelung wäre bei der Sektorkopplung mit Windkraft daher problemlos möglich.

Abbildung 11: exemplarisches monatliches Stromerzeugungsprofil Windkraftanlage Vestas V150 5,6 MW, Standort Weinviertel (Quelle: WEB Windenergie AG) [1]



Das Potenzial zur Sektorkopplung mit Windkraft wurde für das Bauvorhaben Tonpfeifengasse mit dem durch den Bauträger ausgewählten Energieversorger (EVU) wie folgt abgestimmt:

Grundsätzliche sind bei der Sektorkopplung mit Windkraft zwei regelungstechnische Umsetzungsvarianten möglich:

(1) Variante 1: Überschuss-Windsignal

Seitens EVU wird ein Signal zur Verfügung gestellt, welches der Haustechnik anzeigt, ob Strom bezogen werden soll oder nicht. Die Realisierung über dieses einfache Überschuss-Windsignal, analog dem Überschuss-Signal der PV-Anlage, bringt folgende Nachteile für den Windkraftbetreiber mit sich:

- Das Überschuss-Windsignal ist ein reines Steuersignal und gibt keine Rückmeldung, ob und wieviel mittels Wärmepumpenanlage verbraucht wird.
- Es ist somit nur für den kurzfristigen Ausgleich von Prognosefehlern für den Windkraftbetreiber geeignet.

Die Realisierung des Überschuss-Windsignals würde aktuell über eine kundenspezifische Programmierung eines VPN-Tunnels, über die örtliche MSR (Mess-, Steuer-, Regel-) Technik, erfolgen müssen.

Die Lösungsvariante eines Überschuss-Windsignals, welche für die Stromüberschussnutzung aus der eigenen PV-Anlage grundsätzlich gut geeignet ist und hier die einfachste Lösung darstellt, scheidet für das Projekt Tonpfeifengasse für den EVU aus diesen Gründen aus.

(2) Variante 2: Plug-and-Play-Control

Die Realisierung über Plug-and-Play-Control erlaubt dem EVU eine bessere Prognose der Stromabnahme und bringt folgende wesentliche Vorteile für den Windkraftbetreiber mit sich:

- Die technische Lösungsvariante beinhaltet ein selbstlernendes Regelungskonzept zur Ermittlung von prognosebasierten (Wärmebedarf, Strompreis) Stromfahrplänen
- Hierdurch ist eine strompreisoptimierte Fahrplansteuerung und ein Demand-Side-Management der Wärmepumpenanlage möglich
- Durch eine standardisierte, herstellerunabhängige Kommunikationsschnittstelle zur Wärmepumpenanlage soll die Einbindung in das Regelungskonzept vereinfacht werden. Nachgelagerte Anlagenkomponenten (Heizungsventile, ...) werden zudem in das Regelungskonzept integriert, um eine Abnahme nach Stromfahrplan auch garantieren zu können.

Die technische Lösungsvariante 2 soll die Einführung eines stundenorientierten Tarifs erlauben, welcher für jede Stunde auf Basis des Spot-Markt Preises einen Strompreis für die verbrauchte

Energiemenge der Wärmepumpenanlage bestimmt. Die Einführung dieses stundenorientierten Tarifs ist zwar geplant, der entsprechende Stromtarif steht aber zum Zeitpunkt der Berichtslegung noch nicht zur Verfügung.

(3) Umsetzung im Projekt:

Die Nutzung und Speicherung von netzseitig erzeugtem Windstrom wurde für das Projekt aus o.a. Gründen nicht umgesetzt und kann daher über das Monitoring nicht analysiert werden.

4.3. Planungsbegleitende Maßnahmen und Monitoring

Die Realisierung des Gebäudes als Energiespeicher erfolgt wie bereits erläutert durch Aktivierung der Geschosdecken mittels Bauteilaktivierung. Die Prüfung der grundsätzlichen Eignung der Bauteilaktivierung zur Raumkonditionierung beim vorliegenden Bauvorhaben erfolgt im Zuge der Planung mittels thermischer Gebäudesimulation. Die Überprüfung der Anlagentechnik im realen Betrieb erfolgt mittels Monitoring.

4.3.1. Thermische Gebäudesimulation

In der Anlage 1 befindet sich der Kurzbericht zur thermischen Gebäudesimulation, welche im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde. Neben der Prüfung der grundsätzlichen Eignung der Bauteilaktivierung zur Raumkonditionierung durch Ermittlung der operativen Temperatur sowie des PMV-Index (das PMV ist dabei ein Index, der den Durchschnittswert für die Klimabeurteilung durch eine große Personengruppe anhand einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskala vorhersagt. PMV = 0 bedeutet, dass die meisten Personen das Raumklima „neutral“ (weder kalt noch warm) beurteilen werden. PMV = 1 bedeutet „etwas warm“, während PMV = -1 „etwas kühl“ bedeutet), erfolgte auch die Ermittlung der Auskühlzeit bei „Überladung“ der aktivierten Bauteile und somit Ausnutzung der Gebäudespeichermasse als thermischer Speicher.

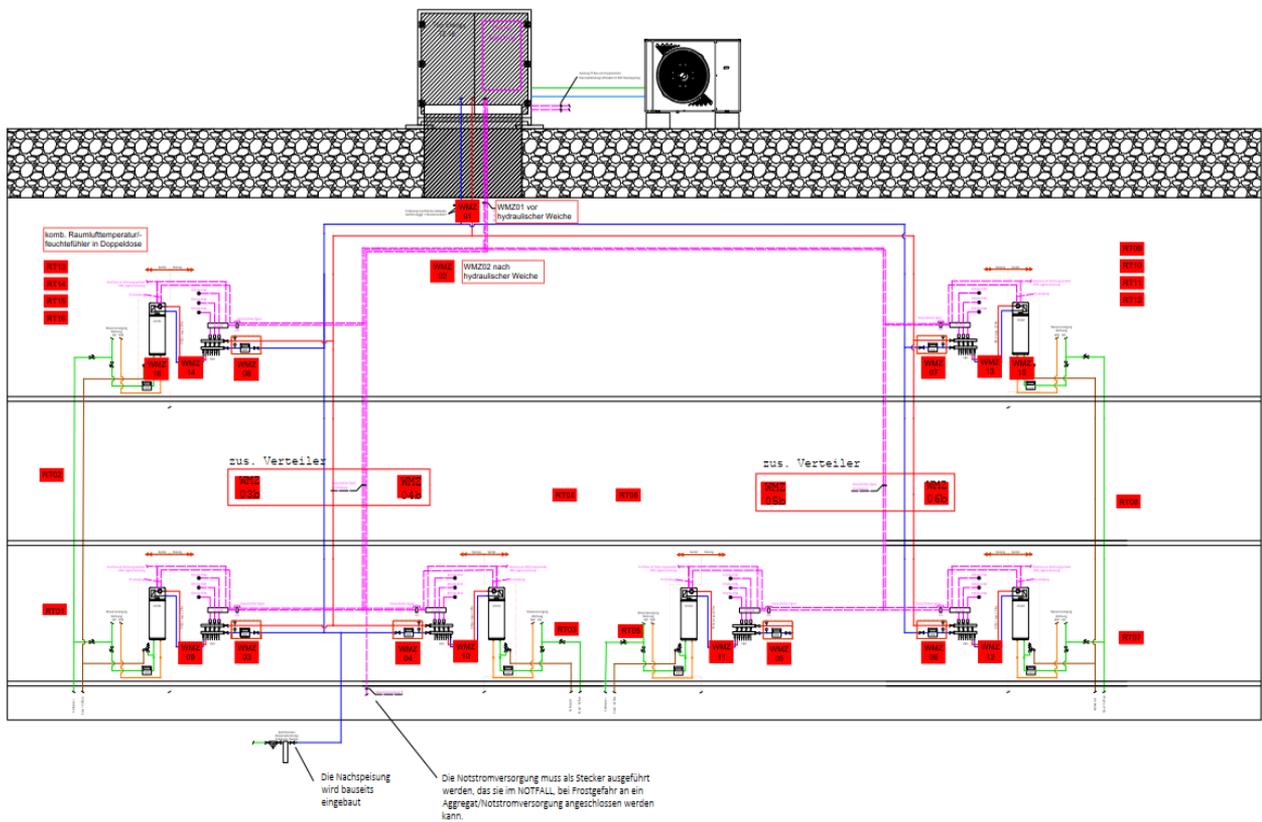
4.3.2. Monitoring

Für das Monitoring von Haus 2 wurde ein Monitoringkonzept erstellt, welches sich in der Anlage 2 befindet. Die auf Basis des Monitoringkonzepts zur Ausführung gelangten Zähler und Sensoren werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

(1) Anlagenschema und Zählkonzept

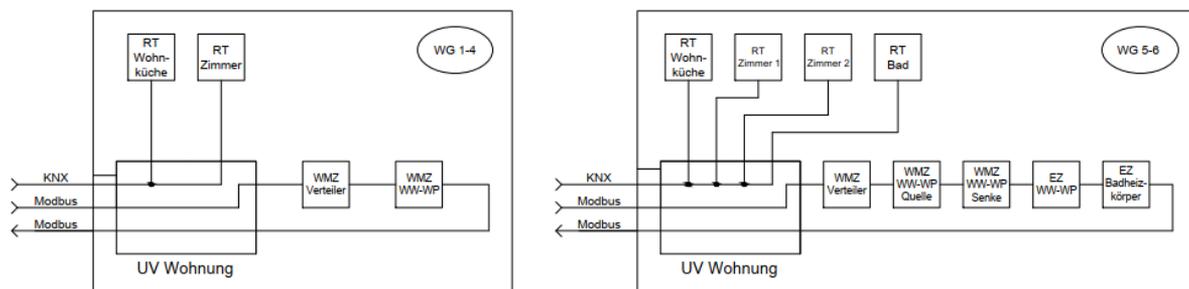
Folgende Abbildung zeigt das Anlagenschema sowie das Zählkonzept für das Monitoring mit der zentralen Luft-Wasser Wärmepumpenanlage am Dach des Gebäudes und den dezentralen Wasser-Wasser Wärmepumpenanlagen mit 150l Speicher, welche aus Platzgründen in den Küchen der jeweiligen Wohneinheiten installiert wurden. Die detaillierte Auflistung der Messpunkte befindet sich im Messkonzept in der Anlage 2.

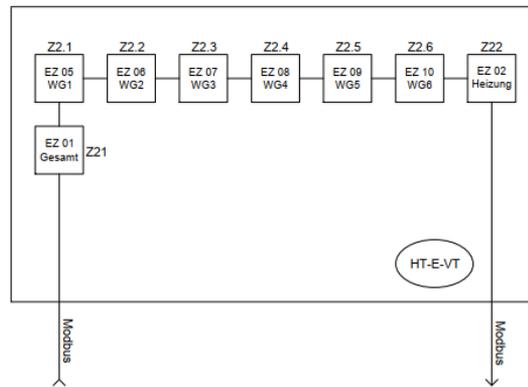
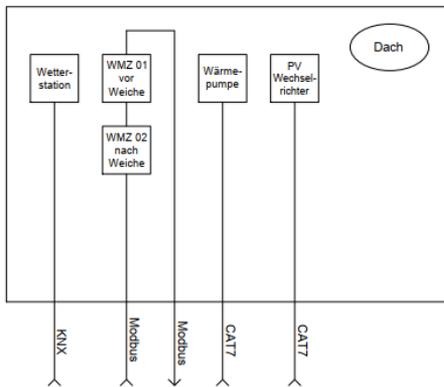
Abbildung 12: Anlagenschema und Zählkonzept Monitoring



Für die Datenübertragung zwischen den Zählern/Sensoren und dem Schaltschrank kommen KNX und Modbus zum Einsatz. Folgende Abbildung zeigt das Automatisierungsschema der Sensoren in den Wohnungen 1 – 6, der Sensoren am Dach (Luft-Wasser Wärmepumpe, Photovoltaik und Wetterstation) sowie der Energiezähler.

Abbildung 13: Automatisierungsschema





(2) Messequipment

(a) Stromzähler

Energiezähler Typ EM 340, Hersteller Carlo Gavazzi

Dreiphasen-Energiezähler

Klasse 1 gemäß EN 62053-21 / Klasse B gemäß EN 50470-3

Abbildung 14: Energiezähler, Typ EM340, Hersteller Carlo Gavazzi



(b) Wärme- und Kältezähler

Wärme- und Kältezähler Typ UH50, Hersteller Siemens

Ultraschallzähler

MID-Genauigkeitsklasse 2 gemäß EN 1434

Abbildung 15: Wärme- und Kältezähler, Typ UH50, Hersteller Siemens



(c) Raumtemperatur und -feuchtefühler

Raumtemperatur und -feuchtefühler Typ EM ZS-FSEN, Hersteller Zennio

Genauigkeit Temperatur $\pm 0,5$ K

Genauigkeit relative Feuchtigkeit $\pm 3,0$ % r.F.

Abbildung 16: Raumtemperatur und -feuchtefühler, Typ ZS-FSEN, Hersteller Zennio



(d) Wetterstation

Wetterstation Typ Meteodata 140 basic, Hersteller Theben

Kombisensor Wind, Helligkeit und Temperatur

Abbildung 17: Wetterstation, Typ Meteodata 140 basic, Hersteller Theben



Zur Überprüfung der erfassten Raumtemperatur und Raumlufefeuchtigkeit in den jeweiligen Wohnungen, wurden über den Zeitraum von einer Woche Datenlogger installiert. Die mittels Datenlogger erfassten Verläufe von Temperatur und Feuchte wurden zum Abgleich mit den Monitoringdaten herangezogen. Die Ergebnisse sind in der Anlage 3 „Raumklimamessungen“ dargestellt.

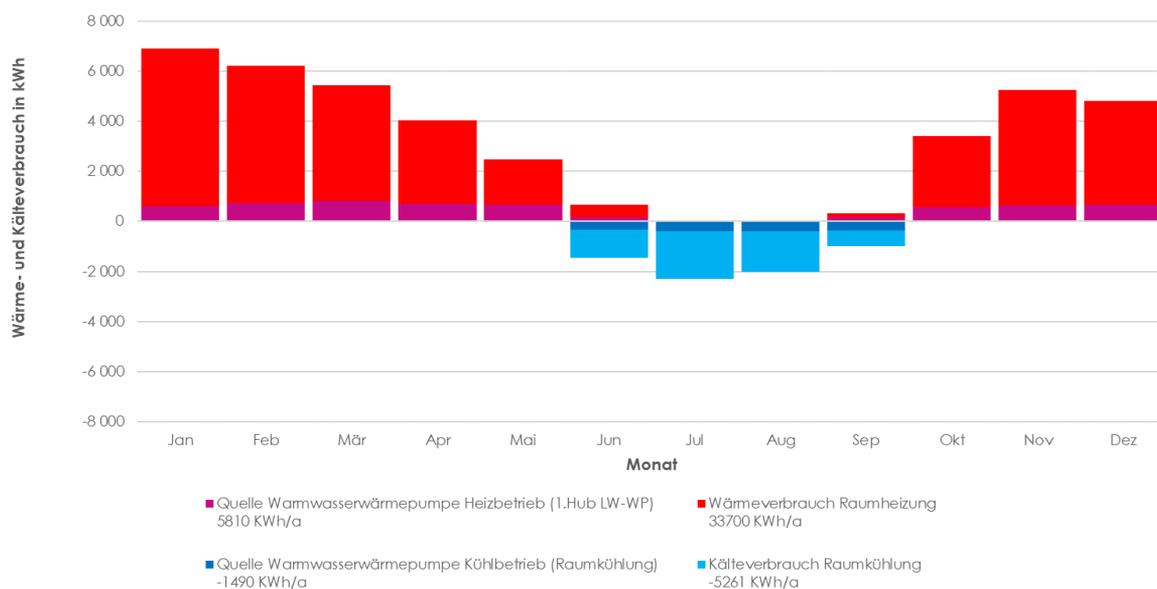
5 Ergebnisse

5.1. Monitoring Haus 2

5.1.1. Wärme- und Kälteverbrauch

Die folgende Abbildung zeigt den Wärme- und Kälteverbrauch der sechs Wohnungen von Haus 2 im ersten Betriebsjahr. Abweichend zum Energieausweis, mit einem ermittelten Heizwärmebedarf von etwa 20.400 kWh/a, stellt sich im ersten Betriebsjahr dabei ein wesentlich höherer Heizwärmeverbrauch von ca. 33.700 kWh/a ein.

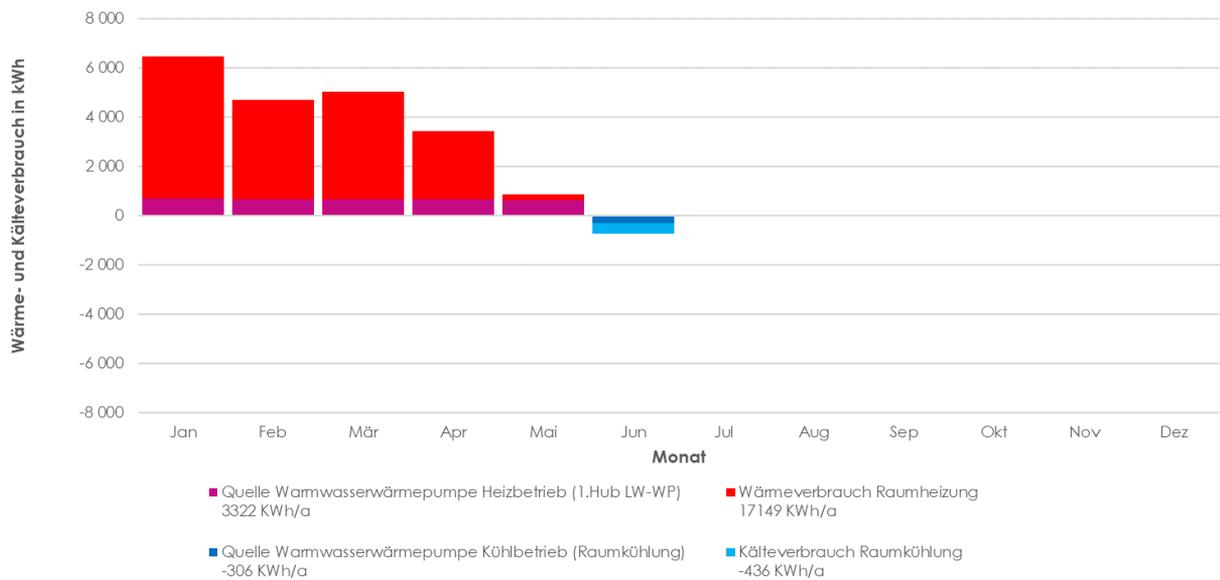
Abbildung 18: Wärme- und Kälteverbrauch, Haus 2 [2021]



Der Rücklauf der Bauteilaktivierung als Quelle der Warmwasserwärmepumpen wird wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, in der Heizperiode von der Heizungswärmepumpe versorgt (1.Hub LW-WP) und führt zu einem entsprechenden Anstieg des Wärmeverbrauchs. In der Kühlperiode wird ebenso der Rücklauf der Bauteilaktivierung als Quelle herangezogen, in diesem Fall führt der Betrieb der Warmwasserwärmepumpen zu einer zusätzlichen Raumkühlung und reduziert dadurch den Betrieb der reversiblen Heizungswärmepumpe im Kühlbetrieb.

Auch im zweiten Betriebsjahr ist im Vergleich zum Energieausweis mit einem Mehrverbrauch bei der Raumheizung von ca. 50 % zu rechnen. Die Umschaltung der reversiblen Heizungswärmepumpe in den Kühlbetrieb erfolgte erst spät im Juni, daher ergibt sich zu Beginn der Kühlperiode im zweiten Betriebsjahr 2022 auch nur ein geringer Kühlenergieverbrauch.

Abbildung 19: Wärme- und Kälteverbrauch, Haus 2 [2022]



Inbetriebnahmephase

Während der Inbetriebnahme der Heizung im Dezember 2020 waren die Wohnungen bereits bezogen. Aufgrund falsch angeschlossener Raumthermostate öffneten die Stellmotoren am Heizungsverteiler nicht und die Wohnungen wurden nicht warm genug. Um kurzfristig ein ausreichendes Temperaturniveau in den Wohnungen zu erreichen, wurden die Stellmotoren provisorisch ausgebaut und die einzelnen Heizkreise manuell einreguliert. Zudem wurde die Vorlauftemperatur angehoben. Dies führte während der Inbetriebnahmephase zu einer Überhitzung der Wohnungen bei gleichzeitig hohem Wärmeverbrauch.

Zudem wurden während der durchgeführten Raumklimamessungen immer wieder dauerhaft gekippte Fenster in den Wohnungen festgestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die Raumlufttemperatur in den Wohnungen während der Inbetriebnahmephase. Die Anhebung der Vorlauftemperatur bei ausgebauten Stellmotoren führte zu einer entsprechenden Überhitzung der Wohnungen. Die max. Temperaturen lagen im Bereich von 29°C, nur durch entsprechendes Lüftungsverhalten wurden Raumlufttemperaturen im Bereich von 24 – 26 °C erzielt.

