

Abschlussbericht

EG2050 – Innovative Vorhaben für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050

Umsetzung, Monitoring und Betriebsoptimierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudes – AktivPLUS Mehrfamilienhaus in Stuttgart Möhringen

für den Projektträger Jülich

Förderung	Gefördert durch:  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
	aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Förderkennzeichen	03EGB0015A; 03EGB0015B
Laufzeit	01.08.2018 – 31.07.2023
Stand	31.07.2023 (Abschlussbericht)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 03EGB0015A/B gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Forschungsprojekt AktivPLUS Mehrfamilienhaus in Möhringen wurde von der Bietigheimer Wohnbau durchgeführt. Als Unterauftrag war das Steinbeis-Transferzentrum EGS tätig. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung der Arbeiten und Ergebnisse aller Projektbeteiligten, inklusive den Unterauftragnehmern.

Projektkoordination / -leitung

Bietigheimer Wohnbau GmbH

Ansprechpartner

Herr Dieter Fiess

Bietigheimer Wohnbau GmbH

Berliner Str. 19, 74321 Bietigheim

Dr.-Ing. Christian Kley

Florian Schmidtchen, Dipl.-Ing.

STZ Energie-, Gebäude- und Solartechnik

Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart

Unteraufträge

Steinbeis-Transferzentrum (STZ) Energie-, Gebäude- und Solartechnik

Dr.-Ing. Christian Kley (Projektleitung)

Florian Schmidtchen, Dipl.-Ing.

Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart

Tel. +49 (0) 711 99 007-5, Fax +49 (0) 711 99 007-99

Inhalt

1 Kurzfassung	5
2 Projektvorstellung	7
2.1 Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens	7
2.2 Aufbau und Methodik des Forschungsvorhabens	10
3 Entwicklung, Umsetzung und Inbetriebnahme (AP1)	11
3.1 Architektur und Gebäudehülle	11
3.2 Energiekonzept	14
3.3 Wärmepumpen und Abwasserwärmetauscher	18
3.4 Photovoltaikanlagen	20
3.5 Stromspeicher	22
3.6 Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Bauphase	23
4 Mess- und Monitoringkonzept (AP2)	25
5 Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien (AP3)	27
5.1 Stromspeicher	27
5.2 Rücklaufbeimischung	30
5.3 Elektroladestationen	31
5.4 Speicherbeladung und Heizstäbe	32
5.5 Heizkurve und Heizgrenztemperatur	33
6 Implementierung und Evaluierung (AP4) / Betriebsergebnisse	34
6.1 Wärmeverbrauch Heizung	34
6.2 Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser/Badheizkörper	36
6.3 Wärmepumpe	39
6.4 Abwasserkanal	41
6.5 Stromverbrauch für Gebäudeversorgung	43
6.6 Nutzerstromverbrauch	45
6.7 PV-Ertrag und Eigenstromnutzung	46
6.8 Stromspeicher	48
6.9 EnergiePLUS-Bilanz	51
6.10 CO ₂ -Footprint	53
7 Zusammenfassung	54
8 Anhang	56

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AKS	Anlagenkennzeichnungsschlüssel	NAPE	Nationalen Aktionsplan Energie
AP	Arbeitspaket	PV	Photovoltaik
EE	Erneuerbare Energien	SZ	Stromzähler
FBH	Fußbodenheizung	WMZ	Wärmemengenzähler
GA	Gebäudeautomation	WP	Wärmepumpe
KMZ	Kältemengenzähler	WWB	Warmwasserbereitung
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	WZ	Wasserzähler

1 Kurzfassung

Ziel des Vorhabens ist die Umsetzung eines ganzheitlichen innovativen Energiekonzepts, das den nahezu klimaneutralen Gebäudestandard sowie gemäß den Forderungen der EU den „nearly-zero-energy-building“-Standard (Niedrigstenergie-Gebäude) erreicht. Dabei werden die für diese Standards notwendigen innovativen Technologien und Methoden in der Praxis demonstriert und evaluiert.

Das Mehrfamilienhaus mit innerstädtischer Lage ist im Kontext von Nutzung und Lage ein besonders wertvolles Demonstrationsprojekt zur Verfolgung der Ziele im Nationalen Aktionsplan Energie (NAPE) der Bundesregierung.

Das in Stuttgart-Möhringen entstandene Mehrfamilienhaus demonstriert die Umsetzung eines nahezu klimaneutralen Gebäudestandards und zeichnet sich durch hohe Energieeffizienz, den Einsatz innovativer Technik und durch eine intensive Nutzung von Sonnenenergie und Umweltwärme aus. Gebaut wurde ein Mehrfamilienhaus mit 22 Wohnungen und einer Gewerbeeinheit, dass durch die unmittelbare Nähe zum Bahnhof Stuttgart-Möhringen besonders hohe Anforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm hat. Über die eingebaute Mess- und Monitoringinfrastruktur können die Betriebsdaten und die Gebäudeperformance differenziert dargestellt werden.

Die Wärmebereitstellung (Raumheizung und WWB) erfolgt über ein monovalentes Wärmepumpensystem. Verbaut ist eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einem Wärmetauscher in einem benachbarten Mischwasserkanal als Wärmequelle. Das große Pufferspeicher-Volumen mit rund 6.500 Liter reduziert die Taktung der Wärmepumpen und kann der Erhöhung des Eigenstromnutzungsanteils der PV-Anlage (PV-Überschussregelung) dienen. Die Wärmeübertragung in den Wohnungen erfolgt über eine Fußbodenheizung (FBH) mit niedrigem Temperaturniveau (max. 40 °C Vorlauf). Durch den Einsatz dezentraler Trinkwasserstationen in den Wohneinheiten kann die zentrale Vorlauf-Temperatur für die Warmwasserbereitung ebenfalls gesenkt werden, was zur hohen Gesamteffizienz des Wärmepumpensystems beiträgt.

Die Erreichung des nahezu klimaneutralen AktivPLUS-Standards erfolgt durch eine wirtschaftlich abgestimmte Kombination aus Reduzierung des Energiebedarfs und Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen. Für das „Stromhaus“ ist auf dem Dach eine PV-Anlage (78 kWp) sowie in den Balkonbrüstungen eine organischen PV-Anlage (4 kWp) installiert. Zur Erhöhung der Eigenstromnutzung ist ein Nickel-Mangan-Cobalt-Stromspeicher mit einer Speicherkapazität von 227 kWh verbaut. Stromerzeugung aus der PV, Speicherung des Solarstroms sowie der Betrieb der elektrischen Wärmepumpe werden durch ein übergeordnetes Stromlast-Management gekoppelt, mit dem Ziel einen maximalen Eigenstromanteil zu erreichen.

2 Jahre konnte mit Hilfe der Bundesförderung ein umfangreiches Monitoring durchgeführt werden, dessen Auswertungen und Analysen sich wie folgt kurz zusammenfassen lassen:

Für die Berechnung wird der Verbrauch aus Gebäudebetrieb und Nutzerstrom verwendet. Das Ergebnis der ganzheitlichen Bilanz zeigt, dass der EnergiePLUS-Standard knapp nicht erreicht wurde. Im Vergleich zu den Planungsparametern wird deutlich, dass der tatsächliche Stromverbrauch höher ist, der Wärmeverbrauch recht gut übereinstimmt. Ein Anstieg des Verbrauchs durch die Lockdowns während der Coronapandemie im Winter konnte festgestellt werden. Die solare Eigenstromnutzung aus den PV-Anlagen lag zwischen 68 und 76 % je nach Optimierungsziel, der solare Deckungsanteil (unter Einbeziehung des Stromspeichers) bei etwa 50 %. Der Stromspeicher zeigt einen Wirkungsgrad von 70 % auf. Die Zwischenspeicherung des zu den Ertragsspitzen erzeugten Stroms zur Nutzung in den Nachtstunden und damit der Reduzierung des Netzstrombezugs funktioniert gut. Der Betrieb der Wärmepumpe zur Bereitstellung von Heizwärme (HW) und Warmwasser in Kombination mit einem großen Speichervolumen ermöglicht eine effiziente Wärmebereitstellung.

Die Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt und das erworbene Know-How aus Planung, Errichtung und Betrieb machen deutlich, dass Mehrfamilienhäuser im Sinne von Klimaneutralität zukunftsfähig gestaltet werden können.

Produkte, Komponenten und Konzepte liegen vor und sind übertragbar. Forschungsbedarf besteht vor allem darin, das Verbrauchsverhalten der Bewohner zu sensibilisieren, Funktionen und Betriebsweisen auf eine standardisierte Umsetzung vorzubereiten und durch evaluierte Prozesse von Information und Öffentlichkeitsarbeit die Marktakzeptanz zu erhöhen.

2 Projektvorstellung

2.1 Motivation und Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Umsetzung eines ganzheitlichen innovativen Energiekonzepts, das den nahezu klimaneutralen Gebäudestandard sowie gemäß den Forderungen der EU den „nearly-zero-energy-building“-Standard (Niedrigstenergie-Gebäude) erreicht. Dabei werden die für diese Standards notwendigen innovativen Technologien und Methoden in der Praxis demonstriert und evaluiert. Das Mehrfamilienhaus mit innerstädtischer Lage ist im Kontext von Nutzung und Lage ein besonders wertvolles Demonstrationsprojekt zur Verfolgung der Ziele im Nationalen Aktionsplan Energie (NAPE) der Bundesregierung.

Bei diesem Projekt handelt sich um ein modellhaftes Transformationsprojekt mit hohem Demonstrationswert, teils mit einem geringen Forschungsbedarf, jedoch einer ambitionierten Steigerung der Energieeffizienz in Kombination mit der Integration erneuerbarer Energien im Gebäudebereich. Die speziell an diesem Standort zur Verfügung stehende Abwasserwärme wird durch eine heute bereits verfügbare Technologie nutzbar gemacht. Die lokal verfügbare solare Energie wird über PV-Anlagen auf Dach und Fassade mit teilweise innovativer Technologie (OPV) genutzt. Die in der Förderinitiative „EnEff.Gebäude.2050“ gewünschte Einsparung beim nicht-erneuerbaren Primärenergie in der Größenordnung von 80 % gegenüber dem Jahr 2008 wird bei weitem übertroffen. Über das Jahr gesehen, kann das Gebäude eine positive End- und Primärenergiebilanz aufweisen und als übertragbares Modellvorhaben für Plusenergiegebäude dienen.

Der ESG vom 18. November 2015 liegt das Ziel des Energiekonzeptes der Bundesregierung zugrunde, den Gebäudebestand bis 2050 nahezu klimaneutral zu gestalten. Diese ambitionierte Aufgabe kann nur gelingen, wenn zukünftig eine beschleunigte Umsetzung von Innovationen, neuen Technologien und Konzepten stattfindet. Aus unserer Sicht bestehen derzeit folgende Hemmnisse hinsichtlich der Umsetzung von Energieeffizienz-Steigerungen bis hin zu einem nahezu klimaneutralen Gebäude, welche in diesem Projekt adressiert wurden:

- Mehraufwand und Mehrkosten bei der Planung
- Umsetzungshemmnisse bei den ausführenden Firmen bzw. die Fehleranfälligkeit bei dem Einbau neuartiger Komponenten sowie die fehlende Erfahrung der einzelnen Handwerker.
- Erhöhter zeitlicher Aufwand bei der Bauüberwachung und Qualitätssicherung
- Beim Einsatz von innovativen Komponenten zur Effizienzsteigerung, steigt der jährliche Wartungs- und Bedienungsaufwand.
- Die Mehrkosten zur Umsetzung eines klimaneutralen Gebäudes können und sollen nicht auf die Nebenkosten (Wärme- und Strompreis) umgewälzt werden. Für den Investor (Bietigheimer Wohnbau) und den Betreiber (SWE Stuttgart) ergeben sich aber womöglich andere Vorteile bei der Umsetzung solcher Projekte.
- Fehlende Erfahrungen im laufenden Betrieb von innovativen Wärme- und Stromerzeugern und Stromspeicher.

Ein Schwerpunkt des geplanten Vorhabens ist der Abbau der genannten Hemmnisse und das Aufzeigen notwendiger Maßnahmen für die Realisierung ambitionierter Vorhaben auf dem Weg zum nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Die Inbetriebnahme und die erste Betriebsphase sollten durch ein technisches Monitoring begleitet werden. Dabei werden die eingesetzten Komponenten zur Effizienzsteigerung nicht einzeln betrachtet, sondern als Gesamtsystem analysiert. Dem künftigen Betreiber wurden anschließend entsprechende Werkzeuge und das Knowhow zur Verfügung gestellt, um einen energieeffizienten Betrieb und den gewünschten Nutzerkomfort zu gewährleisten.

Ein Informationsaustausch zwischen der Bietigheimer Wohnbau GmbH und den Nutzern sollte unter anderem deren Erfahrung und Kritikpunkte zum Energiekonzept und der thermischen Behaglichkeit aufzeigen und die Nutzerakzeptanz steigern. Nach Bezug der Wohnungen war eine Informationsveranstaltung der Bietigheimer Wohnbau in Zusammenarbeit mit dem Architekten und dem STZ für die Wohnungseigentümer geplant, indem über die energetische Zielsetzung und die technischen Komponenten und deren Funktionsweise aufgeklärt werden sollte. Zur Bewertung und dem Abbau der Hemmnisse sollte eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Bietigheimer Wohnbau GmbH, der wissenschaftlichen Begleitung durch das Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik (STZ) mit Einbezug der Wohnungseigentümer erfolgen. Hierfür waren weitere Informationsabende z.B. im Rahmen der Eigentümerversammlung und ggf. Bewohnerumfragen geplant.

Der Wärme- und Strombedarf des Gebäudes soll komplett durch lokal verfügbare Umweltwärme und lokal erzeugte regenerative Energien gedeckt werden. Prognostiziert ist ein Strombedarf von etwa $32 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Als Nachweis für das Erreichen des klimaneutralen Gebäudes soll der Solarertrag der Photovoltaikanlagen auf Dach und Fassade (Planung $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) höher sein als der gemessene Stromverbrauch über ein Jahr. Über das installierte Monitoring sollen die Energieflüsse hinsichtlich Verbrauch und Erzeugung der Liegenschaft erfasst werden.

Die lokal verfügbare Umweltwärme in Form von Abwasserwärme, wird durch eine Wärmepumpe in Verbindung mit einem Abwasserwärmetauscher für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung nutzbar gemacht. Durch die niedrigen Vorlauftemperaturen für Fußbodenheizung (max. 40°C), den Einbau von Frischwasserwasserstationen in den Wohneinheiten (Vorlauftemperaturen max. 55°C) und der Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch durch die Pufferspeicher ist ein effizienter Betrieb der Wärmepumpe möglich. Es soll eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von mindestens 4 erzielt werden.

Die lokale Speicherung von PV-Solarstrom ist ein notwendiger Baustein, um den Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch in Deutschland zu erhöhen und damit die Klimaschutzziele in Deutschland zu erreichen. Dabei geht es nicht um „Energieautarkie“, sondern um die Steigerung der Eigenstromnutzung und damit die Reduzierung der Netzbelastung durch die volatile Stromerzeugung der PV-Anlagen. Ohne einen Batteriespeicher wird von einer Eigenstromnutzung des Solarertrags für den Gebäudebetrieb und Nutzerstrom von über 30 % ausgegangen. Ziel ist durch Regelungstechnische Maßnahmen, die Einbindung von Elektromobilität und dem Einbau eines Stromspeichers den lokal erzeugten regenerativen

Strom in größerem Umfang mit über 50 % direkt zu nutzen und die Einspeisung von Überschüssen in das öffentliche Netz zu reduzieren. Durch die Bereitstellung von Speicherkapazitäten vor Ort können Lastspitzen und in Folge eine mögliche Abschaltung der PV-Anlage aufgrund von Überproduktion vermieden werden. Dies trägt im Gesamtkontext zur Substitution des Verbrauchs von fossilen Energien bei. Das Batteriespeichersystem soll zudem Lastspitzen ausgleichen, welche durch die Integration von Elektromobilität am Gebäude auftreten. Der energetische Vorteil und der wirtschaftliche Nutzen für den Endabnehmer durch den Einsatz eines Stromspeichers soll analysiert werden.

Speicherkapazitäten sind elementarer Bestandteil eines Smart Grid. Im geplanten Vorhaben soll untersucht werden, inwieweit das Batteriesystem im Konzept für das MFH auch als netzdienlicher Speicher installiert und betrieben werden kann und Kapazitäten für das Netz und die Elektromobilität bereitgestellt werden können. Das heißt bei Bedarf kann der Speicher Strom aus dem Netz aufnehmen.

Die eingesetzten Komponenten zur Effizienzsteigerung werden nicht einzeln betrachtet, sondern als Gesamtsystem analysiert. Erst das Zusammenspiel der einzelnen Anlagenkomponenten Wärmepumpe, Photovoltaikanlagen und Stromspeicher sowie Elektromobilität ermöglicht eine wesentliche Effizienzsteigerung. Die Betriebserfahrungen mit gemeinsamen Regelungsverhalten und das Nutzerverhalten sollen analysiert werden und für zukünftige Projekte aufbereitet werden. Für die Qualitätssicherung im Betrieb werden im Rahmen des technischen Monitorings Regelungsparameter und Kennzahlen bestimmt. Welche Regelungsfreiheiten und Einschränkungen für die Nutzer vorgenommen muss um die Effizienz und damit das Ziel, ein klimaneutrales Gebäude, zu erreichen, soll gemeinsam erforscht werden. Allgemein ist der Nutzer und dessen Einfluss als eventuelle „Störgröße“ zu bewerten. Der Einfluss des Nutzers ist nicht zu vernachlässigen, da der Haushaltsstrombedarf (Nutzerstrombedarf) mit etwa 17 kWh/(m²a) höher ist als der Energiebedarf für den Gebäudebetrieb nach EnEV mit einem Strombedarf für Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung mit insgesamt rund 15 kWh/(m²a). Der Einfluss eines energiebewusstes Nutzerverhalten und mögliche Stromeinsparmaßnahmen soll mit Hilfe des digitalen Nutzerinterfaces untersucht werden.

Die Zählerinfrastruktur für das Monitoring wird zusätzlich und unabhängig von der Abrechnungsinfrastruktur des EVU aufgebaut. Die Monitoring-Zähler werden in Reihe nach den entsprechenden Zählern des EVU angebracht. Die Investition trägt die Bietigheimer Wohnbau. Im Vorfeld wird vertraglich festgelegt, dass die Daten für das Monitoring erfasst und ausgewertet werden und die aktuelle Datenschutzrichtlinie eingehalten wird. Die Zähler werden auf ein M-Bus Netz aufgeschaltet, zentral erfasst und auf die Internetplattform der Firma mondayVision geladen. Von dort werden Sie dem STZ für das Monitoring zur Verfügung gestellt.

2.2 Aufbau und Methodik des Forschungsvorhabens

Das F+E-Projekt ist in fünf wissenschaftliche und technische Arbeitspakete unterteilt. Der Fokus der Bearbeitung liegt auf dem Monitoring und der Optimierung des Anlagenbetriebes in Hinblick auf eine hohe Eigenstromnutzung und der Abbildung des EnergiePLUS-Standards.

AP 1 Entwicklung, Umsetzung und Inbetriebnahme „AktivPLUS-Mehrfamilienhaus“

Konzeptentwicklung, Qualitätssicherung in der Planungs- und Bauphase, Mitwirkung bei der Inbetriebnahme

Die Errichtung und der Betrieb des Gebäudes werden in Bezug auf die energetischen und innovativen Zielsetzungen kritisch begleitet

AP 2 Mess- und Monitoringkonzept

Definition von Zielindikatoren für die Anlagen- und Gebäudeperformance, Aufbau und Umsetzung eines Monitoring-Konzeptes zur Überprüfung und Qualitätssicherung der Energie- und Komfortperformance.

AP 3 Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien

Im Mittelpunkt der Betriebsstrategien stehen:

- Betriebsführung des Abwasserwärmetauschers in Kombination mit der elektrisch betriebenen Wasser-Wasser-Wärmepumpe
- Das Batteriemanagementsystem zur Steigerung der Eigenstromnutzung und Reduktion der Lastspitzen in Erzeugung (PV) und Bezug (Elektromobilität)
- Ladungsmanagement der Elektrofahrzeuge
- Funktionsweise der Organischen PV-Anlage und der PV-Dachanlage
- Sicherstellung des thermischen und hygienischen Innenraumkomforts
- Batteriesystem als Regelenergieleistung durch Ladung mit überschüssigem Netzstrom aus regenerativen Energien und gleichzeitiger Vorhaltung von Ladeleistung für die Elektromobilität.

AP 4 Implementierung und Evaluierung

Umsetzung und Erprobung der entwickelten Betriebsstrategien aus AP 3 und Bestätigung durch das Monitoring im realen Betrieb.

AP 5 Projektkommunikation

Verbreitung der Erfahrungen und Ergebnisse aus Planung, Bau und Betrieb

3 Entwicklung, Umsetzung und Inbetriebnahme (AP1)

3.1 Architektur und Gebäudehülle

In unmittelbarer Nähe zum Bahnhof Stuttgart-Möhringen, wurde auf einem ehemaligen Areal der SSB (Stuttgarter Straßenbahnen AG) in der Filderbahnstraße 59, ein fünfgeschossiges Mehrfamilienhaus im Effizienzhaus Plus Standard gebaut. Das Bauvorhaben demonstriert die Umsetzung eines nahezu klimaneutralen Gebäudestandards und zeichnet sich durch hohe Energieeffizienz, den Einsatz innovativer Technik und durch eine intensive Nutzung von Sonnenenergie und Umweltwärme aus. Das Gebäude besteht aus fünf Vollgeschossen mit einer Gesamtwohnfläche von 1.800 m² sowie einem halb eingegrabenen Erdgeschoss, das als Garage für 22 PKW dient.



Abbildung 1 – Ansicht Südfassade (Quelle: Böhme Hilse Architekten)

Die insgesamt 22 Wohnungen sind nach Süden orientiert und haben jeweils einen vorgelagerten Balkon, wobei die Wohnfläche zwischen 60 m² und 120 m² variiert.



Abbildung 2 – Beispieldarstellung Wohnungen (Quelle: Böhme Hilse Architekten)

Die Erschließung der Wohnungen erfolgt über ein zentrales Treppenhaus und Laubengänge an der Nordfassade (Abbildung 3).



Abbildung 3 – Beispielebene mit Wohnungsgrundrissen (Quelle: Böhme Hilse Architekten)

Dort grenzt das Gebäude unmittelbar an den Gleiskörper der Straßenbahn (Abbildung 4), weshalb hier hohe Anforderungen an den Schallschutz gegen Außenlärm und den Erschütterungsschutz erfüllt werden müssen.



Abbildung 4 – Lageplan (Quelle: Böhme Hilse Architekten)



Abbildung 5 – Ansicht Nordfassade (Quelle: Böhme Hilse Architekten)

Beim gesamten Gebäude kommt eine 3-fach Wärmeschutzverglasung mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von $g \leq 0,55$ zum Einsatz. Die Fenster sind mit einem außenliegenden Sonnenschutz ausgestattet.

