

# **Endbericht der Modellvorhaben Effizienzhaus Plus Nr. 37**

Wissenschaftliche Begleitung des Effizienzhaus Plus  
der Nassauischen Heimstätte  
in Riedberg-Frankfurt am Main

## **Forschungsprogramm**

Modellhäuser im „Plus-Energie-Standard“, ein Forschungsprogramm des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI)

## **Messperiode**

Oktober 2015 bis September 2017

## **Aktenzeichen**

SWD - 10.08.82-12.19

## **gefördert durch**

das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

## **bearbeitet von**

Oliver Rosebrock, M.Sc.  
Dr.-Ing. Stefan Plesser (Projektleitung)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch  
Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)



## Abschlussbericht

# Effizienzhaus Plus, FFM Riedberg EnergiePLUS im Geschosswohnungsbau

TU Braunschweig  
Institut für Gebäude- und Solartechnik

Mühlenpfordtstraße 23  
D-38106 Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. M. Norbert Fisch

Tel. +49 (0) 531 391-3555  
Fax +49 (0) 531 391-8125

igs@tu-bs.de  
www.tu-braunschweig.de/igs

Ihr Zeichen:  
Ihre Nachricht vom:  
Unser Zeichen: Plesser/Rosebrock

Labor:  
Zimmerstraße24b  
Tel. +49 (0) 531 391-3635  
Fax. +49 (0) 531 391-3636

TU Braunschweig  
Norddeutsche Landesbank Hannover  
Kontonummer 1 999 200  
BLZ 250 500 00

IBAN: DE 79 250500000001999200  
BIC (Swift Code): NOLA DE2H  
USt.-ID: DE 152330858  
Steuer-Nr.: 14/201/24509

|                     |   |
|---------------------|---|
| Ausführende Stelle: | Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS)<br><br>Univ.- Prof. Dr.- Ing. M. Norbert Fisch<br><br>Fakultät Architektur, Bauen, Umwelt<br><br>Mühlenpfordtstraße 23<br><br>38106 Braunschweig |
| Bearbeitung:        | Oliver Rosebrock, M.Sc.<br><br>Dr.-Ing. Stefan Plesser (Projektleitung)   |
| Fördergeber         | Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raum-<br>forschung (AZ: PEH – A3-12 10 01 / 12.19)  |
| Fördernehmer        | Nassauische Heimstätte Wohnungs- und<br>Entwicklungsgesellschaft mbH<br><br>Schaumainkai 47<br><br>60596 Frankfurt am Main  |
| Projektlaufzeit:    | 19.12.2012 – 30.09.2017   |
| Monitoring:         | 10/2015 bis 09/2017   |
| Stand:              | 29.10.2018  |



## INHALTSVERZEICHNIS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Projektbeschreibung.....  | 6  |
| 2     | Architektur und Technik.....  | 8  |
| 2.1   | Architektur.....  | 8  |
| 2.2   | Gebäudehülle.....   | 9  |
| 2.3   | Energiekonzept und Anlagentechnik.....  | 10 |
| 2.3.1 | Anpassung der Anlagentechnik, temporäre Integration zusätzlicher Wärmeerzeuger .. | 11 |
| 3     | Planung und Auslegung.....  | 16 |
| 4     | Mess- und Monitoringkonzept.....  | 19 |
| 4.1   | Messdatenausfälle.....  | 23 |
| 5     | Energetisches-Monitoring 2015 - 2017.....   | 25 |
| 5.1   | End- und Primärenergie sowie Effizienzhaus Plus-Nachweis .....                    | 25 |
| 5.2   | Strombilanz.....  | 27 |
| 5.2.1 | Stromerzeugung - PV-Ertrag und Batterie .....                                     | 35 |
| 5.3   | Wärmebilanz.....  | 42 |
| 5.3.1 | Wärmeabnahme.....   | 42 |
| 5.3.2 | Wärmeerzeugung .....  | 46 |
| 5.3.3 | Wärmequellen.....   | 47 |
| 5.4   | Systemeffizienz.....  | 50 |
| 6     | Wirtschaftlichkeit .....  | 51 |
| 6.1   | Mehrinvestitionskosten für den Effizienzhaus Plus Standard .....                  | 52 |
| 6.2   | Betriebskosteneinsparung im Effizienzhaus Plus Standard .....                     | 53 |
| 7     | Zusammenfassung Monitoring .....  | 55 |
| 8     | Ausblick .....  | 59 |
| 9     | Betriebsoptimierung.....  | 62 |
| 9.1   | Methodik .....  | 62 |
| 9.2   | Spezifikation des Projekts.....   | 64 |
| 9.3   | Prüfung und Auswertung.....   | 66 |
| 9.4   | Visualisierung im Dashboard.....  | 68 |
| 10    | Anhang .....  | 69 |
| 10.1  | Grundrisse und Ansichten.....   | 69 |
| 10.2  | Ergebnisse Energiebedarf/-deckung und EnEV .....                                  | 70 |
| 10.3  | Messdaten Strom.....  | 72 |
| 10.4  | Messdaten Wärme.....  | 74 |
| 10.5  | Messdaten Wärme Korrektur HT-Netz.....  | 76 |
| 11    | Literatur.....  | 77 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Ansicht von Süd-West, Quelle: HHS Planer+Architekten, Kassel.....   | 6  |
| Abbildung 2: Grundriss Regelgeschoss aus [2].....  | 8  |
| Abbildung 3: Energiekonzept vor (links) und nach dem Umbau / der Erweiterung der Anlagentechnik (rechts).....                        | 13 |
| Abbildung 4: Hydraulikschema 2015-2016 , Quelle: egs-plan, angepasst durch IGS .....   | 14 |
| Abbildung 5: Hydraulikschema ab April 2016 , Quelle: egs-plan, angepasst durch IGS .....   | 15 |
| Abbildung 6: Endenergiebilanz nach Effizienzhaus Plus auf Basis von [1] .....  | 17 |
| Abbildung 7: Endenergiebilanz mit Berücksichtigung von Eigenstromnutzung auf Basis von [1].....                                      | 17 |
| Abbildung 8: Primärenergiebilanz nach Planung/EnEV auf Basis von [1].....  | 18 |
| Abbildung 9: Zählerübersicht Strom.....  | 20 |
| Abbildung 10: Zählerübersicht Wärme .....  | 21 |
| Abbildung 11: Messpunkte im Eisspeicher.....   | 22 |
| Abbildung 12: Übersicht Messdatenausfälle Stromzähler.....   | 23 |
| Abbildung 13: Endenergiebilanz Messzeitraum 2015/2016 und 2016/2017 .....  | 26 |
| Abbildung 14: Primärenergiebilanz Messzeitraum 2015/2016 und 2016/2017 .....   | 27 |
| Abbildung 15: Stromverbrauch nach Art des Verbrauchers 10/2015 bis 09/2017 .....   | 28 |
| Abbildung 16: Messwerte Zähler RLT 10/2015 bis 09/2017 .....   | 29 |
| Abbildung 17: Messwerte Zähler Allgemeinstrom, 10/2015 bis 09/2017 .....   | 30 |
| Abbildung 18: Messwerte Zähler Aufzug, 10/2015 bis 09/2017 .....   | 31 |
| Abbildung 19: Messwerte Zähler Heizzentrale inklusiver Wärmepumpenstrom, 10/2015 bis 09/2017 .....                                   | 32 |
| Abbildung 20: Summe Messwerte Zähler der 17 Wohneinheiten, 10/2015 bis 09/2017 .....   | 33 |
| Abbildung 21: Messwerte Zähler E-Mobilität, 10/2015 bis 09/2017 .....  | 34 |
| Abbildung 22: Darstellung der regenerativen Stromerzeugung inkl. des lokalen Stromspeichers der (Batterie auf Gleichstromseite)..... | 35 |
| Abbildung 23: Messwerte Stromerzeugung PV-Module, 10/2015 bis 09/2017 .....  | 36 |
| Abbildung 24: Messwerte Batteriebe- und -entladung, 10/2015 bis 09/2017 .....  | 37 |
| Abbildung 25: Messwerte Zähler Erzeugung gesamt, 10/2015 bis 09/2017 .....   | 38 |
| Abbildung 26: Vergleich DC/AC Einspeisung, 10/2015 bis 09/2017 .....   | 39 |
| Abbildung 27: Gesamteffizienz des PV-Systems ab Erzeugung .....  | 40 |
| Abbildung 28: Eigendeckung und Eigennutzung PV-Strom (DC-seitig) .....   | 41 |

Abbildung 29: Wärmeverbrauch Niedertemperaturnetz (NT), 10/2015-09/2017 .....44

Abbildung 30: Wärmeverbrauch Hochtemperaturnetz (HT) 2015-2017 .....45

Abbildung 31: Erzeugte Wärmemenge und Verbrauch in den Netzen (inkl. Verluste), 10/2015-09/2017 .....46

Abbildung 32: Wärme aus dem Eisspeicher an die Wärmepumpe, 10/2015-09/2017 .....47

Abbildung 33: Temperaturen und Füllstand Eisspeicher .....48

Abbildung 34: Freie Kühlung .....49

Abbildung 35: Systemeffizienz (nicht zu verwechseln mit Arbeitszahl Wärmepumpe) .....50

Abbildung 36: Wärmebilanz seit September 2017 .....60

Abbildung 37: Energiekonzept ab November 2017 .....61

Abbildung 38: Digitales Prüfkonzert auf Basis einer Aktiven Funktionsbeschreibung .....63

Abbildung 39: Spezifikation der Wärmepumpenanlage auf dem Digitalen Prüfstand (synavision GmbH) .....64

Abbildung 40: Spezifikation der Betriebszustände (Detail) .....65

Abbildung 41: Spezifikation einer Betriebsregel .....65

Abbildung 42: Auswertung der Betriebszustände für KW4/5, 2018 .....66

Abbildung 43: Auswertung der Betriebsregeln im Betriebszustand 1 für KW4/5, 2018 .....67

Abbildung 44: Ansicht aus dem Online-Dashboard .....68

Abbildung 45: Grundrisse Erdgeschoss und Regelgeschoss aus [2] .....69

Abbildung 46: Gebäudeansichten von Nord-West nach Nord-Ost (Quelle: HHS Planer+Architekten) .....69

Abbildung 47: Messwerte Strom Messzeitraum 2015/2016 .....72

Abbildung 48: Messwerte Strom Messzeitraum 2016/2017 .....72

Abbildung 49: Stromverbrauch nach Kategorien .....73

Abbildung 50: Stromverbrauch Haustechnik und E-Mobilität .....73

Abbildung 51: Messwerte Wärme Messzeitraum 2015/2016 .....74

Abbildung 52: Messwerte Wärme Messzeitraum 2016/2017 .....74

Abbildung 53: Wärmeverbrauch HT in den Wohnungen 2015/2016 .....74

Abbildung 54: Wärmeverbrauch HT in den Wohnungen 2016/2017 .....75

Abbildung 55: Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen 2015/2016 .....75

Abbildung 56: Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen 2016/2017 .....75

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Allgemeine Gebäudedaten .....  | 7  |
| Tabelle 2: Kenndaten Gebäudehülle .....   | 9  |
| Tabelle 3: Energiebedarfswerte nach EnEV 2009 .....                               | 16 |
| Tabelle 4: Gesamt-Stromverbrauch 2015-2017 .....                                  | 27 |
| Tabelle 5: Wärmebilanz .....  | 42 |
| Tabelle 6: Klimabereinigung .....   | 43 |
| Tabelle 7: Übersicht der Investitionskosten des Mehrfamilienhauses Riedberg ..... | 51 |
| Tabelle 8: Übersicht Mehrkosten der Gebäudehülle auf Basis von [5] .....          | 52 |
| Tabelle 9: Mehrinvestitionskosten für die Anlagentechnik.....                     | 53 |
| Tabelle 10: Vergleich Betriebskosten .....  | 54 |
| Tabelle 11: Spezifikationskonzept Aktiver Funktionsbeschreibungen .....           | 62 |
| Tabelle 12: Energiebedarf nach Kategorien .....                                   | 70 |
| Tabelle 13: Energieerzeugung (geplant).....                                       | 70 |
| Tabelle 14: Energiebedarfe nach EnEV .....  | 71 |
| Tabelle 15: Aufwandszahlen .....  | 71 |

gefördert durch:



## 1 Projektbeschreibung

Im Frankfurter Stadtteil Riedberg ist durch das Wohnungsunternehmen Nassauische Heimstätte ein Effizienzhaus Plus mit 17 Zwei- bis Vier-Zimmerwohnungen auf 1.600 m<sup>2</sup> Gesamtwohnfläche in vier Vollgeschossen und einem Dachgeschoss entstanden.

Das Konzept, mehr Energie zu erzeugen als die Bewohner für Wärme und Haushaltsstrom benötigen, ist in Einfamilienhäusern bereits erprobt.

Der Energieüberschuss soll vor Ort verwendet werden und Elektroautos und E-Bikes in der Tiefgarage des Gebäudes aufladen, die von den Mietern gemeinsam genutzt werden können.

Mit Hilfe einer hochwertigen Gebäudehülle und optimaler Ausnutzung von erneuerbaren Energien soll der Effizienzhaus Plus Standard im Mehrfamilienhaus erreicht werden und so gezeigt werden, dass sich die Erreichung eines Energieüberschusses in der Jahresbilanz nicht nur auf Gebäude mit wenigen Wohneinheiten beschränkt.



Abbildung 1: Ansicht von Süd-West, Quelle: HHS Planer+Architekten, Kassel

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die allgemeinen Gebäudedaten.

**Tabelle 1: Allgemeine Gebäudedaten**

| Allgemeine Angaben   |  |
|----------------------|--|
| Anschrift            | Graf-von-Stauffenberg-Allee 57<br>D-60438 Frankfurt (Main)   |
| Baujahr              | 2015   |
| Bezug                | August 2015  |
| Anzahl Wohneinheiten | 17   |
| Bauherr              | Nassauische Heimstätte<br>Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH<br>Schaumainkai 47<br>60596 Frankfurt am Main |

| Gebäudedaten*                              |                            |                 |
|--|----------------------------|-----------------|
| Wohnfläche                                 | 1.599                      | m <sup>2</sup>  |
| Gebäudenutzfläche A <sub>N</sub> nach EnEV | 2.407                      | m <sup>2</sup>  |
| Gebäudenutzfläche beheizt                  | 1.599                      | m <sup>2</sup>  |
| Bruttogrundfläche                          | 3.170                      | m <sup>2</sup>  |
| Wärmeübertragende Umfassungsfläche A       | 2.654                      | m <sup>2</sup>  |
| beheiztes Gebäudevolumen V <sub>e</sub>    | 8.517                      | m <sup>3</sup>  |
| Hüllflächenfaktor A/V                      | 0,31                       | m <sup>-1</sup> |
| Breitengrad:                               | 50,1° N                    |                 |
| Längengrad:                                | 8,4 ° O                    |                 |
| Höhenlage:                                 | 151 m. ü. NN.              |                 |
| Mittlere Jahrestemperatur:                 | 11,8 (15/16), 10,9 (16/17) | °C              |
| Mittlere Wintertemperatur an Heiztagen     | 6,2 (15/16), 5,7 (16/17)   | °C              |
| Gradtagzahl am Standort                    | 2682 (15/16) 3071 (16/17)  | Kd/a            |
| TRY - Klimazone / Referenzstation:         | Frankfurt/M-Flughafen      |                 |

\* Quellen: EnEV Nachweis 07.01.2015 [1]/ HHS Planer+Architekten und Fraunhofer [2]



## 2 Architektur und Technik

### 2.1 Architektur

Das fünfgeschossige Mehrfamilienwohnhaus befindet sich auf einem dreieckigen Grundstück im Frankfurter Norden. Bezogen wurde das Gebäude im August 2015. Die fünfeckige Gebäudeform basiert auf der Grundstücksform und der Integration in zwei städtebauliche Raster. Um einen zentralen Erschließungskern (Treppe und Aufzug) ordnen sich die Wohnungen an.

Jede Wohnung verfügt über eine Loggia. Ein Sonnenschutz in Form von Jalousien ist vorhanden. Durch die Kompaktheit des Baukörpers und dessen Form soll eine optimale Nutzung von Tageslicht erfolgen



Abbildung 2: Grundriss Regelgeschoss aus [2]

Weitere Grundrisse und Ansichten sind im Anhang zusammengestellt.

## 2.2 Gebäudehülle

Zur Erreichung des Effizienzhaus Plus Standards kommen zum einen eine gute Gebäudehülle und zum anderen auf eine effiziente Anlagentechnik zum Einsatz.

Die Außenwände sind aus Stahlbeton und mit einer Wärmedämmung sowie einer vorgehängten Fassade aus Faserzementtafeln umgesetzt und erreichen einen U-Wert von 0,12 W/(m²K).

Das Dach ist als Pultdach mit einer Neigung von 10° ausgebildet, besitzt eine 30 cm starke Wärmedämmung und erreicht einen U-Wert von 0,13 W/(m²K).

Die Fenster erzielen mit einer 3-Scheiben-Verglasung einen U-Wert von 0,80 W/(m²K).

Die Geschossdecke der Wohnungen über der Tiefgarage wird als Stahlbetondecke mit schwimmendem Estrich und unterseitiger 24 cm starker Dämmung ausgebildet und erreicht einen U-Wert von 0,12 W/(m²K).

Tabelle 2 gibt einen Überblick über bauphysikalischen Werten der Gebäudehülle.

**Tabelle 2: Kenndaten Gebäudehülle**

| Gebäudehülle*                                       |   |       |
|---|---|-------|
| Fensterfläche                                       | 493   | m²    |
| Fensterflächenanteile je Orientierung               | N-NO: 26<br>N-NW: 28<br>S-SO: 36<br>S-SW: 42<br>W: 27 | %     |
| Kompaktheit/ Verhältnis A/V <sub>e</sub>            | 0,31  | 1/m   |
| Dach  | 0,13  | W/m²K |
| Außenwand   | 0,12  | W/m²K |
| Dachfenster (Ausstieg)                              | 1,1   | W/m²K |
| Fassadenfenster                                     | 0,8   | W/m²K |
|   | 3-fach Verglasungen                                   |       |
| Mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient H <sub>T</sub> | 0,276   | W/m²K |
| Grenzwert nach EnEV 2009                            | 0,40  | W/m²K |
| Sonnenschutz  | Außenliegend, manuell                                 |       |

### 2.3 Energiekonzept und Anlagentechnik

Das Versorgungskonzept des Gebäudes basiert auf der Nutzung von Umweltwärme und regenerativer Stromerzeugung vor Ort. Die Wärmeversorgung erfolgt mittels einer elektrischen Sole-Wasser-Wärmepumpe ( $50\text{kW}_{\text{th}}$ ). Als Wärmequelle dienen in Abhängigkeit von Temperaturniveau und Verfügbarkeit ein solarthermischer Luftkollektor auf dem Dach ( $85\text{ m}^2$ ) oder ein Eisspeicher mit einem Volumen von etwa  $100\text{ m}^3$ . Beim Eisspeicher wird insbesondere die große Schmelzenthalpie herangezogen. Die Regeneration des Eisspeichers erfolgt über Wärmeleitung vom Erdreich und durch die Luftkollektoren sowie durch freie Kühlung im Sommer.

Für die Wärmeverteilung im Gebäude sind zwei Netze vorgesehen. Ein Niedertemperaturnetz für die Fußbodenheizung (Pufferspeicher wird hier noch im Laufe der Betriebszeit nachgerüstet), sowie ein Hochtemperaturnetz mit einem Pufferspeicher von  $1.000\text{ l}$ . Über das Hochtemperaturnetz wird die Trinkwarmwasservorerwärmung in den Wohnungsübergabestationen, die Badheizkörper sowie die Heizregister der Lüftungsanlage versorgt.

Die Wohnungslüftung erfolgt über eine zentrale mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. (siehe Abbildung 3: Energiekonzept)

PV-Module auf dem Dach ( $84,37\text{ kW}_p$ ) und in der Fassade ( $15,28\text{ kW}_p$ ) sollen für einen bilanziellen Stromüberschuss sorgen. Mit Hilfe einer Batterie (Lithium-Eisen-Phosphat,  $59,4\text{ kWh}$ ) und der Elektromobilität soll ein möglichst hoher Eigenstromnutzungsanteil ermöglicht werden.

Folgende Komponenten kommen zum Einsatz

#### PV:

Dach:

258 Hocheffizienzmodule Sunpower SPR327 NE-WHT,  $327\text{ W}_p$ ,  $84,4\text{ kW}_p$  Gesamtleistung

54 Dummy Module für die Randbereiche

Fassade:

18 Module Glas/Glas-Modul SOL 272 K,  $272\text{ W}_p$  Fassade A, Gesamtleistung  $4,89\text{ kW}_p$

28 Module Glas/Glas-Modul SOL 368 K,  $371\text{ W}_p$  Fassade B, Gesamtleistung  $10,39\text{ kW}_p$

#### Batterie:

Sinusstrom Model SP-LFP 100 AHA, Lithium-Eisen Phosphat, Kapazität:  $59,4\text{ kWh}$

Besonderheit: Die Kombination aus PV- und Batterie befindet sich in einem System auf der Gleichstromseite. Es gibt nur einen Wechselrichter, der Gleichstrom aus Batterie oder PV-Anlage zu Wechselstrom wandelt. Die Batterie hat keine Verbindung zum öffentlichen Stromnetz und kann entsprechend nicht vom Netzstrom geladen werden.

### Wärmepumpe:

Simaka Simatron WP50 SW R407C, Heizleistung: 50,48 kW (B0/W35), COP 4,55 (B0/W35)

### Pufferspeicher:

NAU PUB 1000, Speichervolumen: 1.000 Liter für das Hochtemperaturnetz

NAU PUB 1000, Speichervolumen: 1.000 Liter für das Niedertemperaturnetz (seit 04/2016)

### Eisspeicher:

Isocal Eisspeicher, mit Wärmetauscher und Regelung, 98 m<sup>3</sup> Volumen

### Solarabsorber:

11x Isocal SolarLuft-Kollektor SLK-F, Entzugsleistung 480 W/(m<sup>2</sup>K), je 6 m x 1,3 m, Lage unterhalb der PV-Dummy-Module auf dem Dach

### Lüftungsanlage:

LÜFTA MAXK-I3 2000 DC, zentral mit WRG, effektiver Wärmebereitstellungsgrad 84%

#### 2.3.1 Anpassung der Anlagentechnik, temporäre Integration zusätzlicher Wärmeerzeuger

Im Dezember 2015 wurde festgestellt, dass die Regelung der Anlage nicht planmäßig funktionierte. Die vorhandene Anlagentechnik wies hydraulische und regelungstechnische Mängel auf. Zum einen waren die Erträge des Solarabsorbers zu gering bzw. nicht vorhanden, sodass der Eisspeicher entgegen der Planung die Hauptwärmequelle für die Wärmepumpe darstellt. Zum anderen ging die Wärmepumpe regelmäßig auf Störung, da im Niedertemperaturnetz die Temperaturspreizung zu gering war.

Im Zuge des folgenden Umbaus der Heizzentrale von Januar bis April 2016 kam ein ölbetriebene mobile Heizeinheit („Hotmobil“) zur Beheizung des Gebäudes zum Einsatz. Der Endenergieverbrauch und Primärenergieverbrauch durch das Heizöl wird in den Energiebilanzen mit aufgeführt.

Der Umbau bestand im Wesentlichen darin, dass die Verrohrung der Solarabsorber auf dem Dach überprüft und angepasst wurde (Änderung Rohrdurchmesser, Überprüfung Strömungsrichtung). Zur Verringerung der Taktung der Wärmepumpe wurde ein Wärmespeicher mit einem Volumen von 1.000 Liter in das Niedertemperaturnetz als hydraulische Weiche integriert (Abbildung 4 und Abbildung 5). Zusätzlich wurde ein externer Regler zur Steuerung und Freigabe der Wärmequellen installiert. Die Inbetriebnahme nach dem Umbau erfolgte am 28.04.2016.

Seit der Inbetriebnahme traten weitere Mängel an der Anlage, insbesondere am Regler der Wärmequellen und bei der Wärmepumpe auf, sodass zunächst nur eine Vorabnahme der Anlage im Dezember 2016 erfolgte. Die Endabnahme der Wärmepumpe steht bis Ende des Monitoringzeitraums aus.

Aufgrund fehlerhafter Funktionen des Reglers der Wärmequellen war der Eisspeicher in der Heizperiode 2016/2017 erneut zu früh vereist, sodass für die Bereitstellung der Wärme im Hochtemperaturnetz von Januar 2017 bis Anfang März 2017 ein elektrischer Durchlauferhitzer im Hochtemperaturnetz zum Einsatz kam.

Für die Heizperiode 2017/2018, die in diesem Bericht nicht betrachtet wird, wurde eine dauerhafte Installation von elektrischen Durchlauferhitzern für das Hochtemperaturnetz zur Spitzenlastabdeckung und Sicherstellung der Wärmeversorgung umgesetzt.

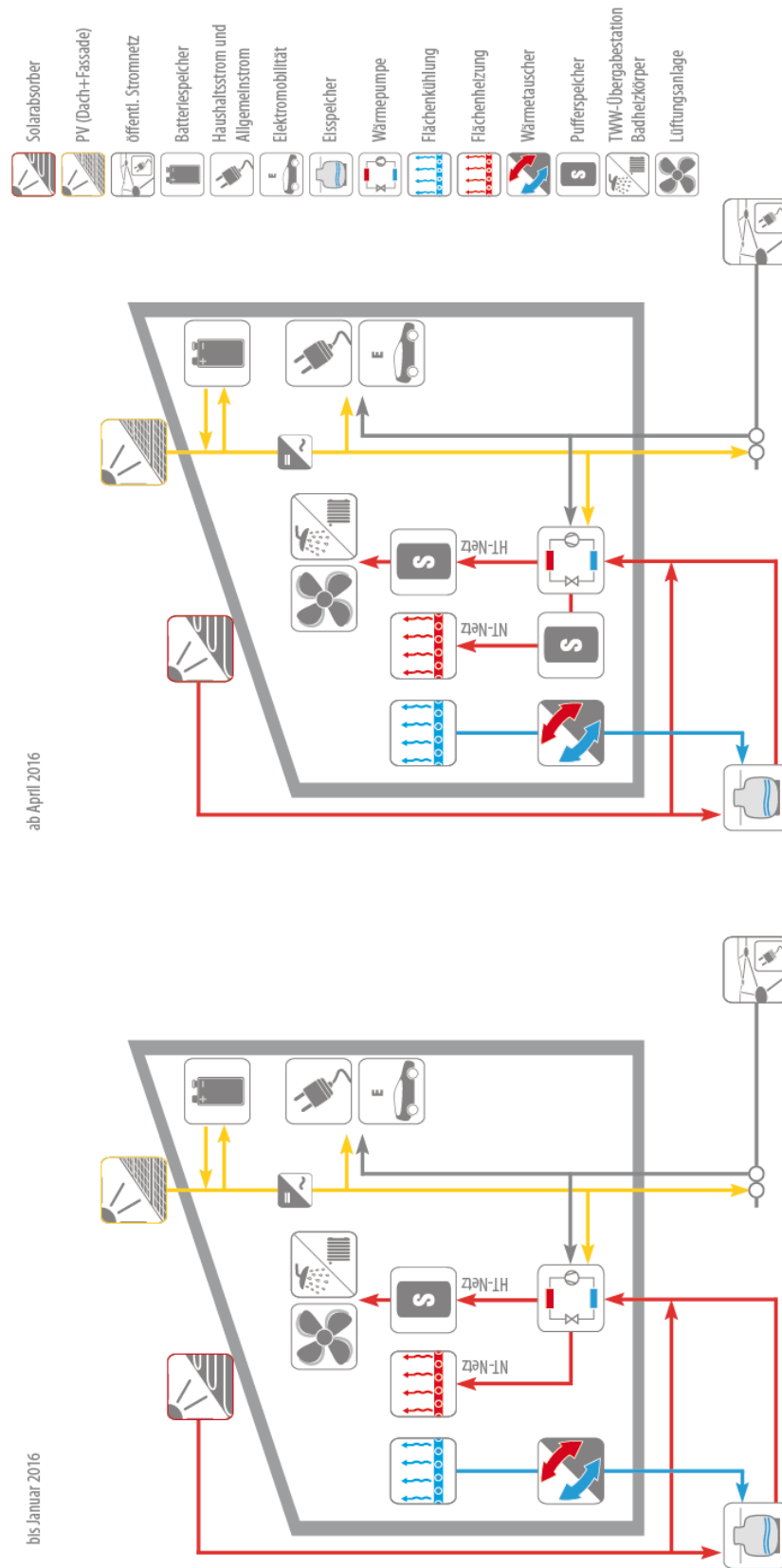


Abbildung 3: Energiekonzept vor (links) und nach dem Umbau / der Erweiterung der Anlagentechnik (rechts)