Abbildung 20: Raumlufttemperatur Wohnküche (Top 2.5) während der Inbetriebnahme

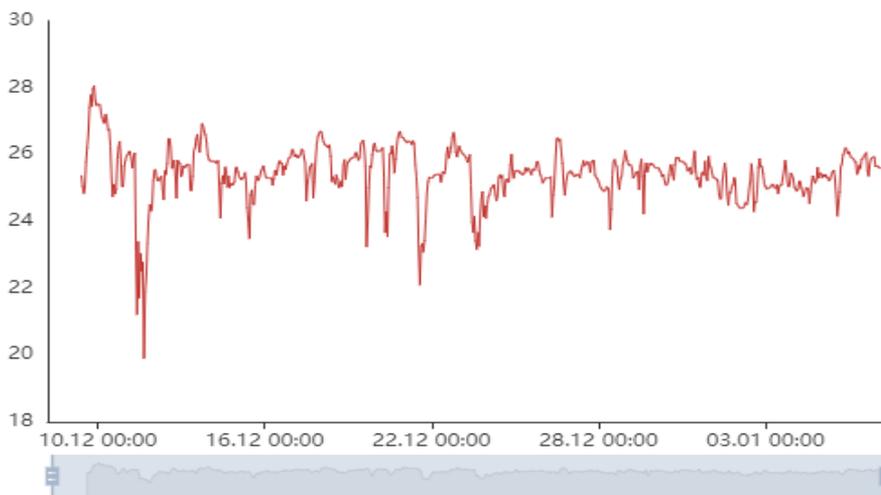
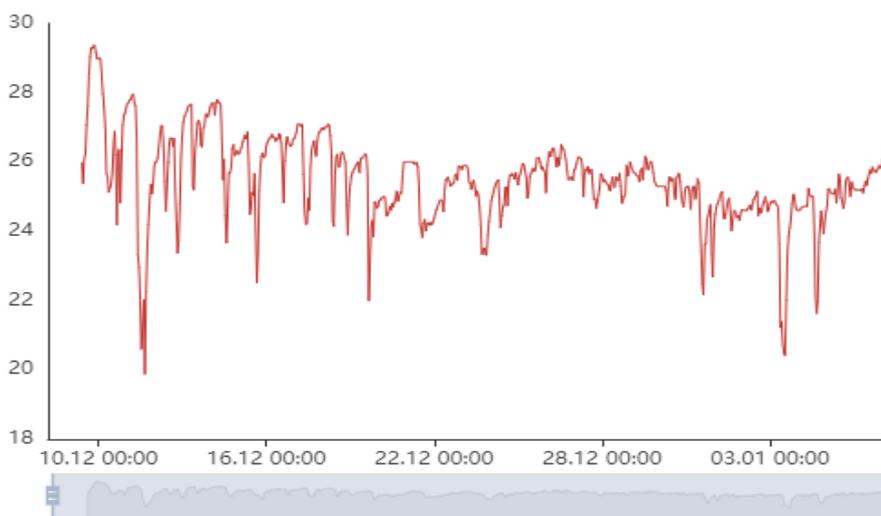


Abbildung 21: Raumlufttemperatur Zimmer 2 (Top 2.5) während der Inbetriebnahme



Die Vorlauftemperatur lag während des manuellen Betriebs mit bis zu 33°C wesentlich zu hoch für die zu diesem Zeitpunkt vorherrschende Außenlufttemperatur mit meist über 0 °C. Ab dem 20. Dezember erfolgte eine Absenkung der Vorlauftemperatur, wodurch sich die Temperaturspitzen in den Wohnungen reduzierten. Bis zum korrekten Anschluss der Raumthermostate im Zeitraum 02/03 2021 wurde diese Betriebsweise beibehalten.

Abbildung 22: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.5) während der Inbetriebnahme

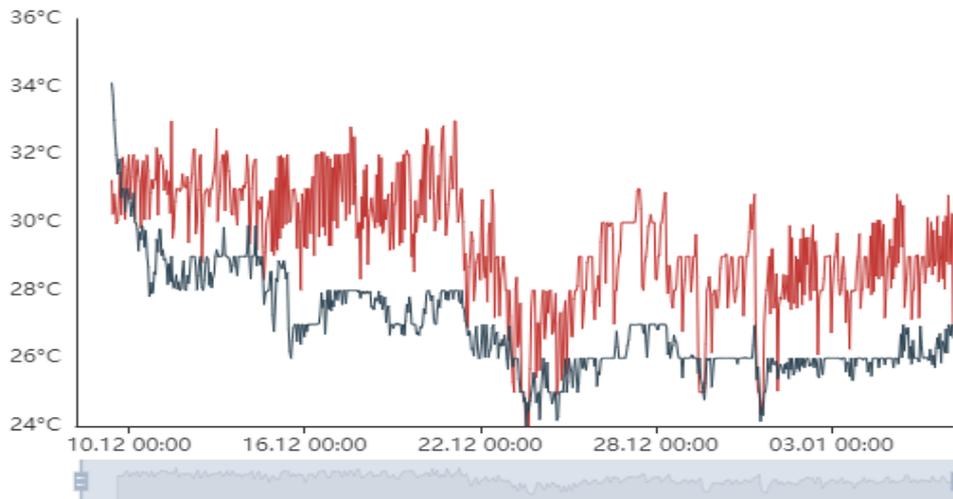
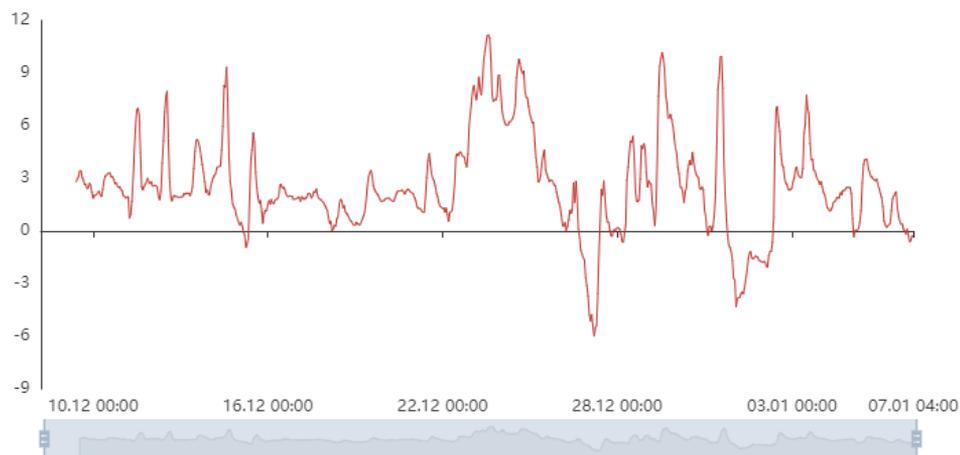


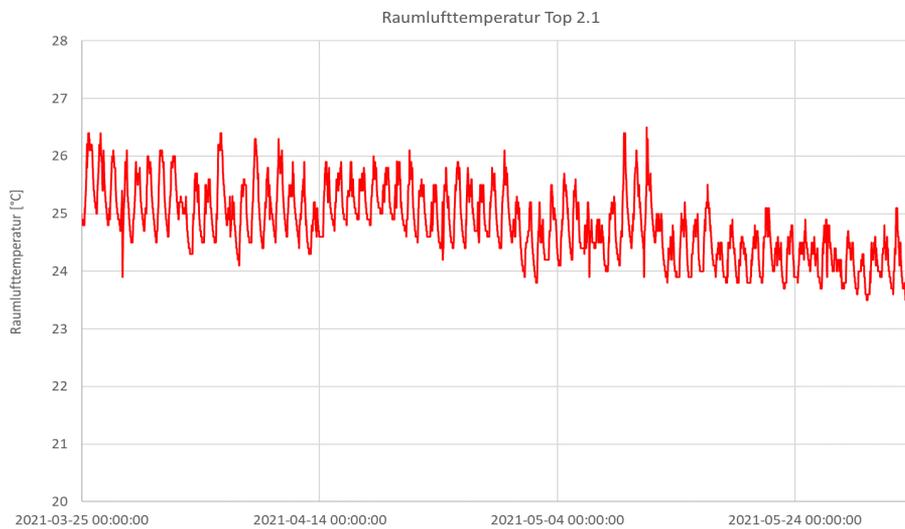
Abbildung 23: Verlauf der Außenlufttemperatur während der Inbetriebnahme



5.1.2. Bauteilaktivierung - Raumheizung

Nach der Inbetriebnahmephase lagen die Raumlufttemperaturen im regulären Anlagenbetrieb in einem für die Bauteilaktivierung behaglichen Bereich, teilweise mit 24-25°C in manchen Wohnungen sogar noch etwas zu hoch für eine gute Anlageneffizienz. Ende April erfolgte daher eine Absenkung der Heizkurve, um die Effizienz der Luft-Wasser Wärmepumpe im weiteren Betrieb zu steigern.

Abbildung 24: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.1)



5.1.3. Bauteilaktivierung - Raumkühlung

Die Bauteilaktivierung wird auch zur Kühlung eingesetzt. Die Kälteversorgung erfolgt dabei entweder über die Luft-Wasser-Wärmepumpe oder die Warmwasserbereitung (Passivwarmwasser), wenn die Luft-Wasser-Wärmepumpe nicht in Betrieb ist. In diesem Fall fungiert die Bauteilaktivierung als Wärmequelle und die Wohnung wird mit geringer Leistung teilgekühlt. Mittels der Bauteilaktivierung lassen sich sehr behagliche Raumlufttemperaturen im Sommer erreichen, die Temperaturspitzen im Sommer liegen in den Wohnungen bei ca. 26 °C. Die Vorlauftemperatur liegt im Sommer bei minimal 18°C.

Abbildung 25: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.1)

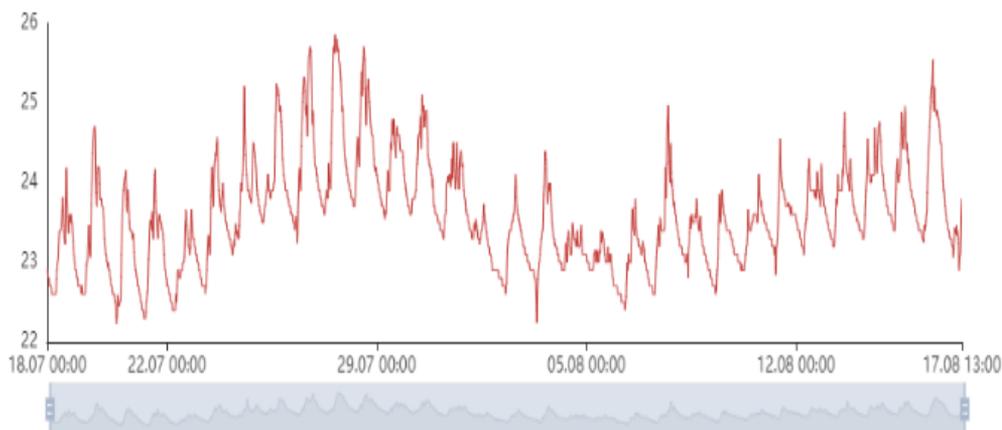


Abbildung 26: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.1) während der Kühlperiode

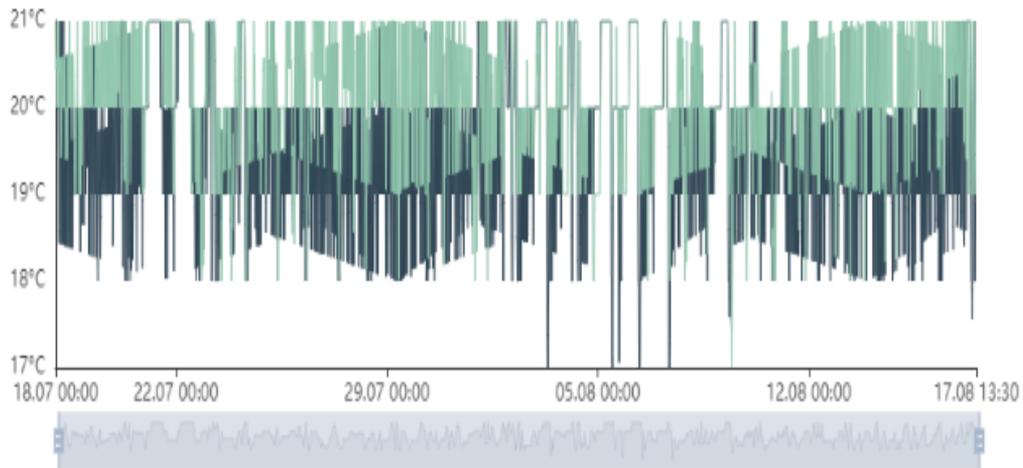


Abbildung 27: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.6)

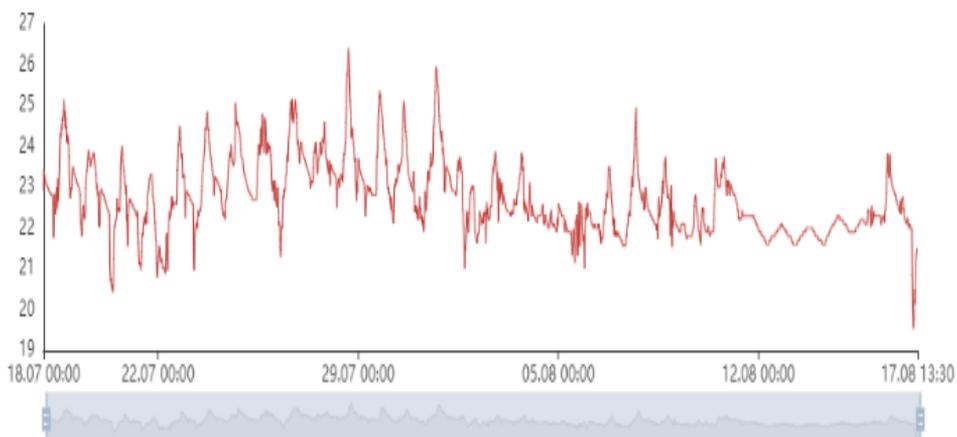
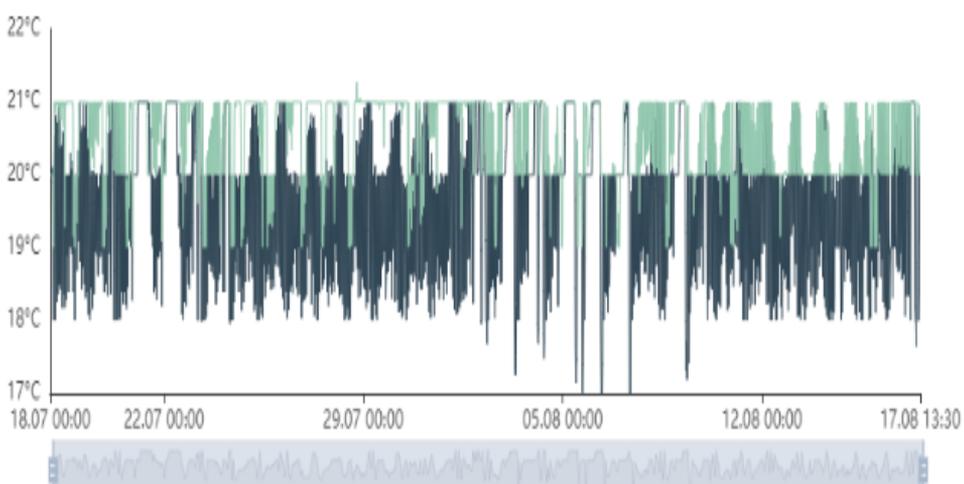


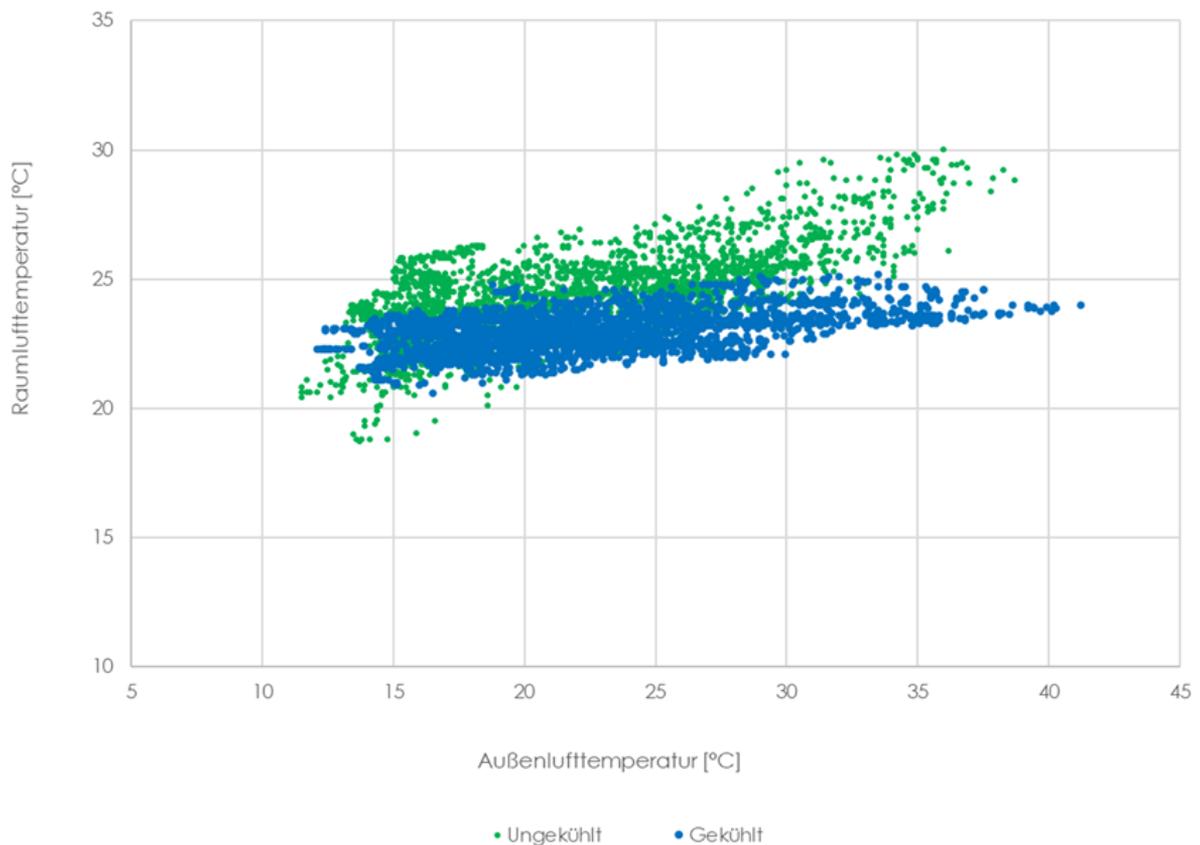
Abbildung 28: Vorlauf- und Rücklauf-temperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.6) während der Kühlperiode



Behaglichkeit

Im Juni 2022 erfolgte aufgrund eines Regelungsfehlers trotz bereits hoher Außenlufttemperaturen keine Kühlung bei Haus 2, die reversible Wärmepumpe ging nicht automatisch in den Kühlbetrieb. Hierdurch lässt sich der Unterschied in den Monaten Juni und Juli 2022 zwischen einem ungekühlten und gekühlten Wohngebäude darstellen. Die Auswertung erfolgt beispielhaft für die Wohnküche in Top 2.6.

Abbildung 29: Raumlufthtemperaturen Wohnküche 2.6 (Juni ungekühlt, Juli gekühlt)



Im Juni, während die reversible Wärmepumpenanlage noch nicht im Kühlbetrieb war, stellen sich in der betrachteten Wohnküche Raumlufthtemperaturen bis zu 30 °C ein. Nach der Inbetriebnahme der Kühlung reduzieren sich die maximalen Raumlufthtemperaturen im Juli auf etwa 25 °C. Die Kühlung über die Bauteilaktivierung führt zu sehr behaglichen Raumlufthtemperaturen und in Verbindung mit einer geringen Untertemperatur der Decke zur Raumlufthtemperatur zu einer insgesamt hohen thermischen Behaglichkeit im Raum.

5.1.4. Energieverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe (Heizung, Kühlung, 1.Hub Warmwasser)

Folgende Abbildungen zeigen den Energieverbrauch der Luft-Wasser Wärmepumpe sowie die jeweiligen Monatsarbeitszahlen bei Heiz- und Kühlbetrieb für die Betriebsjahre 2021 und 2022. Im Heizbetrieb liegen die Monatsarbeitszahlen zwischen 3,2 und 7,0, im Kühlbetrieb zwischen 4,0 und 6,0. Die Luft-Wasser Wärmepumpe erreicht im Betrieb in etwa die im Datenblatt angeführten Leistungszahlen.