Tabelle 1 Kenndaten der Gebäudehülle - Bauteilaufbauten

Bauteil	Dämmung [mm]	Wärmeleitfähigkeit [W/m ² K]	U-Wert [W/m ² K]
Außenwände			
Außenwand gg. Erdreich	120	0,035	0,27
Außenwand gg. Unbeheizte Räume	125	0,037	0,27
Außenwand TRH gg. Tiefgarage	125	0,037	0,27
Außenwand Gewerbe gg. Tiefgarage	160	0,032	0,19
Außenwand Gewerbe	180	0,032	0,17
Außenwand WDVS (Stb / KS)	180	0,032	0,17 / 0,17
Außenwand zum Laubengang (Stb / KS)	180	0,035	0,19 / 0,18
Dächer			
Dachterrasse	100	0,024	0,21
Hauptdach	220	0,032	0,14
Fußböden			
Fußboden gg. Erdreich TRH	20 / 120	0,045 / 0,035	0,22
Fußboden gg. Erdreich Gewerbe	160	0,036	0,11 ¹⁾
Fußboden gg. TG	100	0,037	0,13 ¹⁾
Fußboden gg. Keller	125	0,037	0,16 ¹⁾
Fußboden gg. außen	100	0,032	0,12 ¹⁾
Fenster und Türen			
Außenfenster	-	-	0,85
Pfosten-Riegel-Fassade Gewerbe	-	-	1,0
Lichtkuppel/RWA	-	-	1,4
Außentür Laubengang	-	-	1,0
Außentür Eingangsbereich	-	-	1,2
Außentür Gewerbe	-	-	1,0

Die Anforderungen der EnEV 2013 werden erfüllt. Der spezifische Jahresprimärenergiebedarf unterschreitet mit berechneten 23 kWh/(m²*a) den Anforderungswert um 74 %. Der spezifische

Transmissionswärmeverlust HT' wurde auf 0,38 W/(m²*K) berechnet. Dieser unterschreitet den Anforderungswert der EnEV 2013 um 24 % und erfüllt die Anforderungen des KfW 55-Standards.

3.2 Energiekonzept

Die Wärmebereitstellung für Raumheizung und Warmwasserbereitung erfolgt über ein monovalentes Wärmepumpensystem. Umgesetzt wurde eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit Nutzung des nahe dem Baugrundstück gelegenen Abwasserkanals als Wärmequelle. Mit dieser hocheffizienten Technologie kann eine Jahresarbeitszahl (JAZ) größer 4 erreicht werden, d.h. mit einer Kilowattstunde eingesetztem Strom werden, zusammen mit der „frei verfügbaren“ Wärme aus dem Abwasserkanal, im Jahresmittel mindestens 4 Kilowattstunden Wärme erzeugt.

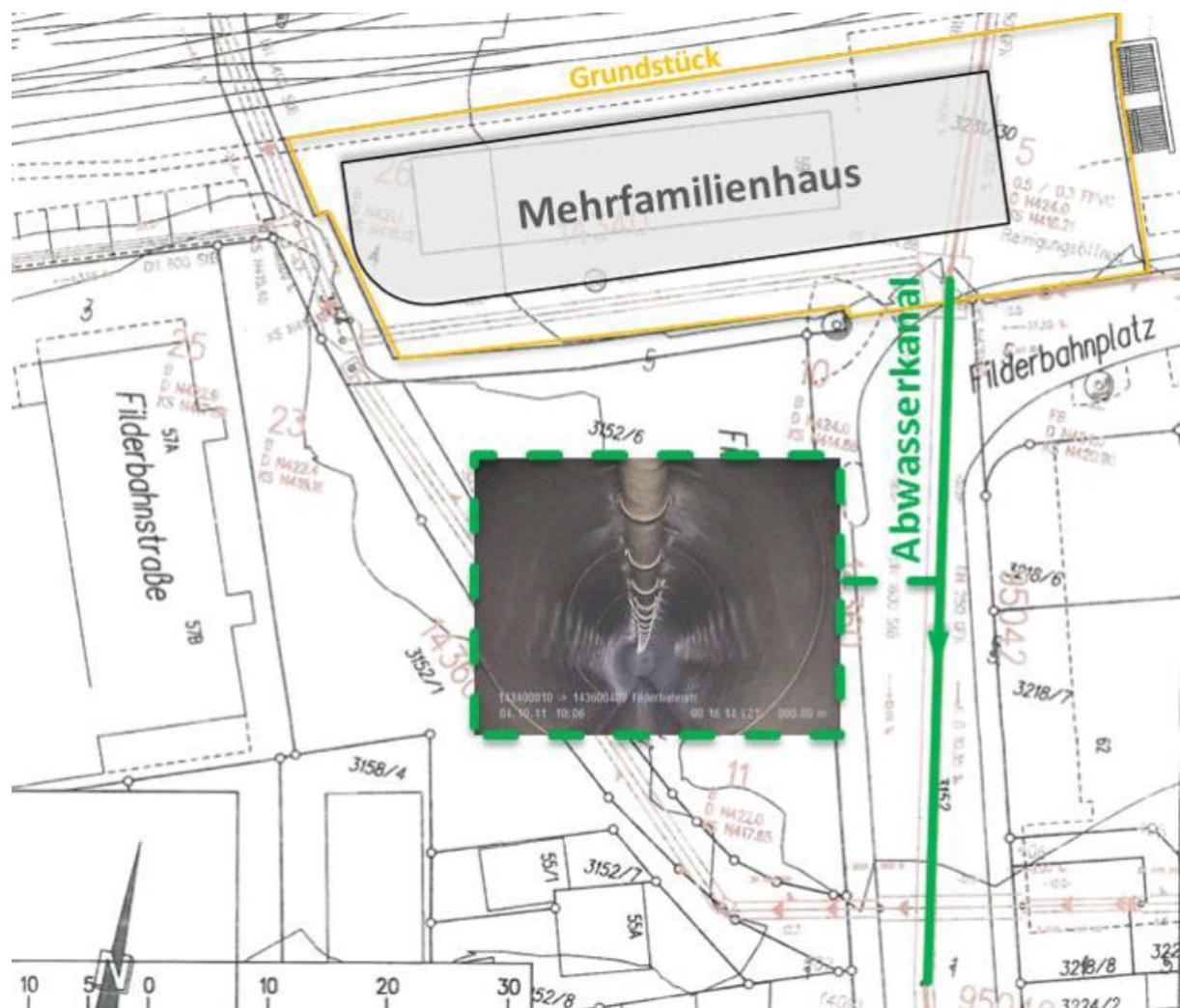


Abbildung 6 – Abwasserkanal am Grundstück als Wärmequelle für die Wärmepumpe

Zur Reduktion der Wärmepumpen-Taktung und zur Erhöhung der Eigenstromnutzung von Photovoltaikstrom über die Wärmepumpe werden zwei Hochtemperaturpufferspeicher mit je 2.000 Liter sowie ein Niedrigtemperaturspeicher mit 2.500 l eingesetzt. Die Wärmeübertragung

in den Wohnungen erfolgt über eine Fußbodenheizung mit niedrigem Temperaturniveau (max. 40 °C Vorlauf). Durch den Einsatz dezentraler Trinkwasserstationen in den Wohneinheiten kann die zentrale VL-Temperatur für die Warmwasserbereitung ebenfalls gesenkt werden, was zur hohen Gesamteffizienz des Wärmepumpensystems beiträgt.

Zur Gewährleistung des hygienischen Luftwechsels in den Wohnungen und der Belüftung der innenliegenden Bäder kommen aus wirtschaftlichen Gründen dezentrale Abluftanlagen zum Einsatz. Die Absaugung erfolgt in den innenliegenden Bädern über einen lichtgesteuerten Badlüfter und die Zuluft strömt über Außenwand-Luftdurchlässe in die Wohnungen.

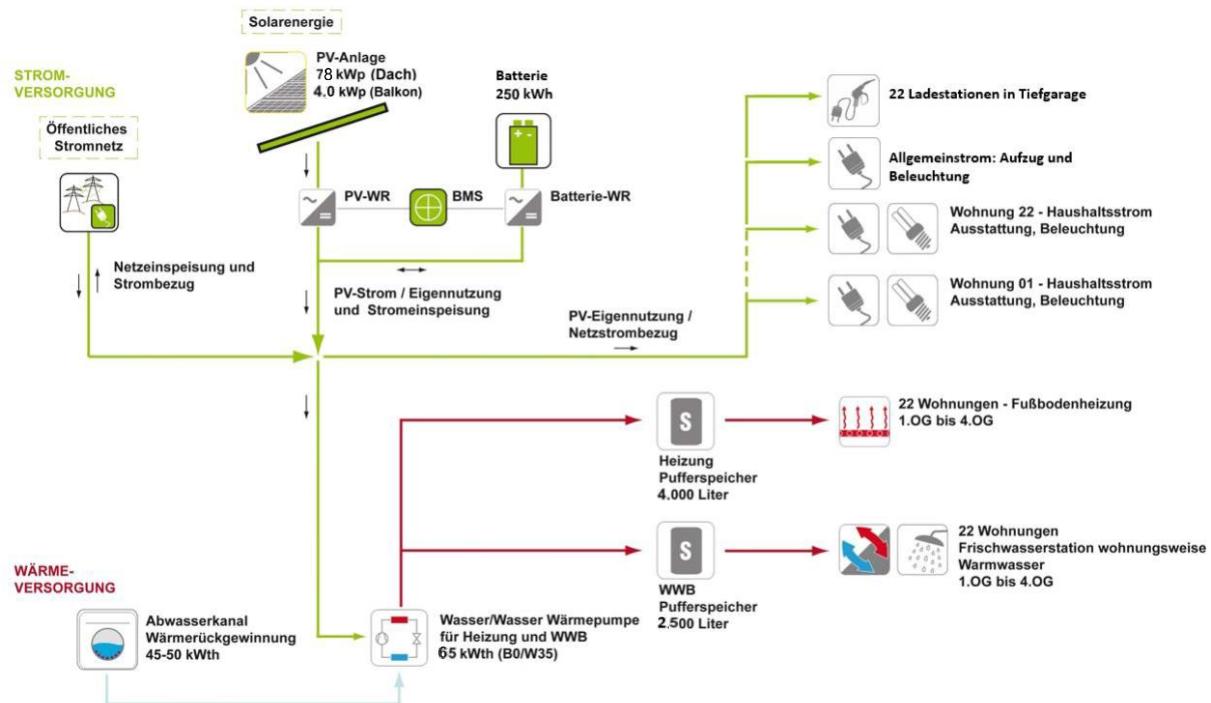


Abbildung 7 – Anlagenschema

Einen wesentlichen Beitrag zum „nahezu klimaneutralen Gebäudestandard“ bzw. zum EffizienzhausPLUS-Standard leistet das Photovoltaiksystem auf dem Flachdach des Mehrfamilienhauses mit einer Peakleistung von ca. 78 kWp. Das zur Erreichung des Plusenergie-Gebäudestandards notwendige Verhältnis der Energiebezugsfläche zur Dachfläche von 1:4 ist eine Herausforderung am vorliegenden Gebäude. Zusätzlich sind in den Glaselementen der Balkonbrüstungen an der Südfront organische Photovoltaikmodule (OPV) integriert (Abbildung 8), die auf der Balkonbrüstungsfläche von ca. 125 m² insgesamt weitere ca. 4 kWp bereitstellen (Abbildung 9). Die spezifische Modulleistung beträgt hierbei 50 bis 55 Wp/m². Die Zukunftstechnologie OPV hat experimentellen Forschungscharakter. Im Projekt soll die Technologie am realen Gebäude praktische Anwendung finden. Die eigentliche OPV-Folie wird wie bei einer Verbundglasscheibe zwischen zwei Glasplatten eingeklebt. Aufgrund der Besonderheiten der OPV im Aufbau beträgt der mögliche Tagesertrag etwa 20 bis 30 % mehr als dies bei Si-Elementen möglich ist. Organische Photovoltaik hat sowohl bei höheren Temperaturen als

auch bei ungünstigem Lichteinfall (bis zur Horizontalen) keinen nennenswerten Leistungsabfall. Außerdem kommt es bei teilweiser Verschattung auch nicht zum Ausfall einzelner Strings.

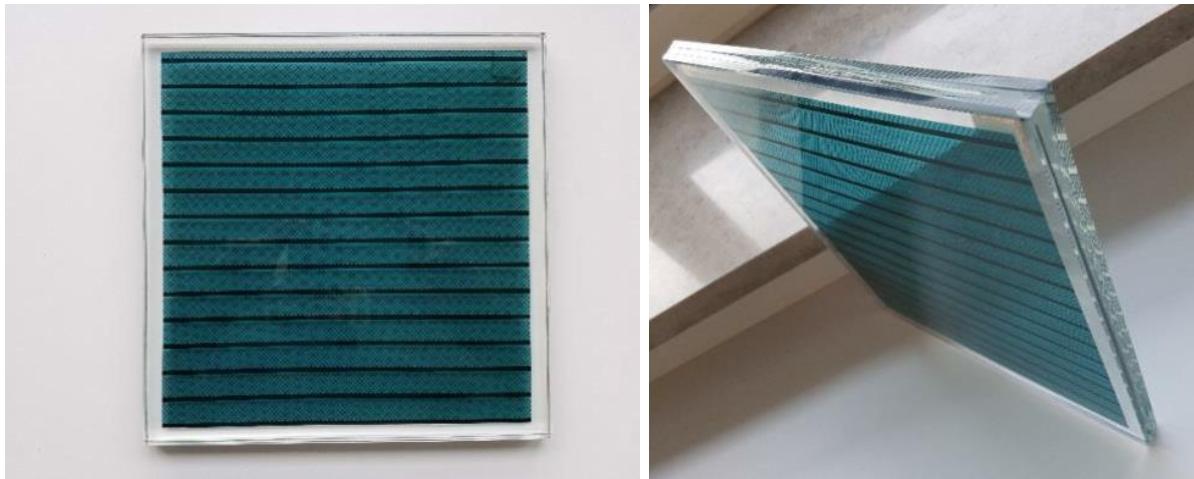


Abbildung 8 – Organische Photovoltaik (OPV) in einer Verbundglasscheibe
(Quelle: Böhme Hilse Architekten)



Abbildung 9 – Organische Photovoltaik integriert in den Balkonbrüstungen an der Südfassade
(Quelle: Böhme Hilse Architekten)

Sämtliche Parkplätze in der Tiefgarage (22) sind mit Stromladesäulen (je 11 kW) ausgestattet (Abbildung 10) um jeder der 22 Wohneinheiten eine eigene Ladesäule zur Ladung eines Elektroautos zu Verfügung zu stellen.

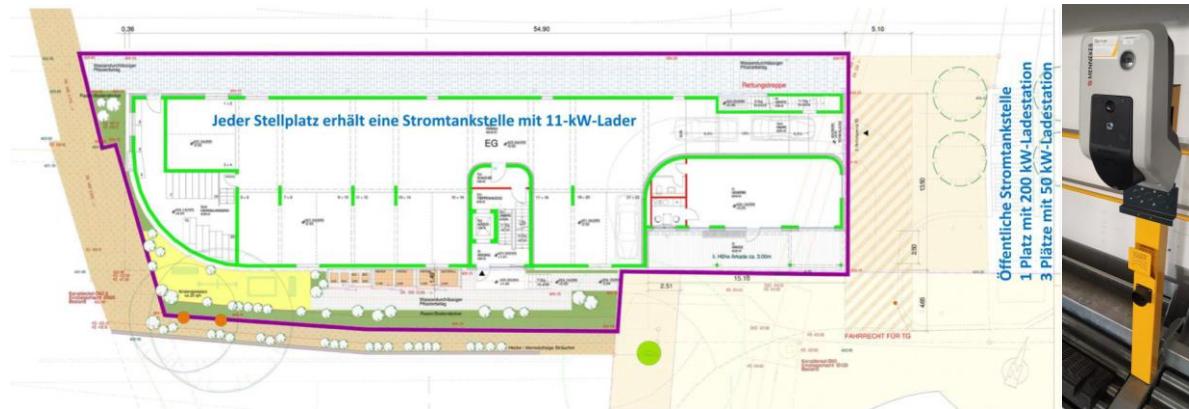


Abbildung 10 – Ladestationen für E-Mobilität in der Tiefgarage

Zur Steigerung der Eigenstromnutzung für den Gebäudebetrieb, den Nutzerstrom und die Elektromobilität wurde das Gebäude mit einem Batteriespeichersystem mit einer Kapazität von insgesamt 250 kWh ausgestattet. Zudem soll das Batteriesystem zur Netzentlastung beitragen, indem Lastspitzen in Erzeugung durch die Zwischenspeicherung von PV-Stromüberschüssen und im Verbrauch durch die Ladung der Elektrofahrzeuge und dem Wärmepepumpenbetrieb ausgeglichen werden. Die Regelung muss durch ein übergeordnetes Stromlast-Management mit Einbezug aller Erzeuger, Verbraucher und elektrischer und thermischer Speicher gesteuert werden.

Zur Sicherstellung der geplanten energetischen Performance des Gesamtsystems erfolgte nach der Inbetriebnahme ein Betriebs-Monitoring.

Nach damaliger Planung kann der EffizienzhausPLUS Standard erreicht werden. Der mittels Simulation und BMUB-Berechnungsverfahren ermittelte jährliche Endenergieüberschuss beträgt für den Standort Potsdam (Referenz nach BMUB) 8,2 kWh/m²a entsprechend 720 kWh/Wohneinheit (Abbildung 11).

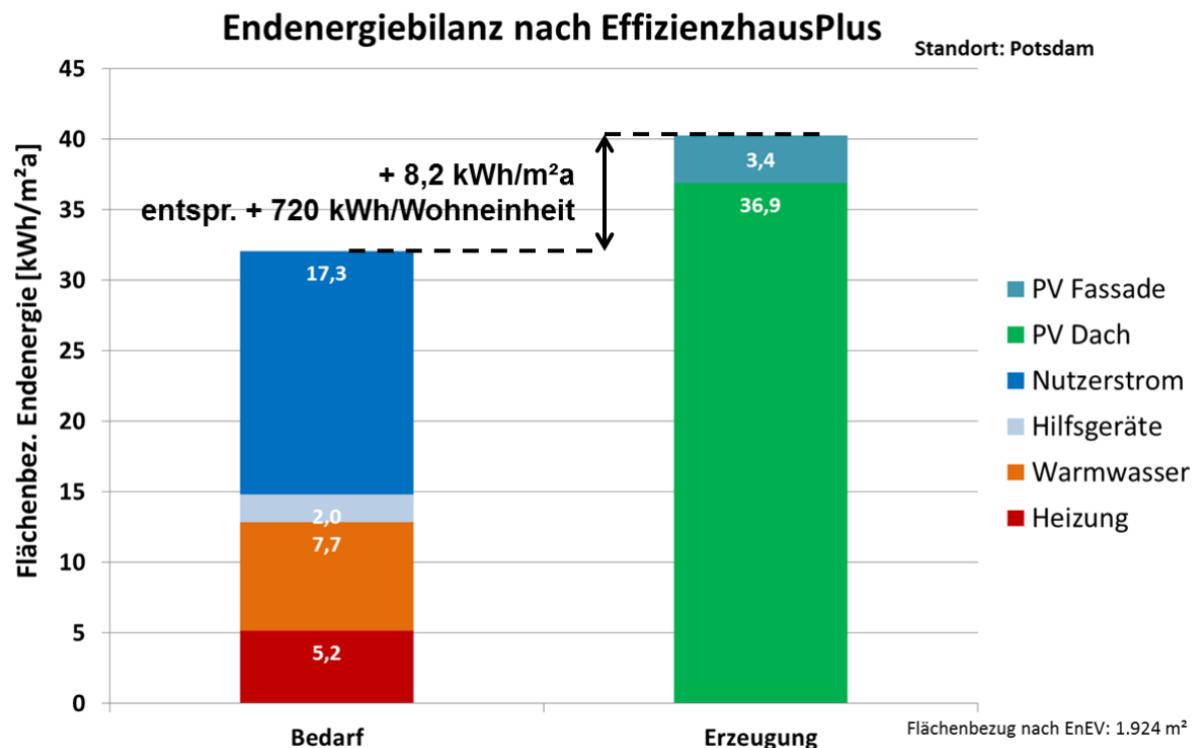


Abbildung 11 – Endenergiebilanz: Standort Potsdam

In der Summe demonstriert das Gebäude damit in herausragender Weise den Baustandard der Zukunft und bildet gleichzeitig den Rahmen für die Entwicklung und Evaluation notwendiger innovativer Methoden und Werkzeuge für Mehrfamilienhäuser.

3.3 Wärmepumpen und Abwasserwärmetauscher

Die Wärmebereitstellung (Raumheizung und WWB) erfolgt über ein monovalentes Wärmepumpensystem. Verbaut wurde eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe Typ HWW 2/120 R513A der Firma Combitherm mit einer Heizleistung von ca. 71 kW. Im Warmwasserbetrieb (15/55°C) ist der COP mit 3,59 ausgewiesen, im Heizbetrieb (15/40°C) mit ca. 5,0.

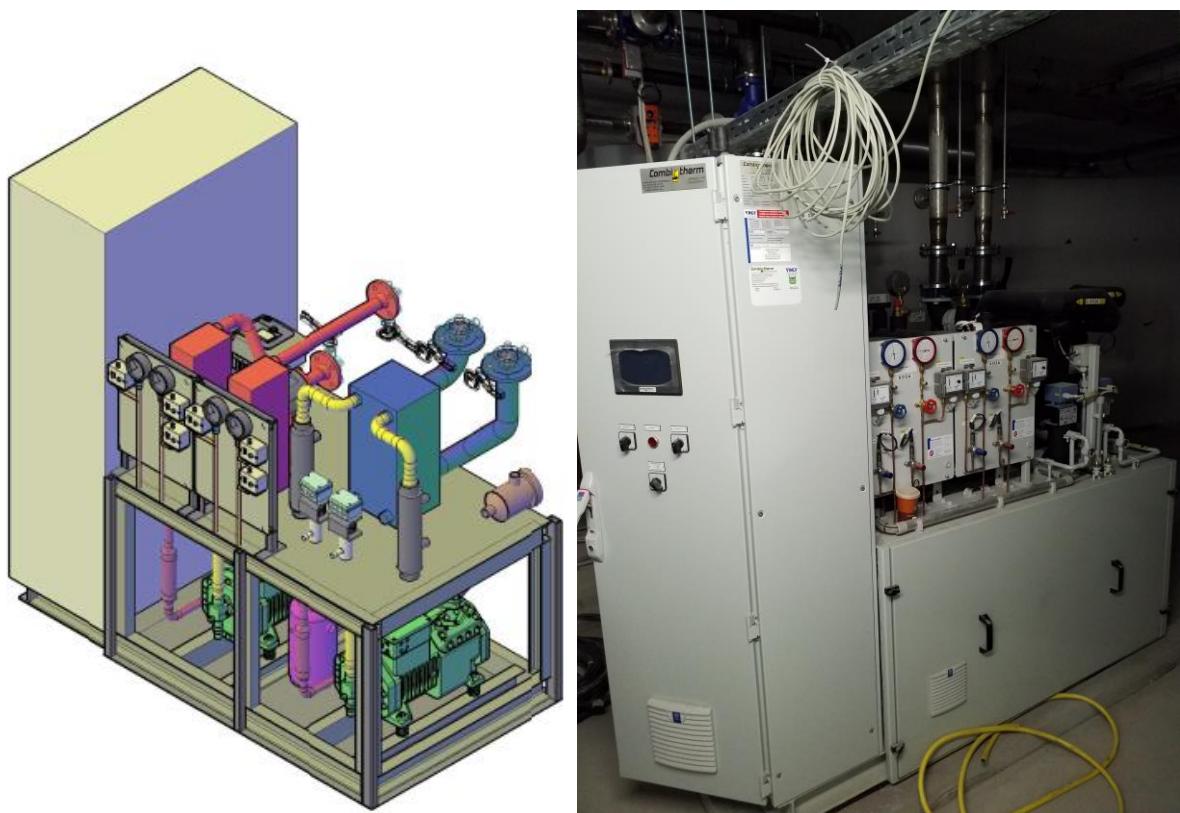


Abbildung 12 – Zeichnung und Foto der Wärmepumpe (Quelle Abb. links: Combitherm)

Als Wärmequelle dient ein Wärmetauscher in einem benachbarten Mischwasserkanal. Der Wärmetauscher hat eine Gesamtlänge von 56 m. Bei einer spezifischen Entzugsleistung von ca. 1.1 kW/m entspricht das einer Entzugsleistung von insgesamt ca. 50 kW. Bei Abwasser-temperaturen unter 10° C muss die Wärmeentnahme gestoppt werden.