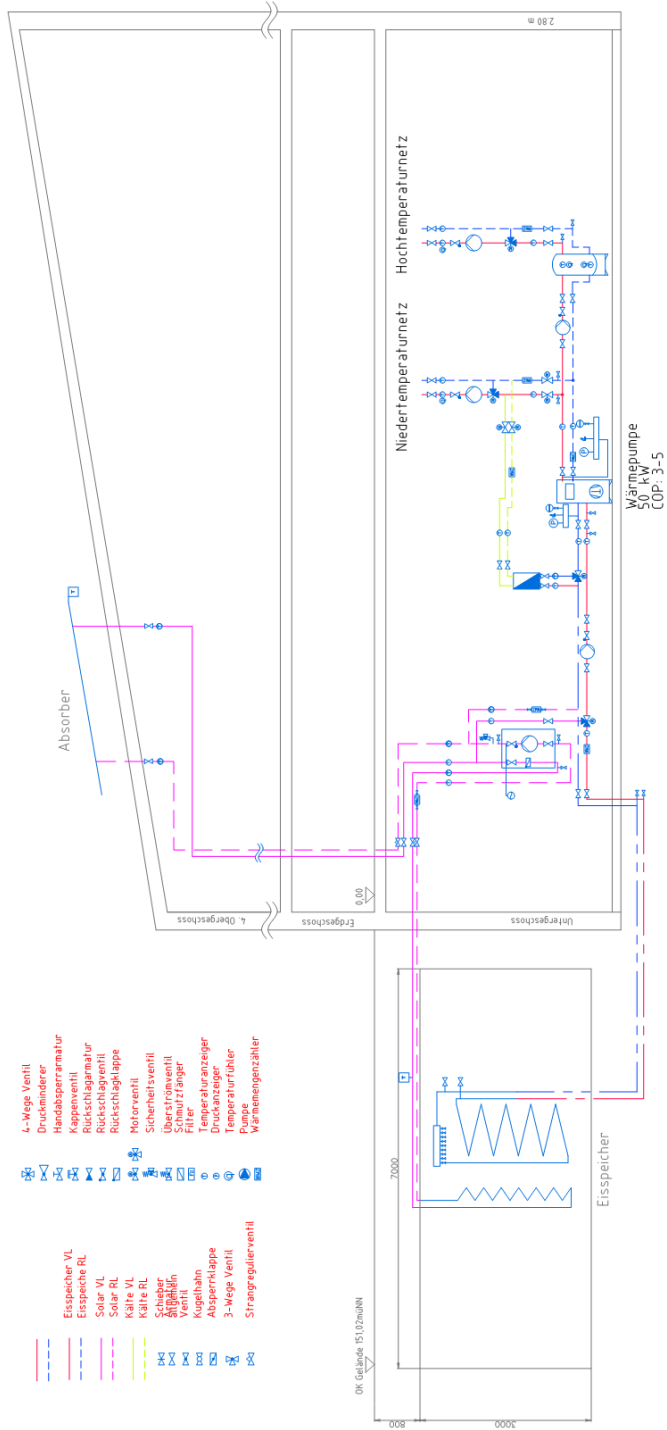


Abbildung 4: Hydraulikschema 2015-2016 , Quelle: egs-plan, angepasst durch IGS

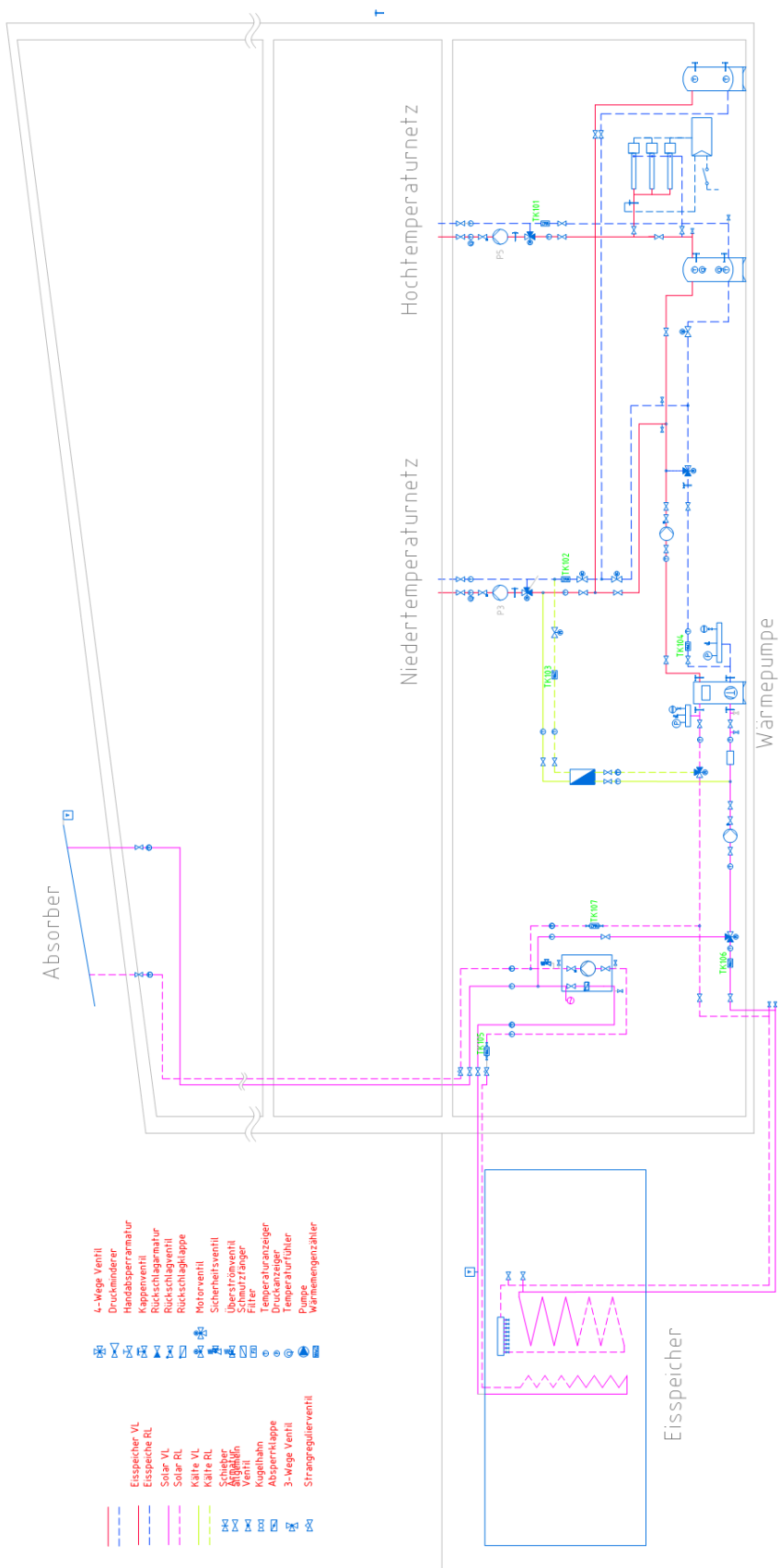


Abbildung 5: Hydraulikschema ab April 2016, Quelle: egs-plan, angepasst durch IGS



### 3 Planung und Auslegung

Das Mehrfamilienhaus wurde nach DIN 18599 mit der EnEV 2009 berechnet und ausgelegt. Die Energie Plus Bilanz erfolgt nach den Rahmenbedingungen des BMUB und BBSR zum EffizienzhausPlus Standard. Aufgrund der installierten Anlagentechnik kommen weder Heizöl noch Gas als Energieträger zum Einsatz. Das Mehrfamilienhaus deckt den Endenergiebedarf ausschließlich mit Strom.

Tabelle 3 zeigt die energetischen Kennwerte gemäß der Auslegung und Berechnung nach EnEV. Im Anhang befinden sich weitere Kennwerte nach EnEV.

**Tabelle 3: Energiebedarfswerte nach EnEV 2009**

| Energetische Kennwerte aus der Planung   |        |
|--|--------|
| Jahresheizwärmebedarf ( $Q_h$ ) absolut [kWh/a]                                    | 19.832 |
| Jahresheizwärmebedarf ( $q_h$ )spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]                 | 8,24   |
| Jahreswärmebedarf zur Trinkwarmwasserbereitung absolut [kWh/a]                     | 25.580 |
| Jahreswärmebedarf zur Trinkwarmwasserbereitung spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)] | 10,63  |
| Endenergiebedarf Strom (Strom-Mix) absolut [kWh/a]                                 | 29.974 |
| Endenergiebedarf Strom (Strom-Mix) spezifisch [kWh/(m <sup>2</sup> a)]             | 12,45  |
| Primärenergiebedarf absolut [kWh/a]  | 16.898 |
| Spezifischer Primärenergiebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]                          | 7,02   |
| Grenzwert nach EnEV (Referenzgebäude) [kWh/(m <sup>2</sup> a)]                     | 87,22  |
| Unterschreitung der gesetzlichen Anforderung (Referenzgebäude) [%]                 | 91,9   |

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Endenergiebilanz aus der Gebäudeplanung und den Bilanzrahmen Effizienzhaus Plus. Gemäß der Planung wird für das Gebäude ein bilanzieller Stromüberschuss von etwa 24.500 kWh/a erwartet. In der Bilanzierung ist die E-Mobilität nicht berücksichtigt worden.

Der Eigendeckungsanteil liegt nach der Bilanzierung auf EnEV-Basis mit erweitertem Bilanzrahmen nach Effizienzhaus Plus bei 75 % [1]. In der Praxis wird bei der vorhandenen Kombination aus Bedarf, Batteriekapazität und PV-Anlagengröße dieser hohe Wert jedoch nicht zu erreichen sein. Der hohe Wert leitet sich aus dem Berechnungsverfahren basierend auf §5 der EnEV ab.

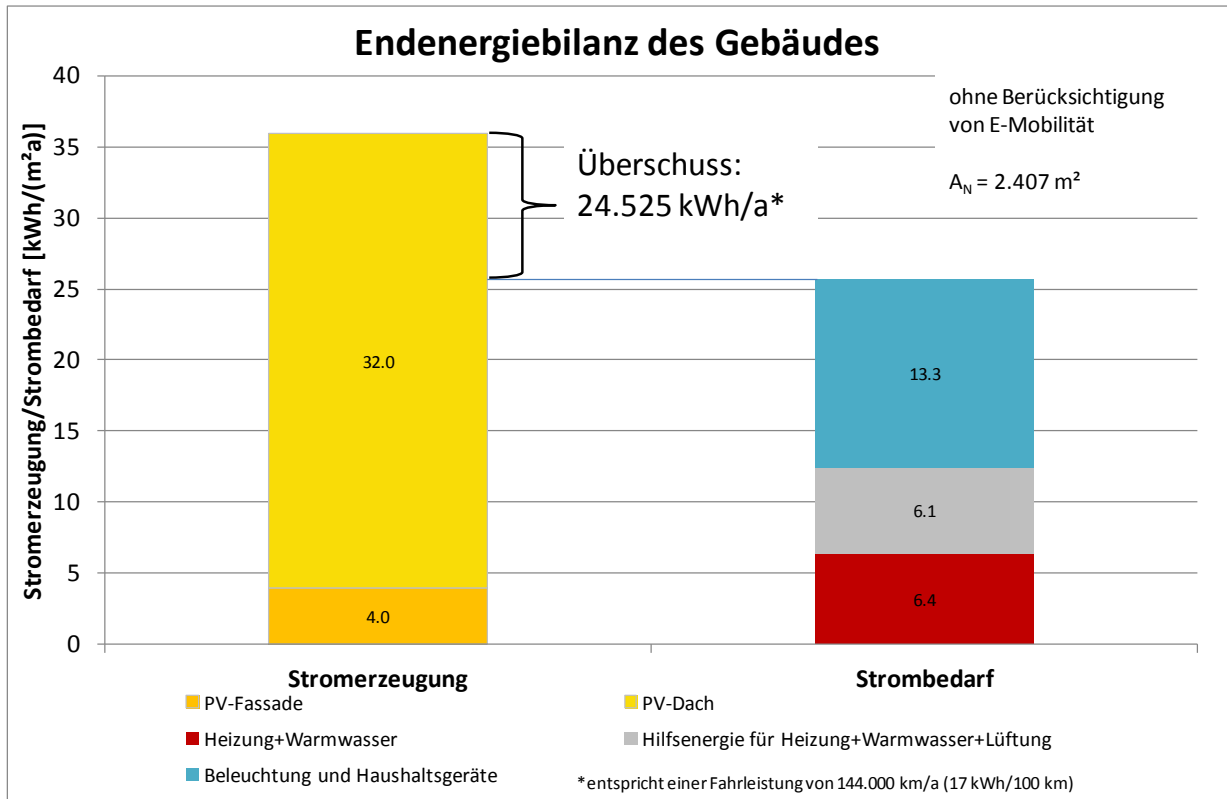


Abbildung 6: Endenergiebilanz nach Effizienzhaus Plus auf Basis von [1]

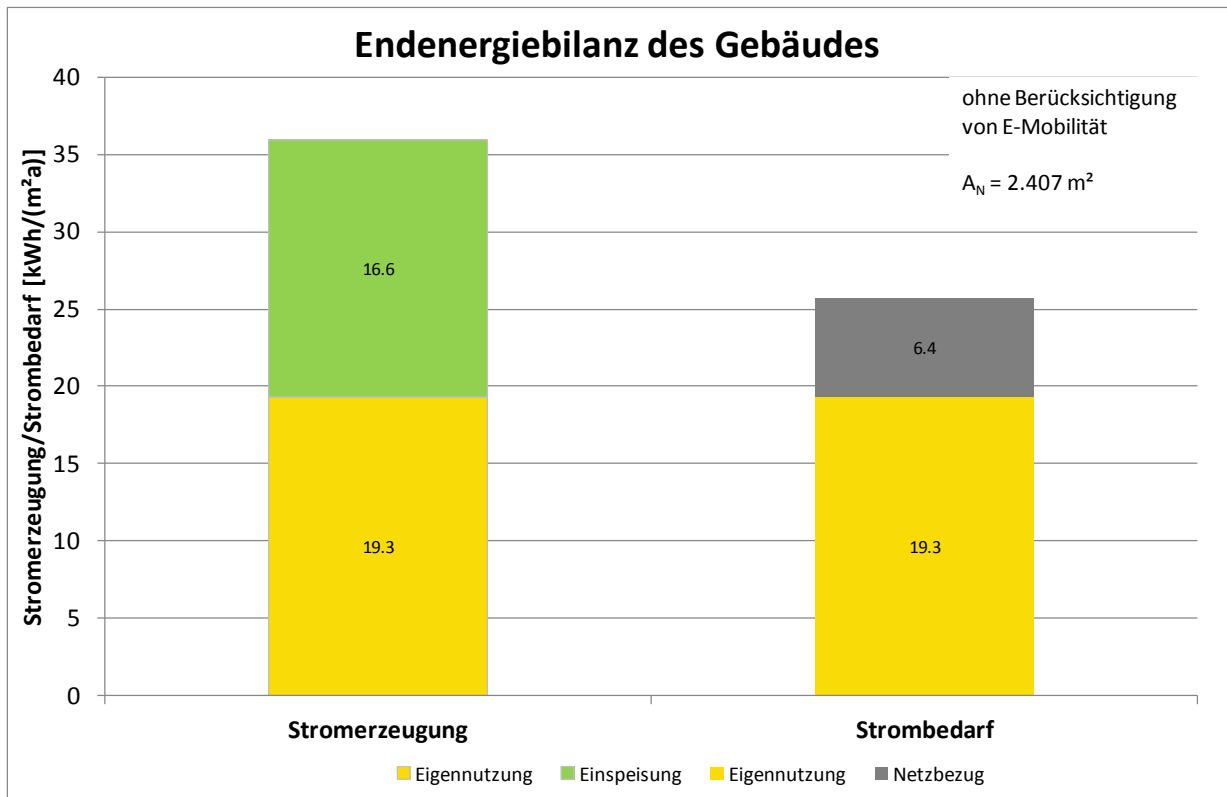


Abbildung 7: Endenergiebilanz mit Berücksichtigung von Eigenstromnutzung auf Basis von [1]

Abbildung 8 zeigt die Primärenergiebilanz des Gebäudes auf Basis der Planungswerte.

Es ergibt sich eine Bilanz von  $-10 \text{ kWh}_{EE}/(\text{m}^2\text{a})$  bezogen auf die Endenergie bzw.  $-31 \text{ kWh}_{PE}/(\text{m}^2\text{a})$  mit Primärenergiebezug.

Anzumerken ist, dass sowohl bei der Endenergie- als auch bei der Primärenergiebilanz Eigenstromnutzung für Elektromobilität nicht berücksichtigt wurde.

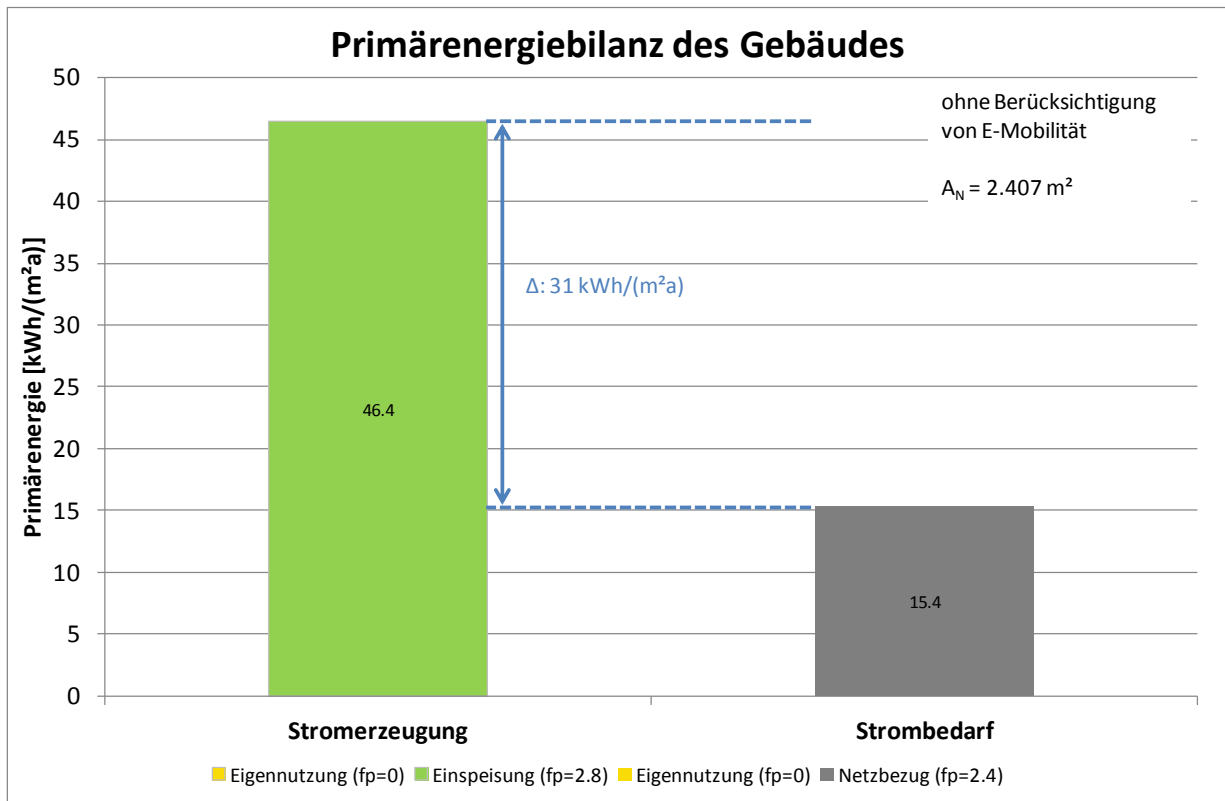


Abbildung 8: Primärenergiebilanz nach Planung/EnEV auf Basis von [1]

## 4 Mess- und Monitoringkonzept

Zur Bewertung der Gebäudeperformance und für das energetische Monitoring ist eine Infrastruktur zur Messung von Strom- und Wärmeverbräuchen installiert worden. Für die Betrachtung werden die Zählerstände von Wärmemengen- bzw. Stromzähler automatisch erfasst und weitergeleitet. Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die installierten Messstellen der Wärme- und Strommengenähler.

Der Gesamtenergieverbrauch Strom setzt sich zusammen aus dem Verbrauch der gesamten Haustechnik (Wärmepumpe, Lüftung, Umwälzpumpen, dem Allgemeinstrombedarf (u.a. für Beleuchtung der Allgemeinflächen) und Aufzug), dem Nutzerstrom aus den 17 Wohneinheiten sowie zusätzlich dem Verbrauch für die Elektromobilität. Dieser wird separat ausgewiesen, da sie wie beschrieben nicht im Bilanzkreis nach Kap. 3 inkludiert ist. Ebenso werden die Batterie-ladung und -entladung aufgezeichnet sowie die Summe aus PV-Direktertrag (ohne Zwischenspeicherung in der Batterie) und Batterieentladung gemessen, um den Gesamtertrag an regenerativem Strom zu erfassen. Die Schnittstelle zum öffentlichen Netz (Strombezug und Strom-einspeisung) wird ebenfalls aufgezeichnet.

Für die Analyse der Wärmebereitstellung werden die Wärmemenge des Solarkollektors (an Eisspeicher zur Regeneration und an Wärmepumpe), sowie die Wärmemenge aus dem Eisspeicher an die Wärmepumpe und die gesamte erzeugte Wärme der Wärmepumpe erfasst.

Auf der Abnahmeseite werden die Gesamtwärmeenergiemenge, die aus dem Speicher im Hochtemperaturnetz bereitgestellt wird, und die Gesamtwärmemenge, die im Niedertemperaturnetz verbraucht wird, gemessen.

Mit Hilfe der gesamten, von der Wärmepumpe erzeugten Wärmemenge ist so eine bilanzielle Bestimmung der Speicherverluste möglich.

Im Hochtemperaturnetz wird der Verbrauch innerhalb der Wohneinheiten für Trinkwarmwasser und den Badheizkörper, die über das Hochtemperaturnetz versorgt werden, erfasst. In drei Wohnungen gibt es je zwei Übergabestationen, von denen nur eine gezählt wird (Wohnungen 6,10,14). Hier wird der Wärmeverbrauch abgeschätzt und addiert. Ebenfalls nicht erfasst werden die Heizkörper im Dachgeschoss (Abstellräume und Trockenboden). Seit August 2017 wird die Wärmemenge des Heizregisters des Lüftungsgeräts gemessen.

Im Niedertemperaturnetz erfolgt ebenfalls in jeder Wohneinheit eine Messung des Wärmeverbrauchs der Fußbodenheizung.

Die Messung der Kühlenergie über freie Kälte erfolgt lediglich zentral.

Es werden M-Bus-Zähler verwendet, die in 15-Minuten-Intervallen ausgelesen werden.

Zur Messung des Stromverbrauchs kommen Zähler der Fa. Eltako Modell DSZ12WDM als Wandlerzähler zum Einsatz. Die Messung des Netzbezugs und der Netzeinspeisung erfolgt mit Hilfe des Zählers des EVU. Die Erfassung der Batterieladung und des PV-Ertrags erfolgt über das Batteriemanagementsystem. Ausgelesen werden jeweils der Zählerstand sowie die momentane Leistung.

Die Wärmemengen werden mit M-Bus-Zählern der Fa. Diehl bzw. seit August in Teilen der Fa. Siemens gemessen und ebenfalls automatisiert in 15-Minuten Intervallen ausgelesen. Bereitgestellt werden jeweils Vor- und Rücklauftemperaturen, die Durchflussrate, die momentane Leistung sowie die Gesamtenergiemenge (Zählerstand).

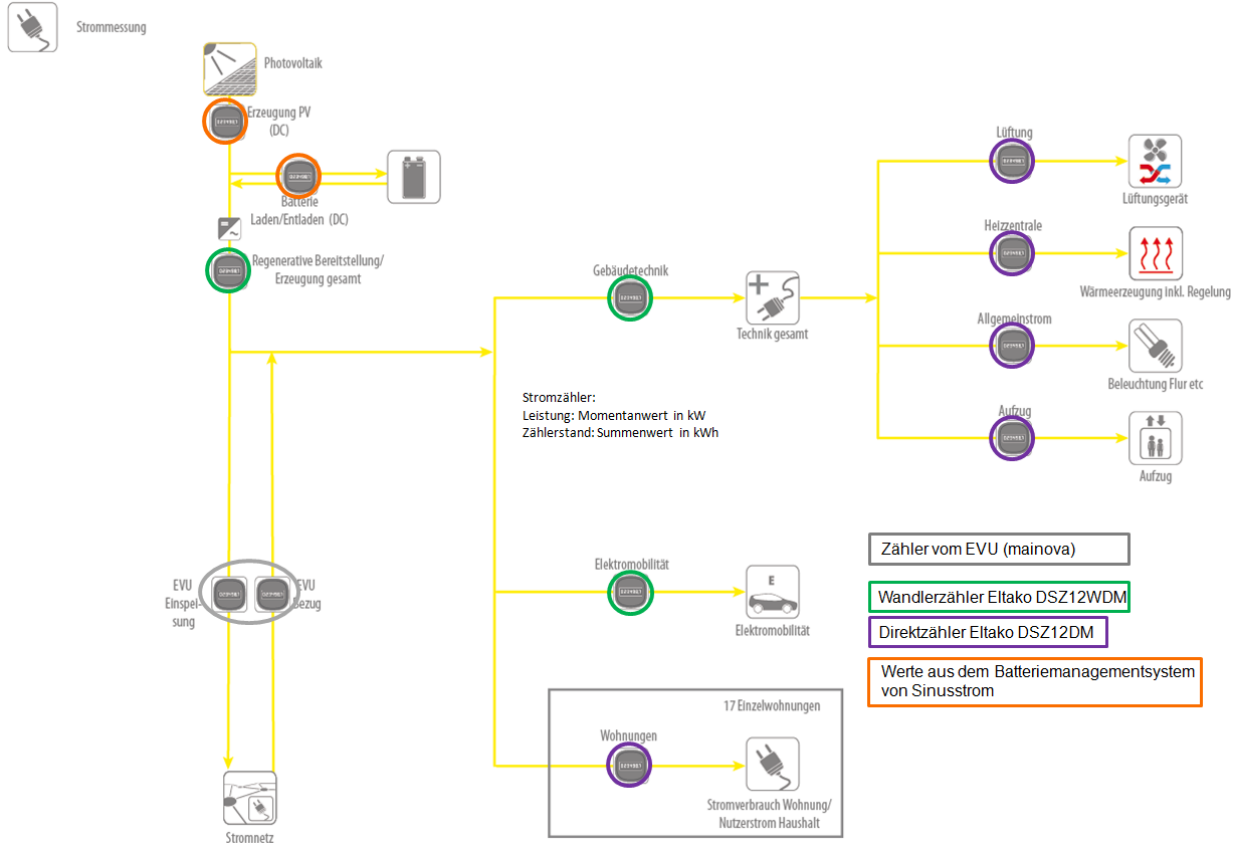


Abbildung 9: Zählerübersicht Strom

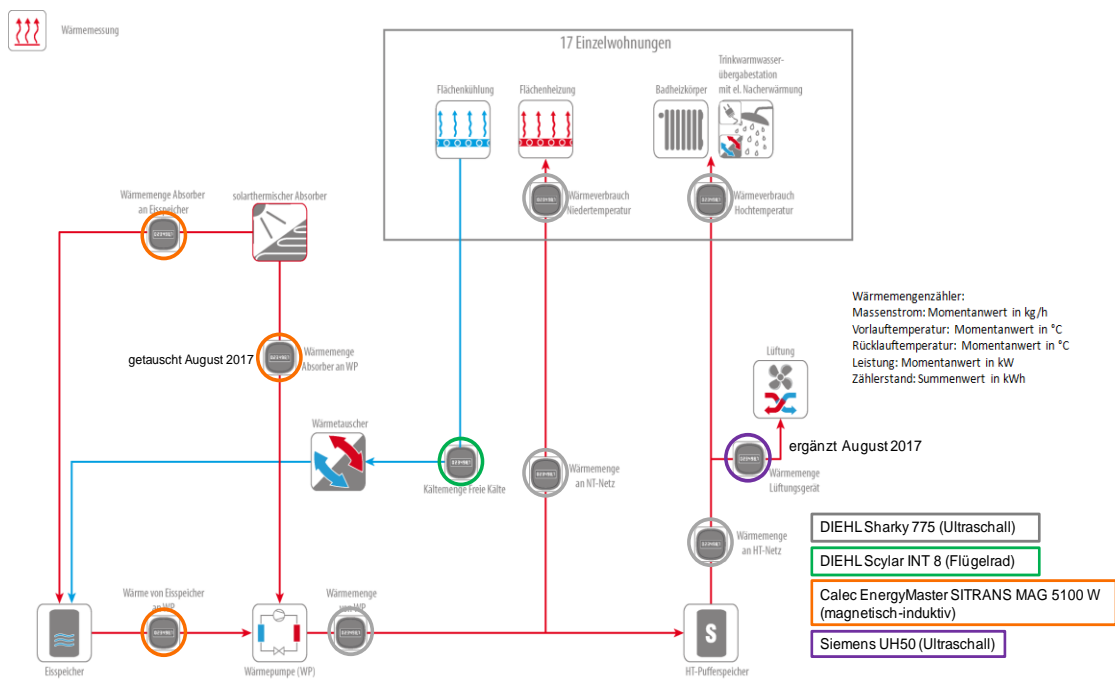
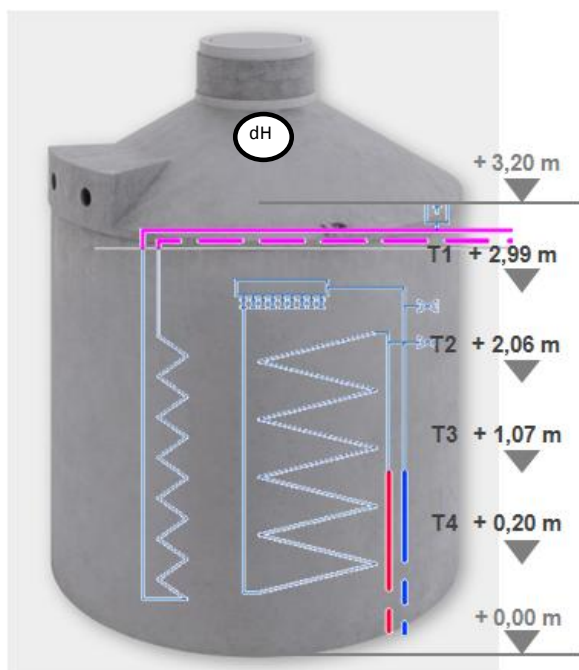


Abbildung 10: Zählerübersicht Wärme

Zusätzlich werden folgende Daten vom Eisspeicher aufgezeichnet (Abbildung 11):

- Temperatur mittig in 0,20 m Höhe
- Temperatur mittig in 1,07 m Höhe
- Temperatur mittig in 2,06 m Höhe
- Temperatur mittig in 2,99 m Höhe
- Abstand (dH) von Deckel zur Wasseroberfläche auf 3,6 m Höhe



**Abbildung 11: Messpunkte im Eisspeicher**

Diese Messdaten dienen dazu, den Grad der Eisbildung im Speicher abzuschätzen, da durch die Volumenzunahme beim Wechsel des Aggregatzustands von flüssig zu fest der Abstand der Wasser-/Eisoberfläche zum Deckel bei  $0^{\circ}\text{C}$  sinkt. Unter der Annahme einer elfprozentigen Volumenzunahme beim vollständigen Gefrieren kann bei einer Wasseroberfläche auf  $3,20\text{ m}$  Höhe ( $40\text{ cm}$  Abstand vom Sensor) bei  $20^{\circ}\text{C}$  davon ausgegangen werden, dass der vom Sensor gemessene Abstand beim vollständigen Gefrieren auf etwa  $8\text{ cm}$  sinkt.

### 4.1 Messdatenausfälle

Im Monitoring-Zeitraum Oktober 2015 bis September 2017 kam es gehäuft zu Messdatenausfällen, die durch Defekte der Stromzähler zustande kamen.

Abbildung 12 zeigt eine Übersicht der Stromzähler und ab wann die einzelnen Zähler betroffen waren.