Abbildung 30: Stromverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe und Monatsarbeitszahl [2021]

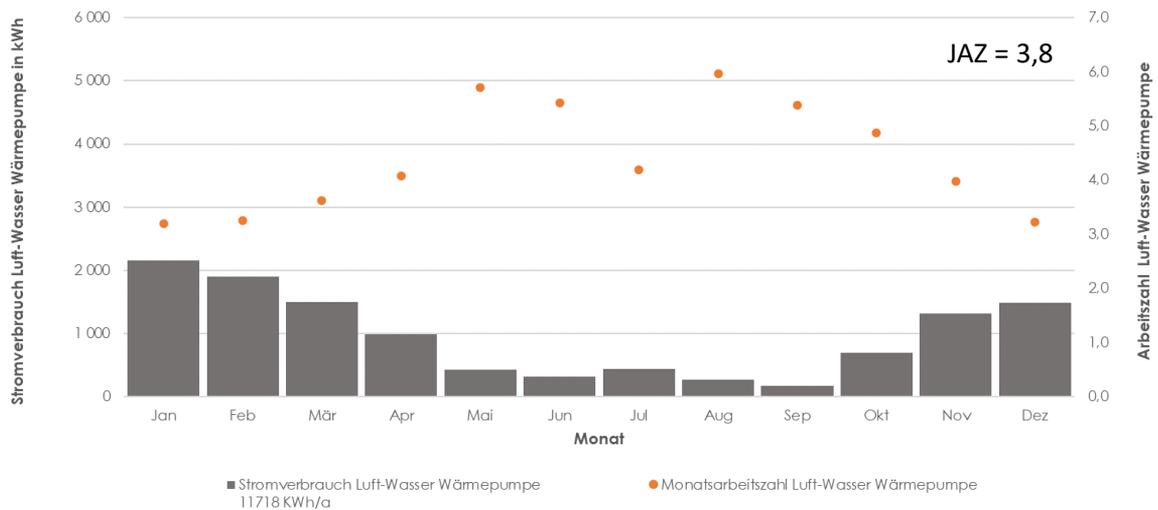
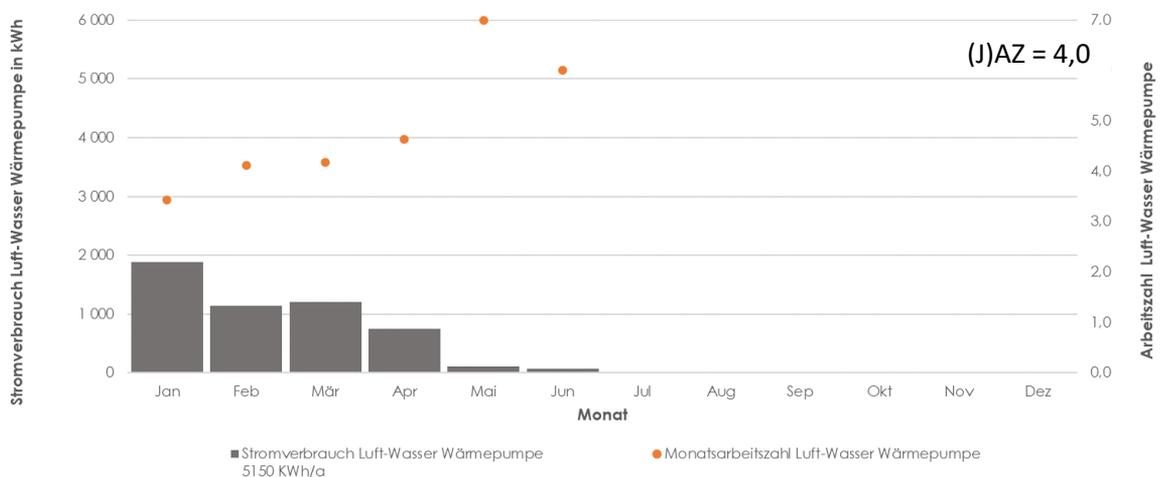


Abbildung 31: Stromverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe und Monatsarbeitszahl [2022]



Die Jahresarbeitszahlen bzw. bilanzierten Monatsarbeitszahlen (Betriebsjahr 2022 Mesperiode nur bis Juni) der Luft-Wasserwärmepumpe liegen zwischen 3,8 und 4,0.

Abbildung 32: Datenblatt Luft-Wasser Wärmepumpe

TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN Gültig für Monoblock und Split-Version						
		ME	Min.	Nom.	Max.	
Heizung	Air 7°C Water 30/35°C	Thermische Leistung	kw	5,31	10,56	20,21
			COP	4,61	4,89	4,17
	Air 2°C Water 30/35°C	Thermische Leistung	kw	4,68	9,36	18,19
			COP	3,99	4,23	3,61
	Air -7°C Water 35°C	Thermische Leistung	kw	3,01	7,23	14,32
			COP	2,88	3,31	2,84
	Air -15°C Water 35°C	Thermische Leistung	kw	2,32	5,80	11,47
			COP	2,46	2,83	2,43
	Air 7°C Water 55°C	Thermische Leistung	kw	4,89	9,40	16,30
			COP	2,75	2,91	2,46
	Air 2°C Water 55°C	Thermische Leistung	kw	4,31	8,50	14,67
			COP	2,51	2,66	2,33
	Air -10°C Water 55°C	Thermische Leistung	kw	2,65	6,04	10,82
			COP	1,65	1,93	1,73
Kühlung	Air 35°C Water 7°C	Kühlleistung	kw	3,75	8,72	14,07
			EER	2,65	3,31	3,03
	Air 35°C Water 18°C	Kühlleistung	kw	4,90	11,35	15,90
			EER	3,93	4,66	4,35

5.1.5. Energieverbrauch Wasser-Wasser Wärmepumpe (2.Hub Warmwasser)

Folgende Abbildungen zeigen den Energieverbrauch der Wasser-Wasser Wärmepumpen in Top 2.5 und Top 2.6 sowie den anteiligen Energieverbrauch für den ersten Hub durch die Luft-Wasser Wärmepumpe im Heizbetrieb. Zudem erfolgt die Darstellung der jeweiligen Monatsarbeitszahlen für die Warmwasserwärmepumpe allein bzw. ergänzt um den Stromverbrauch für den ersten Hub durch die Luft-Wasser Wärmepumpe. Bei Betrieb der Warmwasserwärmepumpen im Sommer, wo die Bauteilaktivierung zur Raumkühlung als Quelle genutzt wird, entfällt der Stromverbrauch für den ersten Hub – die beiden Monatsarbeitszahlen (mit und ohne ersten Hub mittels der Luft-Wasserwärmepumpe) sind in den Sommermonaten somit ident.

Die Aufheizzeit des Speichers bei alleinigem Wärmepumpenbetrieb, mit entsprechend geringer Heizleistung, würde bei etwa 7 Stunden liegen. Aufgrund des geringen Speichervolumens des Warmwasserbereiters kommt der E-Heizstab allerdings sehr oft zum Einsatz. Die Monatsarbeitszahlen der Warmwasserwärmepumpen liegen entsprechend nur zwischen 1,4 und 2,4. Berücksichtigt man den ersten Hub der Warmwasserbereitung durch die Luft-Wasser Wärmepumpe, so reduzieren sich die Monatsarbeitszahlen für die Warmwasserbereitung auf 1,3 – 1,9.

Im Zuge der Inbetriebnahme wurden sehr geringe Zapfmengen beanstandet. Durch eine fehlerhafte Nachströmung von Kaltwasser kam es zu hohen Vermischungen im Speicher und somit einer reduzierten Zapfmenge. Es waren umfangreiche Adaptierungsarbeiten an den Speichern nötig wie etwa der Tausch des Warmwasser-Steigrohrs und der Kaltwasserdichtungen. Durch den Einbau der Speicher in der Küche waren aufgrund fehlender Revisionsöffnungen zudem Arbeiten an den Küchenzeilen erforderlich. Durch den Tausch der fehlerhaften Komponenten konnte zwar die Zapfrate erhöht werden, der häufige Einsatz des E-Heizstabs blieb aufgrund der insgesamt zu kleinen Speicher allerdings bestehen.

Abbildung 33: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.5) [2021]

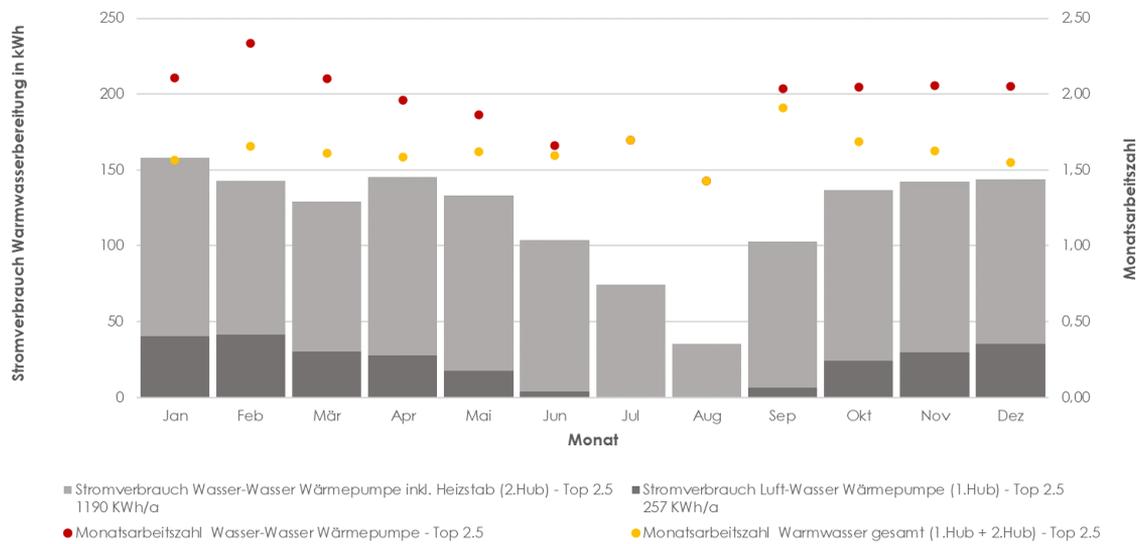


Abbildung 34: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.5) [2022]

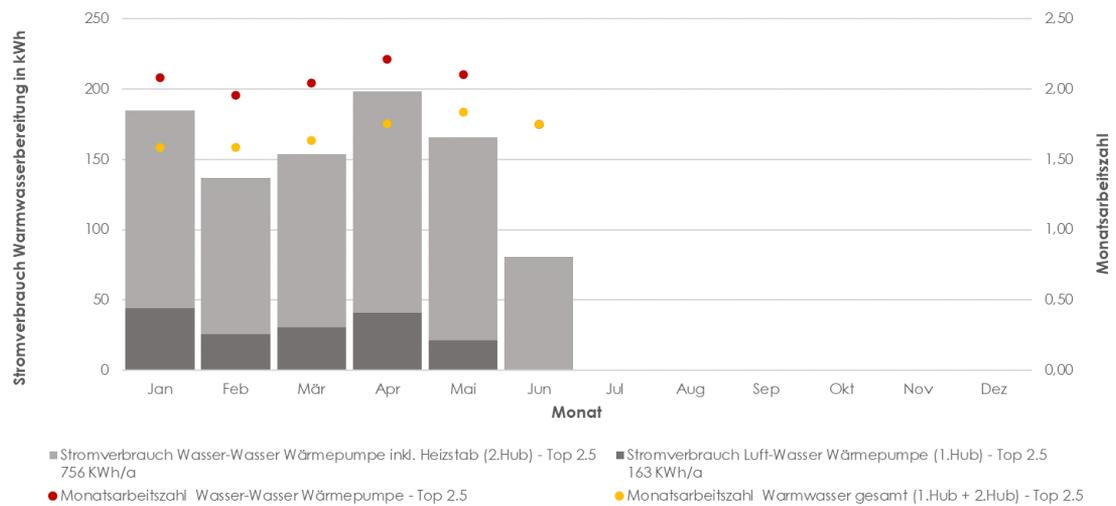


Abbildung 35: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.6) [2021]

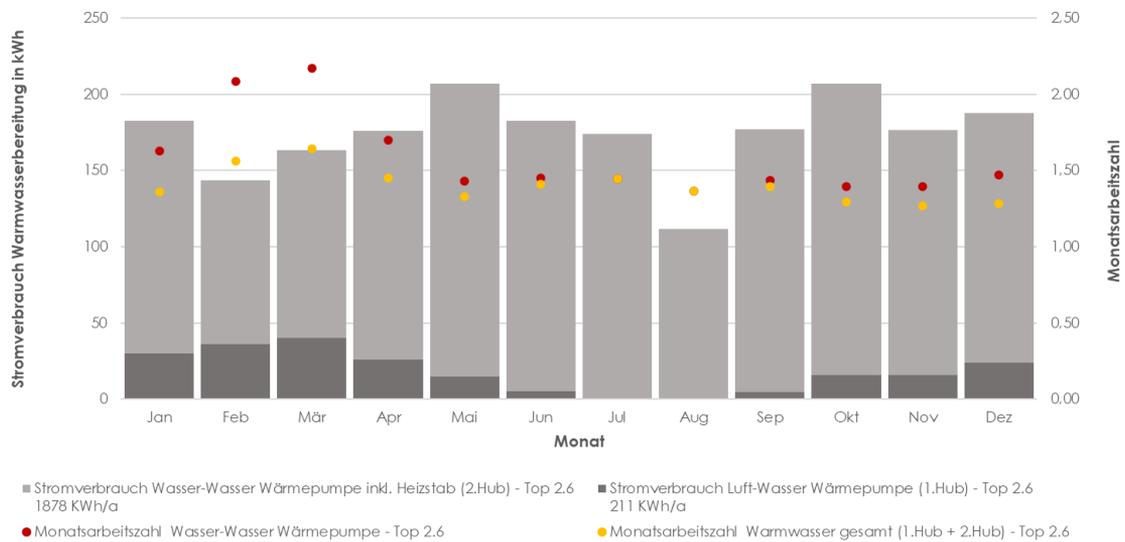
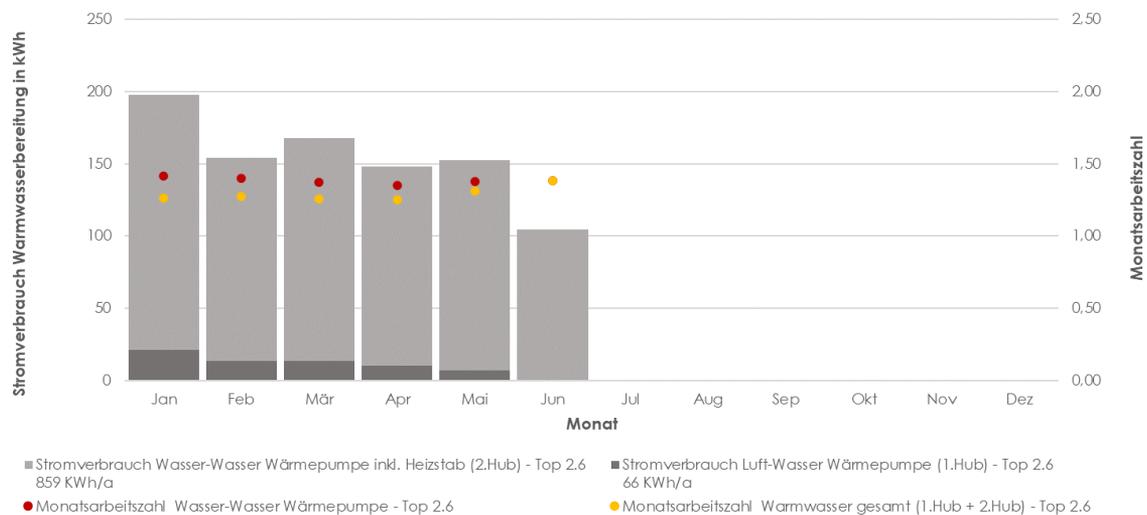


Abbildung 36: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.6) [2022]



Die Wasser-Wasser Wärmepumpen sollten entsprechend Datenblatt eine Leistungszahl von etwa 3,7 erreichen (W25 / W55). Dies wird aufgrund des häufigen Betriebs des E-Heizstabs bei weitem nicht erreicht. Abhilfe kann bei einer derartigen dezentralen Lösung mit geringer Heizleistung nur ein entsprechend großes Speichervolumen in den einzelnen Wohnungen bieten, welches bereits frühzeitig in der Planung zu verorten ist. Die Berücksichtigung einer Gleichzeitigkeit wie bei einer zentralen Warmwasserbereitung ist nicht möglich, entsprechend ist das Speichervolumen zu dimensionieren.

Abbildung 37: Datenblatt Wasser-Wasser Wärmepumpe (Warmwasserbereiter mit 150l Speicher)

Bezeichnung	OVUM XR100	OVUM XR150	OVUM ER270	OVUM EL270
Wärmequelle	Rücklauf des Heizsystems			Luft
Montageart	Wandmontage		Standgerät	
Isolierung	PU-Schaum 45 mm		PU-Schaum 50 mm	
Inhalt	100 ltr	150 ltr	270 ltr	
Speichermantel	Edelstahl			
max. Betriebsdruck	6 bar (0,6 MPa)			
Abmessungen (mm)	Ø525 x H1290	Ø525 x H1625	Ø630 x H1748	
Gewicht	48 kg (netto)	59 kg (netto)	80,7 kg (netto)	
Wasseranschluss	M 3/4 "			
Stromversorgung	230 V AC - 50 Hz			
IP-Schutzklasse	IPX4		IPX1	IPX4
Energieklasse	A+			
Aufnahmeleistung max.	1550 W		1700 W	
Leistungsschutzschalter	10 A		16 A	
max. Aufnahmeleistung WP	350 W		500 W	
E-Stab	1200 W			
Kältemittelart	R290			
Kältemittelmenge	0,1 kg		0,13 kg	0,15 kg
max. Temperatur mit WP	55 °C		60 °C	
COP (Qt 25°C)	3,4	3,7	4,0	3,0
Schall in 1 m Entfernung	36 dB	36 dB	39 dB	39 DB
Warmwasser Referenztemp.	54,14 °C	54,29 °C	55,19 °C	53,87 °C
Aufheizzeit	5 h 00 min	6 h 30 min	9 h 08 min	10 h 08 min
Zapfleistung 40 °C in 14 h	316 ltr	476 ltr	747 ltr	663 ltr
Quellentemperaturen	+18 bis +35 °C			-7 bis +35 °C
Durchfluss	250 ltr/h			250 bis 400 m³/h

Die folgenden Abbildungen zeigen den Warmwasserwärmeverbrauch bei den beiden Wohnungen Top 2.5 und Top 2.6 für die Betriebsjahre 2021 und 2022. Zudem werden anteilig die Speicherverluste dargestellt.

Der prozentuale Anteil von Quelle zu Antriebsenergie (Verdichter/Heizstab) sollte bei der WW-Bereitung etwa bei 70% Quelle zu 30% Antriebsenergie liegen. Durch den häufigen Betrieb des E-Heizstabs liegt das Verhältnis teilweise jedoch genau umgekehrt, der Hauptanteil des Warmwassers wird somit elektrisch bereitgestellt.

Abbildung 38: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.5), [2021]

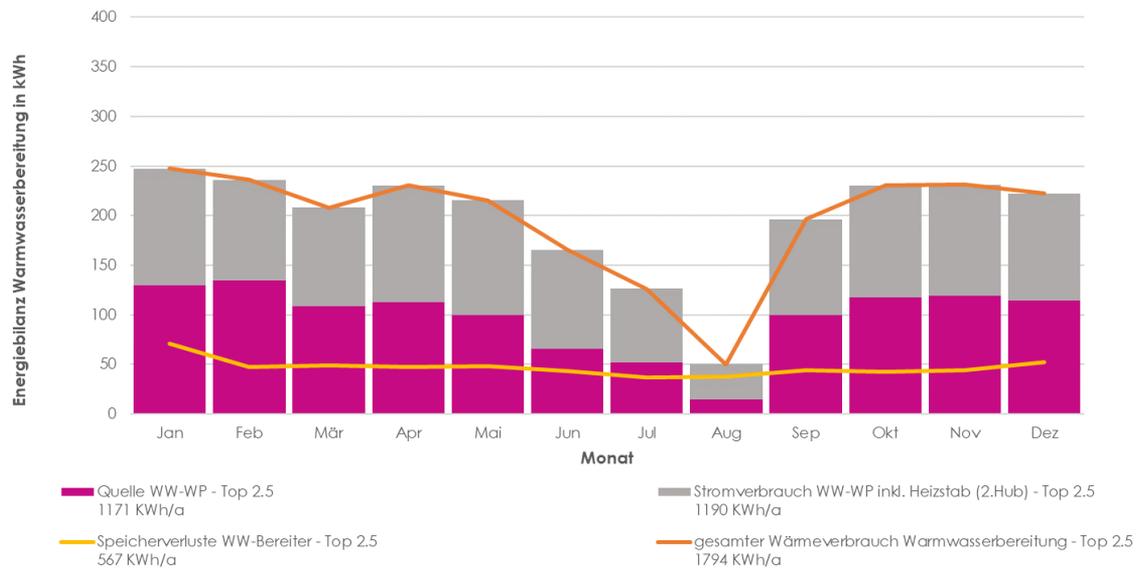


Abbildung 39: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.5), [2022]

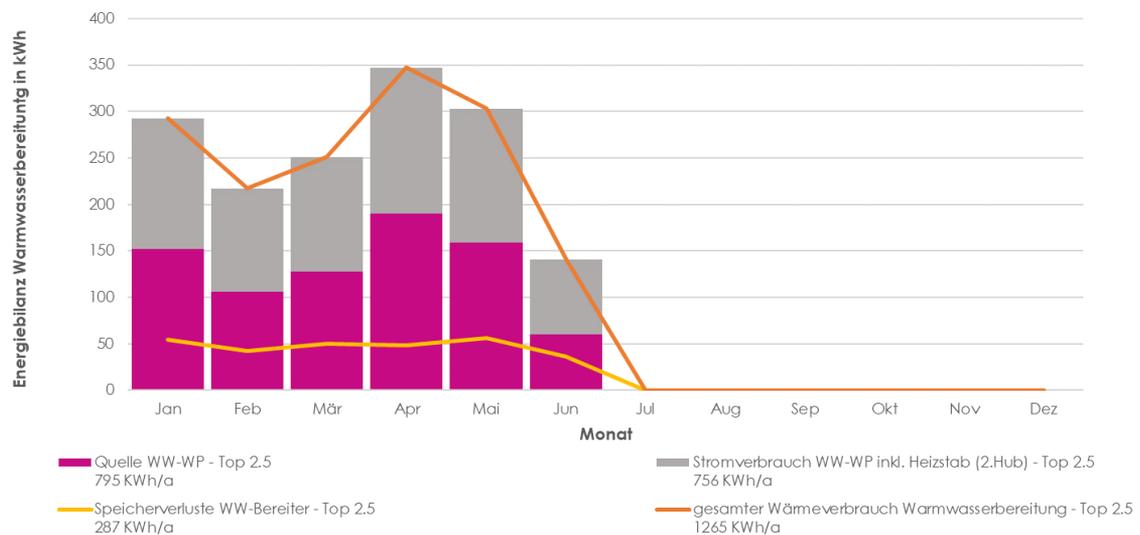


Abbildung 40: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.6), [2021]