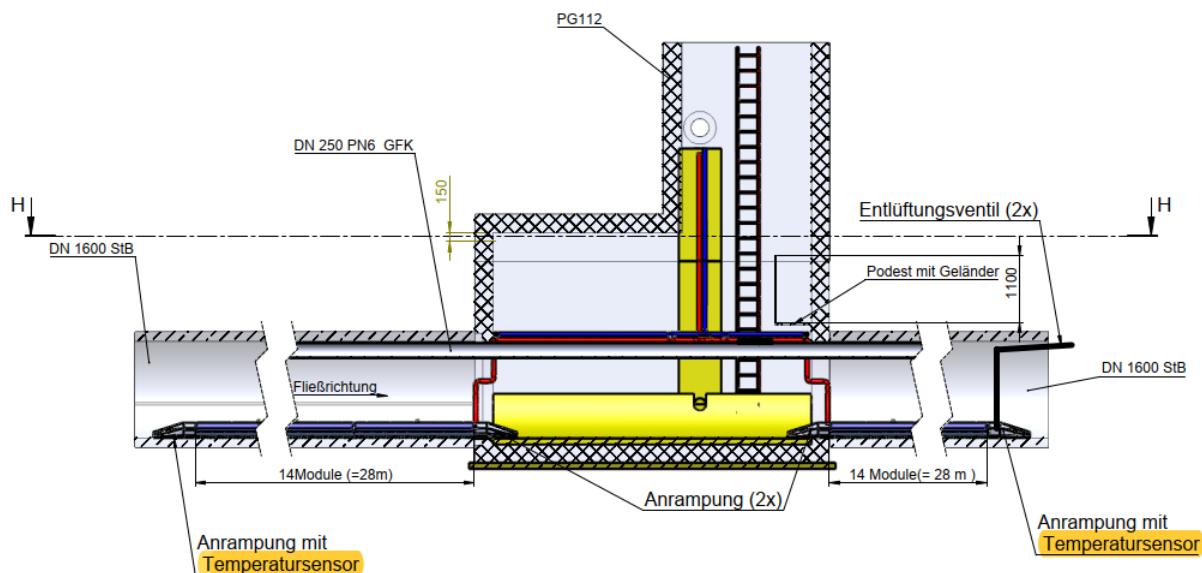


Abbildung 13 – Schnitt des Abwasserwärmetauschers (Quelle: Uhrig-Bau, Geisingen)



Abbildung 14 – Foto des Abwasserwärmetauschers

Durch eine detaillierte Erfassung des Stromverbrauchs der WP und der Wärmeerzeugung wird die Ermittlung der Arbeitszahl der WP ermöglicht. Über verschiedene Betriebsstrategien soll diese in der Nutzungsphase gesteigert werden.

3.4 Photovoltaikanlagen

Auf dem Flachdach ist eine PV-Anlage mit $74,4 \text{ kW}_p$ installiert, die aus 186 Modulen mit je 400 W_p besteht. Diese sind mit 10° Neigung in Nord/Süd Richtung ausgerichtet (siehe Abbildung 15).

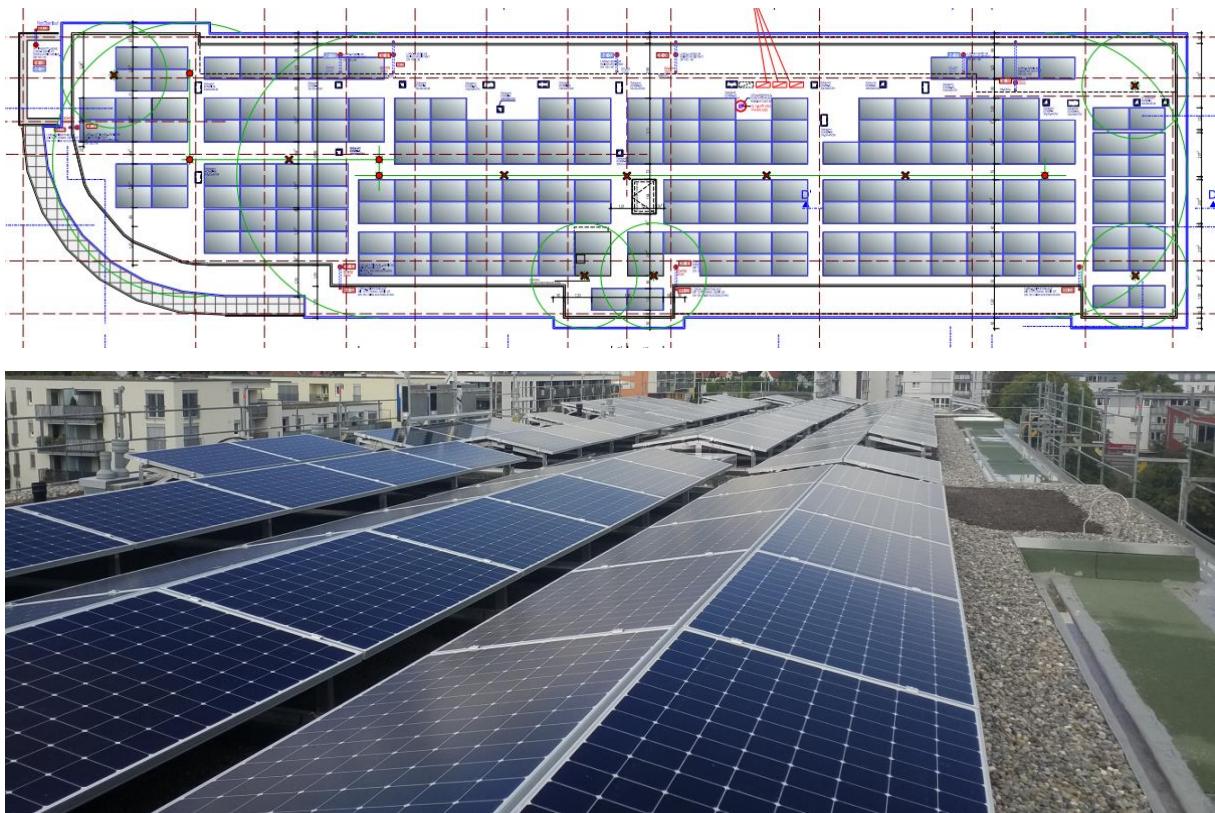


Abbildung 15 – Plan und Foto der PV-Dachanlage (Quelle: EGS-plan)

Außerdem wurde in den Balkonbrüstungen eine vertikale organische PV-Anlage installiert. Diese besteht aus 44 Modulen mit je ca. 51 W_p je Modul. Insgesamt hat die Balkonanlage damit ca. 4.3 kW_p Leistung.



Abbildung 16 – Foto der PV-Balkonanlage

3.5 Stromspeicher

Innovative Gebäudekonzepte zeichnen sich durch einen sehr geringen Energiebedarf und hohe solare Deckungsanteile aus. Da volatile Erträge aus erneuerbaren Energien Überschüsse generieren und nicht immer direkt vor Ort genutzt werden können, gewinnen Speichertechnologien an Bedeutung.

In diesem Vorhaben wurden sechs Speicher des Modells BMW i3 battery (NMC-Akkus) mit einer nutzbaren Gesamtkapazität von rund 227 kWh in Kombination mit Wechselrichtern des Typs Sunny Island 6.0H der Firma Siemens verbaut.

Das ursprüngliche Lademanagement sah vor, den durch die PV-Anlage erzeugten Strom zunächst direkt im Gebäude zu verbrauchen (Technik-Strom für Betrieb WP, Nutzerstrom, Allgemeinstrom). Nicht direkt verbrauchte Erträge werden in den Stromspeicher eingespeist und stehen später am Tag für die Nutzung im Gebäude zur Verfügung. Lediglich wenn der Stromspeicher komplett beladen ist und die Produktion der PV-Anlage den aktuellen Strombedarf im Gebäude übersteigt, wird der überschüssige Strom ins öffentliche Netz eingespeist.

Die hohen PV-Erträge aus den Mittagsstunden werden so in den Abend-/Nachtstunden zur Verfügung gestellt. Damit wird der Netzstrombezug reduziert und die Eigennutzung des PV-Stroms erhöht. Zudem werden Lastspitzen im Strombezug reduziert.



Abbildung 17 – Fotos der Stromspeicher

Sowohl die Be-, als auch die Entladung des Stromspeichers wird mit einem Monitoringzähler erfasst, sodass die durch die Nutzung des Stromspeichers zusätzlich selbst im Gebäude verbrauchte Strommenge sowie der Wirkungsgrad des Stromspeichers ermittelt werden können.

3.6 Erfahrungen und Erkenntnisse aus der Bauphase

Aufgrund von Verzögerungen im Genehmigungsverfahren zum Bauantrag, Klärung zum Bestandschutz einzelner Bäume auf dem Grundstück, der Abstimmung der Schwingungslager des Gebäudefundaments wegen der Nähe zum Gleisbett der Stadtbahnlinie Möhringen mit Weiche in unmittelbarer Nähe sowie Verzug bei den Rohbauarbeiten konnte der Bezug der Wohnungen erst Anfang 2021 begonnen werden. Ursprünglich geplant war Ende 2019. Mitte 2021 waren alle Wohneinheiten bezogen, die Gewerbeeinheit wird erst seit Januar 2022 genutzt. Durch die Verzögerungen hat sich der Fokus der Projektbearbeitung eher auf das Monitoring und die Optimierung des Anlagenbetriebes in Hinblick auf eine hohe Eigenstromnutzung und der Abbildung des EnergiePLUS Standards sowie des Komforts in den Wohnräumen verschoben.

Der Abwasserwärmetauscher wurde in zwei Bauabschnitten eingebaut:

1. Bauabschnitt Mai 2019
2. Bauabschnitt November 2019

Neben der Installation des Wärmeübertragers in den Abwasserkanal wurden die Anbindeleitungen ins Untergeschoss hergestellt, siehe Abbildung 18.



Abbildung 18 – Fotos der Anbindeleitung und des Einbaus des Wärmetauschers

Die Inbetriebnahme der Heizzentrale erfolgte im Dezember 2020. Die Messtechnik war hier installiert, aber es fand noch keine Übertragung der Messdaten statt.

Die PV-Anlage auf dem Dach wurde im Sommer 2020 installiert und im Dezember in Betrieb genommen. Die Installation des Stromspeichers wurde im Herbst 2020 vorgenommen, die Abnahme konnte aber aufgrund von noch nicht fertiggestellten MSR-Leistungen noch nicht erfol-

gen. Die Abnahme MSR fand am 12.05.2021 statt, wobei noch ein paar Kleinigkeiten zur Datenübertragung fürs Monitoring offen waren. Die meisten Datenpunkte wurden aber wie gewünscht übertragen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Stromspeicher in Betrieb, aber noch nicht offiziell abgenommen. Ebenfalls waren die PV-Anlagen (Dachanlage und OPV-Anlage in der Fassadenbrüstung) bereits in Betrieb.



Abbildung 19 – Technikzentrale Stand Dezember 2020

Die Umsetzung und Inbetriebnahme wurde durch Ortsbegehung begleitet. Der Schwerpunkt wurde hierbei auf die Umsetzung des Monitoringkonzeptes und die korrekte Installation der dafür erforderlichen Zähler gelegt. Die Inbetriebnahme der Zentrale inkl. Probelauf Technik fand im Dezember 2020 statt. Aufgrund von Verzögerungen in der MSR-Programmierung und der noch nicht stehenden Datenübertragung konnte die monitoringseitige Begleitung des Probelaufs der Anlagentechnik nicht umgesetzt werden. Daher wurden einige Mängel auch erst nach vorhandener Datenübertragung festgestellt.

So wurde unter anderem festgestellt, dass die Stromzähler nicht wie geplant eingebaut waren und die Berechnung der einzelnen Stromverbräuche musste im Nachgang angepasst werden. Die Stromzähler waren bis Ende Mai 2021 falsch angeschlossen. Die Strombilanz Erzeugung und Verbrauch war daher bis Ende Mai nicht richtig und stimmt erst ab Anfang Juni 2021. Da Ende Mai auch die Wandlerverhältnisse der Stromwandler geprüft und geändert wurden, ließ sich leider die richtige Strombilanz nachträglich nicht mehr errechnen.

Die Wärmepumpenregelung sowie die Speicherbeladung wurden anders umgesetzt als ursprünglich geplant und konnte daher auch nicht eins zu eins überprüft werden. Eine zugehörige Funktionsbeschreibung lag nicht vollständig vor.

4 Mess- und Monitoringkonzept (AP2)

Es wurde ein Konzept von Zielindikatoren für die Anlagen- und Gebäudeperformance entwickelt, das eine detaillierte Analyse und Bewertung der Energieeffizienz und verschiedener Betriebsweisen ermöglicht. Auf Basis der Zieldefinition wurde ein Mess- und Monitoringkonzept aufgestellt und entsprechende Vorgaben für die MSR / GA (Gebäudeautomation) festgelegt.

Um eine systematische und automatisierte Auswertung der Messdaten im späteren Gebäudebetrieb zu ermöglichen, wurden den Messstellen eindeutige Anlagenkennzeichnungsschlüssel (AKS) zugewiesen. Über den AKS einer Messstelle kann deren Lage und die Art der Messung exakt und eindeutig definiert werden.

Wärmepumpe

Durch eine detaillierte Erfassung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe und der Wärmeerzeugung wird die Ermittlung der Arbeitszahl der WP ermöglicht. Über verschiedene Betriebsstrategien soll diese in der Nutzungsphase gesteigert werden.

Stromerzeugung, Speicherung und Nutzung

Die Stromerzeugung der PV-Anlagen wird über zwei zusätzliche Monitoringzähler in kurzen Zeitschritten überwacht. Der eine liefert die Werte der OPV-Anlage, der andere die Summe der beiden Anlagen. Dies ermöglicht den Abgleich von Planungs- zu tatsächlichen Messwerten. Die Be- und Entladung des Batteriespeichers wird ebenfalls mit einem Stromzähler erfasst. Ein weiterer Stromzähler, der den Strombezug und die Stromeinspeisung in das öffentliche Stromnetz erfasst, ermöglicht die Ermittlung der Eigennutzung des vor Ort erzeugten PV-Stroms. Diese Eigennutzung sollte im Verlauf des Forschungsprojektes analysiert und optimiert werden.

Die Datenerfassung und -übertragung wurde durch die Firma enisyst realisiert. Über einen automatisierten Abfragemechanismus werden täglich die Daten in die Monitoringdatenbank des STZ übertragen und für die Verarbeitung zu Monitoringzwecken aufbereitet. Das Monitoringschema wurde laufend fortgeführt und aktualisiert. Eine Messstellenliste, die detailliert alle Messpunkte erfasst und kategorisiert wurde erstellt und im gesamten Projektverlauf weitergeführt und aktualisiert. Am Ende wurden insgesamt 104 Datenpunkte alle 15 Minuten erfasst, gespeichert und überwacht.

Des Weiteren waren für den weiteren Projektverlauf folgende Punkte für das Monitoring relevant:

- Zu Beginn des Monitorings wurden nicht alle notwendigen Daten übermittelt. Das lag unter anderem an falschen und unklaren Datenpunktbezeichnungen und dauerte eine Zeitlang, bis alles behoben war, auch werden nicht alle Daten wie gewünscht übertragen, die wichtigsten allerdings schon.
- Die Daten des Stromzählers der Elektroheizstäbe lagen zu Beginn noch nicht vor und konnten erst ab August 2021 erfasst werden.

- Im Laufe des Projektes wurden weitere Daten wie gemittelte Speichertemperaturen und Tagesmitteltemperaturen, aber auch der Ladestand der Stromspeicher angefragt. Bis diese übertragen werden konnten, dauerte es teilweise recht lange. Die Daten für den Ladestand des Stromspeichers z.B. wurden erst ab Juni 2022 übertragen.
- Im Laufe des Projekts wurde ein fehlerhafter Temperaturfühler ermittelt, der dazu geführt hat, dass die Wärmepumpe sehr lange mit Rücklauftemperierung betrieben wurde.
- Die beiden Temperaturfühler im Abwasserkanal gingen im Laufe des Projektes kaputt und mussten beide ersetzt werden.
- Der Wärmemengenzähler auf der Quellenseite der Wärmepumpe (Abwasserkanal) ist seit dem Juli 2021 ausgefallen und wurde nicht repartiert.

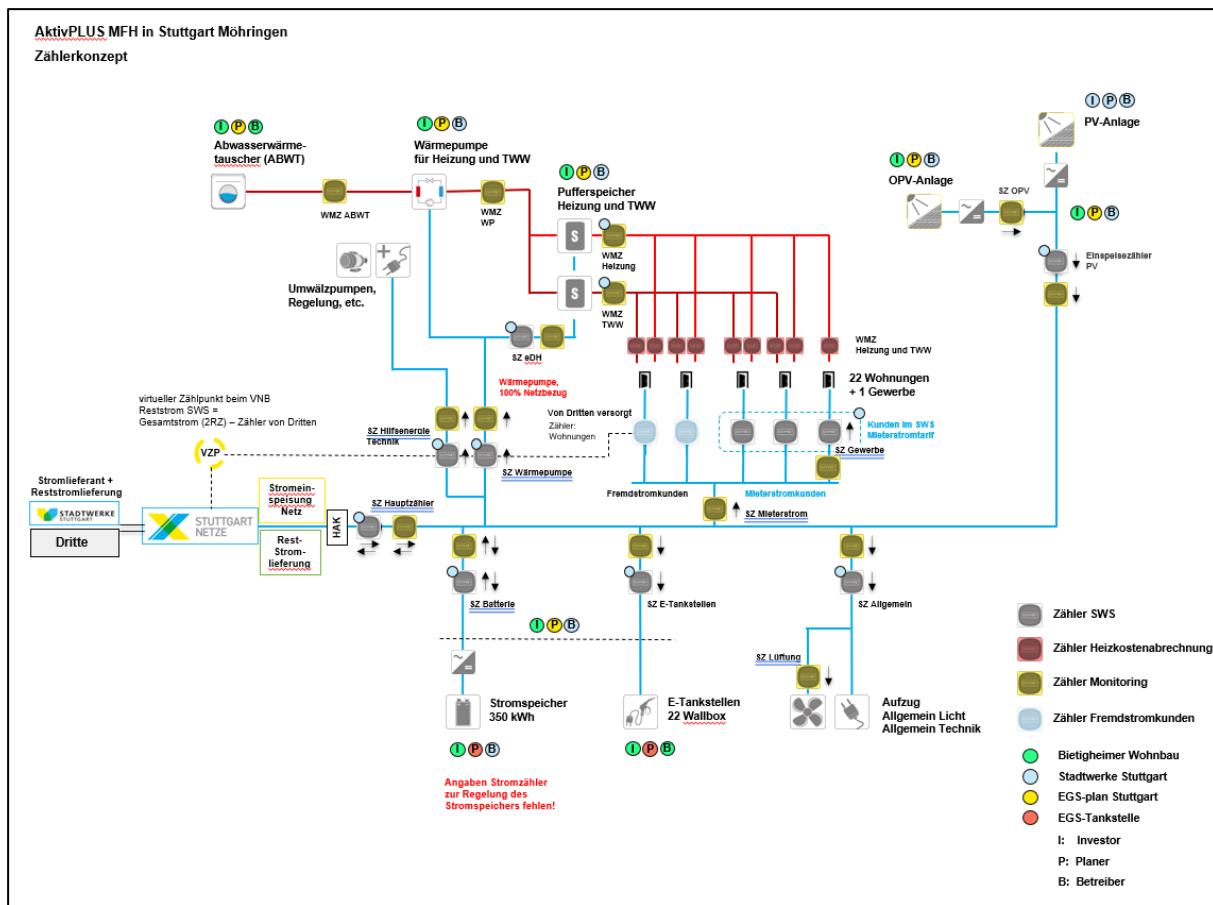


Abbildung 20 – Zählerkonzept

5 Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien (AP3)

Bei der Projektbeantragung war eine detaillierte Auswertung und Analyse inklusive Betriebsoptimierung anhand der Erprobung verschiedener Betriebsstrategien angestrebt. Inzwischen werden und wurden hier schon verschieden Betriebsstrategien untersucht, unter anderem bei den Heizkurven, der Hochtemperatur-Speicherbeladung und im Moment bei der Stromspeicherbeladung und der Rücklauftemperaturanhebung der Wärmepumpe.

5.1 Stromspeicher

Der Stromspeicher wurde zu Beginn des Projekts erst ab einer für die Beladung verfügbaren PV-Leistung von über 2 kW beladen, da die Beladung der Speicher laut Betreiber Stadtwerke Stuttgart ca. 2 kW an Leistung für die Wechselrichter, Ventilatoren etc. benötigt. Mitte Juli 2022 wurden die Ladungsbegrenzung aufgehoben, das heißt die Batterie wurde bei jeder Gelegenheit beladen und nicht erst ab 2 kW PV-Leistung.