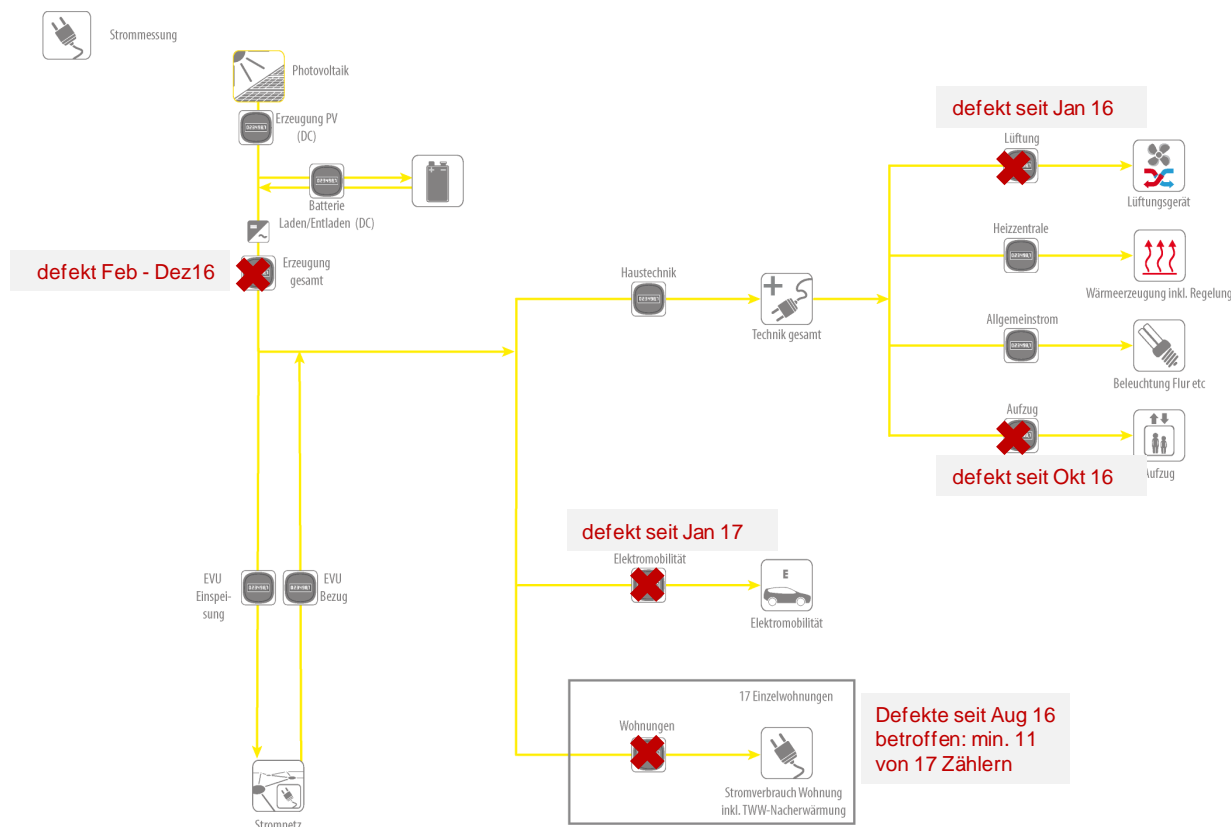


Abbildung 12: Übersicht Messdatenausfälle Stromzähler

Zum Zeitpunkt der ersten Defekte (Zähler Erzeugung gesamt und Lüftung) wurden der Bauherr und die ausführenden Firmen über die Defekte informiert. Durch die teils redundante Erfassung der Energiemengen konnte die Erfassung des Zählers „Erzeugung gesamt“ durch die Werte der Zähler „Erzeugung PV (DC)“ und „Batterie Laden/Entladen (DC)“ annähernd ersetzt werden. Die Ermittlung des Stromverbrauchs der Lüftung konnte bilanziell vorgenommen werden, bis ein zweiter Unterzähler („Aufzug“) des Zählers „Haustechnik“ ebenfalls ausfiel.

Der Defekt der Stromzähler bestand darin, dass in nicht erkennbaren Mustern eine der drei Phasen vom Zähler nicht gemessen wurde und somit falsche Werte angezeigt und gezählt wurden. Die Defekte konnten aufgedeckt werden durch unplausible Energieverbräuche auf Monatsbasis. Zusätzlich konnte bei Vor-Ort-Terminen an den Zählern der Fehlerindikator (LED) festgestellt werden, der jedoch nicht dauerhaft aktiv war. Dies bedeutet, dass die als Defekt markierten Zähler zeitweise richtig, zeitweise falsch gezählt haben. Der Zähler „Erzeugung gesamt“ war als erstes betroffen und wurde bereits im Dezember 2016 ausgetauscht.

Im August 2017 wurden alle M-Bus-Zähler, inklusive des Zählers „Erzeugung gesamt“ ausgetauscht. Der lange Zeitraum vom Erkennen und Mitteilung der Defekte im Januar 2017 bis zum



Umbau ist zum einen der Neubeschaffung ist mit mehrfamilienhauspezifischen Thematiken (Terminfindung zur Stromabschaltung) aber auch Wartezeiten und Organisation einer Ersatzlieferung von neuen Zählern, die vom Hersteller bereitgestellt wurden, zu begründen.

Bei den Wärmemengenzählern gab es ein Problem insbesondere mit dem Zähler des Direktbetriebs Absorber. Es konnte festgestellt werden, dass die gemessenen Durchflüsse geringer sind als die in der Planung vorgesehenen. Da jedoch auch hydraulische Mängel vorlagen, wurde der Zähler im Solekreis zunächst solange beibehalten, bis die Umbaumaßnahmen abgeschlossen waren. Ein Test nach den Umbaumaßnahmen zeigte, dass der Durchfluss nicht korrekt gemessen wird.

Im Zuge des Austauschs der Stromzähler wurden alle Wärmemengenzähler im Solekreis (Abbildung 10, orange Kreise) ebenfalls im August 2017 getauscht.

Ein Abgleich der Daten vor und nach dem Zählertausch hat gezeigt, dass die Messung der Erträge der Solarabsorber fehlerbehaftet war.

Die Messwerte im Zeitraum von August 2017 bis Ende Dezember 2017 sind plausibel.

## 5 Energetisches-Monitoring 2015 - 2017

Auf Basis des in Kapitel 4 dargestellten Mess- und Monitoringkonzeptes werden die energetischen Bilanzen und Kennwerte der Anlagentechnik unter Berücksichtigung der im Laufe des Monitorings aufgetretenen Umbaumaßnahmen sowie Datenausfällen so weit möglich gebildet.

Als Messzeiträume werden zwei Jahre definiert. Das jeweilige Messintervall erstreckt sich von Oktober bis September des Folgejahres. Die Messzeiträume ergeben sich somit zu:

10/2015 bis 09/2016 (Kurzbezeichnung: 15/16)

10/2016 bis 09/2017 (Kurzbezeichnung: 16/17)

### 5.1 End- und Primärenergie sowie Effizienzhaus Plus-Nachweis

Für die Auswertung der End- und Primärenergie sowie dem Nachweis des Effizienzhaus Plus werden aufgrund der in Kap. 4.1 beschriebenen Messdatenausfälle nur der Netzbezug und die Netzeinspeisung dargestellt und ausgewertet, da es bei diesen Zählern keine Ausfälle gab. Die Betrachtung von Netzbezug und Netzeinspeisung sind ausreichend, um eine Aussage zur Erreichung des Effizienzhaus Plus Standards treffen zu können.

Der Effizienzhaus Plus Standard verlangt eine negative End- und Primärenergiebilanz des Gebäudes. Somit kann entweder die gesamte Erzeugung des Gebäudes mit dem Gesamtverbrauch des Gebäudes verglichen werden. Alternativ ist es auch möglich nur den Energieexport (hier: Netzeinspeisung) und den Energiebezug (hier: Netzbezug) zu betrachten, da eigengenutzter Strom im Falle eines Nur-Strom-Hauses jeweils als Konstante hinzuzuaddieren ist, um Gesamtverbrauch und Gesamterzeugung zu bestimmen. Es gilt (Nur-Strom-Haus) vereinfacht:

- 1) Gesamtverbrauch Endenergie = Strom aus Netzbezug + eigengenutzter PV-Strom
- 2) Gesamterzeugung Endenergie = eingespeister Strom + eigengenutzter PV-Strom
- 3) Endenergiebilanz = Gesamtverbrauch Endenergie - Gesamterzeugung Endenergie  
 Endenergiebilanz = Strom aus Netzbezug – eingespeister Strom

Für die Primärenergiebilanz gelten diese Gleichungen analog.

Auf weitere Zähler und Detailauswertungen wird in den folgenden Kapiteln zur Strombilanz eingegangen.

Wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, kamen im Zuge von Umbaumaßnahmen im Messzeitraum 15/16 zusätzliche Wärmeerzeuger zum Einsatz. Der Ölverbrauch des Hotmobils lag bei 8.863 Litern und wird vereinfacht mit einem Endenergiekennwert von 10 kWh/l berücksichtigt. Der Stromverbrauch des elektrischen Durchlauferhitzers (Zeitraum 16/17) ist implizit in der Netzeinspeisung und im Netzbezug berücksichtigt. Erhöhter Stromverbrauch durch den elektrischen Durchlauferhitzer führt zu einer geringeren Netzeinspeisung von erzeugtem PV-Strom und so zu einem erhöhten Netzbezug.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die End- und Primärenergienmengen der beiden Messzeiträume. Das Ziel, den Effizienzhaus Plus Standard (negative Endenergiebilanz und negative Primärenergiebilanz) im Betrieb zu erreichen, konnte nicht realisiert werden, da zunächst diverse Mängel beseitigt und Einregulierungen umgesetzt werden mussten (kein Regelbetrieb, zusätzliche Wärmeerzeuger(siehe Kapitel 2.3.1)).

Im Messzeitraum 15/16 wurden noch 11,1 kWh/(m²a) mehr aus dem Netz bezogen als eingespeist sowie 36,8 kWh/(m²a) zusätzliche Endenergie in Form von Heizöl benötigt, sodass insgesamt 48,7 kWh/(m²a) mehr verbraucht als eingespeist wurden.

2016/2017 konnte die Differenz auf 12,1 kWh/(m²a) reduziert werden.

Zu erkennen ist, dass sich die Bilanz vom ersten zum zweiten Messjahr durch die Anpassungen der Anlage deutlich verbessert hat, jedoch weiterhin mehr Energie bezogen als eingespeist wird. Ein weiterer Grund für die erhöhten Verbräuche ist, dass aufgrund erhöhter Anlagen- und Leitungsverluste und Abweichungen im Nutzerverhalten deutlich mehr Wärme erzeugt werden musste, als in der Planung angesetzt wurde (vgl. Kap.5.3).

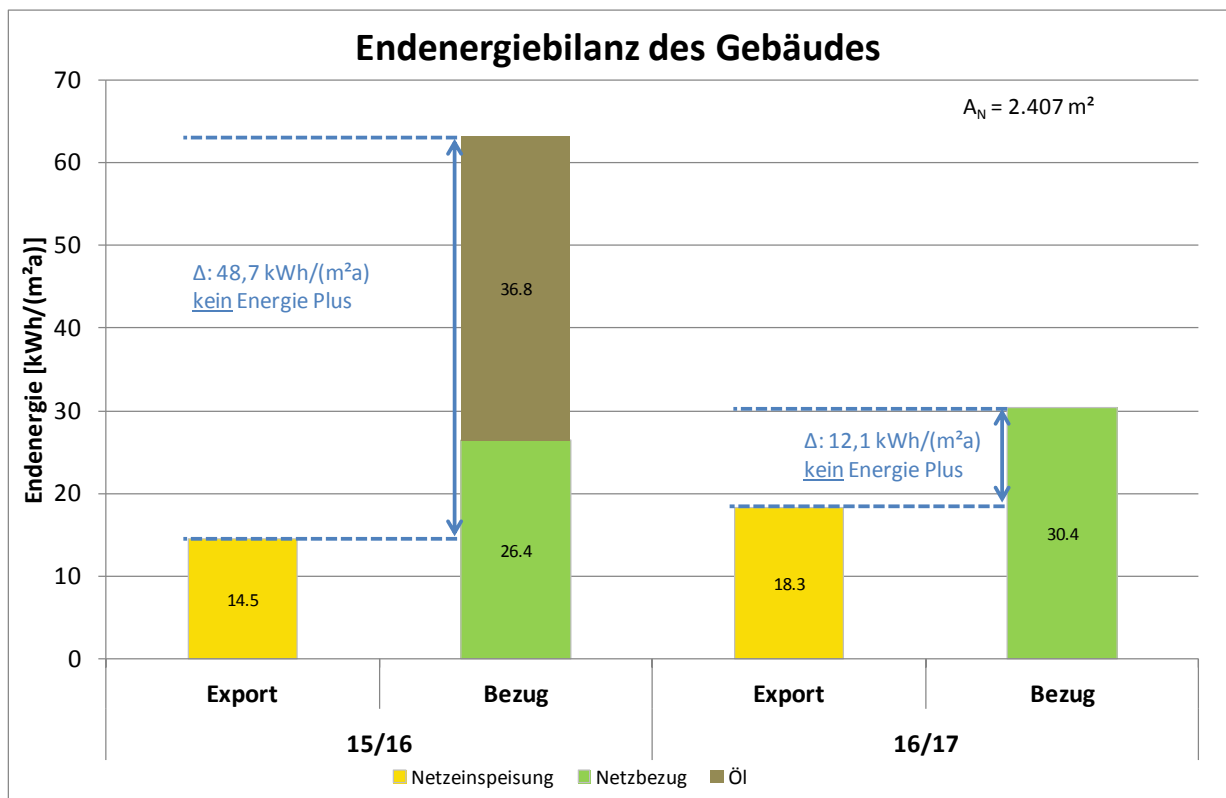


Abbildung 13: Endenergiebilanz Messzeitraum 2015/2016 und 2016/2017

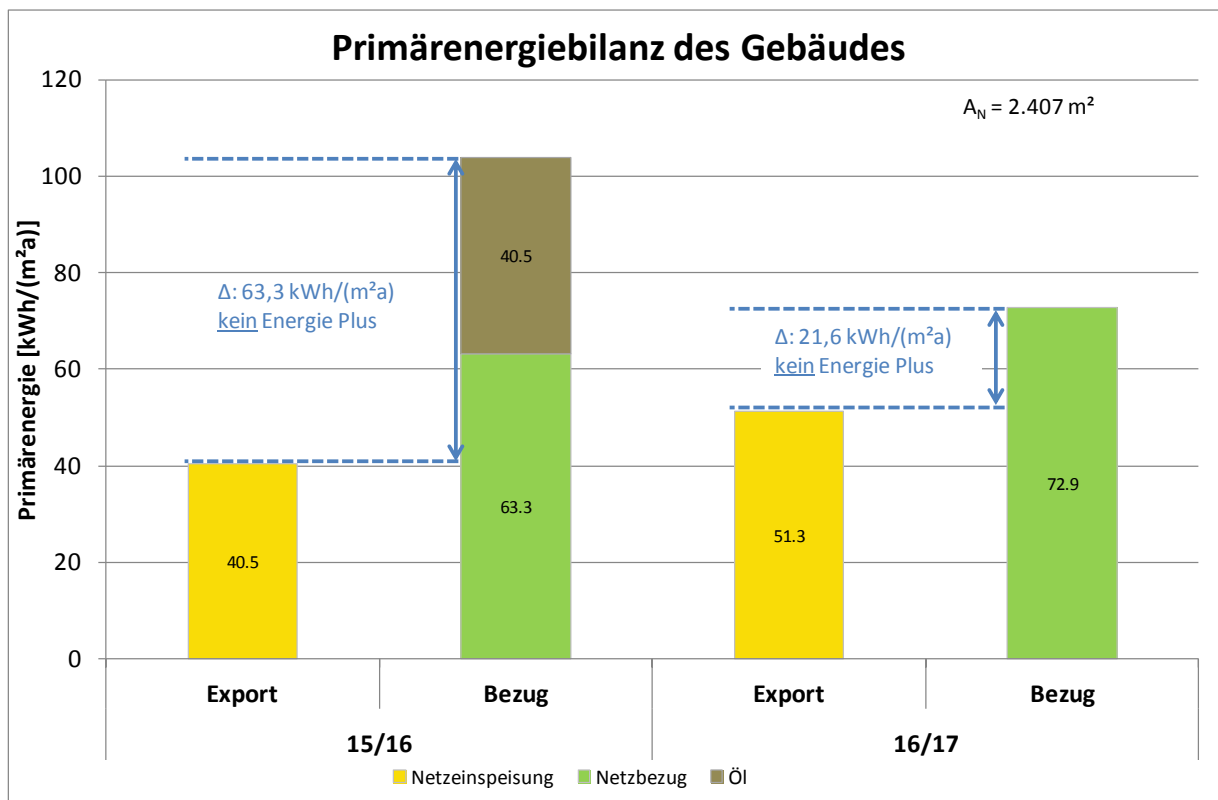


Abbildung 14: Primärenergiebilanz Messzeitraum 2015/2016 und 2016/2017

## 5.2 Strombilanz

Der jährliche Gesamtstromverbrauch beträgt 111.539 kWh/a im Messzeitraum 2015/2016 und steigt auf 124.998 kWh/a im Messzeitraum 2016/2017. Auf  $A_N$  bezogen ergibt sich ein mittlerer Gesamtstromverbrauch von 49,1 kWh/(m²a) und damit etwa 37 % höher als in der Planung angenommen. Aufgrund der beschriebenen Messdatenausfälle wurde der Gesamtstromverbrauch aus den dauerhaft fehlerfreien Zählern „Erzeugung PV (DC)“ sowie der Netzeinspeisung und dem Netzbezug bilanziell ermittelt.

Tabelle 4: Gesamt-Stromverbrauch 2015-2017

|                                  | Messzeitraum 2015/2016 | Messzeitraum 2016/2017 |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Gesamtstromverbrauch [kWh/a]     | 111.539                | 124.998                |
| Spez. Stromverbrauch [kWh/(m²a)] | 46,3                   | 51,9                   |

Im Weiteren wird näher auf die einzelnen Stromverbraucher und auf die Stromerzeugung eingegangen.

Abbildung 15 zeigt den Vergleich der Summe der einzelnen Zähler der Haustechnik und die Messung des Gesamtzählers Haustechnik (vgl. Abbildung 9). Es ist zu erkennen, dass abgesehen vom November und Dezember 2015, als es noch teilweise Probleme bei der Messdatenverarbeitung gab, die Gegenüberstellung der Einzelzähler mit dem Hauptzähler ausgeglichen ist. Beim Vergleich wird seit Juli 2016 der Ausfall des Zählers für die Lüftungsanlage deutlich. Die Differenz zwischen der Summe der Einzelzähler und der Hauptzähler nimmt um etwa 800 bis 1.000 kWh im Monat zu, was dem typischen Verbrauch der Lüftungsanlage in den vorherigen Monaten entspricht.

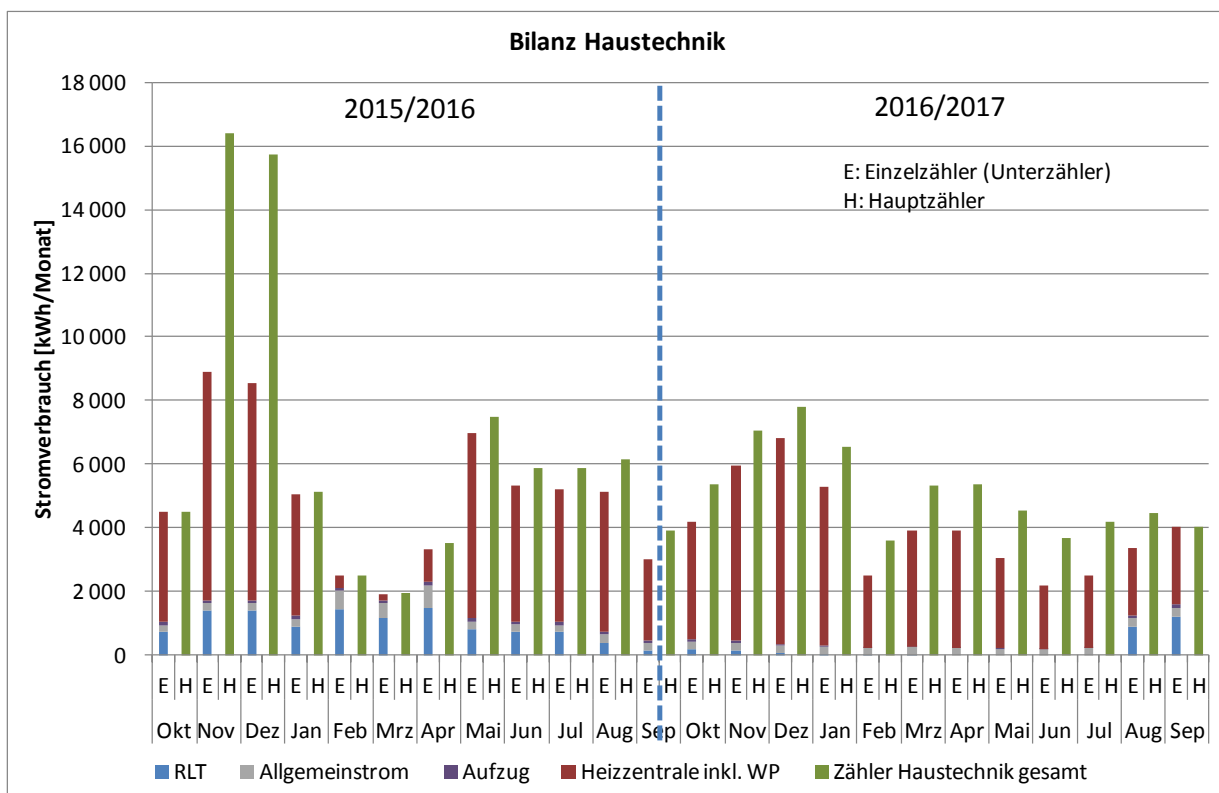


Abbildung 15: Stromverbrauch nach Art des Verbrauchers 10/2015 bis 09/2017

Im Folgenden werden die Unterzähler einzeln betrachtet.

Festzuhalten ist, dass, wie bereits beschrieben wurde, im August 2017 alle Stromzähler der Fa. Eltako (vgl. Abbildung 9) getauscht wurden. Fehlerbehaftete Werte werden in den Graphiken transparent dargestellt.

Abbildung 16 zeigt den Stromverbrauch der Lüftungsanlage. Der Stromverbrauch liegt zwischen 800 und 1200 kWh/Monat und ist abhängig vom eingestellten Zeitprogramm. Es ist zu erkennen, dass im April 2016 Anpassungen durchgeführt wurden (Reduktion des Volumensstroms auf minimale Stufe, Mindestluftwechsel) und sich der Stromverbrauch somit ca. halbiert hat. Unter der Annahme von ca. 1000 kWh/Monat ergibt sich ein flächenspezifischer Stromverbrauch von ca. 5 kWh/(m²a) und somit ein Anteil von ca. 10 % am Gesamtstromverbrauch (vgl. Tabelle 4).

Anfang 2017 wurde auf Wunsch der Mieter ein Zeitprogramm in der Lüftungsanlage hinterlegt, bei dem tagsüber der Volumenstrom erhöht wird. Durch die Änderung steigt der Stromverbrauch der Lüftungsanlage wieder deutlich an. Diese Veränderung zeigt sich nach dem Datenausfall bis zum Zählerwechsel im August 2017 besonders im Messwert des Monats September 2017, der bei ca. 1200 kWh/Monat liegt.

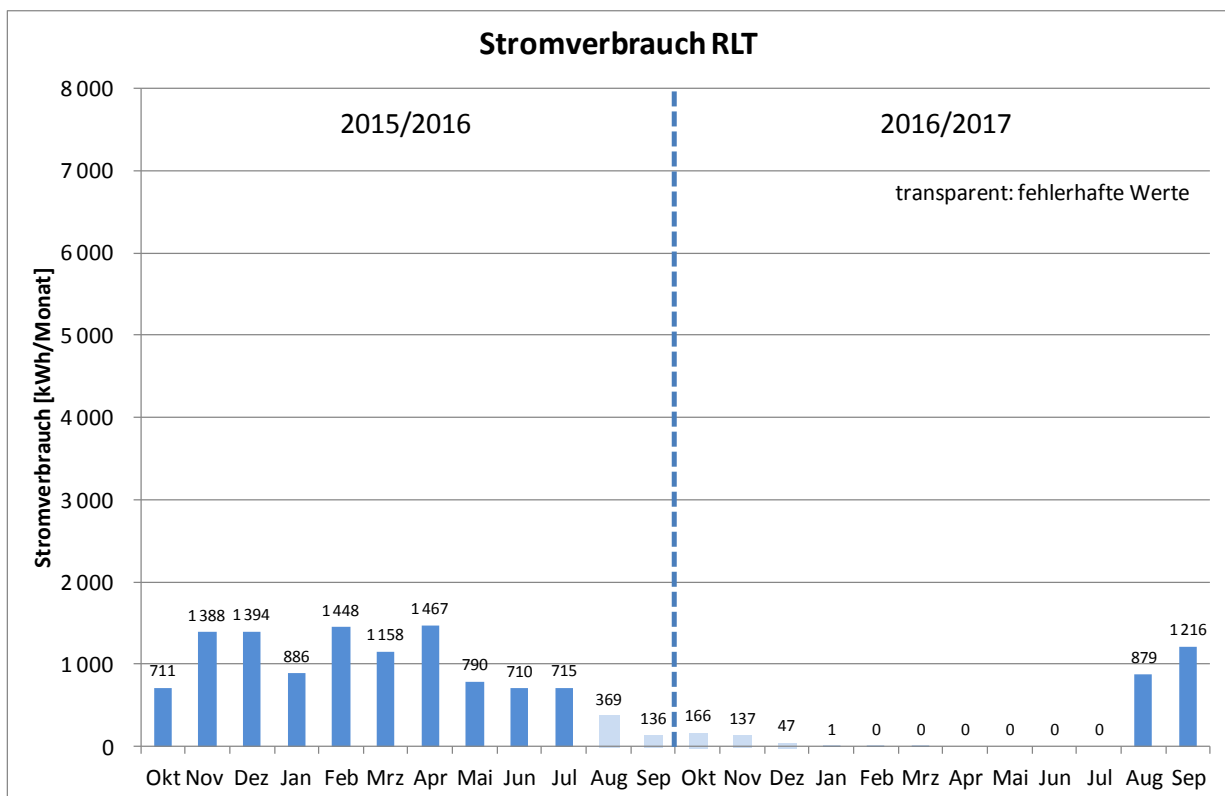


Abbildung 16: Messwerte Zähler RLT 10/2015 bis 09/2017

Der Allgemeinstromverbrauch liegt im Bereich von 200 bis 250 kWh/Monat, also im Bereich von 1 bis 1,3 kWh/(m²a) und stellt mit einem Anteil von ca. 2 % am Gesamtstromverbrauch einen Kleinverbraucher dar.

Die erhöhten Werte von Februar bis April 2016 sind mit den Umbaumaßnahmen in der Heizzentrale verbunden.

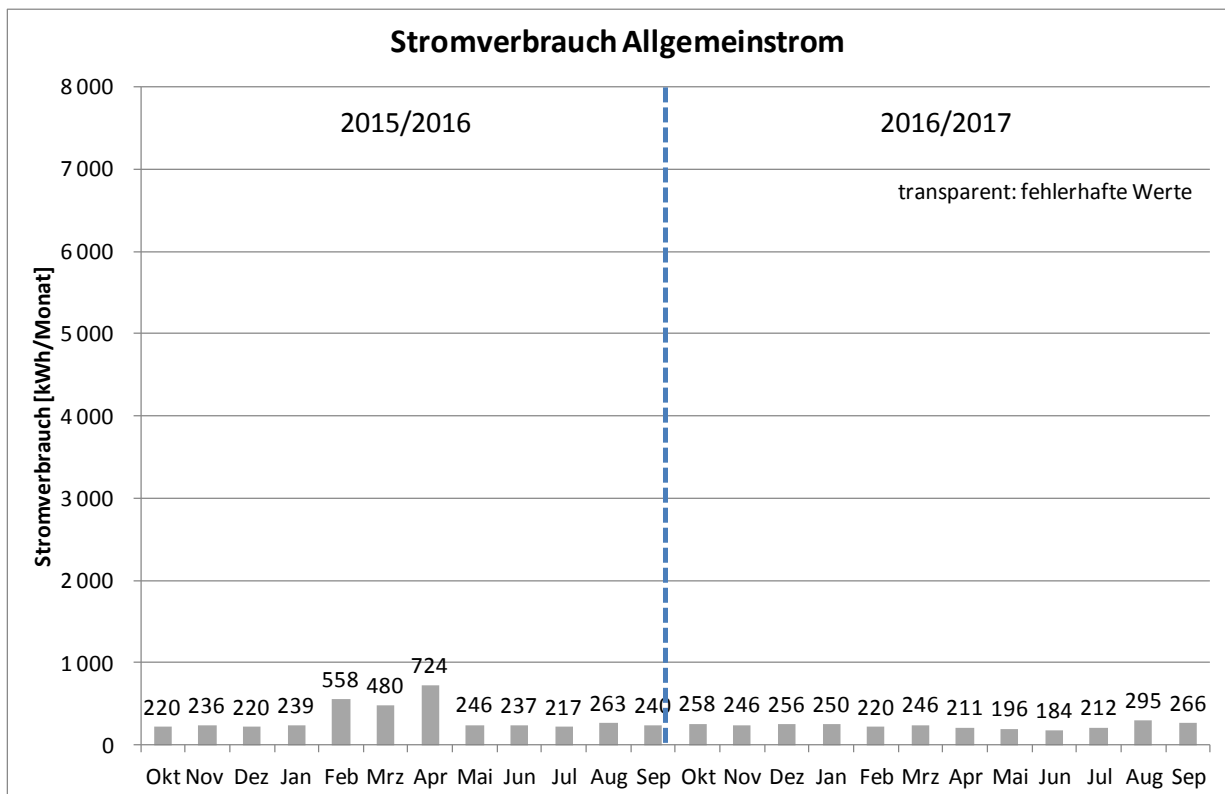


Abbildung 17: Messwerte Zähler Allgemeinstrom, 10/2015 bis 09/2017

Der Stromverbrauch für den Aufzug (Abbildung 18) liegt auf dem Niveau von 100 kWh/Monat bzw. 0,5 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Werte ab Oktober 2016 bis August 2017 sind fehlerbehaftet.

In der Planungsphase von Gebäuden mit Aufzügen muss daher nur ein minimaler Aufschlag für den Strombedarf je Aufzug Berücksichtigung finden. Im Effizienzhaus Plus Standard wird für den Nutzerstrombedarf eine Vorgabe von 20 kWh/(m<sup>2</sup>a) gemacht. Der zusätzliche Verbrauch durch einen Aufzug entspricht also etwa 2,5 %.