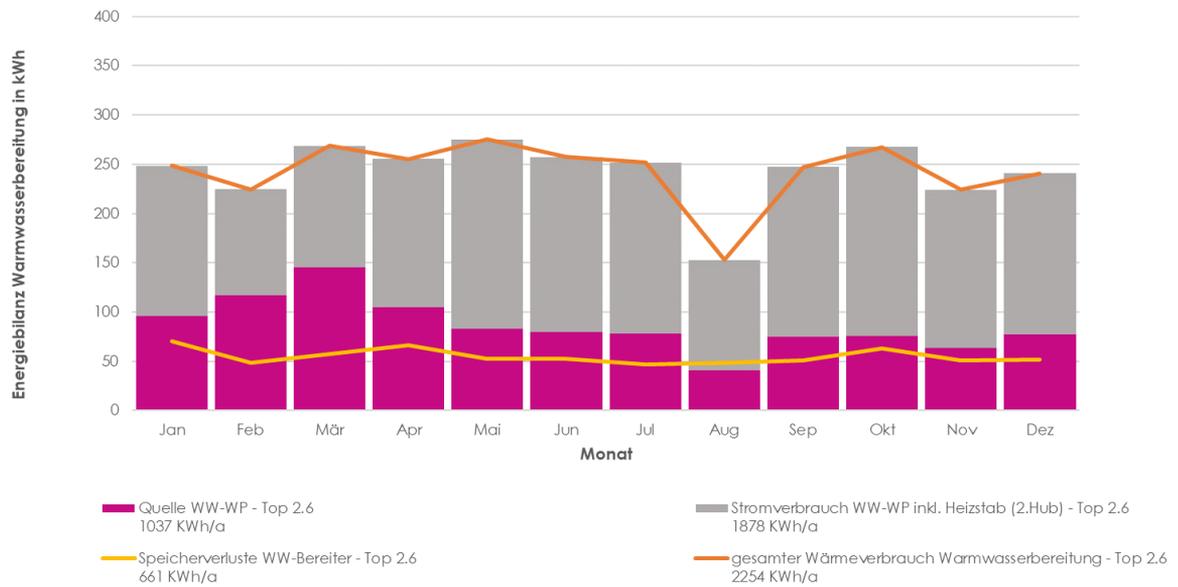
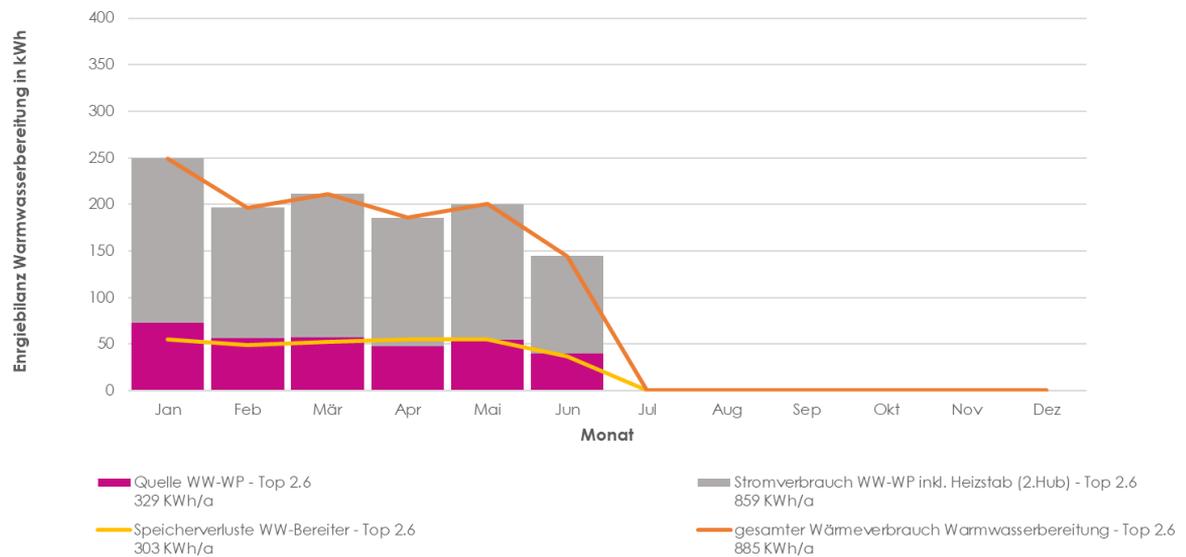


Abbildung 41: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.6), [2022]



Folgende Abbildungen zeigen den Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme des Warmwasserbereiters über den Zeitraum von einem Monat. Die Leistungsaufnahme bei reinem Wärmepumpenbetrieb würde bei etwa 0,35 kW liegen, beim reinen Betrieb mit Heizstab bei etwa 1,2 kW und beim kombinierten Betrieb Wärmepumpe und Heizstab bei etwa 1,5 kW.

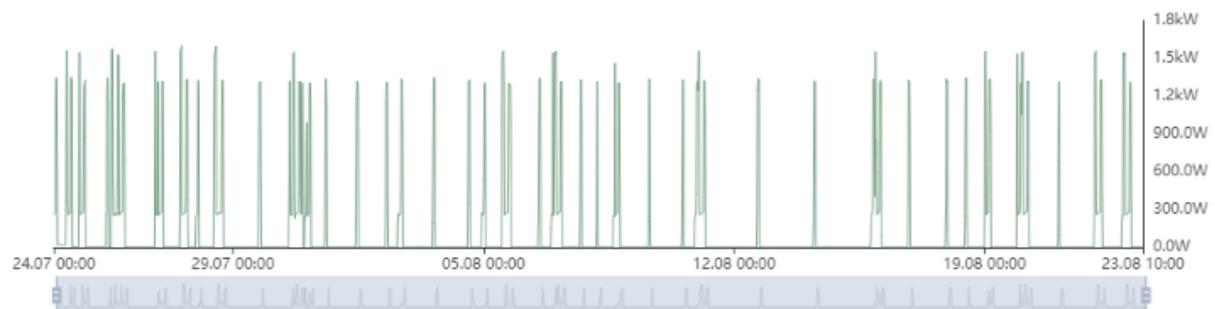
Bei Top 2.5 findet im Zeitraum August 2021 urlaubsbedingt keine Warmwasserzapfung statt. Die Hygieneschaltung zeigt lediglich das Aufheizen mittels Heizstab auf über 60°C.

Abbildung 42: Elektr. Leistungsaufnahme Warmwasserwärmepumpe und E-Heizstab (Top 2.5)



Bei Top 2.6 zeigt sich eine geringe Betriebsdauer mit der Wärmepumpe allein, der E-Heizstab ist häufig der alleinige Warmwasserbereiter bzw. muss zusätzlich zur Wärmepumpe in Betrieb gehen.

Abbildung 43: Elektr. Leistungsaufnahme Warmwasserwärmepumpe und E-Heizstab (Top 2.6)

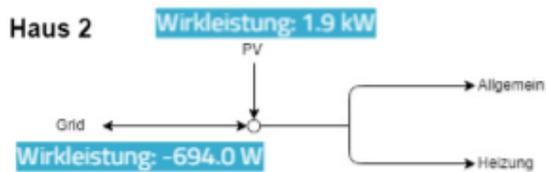


Bei dezentralen Warmwasserbereitern muss entweder das größere Speichervolumen oder die höhere Erzeugerleistung den Bedarf decken können. Unterschiedliche Bedarfe der Nutzer können nicht wie bei zentralen Systemen über die Gleichzeitigkeit der Anzahl der Wohnungen ausgeglichen werden. Entsprechend muss in der Planung Bedacht auf die Systemauslegung gelegt werden (Speichergröße, Wärmepumpenleistung, Verortung des Speichers mit entsprechenden Revisionsöffnungen), ansonsten liegt die Effizienz der Warmwasserbereitung wie gezeigt nur geringfügig über der Effizienz eines Heizstabs allein. Der aktuelle Anlagenbetrieb führt zwar zu keinen Nutzerbeschwerden mehr, da aufgrund hoher Speichertemperaturen eine ausreichend hohe Zapfrate gegeben ist, die Anlageneffizienz der Warmwasserbereitung liegt allerdings deutlich hinter den Möglichkeiten zurück.

5.1.6. Energieerzeugung Photovoltaikanlage

Je Haus wurde eine 10 kWp PV-Anlage installiert. Neben der Umsetzung eines Mieterstrommodells wurde auch die mögliche direkte Nutzung des PV-Stroms für Gebäudetechnik und Allgemiestrom realisiert. Darüberhinausgehende Überschüsse werden in das öffentliche Stromnetz eingespeist.

Abbildung 44: Einbindung PV-Anlage für Direktnutzung TGA und Allgemiestrom (Haus 2)



Folgende Abbildungen zeigen den Stromertrag aus der PV-Anlage am Dach von Haus 2 sowie den Stromverbrauch für TGA und Allgemiestrom für die Betriebsjahre 2021 und 2022. Zudem erfolgt die Darstellung der Anteile direkte Eigennutzung, Netzbezug und Überschuss (Mieterstrommodell bzw. Netzeinspeisung). Der spezifische Stromertrag der 10 kWp PV-Anlage liegt mit etwas über 10.000 kWh/a Jahresertrag bei ca. 1.000 kWh je kWp.

Abbildung 45: Strombilanz PV-Anlage 10kWp und Stromverbrauch TGA + Allgemein (Haus 2) [2021]

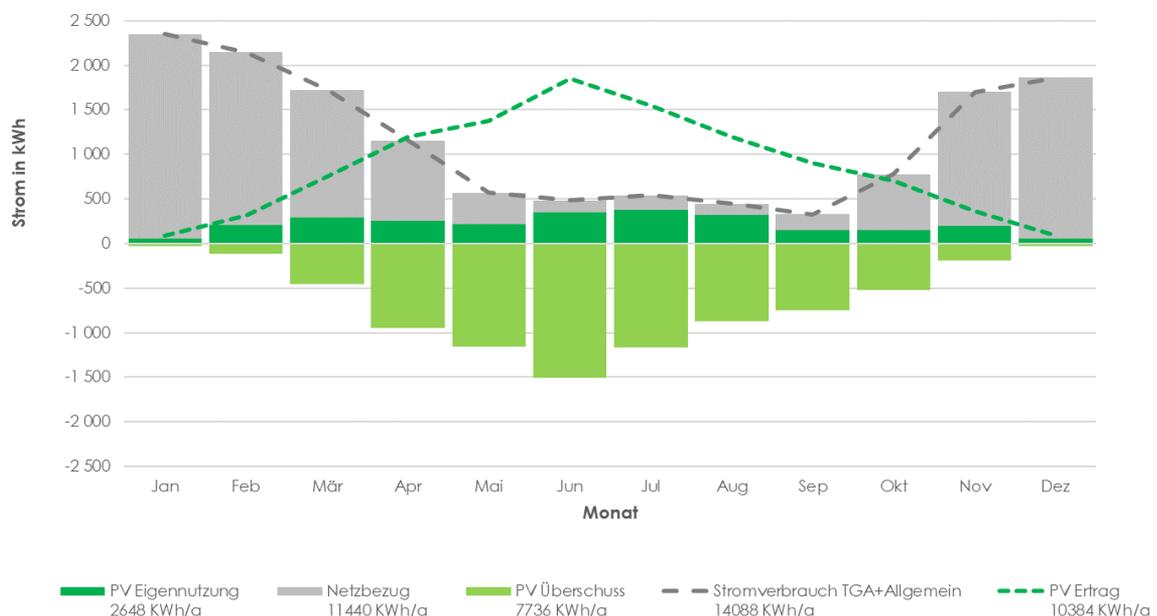
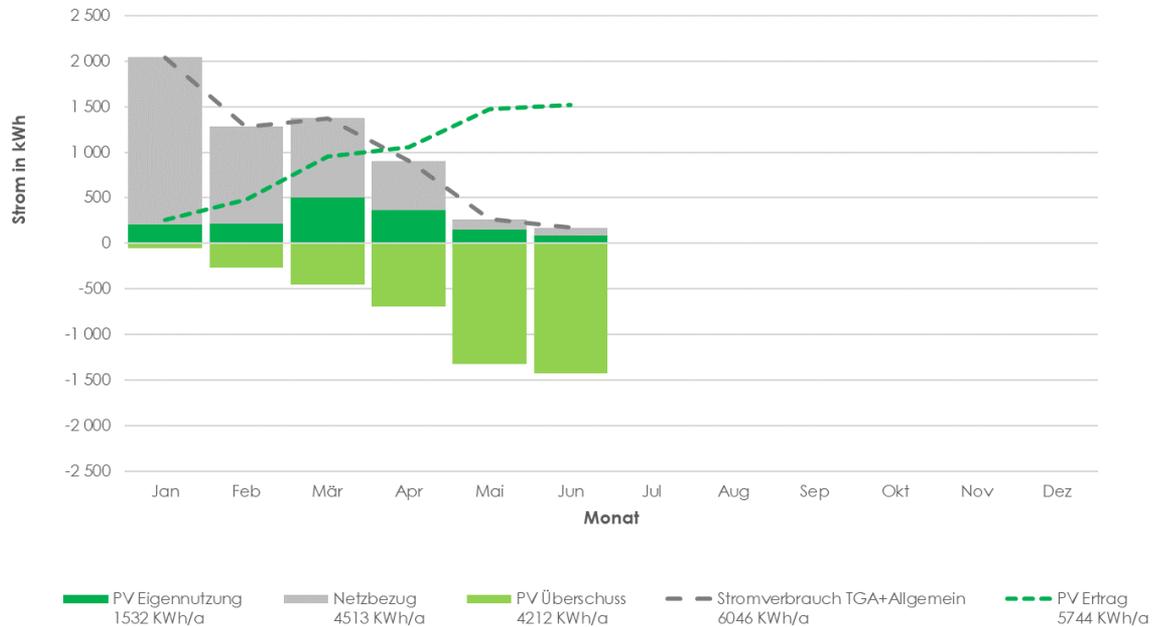


Abbildung 46: Strombilanz PV-Anlage 10kWp und Stromverbrauch TGA + Allgemein (Haus 2) [2022]



Folgende Abbildungen zeigen neben der Bilanz der Photovoltaikanlage die Eigenverbrauchsquote sowie den Autarkiegrad für die Betriebsjahre 2021 und 2022. Die Eigenverbrauchsquote ist dabei definiert als Anteil des direkt selbst genutzten Stroms für TGA und Allgemiestrom am insgesamt produzierten Strom mittels PV-Anlage. Der Autarkiegrad ist der Anteil des selbst genutzten Stroms am gesamten Stromverbrauch für TGA und Allgemiestrom.

Abbildung 47: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad (Haus 2) [2021]

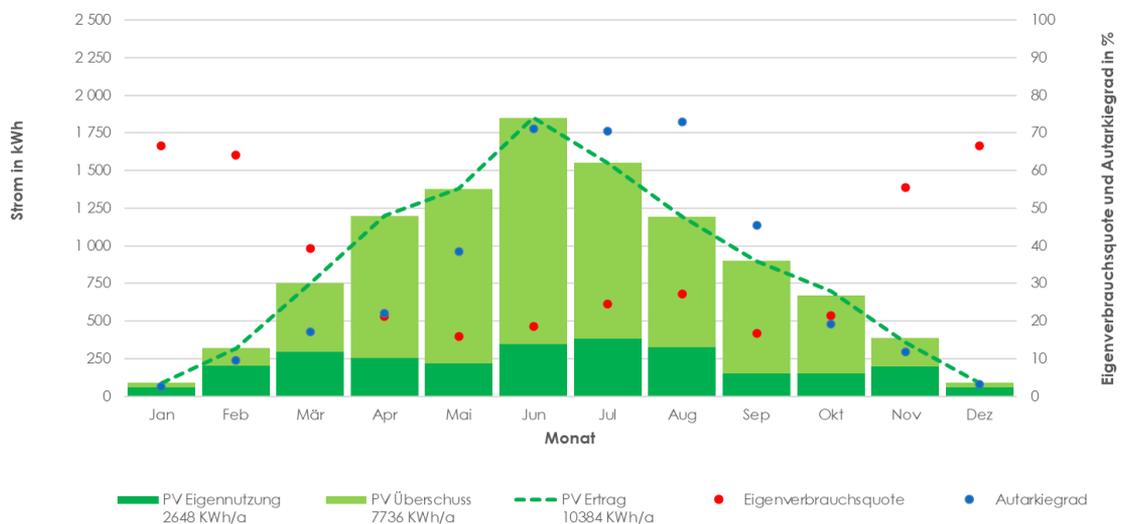
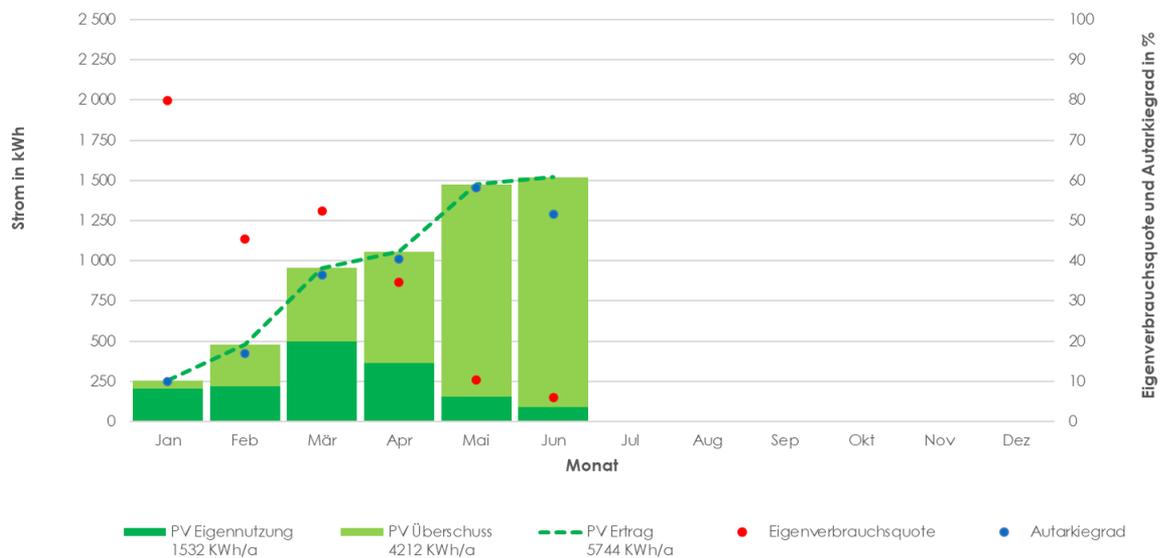
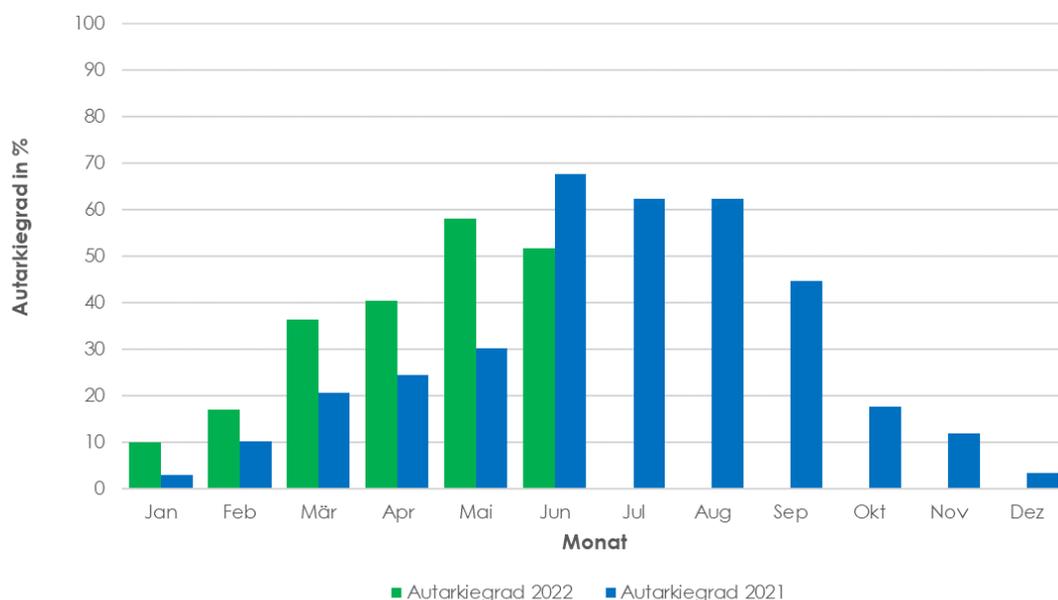


Abbildung 48: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad (Haus 2) [2022]



Durch den im Vergleich zum Jahr 2021 reduzierten Heizwärmeverbrauch, dem optimierten Anlagenbetrieb sowie der Realisierung der Überschussregelung verzeichnet der Autarkiegrad im Jahr 2022 eine deutliche Steigerung. Lediglich im Juni reduziert sich der Autarkiegrad im Vergleich zum Jahr 2021. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Kühlung bei Haus 2 auf Grund eines Regelungsfehlers erst Ende Juni in Betrieb ging und sich dadurch nur ein geringer Stromverbrauch für die reversible Wärmepumpe im Juni ergab.