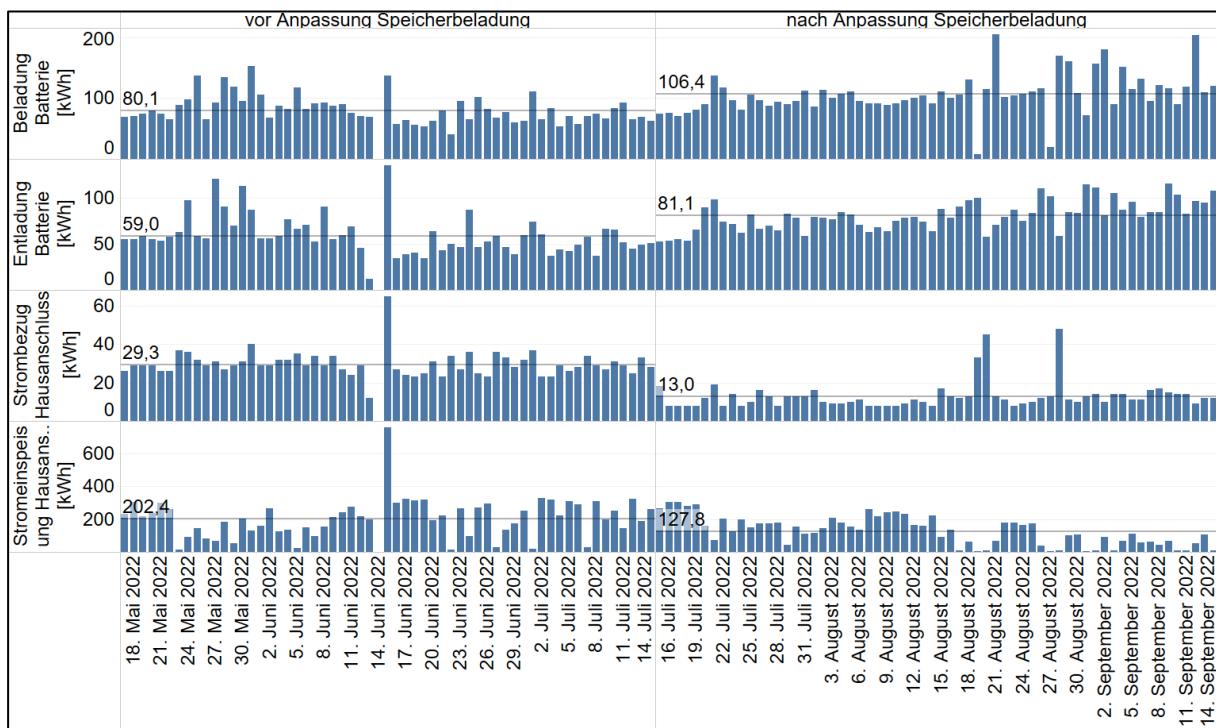


Abbildung 21 – Stromflüsse am Hausanschluss und der Batterie

Der Strombezug sank dadurch im Schnitt um über 50 % von ca. 29 kWh/d auf 13 kWh/d und die Einspeisung sank von ca. 200 kWh/d auf ca. 130 kWh/d (Abbildung 21). Das heißt der Deckungsanteil konnte deutlich erhöht werden, da die Batterie nun mehr genutzt wurde. Allerdings stiegen dadurch auch die Speicherverluste von ca. 150 kWh pro Woche auf ca. 170 kWh pro Woche an (Abbildung 22).

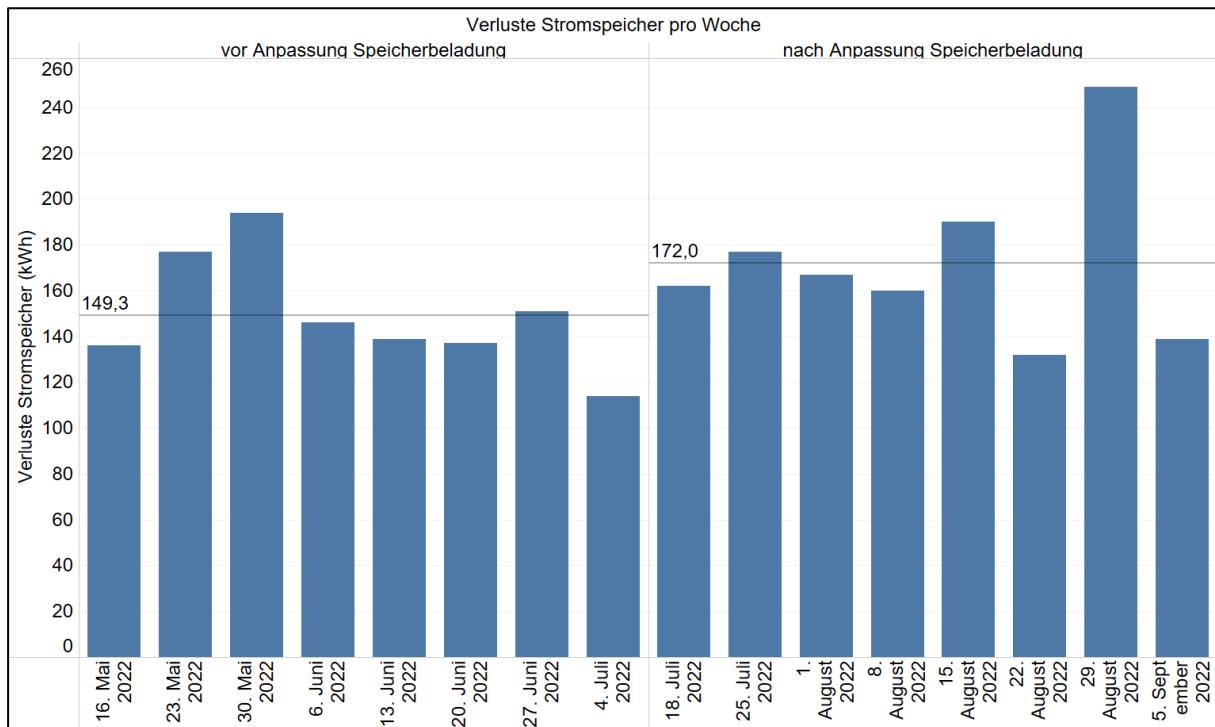


Abbildung 22 – Stromspeicherverluste

Die Stadtwerke Stuttgart haben im Oktober 2022 eine Masterarbeit zur Stromspeicherbeladung vergeben. Dabei stand die Vermeidung der Stromspeicherverluste im Vordergrund nicht die Wirtschaftlichkeit oder möglichst hohe Eigennutzung. Dabei wurden verschiedene Strategien untersucht und simuliert. Die ersten Ergebnisse lagen im Februar 2023 vor. Der Speicher arbeitet erst ab ca. 60 kW in einem hohen Wirkungsgrad. Im Winter sollte er eigentlich ausgeschalten werden. Im Sommer wäre eine Einschaltgrenze von ca. 20 kW sinnvoll. Ideal wäre es für jeden Monat eigene Einschaltleistungen festzulegen. Die Grenze für Entladen sollte geringer sein als die Grenze für Beladen. Ab Mitte März wurden die Grenzen auf 20 kW festgelegt, um die Speicherverluste möglichst gering zu halten.

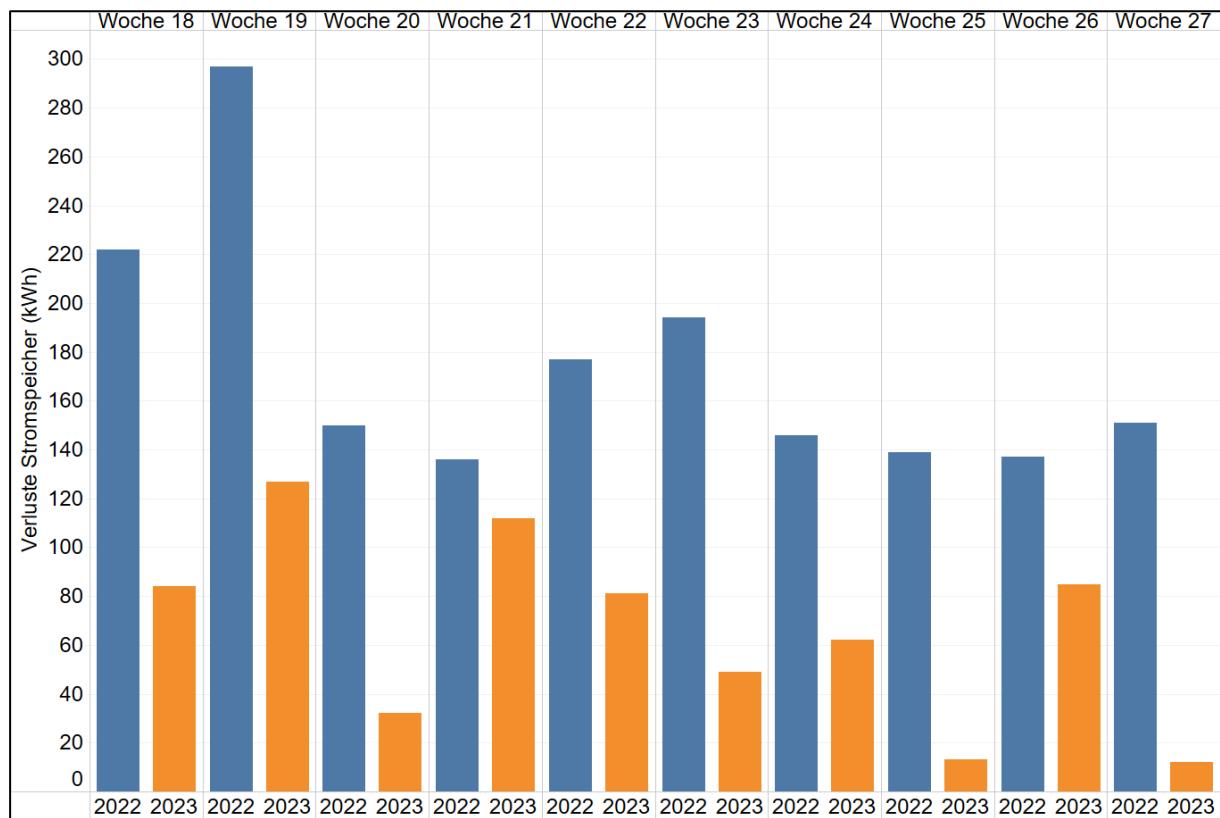


Abbildung 23 – Stromspeicherverluste März bis Juni 2022 und 2023

Abbildung 23 zeigt die Stromspeicherverluste von März bis Juni der Jahre 2022 und 23. Erkennbar ist, dass die Speicherverluste durch die neue Reglung ab März 2023 deutlich verringert wurden. Dadurch sinkt allerdings auch der Deckungsanteil (in den Sommermonaten um ca.10 bis 15 %).



Abbildung 24 – Deckungsanteile März bis Juni 2022 und 2023

5.2 Rücklaufbeimischung

Zu Beginn des Projekts wurde die Rücklauftemperaturerhöhung der Wärmepumpe vom Betreiber SWS außer Betrieb genommen, da bei der Wärmepumpe hier einige Male eine Hochtemperaturstörung ausgelöst wurde. Erst in der darauffolgenden Heizperiode Ende 2021/Anfang 2022 zeigte sich, dass dadurch häufig die elektrische Zusatzheizung in den Pufferspeichern in Betrieb ging, da die Wärmepumpe eine Zeitlang erst mal den Speicher abkühlte, bevor die geplante Vorlauftemperatur erreicht wurde. In der Reaktion darauf wurde die Regelung von den Stadtwerken und Enisyst ständig verändert, um die Heizstäbe möglichst nicht zu benötigen und dadurch wurde auch die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe erhöht, was zu einer schlechteren Leistung führt. Erst im Mai 2023 konnte ein defekter Temperaturfühler identifiziert werden, der zu der Störung der Wärmepumpe im Rücklaufbeimischbetrieb führte. Durch den Austausch des Fühlers konnte das Problem behoben werden, sodass nun durch eine Optimierung der Speicherbeladungsregelung die Effizienz der Wärmepumpe verbessert werden kann. Vor allem die Vorlauftemperaturen zur Warmwasserbereitung können nun verringert werden.

5.3 Elektroladestationen

Hier war geplant, dass das Batteriesystem zur Netzentlastung beitragen soll, indem Lastspitzen in Erzeugung durch die Zwischenspeicherung von PV-Stromüberschüssen und im Verbrauch durch die Ladung der Elektrofahrzeuge und dem Wärmepumpenbetrieb ausgeglichen werden. Es wurde allerdings vom Netzbetreiber untersagt, Strom aus dem Netz in den Batterien zwischenzuspeichern.

Sämtliche Parkplätze in der Tiefgarage (22) sind mit Stromladesäulen (je 11 kW) ausgestattet, um jeder der 22 Wohneinheiten eine eigene Ladesäule zur Ladung eines Elektroautos zu Verfügung zu stellen. Während der Projektlaufzeit waren aber nur maximal 3 Elektroautos im Gebäude vorhanden. Daher konnte ein darauf basierendes, übergeordnetes Lade- und Speichermanagement nicht realisiert werden.

Da die Ladestationen aber zu Beginn alle in Bereitschaft waren gab es hier Standby-Verluste, ohne einen Nutzen davon zu haben. Erst durch eine Umbaumaßnahme konnten einige, nicht benötigte, Wallboxen abgeschaltet werden und so der Standby-Verlust hier um ca. 64% von 1 250 kWh/a auf 450 kWh/a verringert werden.

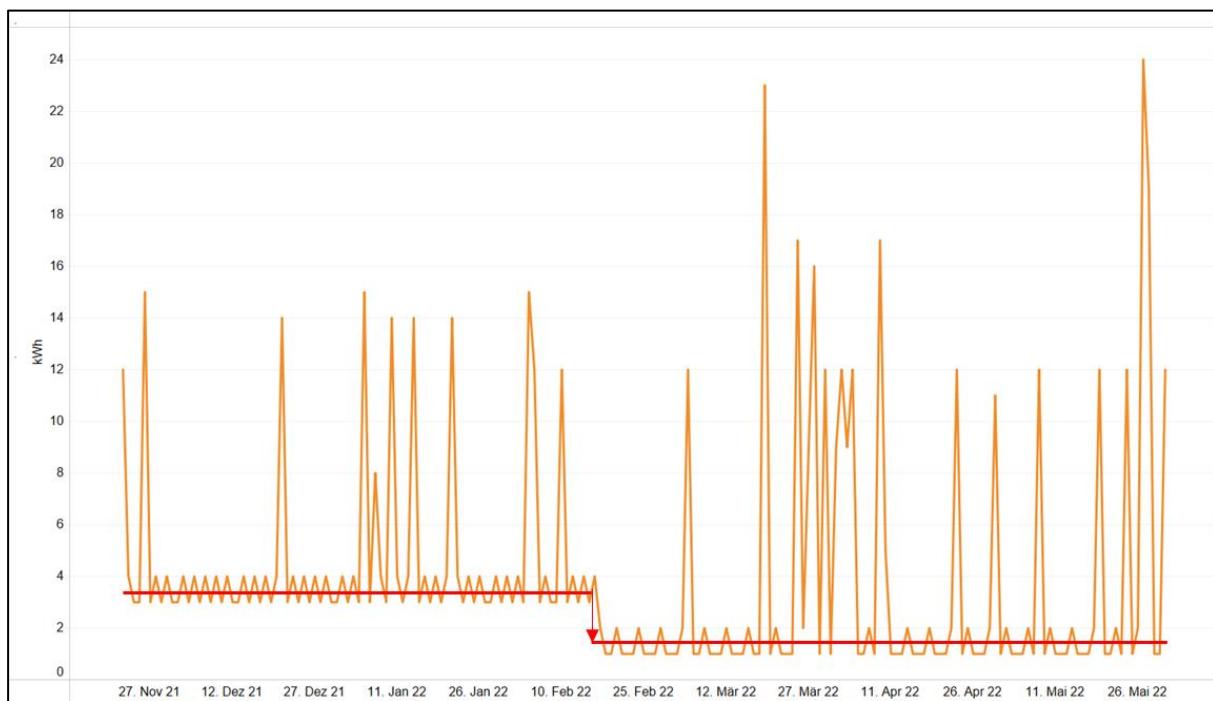


Abbildung 25 – Verringerung der Standby-Verluste nach Umbau im Februar 2022

5.4 Speicherbeladung und Heizstäbe

Aufgrund der oben beschriebenen, fehlenden Rücklaufbeimischung wurde in der Heizperiode 21/22 der Hochtemperaturspeicher bei Beginn der Beladung durch die Wärmepumpe erst abgekühlt bevor die Wärmepumpe dann nach einiger Zeit genug Vorlauftemperatur aufgebaut hatte, um den Speicher zu beladen. In der Zwischenzeit waren aber die elektrischen Zusatzheizstäbe angesprungen, um der Temperaturabsenkung entgegenzuwirken.

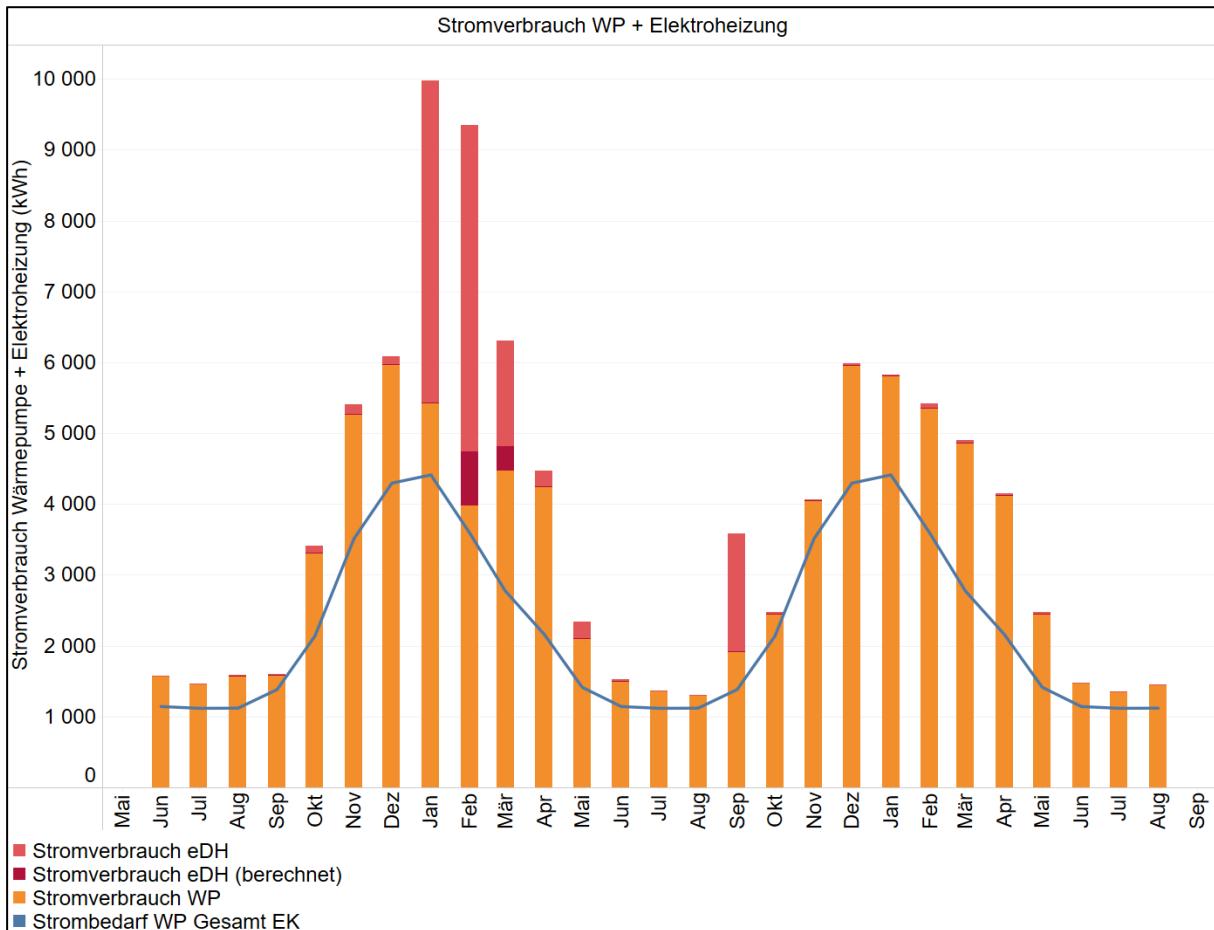


Abbildung 26 – Sehr hoher Stromverbrauch der Elektroheizstäbe (eDH) im Winter 2021/22

In der Reaktion darauf wurde die Regelung von den Stadtwerken und Enisyst ständig verändert, um die Heizstäbe möglichst nicht zu benötigen. Dabei wurden unter anderem die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe und der Ladebeginn des Hochtemperaturspeichers angepasst, bis die Wärmepumpe den Speicher auch ohne Einsatz der elektrischen Heizstäbe wieder allein beladen konnte, allerdings auf Kosten ihrer Effizienz.

In Abbildung 26 erkennt man im Winter 2021/22 in rot und dunkelrot den hohen Stromverbrauch, der durch die elektrischen Heizstäbe verursacht wird.

5.5 Heizkurve und Heizgrenztemperatur

Zu Beginn des Projektes war die Heizkurve durch enisyst deutlich über der ursprünglichen Heizkurve der Planung programmiert. Die gemessenen Temperaturen lagen sogar noch über diesen Werten. Dies wurde recht schnell angepasst und auf die Heizkurve der Planung zurückgesetzt.

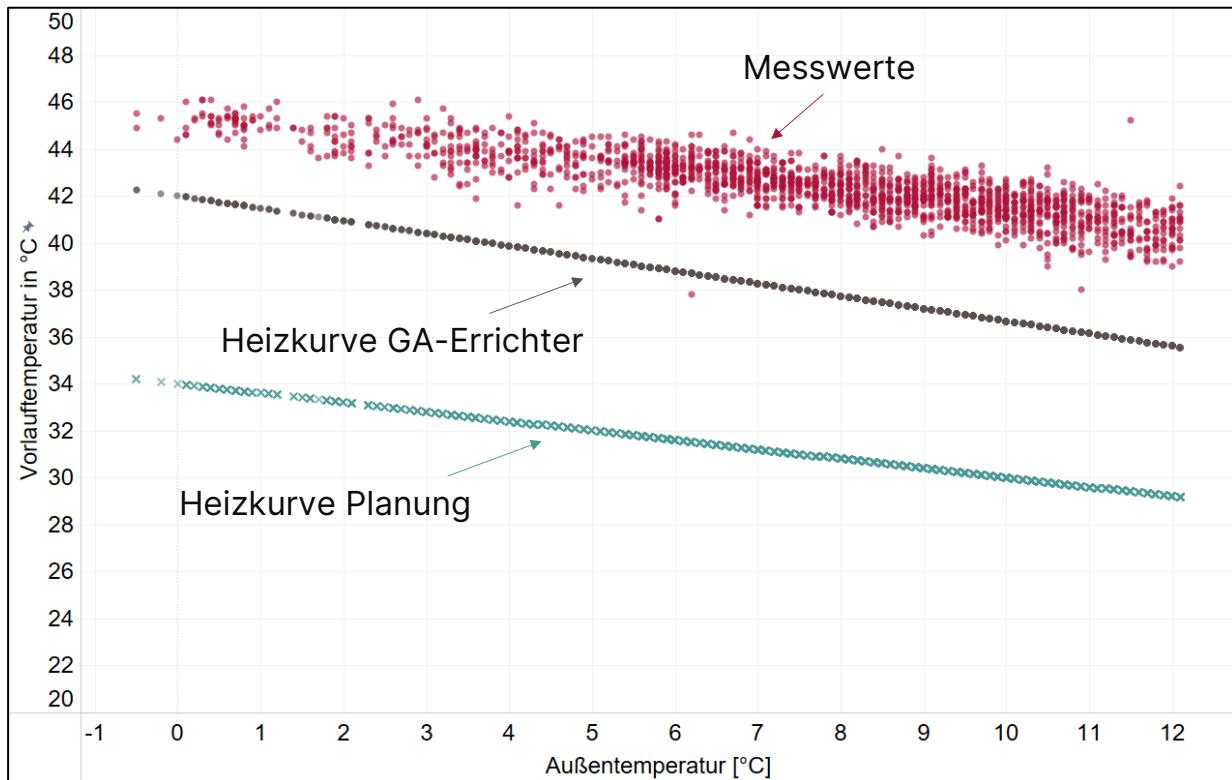


Abbildung 27 – Heizkurven und gemessene Vorlauftemperaturen

Auch bei den Einschaltgrenzen der Fußbodenheizung wurden Optimierungen im Betrieb vorgenommen. Die Grenztemperatur war zu Beginn als aktuelle Außenlufttemperatur hinterlegt. In einem ersten Schritt wurde hier eine Tagesmitteltemperatur als Einschaltkriterium bestimmt. Da diese trotzdem noch zum Einsatz der Fußbodenheizung im Sommer geführt hat, wurde die Grenze abgesenkt.