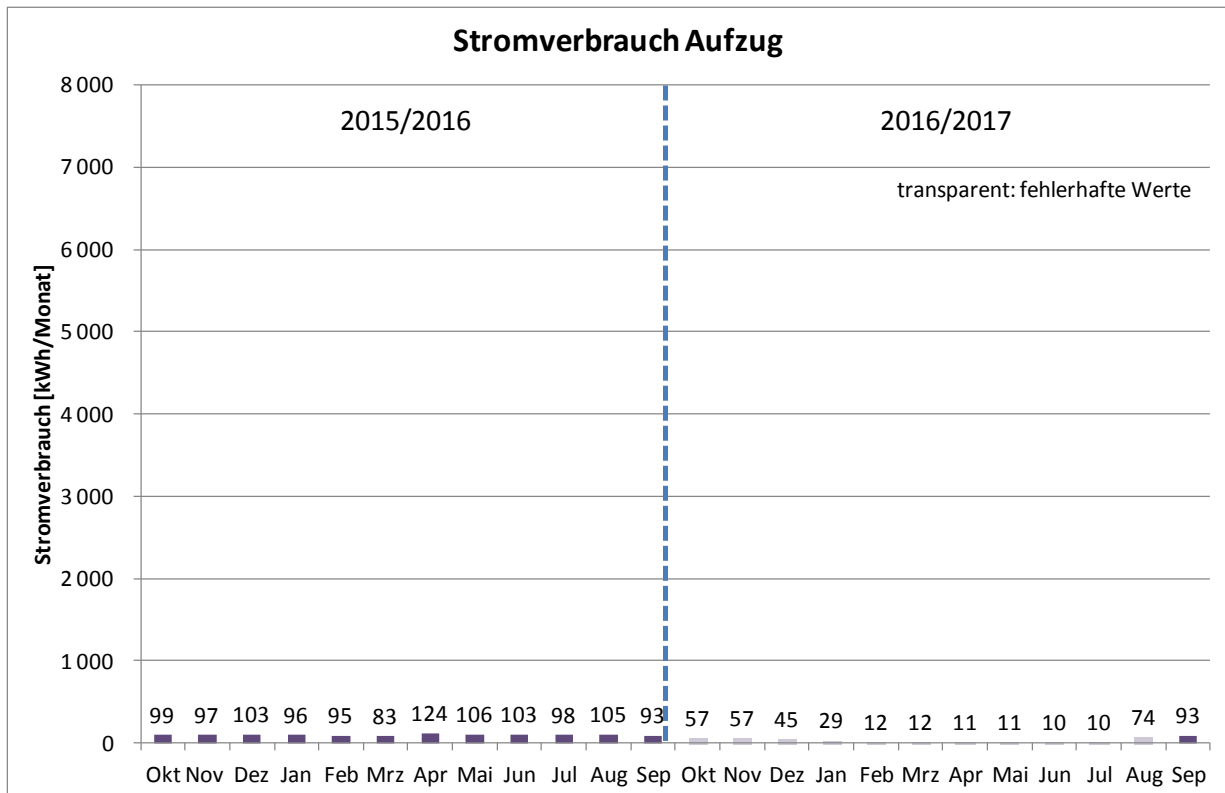


Abbildung 18: Messwerte Zähler Aufzug, 10/2015 bis 09/2017



Der im Winter größter Verbraucher ist, wie zu erwarten, die Heizzentrale mit der Wärmepumpe. Auf Basis der erzeugten Wärmemenge der Wärmepumpe ist davon auszugehen, dass die gemessenen Werte in allen Monaten korrekt sind. Die geringen Stromverbräuche von Februar 2016 bis April 2016 sind auf den Umbau der Heizzentrale und dem Betrieb des Hotmobils zurückzuführen. Die Wärmepumpe war nicht in Betrieb und daher sinkt der Stromverbrauch.

Aufgrund von Problemen im Hochtemperaturnetz (hohe Verluste) musste auch in den Sommermonaten 2016 vergleichsweise viel Wärme erzeugt werden (vgl. Kap. 5.3), sodass Stromverbräuche von über 1,8 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) entstanden. Unter der Annahme, dass nur Trinkwarmwasserverbrauch im Sommer vorhanden ist, sollte der Stromverbrauch der Wärmepumpe im Bereich von 0,3 bis 0,4 kWh/(m<sup>2</sup> Monat) sein (Annahme: 12,5 kWh/(m<sup>2</sup>a) Trinkwarmwasserverbrauch und eine Arbeitszahl von 3).

Der verminderte Strombedarf im Februar 2017 ist auf die Integration eines elektrischen Durchlauferhitzers (vgl. Kap. 2.3.1) im Januar 2017 ist der hier gemessene Stromverbrauch wie auch die Wärmeenergie durch die Wärmepumpe gesunken. Der Anschluss des Durchlauferhitzers erfolgte über den Stromkreis der E-Mobilität, dessen Zähler zu diesem Zeitpunkt bereits defekt war (vgl. Abbildung 21), sodass der Verbrauch des Durchlauferhitzers nicht beziffert werden kann.

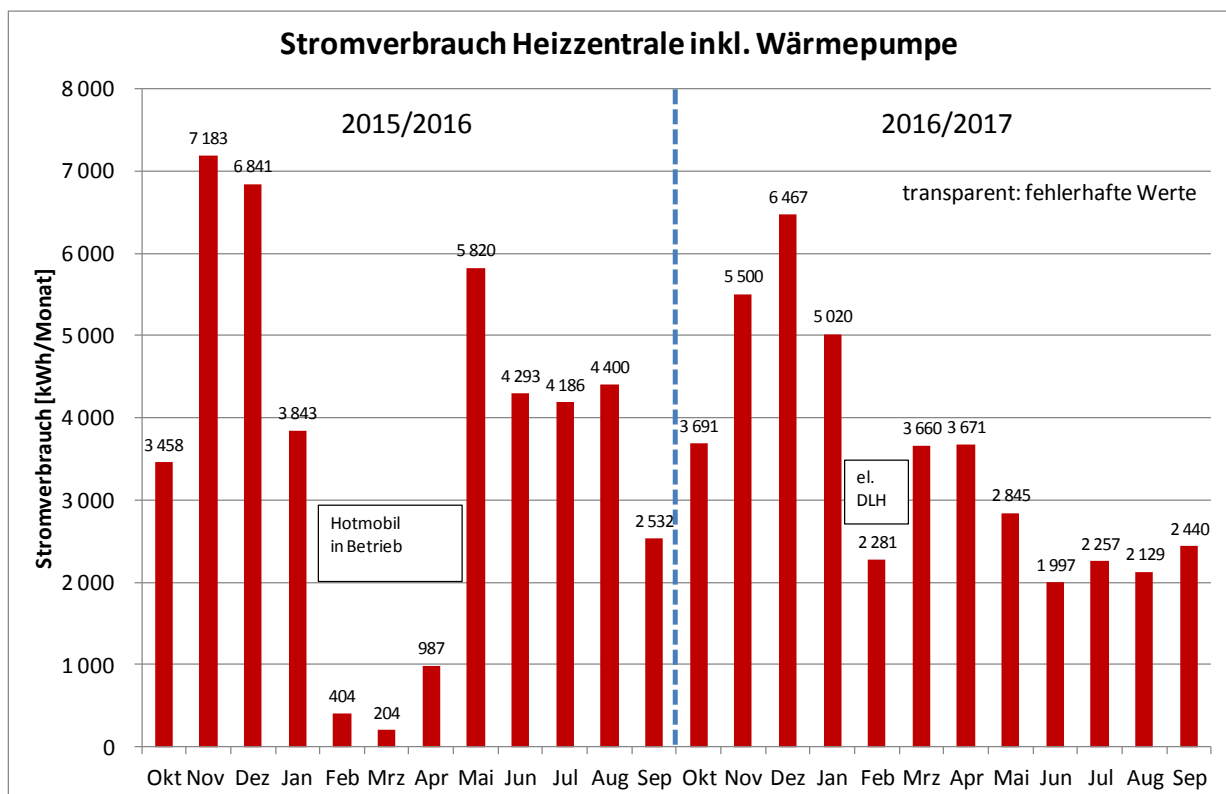


Abbildung 19: Messwerte Zähler Heizzentrale inklusiver Wärmepumpenstrom, 10/2015 bis 09/2017

Der Gesamtstromverbrauch aller Wohneinheiten (Haushaltsstromverbrauch) liegt zwischen 1.400 kWh/Monat und etwa 3.400 kWh/Monat (Abbildung 20). Die geringen Verbrauchswerte zu Beginn der Messperiode beruhen darauf, dass bis zum Jahresbeginn 2016 noch nicht alle Wohnungen vermietet waren.

Ein Verbrauch von 3.400 kWh/Monat entspricht im Schnitt 2.400 kWh/(WE\*a) bzw. 16,95 kWh/(m²a) und ist damit leicht geringer als der im Effizienzhaus Plus Standard angesetzte Wert von maximal anzusetzende Verbrauch von 2.500 kWh/(WE\*a) bzw. 20 kWh/(m²a) [3].

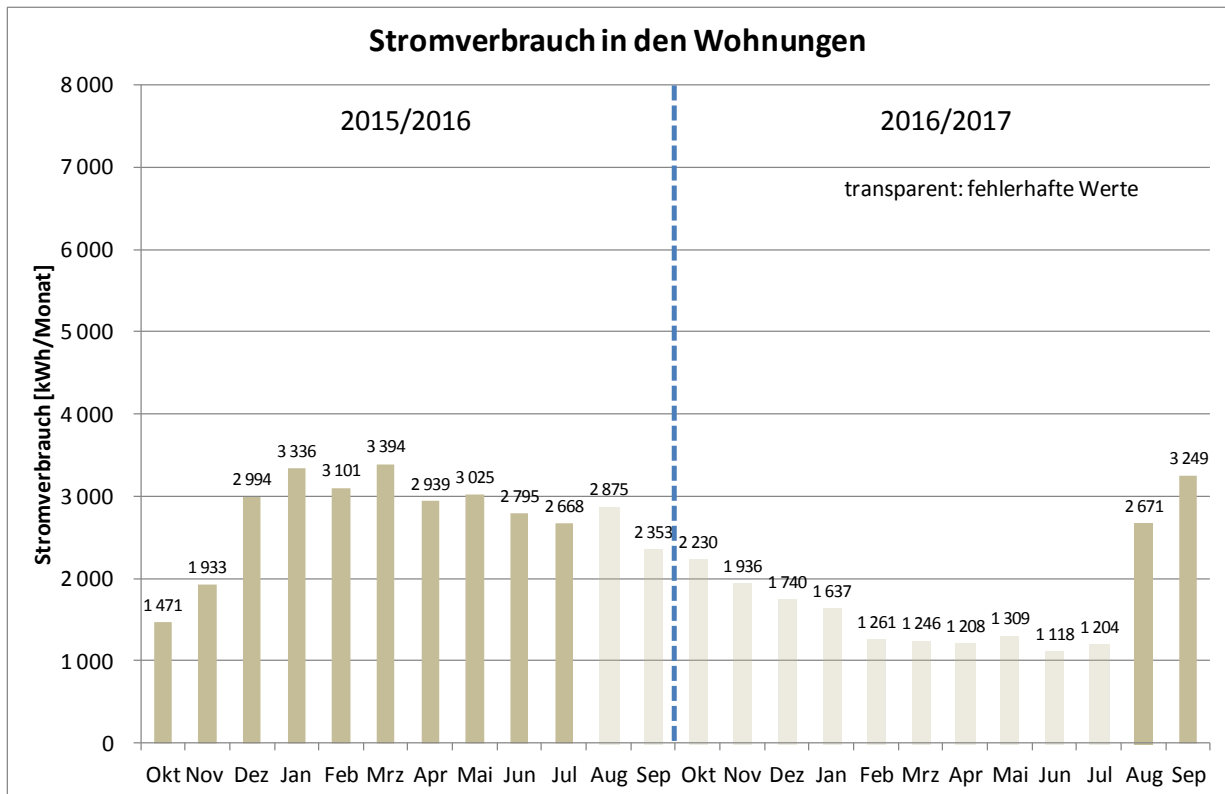


Abbildung 20: Summe Messwerte Zähler der 17 Wohneinheiten, 10/2015 bis 09/2017

Abbildung 21 stellt den Stromverbrauch der E-Mobilität dar. Es kann anhand der Messdaten aufgezeigt werden, dass bei den Bewohnern des Gebäudes die Elektromobilität kaum angenommen wird. In der Tiefgarage des Gebäudes stehenden Bewohnern vier Ladestationen sowie ein Auto im Car-Sharing zur Verfügung.

Viele Monate zeigen keinen Verbrauch, dazwischen wird ein Verbrauch von 65 bis 900 kWh/erfasst. Diese Werte sind nicht aussagekräftig für eine konstante Nutzung von E-Mobilität.

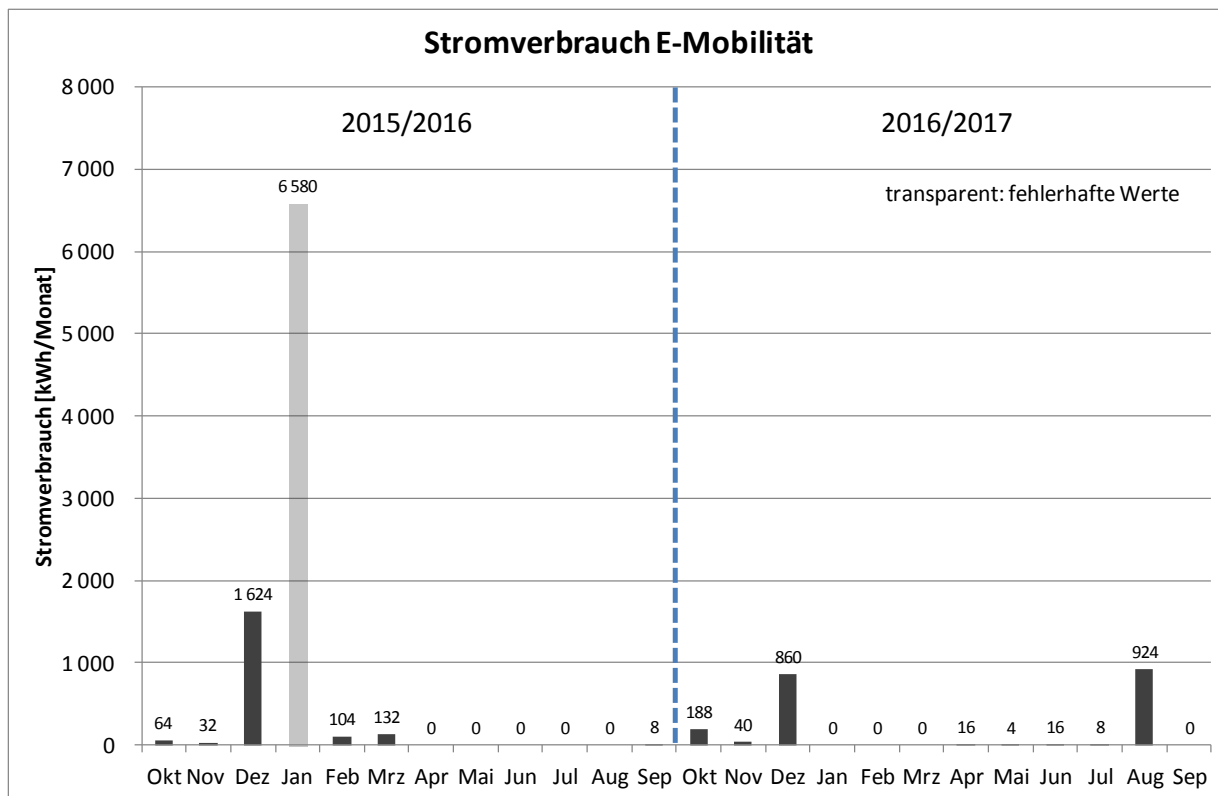


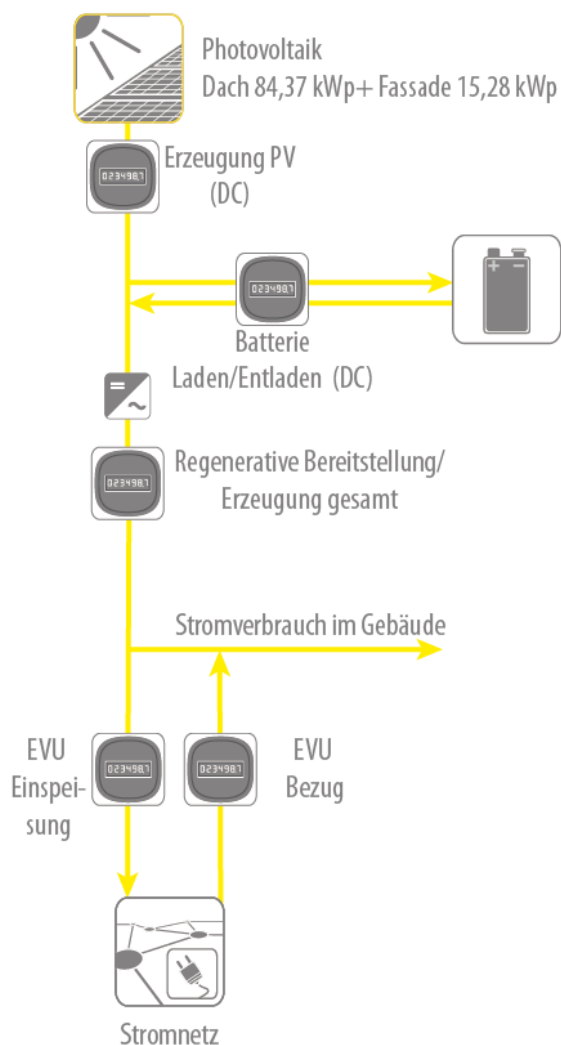
Abbildung 21: Messwerte Zähler E-Mobilität, 10/2015 bis 09/2017

### 5.2.1 Stromerzeugung - PV-Ertrag und Batterie

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Monitorings für die Stromerzeugungsanlage dargestellt.

Im Mehrfamilienhaus Riedberg gibt es die Besonderheit, dass die Batterie auf der Gleichstromseite installiert wurde (Abbildung 22). Dies bedeutet, dass ein Wechselrichtungsvorgang gegenüber typischen Anlagen, bei denen die Stromspeicher aus dem Wechselstromhausnetz gespeist werden und auf der AC-Seite eingebunden sind, eingespart wird.

Zur Auswertung und Analyse stehen Messwerte für die gleichstromseitige Stromerzeugung, getrennt nach Dach- und Fassadenanlage, Messwerte für die Batteriebeladung und -entladung sowie Messwerte der ins Hausnetz eingespeisten Wechselstrommenge zur Verfügung.



**Abbildung 22: Darstellung der regenerativen Stromerzeugung inkl. des lokalen Stromspeichers der (Batterie auf Gleichstromseite)**

In Abbildung 23 ist die Stromerzeugung der PV-Module auf der Gleichstromseite aufgeteilt in Fassade und Dach aufgetragen. Die Daten stammen aus dem Batteriemanagementsystem des Herstellers und stehen erst seit November 2015 zur Verfügung.

Im ersten Auswertungsjahr (2015/2016) wird der Planungswert von ca. 85.000 kWh/a mit etwa 82.000 kWh/a für Dach und Fassade leicht unterschritten. Für die erste Messperiode liegen jedoch nur elf Monate zugrunde. Im Messzeitraum 2016/2017 werden die Planungswerte übertroffen. Die spezifischen Erträge liegen bei 1.038 (Dach) bzw. 549 kWh/(kWp a) (Fassade) und damit im prognostizierten Bereich (vgl. Abbildung 6). Der Anteil der Stromerzeugung über die Fassade liegt bei ca. 8,5 %.

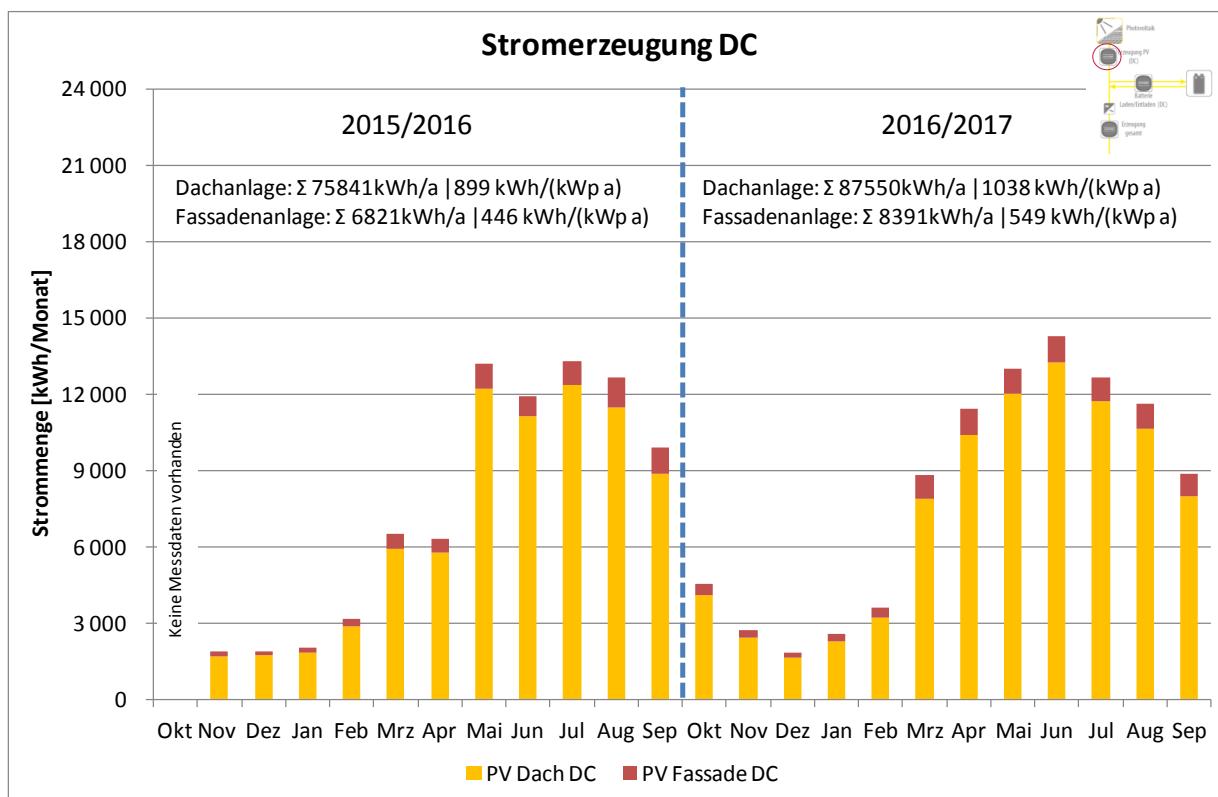


Abbildung 23: Messwerte Stromerzeugung PV-Module, 10/2015 bis 09/2017

Abbildung 24 zeigt die Monatssummen der DC-seitigen Ladung und Entladung der Batterie. Zu erkennen ist zum einen, dass bereits im Sommerhalbjahr die Batterie vollkommen ausgenutzt wird. Bei der vorhandenen Kapazität von 59,4 kWh sind bei einem Vollzyklus pro Tag etwa 1.800 kWh/Monat für die Beladung zu erwarten. Höhere Werte begründen sich zum einen damit, dass teils mehr als ein Vollzyklus pro Tag vorkam (z.B. bei vollgeladener Batterie und zeitweise bewölktem Himmel im Sommer), zum anderen treten Verluste am DC/DC-Wandler auf. Die Batterieverluste belaufen sich in der gesamten Messzeit auf <10 %.

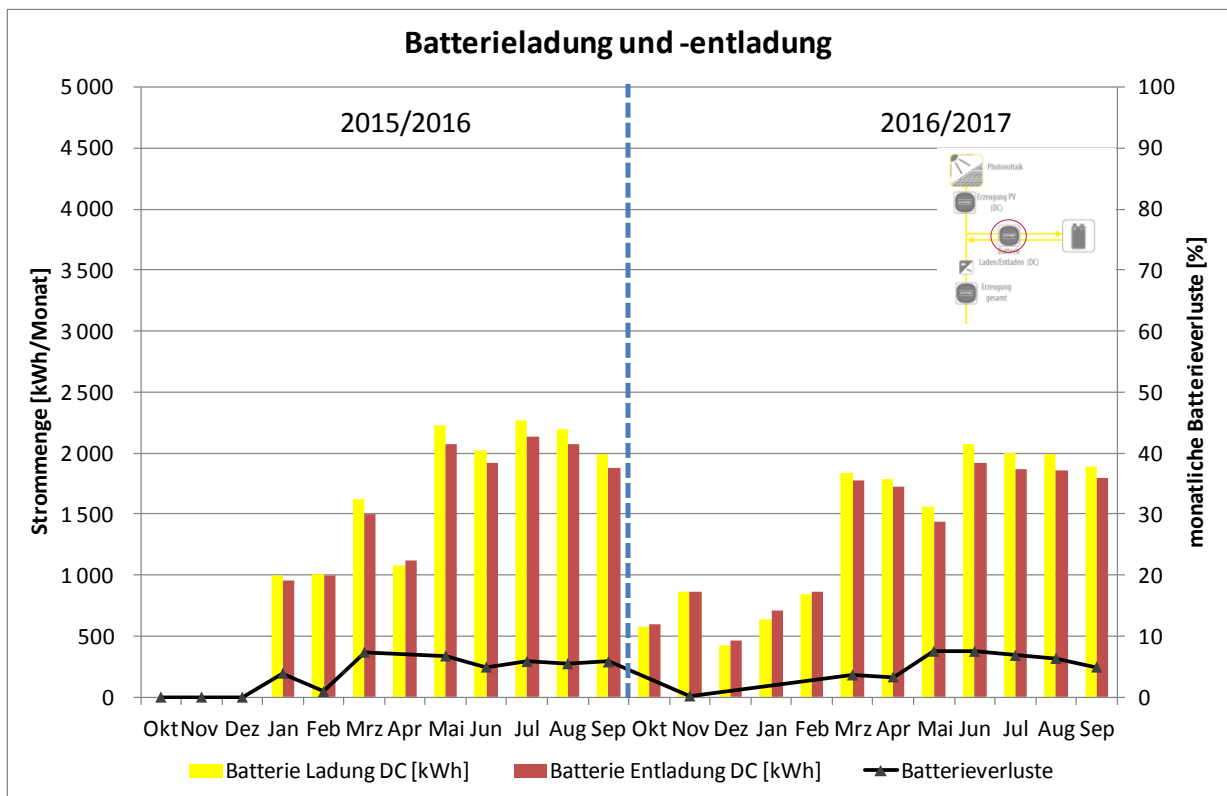


Abbildung 24: Messwerte Batteriebe- und -entladung, 10/2015 bis 09/2017

Zusammenführend werden in Abbildung 25 die Messwerte des Zählers „Erzeugung gesamt“, d.h. die Strommenge, die wechselstromseitig (AC) in das Haus vom PV-Batterie-System eingespeist wurde, dargestellt.

Dieser Zähler weist einen Defekt von Februar 2016 bis Dezember 2016 auf. Bei einem weiteren Austausch im August 2017 wurde eine Phase nicht ordnungsgemäß mit dem Zähler verbunden. Der Fehler wurde im Oktober 2017 beseitigt, so dass auch hier Messdatenausfälle zu verzeichnen sind.

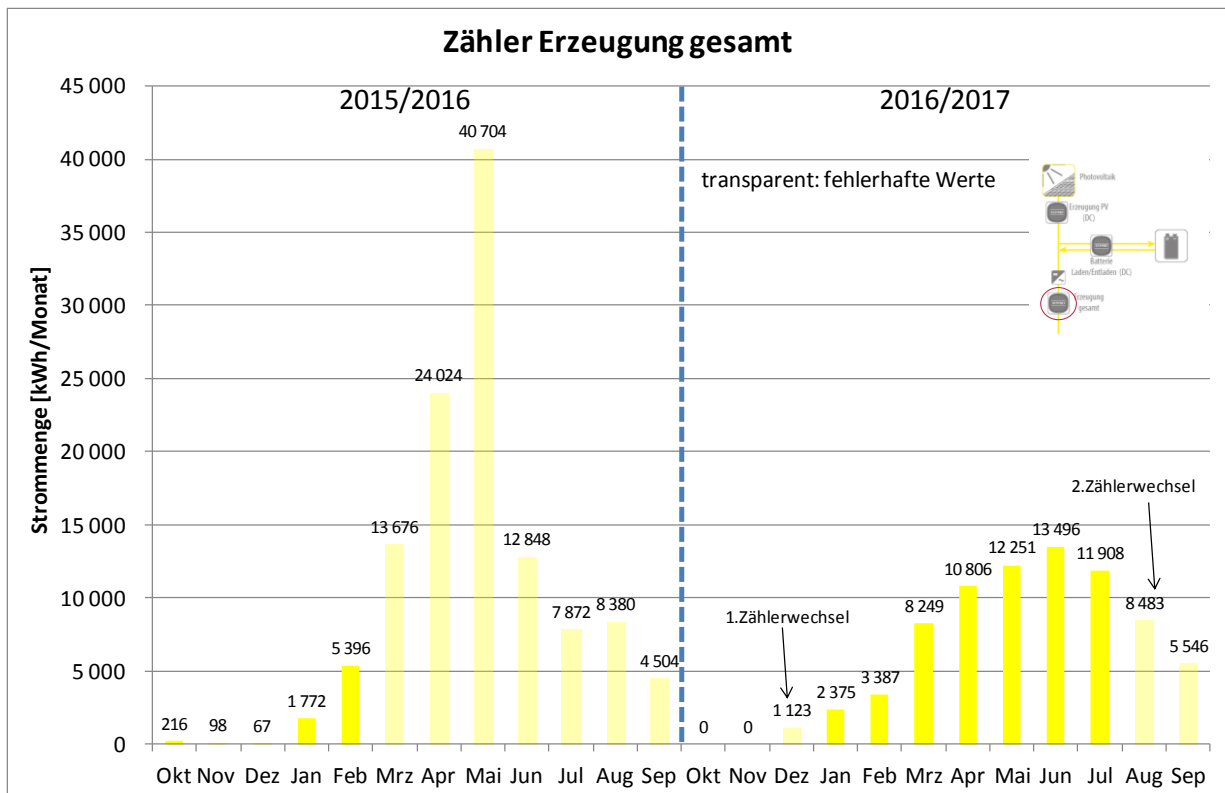


Abbildung 25: Messwerte Zähler Erzeugung gesamt, 10/2015 bis 09/2017

Abbildung 26 zeigt die Effizienz der Umwandlung des DC-Stroms. Dargestellt ist die Bilanz aus DC-Erzeugung, Batteriebeladung und Batterieentladung (rot) und die AC-seitige Hauseinspeisung (Zähler „Erzeugung gesamt“) (gelb).

Seit 2017 (ab dem 1. Zählerwechsel) ist zu erkennen, dass die monatlichen Verluste durch den Wechselrichter im Bereich von 5 - 10 % liegen.

Wird das Gesamtsystem von erzeugtem PV-Strom (DC) zu Hauseinspeisung (AC) betrachtet ergeben sich Gesamtwirkungsgrade von ca. 93 bis 94% (Abbildung 27).

Im Vergleich zu alternativen Konfigurationen mit mehreren Wechselrichtern (Einbindung der Batterie auf der AC-Seite) sind die Verluste somit als gering einzuschätzen. Bei einer AC-seitigen Einbindung sind Verluste von 20-30 % bzw. Wirkungsgrade von 70-80% zu erwarten.