Abbildung 49: Autarkiegrad (Haus 2) [2021 & 2022]



5.1.7. Energiebilanz Haus 1 - 4

Neben der detaillierten Betrachtung von Haus 2 erfolgt die Bildung der Energiebilanz für den Stromverbrauch von Heizung/Kühlung + Allgemein sowie den Stromertrag der PV-Anlagen jeweils für die Häuser 1 – 4. Der Unterschied im jährliche Stromverbrauch zwischen den einzelnen Gebäuden für Heizung/Kühlung + Allgemein liegt nutzerbedingt dabei bei etwa 1.000 – 2.000 kWh/a.

Abbildung 50: Energiebilanz (Stromverbrauch Heizung/Kühlung + Allgemein und Stromertrag PV) Haus 1-4 [01/2021 – 12/2021]

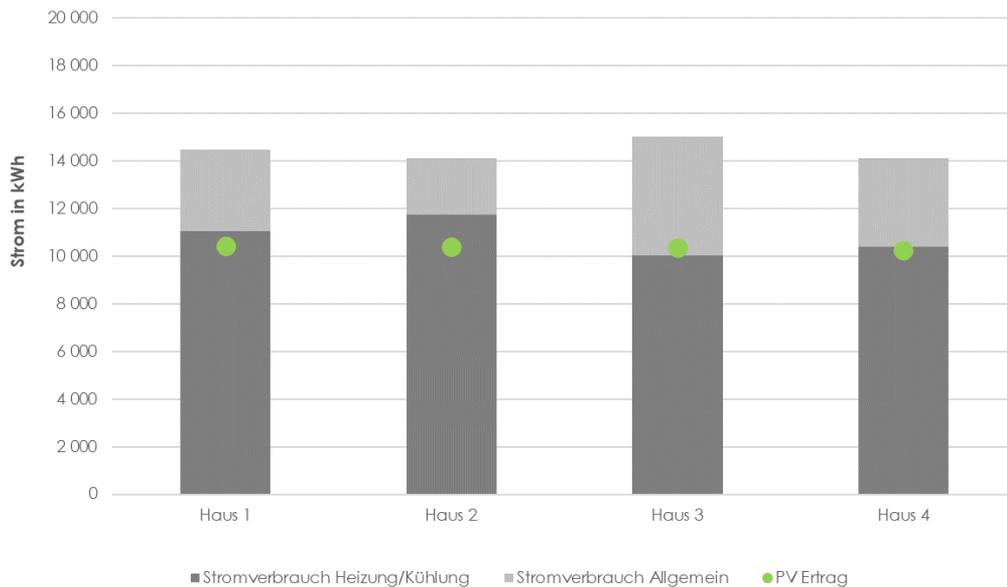
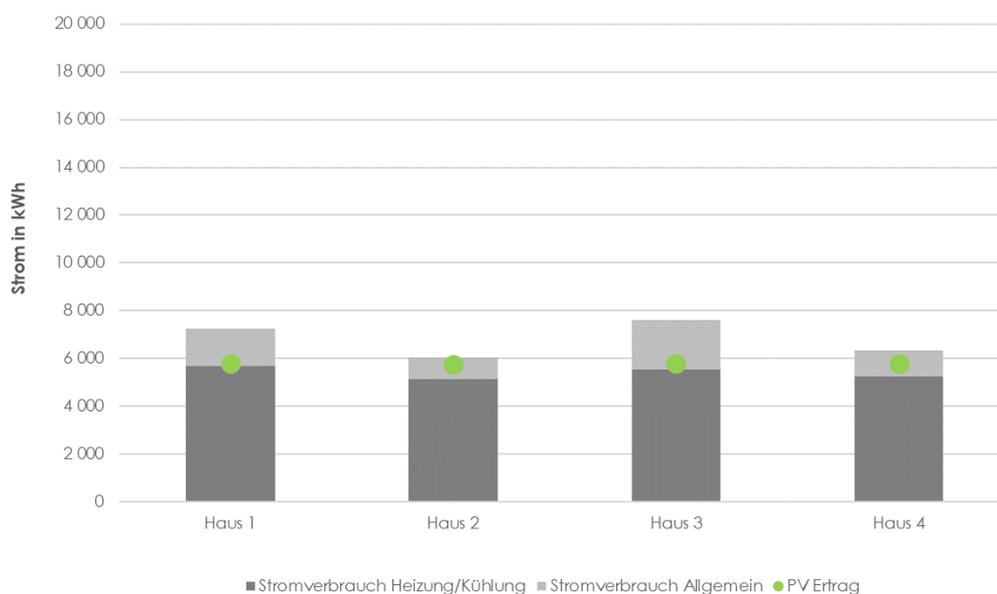


Abbildung 51: Energiebilanz (Stromverbrauch Heizung/Kühlung + Allgemein und Stromertrag PV) Haus 1-4 [01/2022 – 06/2022]



Abzüglich des Eigendeckungsanteils durch die PV Anlagen ergibt sich ein jährlicher Netzbezug für die Raumheizung/-kühlung und den Allgmeinstrom bei den einzelnen Gebäuden in Höhe von ca. 9.000 bis 11.000 kWh/a, wie die folgenden Stromabrechnungen für den Zeitraum 07/2021 – 08/2022 zeigen. Dies deckt sich gut mit den mittels Monitoring im Detail ermittelten Netzbezügen in Höhe von ca. 8.800 kWh für Haus 2, wie in Kapitel 5.1.6. gezeigt.

Abbildung 52: Auszug aus den Stromrechnung Heizung/Kühlung + Allgemein für Haus 1-4 [07/2021 – 08/2022]

Anlagennummer: 9000018765 Strom, Gemeinnützige Wohnungsgesellschaft "Arth, Tonpfeifengasse 5/All., 2604 Theresienfeld

Abrechnungszeitraum: 28.07.2021 - 31.07.2022 **Stromverbrauch:** 10.017 kWh

Anlagennummer: 9000018772 Strom, Gemeinnützige Wohnungsgesellschaft "Arth, Tonpfeifengasse 7/All., 2604 Theresienfeld

Abrechnungszeitraum: 28.07.2021 - 06.08.2022 **Stromverbrauch:** 8.885 kWh

Anlagennummer: 9000018851 Strom, Gemeinnützige Wohnungsgesellschaft "Arth, Tonpfeifengasse 9//Allgemein, 2604 Theresienfeld

Abrechnungszeitraum: 28.07.2021 - 06.08.2022 **Stromverbrauch:** 11.161 kWh

Anlagennummer: 9000018850 Strom, Gemeinnützige Wohnungsgesellschaft "Arth, Tonpfeifengasse 11//Allgemein, 2604 Theresienfeld

Abrechnungszeitraum: 28.07.2021 - 06.08.2022 **Stromverbrauch:** 9.184 kWh

5.1.8. Bauteilaktivierung als Speicher für Überschussstrom aus der PV-Anlage

Die Funktion zur möglichen Überladung der Bauteilaktivierung und somit Nutzung als Energiespeicher wurde bei den Raumthermostaten entsprechend vorgesehen. Aufgrund der jedoch umfangreichen Probleme mit den Raumthermostaten (falsche Verkabelung und Signalverarbeitung), den zu geringen Warmwasserzapfraten und der wesentlich zu geringen Anlageneffizienz bei der Inbetriebnahme lag der Fokus im ersten Betriebsjahr auf der Sicherstellung eines geregelten Anlagenbetriebs.

Nach einigen Problemen mit der Regelung der Wärmepumpenanlage bei Überschussstrom aus der PV-Anlage wurde im März 2022 schließlich die mögliche Speicherung von Überschussstrom aus der Photovoltaikanlage mittels Wärmepumpe in der Bauteilaktivierung realisiert. Die Überschussregelung funktioniert dabei in der Art, dass bei einem Stromüberschuss von mindestens 500 W aus der hauseigenen PV-Anlage die Raumregler im Heizfall auf den erhöhten Sollwert umgestellt werden, wodurch eine Überladung der Bauteilaktivierung durch die Heizungswärmepumpe um ca. 2 K in Bezug auf die Raumtemperatur möglich ist. Im Kühlfall erfolgt die Beladung der Bauteilaktivierung analog, hier kann die Raumtemperatur durch die reversible Heizungswärmepumpe um etwa 2 K abgesenkt werden. Die Nutzung des PV-Stroms für die Beladung der Bauteilaktivierung erst bei 500 W Überschuss reduziert zwar den Nutzen der Bauteilaktivierung als Speicher, führt aber auch zu einer verbesserten direkten Nutzung des PV-Stroms für den Allgemeinstrom und den Betrieb der Wärmepumpe – ohne Überladung der Bauteilaktivierung.

Den Mieter:innen wurde hierzu vorab ein entsprechendes Hinweisschreiben zugestellt, um die Raumthermostate für die Beladung der Bauteilaktivierung korrekt einzustellen.

Abbildung 53: Auszug aus dem Informationsschreiben an die Mieter für die korrekte Einstellung der Raumthermostate

7614 2604 Theresienfeld, Tonpfeifengasse 5-11
060.00 Raumthermostateinstellung

Sehr geehrte Mieterin,
sehr geehrter Mieter,

zur Steigerung der Effizienz der am Dach befindlichen Heizungs-/Kühlungswärmepumpe, soll bei Überschuss-Strom aus der hauseigenen Dach-Photovoltaikanlage, die thermisch aktivierte Betondecke als Energiespeicher genutzt werden.

Damit wollen wir die laufenden Betriebskosten weiter senken und die Umwelt durch die Nutzung von mehr Sonnenstrom entlasten.

Um den Überschuss-Strom aus der PV-Anlage noch effizienter zu nutzen, erfolgt über die Heizungs-/Kühlwärmepumpe eine Speicherung in den aktivierten Betondecken, über welche die Wohnungen geheizt und gekühlt werden. Die Räume werden dabei tagsüber, bei ausreichend Überschuss-Strom aus der Photovoltaikanlage, im Winter etwas überwärmt und im Sommer etwas unterkühlt.

Hierzu ist es erforderlich die Raumthermostate in den einzelnen Zimmern mit dem heutigen Tage auf ca. 24°C einzustellen.



Winter (Heizen):

Die Einstellung von 24°C am Thermostat führt zu einer Raumtemperatur von mindestens 22°C, bei Überschuss-Strom aus der Photovoltaikanlage wird der jeweilige Raum auf bis zu 24°C aufgeheizt.

Sommer (Kühlen):

Die Einstellung von 24°C am Thermostat führt zu einer Raumtemperatur von 26°C, bei Überschuss-Strom aus der Photovoltaikanlage wird der jeweilige Raum auf bis zu 24°C abgekühlt.

Natürlich steht es Ihnen weiterhin frei eine andere, für Sie angenehme, Raumtemperatur einzustellen, jedoch bedenken Sie immer, dass der jeweils eingestellte Raumtemperaturwert im Winter (Heizen) im Schnitt um ca. 2°C unterschritten wird, und im Sommer (Kühlen) um ca. 2°C überschritten wird!

Folgende Abbildung zeigt die Überschussregelung am Beispiel des Heizfalls an einem Tag Mitte März. Die PV-Anlage liefert zweimal am Tag das Signal, dass ein Überschuss von größer 500 W ungenutzt ins Netz eingespeist würde. Je nach individueller Stellung der Raumregler in den Wohnungen und den in den Wohnungen vorherrschenden Raumtemperaturen ergibt sich ein gewisses Potenzial für die Beladung der Bauteilaktivierung mit Überschussstrom aus der PV-Anlage über die Heizungswärmepumpe.

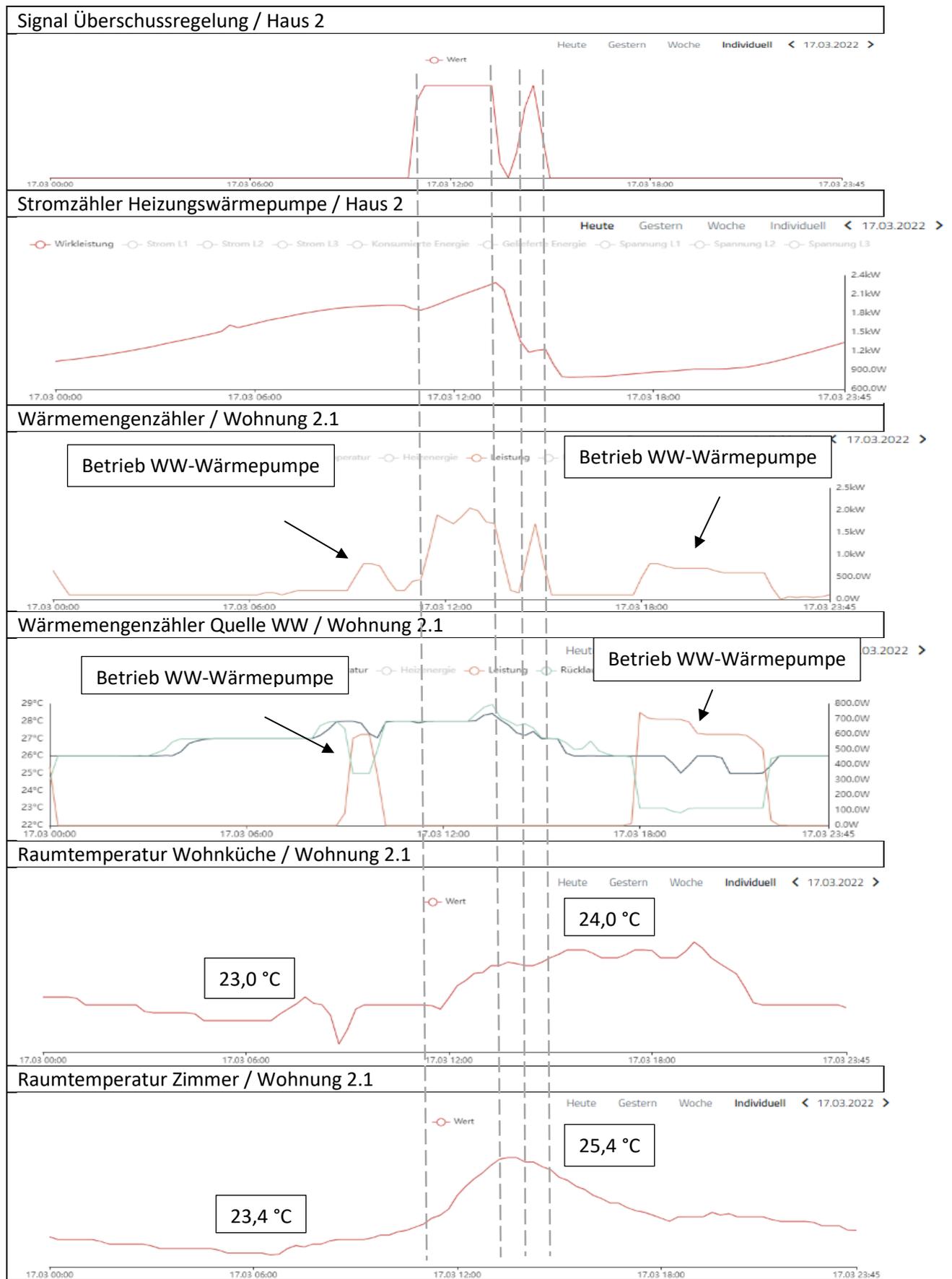
Die durch das Signal zur Überschussregelung herbeigeführte Sollwertänderung um 2 K am Raumregler führt zu einer entsprechenden Erhöhung des Massenstroms und somit Wärmeleistung am Wärmemengenzähler der zugehörigen Wohnung, solange das Signal der Überschussregelung aktiv ist.

Der Stromverbrauch für die Heizungswärmepumpe steigt in diesen beiden Zeiträumen entsprechend der erhöhten Wärmeverbrauchsanforderung an. Die Raumtemperaturen in den beispielhaft angeführten Räumen nehmen daraufhin entsprechend zu.

Der Wärmemengenzähler zeigt an diesem Tag jedoch noch einen zweimaligen Betrieb der Heizungswärmepumpe für den ersten Hub der Warmwasserbereitung an. Dies liegt daran, dass die Warmwasserwärmepumpe nicht direkt mit der Bauteilaktivierung verbunden ist und so die BTA nicht als Speicher nutzen kann, sondern nur am Heizungsverteiler im Rücklauf eingebunden ist. Da aufgrund von ausreichend hohen Raumtemperaturen die Ventile der Heizkreise geschlossen sind, kühlt bei Betrieb der Warmwasserwärmepumpe der Rücklauf zur Heizzentrale hin ab, worauf die Heizungswärmepumpe in Betrieb geht und so den ersten Hub für die Warmwasserwärmepumpe abdeckt.

Eine zeitliche Verschiebung der Warmwasserbereitung ausschließlich auf Zeiten mit einem ausreichend hohen PV-Ertrag, lässt sich aufgrund der zu geringen Heizleistung der Warmwasserwärmepumpe jedoch nicht bewerkstelligen.

Abbildung 54: Überschussregelung im Heizbetrieb an einem beispielhaften Tag Mitte März



Für die Monate März, April und Mai 2022, in denen die Überschussregelung korrekt in Betrieb war, erfolgt in den folgenden Abbildungen wochenweise die Darstellung des Stromverbrauchs für die Wärmepumpe im Heizfall (dunkelgrau), reduziert um den anteiligen Verbrauch für den ersten Hub der Warmwasserbereitung. Somit lässt sich die Bilanz allein für die Bauteilaktivierung als Speicher darstellen. Neben dem Stromertrag der PV-Anlage (grün) werden auch der Deckungsanteil des Stromverbrauchs der Heizungswärmepumpe direkt durch die PV-Anlage ohne Überschussregelung (hellblau) und mit Überschussregelung (lila) dargestellt, ergänzt um den Deckungsanteil über das öffentliche Stromnetz außerhalb von Zeiten mit Stromertrag aus der PV-Anlage. Ist das Signal der Überschussregelung (hellgrau) auf 1, so wird durch die Sollwertänderung am Raumregler der Wärmeverbrauch und somit der Stromverbrauch für die Heizungswärmepumpe, welcher zu diesem Zeitpunkt mittels PV-Strom gedeckt wird, entsprechend erhöht.