6 Implementierung und Evaluierung (AP4) / Betriebsergebnisse

Auf der Basis des im Kapitel 4 dargestellten Mess- und Monitoringkonzepts liegen für die Betriebsjahre 2021 (ab Juni) bis 2023 (bis August) Ergebnisse zur Anlagen- und Gebäudeperformance sowie den Energiebilanzen vor.

In der Zusammenarbeit von STZ, SWS, BWB und enisyst konnten Vorschläge für Anpassungen der Regelparameter und Grenzwerte sowie zur Betriebsoptimierung erarbeitet werden, die von der Firma enisyst umgesetzt wurden. Die Optimierungen bezogen sich u. a. auf die Heizgrenze sowie Anpassungen der Heizkurve.

Durch die im Frühjahr 2020 aufgekommene Corona-Pandemie hat sich das Nutzungsverhalten drastisch verändert. Lockdowns und Reiseverbote führten teilweise zu deutlich höheren Anwesenheitszeiten der Bewohner. Die Auswirkungen und die veränderten Nutzergewohnheiten sind vor allem noch im Winter 2021 zu sehen.

6.1 Wärmeverbrauch Heizung

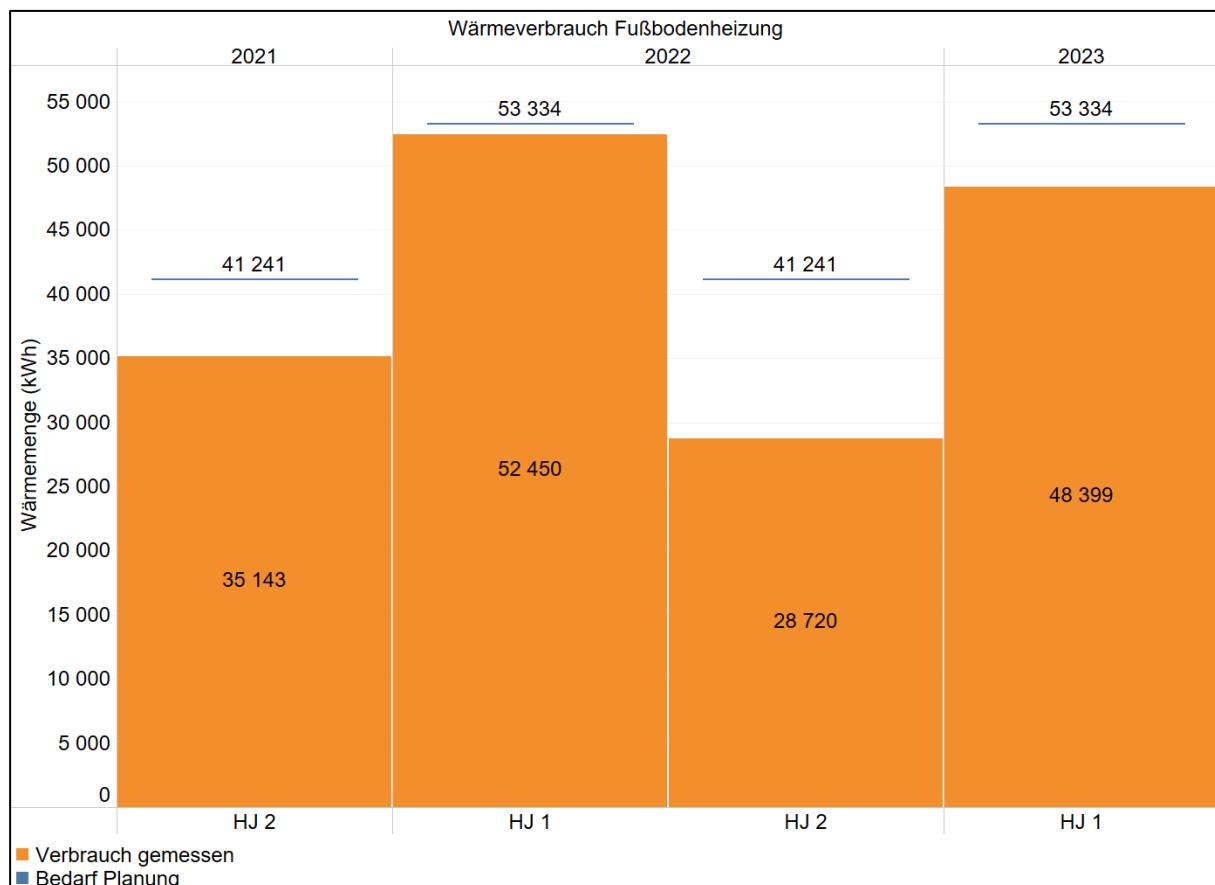


Abbildung 28 – Wärmeverbrauch der Fußbodenheizung halbjährlich

Der Heizwärmeverbrauch der Fußbodenheizung lag in allen 4 Halbjahren des Betrachtungszeitraums unter den angenommenen Werten der Planung. Die Durchschnittsaußentemperatur lag in den letzten drei Halbjahren über dem langjährigen Temperaturmittel, was den geringeren Verbrauch in diesem Zeitraum teilweise erklären kann. Aber auch bei geringeren Außentemperaturen im 2. Halbjahr 2021 lag der Verbrauch unter den geplanten Werten. Ein Teil der Wärmeübergabe findet, anders als im Energiekonzept geplant, über Badheizkörper statt, die am Heizkreis Trinkwarmwasser angeschlossen sind. Daher ergibt sich dort eine Jahreszeitabhängige Kurve (siehe Abbildung 31) und der Verbrauch dort ist höher und dafür im Heizkreis Fußbodenheizung geringer.

Durch Optimierungsmaßnahmen wie dem Absenken der ursprünglich recht hoch eingestellten Heizkurve sowie einer Anpassung der Einschaltrandbedingungen für den Heizbetrieb konnte der Wärmeverbrauch im Verlauf des Projekts verringert werden (18% von Halbjahr 2 2022 zu Halbjahr 2 2021 und 8% von Halbjahr 1 2023 zu von Halbjahr 1 2022).

Heizkurve FBH

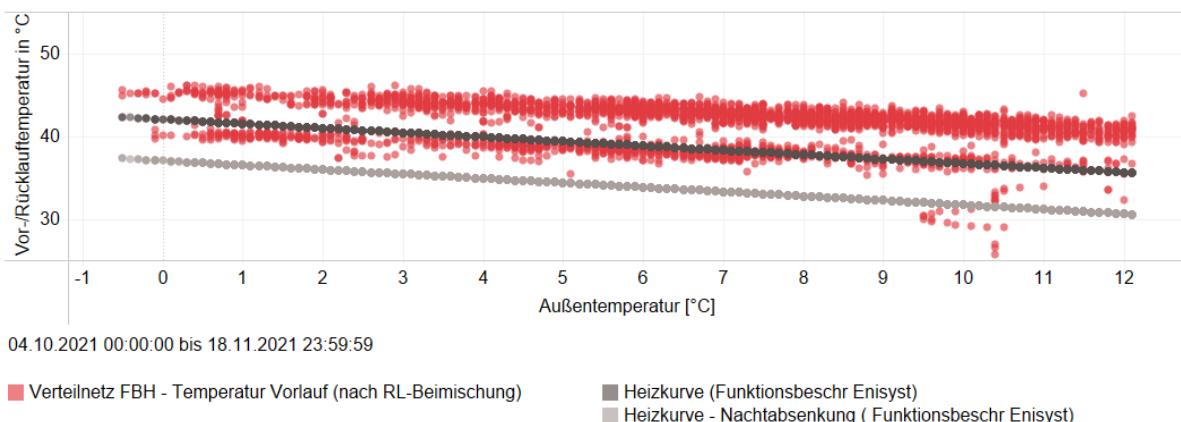


Abbildung 29 – Ursprüngliche Heizkurve

Heizkurve FBH aktuell - ab 19.05.2022

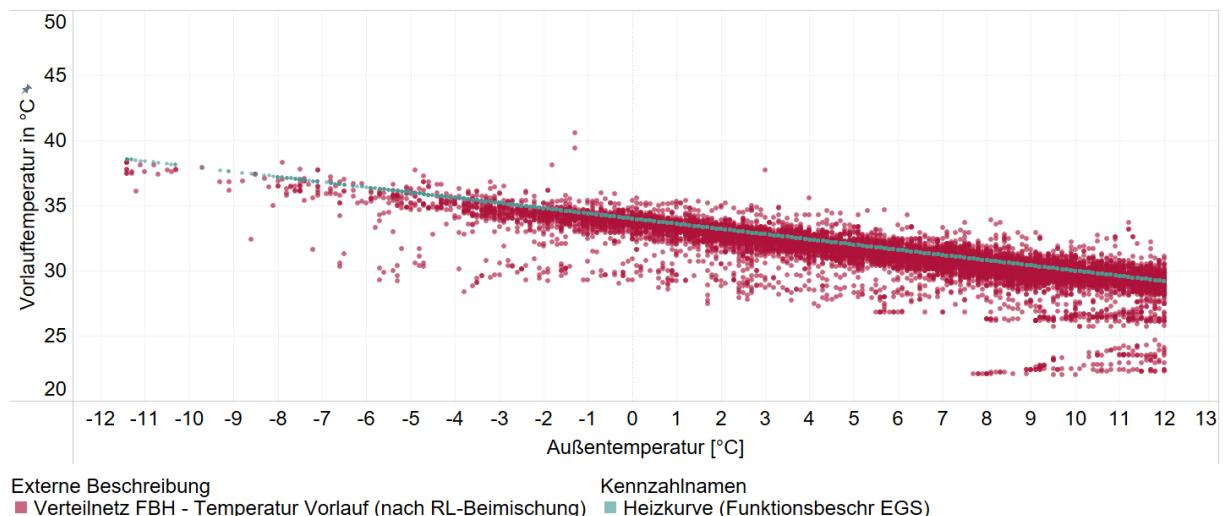


Abbildung 30 – Angepasste Heizkurve

In Abbildung 29 sind die von Enisyst geplanten Heizkurven in grau und die aktuellen Messwerte der Vorlauftemperaturen in rot dargestellt. Die Messwerte lagen zu Beginn ca. 4 Kelvin über dieser Heizkurve. Da aber auch die Heizkurve von Enisyst über der Heizkurve der Planung lag wurden sowohl die Heizkurve aktualisiert als auch die Einstellungen angepasst (siehe Abbildung 30).

6.2 Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser/Badheizkörper

Im Gegensatz zum Wärmeverbrauch der Fußbodenheizung liegt der Wärmeverbrauch des Warmwassers über den Werten der Planung und wird auch im Verlauf des Projektes nicht geringer. Der höhere Verbrauch im Vergleich mit dem Energiekonzept kann, wie vorher beschrieben, durch die Badheizkörper erklärt werden.

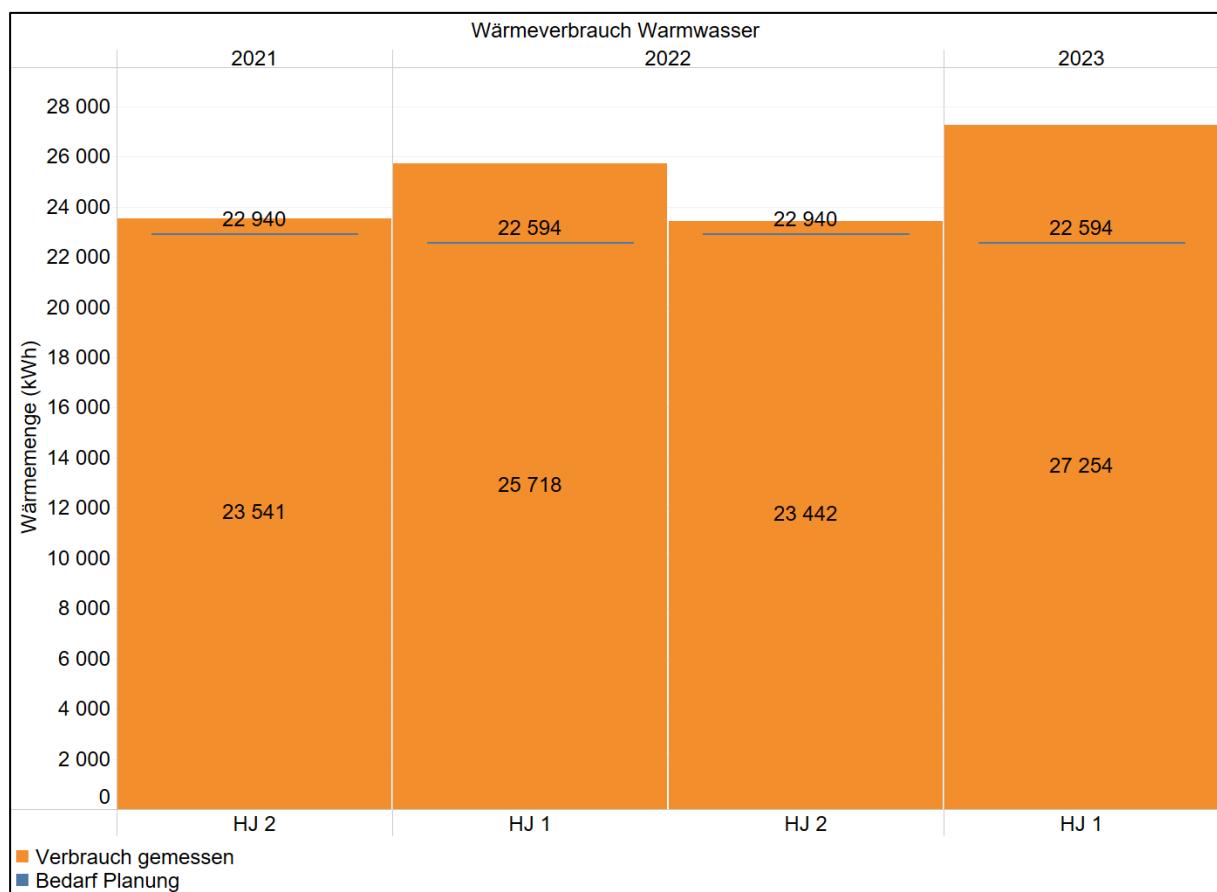


Abbildung 31 – Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser halbjährlich

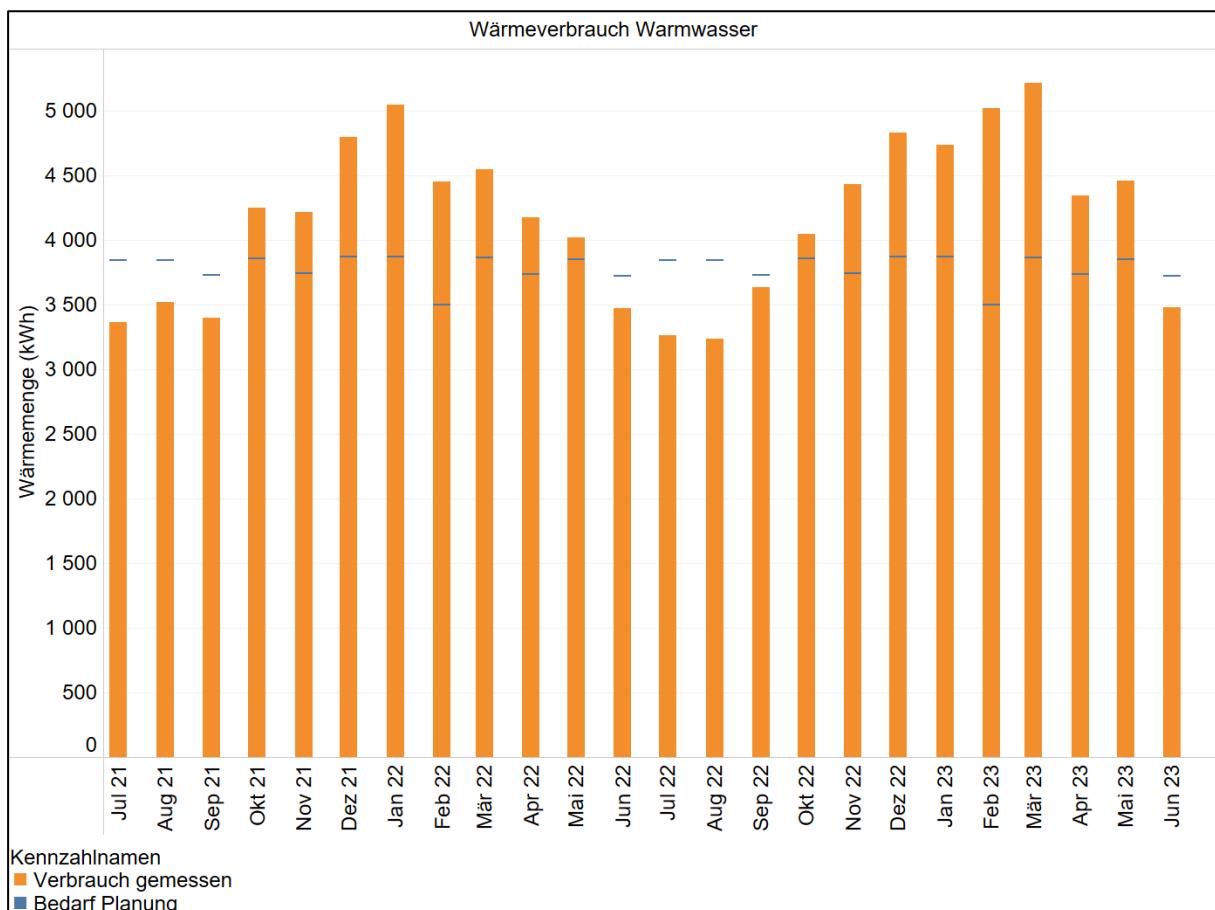


Abbildung 32 – Wärmeverbrauch Trinkwarmwasser monatlich

Abbildung 32 zeigt einen jahreszeitlichen Verlauf, da die Badheizkörper nur im Winter in Betrieb sind. In den Sommermonaten, in denen tatsächlich nur der Verbrauch für Warmwasser gemessen wird sieht man, dass dieser sogar unter den Werten der Planung liegt.

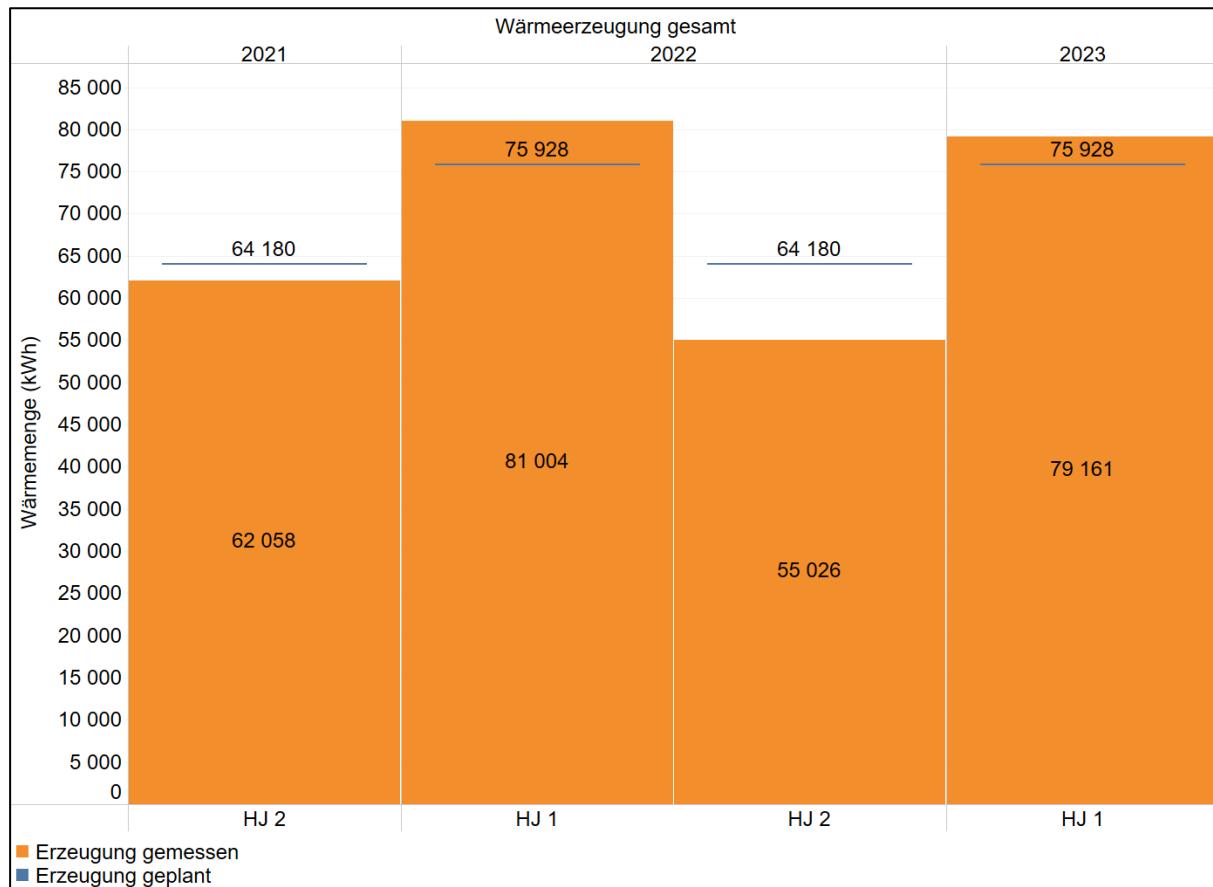


Abbildung 33 – Wärmeerzeugung gesamt halbjährlich

Insgesamt passt die gesamte Wärmeerzeugung aber gut zu den Werten aus dem Energiekonzept, wie man in Abbildung 33 sehen kann. Hier zeigen sich auch wieder die Optimierungserfolge der Heizungsregelung, sodass die Erzeugung insgesamt verringert werden konnte.