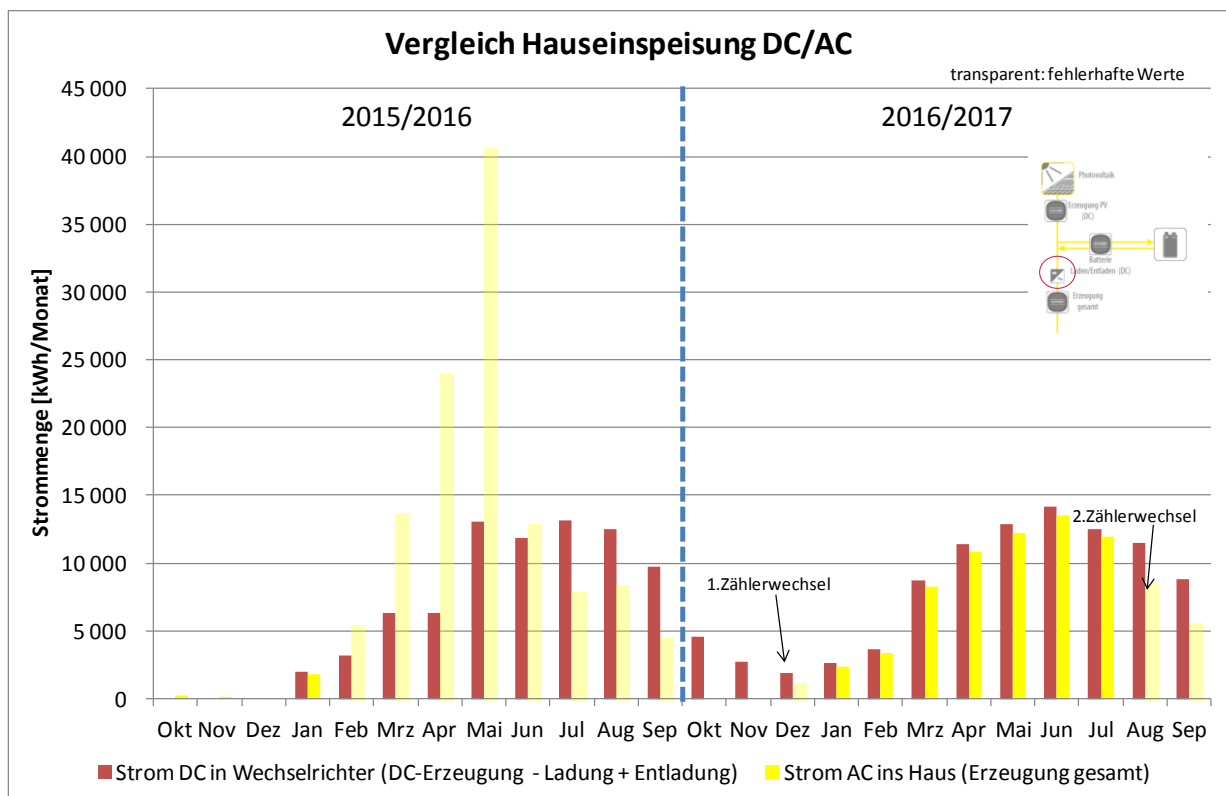


Abbildung 26: Vergleich DC/AC Einspeisung, 10/2015 bis 09/2017



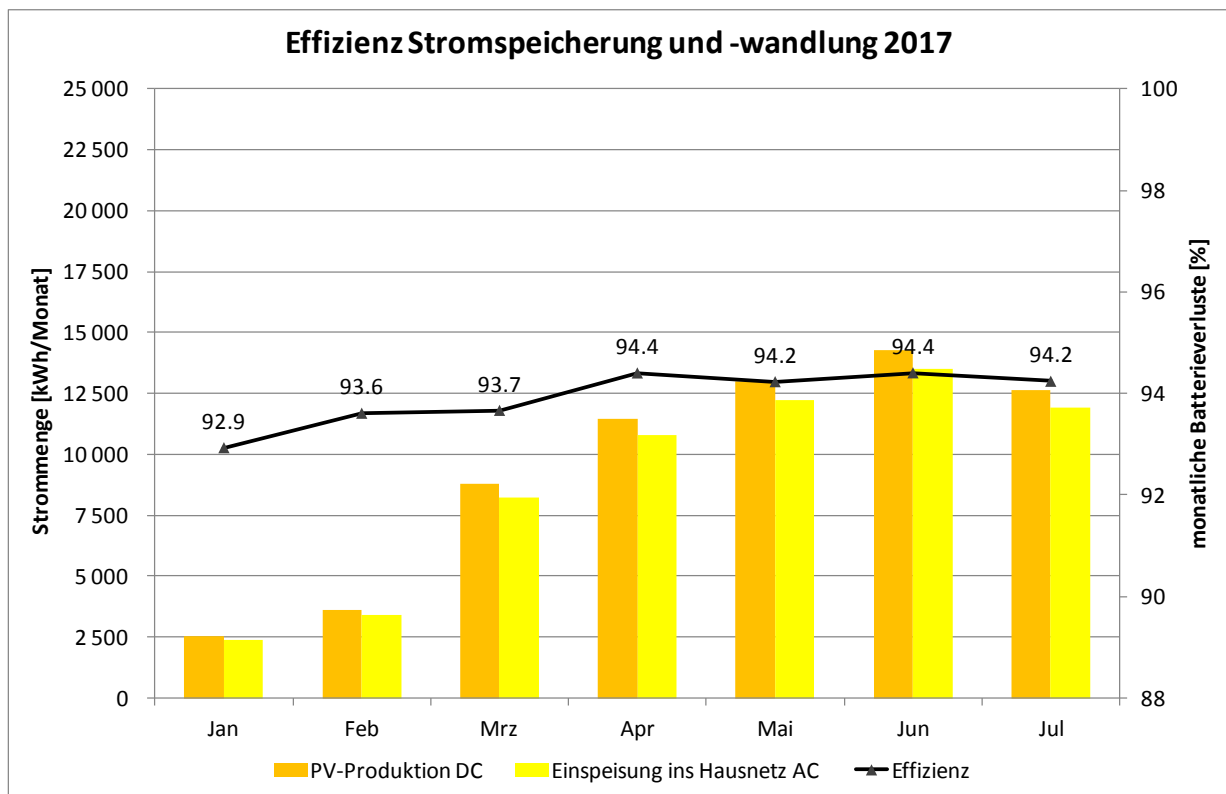


Abbildung 27: Gesamteffizienz des PV-Systems ab Erzeugung

Abbildung 28 zeigt den Eigenstromnutzungsanteil (im Haus genutzter PV-Strom zu PV-Erzeugung) und den Eigenstromdeckungsanteil (im Haus genutzter Strom zu Gesamtverbrauch) im Gebäude. Die Anteile beziehen sich auf die DC-seitige PV-Produktion, da AC-seitig keine ausreichenden Messdaten zur Verfügung stehen (Defekt Zähler „Erzeugung gesamt“) und die Verluste bei einer AC-seitigen Betrachtung nicht berücksichtigt würden.

Der Eigennutzungsanteil zeigt den typischen jahreszeitlichen Verlauf und ist im Winter mit 70-90% deutlich höher als im Sommer (45-50%). Die Gründe für die Schwankungen liegen an der jahreszeitlich divergierenden Ertragsseite der Erzeugung selbst (höhere Erzeugung im Sommer als im Winter) und dem jahreszeitlich stark unterschiedlichen Verbrauch der Anlagentechnik (höherer Verbrauch im Winter (Wärmepumpe) als im Sommer).

Der Eigendeckungsanteil liegt zwischen 14 % in den Wintermonaten und steigt bis auf knapp 80% in den Sommermonaten.

Auf Jahresbasis ergeben sich Eigennutzungsanteile von etwa 55-60 % und Eigendeckungsanteile von etwa 40-45%. Verglichen mit dem Ansatz nach EnEV aus der Planung (vgl. Abbildung 7) liegt die Eigennutzung auf dem Planungsniveau, die Eigendeckung ist deutlich geringer als angenommen.

Dies ist mit dem erhöhten Verbrauch gegenüber dem geplanten Bedarf zu begründen (vgl. Tabelle 4).

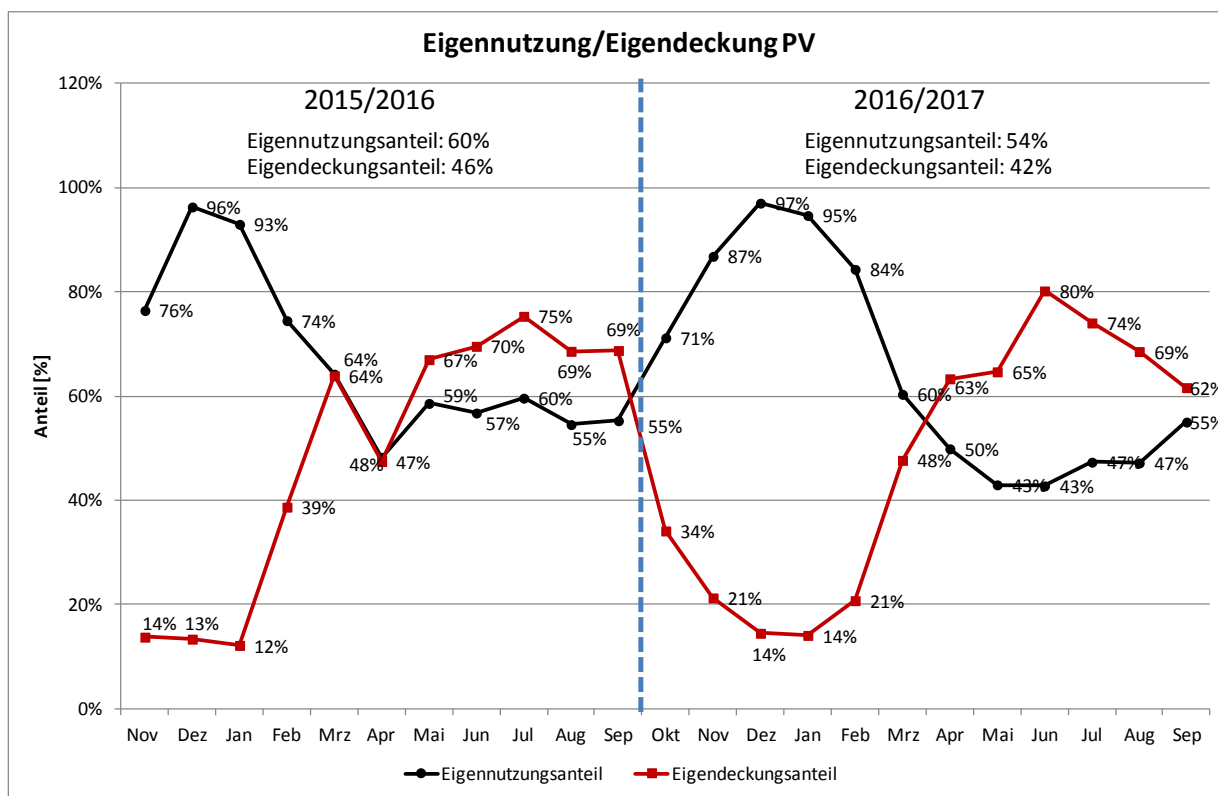


Abbildung 28: Eigendeckung und Eigennutzung PV-Strom (DC-seitig)

### 5.3 Wärmebilanz

Tabelle 5 zeigt die Wärmebilanz im Gebäude (Erzeugung und Wärmeabnahme).

Tabelle 5: Wärmebilanz

|   | 2015/2016  | 2016/2017 | Bedarf nach EnEV                          |
|---|------------|-----------|---|
| <b>Wärmeerzeugung [kWh/(m²a)]</b>   |            |           |   |
| Erzeugung (Wärmepumpe plus Hotmo-<br>bil (15/16) )                            | 59,7       | 36,5      | 9,46 (Heizung)<br>15,34 (Trinkwarmwasser) |
| Wärmeverbrauch<br>Niedertemperaturnetz  | 5,7        | 18,1      |   |
| Wärmeverbrauch<br>Hochtemperaturnetz  | 33,8       | 22,1      |   |
| <b>Nutzwärme [kWh/(m²a)]</b>  |            |           |   |
| Fußbodenheizung (FBH)   | 9,9        | 18,7      | 8,24                                      |
| witterungsbereinigt FBH   | 13,1       | 22,3      |   |
| Trinkwarmwasser/Badheizkörper   | 9,8        | 12,4      | 10,83                                     |
| <b>Verluste [kWh/(m²a)]</b>   |            |           |   |
| Verluste<br>Niedertemperaturnetz  | Messfehler |           | 1,22 (Heizung)                            |
| RLT + 3 Übergabestationen + Heizkörper<br>DG + Verluste<br>Hochtemperaturnetz | 24         |           | 4,51 (Trinkwarmwasser)                    |

Durch Messfehler und temporäre Wärmeerzeuger entstehen Abweichungen zwischen Erzeugung und Abnahme, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

#### 5.3.1 Wärmeabnahme

Zunächst wird betrachtet, wie hoch die Wärmeverbräuche in den Messzeiträumen 2015-2017 bezüglich Hoch- und Niedertemperaturnetz ausgefallen sind.

Abbildung 29 zeigt den Wärmeverbrauch im Niedertemperaturnetz (NT-Netz) sowie den Gesamtwärmeverbrauch in den Wohnungen für die Fußbodenheizung. Im Messzeitraum 2015/2016 kam es zu Ausfällen des Zählers für das NT-Netz, sodass insgesamt nur 5,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) gemessen wurden. Die Summe der Verbräuche der Fußbodenheizung aus den einzelnen Wohnungen liegt bei 9,9 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Wärmeverbrauch für die Fußbodenheizung ergibt sich nach Klimabereinigung mit dem Klimafaktor von 1,32 des IWU [4] zu 13,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) und liegt damit bereits über dem Niveau des EnEV-Nachweises von 8,24 kWh/m<sup>2</sup>a (vgl. Tabelle 3).

In der Heizperiode 15/16 waren noch nicht alle Wohnungen vermietet, so dass ein Wärmeverbrauchsanstieg in der Heizperiode 16/17 in Höhe von ca. 50% zu erkennen ist. Der Verbrauch liegt gemessen bei 18,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. witterungsbereinigt (Klimafaktor 1,19) bei 22,3 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die Basis zur Klimabereinigung zeigt Tabelle 6.

**Tabelle 6: Klimabereinigung**

|  |          |
|--|----------|
| Standort und Betrachtungsperiode   |          |
| Gradtagzahl am Standort Frankfurt/M-Flughafen in der Messperiode von 10/15 bis 09/16     | 2.681 Kd |
| Gradtagzahl am Standort Frankfurt/m-Flughafen in der Messperiode von 10/16 bis 09/17     | 3.072 Kd |
| Gradtagzahl am Standort Frankfurt/M-Flughafen für das langjährige Mittel (1971 bis 2017) | 3.058 Kd |
| Gradtagzahl für das Referenzklima Deutschland  | 3.601 Kd |
| Klimafaktor 15/16 (Bezug Standort Würzburg)  | 1,32     |
| Klimafaktor 15/16 (Bezug Standort Würzburg)  | 1,19     |

Die Abweichung zum Planungswert ist hoch, allerdings ist ein Heizwärmebedarf kleiner 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) als sehr gering einzustufen (ca. 33 % unter Mindestanforderung für ein Passivhaus).

Abweichungen von < 10 % zwischen den Bilanzen aus der gemessenen Wärme, die nach dem Speicher ins NT-Netz eingespeist wird, zu entnommener Wärmemenge in den Wohnungen, lassen sich mit Messungenauigkeiten der einzelnen Wärmemengenzähler erklären.

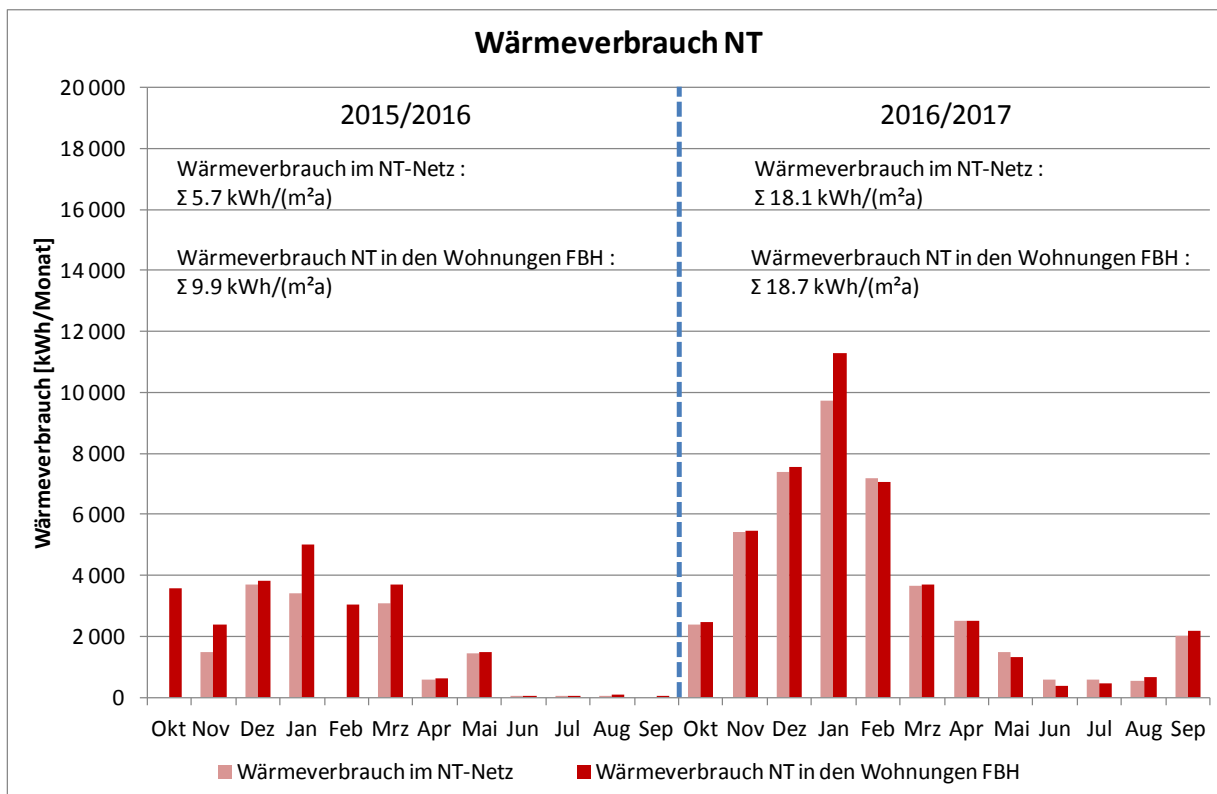


Abbildung 29: Wärmeverbrauch Niedertemperaturnetz (NT), 10/2015-09/2017

Eine Erfassung der Raumtemperaturen in den Wohnungen wurde im Mess- und Monitoringkonzept nicht vorgesehen. Eine nachträgliche Installation von Sensoren und Datenloggern zur Erfassung der Raumtemperaturen wurde nicht umgesetzt, da die Mieter bereits durch die anlagentechnischen Umbaumaßnahmen eingeschränkt wurden.

Die freiwillige Bereitstellung von Messdaten eines Mieters für den Messzeitraum von 07/2016 bis 04/2017 zeigte mit durchschnittlich 22 °C Raumtemperatur in der Heizperiode einen erhöhten Wert gegenüber der Planung mit 20 °C. Der erhöhte Wärmebedarf für die Raumheizung lässt sich somit plausibel durch eine erhöhte Raumtemperatur von ca. 2K in den Wohnungen erklären.

Abbildung 30 zeigt den Wärmeverbrauch im Hochtemperaturnetz und die Wärmeabnahme in den Wohnungen. Das Hochtemperaturnetz liefert Wärme für die Trinkwassererwärmung in den Wohnungsstationen sowie Wärme für das Nachheizregister der Lüftungsanlage.

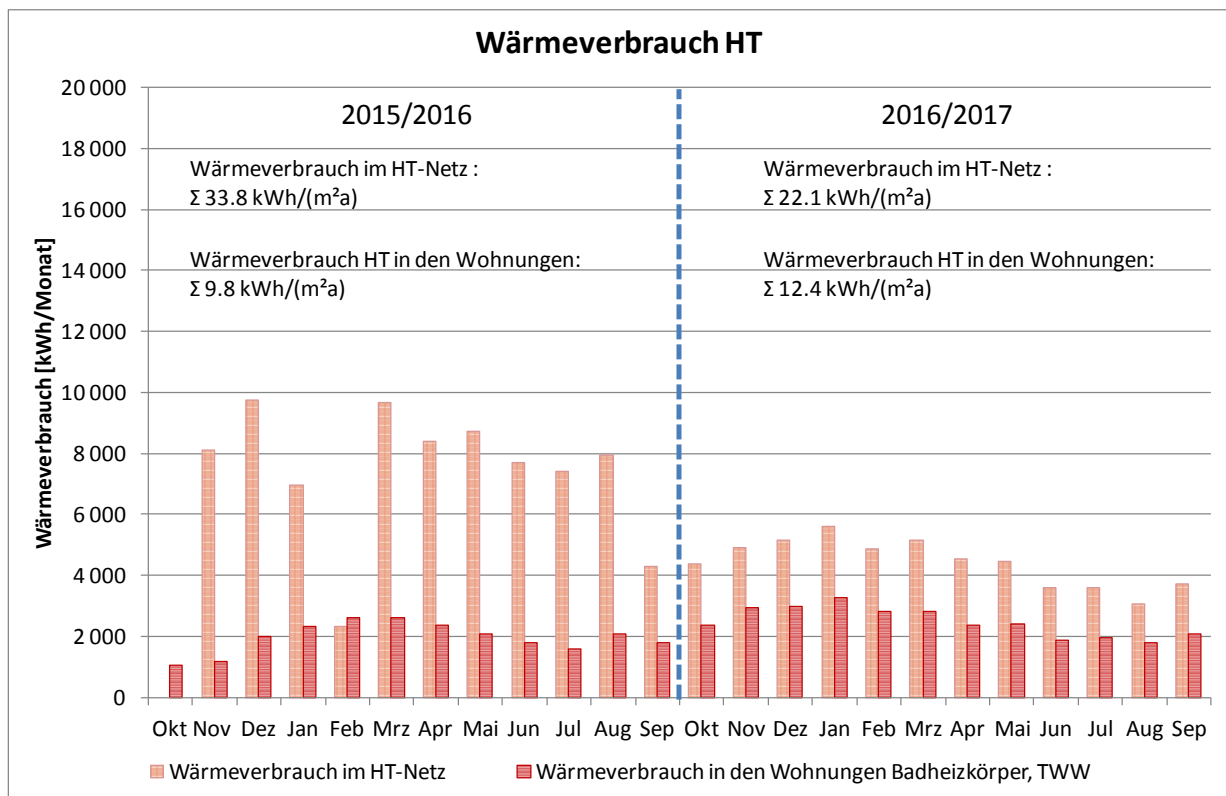


Abbildung 30: Wärmeverbrauch Hochtemperaturnetz (HT) 2015-2017

Deutlich zu erkennen ist die hohe Diskrepanz zwischen der Wärme, die ins Hochtemperaturnetz gespeist wird, und der Wärme, die an den gemessenen Wohnungsübergabestationen entnommen wird. Die Differenz sollte rechnerisch dem Wärmeverbrauch der Lüftungsanlage, den Verteilverlusten sowie den drei fehlenden Übergabestationen und den Heizkörpern im Dachgeschoss entsprechen. Bis August 2017 konnte der Wärmeverbrauch für die Lüftungsanlage nicht separat erfasst werden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass in einer Wohnung die Wärmemenge aufgrund eines fehlerhaft eingebauten Durchflussmessgeräts nicht erfasst werden. Eine Änderung wäre nur mit Mietereinschränkung möglich gewesen, weshalb hierauf verzichtet wurde. Eine Korrektur (Berücksichtigung der fehlenden/fehlerhaften Übergabestationen) für 2016/2017 ergibt einen Wert 14,2 kWh/(m²a). Die Berechnung findet sich im Anhang.

In der Messperiode 2015/2016 wurden etwa 2/3 der produzierten Wärme nicht direkt in den Wohnungen genutzt. Die Differenzwärmemenge ist entweder in die Lüftungsanlage geflossen, in den Heizkörpern im Dachgeschoss verbraucht worden oder durch Verteilverluste angefallen. Die Differenz der Bilanzen konnte im Messjahr 2016/2017 auf etwa 45-50% gesenkt werden und damit ein höherer Anteil der produzierten Wärme direkt in den Wohnungen genutzt werden. Unter Berücksichtigung der Korrektur von 12,4 auf 14,2 kWh/(m²a) verringert sich der Anteil von Verlusten, Heizkörper im Dachgeschoss und Nachheizung der Lüftung auf 36 %.

Die Verlustleistung lag durchschnittlich bei ca. 2,4 kW im Jahr 2017. Dieser Wert ist etwa 30 % höher als auf Basis des vorhandenen Rohrleitungsnetzes auftreten sollte.

Im August 2017 konnte nach der Installation des zusätzlichen Wärmemengenzählers für die RLT-Anlage festgestellt werden, dass am Heizregister der RLT-Anlage eine Fehlströmung vorlag, die ein Überströmen des Vorlaufs in den Rücklauf verursacht hat. In Kombination mit

Problemen bei der Rücklaufbeimischung führte es dazu, dass der Hochtemperaturspeicher dauerhaft durchströmt wurde, regelmäßig die eingestellte Solltemperatur unterschritten wurde und damit die Wärmepumpe in Betrieb ging. Durch das hohe Temperaturniveau (teils über 60 °C, während des Umbaus über 70° C) waren die Zirkulationsverluste innerhalb der thermischen Hülle höher als der Wärmeverbrauch in den Wohnungen.

Die Verbrauchswerte in den Wohnungen liegen in der Messperiode 2016/2017 auf bzw. korrigiert leicht über dem Niveau des EnEV-Ansatzes (2016/2017 12,4 bzw. 14,2 kWh/(m²a), EnEV: 12,5 kWh/(m²a)). Der geringere Wert von in Höhe von 9,8 kWh/m²a für 2015/2016 ist durch Teilvermietung in der Heizperiode 2015/2016 begründbar.

### 5.3.2 Wärmezeugung

Abbildung 31 zeigt den Vergleich der Wärmemenge, die von der Wärmepumpe erzeugt wurde, und der verbrauchten Wärmemenge in den beiden Verteilnetzen (Hoch- und Niedertemperatur). Zu erkennen ist, dass in der ersten Heizperiode hohe Differenzen auftreten, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Bereich Messfehler vorlagen.

Durch die Aufstellung des Hotmobils wurde in der Zeit von Januar bis März 2016 die Wärme vom Hotmobil gemessen, der abgerechnete Verbrauch liegt bei insgesamt 8.863 Litern Heizöl. Weiterhin fehlen im April 2016 aufgrund des Umbaus der Anlagen die Messwerte.

Ab Mai 2016 ist die Bilanz nachvollziehbar, Differenzen im Januar und Februar 2017 sind mit dem elektrischen Durchlauferhitzer (vgl. Kap. 2.3.1), dessen Wärmeeinträge ins Hochtemperaturnetz nicht separat aufgezeichnet wurden, zu begründen.

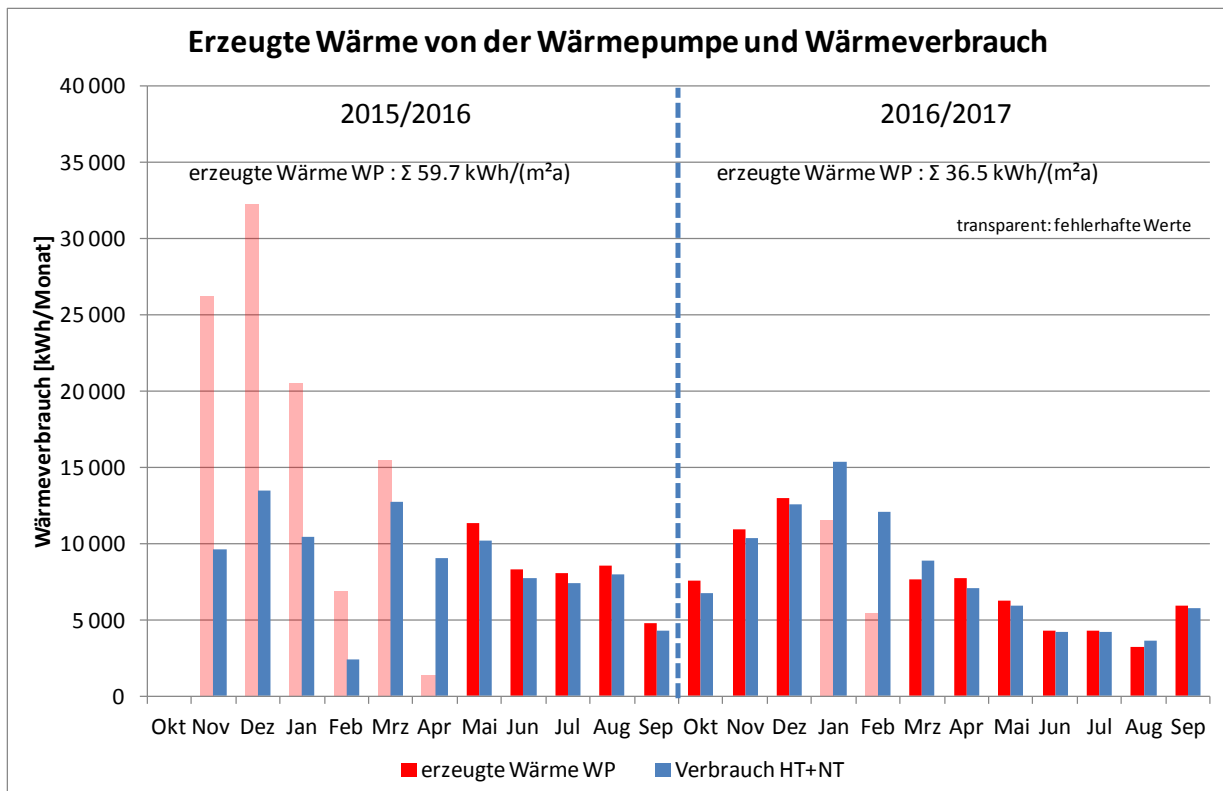


Abbildung 31: Erzeugte Wärmemenge und Verbrauch in den Netzen (inkl. Verluste), 10/2015-09/2017

### 5.3.3 Wärmequellen

Aussagen zu den Wärmequellen Solarabsorber und Eisspeicher sowie deren Zusammenspiel können aufgrund der fehlerbehafteten Messwerte für die Regeneration und den Quellbetrieb Absorber nur in geringem Umfang getätigt werden. Lediglich der Zähler, der die Wärmelieferung des Eisspeichers an die Wärmepumpe misst, hat bis zum Zählertausch im August 2017, abgesehen vom November und Dezember 2015, plausible Werte geliefert. Somit kann nur bewertet werden, wie hoch der Anteil des Eisspeichers an der Wärmebereitstellung war.

Die Messwerte aus dem November und Dezember 2016 sind unplausibel hoch, da bei 100 m<sup>3</sup> Wasservolumen nur etwa 2.300 kWh sensible Wärme (Abkühlung 20° C auf 0° C) und 9.300 kWh latente Wärme (Kristallisationswärme) im Eisspeicher enthalten sind und die Wärmepumpe zu diesem Zeitpunkt ausschließlich Wärme aus dem Eisspeicher entnommen hat.