Abbildung 55: Prinzip der Überschussregelung - Heizfall

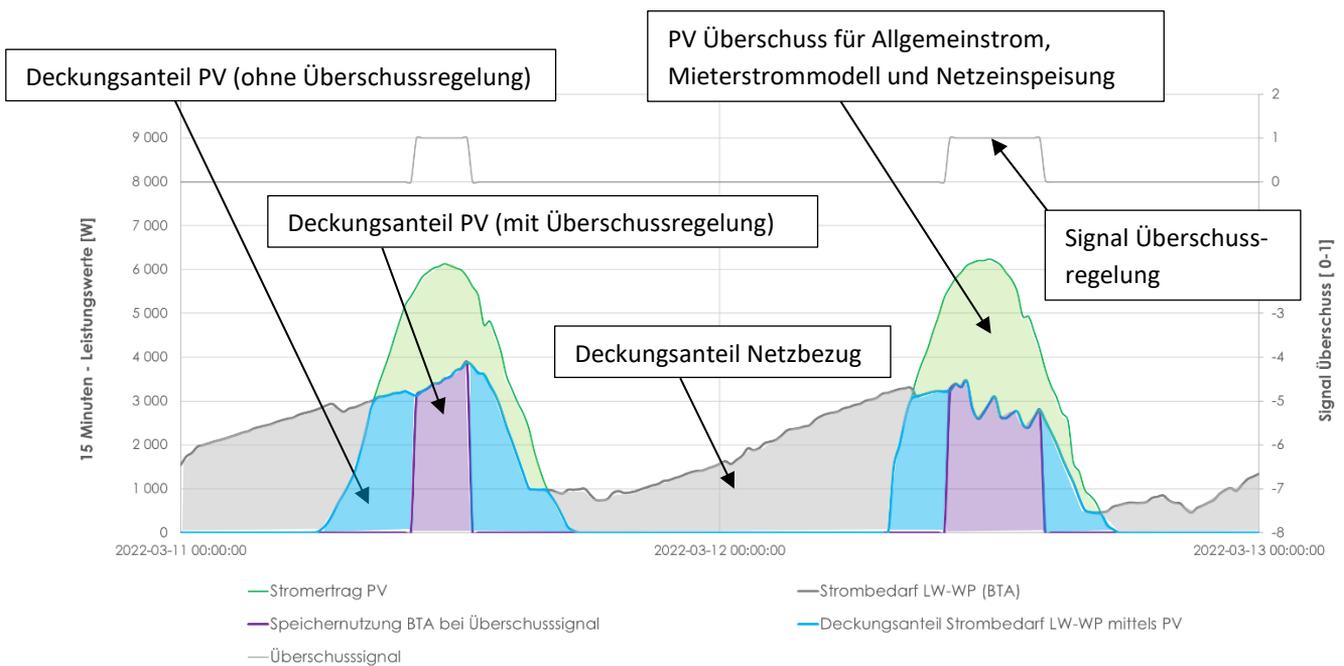
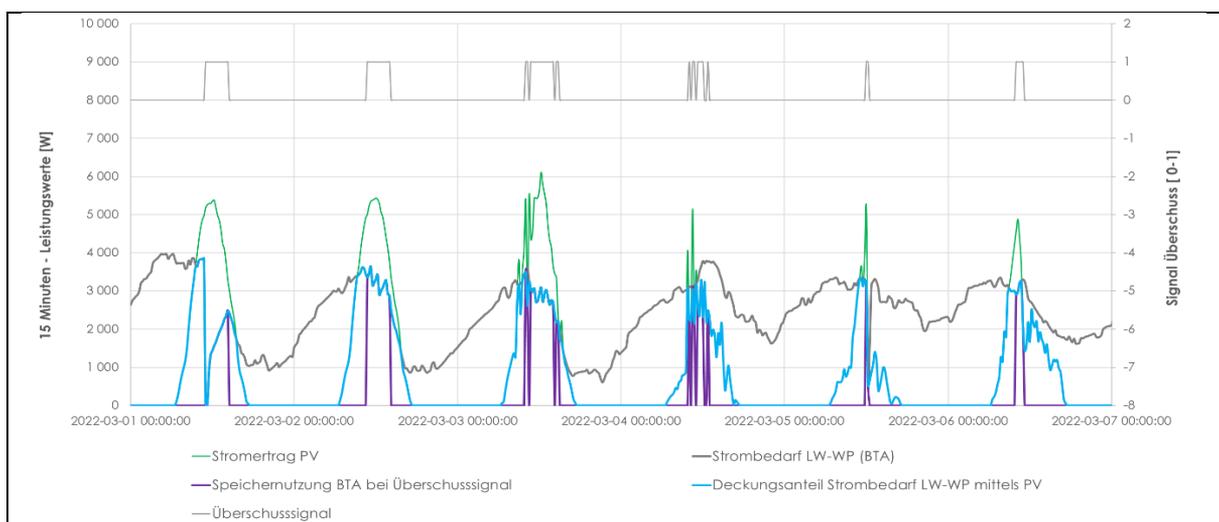
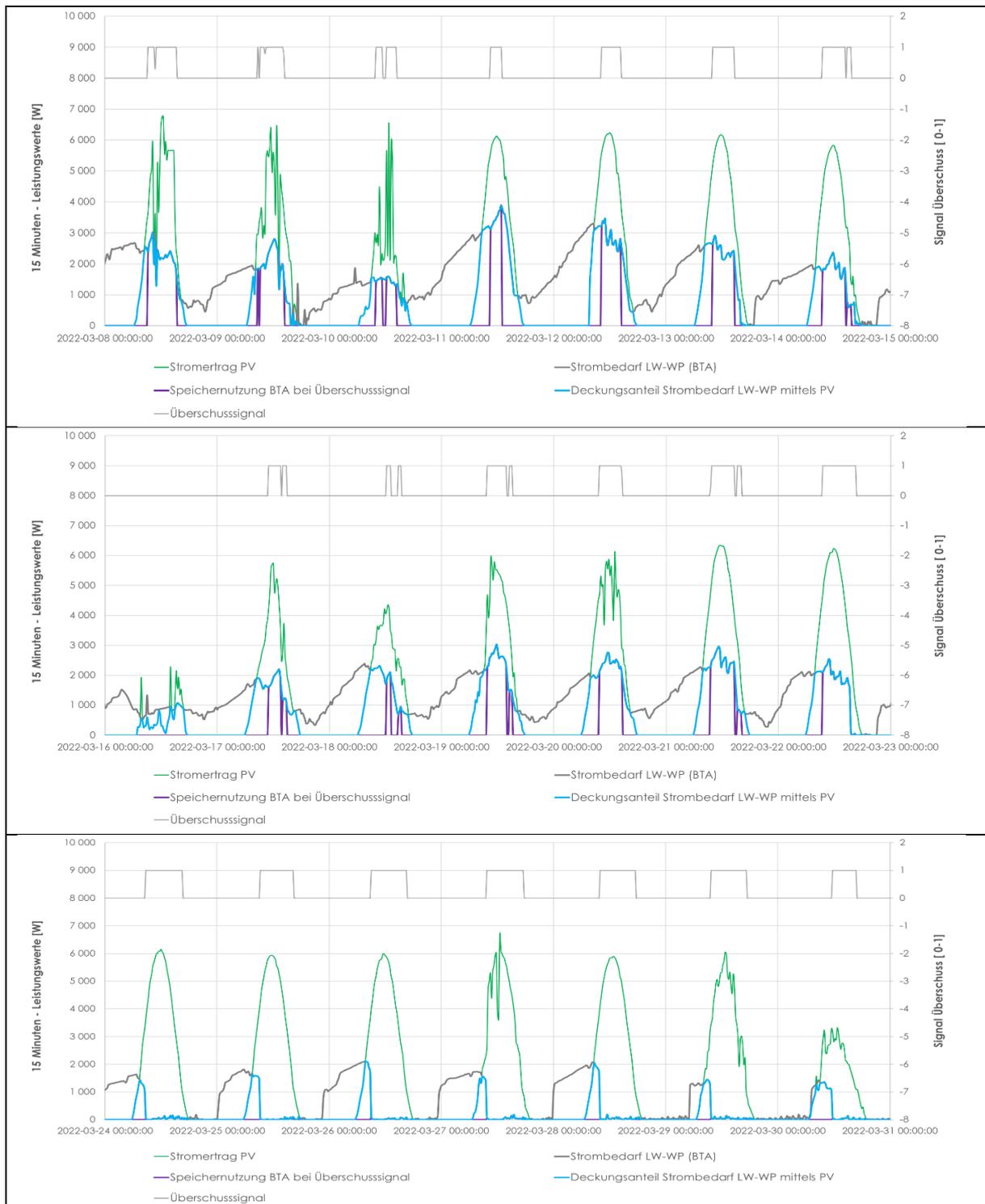


Abbildung 56: Überschussregelung März - Heizbetrieb





In der vierten Woche im März führen höhere Außenlufttemperaturen und dadurch bereits ausreichend hohe Raumlufttemperaturen untertags dazu, dass bei aktivem Überschussignal die Überschussregelung nicht mehr in Betrieb geht, obwohl sich in den Abendstunden noch ein Heizwärmeverbrauch einstellt. Dies tritt beim Übergang von der Heiz- in die Kühlperiode bei Thermostatregelung des Öfteren auf. Dieser Effekt würde sich durch eine Regelung über einen Tagesmittelwert der Raumtemperatur bzw. über die Kerntemperatur der Bauteilaktivierung abmindern und so das Potenzial der Überschussregelung auch in der Übergangszeit optimal ausnutzen. Dieser Aspekt wird im nachfolgenden Kapitel mittels Gebäudesimulation näher betrachtet.

Abbildung 57: Überschussregelung April - Heizbetrieb



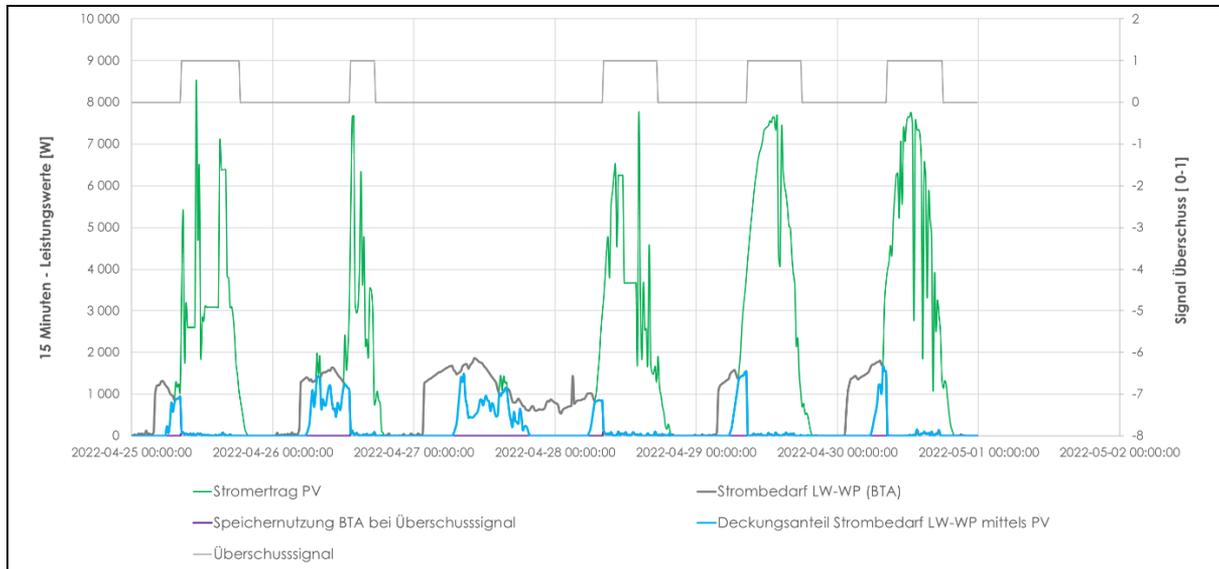
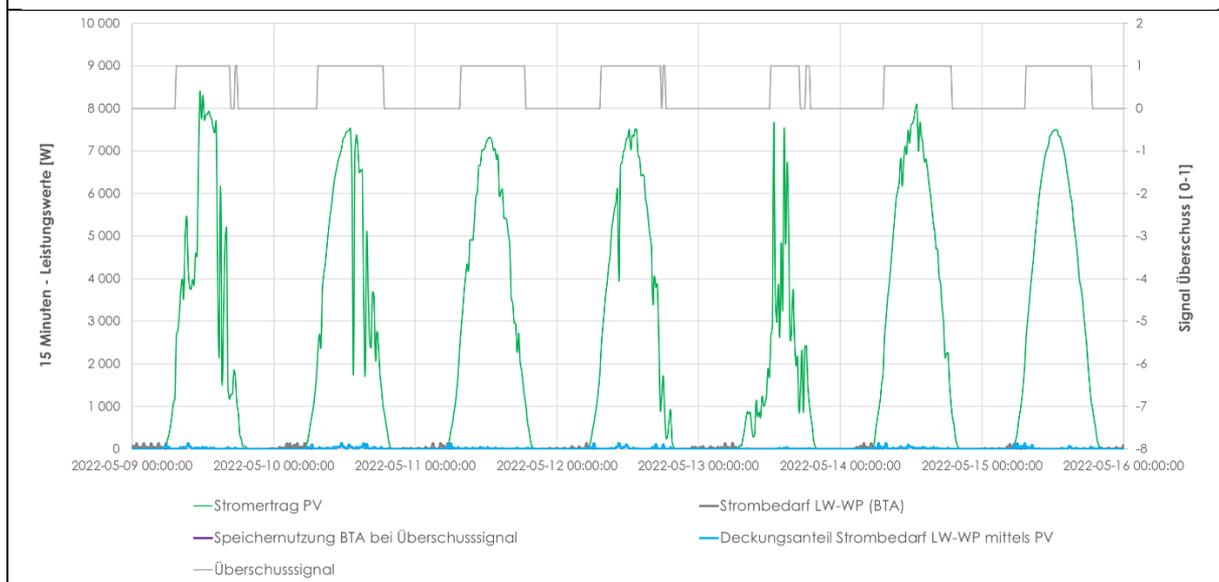
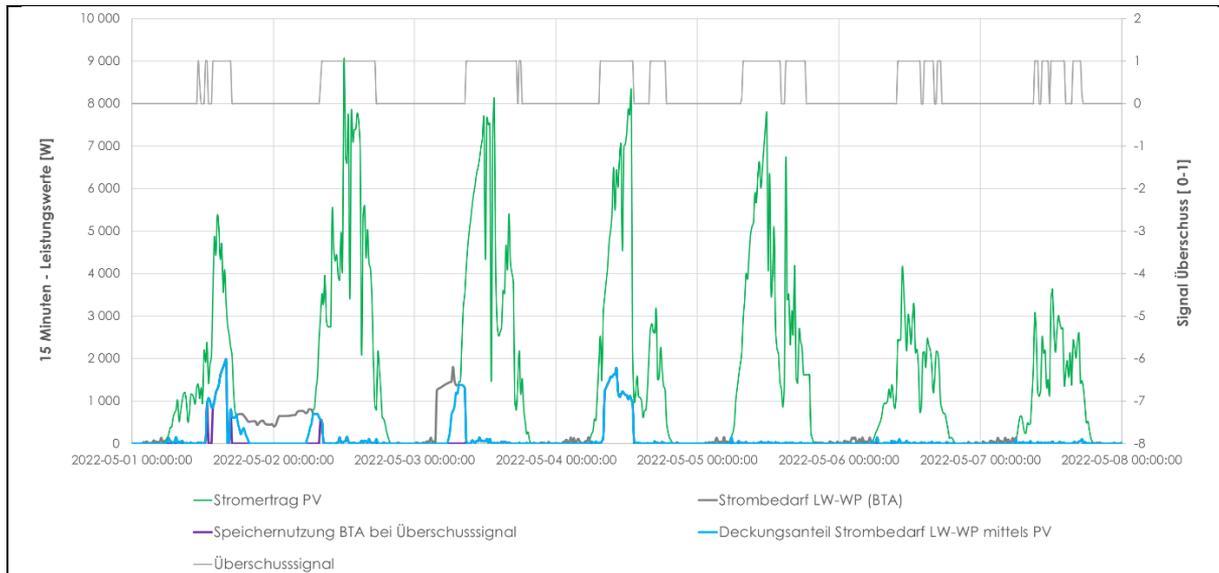
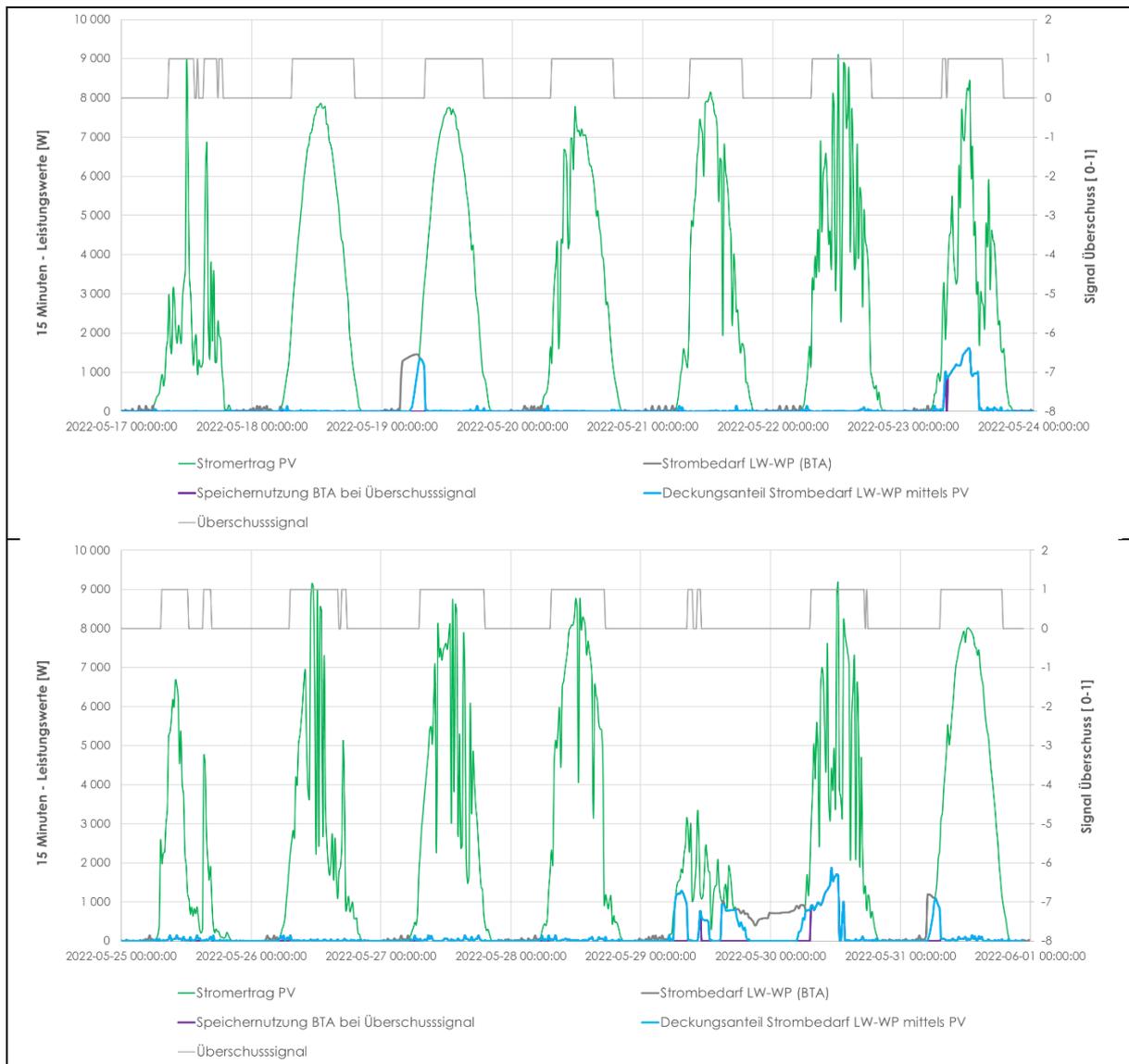


Abbildung 58: Überschussregelung Mai - Heizbetrieb



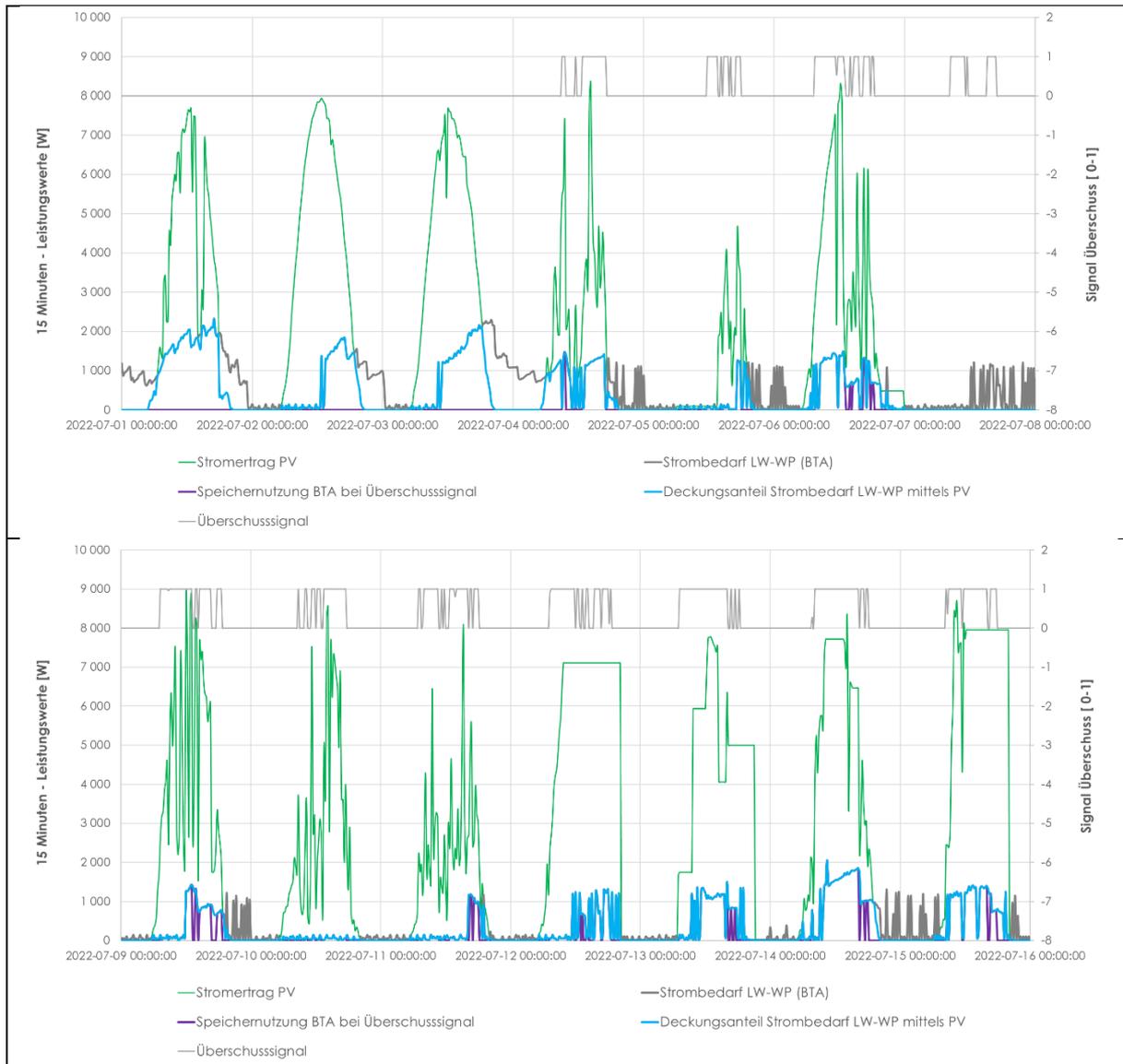


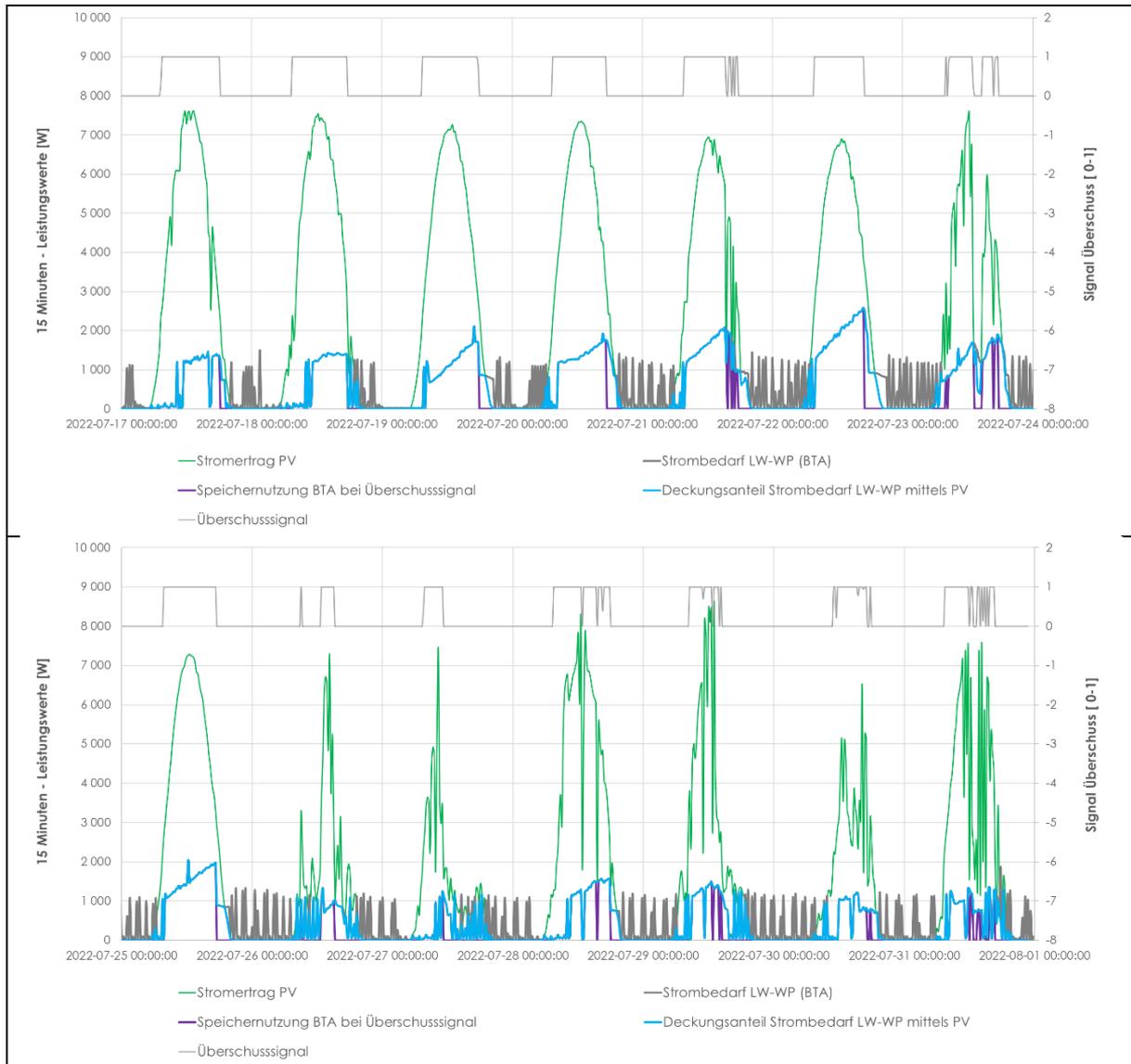
Für die Monate März, April und Mai 2022 ergeben sich folgende Deckungsgrade am Stromverbrauch der Heizungswärmepumpe mittels PV:

Monat	Stromverbrauch LW-WP	Deckungsanteil PV (Gesamt)
März 2022	1.073 kWh	422 kWh (39%)
April 2022	650 kWh	278 kWh (43%)
Mai 2022	83 kWh	52 kWh (63%)

Für den Monat Juli 2022 erfolgt in der folgenden Abbildung wochenweise die Darstellung des Stromverbrauchs für die reversible Wärmepumpe im Kühlfall (dunkelgrau). Da im Kühlfall die Warmwasserwärmepumpe die Bauteilaktivierung als Quelle nutzt und hierfür nicht wie im Heizfall die Heizungswärmepumpe den ersten Hub durchführt, erfolgt im Vergleich zum Heizfall keine Korrektur des Stromverbrauchs der reversiblen Wärmepumpe. Der Grund für die häufige kurzfristige Einschaltung der Heizungswärmepumpe in den Nachtstunden konnte nicht eindeutig geklärt werden.

Abbildung 59: Überschussregelung Juli - Kühlbetrieb





Für den Monat Juli 2022 ergeben sich folgende Deckungsgrade am Stromverbrauch der reversiblen Heizungswärmepumpe mittels PV:

Monat	Stromverbrauch LW-WP	Deckungsanteil PV (Gesamt)
Juli 2022	429 kWh	322 kWh (75%)

Der mögliche Deckungsanteil der PV-Anlage in Kombination mit der beschriebenen Überschussregelung zeigt im Verlauf der betrachteten Monate das Potenzial zur Speicherung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien in der ohnehin vorhandenen Speichermasse bei Gebäuden mit Bauteilaktivierung.

Begrenzt wird das Potenzial beim vorliegenden Bauvorhaben durch die umgesetzte Regelung mittels klassischer Raumthermostate und der Thematik, dass bei der Kombination von Überschussregelung und Photovoltaik immer hohe PV-Erträge mit hohen solaren Gewinnen einhergehen. Die Überwärmung der Wohnungen durch gleichzeitige Überschussregelung und hohe solare Gewinne begrenzt dabei das Potenzial der Speicherung in der Übergangszeit. Die Sektorkopplung mit Windstrom wäre daher für den Heizfall wesentlich vorteilhafter, da hier die Stromüberschüsse auch zu Zeiten ohne hohe solare Gewinne auftreten und sich das Erzeugungsprofil von Windenergie grundsätzlich besser mit dem Heizbedarfsprofil deckt, als dies im Fall von Sonnenenergienutzung der Fall ist.

Im Kühlfall zeigt sich wiederum eine sehr gute Ausnutzung des PV-Stroms für die Deckung des Stromverbrauchs der reversiblen Wärmepumpe.

Der Einfluss der Überschussregelung im Vergleich zu einem Gebäude ohne Überschussregelung lässt sich mittels Monitoring dabei kaum nachweisen, entsprechend wird diese Fragestellung im folgenden Kapitel mittels Gebäudesimulation näher betrachtet.

5.2. Thermische Gebäudesimulation

5.2.1. Gebäudekonzept mit Bauteilaktivierung (Planungsphase)

Aufgrund der guten bauphysikalischen Kennwerte der Gebäudehülle lässt sich mit der Bauteilaktivierung eine operative Raumtemperatur von 22°C in allen Wohnungen bewerkstelligen. Die hierfür erforderliche Oberflächentemperatur liegt mit max. 5,0 K über der Raumlufttemperatur in einem akzeptablen Bereich für eine hohe thermische Behaglichkeit. Die Auslegung der Wärmepumpe bietet ausreichend Reserve für die „Überladung“ der Bauteilaktivierung und somit Nutzung des Gebäudes als Speicher für PV- oder Windstrom. In der Anlage 1 befindet sich der Kurzbericht mit den Ergebnissen zur thermischen Gebäudesimulation, welche im Zuge der Planung durchgeführt wurde.

5.2.2. Bauteilaktivierung als Speicher für Überschussstrom aus erneuerbaren Energien (Exkurs Regelungsstrategie)

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, hat neben der Nutzung von Wind- oder Solarstrom - mit den jeweiligen Charakteristika wann die möglichen Stromüberschüsse überwiegend auftreten - die Regelung der Überschussbeladung der BTA einen wesentlichen Beitrag an der optimalen Nutzung des Betonspeichers im Gebäude. Um den Aspekt der unterschiedlichen Regelungsmöglichkeiten näher zu betrachten, erfolgt die Modellierung der Wohnung 2.6 mittels Gebäudesimulation. Es werden dabei unterschiedliche Regelstrategien abgebildet und hinsichtlich dem möglichen Deckungsgrad des Wärmebedarfs bei Überschussbeladung der BTA mit Strom aus erneuerbaren Energien vereinfacht betrachtet. Die Bewertung erfolgt dabei anhand des Heizwärmebedarfs von Wohnung 2.6 und dem möglichen Deckungsgrad des Heizwärmebedarfs durch Überschussstrom bei täglich vier Stunden zur Verfügung stehendem Signal zur Überschussbeladung der Bauteilaktivierung.

Die Bewertung der Effizienz der möglichen Speichernutzung bei Bauteilaktivierung erfolgt anhand folgender Kennzahl, welche auf Strom oder Wärme basieren kann:

$$\text{Deckungsanteil}_{PV} = \frac{\min(q_{el}\text{Heizungswärmepumpe}, q_{el}PV)}{q_{el}\text{Heizungswärmepumpe}}$$

Der „Deckungsanteil_PV“ beschreibt somit den Anteil des gesamten Strombedarfs der Wärmepumpe (graue Fläche in den nachfolgenden Abbildungen), welcher über die PV-Anlage abgedeckt werden kann (grüne Fläche in den nachfolgenden Abbildungen).

Unabhängig von der Regelung der Bauteilaktivierung wird immer ein gewisser Anteil des Strombedarfs der Wärmepumpe über die PV-Anlage abgedeckt werden. Durch die Umsetzung von geeigneten Regelstrategien kann der Strombedarf der Wärmepumpe jedoch bewusst in die Zeiten vorhandenen PV-Ertrags verschoben werden.

Während im Monitoring kaum festgestellt werden kann, wie hoch der Deckungsanteil ohne optimierte Regelung gewesen wäre, kann mittels Gebäudesimulation ein Vergleich zwischen verschiedenen Regelstrategien - bei ansonsten unveränderten Randbedingungen - angestellt werden, um die Effizienz einer Regelstrategie bewerten zu können.

Abbildung 60: Kennzahl – Deckungsanteil ohne Überschussregelung

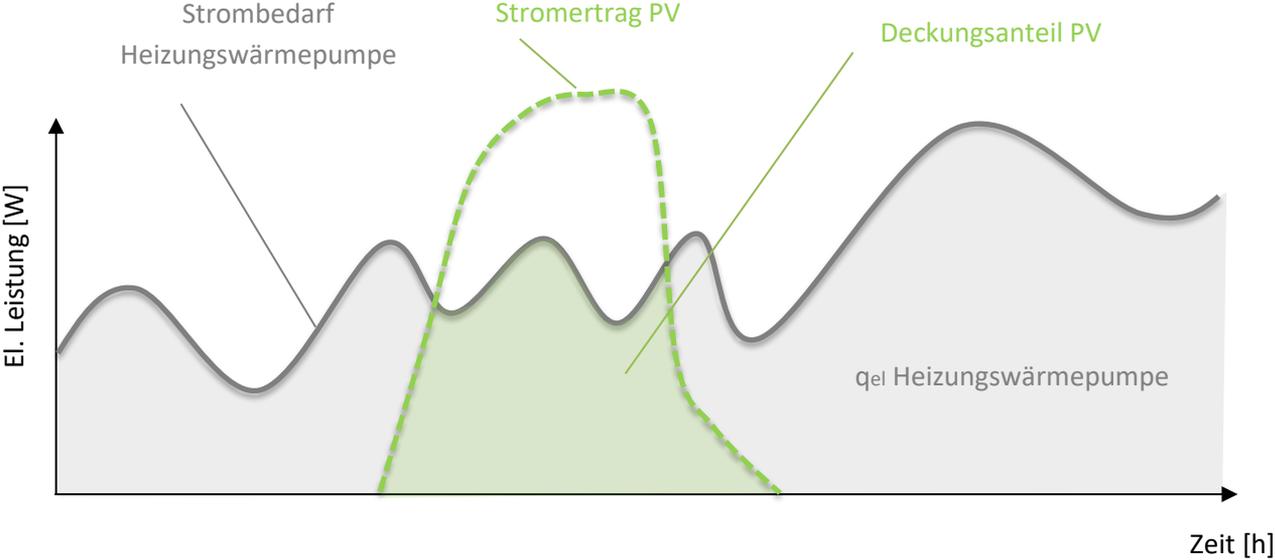
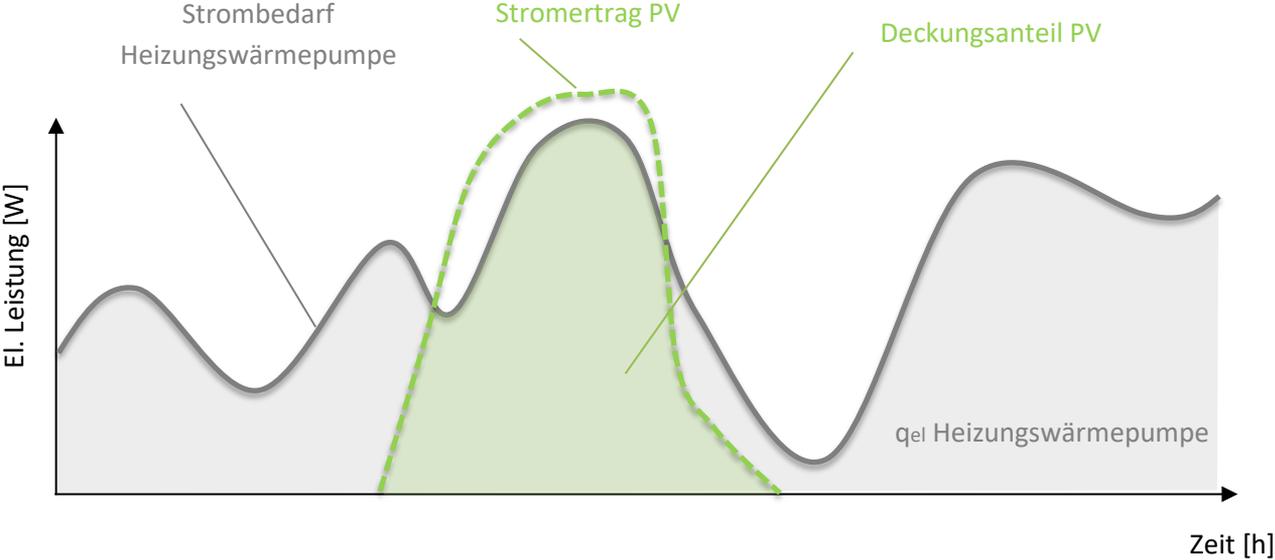


Abbildung 61: Kennzahl – Deckungsanteil mit Überschussregelung



Folgende Varianten werden in Bezug auf die Regelung der Überschussbeladung der Bauteilaktivierung für die Wohnung 2.6 mittels Gebäudesimulation näher untersucht:

Variante 1 stellt die Variante mit Raumthermostat, ohne optimierter Überschussregelung dar.

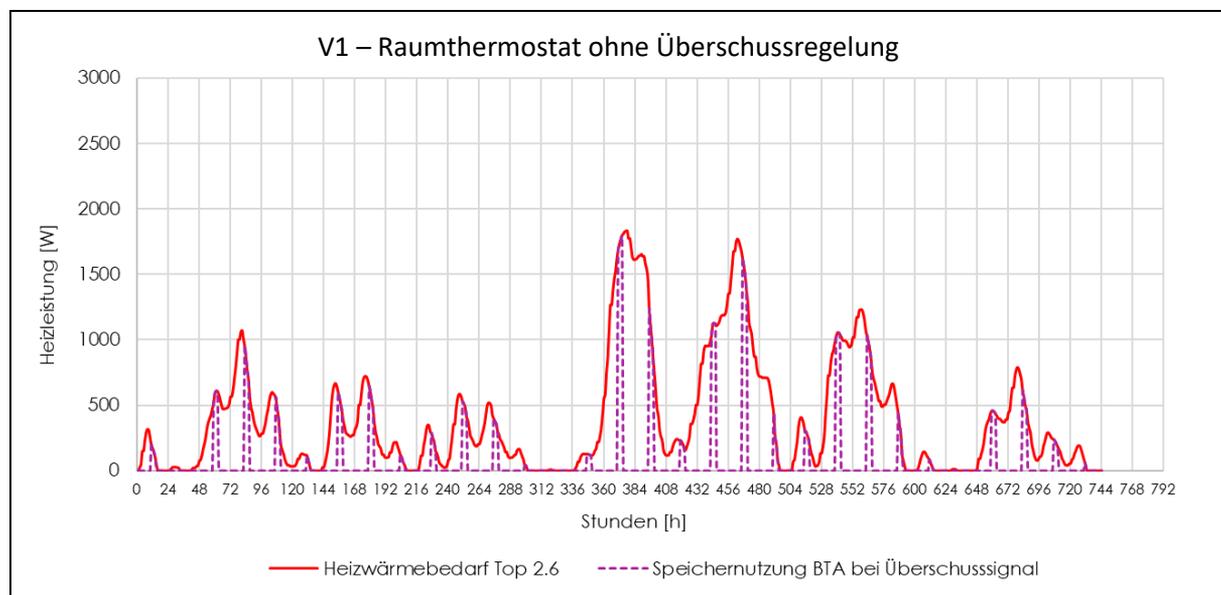
Variante 2 stellt das System mit Raumthermostat und Überschussregelung – entsprechend der Umsetzung bei dem Projekt Tonpfeifengasse – dar.

Variante 3 stellt die Regelung über den 24h Mittelwert der Raumtemperatur (vergleichbar mit einem Kerntemperaturfühler) dar.

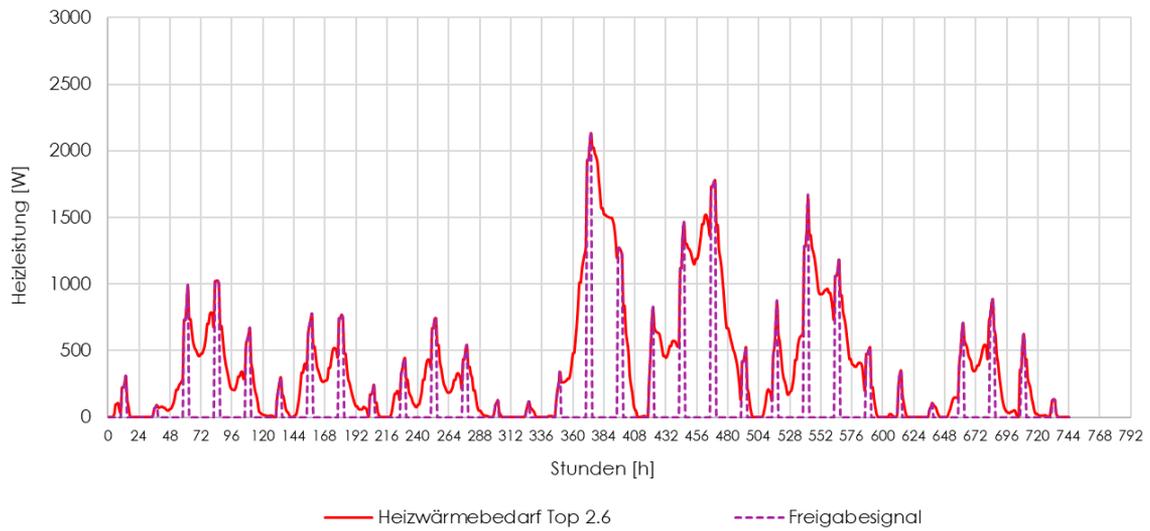
Variante 4 regelt zu Zeiten ohne Freigabesignal über ein Raumthermostat und zu Zeiten mit Freigabesignal nach dem 24h Mittelwert der Raumtemperatur (vergleichbar mit einem Kerntemperaturfühler). Durch diese Art der Regelung bei Freigabesignal wird das aktuelle Raumverhalten mit den internen und solaren Lasten weitestgehend ignoriert und so die Speichermasse des Betonbauteils maximal ausgenutzt. Gewisse Überschreitungen der Raumtemperatur, verursacht durch z.B. zu hohen solaren Gewinnen, sollten durch Betätigung der Sonnenschutzeinrichtung bzw. gezieltes kurzes Lüften begrenzt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft für den Monat März für die unterschiedlichen Regelstrategien den Heizwärmebedarf von Top 2.6 sowie den Deckungsanteil, wenn die BTA bei Überschussignal als Speicher für erneuerbaren Strom genutzt wird.

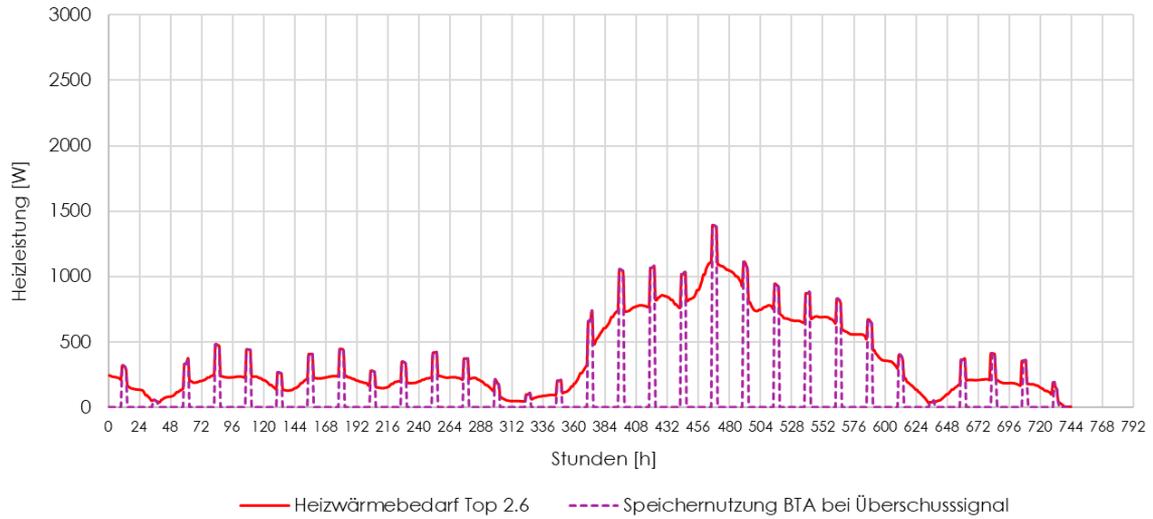
Abbildung 62: Variantenstudie – Regelungsvarianten (Basis Heizwärmebedarf Top 2.6)



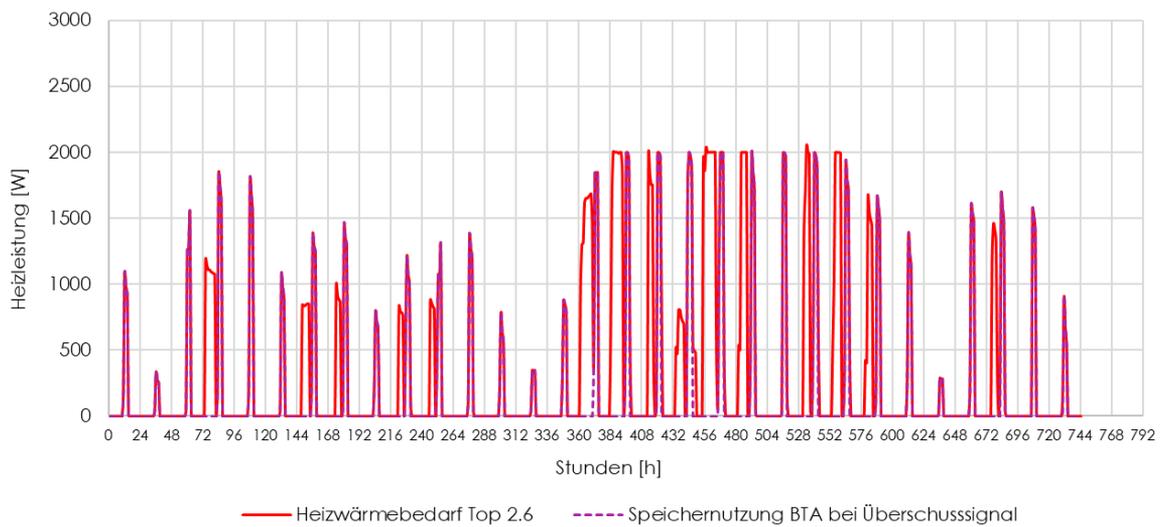
V2 – Raumthermostat + Überschussregelung



V3 – Raumthermostat (24h Mittelwert) + Überschussregelung



V4 – Raumthermostat + Überschussregelung (24h Mittelwert)



Folgende Deckungsanteile des Heizwärmebedarfs während des Freigabesignals, also gedeckt über Strom aus erneuerbaren Energien, ergeben sich für die vier untersuchten Regelungsvarianten. Das Verhältnis des Deckungsanteils von den Varianten 1 - 4 zu den jeweiligen Referenzvarianten zeigt die Effizienz der Regelstrategie in Bezug auf die Speichernutzung mit erneuerbarem Strom. Der resultierende Deckungsanteil des Heizwärmebedarfs auf Basis der unterschiedlichen Regelstrategien liegt zwischen 56 und 133 kWh.