6.3 Wärmepumpe

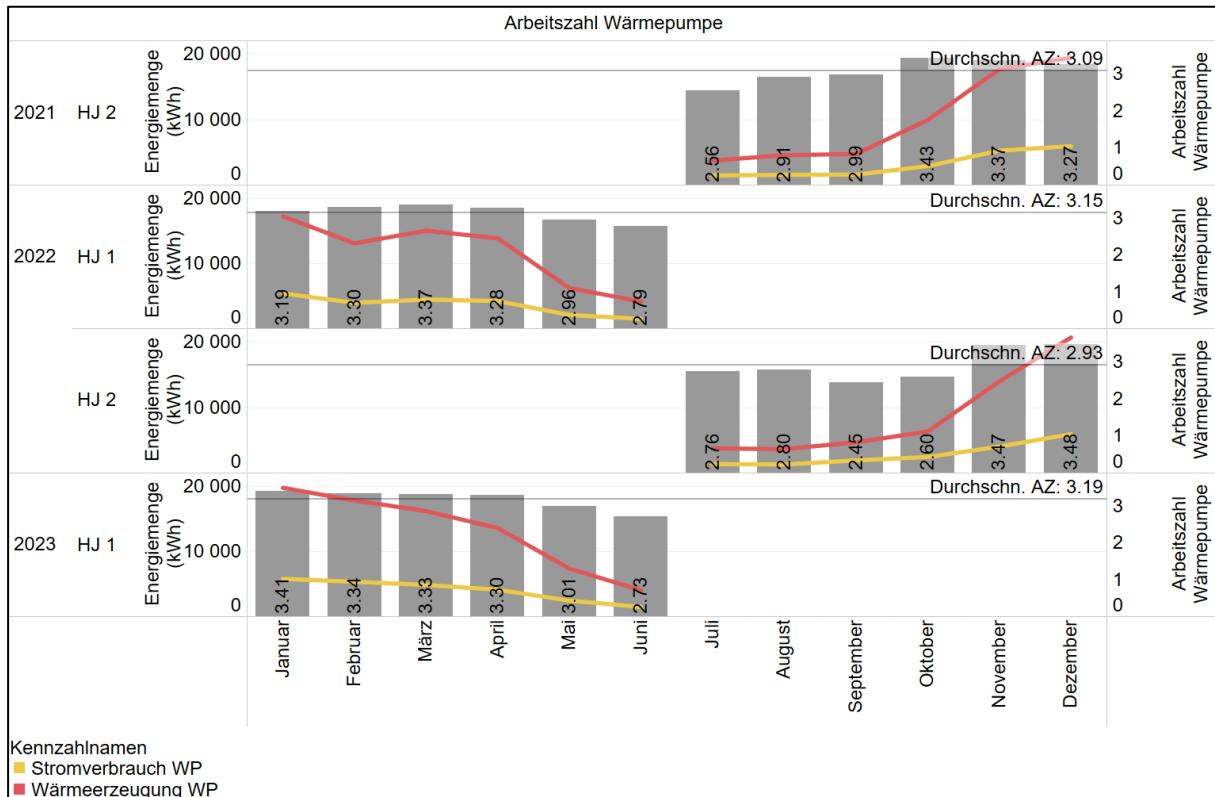


Abbildung 34 – Arbeitszahl der Wärmepumpe

Der Bilanzrahmen der hier betrachteten Arbeitszahl wurde wie folgt gezogen: Es wird der Stromverbrauch der WP selbst betrachtet sowie der Stromverbrauch der Kondensator- und Verdampferkreispumpe. Gegenübergestellt wird die Wärmeerzeugung der WP im Heizwärme- und TWW-Betrieb.

Die Arbeitszahl liegt in den betrachteten Halbjahren zwischen 2,93 und 3,19.

Im reinen Warmwasserbetrieb in den Sommermonaten erreicht die WP eine Arbeitszahl zwischen 2,6 und 3. Im Mischbetrieb im Winter durchgehend über 3, da hier nicht nur die hohen Vorlauftemperaturen für das Warmwasser erzeugt werden müssen, sondern auch niedrigere Temperaturen unter 40°C für die Fußbodenheizung, was der Arbeitszahl zugutekommt.

Mitte September gab es ein Problem im Primärkreis der Wärmepumpe. Zwei Entleerhähne waren abgerissen, sodass der Primärkreis trocken gelaufen ist und die Wärmepumpe nicht arbeiten konnte. Die gesamte Wärmeerzeugung lief daher für ca. eine Woche komplett über die elektrische Zusatzheizung und auch danach gab es bei der Wiedereinregulierung noch kleinere Probleme, die zum Einsatz der Zusatzheizung führten und die niedrigen Arbeitszahlen im September und Oktober 2022 erklären.

Die durchschnittliche Arbeitszahl von 3,0 über die komplette Projektlaufzeit liegt deutlich unter der angestrebten JAZ von 4,0. Ein Grund hierfür ist das Fehlen der Rücklauftemperaturerhö-

hung über fast die komplette Projektlaufzeit. Ein anderer Grund sind die „Standby-Stromverbräuche“ der Wärmepumpe. Zu Beginn des Projekts wurde die Rücklauftemperaturerhöhung der Wärmepumpe vom Betreiber SWS außer Betrieb genommen, da bei der Wärmepumpe hier einige Male eine Hochtemperaturstörung ausgelöst wurde. Erst in der darauffolgenden Heizperiode Ende 2021/Anfang 2022 zeigte sich, dass dadurch häufig die elektrische Zusatzheizung in den Pufferspeichern in Betrieb ging, da die Wärmepumpe eine Zeitlang erst mal den Speicher abkühlte, bevor die geplante Vorlauftemperatur erreicht wurde. In der Reaktion darauf wurde die Regelung von den Stadtwerken und Enisyst ständig verändert, um die Heizstäbe möglichst nicht zu benötigen und dadurch wurde auch die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe erhöht, was zu einer schlechteren Leistung führt. Erst im Mai 2023 konnte ein defekter Temperaturfühler identifiziert werden, der zu der Störung der Wärmepumpe im Rücklaufbeimischbetrieb führte. Durch den Austausch des Fühlers konnte das Problem behoben werden, sodass nun durch eine Optimierung der Speicherbeladungsregelung die Effizienz der Wärmepumpe verbessert werden kann.

Der Standby-Verlust der Wärmepumpe resultiert aus einer Ölheizung, die Kältemittel aus dem Ölsumpf löst, um eine ausreichende Schmierung innerhalb des Verdichters zu gewährleisten. Das erhöht die Lebenserwartung der Wärmepumpe deutlich, geht aber auf Kosten der Effizienz. In Abbildung 35 ist die Arbeitszahl einmal inklusive der Standby-Verluste dargestellt und einmal, mit Hilfe einer Berechnung, ohne diese Standby-Verluste. Man kann erkennen, dass die Arbeitszahl mit durchschnittlich 3,56 ohne Standby deutlich höher liegen würde.

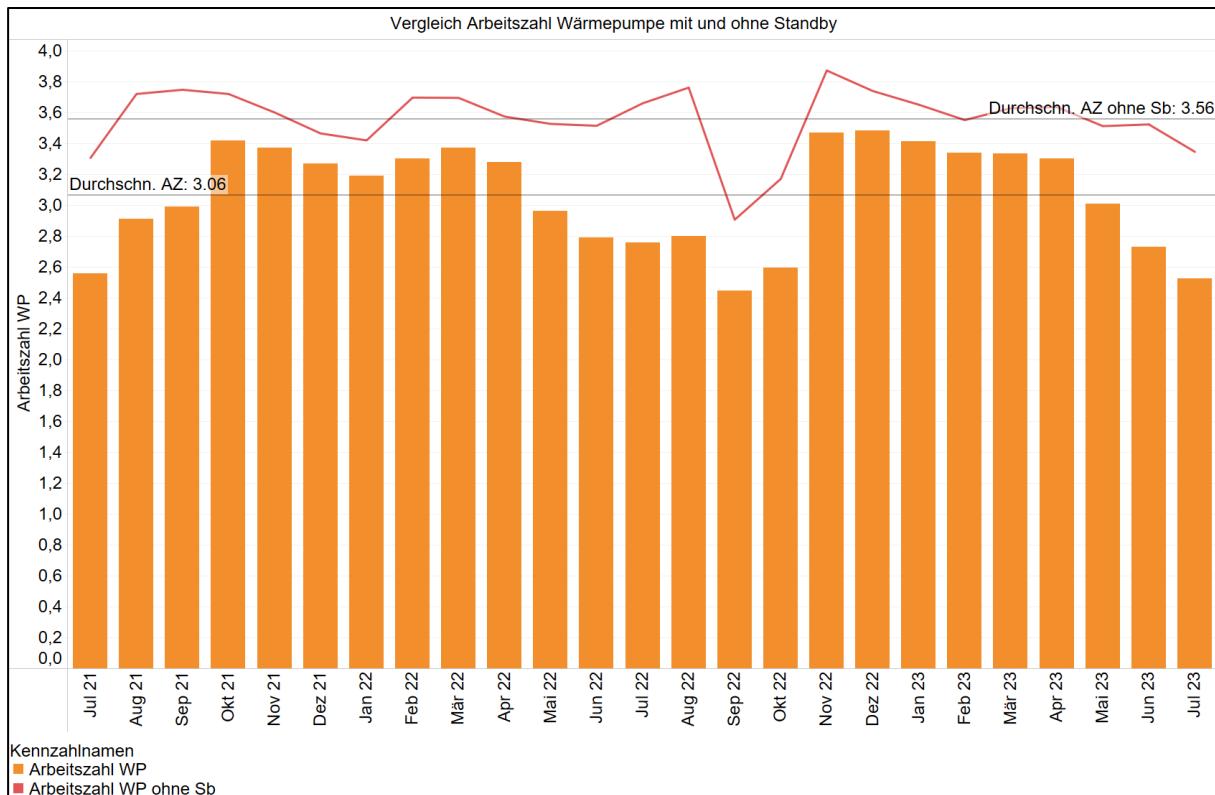


Abbildung 35 – Arbeitszahl mit und ohne Standby

6.4 Abwasserkanal

Abbildung 36 zeigt in gelb die Außenlufttemperaturen und in blau und türkis die Abwassertemperaturen im Kanal. Man sieht bei den Abwassertemperaturen jeweils zwei Lücken, bei denen die Temperaturfühler ausgefallen waren. Im Sommer 2022 wurde zwei neue Temperaturfühler eingesetzt und besser gegen Nagerfraß geschützt, da dieser zu den Ausfällen geführt hatte. Diese funktionieren seitdem verlässlich. Erkennbar ist, dass die Abwassertemperaturen im Winter mit konstant ca. 10 bis 15 °C teils deutlich über den Außenlufttemperaturen liegen.

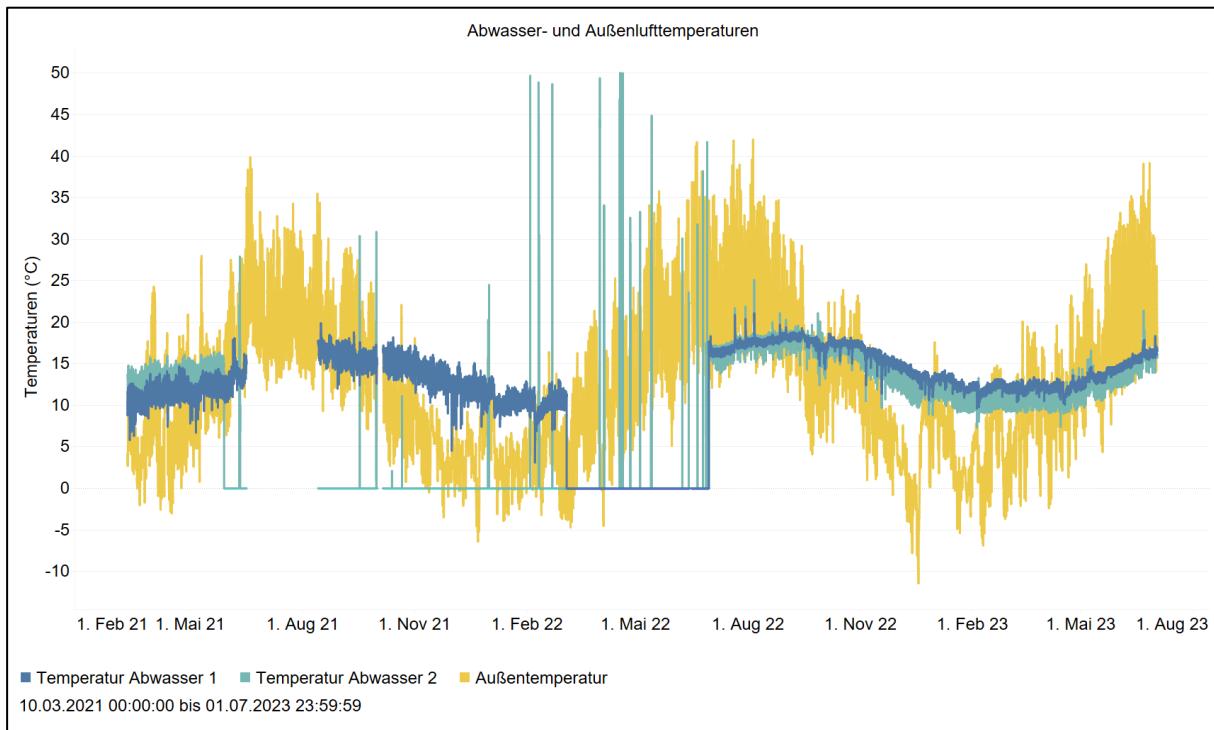


Abbildung 36 – Abwasser- und Außenlufttemperaturen

In diesem Projekt gab es die Vereinbarung mit der Stadtentwässerung Stuttgart, dass die Wärmepumpe ab einer Abwassertemperatur von untern 9°C außer Betrieb genommen werden muss. Dies war im Winter 2021 an einigen Tagen der Fall, sodass hier vom Wärmepumpenbetrieb auf die Elektroheizstäbe umgeschaltet werden musste (siehe Abbildung 37). Ab Ende November/Anfang Dezember 2021 konnte erstmals festgestellt werden, dass die Abwassertemperaturen in einen Bereich von 10 °C und niedriger fallen. Ab einer Temperatur von 9 °C muss die Wärmepumpe abgeschaltet werden, um das Abwasser nicht noch mehr abzukühlen. Die Wärme wird dann elektrisch in den Speichern erzeugt.

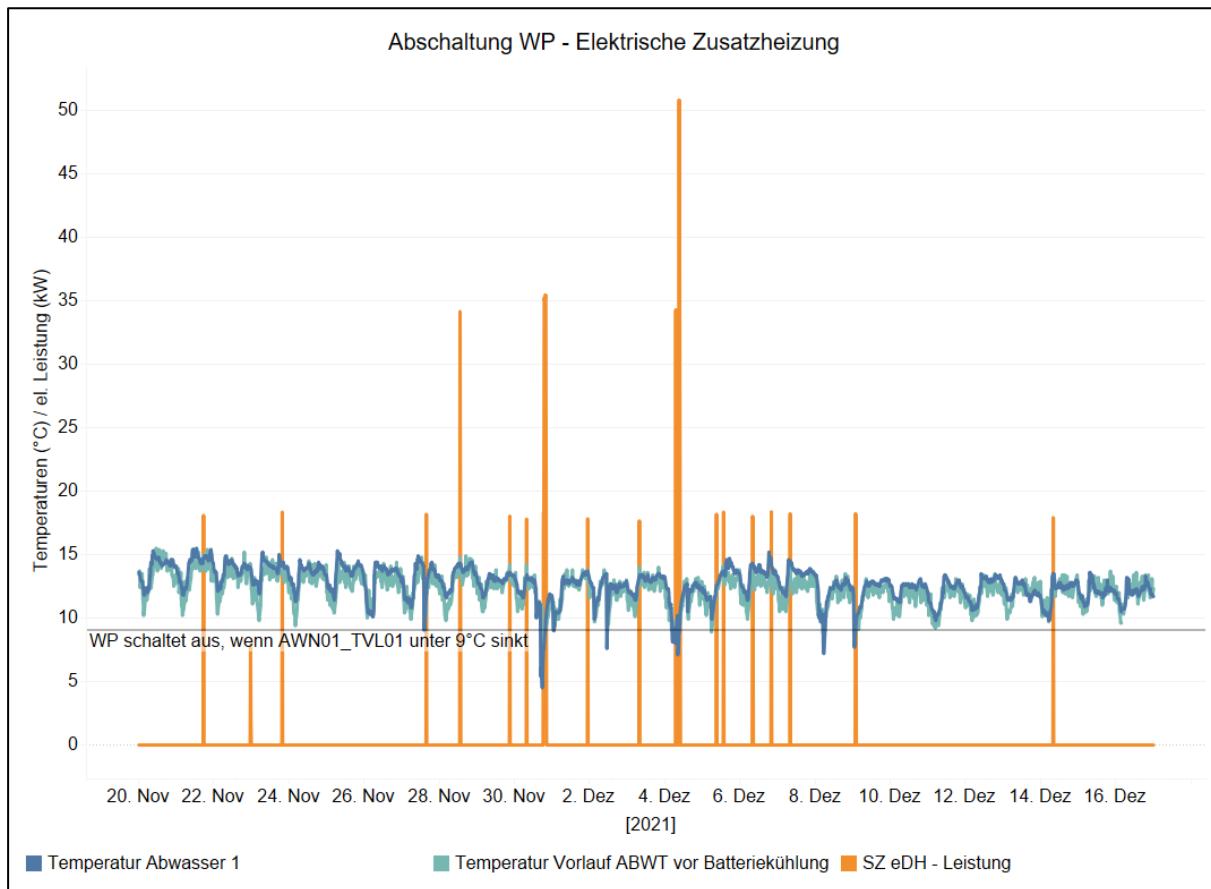


Abbildung 37 – Abwassertemperaturen und elektrische Leistung Zusatzheizung

6.5 Stromverbrauch für Gebäudeversorgung

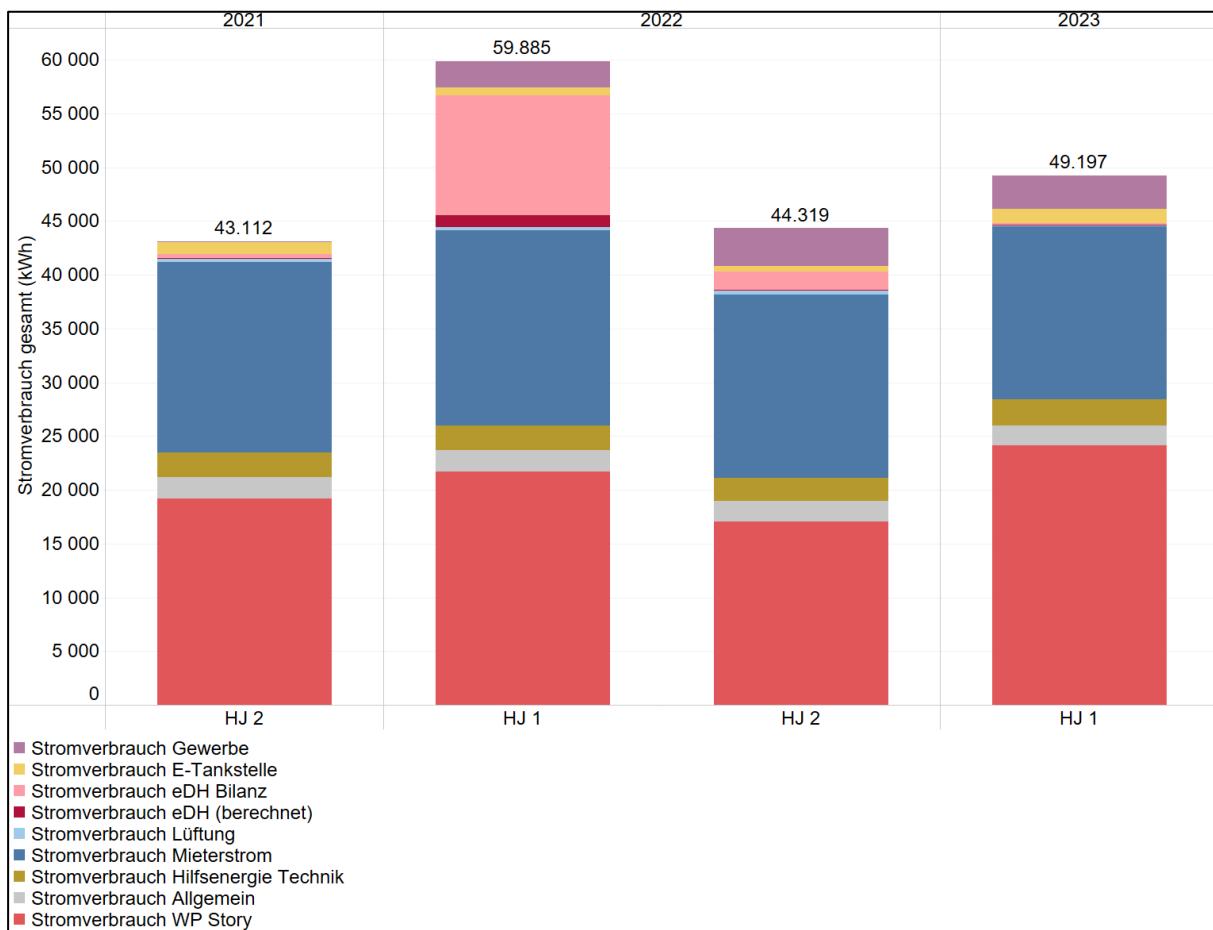


Abbildung 38 – gesamter Stromverbrauch jährlich

Der halbjährliche Stromverbrauch lag zwischen 43 000 und 60 000 kWh, wobei die ersten Halbjahre durch den längeren Heizbetrieb höher liegen als die zweiten Halbjahre, da der Stromverbrauch der Wärmepumpe einer der beiden Hauptanteile am Gesamtstromverbrauch ist. Er macht ca. 45 bis 50 % des gesamten Stromverbrauchs aus. Der zweite große Anteil ist der Mieterstrom. Er liegt zwischen ca. 30 und 40%.

Ab dem ersten Halbjahr 2022 kommt mit dem lila Balken Gewerbestrom dazu und 2022 gab es vor allem im ersten Halbjahr einen großen Anteil an Stromverbrauch der elektrischen Heizstäbe. Das lag an der, schon oben beschrieben, Problematik der Rücklauftemperaturerhöhung und dem dadurch verursachten vermehrten Einsatz der Heizstäbe. Der Ausfall der Wärmepumpe im September führte zum Verbrauch der Heizstäbe im zweiten Halbjahr 2022. Der Mieterstrom hat vom zweiten Halbjahr 2023 zum zweiten Halbjahr 2022 um ca. 12 % bzw. 2 000 kWh abgenommen, was vermutlich an der häufigeren Wohnungsnutzung während Corona lag. Die restlichen Stromverbräuche blieben, bis auf die Elektromobilität, relativ stabil. Hier konnte durch einen Umbau der Standby-Verlust der Ladestationen Anfang 2022 deutlich verringert werden, sodass der Verbrauch hier nach unten ging. 2023 steigt der Verbrauch durch die erhöhte Anzahl an Elektrofahrzeuge die geladen wurden.