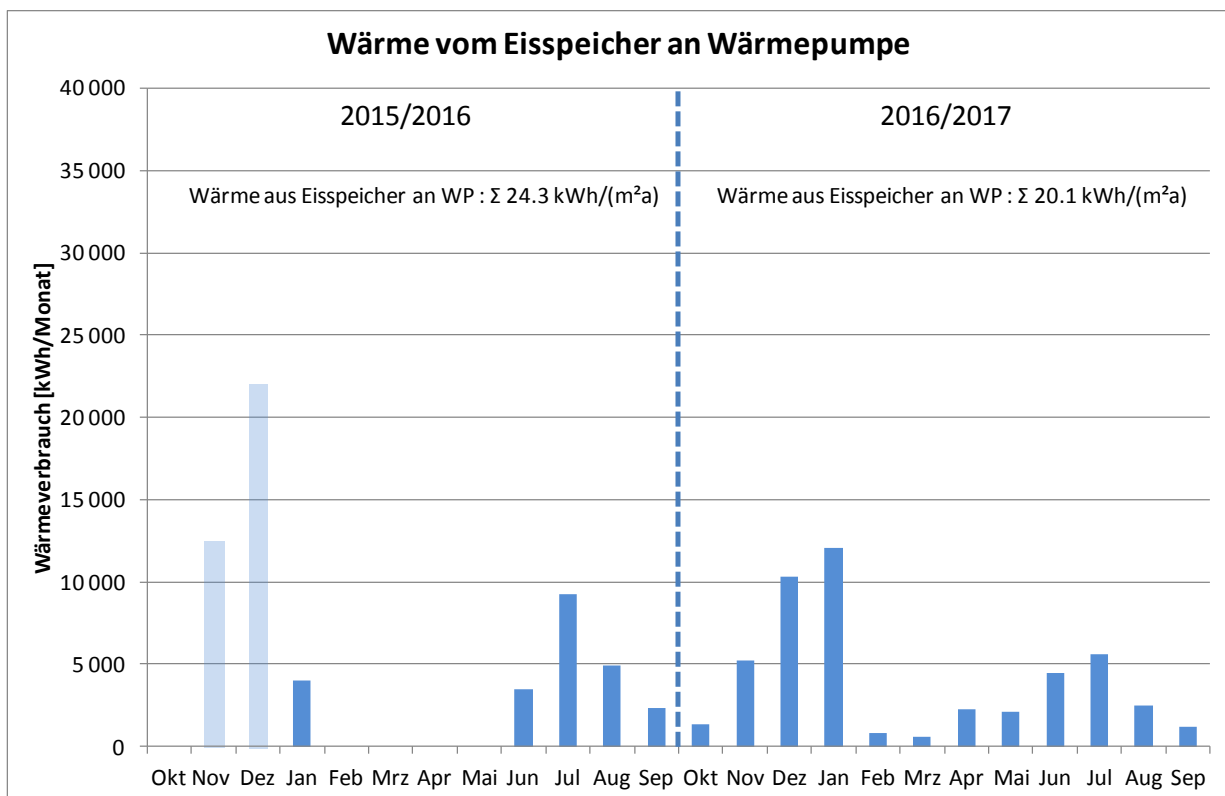


Abbildung 32: Wärme aus dem Eisspeicher an die Wärmepumpe, 10/2015-09/2017

Auf Basis der Temperatur im Eisspeicher und des Abstandes der Wasseroberfläche zum Deckel des Eisspeichers konnte der Gefriervorgang beobachtet und so festgestellt werden, dass die Vereisung zu früh begonnen und jeweils im Januar schon zu weit fortgeschritten war, sodass ein zusätzlicher Wärmeerzeuger notwendig wurde.

Durch das vollständige Gefrieren des Eisspeichers vor Ende der Heizperiode kann geschlossen werden, dass die Regeneration des Eisspeichers wie auch die Nutzung der Solarabsorber als direkte Wärmequelle nicht ausreichend ist.



Abbildung 33 zeigt den Verlauf der Eisspeichertemperaturen und den Abstand der Wasseroberfläche zum Deckel des Eisspeichers. Es ist zu erkennen, dass in beiden Heizperioden bereits ab November keine sensible Wärme im Speicher vorhanden ist, die Temperaturen erreichen 0 °C. Weiterhin ist zu erkennen, dass ab Januar der Abstand jeweils noch etwa bei 200 mm lag. Im Betrieb hat sich gezeigt, dass bereits ab diesem Abstand die entziehbare Leistung für einen stabilen Betrieb der Wärmepumpe nicht hoch genug ist. In Kombination mit einer nicht ausreichenden Leistung und einer zu frühen Umschaltung auf den Eisspeicher (Umschaltzeitpunkt abhängig von der Außentemperatur) war ein monovalenter Betrieb der Wärmepumpe nicht mehr möglich. Weiterhin ist in der Grafik die Regeneration im Sommer durch Solarabsorber und freie Kühlung zu erkennen.

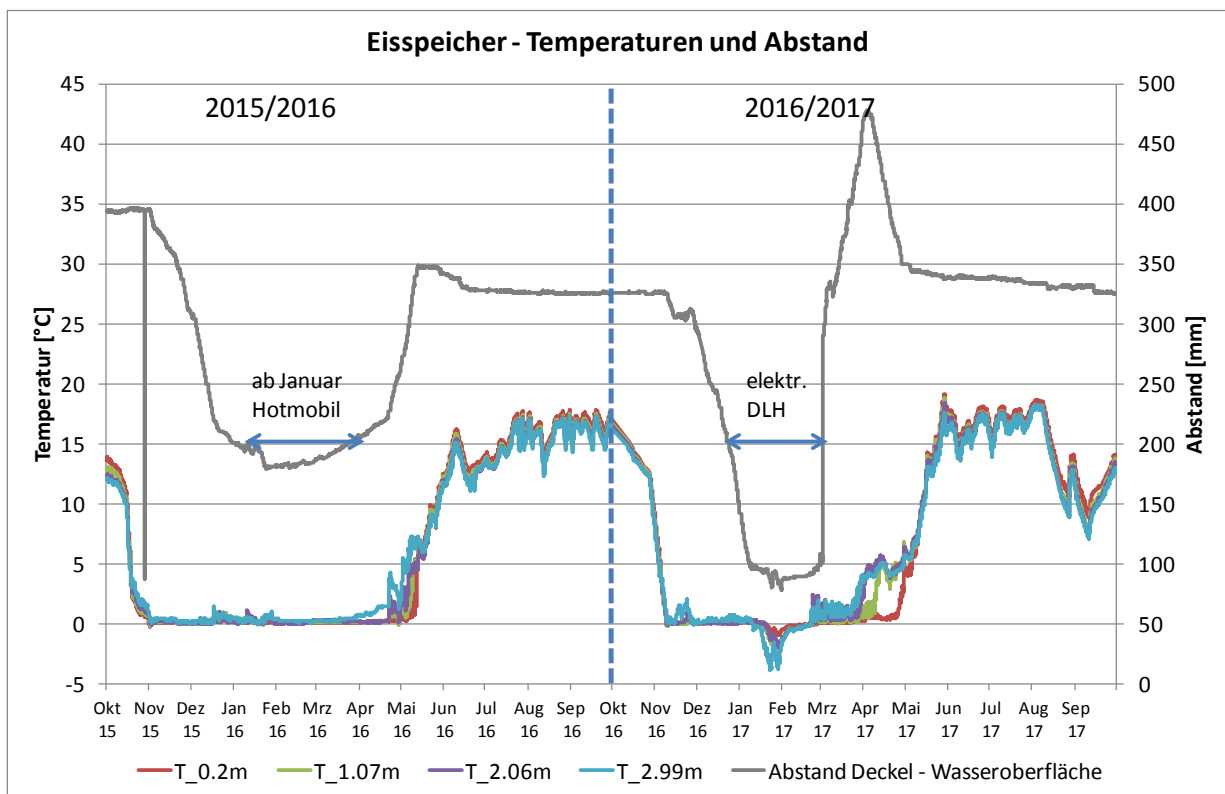


Abbildung 33: Temperaturen und Füllstand Eisspeicher

Abbildung 34 zeigt den Kälteverbrauch im Gebäude. Die über freie Kühlung abgeführte Wärme liegt bei 3,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) (15/16) bzw. 3,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (16/17).

Es wird deutlich, dass die Regeneration des Eisspeichers nicht alleine über die freie Kühlung erfolgen kann, da der Kälteverbrauch deutlich geringer ist als die dem Eisspeicher entzogene Wärme (vgl. Abbildung 32). Des Weiteren ist im Sommer das Temperaturniveau begrenzt. Erreicht der Eisspeicher eine Temperatur oberhalb von 18 °C, ist keine freie Kühlung mehr möglich. Die sommerliche Regelung sieht daher vor, den Eisspeicher als Quelle für die Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung zu nutzen und gleichzeitig den Speicher durch freie Kühlung zu regenerieren. Das Abkühlen und Erwärmen im Sommer kann in Abbildung 33 erkannt werden (Schwankung zwischen 15 und 18°C im Sommer).

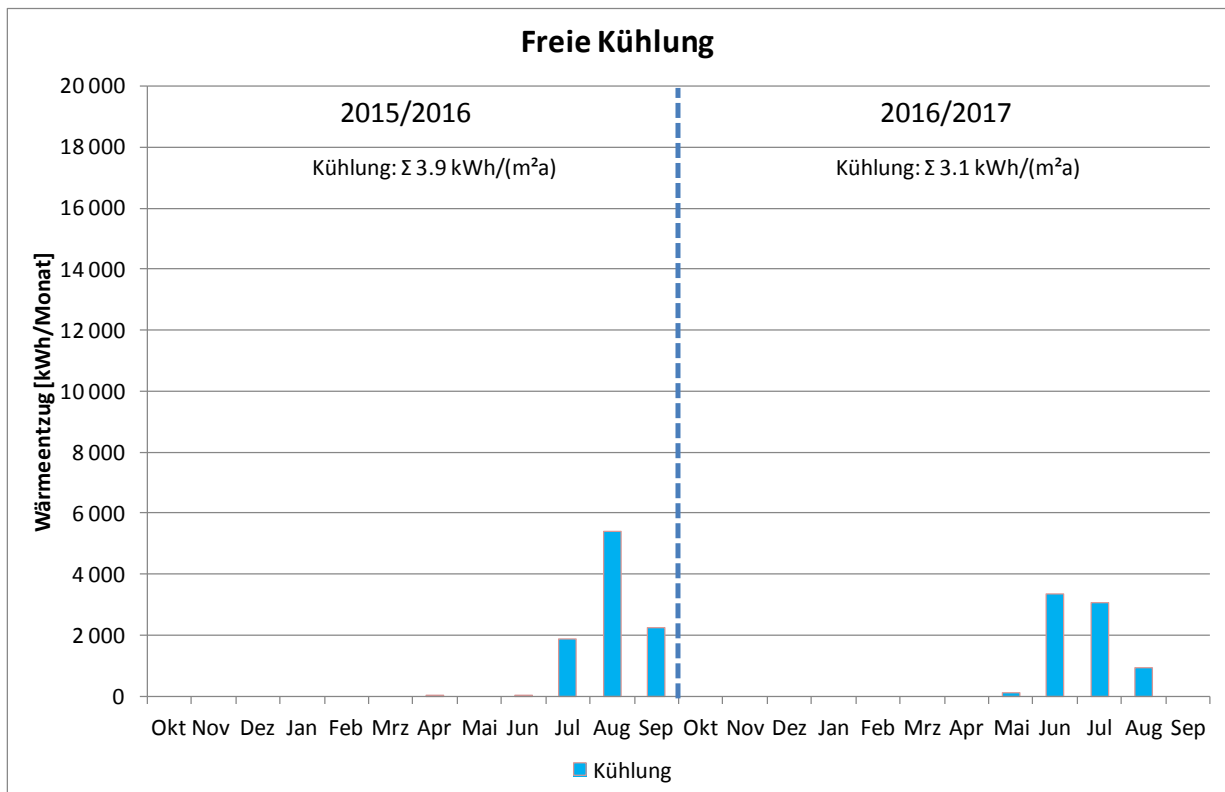


Abbildung 34: Freie Kühlung

### 5.4 Systemeffizienz

Abbildung 35 zeigt die Performance der Wärmepumpe mit allen Randperipherien. Hierbei wird die von der Wärmepumpe erzeugte Wärmemenge durch den Stromverbrauch der Heizzentrale dividiert, d.h. alle Stromverbräuche, die für das Heizungssystem nötig sind, werden in diesem Wert betrachtet.

Aufgrund der aufwendigen Umbaumaßnahmen zu Beginn des Jahres 2016 kann für das Messjahr 2015/2016 keine Effizienz sinnvoll ermittelt werden.

Die Effizienz, beschrieben durch die erzeugte Wärmemenge der Wärmepumpe bezogen auf den Strombedarf des Heizungssystems inkl. Peripherie, lag im Jahr 2016/2017 bei 2,1. Laut EnEV-Nachweis soll die Effizienz des Heizungssystems bei etwa 2,9 (Erzeugerabgabe zu Endenergie Erzeuger) liegen.

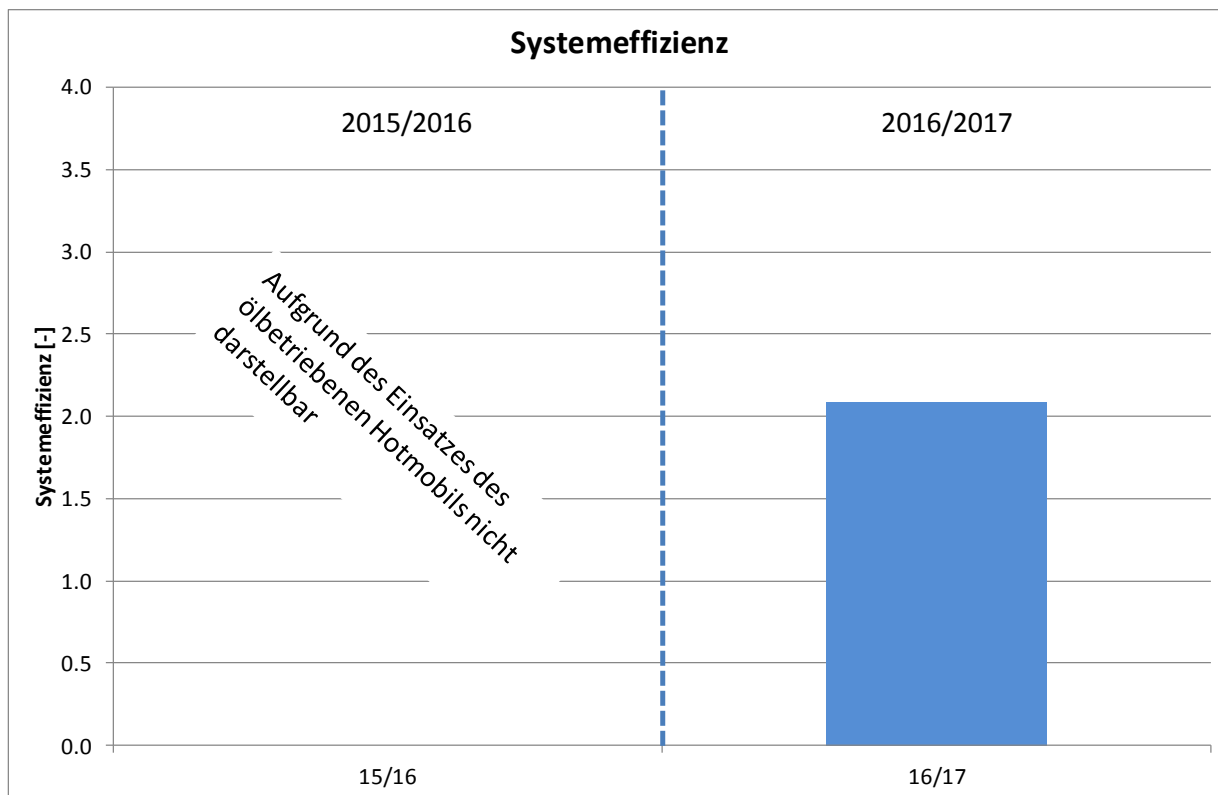


Abbildung 35: Systemeffizienz (nicht zu verwechseln mit Arbeitszahl Wärmepumpe)

## 6 Wirtschaftlichkeit

In diesem Kapitel werden zum einen die tatsächlichen Kosten, die bei der Errichtung des Gebäudes entstanden sind, dargestellt, zum anderen wird ein Vergleich zwischen dem EnEV 2009 Standard und dem Effizienzhaus Plus Standard in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit erstellt.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Investitionskosten zur Anlagentechnik, die im Mehrfamilienhaus verbaut wurden. Eine detaillierte Abrechnung zur Kostengruppe 300 liegt nicht vor.

**Tabelle 7: Übersicht der Investitionskosten des Mehrfamilienhauses Riedberg**

| Bauteil / Anlage                      | Netto-Kosten exkl. MwSt. [€]   |
|---------------------------------------|--|
| Außenwand                             | Keine Angabe   |
| Dach                                  |  |
| Wand gegen Erdreich                   |  |
| Bodenplatte                           |  |
| Fenster                               |  |
| Heizung<br>exkl. Eisspeicher          | 116.800 €  |
| Eisspeicher                           | 35.400 €   |
| Lüftungsanlage                        | Keine Angabe   |
| Photovoltaik                          | 165.600 (Dach), ca. 1.950 €/kW <sub>p</sub><br>63.200 (Fassade), ca. 4.100 €/kW <sub>p</sub> |
| Batterie (LiFePO)                     | 83.800 €, ca. 1.400 €/kWh  |
| Elektroinstallation und<br>Automation | Keine Angabe   |
|                                       |  |
| Summe der Posten                      | <b>464.800 €</b>   |

## 6.1 Mehrinvestitionskosten für den Effizienzhaus Plus Standard

Im Zuge des Energie Plus Nachweises soll ebenfalls auf die Mehrkosten zur Umsetzung des Standards eingegangen werden. Die Ermittlung der Mehrinvestitionskosten für den Effizienzhaus Plus Standard erfolgt über den Ansatz das Referenzgebäude der EnEV 2009 mit einem Gasbrennwert - statt Ölbrennwertkessel als Basis heran zu ziehen. Für das Referenzgebäude sind in der EnEV U-Werte zu den einzelnen Bauteilen definiert, aus denen sich eine Dämmschichtdicke bei Standardbauteilkonstruktionen ableiten lässt. Anschließend wird ermittelt, wie viel zusätzliche Dämmung bei dieser Konstruktion benötigt wird, um die U-Werte zu erreichen, die die Bauteile des Mehrfamilienhauses Riedberg aufweisen. Mit Hilfe von spezifischen Kosten nach [5, Tabelle 45] lassen sich die Mehrkosten für die Investition in die Gebäudehülle ermitteln.

Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die Mehrkosten der Gebäudehülle im Vergleich mit dem EnEV 2009 Referenzgebäude. Die zusätzlichen Investitionskosten liegen bei etwa 76.000 € (ca. 24 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>) brutto.

Typische Kosten nach BKI [6] für die Kostengruppe 300 liegen im Bereich bis 1.000 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>. Das Zusatzinvest in die Gebäudehülle zur Umsetzung des Effizienzhaus-Plus-Standards liegt somit bei ca. 2,4 %.

Tabelle 8: Übersicht Mehrkosten der Gebäudehülle auf Basis von [5]

| Bauteil         | U-Wert<br>EnEV 2009 | U-Wert<br>Riedberg | Δ U-<br>Wert       | Wärmeleit-<br>fähigkeit<br>Dämmung | zusätzliche<br>Dämmschicht-<br>dicke | Zusatzkosten<br>nach [5]<br>brutto | Fläche         | Mehrkosten<br>(brutto)       |
|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------------------|
|                 | W/m <sup>2</sup> K  | W/m <sup>2</sup> K | W/m <sup>2</sup> K | W/(mK)                             | cm                                   | €/cm/m <sup>2</sup>                | m <sup>2</sup> | €                            |
| Dach            | 0.20                | 0.14               | 0.06               | 0.035                              | 8                                    | 1.10                               | 528            | 4 356 €                      |
| Bodenplatte     | 0.35                | 0.13               | 0.22               | 0.035                              | 18                                   | 1.10                               | 571            | 11 050 €                     |
| Außenwand       | 0.28                | 0.13               | 0.15               | 0.035                              | 14                                   | 1.40                               | 1528           | 30 849 €                     |
| Dachfenster     | 1.40                | 1.10               | 0.30               | -                                  | -                                    | 30                                 | 3              | 86 €                         |
| Fassadenfenster | 1.30                | 0.80               | 0.50               | -                                  | 3-fach Verglasung                    | 60                                 | 493            | 29 600 €                     |
| Summe           |                     |                    |                    |                                    |                                      |                                    |                | <b>75 942 €</b>              |
|                 |                     |                    |                    |                                    |                                      |                                    |                | <b>24 €/m<sup>2</sup>BGF</b> |

In Tabelle 9 sind die Mehrinvestitionskosten für die Anlagentechnik dargestellt. Hier wird ebenfalls zwischen dem Einbau eines Gasbrennwertkessels und der Wärmepumpe mit Absorber und Eisspeicher unterschieden. Die Mehrkosten in der Kostengruppe 400 liegen bei etwa 82.000 € (26 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>) ohne die Berücksichtigung der PV-Anlage und der Batterie. Unter Berücksichtigung der verbauten PV-Anlage und des Batteriespeichers ergeben sich Mehrkosten von etwa 465.000 € (147 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>).

Die spezifische Bruttokosten der abgerechneten PV-Anlage sind mit 197.000 € (ca. 2.400 €/kW<sub>p</sub>) für die Dachanlage und 75.000 € (ca. 5.000 €/kW<sub>p</sub>) für die Fassadenanlage durch die verbauten Dummy-Module (gestalterischer Anspruch) sehr hoch. Der Batteriespeicher liegt mit ca. 1.600 €/kWh (brutto) im normalen Kostenbereich (vgl. Tabelle 7).

Für den Kostenvergleich wird aufgrund der erhöhten Kosten durch die architektonische Integration der PV-Anlage statt der abgerechneten Kosten ein Standardkennwert von 1.800 €/kW<sub>p</sub> (brutto) angesetzt. Mit diesem Ansatz liegen die Mehrkosten bei ca. 362.000 € (114 €/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>).

**Tabelle 9: Mehrinvestitionskosten für die Anlagentechnik**

| EnEV 2009 Ref.-Geb.   |                      |                   |   |
|---|----------------------|-------------------|---|
| Komponente  | spez.Kosten (netto)  | Größe             | Gesamtkosten (brutto)                   |
| Gaskessel inkl. Regelung, Zubehör, Abgassystem, Hydraulische Einbindung | 350 € €/kW           | 77 kW             | 32 071 €                                |
| Gasanschluss  | 2 500 €              |                   | 2 975 €                                 |
| Solarthermie inkl. Speicher   | 745 €/m <sup>2</sup> | 72 m <sup>2</sup> | 64 018 €                                |
| 3% von A <sub>N</sub> nach EEWärmeG                                     |                      |                   | 99 063 €                                |
| Energiehaus Plus Riedberg   |                      |                   |   |
| Komponente  | Kosten (netto)       | Größe             | Gesamtkosten (brutto)                   |
| Wärmepumpe inkl. Speicher+Montage+Absorber                              | 116 763 €            | Aus Rechnung      | 138 948 €                               |
| Eisspeicher   | 35 453 €             | Rechnung          | 42 189 €                                |
|   |                      |                   |   |
|   |                      | Summe HLS         | 181 137 €                               |
|   |                      |                   |   |
| PV-Anlage Dach  | 165 582 €            | Rechnung          | 151 866 €                               |
| PV-Anlage Fassade   | 63 240 €             | Rechnung          | 28 440 €                                |
| Batterie  | 83 747 €             | Rechnung          | 99 659 €                                |
|   |                      | Summe ELT         | 279 965 €                               |
|   |                      |                   |   |
| Differenzkosten zum Referenzgebäude                                     | (Ref.-Geb. ohne PV)  |                   | *reduziert auf 1.800 €/kWp<br>362 000 € |

## 6.2 Betriebskosteneinsparung im Effizienzhaus Plus Standard

Im Folgenden erfolgt der Vergleich der Betriebskosten vom EnEV 2009 Referenzgebäude und dem Effizienzhaus Plus Riedberg. Hierbei wird der Haushaltsstrom in die Betrachtung einbezogen. Als Basis werden Standardstrom- und -gastarife, Stand 2017 für den Standort Frankfurt a. M., genutzt. Es werden keine Mieterstrommodelle berücksichtigt, sondern die Vollkosten analog zur VDI 2067 angesetzt.

Für den Vergleich der Betriebskosten werden die Endenergiebedarfe Gas und Strom für die Anlagentechnik des Referenzgebäudes hinterlegt. Aufgrund des problematischen Betriebs und des erhöhten Wärmeverbrauchs im Gebäude erfolgt der Vergleich der Betriebskosten auf Basis der Bedarfswerte nach EnEV für die Anlagentechnik im Gebäude Riedberg. Für den Nutzer- und Allgemeinstrom sowie den PV-Ertrag werden die Messwerte von 2016/2017 hinterlegt.

Tabelle 10 zeigt den Vergleich der jährlichen Betriebskosten der beiden Varianten. Die Einsparung im Effizienzhaus Plus Riedberg betragen ~ 19.500 €/a verglichen mit dem Referenzgebäude.

**Tabelle 10: Vergleich Betriebskosten**

| EnEV 2009 Ref.-Geb.                               |                                   |            |                       |
|---|-----------------------------------|------------|-----------------------|
|   | spez.Kosten (netto)               | Größe      | Gesamtkosten (brutto) |
| <b>Kosten Gas</b>                                 |                                   |            |                       |
| Grundpreis (Standardtarif)                        | 98 €/a                            |            | 117 €                 |
| Arbeitspreis (Standardtarif)                      | 0.0464 €/kWh                      | 131070 kWh | 7 237 €               |
| Wartung   | 180 €/a                           |            | 214 €                 |
| Instandsetzung                                    | 1%/a ST, 1.5 %/a GK               |            | 1 121 €               |
| <b>Kosten Strom</b>                               |                                   |            |                       |
| Grundpreis (Standardtarif)                        | 125 €/a                           |            |                       |
| Hilfsstrom Anlagentechnik inkl. RLT (aus EnEV)    | 0.262 €/kWh                       | 26501 kWh  | 8 262 €               |
| Arbeitspreis Allgemeinstrom/Aufzug (Messwert)     | 0.262 €/kWh                       | 3600 kWh   | 1 122 €               |
| Arbeitspreis Haushaltsstrom (Messwert)            | 0.262 €/a                         | 40800 kWh  | 12 721 €              |
|   |                                   | Summe      | 30 795 €              |
| Energiehaus Plus Riedberg (Bedarf)                |                                   |            |                       |
|   | spez.Kosten (netto)               | Größe      | Gesamtkosten (brutto) |
| <b>Kosten Strom</b>                               |                                   |            |                       |
| Grundpreis (Standardtarif)                        | 125 €/a                           |            |                       |
| Arbeitspreis Anlagentechnik inkl. RLT (nach EnEV) | 0.262 €/a                         | 29974 kWh  | 9 345 €               |
| Arbeitspreis Allgemeinstrom/Aufzug (Messwert)     | 0.262 €/a                         | 3600 kWh   | 1 122 €               |
| Arbeitspreis Haushaltsstrom (Messwert)            | 0.262 €/a                         | 40800 kWh  | 12 721 €              |
| Wartung   | 150 €/a                           |            | 179 €                 |
| Instandsetzung                                    | 0.25%/a ESP, 1 %/a WP; 0.25%/a PV |            | 2 195 €               |
| Ersparnis durch Eigennutzung*                     | 0.193 €/a                         | 44750 kWh  | -8 646 €              |
| Einspeisevergütung                                | 0.107 €/a                         | 44057 kWh  | -5 626 €              |
|   |                                   | Summe      | 11 290 €              |

\*berechnet aus DC-Erzeugung 2016\*0.93, Berücksichtigung EEG-Umlage

Unter den aufgeführten Randbedingungen ergibt sich für das Effizienzhaus Plus eine statische Amortisationszeit ca. 22 Jahren (Mehrinvestitionskosten bezogen auf die jährliche Kosteneinsparung). Wird das Effizienzhaus Plus Ziel erreicht, ist die Umsetzung des Konzepts somit als wirtschaftlich zu betrachten.

Werden die tatsächlich gemessenen Werte zu Grunde gelegt, ergibt sich eine deutlich höhere Amortisationszeit des Gebäudes. Dies ist dem erhöhten Wärmeverbrauch (vgl. Kap. 5.3) und dem damit erhöhten Stromverbrauch des Gebäudes geschuldet. Durch die geringer ausfallenden Verbrauchsdifferenzen wird die Wirtschaftlichkeit des Zusatzinvests in die Gebäudehülle geringer. Es wird durch die zusätzliche Dämmung nicht die geplante Wärmemenge eingespart.

Zudem ist durch die geringe Effizienz des Systems (vgl. Kap. 5.4) ebenfalls ein erhöhter Stromverbrauch und damit eine geringe Wirtschaftlichkeit gegeben.

## 7 Zusammenfassung Monitoring

Dem Bericht liegen die Messdaten von Oktober 2015 bis September 2017 zugrunde, die Aufschluss über die Gebäudeperformance und Energieeffizienz des Mehrfamilienhauses Riedberg geben sollen.

Eine detaillierte Analyse und Auswertung sowie die Erarbeitung von Optimierungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung sind aufgrund der verspäteten Inbetriebnahme, mehrfachen Umbauarbeiten sowie häufigen und langen Messdatenausfällen nicht umsetzbar.

### Energieperformance

Das energetische Ziel, den Effizienzhaus Plus Standard im Mehrfamilienhausbau nachzuweisen wird in beiden Messperioden nicht erreicht.

Endenergetisch werden 48,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Messperiode 15/16) bzw. 12,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Messperiode 16/17) mehr Energie benötigt, als von der PV-Anlage eingespeist werden kann. Die Energiebezüge aus dem Netz übersteigen den Energieexport um 335 % bzw. 65 %.

Primärenergetisch liegen die Differenzen bei 63,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) Messperiode 15/16) bzw. 21,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Messperiode 16/17). Der Primärenergiebezug ist 148 % bzw. 42 % höher als der Primärenergieexport.

Das Nichterreichen des Effizienzhaus-Plus Standards lässt sich mit zwei wesentlichen Gründen erklären.

Zum einen gab es einen erhöhten Verbrauch an Heizenergie insbesondere zur Warmwasserbereitung sowie erhöhte Verteilverluste gegenüber der Planung

Weiterhin führen Mängel und Fehler in der Anlagentechnik (Performance der Solarabsorber unter den PV-Modulen, fehlerhafter Betrieb der Lüftungsanlage, mangelhafte WP-Regelung) dazu, dass das Heizungssystem ineffizient ist. Überprüfungen vor Ort haben gezeigt, dass die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe gesteigert werden kann. Maßnahmen hierzu wurden im Dezember 2016 (Austausch der Verdichter, Anpassungen Regelung) vorgenommen.

Aufgrund von Planungs- und Ausführungsfehlern konnten die Solarabsorber nicht die geplante Energiemenge für die Wärmepumpe bereitstellen. Der Eisspeicher musste somit früher als geplant zur Wärmequelle für die WP zum Einsatz kommen und ist dementsprechend früher als geplant eingefroren und kann deshalb nicht zur Deckung der Spitzenlasten genutzt werden. In beiden betrachteten Heizperioden mussten temporär mobile Wärmeerzeuger zum Einsatz kommen, um den Heizenergiebedarf im Gebäude zu decken.