Die Variante 1 mit Raumthermostat ohne Überschussregelung, zeigt hier bereits eine gewisse Deckung in Höhe von 19,3 %. Für den Vergleich der Varianten wird diese Variante als Basisvariante herangezogen. Die Varianten 2 und 3 zeigen eine geringe Steigerung des Deckungsanteils des Heizwärmebedarfs während der Freigabezeiten.

Jedoch erst bei der Variante 4, mit entsprechend optimierter Regelung entweder über den 24h-Mittelwert der Raumtemperatur oder einen Kerntemperaturfühler im aktivierten Bauteil, lässt sich der Deckungsanteil im Vergleich zur Referenzvariante nahezu verdreifachen.

Variante	Deckungsanteil Heizwärmebedarf während Freigabesignal / Überschussstrom	Deckungsanteil Heizwärmebedarf während Freigabesignal / Überschussstrom	Effizienz im Vergleich zu Variante 1 Regelstrategie
V1	56 kWh	19,3 %	1,00
V2	78 kWh	27,4 %	1,41
V3	63 kWh	22,9 %	1,19
V4	133 kWh	48,9 %	2,53

6 Schlussfolgerungen

6.1. Erfahrungen aus Anlagenbetrieb & Monitoring

Die Bauteilaktivierung als Wärmeabgabe- bzw. Wärmeentzugssystem zeigt sich als sehr robustes System. Nach Behebung diverser Probleme, die mit der Bauteilaktivierung an sich nichts tun hatten, stellte sich ein gleichmäßiger Betrieb ein. Komfortable Raumtemperaturen konnten mit niedrigen Vorlauftemperaturen erreicht werden. Die Vorteile der Bauteilaktivierung zeigten sich insbesondere im Kühlfall.

Nachfolgend sollen Erfahrungen aus dem Projektverlauf aufgezeigt werden.

6.1.1. Inbetriebnahme und Betrieb

Folgende Punkte wurden im Zuge der Inbetriebnahme festgestellt und behoben:

- Räume zu kalt und in weiterer Folge zu warm
 - o Stellmotoren öffnen nicht → provisorischer Ausbau der Stellmotoren und manuelle Einregulierung sowie Anhebung der Vorlauftemperatur → Überhitzung der Wohnungen kombiniert mit hohem Wärmeverbrauch
 - o Raumthermostate waren falsch angeschlossen (Signal Sommer-/Winterbetrieb; Signal Überladung mit PV-Strom)
 - o Heizungsverteiler, korrekte Einstellung der Durchflüsse erforderlich
- Warmwasserzapfrate und Effizienz Warmwasserbereitung
 - o Speicherdurchmischung bei Warmwasserzapfung durch fehlerhafte Nachströmung von Kaltwasser → mögliche Zapfmengen wesentlich zu gering und häufiger Einsatz des el. Heizstabs → geringe Effizienz der Warmwasserbereitung
 - o Tausch von WW-Steigrohr und KW-Dichtung in den Speichern erforderlich → Einbau der Speicher in der Küchenmöblierung; tlw. keine Revisionsöffnungen vorgesehen → erheblicher Aufwand (Anpassungen an der Küchenmöblierung und immer Zugang zu den Wohnungen erforderlich) für umfangreiche Adaptierungen bei der dezentralen Warmwasserbereitung.
 - o Speicherdimensionierung mit 150l für Wärmepumpenbetrieb mit geringer Heizleistung und somit langer Aufheizzeit bei vollständiger Entnahme tlw. zu gering → häufiger Einsatz des el. Heizstabs → geringe Effizienz der Warmwasserbereitung
- Einzelraumregelung
 - o Die Einzelraumregelung mit einer Vielzahl an Raumthermostaten verursacht einen erheblichen Aufwand bei der Fehlersuche (falsche Verkabelung und Signalverarbeitung), der mögliche positive Einfluss der Einzelraumregelung bei einem so trägen System wie der Bauteilaktivierung ist zudem begrenzt.

6.1.2. Überschussregelung zur Speicherung von erneuerbarem Strom in den aktivierten Bauteilen

Die Realisierung der Regelung allein über die Sollwertverschiebung am Raumthermostat führt bereits zu einer verbesserten Ausnutzung von erneuerbarem Strom, das volle Potenzial der Bauteilaktivierung kann damit aber insbesondere im Zusammenhang mit solarer Energiegewinnung nicht genutzt werden.

Hohe PV-Erträge treten meist gleichzeitig mit hohen solaren Gewinnen über die Fensterflächen auf. In der Übergangszeit wird die Beladung der Bauteile häufig unterbrochen, da die Temperatur in den Räumen über den (verschobenen) Sollwert ansteigt. Der Temperaturanstieg in den Wohnungen wird zwar vorrangig durch die solaren Gewinne über die Fensterflächen und weniger durch Überschussregelung und Beladung der Bauteilaktivierung hervorgerufen, dennoch wird das Potenzial zur Wärmespeicherung dadurch beschränkt.

Es zeigte sich auch, dass bei der installierten PV-Leistung von ca. 2,5 kWp je Wohneinheit während winterlicher Klimabedingungen nach Abdeckung des Haushaltsstroms inkl. Warmwasserbereitung zumeist kaum Überschüsse verbleiben, welche zur Beladung des Betonspeichers genutzt werden könnten. Wird eine hohe Abdeckung des Wärmebedarfs über PV-Strom gewünscht, bedingt dies eine deutlich größere Dimensionierung der PV-Anlage.

Die Sektorkopplung mit Windstrom (Wind Peak Shaving) wäre daher für den Heizfall vorteilhafter, da hier die Stromüberschüsse auch zu Zeiten ohne hohe solare Gewinne auftreten und das Erzeugungsprofil von Windenergie wesentlich besser zum Bedarfsprofil von Gebäuden im Heizfall passt. Die Umsetzung des Wind Peak Shavings ist technisch durchaus möglich, wurde aber aufgrund organisatorischer Rahmenbedingungen (kein flexibler Stromtarif etc.) nicht umgesetzt.

Für den Kühlfall ist die Kombination mit Photovoltaikstrom im Gegensatz dazu sehr gut geeignet. Hier lassen sich hohe Deckungsgrade erzielen. Hier werden auch entsprechend hohe Deckungsgrade erzielt.

6.2. Ausblick und Empfehlungen

Die umfangreichen Probleme während der Inbetriebnahme und insbesondere die Effizienz der Wärmepumpenanlage für die Warmwasserbereitung zeigen, dass eine fundierte Planung und Ausführung - welche die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten, dem Nutzer und dem energetischen Gebäudestandard berücksichtigen - unerlässlich für einen einwandfreien Anlagenbetrieb sind. Komplexere Systeme erfordern dabei einen höheren Planungsaufwand sowie einen wesentlich erhöhten Aufwand während der Inbetriebnahme.

Besonders wichtig erscheint eine Funktionskontrolle nach Fertigstellung der Bauarbeiten. Auffällig ist, dass zwar kaum Probleme im Bereich der Installationstechnik auftreten, jedoch umfangreiche und vor allem schwer feststellbare Mängel im Bereich der Regelungstechnik auftreten können. Dabei scheint es allerdings irrelevant zu sein, um welches Wärmeabgabesystem (Bauteilaktivierung, Fußbodenheizung etc.) es sich handelt. Im Fall der Tonpfeifengasse wurden beispielsweise sämtliche Raumthermostate falsch verkabelt.

Besonders wichtig ist die Funktionskontrolle bei dezentrale Anlagenteilen. Diese müssen vor dem Bezug der Wohnungen durch die Mieter:innen voll funktionsfähig sein. Adaptierungen an den dezentralen Anlagenteilen sind nach Bezug zwangsläufig mit höherem Aufwand und einer Verunsicherung der Nutzer:innen verbunden.

Dimensionierung, Platzierung und erforderliche Revisionsöffnungen sind für dezentrale Warmwasserbereiter frühzeitig in der Planung mit zu berücksichtigen. Bei dezentralen WW-Bereitern muss entweder das größere Speichervolumen oder die höhere Erzeugerleistung den Bedarf decken können. Unterschiedliche Bedarfe der Nutzer:innen können nicht wie bei zentralen Systemen über die Gleichzeitigkeit der Anzahl der Wohnungen ausgeglichen werden. Entsprechend muss in der Planung Bedacht auf die Systemauslegung gelegt werden (Speichergröße, Wärmepumpenleistung, Verortung des Speichers). Bei Einbauten von Warmwasserbereitern in der Küchenmöblierung sind zudem Vorgaben hinsichtlich Revisionsöffnungen zu machen.

Die Regelung der Raumtemperatur erfolgt in der Tonpfeifengasse über eine Einzelraumregelung mit Raumthermostaten. Eine große Anzahl an Raumthermostaten erhöht potenziell die Fehlerhäufigkeit und erschwert die Fehlersuche an der Anlage, insbesondere wenn über die Raumthermostate mehrere Funktionen (Sommer- und Winterbetrieb in Kombination mit Passivwarmwasser sowie Überladung mit PV-Strom) abgedeckt werden sollen. Die Tatsache, dass die Auswirkungen von geänderten Einstellungen nur stark zeitlich verzögert im Raum feststellbar sind, erschwert die Fehlersuche.

Die durchgeführten Analysen zeigen, dass bei der Regelstrategie zur Wärmespeicherung in der Bauteilaktivierung im Zusammenhang mit Sonnenenergie noch Entwicklungspotenzial gegeben ist. Die Überschussregelung zur Nutzung der Bauteilaktivierung als Speicher, sollte zur optimalen Ausnutzung des Stromertrags aus erneuerbarer Energie möglichst abgekoppelt von der Raumtemperatur erfolgen. Einen beispielhaften Lösungsansatz stellt z.B. eine Überschussregelung über die Betonkerntemperatur dar. Zu einem ähnlichen Verhalten würde eine Regelung nach dem 24-Mittelwert der Raumtemperatur über das Raumthermostat führen. Technisch wäre dies wohl umsetzbar – entsprechende Raumregler sind am Markt allerdings nicht verfügbar. In diesem Bereich besteht der größte Entwicklungsbedarf. Unter Anbetracht der Tatsache, dass selbst einfachste Regelsysteme große Probleme bereiten können und die Fehleranfälligkeit mit zunehmender Komplexität der technischen Lösung im Regelfall zunimmt, sollte bei den künftigen Entwicklungsarbeiten aber der Fokus auf möglichst einfache Lösungen gelegt werden. Aus diesem Grund werden digitale Regler mit einer Vielzahl von Einstellmöglichkeiten, prädiktive Regelungsansätze, App-Steuerungen, etc. eher kritisch gesehen.

Zudem ist die Sektorkopplung mit Windstrom weiter voranzutreiben, da hier die Kombination mit der Bauteilaktivierung in Bezug auf die maximal nutzbare Speicherkapazität besonders vielversprechend ist. In diesem Zusammenhang scheinen die organisatorischen und regulativen Hemmnisse bedeutender als die technischen Hürden.

Weiterer Forschungsbedarf wird im Bereich der Bewertung der Energieflexibilität gesehen, hier insbesondere im Bereich der Kennzahlentwicklung. Es stellt sich die Frage, wie die Deckungsanteile mit und ohne Überschussregelung ermittelt und beschrieben werden können, um das System der Energiespeicherung in den aktivierten Bauteilen mit anderen Speichertechnologien vergleichbar zu machen.

Die Weiterverbreitung bzw. Verarbeitung der Erkenntnisse erfolgt u.a. im Rahmen des Projekts „BTTAB – Breitentest von energieeffizienten Demonstrationsgebäuden mit thermisch aktivierten Bauteilen“, welches im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft gefördert wird. In diesem Projekt werden ca. 20 Projekte mit Bauteilaktivierung analysiert und bewertet. Aufbauend auf den Erkenntnissen des Projekts Tonpfeifengasse und den durchgeführten Analysen, soll in diesem Projekt auch die o.a. Bewertungsgröße zur Feststellung der Speichereffektivität anhand von Messdaten entwickelt werden.

Eine vertiefte Untersuchung der Überschussregelung mittels Monitoring wird bei einem weiteren Bauvorhaben, der Wohnhausanlage „Klee Living“ in der Breitenfurter Straße 178-182, erfolgen. Hier wird die Verschiebung der Sollwerte über die Raumthermostate im großvolumigen Wohnbau untersucht. Als zweiten Ansatz zur Verarbeitung von Überschussignalen wird in diesem Projekt auch die bereits aus anderen Projekten bekannte Anhebung der Vorlauftemperatur und Einspeisung der Überschusswärme in unregelmäßige Heizkreise analysiert.

Das erlangte Wissen aus dem Monitoring des Projekts Tonpfeifengasse ist bereits während der Projektlaufzeit in die Konzipierung einer Vielzahl anderer Projekte mit Bauteilaktivierung zur Heizung, Kühlung und Wärmespeicherung eingeflossen. Zudem wurden die Erkenntnisse dieses Projekts in laufenden Schulungen, Workshops und Vorträgen zum Thema Bauteilaktivierung aufgegriffen und so einem breiteren Publikum zugänglich gemacht.

7 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept – Gebäude als Energiespeicher für PV-Strom [Quelle: Friembichler F., Handler S., Krec K., Kuster H.: Planungsleitfaden Thermische Bauteilaktivierung, 2016, BMVIT, 2016]	11
Abbildung 2: Luftbild, Haus 1 – 4 (Quelle: Google Maps)	13
Abbildung 3: Grundriss Erdgeschoss, Haus 2	14
Abbildung 4: Grundriss Obergeschoss, Haus 2.....	15
Abbildung 5: Grundriss Dachgeschoss, Haus 2.....	16
Abbildung 6: Schnitt 1, Haus 2	17
Abbildung 7: Schnitt 2, Haus 2	17
Abbildung 8: Heizleistung und Leistungszahl der Luft-Wasser Wärmepumpe in Abhängigkeit der Temperatur auf der Quellenseite [Ovum].....	18
Abbildung 9: Systemskizze aktiviertes Halbfertigteil mit Rohrleitungen auf der Elementdecke.....	19
Abbildung 9: Verlegung der Rohrleitungen auf der Elementdecke Tonpfeiffengasse (Foto: Handler)	20
Abbildung 9: exemplarisches monatliches Stromerzeugungsprofil Windkraftanlage Vestas V150 5,6 MW, Standort Weinviertel (Quelle: WEB Windenergie AG) [1].....	21
Abbildung 10: Anlagenschema und Zählkonzept Monitoring.....	24
Abbildung 11: Automatisierungsschema	24
Abbildung 12: Energiezähler, Typ EM340, Hersteller Carlo Gavazzi	25
Abbildung 13: Wärme- und Kältezähler, Typ UH50, Hersteller Siemens	25
Abbildung 14: Raumtemperatur und -feuchtefühler, Typ ZS-FSEN, Hersteller Zennio.....	26
Abbildung 15: Wetterstation, Typ Meteodata 140 basic, Hersteller Theben	26
Abbildung 16: Wärme- und Kälteverbrauch, Haus 2 [2021]	28
Abbildung 17: Wärme- und Kälteverbrauch, Haus 2 [2022]	29
Abbildung 18: Raumlufttemperatur Wohnküche (Top 2.5) während der Inbetriebnahme	30
Abbildung 19: Raumlufttemperatur Zimmer 2 (Top 2.5) während der Inbetriebnahme	30
Abbildung 20: Vorlauf- und Rücklauftemperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.5) während der Inbetriebnahme.....	31
Abbildung 21: Verlauf der Außenlufttemperatur während der Inbetriebnahme.....	31
Abbildung 22: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.1).....	32
Abbildung 23: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.1).....	32
Abbildung 24: Vorlauf- und Rücklauftemperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.1) während der Kühlperiode	33
Abbildung 25: Raumtemperatur Wohnküche (Top 2.6).....	33
Abbildung 26: Vorlauf- und Rücklauftemperatur am Heizkreisverteiler (Top 2.6) während der Kühlperiode	33
Abbildung 27: Raumlufttemperaturen Wohnküche 2.6 (Juni ungekühlt, Juli gekühlt)	34
Abbildung 28: Stromverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe und Monatsarbeitszahl [2021].....	35

Abbildung 29: Stromverbrauch Luft-Wasser Wärmepumpe und Monatsarbeitszahl [2022].....	35
Abbildung 30: Datenblatt Luft-Wasser Wärmepumpe	36
Abbildung 31: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.5) [2021]	37
Abbildung 32: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.5) [2022]	37
Abbildung 33: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.6) [2021]	38
Abbildung 34: Stromverbrauch Warmwasserbereitung und Monatsarbeitszahl (Top 2.6) [2022]	38
Abbildung 35: Datenblatt Wasser-Wasser Wärmepumpe (Warmwasserbereiter mit 150l Speicher) .	39
Abbildung 36: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.5), [2021].....	40
Abbildung 37: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.5), [2022].....	40
Abbildung 38: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.6), [2021].....	41
Abbildung 39: Warmwasserwärmeverbrauch, Speicherverluste und anteilig Quelle / Strom (Verdichter und Heizstab) (Top 2.6), [2022].....	41
Abbildung 40: Elektr. Leistungsaufnahme Warmwasserwärmepumpe und E-Heizstab (Top 2.5)	42
Abbildung 41: Elektr. Leistungsaufnahme Warmwasserwärmepumpe und E-Heizstab (Top 2.6)	42
Abbildung 42: Einbindung PV-Anlage für Direktnutzung TGA und Allgemeinstrom (Haus 2)	43
Abbildung 43: Strombilanz PV-Anlage 10kWp und Stromverbrauch TGA + Allgemein (Haus 2) [2021]	43
Abbildung 44: Strombilanz PV-Anlage 10kWp und Stromverbrauch TGA + Allgemein (Haus 2) [2022]	44
Abbildung 45: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad (Haus 2) [2021]	44
Abbildung 46: Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad (Haus 2) [2022]	45
Abbildung 47: Autarkiegrad (Haus 2) [2021 & 2022]	45
Abbildung 48: Energiebilanz (Stromverbrauch Heizung/Kühlung + Allgemein und Stromertrag PV) Haus 1-4 [01/2021 – 12/2021]	46
Abbildung 49: Energiebilanz (Stromverbrauch Heizung/Kühlung + Allgemein und Stromertrag PV) Haus 1-4 [01/2022 – 06/2022]	46
Abbildung 50: Auszug aus den Stromrechnung Heizung/Kühlung + Allgemein für Haus 1-4 [07/2021 – 08/2022].....	47
Abbildung 51: Auszug aus dem Informationsschreiben an die Mieter für die korrekte Einstellung der Raumthermostate	48
Abbildung 52: Überschussregelung im Heizbetrieb an einem beispielhaften Tag Mitte März	50
Abbildung 53: Prinzip der Überschussregelung - Heizfall	51
Abbildung 54: Überschussregelung März - Heizbetrieb.....	51
Abbildung 55: Überschussregelung April - Heizbetrieb	53
Abbildung 56: Überschussregelung Mai - Heizbetrieb.....	54
Abbildung 57: Überschussregelung Juli - Kühlbetrieb.....	56
Abbildung 58: Kennzahl – Deckungsanteil ohne Überschussregelung	60
Abbildung 59: Kennzahl – Deckungsanteil mit Überschussregelung	60

Abbildung 60: Variantenstudie – Regelungsvarianten (Basis Heizwärmebedarf Top 2.6)..... 61

8 Anhang

Anlage 1: Thermische Gebäudesimulation

Anlage 2: Raumklimamessungen

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)