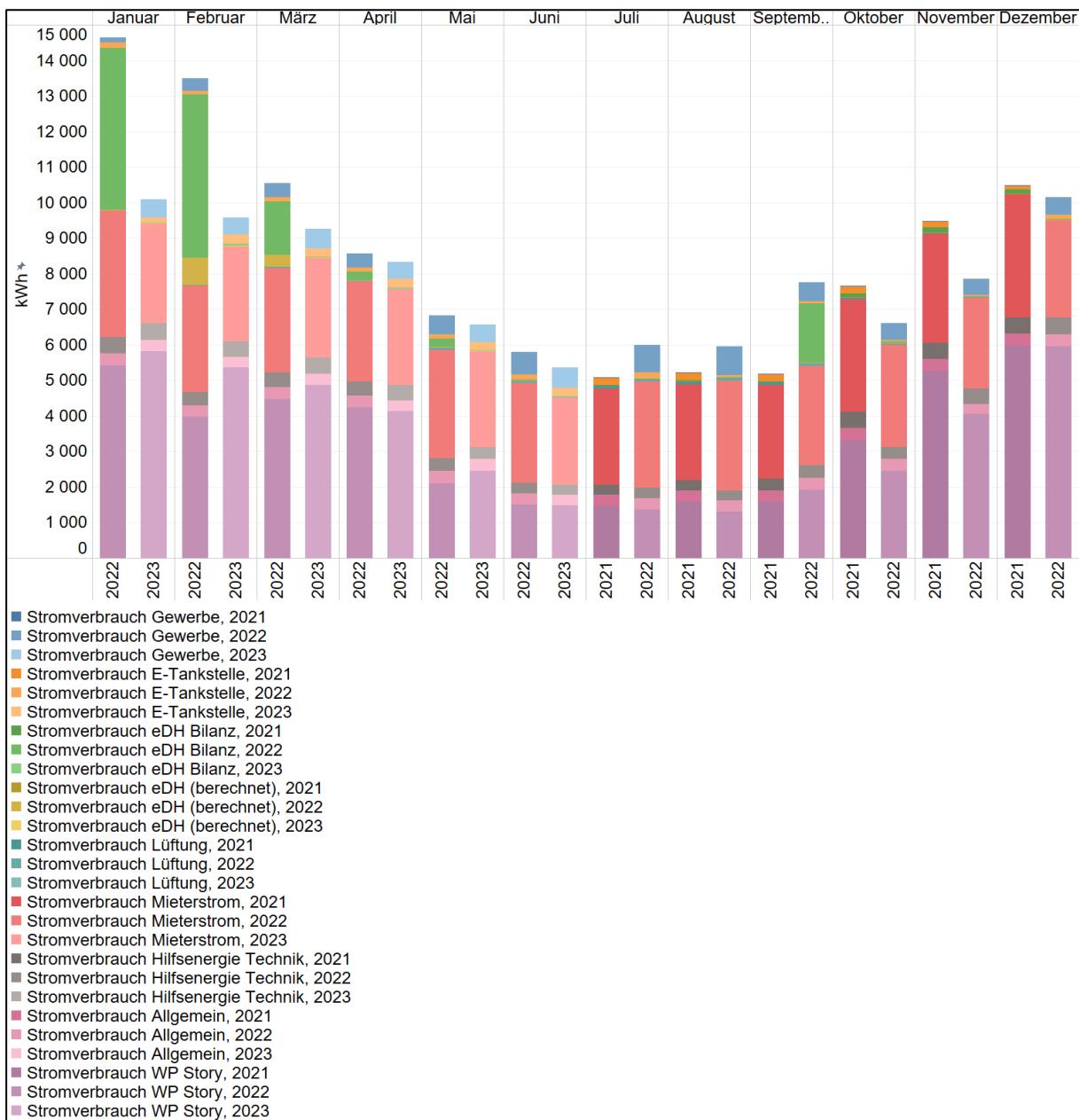


Abbildung 39 – gesamter Stromverbrauch monatlich

Beim Monatsvergleich der Stromverbräuche zeigt sich fast immer eine Einsparung im Vergleich zum Vorjahr. Nur in den Monaten Juli bis September stieg der Stromverbrauch an, was an dem Stromverbrauch der Gewerbeeinheit lad, die 2021 noch nicht genutzt wurde und an dem Ausfall der Wärmepumpe und dem Einsatz der Heizstäbe im September. Daher resultiert auch der Mehrverbrauch des zweiten Halbjahres 2022 im Vergleich mit 2021.

6.6 Nutzerstromverbrauch

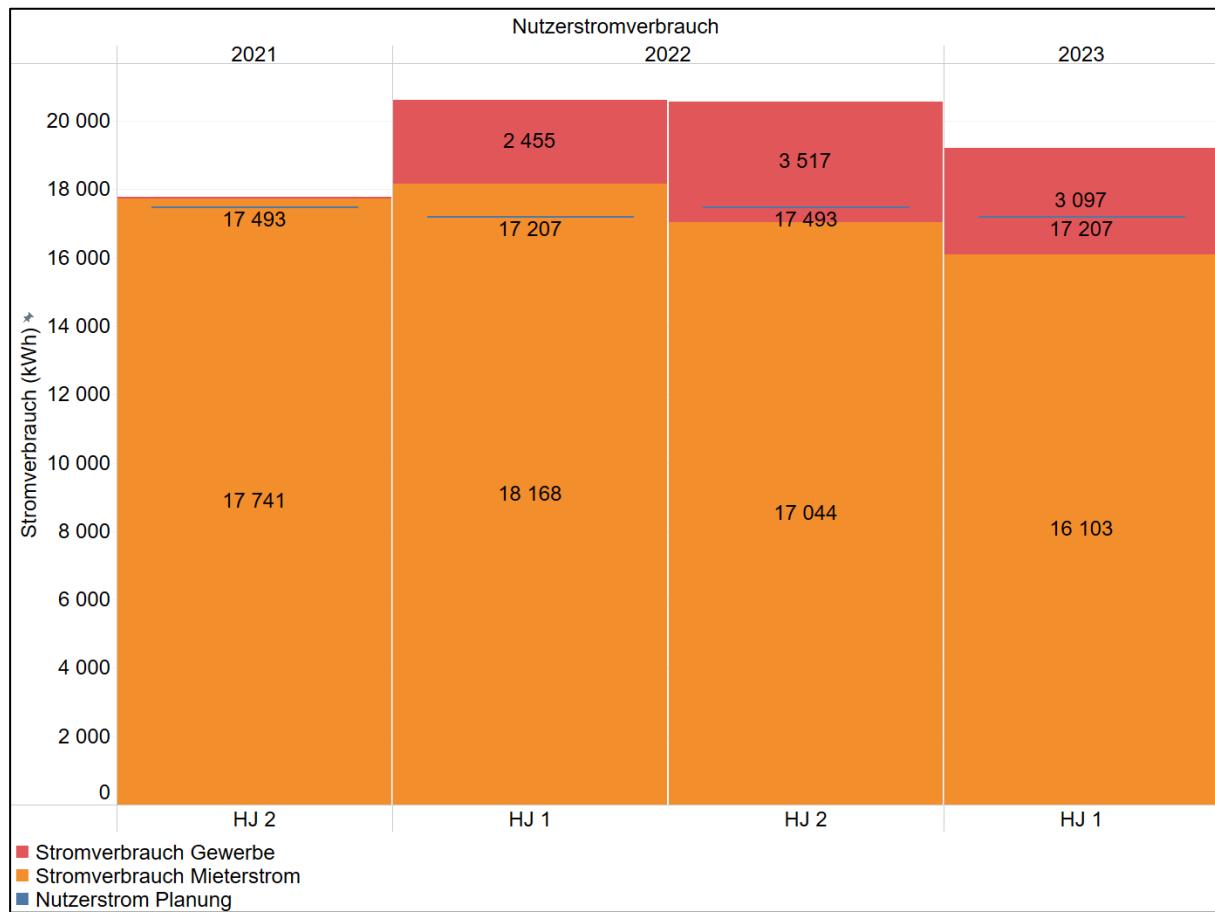


Abbildung 40 – Nutzerstromverbrauch halbjährlich

Der Stromverbrauch der Nutzer ist in Abbildung 40 aufgeteilt in orange (Mieter) und rot (Gewerbe) dargestellt. Er liegt über den Werten der Planung, wobei der Gewerbestromverbrauch zwischen 25 und 40% über den Werten der Planung liegt und der Mieterstromverbrauch zwischen 25% zu Beginn und 10% im letzten Halbjahr.

6.7 PV-Ertrag und Eigenstromnutzung

Die PV-Anlage besteht aus einer Dachanlage auf dem Flachdach mit kristallinen Modulen und einer Balkonanlage mit organischen Modulen. Ursprünglich war geplant, die von der PV-Anlage generierten Erträge vorrangig im Gebäude zu verbrauchen. Nach dem Direktverbrauch durch die Anlagentechnik und den Nutzerstrom sollte zunächst der Stromspeicher beladen werden und lediglich Überschüsse, die nach voller Beladung des Stromspeichers noch bestehen, sollten in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden.

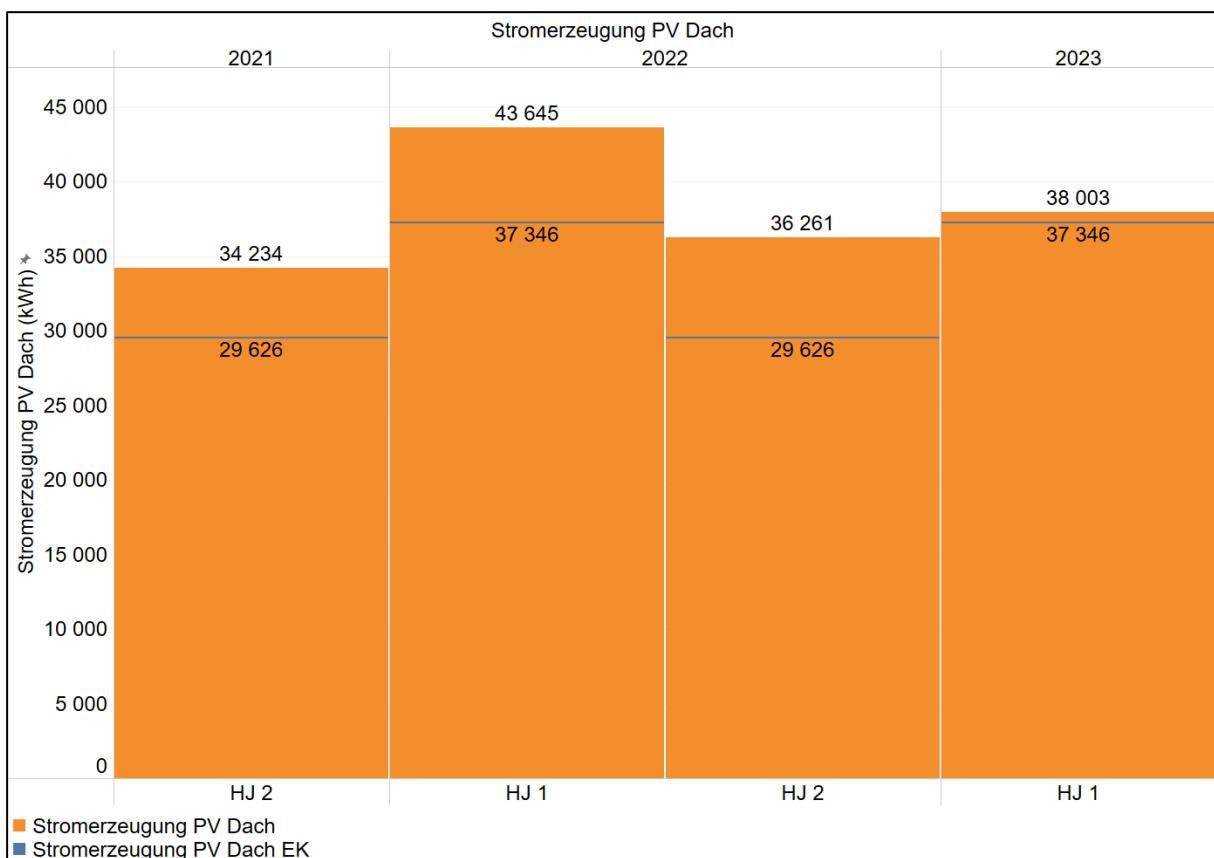


Abbildung 41 – Stromerzeugung PV-Dach im Vergleich zur Planung halbjährlich

Die Dachanlage erzeugt bisher immer mehr Strom als im Energiekonzept simuliert worden war. Die ersten drei Halbjahre lagen jeweils deutlich über der Planung, lediglich das vierte Halbjahr lag nur knapp darüber.

Die OPV-Anlage an der Fassade hat zu Beginn des Projekts nur sehr wenig Strom erzeugt. Die Fehlersuche ergab, dass zwei der Wechselrichter nicht richtig eingestellt waren. Dieses Problem wurde Mitte März 2022 gelöst. Die Stromerzeugung der OPV-Anlage ist dem allerdings wieder rückläufig. Im Vergleich mit der Simulation des Herstellers der OPV-Anlage ist die gemessene Erzeugung immer noch deutlich geringer (ca. 20 bis 30%). Der Jahres-Verlauf der Simulationswerte lässt darauf schließen, dass bei der Simulation eventuell nicht mit einer vertikalen Ausrichtung simuliert wurde.

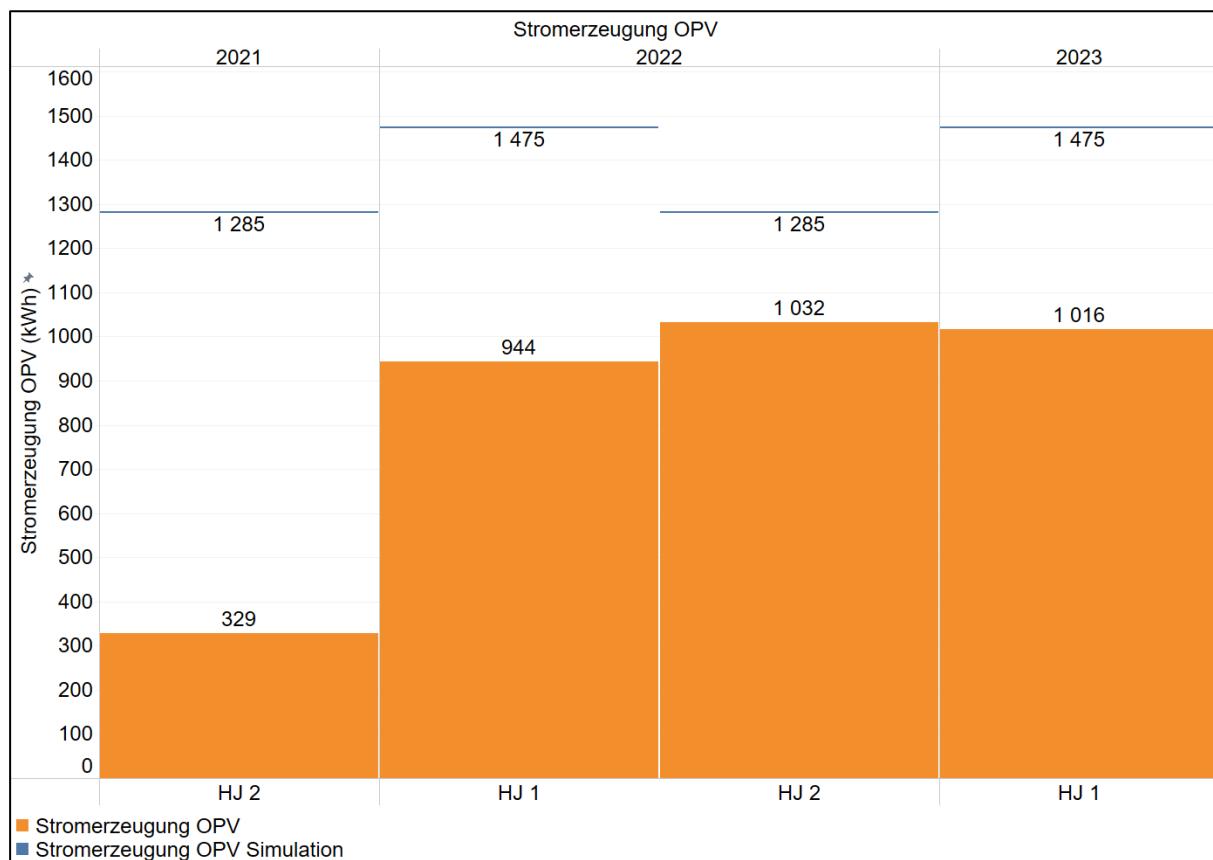


Abbildung 42 – Stromerzeugung OPV-Fassade im Vergleich zur Planung halbjährlich

Der mittlere Eigennutzungsgrad (Direktnutzung PV-Strom und Nutzung durch Zwischenspeicherung im Stromspeicher) lag in den einzelnen Halbjahren zwischen 68 und 80% (Abbildung 43). In den Sommermonaten kann aufgrund der hohen Erzeugung nur ein geringerer Eigennutzungsanteil erreicht werden. In den Wintermonaten kann aber ein Großteil des erzeugten Stroms direkt und nach Zwischenspeicherung im Gebäude verbraucht werden.

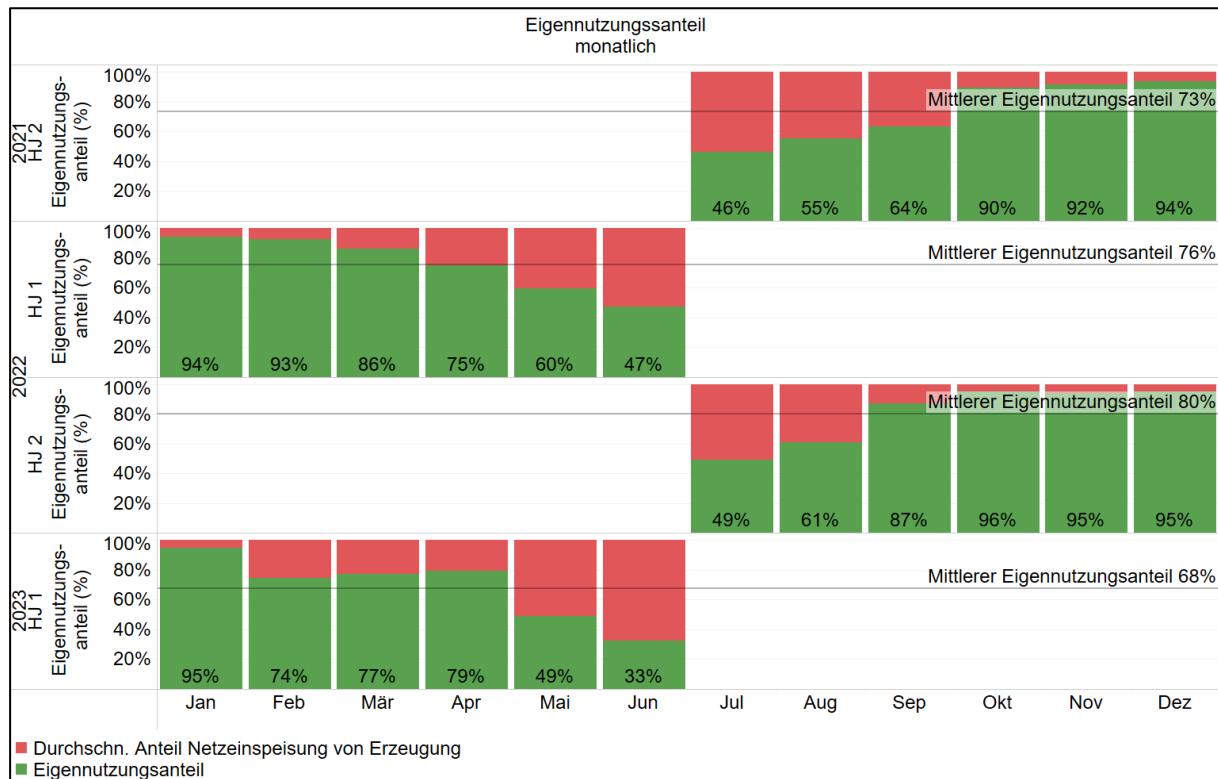


Abbildung 43 – Eigennutzungsanteil monatlich

6.8 Stromspeicher

In Abbildung 44 sind oben der Netzbezug bzw. die Netzeinspeisung, darunter die Batteriebeladung bzw. -entladung und ganz unten der Ladestand des Stromspeichers dargestellt. Beim Hausanschluss bedeutet rot ein Bezug und grün eine Einspeisung, bei der Batterie bedeutet rot Entladung und grün Beladung und beim Speicherladestand bedeutet grün 100% und rot 0%. Der Speicherladestand war erst ab Juni 2022 verfügbar.

Im Sommer wird der Stromspeicher abends und morgens entladen (erkennbar an der roten Farbe), dann am Morgen beladen, sobald die Sonne scheint und die PV mehr produziert als im Moment im Haus benötigt wird (grün) und sobald die Batterie beladen ist (dunkelgrün beim Stromspeicher unten) wird der überschüssige Strom ins Netz eingespeist (grün oben beim Hausanschluss). Im Sommer muss kaum Strom aus dem Netz bezogen werden (rot oben beim Hausanschluss), dafür reicht im Winter die PV-Stromerzeugung kaum aus, den Speicher zu füllen (wenig grün in der Mitte).