Diese Umstände führen dazu, dass trotz planmäßiger Stromerzeugung der PV-Anlage und prognostiziertem Haushaltsstromverbrauch (ca. 2.400 kWh/(WE\*a)) kein Energieüberschuss erreicht werden konnte.



### Heizwärmeverbrauch

Der Heizwärmeverbrauch liegt in den Messperioden bei 9,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Messperiode 15/16) bzw. 18,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Messperiode 16/17). Witterungsbereinigt ergeben sich Verbräuche von 13,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) (MP 15/16) bzw. 22,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) für die Messperiode 16/17. Die Erhöhung des Heizwärmeverbrauchs ergibt sich insbesondere durch die Zunahme der vermieteten Wohnungen und damit der Anzahl der Nutzer insgesamt wie auch der beheizten Räume.

Die Abweichungen der witterungsbereinigten Verbräuche zum berechneten Heizwärmebedarf von 8,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) nach EnEV sind mit 47 bzw. 150 % unverhältnismäßig hoch.

### Trinkwarmwasserbereitung

Der Verbrauch an Trinkwarmwasser in den Wohnungen liegt bei 9,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) in der Messperiode 15/16 bzw. bei 12,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) im Messjahr 16/17. Wird der Wärmeverbrauch der nicht aufgezeichneten Übergabestationen mit einbezogen, ergibt sich im Messjahr 2016/2017 ein Verbrauch von 14,2 kWh/(m<sup>2</sup>a) (vgl. Kap. 5.3). Der Verbrauch entspricht bei einem voll vermieteten Gebäude in etwa dem Planungsansatz nach EnEV von 12,5 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Auffällig sind die hohen zusätzlichen Wärmeverbräuche im Hochtemperaturnetz (Verteilverluste, Heizkörper im Dachgeschoss, Nachheizung der Lüftungsanlage), die im Bereich von 36 % bis 66 % liegen. Hierdurch ergibt sich eine erhebliche Abweichung zur Planung, bei der Verluste im Bereich von 10 % angenommen wurden.

Durch die zusätzliche Installation eines Wärmemengenzählers für die Nachheizung der Lüftungsanlage kann ab August 2017 eine getrennte Erfassung des Wärmeverbrauchs der Lüftungsanlage und Verteilverluste im Hochtemperaturnetz erfolgen.

Weitere Optimierungspotenziale können die Senkung des Temperaturniveaus und die Reduzierung der Warmhaltung der Übergabestationen sein. Weiterhin sollte überprüft werden, in welchem Umfang die Heizkörper im Dachgeschoss zum Wärmeverbrauch beitragen und das Heizregister der Lüftungsanlage überprüft werden.

### Wärmequellen

Das System aus Solarabsorber und Eisspeicher konnte in der zweijährigen Monitoringphase nicht in den geplanten Betrieb überführt werden. Die Gründe hierfür sind:

- Erheblich höherer Heizenergieverbrauch
- Defekte Hardwarekomponenten
- Dauer der Austausch defekter Komponenten,
- Berücksichtigung von Aspekten bei Umbaumaßnahmen in einem vermieteten Objekt im Vergleich zum Einfamilienhaus (z. B. Terminabsprachen)

Durch den im Vergleich zur Planung deutlich erhöhten Wärmeverbrauch, insbesondere im Hochtemperaturnetz (mehr Bewohner, größere Fläche) ergeben sich Probleme mit den Wärmequellen.

Die Planung sah vor, dass ca. 75 % der benötigten Wärme für die Wärmepumpe durch die Solarabsorber bereitgestellt wird, während der Eisspeicher nur für die Spitzenabdeckung bei geringen Solarerträgen und/oder sehr niedrigen Außentemperaturen vorgesehen ist.

Durch Fehler in der Anlagen- und Regelungsausführung vereiste der Eisspeicher in beiden betrachteten Heizperioden früher als geplant.

Es sollte überprüft werden, wie die Solarabsorber effizienter in das Wärmeversorgungssystem integriert werden können. Hierzu kann zum einen die Umschalttemperatur zwischen den beiden Wärmequellen optimiert werden. Auf der anderen Seite kann der Wärmeübergang von der Außenluft an das Wärmeträgermedium optimiert werden. Hierzu gibt es die Option, die Umströmung und damit den konvektiven Wärmeübergang der Absorber zu verbessern. Aufgrund der Montage unterhalb der PV-Module ist eine Erhöhung der Absorberleistung durch höhere Strahlungsgewinne nicht zu realisieren.

### PV-Anlage und Batterie

Die Besonderheit des Stromerzeugungs- und Speichersystems ist, dass die eingebaute Batterie vor dem Wechselrichter auf der Gleichstromseite integriert ist, d.h. erzeugter Gleichstrom aus der PV wird nicht zu Wechselstrom gewandelt, ins Stromnetz des Gebäudes eingespeist und zur Speicherung wieder in Gleichstrom gewandelt, sondern nur einmal DC/DC-gewandelt und in der Batterie gespeichert.

Sowohl die Dach- als auch die Fassadenphotovoltaikanlage haben die Planungsziele erfüllt und zu erwartende Erträge im Bereich von 1.000 kWh/(kW<sub>p</sub> a) (Dach) bzw. 500 kWh/(kW<sub>p</sub> a) (Fassade) erbracht.

Die Batterieverluste (Entladung (DC) zu Ladung (DC)) liegen bei ca. 5 %.

Die Integration eines Stromspeichers auf DC-Seite und somit die Vermeidung zusätzlicher Wechselrichterverluste führt zu einer Gesamteffizienz des Systems (eingespeister Wechselstrom ins AC-Stromnetz des Gebäudes zu PV-Erzeugung DC) von ca. 93-94 %.

Die Eigenstrom-Nutzungsanteile von PV-Strom liegen im Bereich von etwa 55-60 % und der solare Deckungsanteil im Bereich von etwa 40-45%. Diese Werte beziehen sich auf die DC-seitige PV-Produktion und inkludieren somit alle Systemverluste.

### E-Mobilität

Die in der Tiefgarage vorhandenen Ladesäulen wurden nahezu nicht genutzt. Es besteht somit noch Optimierungspotenzial hinsichtlich der Eigenstromnutzung im Gebäude.

### Monitoring

Es kann festgehalten werden, dass bei Systemen mit mehreren Wärmequellen die Inbetriebnahme und der Betrieb zur Erreichung eines Regelbetriebs überwacht werden müssen. Gleiches gilt für die Errichtung, um Umsetzungsfehler zu vermeiden und einen planmäßigen Betrieb sicherzustellen.

Weiterhin muss die Übertragung korrekter Messdaten gegeben sein, um Auswertungen des Betriebs auch automatisiert zu ermöglichen.

Ebenso muss die Plausibilität von Messdaten gegeben und die Messtechnik robust sein. Ein nur schwer zu diagnostizierender Ausfall einer Vielzahl von Zählern wie im betrachteten Gebäude (kein Regelfall) muss vermieden werden.

Unter der Annahme eines planmäßigen Betriebs und der Verringerung der Verluste ist die Umsetzung eine Effizienzhaus Plus im Mehrfamilienhaus möglich.

## 8 Ausblick

Mit dem Austausch der Messtechnik im August 2017 konnten alle Anlagenteile erneut kontrolliert werden und mittels energetischer Bilanzierung überprüft werden, dass die gelieferten Messwerte plausibel sind.

Abbildung 36 zeigt die Wärmebilanz im Gebäude seit dem Austausch der Wärme- und Stromzähler im August 2017. Dargestellt ist die Summe der Wärmequellen inkl. dem Strom für die Heizzentrale („Quellen“ in Abbildung 36), die erzeugte Wärme der Wärmepumpe („Erzeugerabgabe“), die abgenommene Wärme in den Wärmenetzen sowie der Wärmeverbrauch in den Wohnungen.

Zu erkennen, dass die Erzeugungsverluste bei etwa 10 % liegen. Dies begründet sich aber insbesondere damit, dass im Stromzähler die komplette Peripherie der Heizzentrale enthalten ist.

Die Speicherverluste liegen unterhalb von 5 % und lassen sich mit der geringen Speichergröße im Vergleich zum Wärmeverbrauch begründen (1000 l Speicher entsprechen bei 30 K nutzbarer Temperaturdifferenz ca. 35 kWh).

Die hohen Verluste im Hochtemperaturnetz lassen sich auch hier erkennen. Bezogen auf die Gesamtwärmemenge (HT und NT) liegen die Verluste bei etwa 25 %.

Werden die Quellen betrachtet, so ist zu erkennen, dass die ab Oktober der Großteil der Wärme wie geplant aus den Solarabsorber stammt. Der vergleichsweise hohe Anteil aus dem Eisspeicher im September kann mit der Freigabe zur Kühlung begründet werden. Bis Mitte September (Zeitprogramm) war die Kühlung freigegeben und dementsprechend wurde planmäßig Trinkwarmwasser bis zu diesem Zeitpunkt mit dem Eisspeicher als Wärmequelle erzeugt.

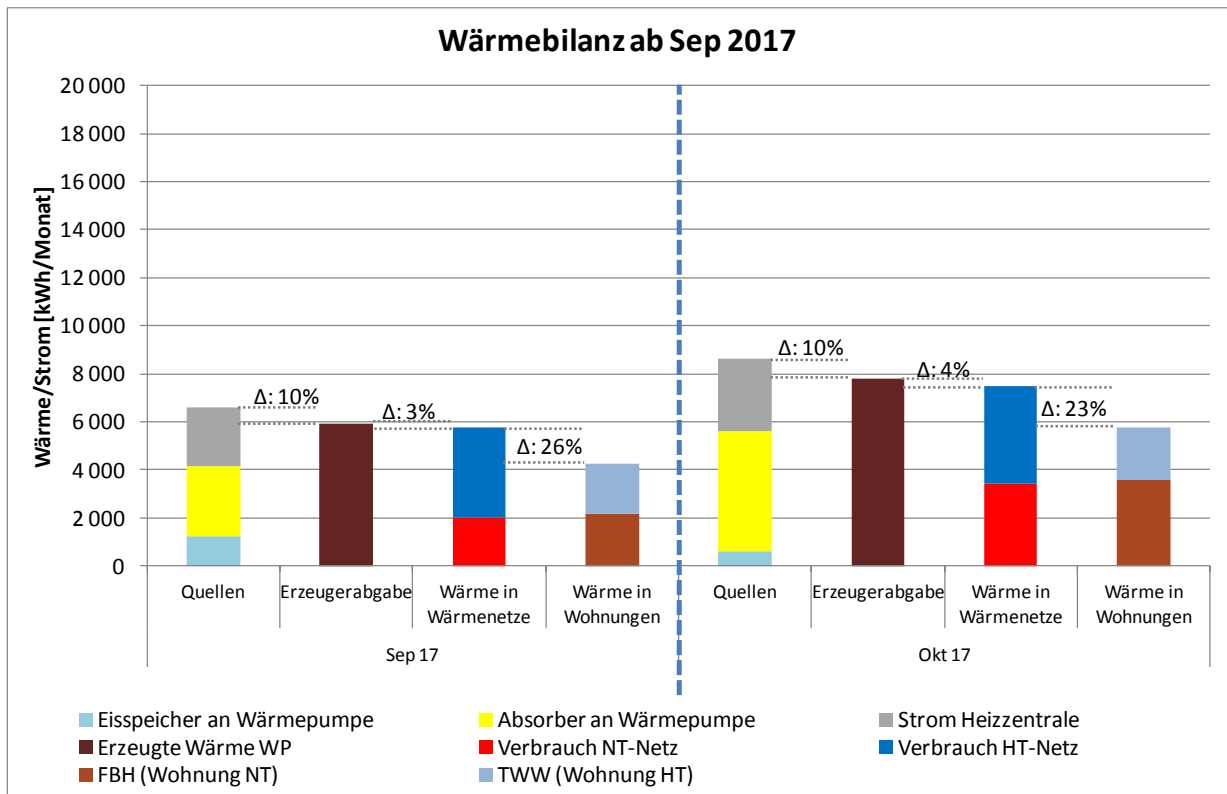


Abbildung 36: Wärmebilanz seit September 2017

Des Weiteren wurden im August 2017 im Hochtemperaturnetz elektrische Durchlauferhitzer (3x9 kW, ausgestattet mit Stromzähler) installiert und im November 2017 in Betrieb genommen. Ziel der Installation der Durchlauferhitzer ist es, unabhängig von Solarabsorber- und Eisspeicherverfügbarkeit den Mietern Trinkwarmwasser bereitstellen zu können und gleichzeitig bei sehr kalten Witterungsbedingungen den Eisspeicher entlasten zu können.

Im Falle kalter Außentemperaturen erfolgt die Wärmeversorgung für die Fußbodenheizung weiterhin über die Wärmepumpe, die Versorgung des Trinkwarmwassers übernimmt dann der Durchlauferhitzer.

Das Energiekonzept für die Heizperiode 2017/2018 zeigt Abbildung 37.

ab November 2017

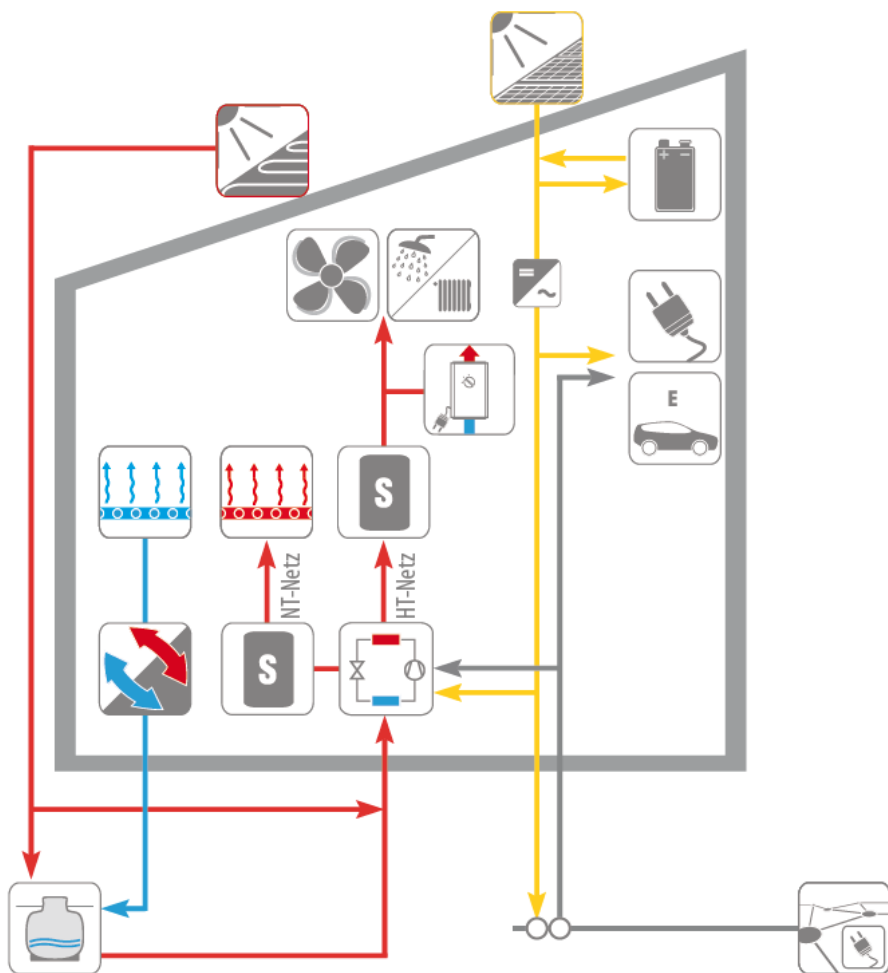


Abbildung 37: Energiekonzept ab November 2017

Für den zukünftigen Betrieb der Anlagentechnik wird erwartet, dass die Gesamtperformance des Systems steigt, da nun für längere Zeit eine ausreichende Wärmeversorgung der Wärmepumpe gegeben sein sollte und somit keine Betriebsprobleme zu erwarten sein sollten.

## 9 Betriebsoptimierung











Im Rahmen des Forschungsprojekts hat energydesign braunschweig eine aktive Funktionsbeschreibung für das Gebäude erstellt. Auf dieser Basis erfolgt ein Performance-Check zur Bewertung und Betriebsoptimierung der Wärmepumpenanlagen. Dieser Bericht dokumentiert die Prüfung des Betriebs.

### 9.1 Methodik

Im Folgenden wird zunächst die Methodik und die Erstellung einer Aktiven Funktionsbeschreibung (AFB) erläutert. Die AFB wurde mit der Software „Digitaler Prüfstand“ der synavision GmbH erstellt, die sowohl die Spezifikation des Anlagenbetriebs als auch dessen Überprüfung auf Basis von Betriebsdaten ermöglicht. Für diese Prüfung fehlten in der Vergangenheit nicht nur die Daten, sondern insbesondere auch prüfbare Funktionsbeschreibungen. Der Optimierungsansatz des Digitalen Prüfstands fokussiert deshalb auf die Prüfung der Übereinstimmung von Daten aus dem Betrieb mit den Vorgaben aus der Planung und ermöglicht für diese Prüfung einen in weiten Teilen digitalisierten Prüfprozess.

Die Methode basiert auf dem Konzept des Zustandsgraphen nach VDI 3814-6. Sie spezifiziert die Anforderungen an den Anlagenbetrieb durch Betriebszustände (BZ) und Betriebsregeln (BR) mit folgendem Aufbau:

Tabelle 11: Spezifikationskonzept Aktiver Funktionsbeschreibungen

|   |                                |
|---|--------------------------------|
|  <b>BZ00_Aus</b>     |                                |
|  BR_Prim_VL_Ve       | Prim_VL_Ve == 0                |
|  BR_Sek_RL_Pu_BM     | Sek_RL_Pu_BM == 0              |
|  ZI00                | ZI == 0                        |
|  <b>BZ01_Ein</b>     |                                |
|  BR_M001_GrWaPuAn_BM | M001_GrWaPuAn_BM == 1          |
|  BR_Prim_RL_T        | Prim_RL_T > 9                  |
|  BR_Sek_RL_Pu_BM     | Sek_RL_Pu_BM == 1              |
|  BR_Sek_VL_T         | Sek_VL_T > 11 && Sek_VL_T < 13 |
|  ZI01                | ZI == 1                        |

Der Zustandsraum in diesem Beispiel umfasst 2 Betriebszustände mit drei bzw. fünf Betriebsregeln. Die Regeln sind im digitalen Prüfstand angelegt. Die verwendeten Datenpunkte sind

grafisch dargestellt und aufgelistet. Für die Datenpunkte sind Betriebsdaten zur Prüfung zu speichern und zu übergeben.

Für jeden Zustandsraum ist ein virtueller Datenpunkt als Zustandsindikator (ZI) anzulegen, der jeweils den vorgegeben Wert für den gerade vorliegenden Betriebszustand annimmt (im Beispiel 0 oder 1).

Für die Auswertung der Betriebsdaten werden alle Betriebsregeln zu einzelnen Zeitpunkten ausgewertet. Ausgewertet wird jeweils der Betriebszustand, der entsprechend dem Zustandsindikator zu einem Zeitpunkt gültig ist. Sind alle Betriebsregeln zu einem Zeitpunkt erfüllt, ist der Betriebszustand und damit der Zustandsraum zu diesem Zeitpunkt gültig.

Für die Gesamtbewertung wird der KPI (Key Performance Indicator) Betriebsgüte der Anlage berechnet als Anteil der Zeitpunkte im Prüfzeitraum, für die der Zustandsraum als gültig ausgewertet wurde, an der Gesamtheit der Zeitpunkte im Prüfzeitraum.

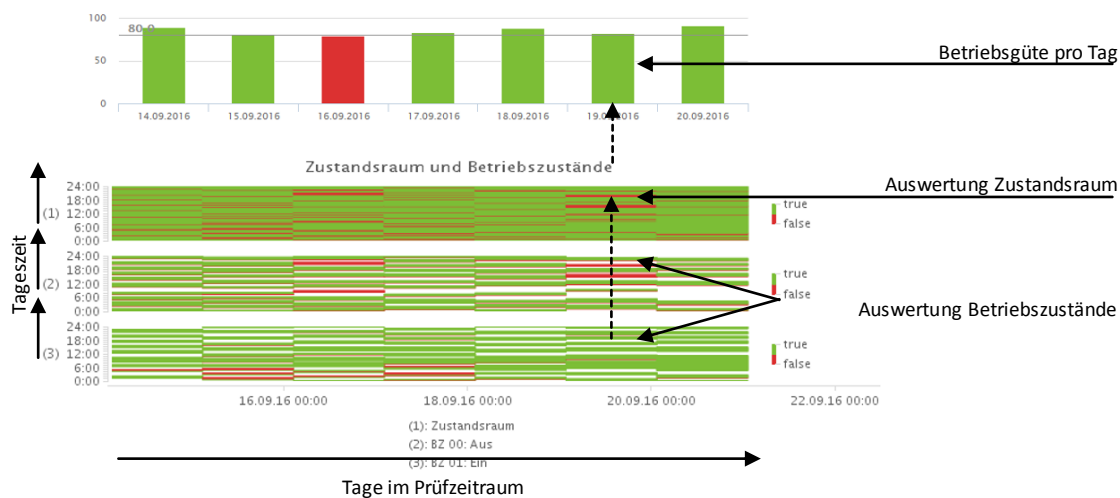


Abbildung 38: Digitales Prüfkonzept auf Basis einer Aktiven Funktionsbeschreibung

Der KPI Betriebsgüte einer Anlage muss im Prüfzeitraum an jedem Tag über 80% liegen. Weiterführende Informationen zum Spezifikations- und Prüfkonzept finden Sie unter <http://documentation.synavision.de>.



## 9.2 Spezifikation des Projekts

Für das Projekt Riedberg wurde durch das Ingenieurbüro energydesign braunschweig GmbH eine Aktive Funktionsbeschreibung auf dem digitalen Prüfstand angelegt (Abbildung 39).

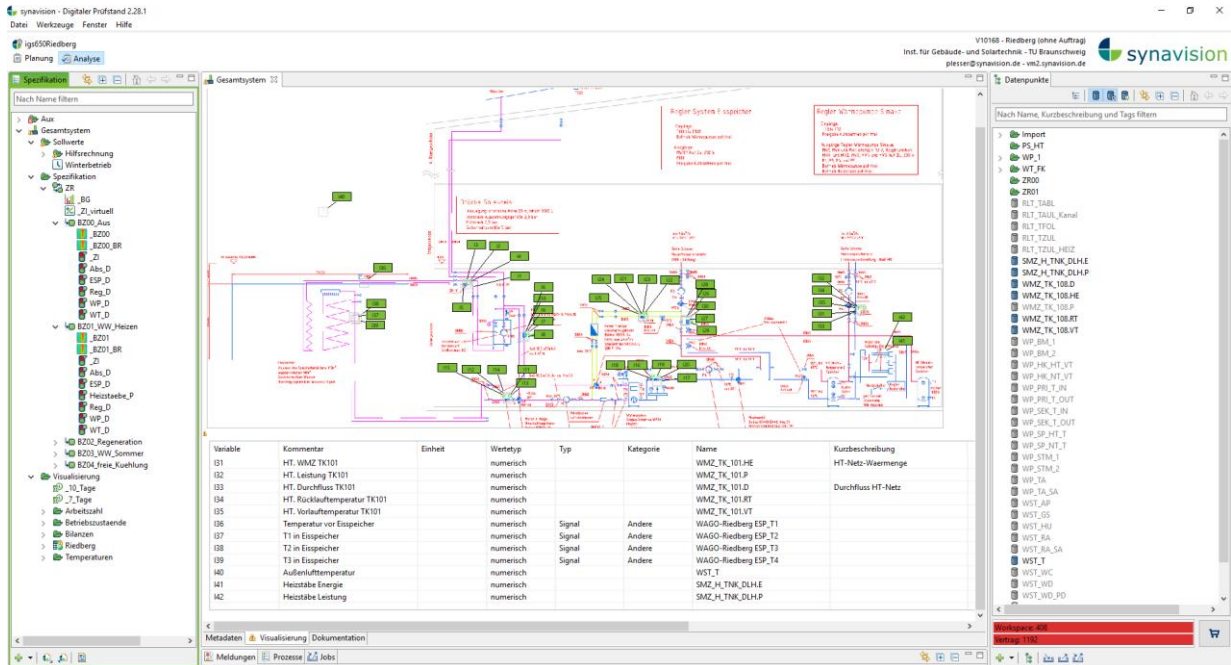


Abbildung 39: Spezifikation der Wärmepumpenanlage auf dem Digitalen Prüfstand (synavision GmbH)

Die Spezifikation umfasste 5 Betriebszustände der Anlage: Aus (0), Heizen&Warmwasser (1), Regeneration (2), Warmwasser im Sommer (3) und freie Kühlung (4), (Abbildung 40).



Abbildung 40: Spezifikation der Betriebszustände (Detail)

Für die einzelnen Betriebszustände wurden dann mit Hilfe der im digitalen Prüfstand verfügbaren domänenspezifischen Sprache einzelne Betriebsregeln für die Anlage und den jeweiligen Betriebszustand spezifiziert. Die Spezifikation in Abbildung 41 gibt vor, dass wenn die Vorlauftemperatur zur Wärmepumpe (I10) größer als  $-2^{\circ}\text{C}$  ist, der Durchfluss (I8) größer  $0 \text{ m}^3/\text{h}$  sein muss.

Regelspezifikation

1 I10 > -2 implies I8 > 0

Variablen

| Variable | Kommentar                            | Einheit | Werttyp   | Typ | Kategorie | Name          | Kurzbeschreibung                   |
|----------|--------------------------------------|---------|-----------|-----|-----------|---------------|------------------------------------|
| i 11     | Reg. WMZ TK105                       |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_105.KE |                                    |
| i 12     | Reg. Leistung TK105                  |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_105.P  |                                    |
| i 13     | Reg. Durchfluss TK105                |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_105.D  | Durchfluss Absorber ab Eisspeicher |
| i 14     | Reg. Rücklauftemperatur TK105        |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_105.RT |                                    |
| i 15     | Reg. Vorlauftemperatur TK105         |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_105.VT |                                    |
| i 16     | Abs. zu WP WMZ TK107                 |         | numerisch |     |           | WMZ_TK_107.HE |                                    |
| i 17     | Abs. zu WP Leistung TK107            |         | numerisch |     |           | WMZ_TK_107.P  |                                    |
| i 18     | Abs. zu WP Durchfluss TK107          |         | numerisch |     |           | WMZ_TK_107.D  | Durchfluss Absorber an WP          |
| i 19     | Abs. zu WP Rücklauftemperatur TK1... |         | numerisch |     |           | WMZ_TK_107.RT |                                    |
| i 110    | Abs. zu WP Vorlauftemperatur TK107   |         | numerisch |     |           | WMZ_TK_107.VT |                                    |
| i 111    | FSP WMZ TK106                        |         | numerisch |     |           | KMZ_TK_106.KF |                                    |

Abbildung 41: Spezifikation einer Betriebsregel

### 9.3 Prüfung und Auswertung

Wie oben bereits beschrieben, verlief der Datenexport im Projekt nicht optimal. Entsprechend verlief auch die Prüfung sehr zeitverzögert und nur stichprobenhaft. Zeigt eine Auswertung der Betriebsdaten einer Woche im Januar 2018, siehe Abbildung 42. Dargestellt sind die Betriebsgüte als prozentuale Darstellung der jeweils an einem Tag als gültig (fehlerfrei) ausgewerteten Zeitpunkt im Prüfzeitraum (obere Säulengrafik) sowie die aggregierten Betriebszustände – als Ergebnis der jeweils enthaltenen Betriebsregeln, dargestellt als Rasterdiagramme (grün: korrekt; rot: fehlerhaft; weiß: Betriebszustand lag zu diesem Zeitpunkt nicht vor). Erkennbar ist auf den ersten Blick, dass im Betriebszustand 1 (Heizen und Warmwasser) Fehler vorlagen.