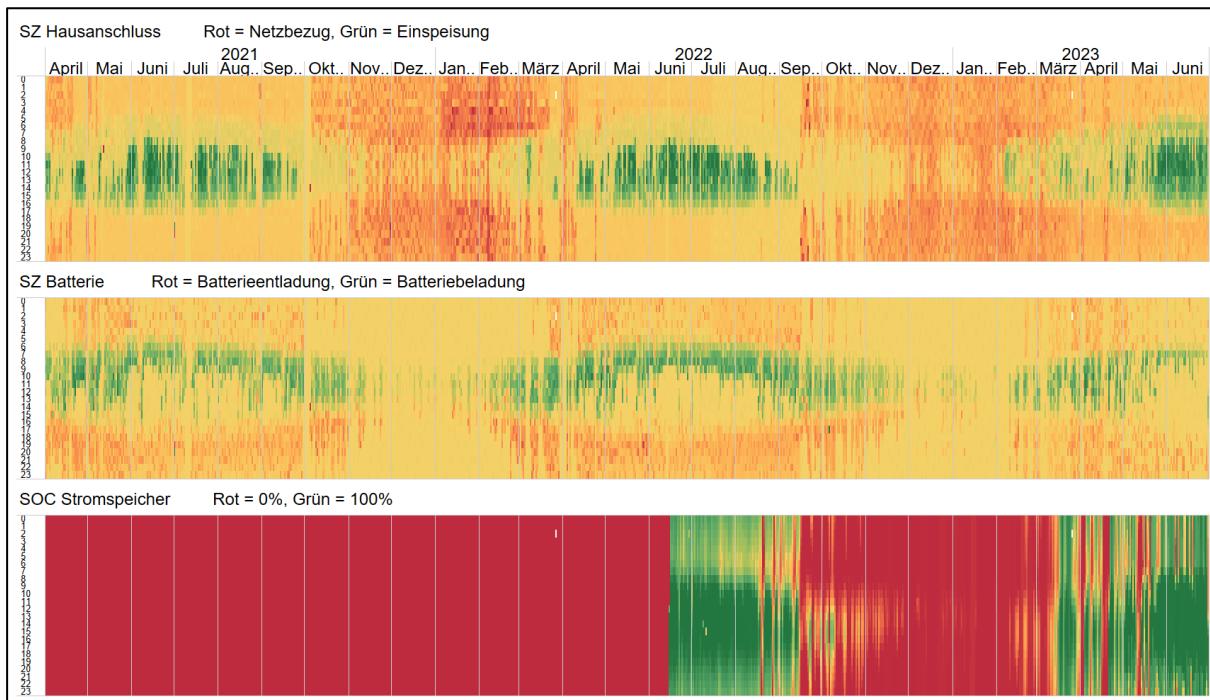


Abbildung 44 – Netzbezug/Batteriebeladung/Stromspeicherladestand im Carpetplot

Der Netzstrombezug lag in den ersten 3 Halbjahren jeweils bei ca. 50%. Durch die Nutzung des Stromspeichers konnte der Eigenstromanteil von ca. 30% PV-Direktnutzung auf 50% gehoben werden. Im letzten Halbjahr lag der Netzstrombezug bei ca. 57 %, der Anteil der Batterie nur noch bei 13 % im Mittel anstatt wie vorher bei 20%. Dies ist einer geänderten Stromspeicherbeladungsstrategie geschuldet, siehe Kapitel 5.1.

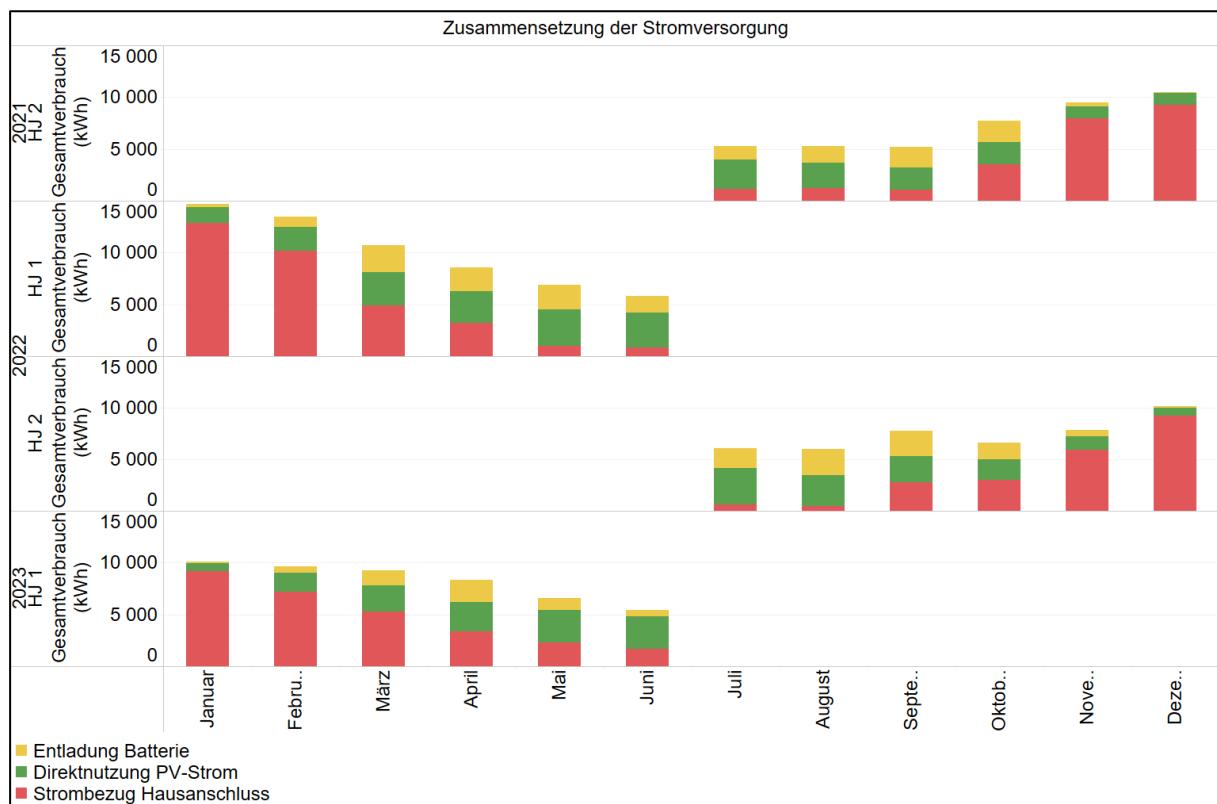


Abbildung 45 – Zusammensetzung der Stromversorgung im Gebäude

6.9 EnergiePLUS-Bilanz

Der Verbrauch im 1. Halbjahr 2023 liegt knapp über dem Verbrauch des 2. Halbjahres 2022 aber deutlich unter dem 1. Halbjahr 2022. Der Mieterstrom liegt in allen Halbjahren auf einem ähnlichen Niveau. Der Stromverbrauch der Wärmepumpe war im aktuellen Betrachtungszeitraum bisher am höchsten, da hier ein Großteil in der Heizperiode liegt und im vergleichbaren 1. Halbjahr 2022 viel Wärme durch die elektrische Zusatzheizung erzeugt wurde, was sich dort in dem hohen hellblauen Anteil wiederspiegelt.

Die Stromerzeugung war im aktuellen Betrachtungszeitraum höher als im 2. Halbjahr 2022 aber geringer als im 1. Halbjahr 2022. Bisher konnte aber in allen vier Halbjahren keine positive EnergiePLUS Bilanz erreicht werden.

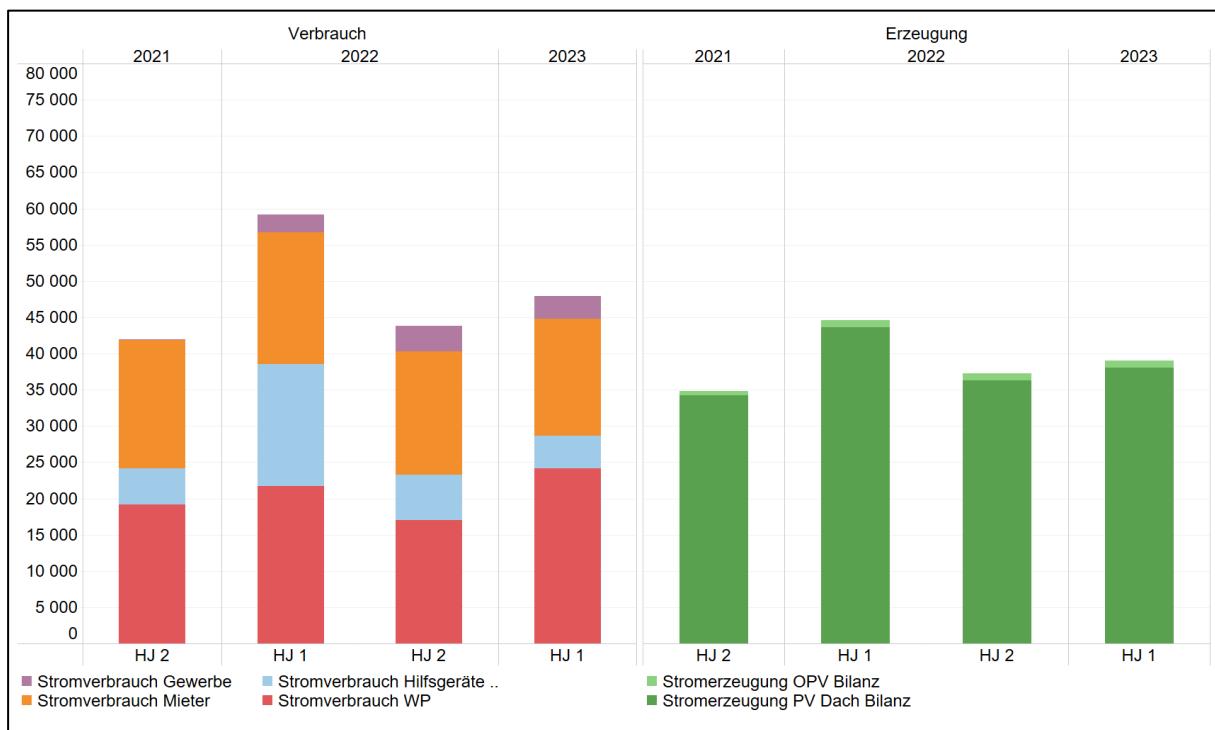


Abbildung 46 – EnergiePLUS-Bilanz der letzten 4 Halbjahre

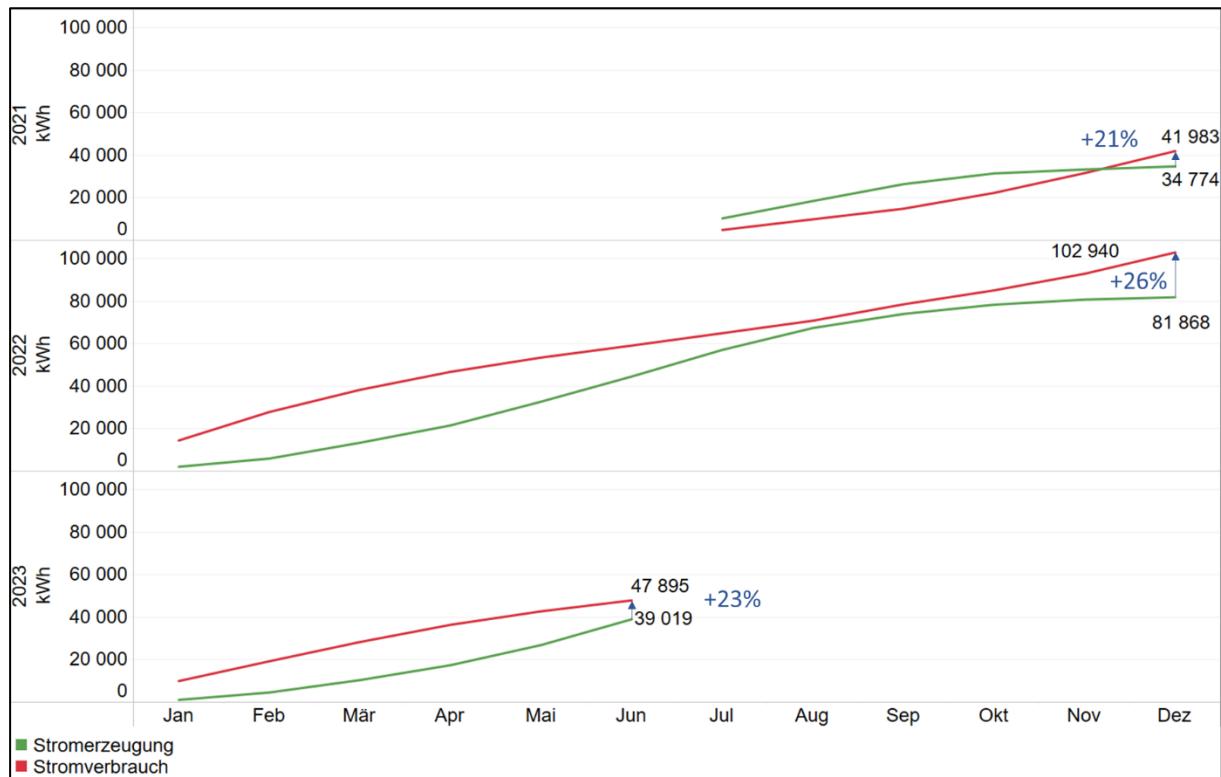


Abbildung 47 – kumulierte EnergiePLUS-Bilanz der letzten 4 Halbjahre

6.10 CO₂-Footprint

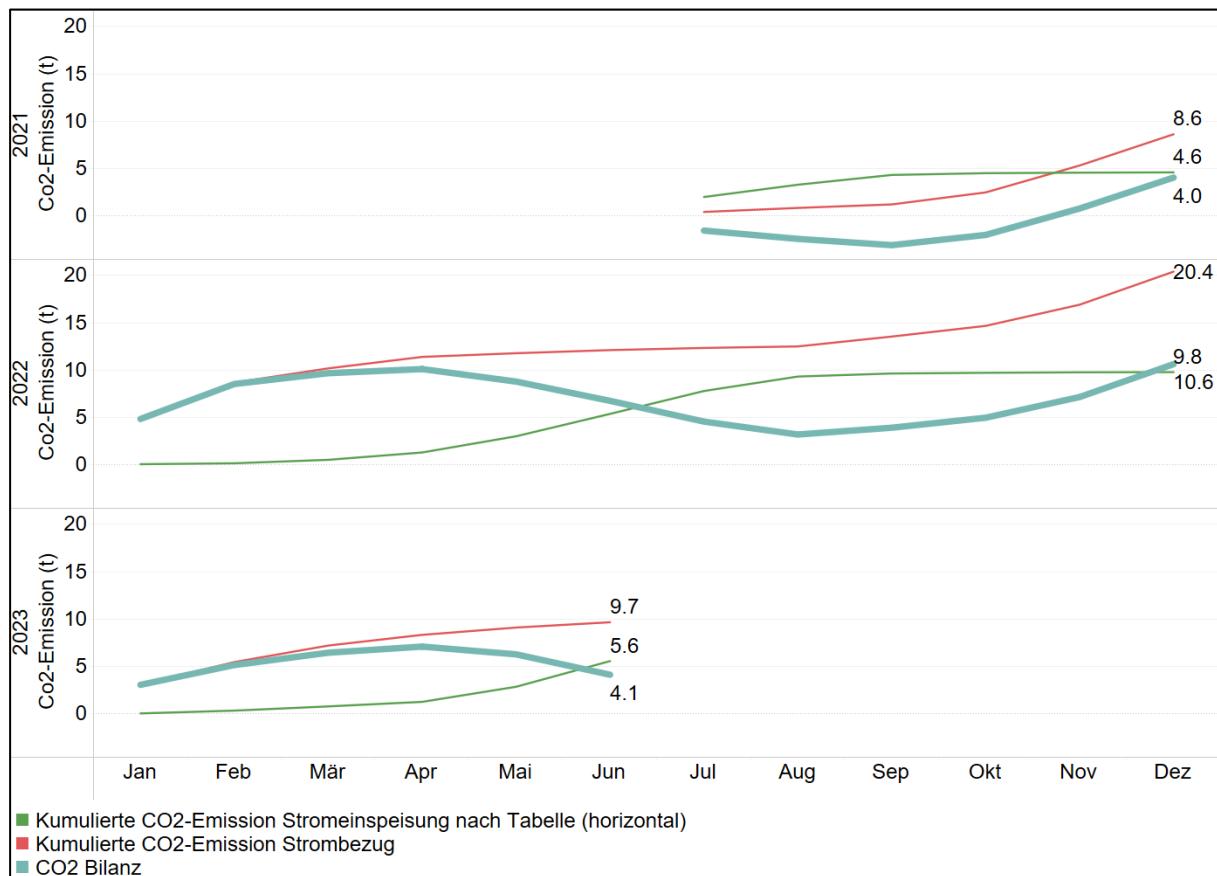


Abbildung 48 – CO₂ -Bilanz kumuliert

Die CO₂ -Bilanz des Gebäudes liegt bei ca. 4 bis 5 t CO₂ je Halbjahr. Es wird Strom mit CO₂-Äquivalenten von ca. 10 t pro Jahr aus dem Netz bezogen und Strom mit ca. 5 t eingespeist. Das entspricht einer Emission von ca. 9 bis 12 kg/m² Wohnfläche und Jahr.

Tabelle 2 angesetzte CO₂-Äquivalente nach GEMIS

	CO ₂ -Äquivalent [g/kWh]		
	2021	2022	2023
Stromerzeugung	357	380	332
Strom-Bezug Netz	357	380	332

7 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens ist die Umsetzung eines ganzheitlichen innovativen Energiekonzepts, das den nahezu klimaneutralen Gebäudestandard sowie gemäß den Forderungen der EU den „nearly-zero-energy-building“-Standard (Niedrigstenergie-Gebäude) erreicht. Dabei werden die für diese Standards notwendigen innovativen Technologien und Methoden in der Praxis demonstriert und evaluiert.

Das Mehrfamilienhaus mit innerstädtischer Lage ist im Kontext von Nutzung und Lage ein besonders wertvolles Demonstrationsprojekt zur Verfolgung der Ziele im Nationalen Aktionsplan Energie (NAPE) der Bundesregierung.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens Umsetzung, Monitoring und Betriebsoptimierung eines nahezu klimaneutralen Gebäudes – „AktivPLUS Mehrfamilienhaus in Stuttgart Möhringen“ leitete das Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude- und Solartechnik das wissenschaftliche Monitoring- und Optimierungsprogramm für eine Laufzeit von 2 Jahren.

Ziel des Vorhabens ist die Umsetzung und Dokumentation eines ganzheitlichen innovativen Energiekonzepts, von der Planung über die Gebäudeerstellung bis zum Betrieb. Dabei werden innovative Technologien und Methoden eingesetzt und evaluiert. Das Projekt soll die genannten Inhalte in besonders anschaulicher Weise demonstrieren. Der Fokus der Bearbeitung liegt dabei auf dem Monitoring und der Optimierung des Anlagenbetriebs. EnergiePLUS als Zielstandard soll erprobt werden. Dabei soll eine hohe solare Deckung des Energiebedarfs erreicht und nachgewiesen werden.

Das Mehrfamilienhaus mit 20 Wohnungen wurde ab Anfang 2021 bezogen. Seit Mitte 2021 sind alle Anlagenkomponenten in Betrieb und die Messdaten werden vollständig erfasst. Im vorliegenden Abschlussbericht werden die Betriebsergebnisse aus dem Monitoring der ersten 2 Betriebsjahre im Zeitraum von Juli 2021 bis Juli 2023 dargestellt.

Monitoring

Der halbjährliche Stromverbrauch lag zwischen 43 000 und 60 000 kWh, wobei die ersten Halbjahre durch den längeren Heizbetrieb höher liegen als die zweiten Halbjahre, da der Stromverbrauch der Wärmepumpe einer der beiden Hauptanteile am Gesamtstromverbrauch ist. Insgesamt wurden in den 2 Jahren 196,5 MWh Strom verbraucht, was durchschnittlich ca. 66kWh/(m²*a) beträgt.

Es zeigt sich ein leicht erhöhter Stromverbrauch für den Nutzerstrom (Ausstattung plus Beleuchtung der Wohnungen inkl. Küche und Bad) sowie Gewerbe in Höhe von 26 kWh/(m²*a) im Jahr 2020 statt der geplanten 20 kWh/(m²*a).

Der Stromertrag der PV-Dach-Anlage (78 kW_p) lag durchschnittlich bei 975 kWh/kW_p und damit über dem prognostizierten Stromertrag von 859 kWh/kW_p. Der Ertrag der OPV lag bei ca. 2 MWh/a. Der Überschuss wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist oder im Nickel-Mangan-Cobalt Stromspeicher (227 kWh) zwischengespeichert, um somit den Eigenstromnutzungsanteil zu erhöhen. Die solare Eigenstromnutzung liegt zwischen 68 und 76 % je nach

Optimierungsziel, der Deckungsanteil bei 40 bis 50 %. Der Gesamtwirkungsgrad des NMC-Stromspeichers beträgt ca. 70 %.

Im Durchschnitt wurde in den Betrachtungsjahren jährlich 132 MWh Wärme erzeugt. Aufgeteilt in 49,5 MWh für Warmwasser und 82,3 MWh für Heizung (55,5 kWh/m² a). Die Jahresarbeitszahlen der elektrischen Wärmepumpe lagen zwischen 2,93 und 3,19.

Betriebserfahrungen und Optimierungen

Neben der Reduzierung des Energiebedarfs von Gebäuden ist die nachhaltige CO₂-neutrale Deckung des Energiebedarfs ein Schwerpunkt in Forschung und Entwicklung. Unter dem Gesichtspunkt der Nutzung regenerativer Energien und einer energieeffizienten Bauweise wird für die Beheizung und Kühlung von Wohngebäuden in den letzten Jahren verstärkt die Wärmepumpe ins Energiekonzept mit eingebunden. Die WP-Technologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung weiterhin eine wesentliche Rolle spielen. Um das Potenzial dieser Energieversorgungsvariante möglichst effizient ausschöpfen zu können, kommt der Wahl der Niedertemperaturwärmequelle und des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Wärmeübertrager eine entscheidende Bedeutung zu. Die speziell an diesem Standort zur Verfügung stehende Abwasserwärme wird durch eine heute bereits verfügbare Technologie nutzbar gemacht.

Das Pilotprojekt stellt einen Baustandard der Zukunft dar und bildet Möglichkeiten und einen Rahmen für die Entwicklung und Evaluation innovativer Gebäudetechnik und Methoden für Mehrfamilienhäuser. Wie in anderen Projekten zeigt jedoch auch das hier vorgestellte Aktiv-PLUS Mehrfamilienhaus, dass sowohl ein von der Planung an integriertes Monitoring als auch die begleitende Qualitätsüberprüfung in der Bauphase unumgänglich sind. Erst in der praktischen Anwendung kann gezeigt werden, ob die Planung umsetzbar ist und funktioniert. Für alle Anlagen zum Heizen und Kühlen sind jedoch ganzheitlich aufeinander abgestimmte Regelstrategien erforderlich, die darüber hinaus doppelt geprüft und im Betrieb bis zum Erreichen des Regelbetriebs messtechnisch begleitet werden müssen.

Ausblick

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt sollten mit den Erfahrungen und dem Know-how aus anderen Wohnungsbauten und der Industrie verbunden werden. Die Kenntnisse aus Planung, Erstellung und Betrieb der einzelnen Funktionen der Anlagen und die Zusammenarbeit sind wesentliche Punkte für die zukünftige Forschung und Marktbereitschaft.

8 Anhang

Projektbeteiligte

Tabelle 3 Projektbeteiligte

Architekt	Werkgemeinschaft Böhme Hilse Diplomingenieure Freie Architekten
Bauherr	Bietigheimer Wohnbau GmbH
Energiekonzept	EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH
Bauphysik	EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH
HLS-Planung	EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH
MSR	enisyst GmbH
Betreiber	Stadtwerke Stuttgart GmbH
Monitoring	Steinbeis-Transferzentrum Energie-, Gebäude- und Solartechnik