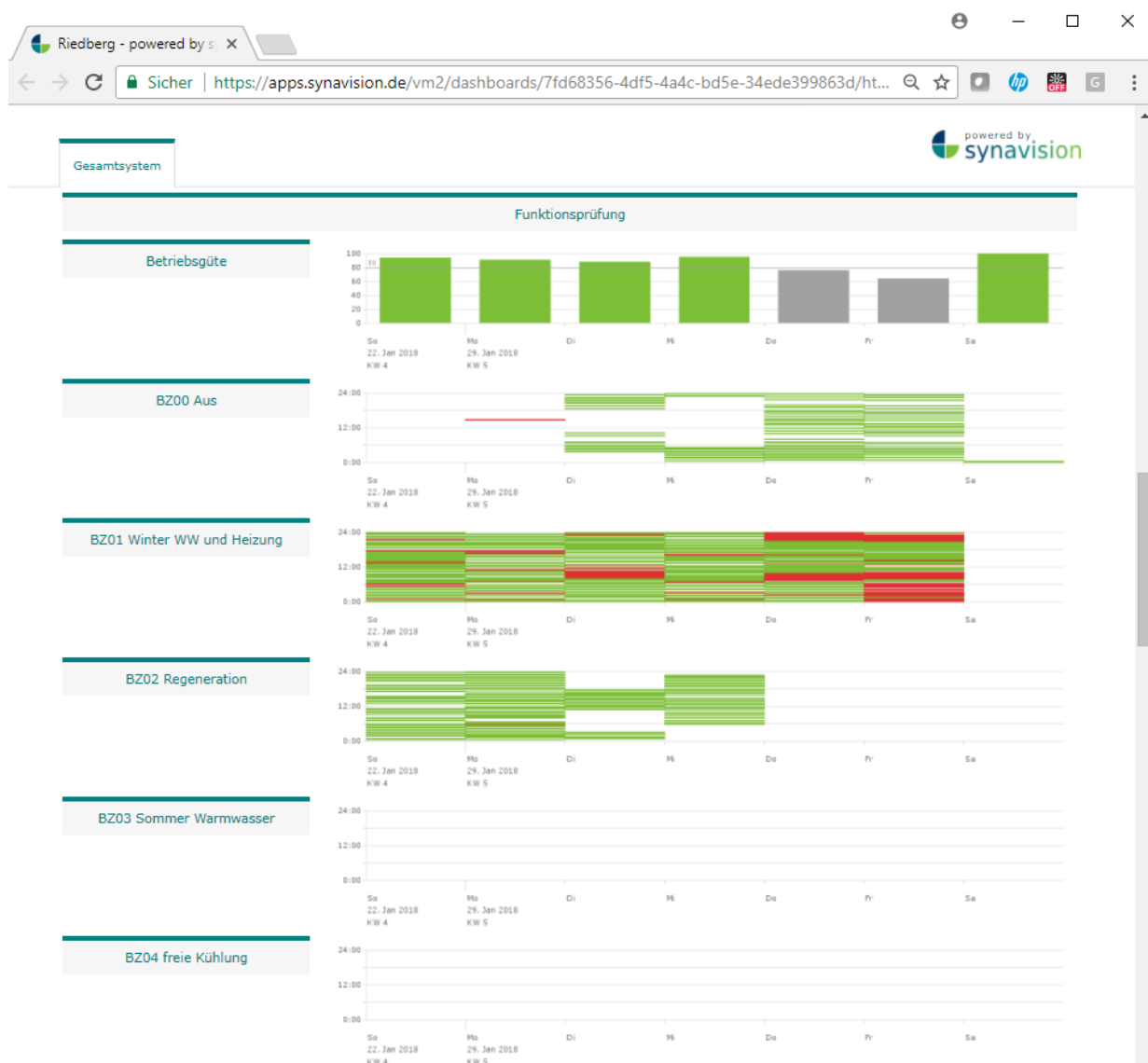
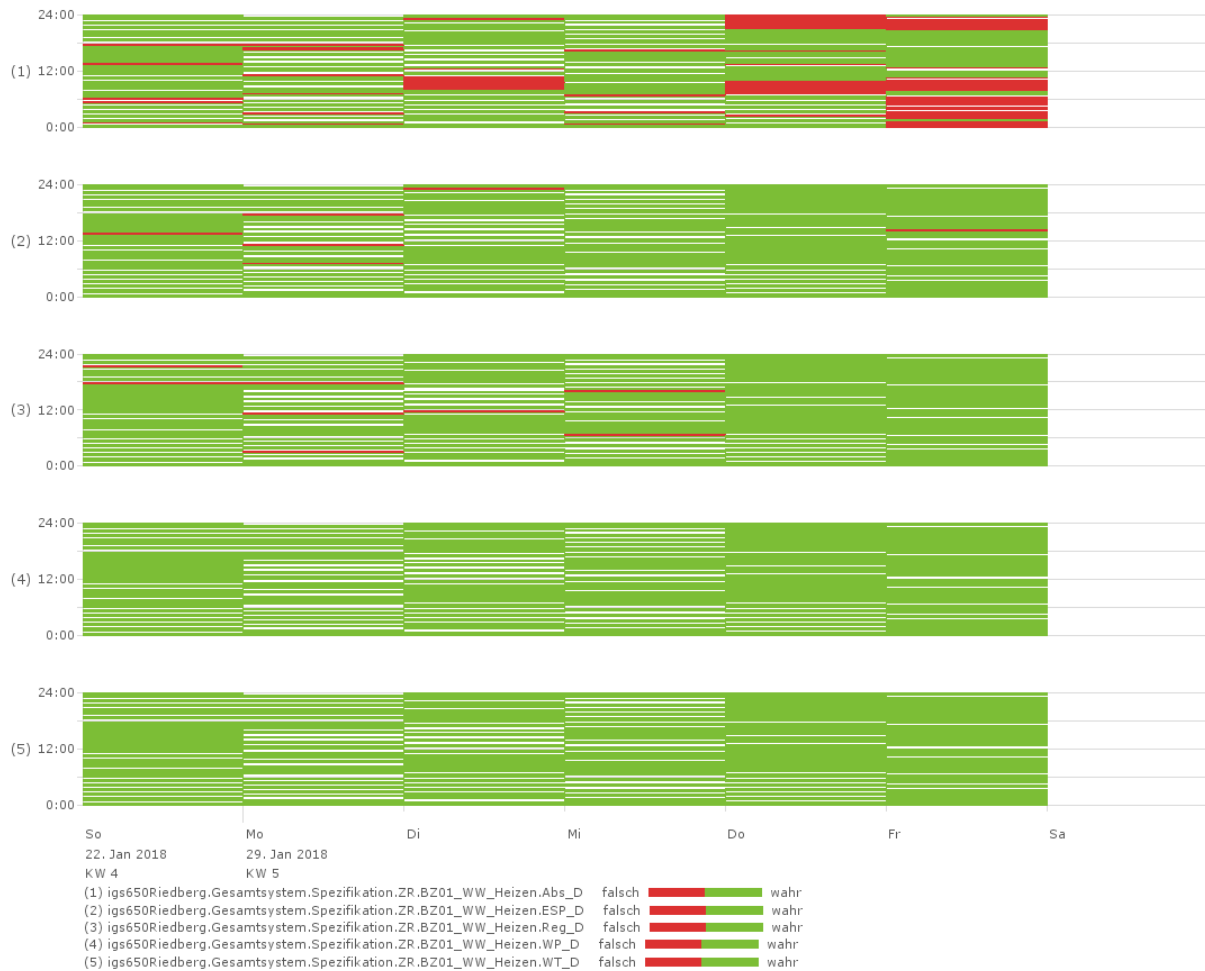


Abbildung 42: Auswertung der Betriebszustände für KW4/5, 2018

Noch eine Stufe detaillierter zeigt Abbildung 43 die einzelnen Betriebsregeln des Betriebszustands 1 mit der gleichen Darstellungsmethodik. Der Fehler lag offensichtlich, wie im oberen Rasterdiagramm zu erkennen, im Datenpunkt WW\_Heizen.Abs\_D, der eine Regel für den Durchfluss des Zählers Absorber zu Wärmepumpe enthält.



**Abbildung 43: Auswertung der Betriebsregeln im Betriebszustand 1 für KW4/5, 2018**

Die Prüfung konnte auf Grund der fehlerhaften Daten nur teilweise durchgeführt werden. Die identifizierten Fehler sind bereits in Abschnitt 4.1 genannt.

### 9.4 Visualisierung im Dashboard

Alle oben dargestellten Auswertungsgrafiken sowie zusätzliche technische Analysen sind in einem Dashboard über Webbrowser einsehbar. Mit Hilfe eines Dashboards kann schnell ein nicht ordnungsgemäßer Betrieb entdeckt werden, um eine detailliert Analyse zu initiieren und Performance- und Betriebsmängel beseitigen und die Anlage in den Regelbetrieb überführen zu können, siehe Abbildung 44.

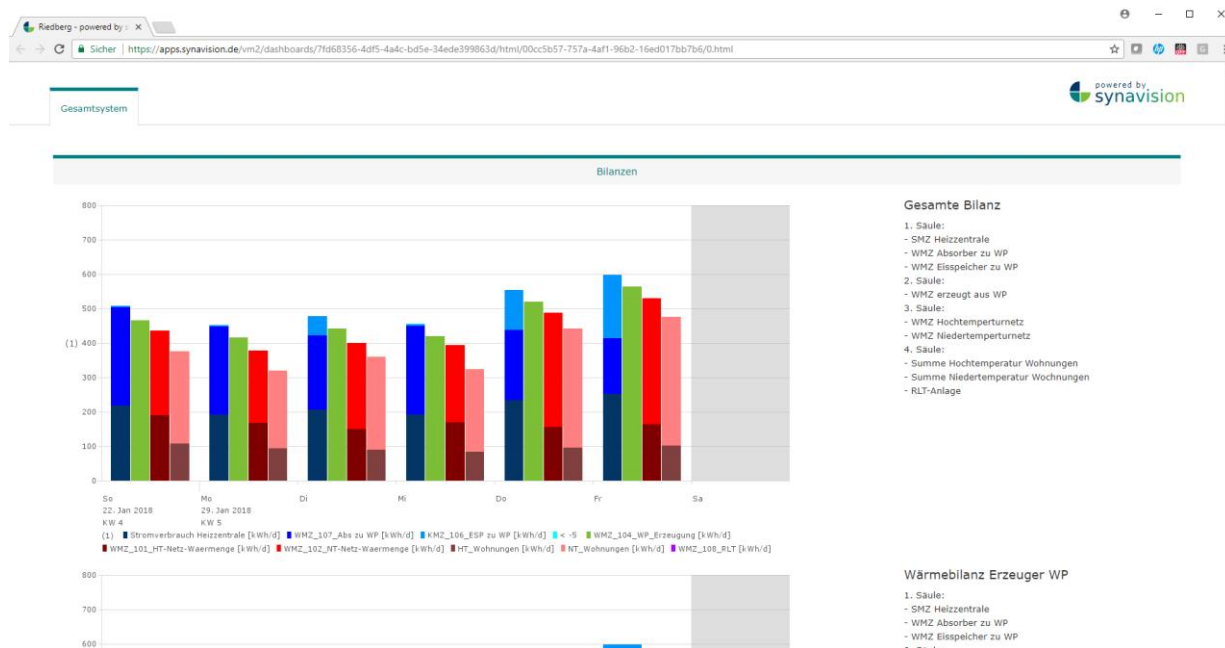


Abbildung 44: Ansicht aus dem Online-Dashboard

Das gesamte Dashboard ist einsehbar unter folgendem Link:

<https://apps.synavision.de/vm2/dashboards/7fd68356-4df5-4a4c-bd5e-34ede399863d/html/00cc5b57-757a-4af1-96b2-16ed017bb7b6/0.html>

## 10 Anhang

### 10.1 Grundrisse und Ansichten



Abbildung 45: Grundrisse Erdgeschoss und Regelgeschoss aus [2]



Abbildung 46: Gebäudeansichten von Nord-West nach Nord-Ost (Quelle: HHS Planer+Architekten)

## 10.2 Ergebnisse Energiebedarf/-deckung und EnEV

**Tabelle 12: Energiebedarf nach Kategorien**

| Name  | Heizung      | Warmwasser | Lüftung | Kühlung | Licht  | Haushalt + Kochen | sonstiges |
|---|--------------|------------|---------|---------|--------|-------------------|-----------|
| Nutzenergie Q <sub>x,b</sub> [kWh/a]                        | 19.832       | 25.580     |         |         |        |                   |           |
| Wärme-/Kälteabgabe d. Erzeugung Q <sub>x,outg</sub> [kWh/a] | 22.786       | 37.848     | 1.731   |         |        |                   |           |
| Strombedarf [kWh/a]   | 6.073        | 13.847     | 9.091   |         | 31.976 |                   |           |
|   | Gesamt kWh/a |            |         |         |        |                   |           |

**Tabelle 13: Energieerzeugung (geplant)**

| Deckung (geplant) |         |
|-------------------|---------|
| Komponente        | [kWh/a] |
| PV-Dach           | 76.960  |
| PV-Wand           | 9.514   |
| PV-weitere        |         |
| Gesamt            | 86.474  |

**Tabelle 14: Energiebedarfe nach EnEV**

| Teilabschnitt             | Erläuterung  | Energie [kWh/a] | Spez. Energie [kWh/m²a] |
|---------------------------|--|-----------------|-------------------------|
| Nutzenergie               | Nutzenergiebedarf der Räume für Heizung, Trinkwarmwasser und Kühlung   | 45.412          | 18,87                   |
| Erzeugerabgabe            | Wärme- und Kälteabgabe der Erzeuger an das Verteilnetz oder die Speicher für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung   | 60.634          | 25,19                   |
| Endenergie Erzeuger       | Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung  | 20.882          | 8,68                    |
| Endenergie Haustechnik    | Strombedarf für die Erzeugung von Wärme und Kälte für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung und Kühlung sowie Hilfsenergie für die Anlagentechnik wie Pumpen, Ventilatoren und Regelungen* | 29.974          | 12,45                   |
| Primärenergie Haustechnik | Nicht erneuerbarer Anteil des Primärenergieinhalts der gesamten Endenergie für die Haustechnik*  | 16.898          | 7,02                    |

\*ohne Berücksichtigung des eigengenutzten Stroms

\*\*unter Berücksichtigung des eigengenutzten Stroms

**Tabelle 15: Aufwandszahlen**

| Bewertete Teilabschnitte  | Aufwandszahlen / Arbeitszahlen [kWh/kWh] |
|---|--|
| Effizienz der Verteilung (Erzeugerabgabe / Nutzenergie)                               | 1,34                                     |
| Effizienz der Wärme- / Kälteerzeuger (Endenergie Erzeuger / Erzeugerabgabe)           | 0,34                                     |
| Endenergetische Effizienz der Haustechnik (Endenergie Haustechnik / Nutzenergie)      | 0,45                                     |
| Effektive Arbeitszahl der gesamten Haustechnik (Nutzenergie / Endenergie Haustechnik) | 1,51                                     |
| Arbeitszahl des Energieerzeugers (Erzeugerabgabe / Endenergie Erzeuger)               | 2,90                                     |
| Primärenergetische Effizienz der Haustechnik (Primärenergie Haustechnik/ Nutzenergie) | 0,37                                     |



### 10.3 Messdaten Strom

Abbildung 47 und Abbildung 48 sowie Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die Messdaten Strom in den beiden Messperioden. In rot sind fehlerbehaftete Werte dargestellt, in blau berechnete Werte (Bilanzen).

| kWh/Monat   | 2015   |        |        | 2016   |       |        |        |        |        |        |                  |                               |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------------------------------|
|   | Okt    | Nov    | Dez    | Jan    | Feb   | Mrz    | Apr    | Mai    | Jun    | Jul    | Aug              | Sep                           |
| Lüftungsgerät   | 711    | 1 388  | 1 394  | 886    | 1 448 | 1 158  | 1 467  | 790    | 710    | 715    | 369              | 136                           |
| Allgemeinstrom  | 220    | 236    | 220    | 239    | 558   | 480    | 724    | 246    | 237    | 217    | 263              | 240                           |
| Aufzug  | 99     | 97     | 103    | 96     | 95    | 83     | 124    | 106    | 103    | 98     | 105              | 93                            |
| Heizzentrale inkl. WP   | 3 458  | 7 183  | 6 841  | 3 843  | 404   | 204    | 987    | 5 820  | 4 293  | 4 186  | 4 400            | 2 532                         |
| Haustechnik Summe EZ  | 4 488  | 8 904  | 8 558  | 5 065  | 2 506 | 1 924  | 3 301  | 6 962  | 5 344  | 5 216  | 5 136            | 3 001                         |
| Zähler Haustechnik gesamt   | 4 488  | 16 420 | 15 722 | 5 116  | 2 508 | 1 932  | 3 532  | 7 496  | 5 892  | 5 892  | 6 156            | 3 912                         |
| Stromverbrauch in den Wohnungen                                   | 1 471  | 1 933  | 2 994  | 3 336  | 3 101 | 3 394  | 2 939  | 3 025  | 2 795  | 2 668  | 2 875            | 2 353                         |
| E-Mobilität   | 64     | 32     | 1 624  | 6 580  | 104   | 132    |        |        |        |        |                  | 8                             |
| Gesamtverbrauch aus EZ  | 6 023  | 18 385 | 20 340 | 15 032 | 5 713 | 5 458  | 6 471  | 10 521 | 8 687  | 8 560  | 9 031            | 6 273                         |
| Gesamtverbrauch aus Bilanz (inkl. Batterieverlusten)              | 3 182  | 10 420 | 13 572 | 15 391 | 6 076 | 6 520  | 6 416  | 11 542 | 9 723  | 10 519 | 10 049           | 7 950                         |
| PV-Produktion aus BMS (DC)  | 0      | 1 874  | 1 883  | 2 013  | 3 157 | 6 488  | 6 311  | 13 198 | 11 917 | 13 292 | 12 641           | 9 889                         |
| Zähler Erzeugung gesamt   | 216    | 98     | 67     | 1 772  | 5 396 | 13 676 | 24 024 | 40 704 | 12 848 | 7 872  | 8 380            | 4 504                         |
| Netzbezug   | 4 788  | 8 988  | 11 759 | 13 521 | 3 725 | 2 355  | 3 372  | 3 810  | 2 961  | 2 597  | 3 157            | 2 486                         |
| Netzeinspeisung   | 1 606  | 442    | 70     | 142    | 806   | 2 323  | 3 267  | 5 465  | 5 155  | 5 371  | 5 749            | 4 425                         |
| Eigennutzung bezogen auf DC-Produktion                            | -1 606 | 1 432  | 1 813  | 1 871  | 2 351 | 4 165  | 3 044  | 7 733  | 6 762  | 7 921  | 6 892            | 5 465                         |
| Eigennutzung bezogen auf AC-Strom ins Haus                        | -1 390 | -344   | -3     | 1 630  | 4 590 | 11 353 | 20 757 | 35 239 | 7 693  | 2 501  | 2 631            | 79                            |
| spez. Verbrauch Heizung [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ]       | 1.4    | 3.0    | 2.8    | 1.6    | 0.2   | 0.1    | 0.4    | 2.4    | 1.8    | 1.7    | 1.8              | 1.1                           |
| spez. Haushaltsstromverbrauch [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ] | 0.6    | 0.8    | 1.2    | 1.4    | 1.3   | 1.4    | 1.2    | 1.3    | 1.2    | 1.1    | 1.2              | 1.0                           |
| spez. Gesamtverbrauch [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ]         | 3      | 8      | 8      | 6      | 2     | 2      | 3      | 4      | 4      | 4      | 4                | 3                             |
| spez. PV-Produktion [kWh/kW <sub>p</sub> ]                        | 0.0    | 18.8   | 18.9   | 20.2   | 31.7  | 65.1   | 63.3   | 132.4  | 119.6  | 133.4  | 126.9            | 99.2                          |
| Batterie Ladung DC  | fehlt  | fehlt  | fehlt  | 996    | 1 002 | 1 618  | 1 075  | 2 228  | 2 024  | 2 267  | 2 194            | 1 994                         |
| Batterie Entladung DC   | fehlt  | fehlt  | fehlt  | 957    | 993   | 1 499  | 1 121  | 2 078  | 1 924  | 2 135  | 2 074            | 1 879                         |
| PV Dach DC  | 0      | 1 693  | 1 718  | 1 810  | 2 867 | 5 909  | 5 762  | 12 237 | 11 136 | 12 361 | 11 493           | 8 855                         |
| PV Fassade DC   | 0      | 181    | 165    | 202    | 290   | 579    | 549    | 961    | 781    | 931    | 1 148            | 1 035                         |
|   |        |        |        |        |       |        |        |        |        |        | berechnete Werte | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |

Abbildung 47: Messwerte Strom Messzeitraum 2015/2016

| kWh/Monat   | 2016   |        |        | 2017    |         |         |        |        |        |        |                  |                               |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------------------------------|
|   | Okt    | Nov    | Dez    | Jan     | Feb     | Mrz     | Apr    | Mai    | Jun    | Jul    | Aug              | Sep                           |
| Lüftungsgerät   | 166    | 137    | 47     | 1       | 0       | 0       | 0      | 0      | 0      | 0      | 879              | 1 216                         |
| Allgemeinstrom  | 258    | 246    | 256    | 250     | 220     | 246     | 211    | 196    | 184    | 212    | 295              | 266                           |
| Aufzug  | 57     | 57     | 45     | 29      | 12      | 12      | 11     | 11     | 10     | 10     | 74               | 93                            |
| Heizzentrale inkl. WP   | 3 691  | 5 500  | 6 467  | 5 020   | 2 281   | 3 660   | 3 671  | 2 845  | 1 997  | 2 257  | 2 129            | 2 440                         |
| Haustechnik Summe EZ  | 4 172  | 5 940  | 6 814  | 5 300   | 2 512   | 3 918   | 3 892  | 3 053  | 2 191  | 2 480  | 3 377            | 4 016                         |
| Zähler Haustechnik gesamt   | 5 376  | 7 036  | 7 816  | 6 540   | 3 604   | 5 316   | 5 376  | 4 552  | 3 676  | 4 200  | 4 453            | 4 047                         |
| Stromverbrauch in den Wohnungen                                   | 2 230  | 1 936  | 1 740  | 1 637   | 1 261   | 1 246   | 1 208  | 1 309  | 1 118  | 1 204  | 2 671            | 3 249                         |
| E-Mobilität   | 188    | 40     | 860    | Ausfall | Ausfall | Ausfall | 16     | 4      | 16     | 8      | 924              | 0                             |
| Gesamtverbrauch aus EZ  | 7 794  | 9 012  | 10 416 | 8 177   | 4 865   | 6 562   | 6 600  | 5 865  | 4 810  | 5 412  | 8 047            | 7 296                         |
| Gesamtverbrauch aus Bilanz (inkl. Batterieverlusten)              | 9 445  | 11 058 | 12 148 | 17 181  | 14 711  | 11 146  | 9 018  | 8 639  | 7 626  | 8 076  | 8 013            | 7 935                         |
| PV-Produktion aus BMS (DC)  | 4 527  | 2 709  | 1 813  | 2 555   | 3 618   | 8 806   | 11 447 | 13 000 | 14 295 | 12 635 | 11 645           | 8 890                         |
| Zähler Erzeugung gesamt   | 0      | 0      | 1 123  | 2 375   | 3 387   | 8 249   | 10 806 | 12 251 | 13 496 | 11 908 | 8 483            | 5 546                         |
| Netzbezug   | 6 223  | 8 706  | 10 389 | 14 763  | 11 661  | 5 834   | 3 309  | 3 054  | 1 512  | 2 098  | 2 521            | 3 045                         |
| Netzeinspeisung   | 1 305  | 357    | 54     | 137     | 568     | 3 494   | 5 737  | 7 415  | 8 181  | 6 657  | 6 153            | 4 000                         |
| Eigennutzung bezogen auf DC-Produktion                            | 3 222  | 2 352  | 1 759  | 2 418   | 3 050   | 5 313   | 5 709  | 5 585  | 6 114  | 5 978  | 5 492            | 4 889                         |
| Eigennutzung bezogen auf AC-Strom ins Haus                        | -1 305 | -357   | 1 069  | 2 238   | 2 819   | 4 755   | 5 069  | 4 836  | 5 315  | 5 251  | 2 330            | 1 546                         |
| spez. Verbrauch Heizung [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ]       | 1.5    | 2.3    | 2.7    | 2.1     | 0.9     | 1.5     | 1.5    | 1.2    | 0.8    | 0.9    | 0.9              | 1.0                           |
| spez. Haushaltsstromverbrauch [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ] | 0.9    | 0.8    | 0.7    | 0.7     | 0.5     | 0.5     | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 0.5    | 1.1              | 1.3                           |
| spez. Gesamtverbrauch [kWh/m <sup>2</sup> <sub>AN</sub> ]         | 3      | 4      | 4      | 3       | 2       | 3       | 3      | 2      | 2      | 2      | 3                | 3                             |
| spez. PV-Produktion [kWh/kW <sub>p</sub> ]                        | 45.4   | 27.2   | 18.2   | 25.6    | 36.3    | 88.4    | 114.9  | 130.5  | 143.5  | 126.8  | 116.9            | 89.2                          |
| Batterie Ladung DC  | 578    | 867    | 423    | 640     | 842     | 1 842   | 1 786  | 1 556  | 2 072  | 2 003  | 1 989            | 1 888                         |
| Batterie Entladung DC   | 594    | 865    | 468    | 707     | 868     | 1 775   | 1 726  | 1 439  | 1 917  | 1 866  | 1 863            | 1 795                         |
| PV Dach DC  | 4 113  | 2 435  | 1 614  | 2 261   | 3 231   | 7 887   | 10 377 | 12 015 | 13 271 | 11 707 | 10 645           | 7 996                         |
| PV Fassade DC   | 415    | 274    | 199    | 294     | 387     | 920     | 1 070  | 986    | 1 024  | 928    | 1 000            | 894                           |
|   |        |        |        |         |         |         |        |        |        |        | berechnete Werte | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |

Abbildung 48: Messwerte Strom Messzeitraum 2016/2017

|        | Netzbezug | PV-Ertrag (DC) | PV-Einspeisung | PV-Eigenverbrauch | Heizung/TWW/<br>Kühlung | Lüftung | Allgemein-<br>strom | Aufzug | Nutzerstrom                 | Hausautomation                | Gesamtverbrauch inkl.<br>Verlusten des<br>Erzeugungssystems |
|--------|-----------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------|---------------------|--------|-----------------------------|-------------------------------|---|
| Okt 15 | 4 788     | 0              | 1 606          | -1 606            | 3 458                   | 711     | 220                 | 99     | 1 471                       | nicht separat aufgezeichnet   | 3 182   |
| Nov 15 | 8 988     | 1 874          | 442            | 1 432             | 7 183                   | 1 388   | 236                 | 97     | 1 933                       | nicht separat aufgezeichnet   | 10 420  |
| Dez 15 | 11 759    | 1 883          | 70             | 1 813             | 6 841                   | 1 394   | 220                 | 103    | 2 994                       | nicht separat aufgezeichnet   | 13 572  |
| Jan 16 | 13 521    | 2 013          | 142            | 1 871             | 3 843                   | 886     | 239                 | 96     | 3 336                       | nicht separat aufgezeichnet   | 15 391  |
| Feb 16 | 3 725     | 3 157          | 806            | 2 351             | 404                     | 1 448   | 558                 | 95     | 3 101                       | nicht separat aufgezeichnet   | 6 076   |
| Mrz 16 | 2 355     | 6 488          | 2 323          | 4 165             | 204                     | 1 158   | 480                 | 83     | 3 394                       | nicht separat aufgezeichnet   | 6 520   |
| Apr 16 | 3 372     | 6 311          | 3 267          | 3 044             | 987                     | 1 467   | 724                 | 124    | 2 939                       | nicht separat aufgezeichnet   | 6 416   |
| Mai 16 | 3 810     | 13 198         | 5 465          | 7 733             | 5 820                   | 790     | 246                 | 106    | 3 025                       | nicht separat aufgezeichnet   | 11 542  |
| Jun 16 | 2 961     | 11 917         | 5 155          | 6 762             | 4 293                   | 710     | 237                 | 103    | 2 795                       | nicht separat aufgezeichnet   | 9 723   |
| Jul 16 | 2 597     | 13 292         | 5 371          | 7 921             | 4 186                   | 715     | 217                 | 98     | 2 668                       | nicht separat aufgezeichnet   | 10 519  |
| Aug 16 | 3 157     | 12 641         | 5 749          | 6 892             | 4 400                   | 369     | 263                 | 105    | 2 875                       | nicht separat aufgezeichnet   | 10 049  |
| Sep 16 | 2 486     | 9 889          | 4 425          | 5 465             | 2 532                   | 136     | 240                 | 93     | 2 353                       | nicht separat aufgezeichnet   | 7 950   |
| Okt 16 | 6 223     | 4 527          | 1 305          | 3 222             | 3 691                   | 166     | 258                 | 57     | 2 230                       | nicht separat aufgezeichnet   | 9 445   |
| Nov 16 | 8 706     | 2 709          | 357            | 2 352             | 5 500                   | 137     | 246                 | 57     | 1 936                       | nicht separat aufgezeichnet   | 11 058  |
| Dez 16 | 10 389    | 1 813          | 54             | 1 759             | 6 467                   | 47      | 256                 | 45     | 1 740                       | nicht separat aufgezeichnet   | 12 148  |
| Jan 17 | 14 763    | 2 555          | 137            | 2 418             | 5 020                   | 1       | 250                 | 29     | 1 637                       | nicht separat aufgezeichnet   | 17 181  |
| Feb 17 | 11 661    | 3 618          | 568            | 3 050             | 2 281                   | 0       | 220                 | 12     | 1 261                       | nicht separat aufgezeichnet   | 14 711  |
| Mrz 17 | 5 834     | 8 806          | 3 494          | 5 313             | 3 660                   | 0       | 246                 | 12     | 1 246                       | nicht separat aufgezeichnet   | 11 146  |
| Apr 17 | 3 309     | 5 737          | 5 709          | 3 671             | 0                       | 211     | 11                  | 1 208  | nicht separat aufgezeichnet | 9 018                         |   |
| Mai 17 | 3 054     | 13 000         | 7 415          | 5 585             | 2 845                   | 0       | 196                 | 11     | 1 309                       | nicht separat aufgezeichnet   | 8 639   |
| Jun 17 | 1 512     | 14 295         | 8 181          | 6 114             | 1 997                   | 0       | 184                 | 10     | 1 118                       | nicht separat aufgezeichnet   | 7 626   |
| Jul 17 | 2 098     | 12 635         | 6 657          | 5 978             | 2 257                   | 0       | 212                 | 10     | 1 204                       | nicht separat aufgezeichnet   | 8 076   |
| Aug 17 | 2 521     | 11 645         | 6 153          | 5 492             | 2 129                   | 879     | 295                 | 74     | 2 671                       | nicht separat aufgezeichnet   | 8 013   |
| Sep 17 | 3 045     | 8 890          | 4 000          | 4 889             | 2 440                   | 1 216   | 266                 | 93     | 3 249                       | nicht separat aufgezeichnet   | 7 935   |
|        |           |                |                | berechnete Werte  |                         |         |                     |        |                             | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |   |

Abbildung 49: Stromverbrauch nach Kategorien

|        | Heizung/TWW/Kühlung | Lüftung | E-Mobilität | projektspezifisch             |
|--------|---------------------|---------|-------------|-------------------------------|
| Okt 15 | 3 458               | 711     | 64          | nicht separat aufgezeichnet   |
| Nov 15 | 7 183               | 1 388   | 32          | nicht separat aufgezeichnet   |
| Dez 15 | 6 841               | 1 394   | 1 624       | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jan 16 | 3 843               | 886     | 6 580       | nicht separat aufgezeichnet   |
| Feb 16 | 404                 | 1 448   | 104         | nicht separat aufgezeichnet   |
| Mrz 16 | 204                 | 1 158   | 132         | nicht separat aufgezeichnet   |
| Apr 16 | 987                 | 1 467   | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Mai 16 | 5 820               | 790     | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jun 16 | 4 293               | 710     | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jul 16 | 4 186               | 715     | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Aug 16 | 4 400               | 369     | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Sep 16 | 2 532               | 136     | 8           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Okt 16 | 3 691               | 166     | 188         | nicht separat aufgezeichnet   |
| Nov 16 | 5 500               | 137     | 40          | nicht separat aufgezeichnet   |
| Dez 16 | 6 467               | 47      | 860         | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jan 17 | 5 020               | 1       | Ausfall     | nicht separat aufgezeichnet   |
| Feb 17 | 2 281               | 0       | Ausfall     | nicht separat aufgezeichnet   |
| Mrz 17 | 3 660               | 0       | Ausfall     | nicht separat aufgezeichnet   |
| Apr 17 | 3 671               | 0       | 16          | nicht separat aufgezeichnet   |
| Mai 17 | 2 845               | 0       | 4           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jun 17 | 1 997               | 0       | 16          | nicht separat aufgezeichnet   |
| Jul 17 | 2 257               | 0       | 8           | nicht separat aufgezeichnet   |
| Aug 17 | 2 129               | 879     | 924         | nicht separat aufgezeichnet   |
| Sep 17 | 2 440               | 1 216   | 0           | nicht separat aufgezeichnet   |
|        | berechnete Werte    |         |             | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |

Abbildung 50: Stromverbrauch Haustechnik und E-Mobilität

### 10.4 Messdaten Wärme

Abbildung 51 und Abbildung 52 sowie Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen die Messdaten Wärme in den beiden Messperioden. In rot sind fehlerbehaftete Werte dargestellt, in blau berechnete Werte (Bilanzen).

|  | 2015   |        |        |        | 2016  |        |                  |        |       |                               |       |       |
|--|--------|--------|--------|--------|-------|--------|------------------|--------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| in kWh   | Okt    | Nov    | Dez    | Jan    | Feb   | Mrz    | Apr              | Mai    | Jun   | Jul                           | Aug   | Sep   |
| Wärme aus Eisspeicher an WP                      | fehlt  | 12 441 | 22 023 | 4 017  | 0     | 0      | 0                | 0      | 3 476 | 9 256                         | 4 913 | 2 306 |
| Wärme aus Solarabsorber an WP                    | fehlt  | 0      | 0      | 0      | 0     | 0      | 0                | 0      | 41    | 73                            | 91    | 475   |
| Strom WP (Bilanz)                                | fehlt  | 13 776 | 10 201 | 16 531 | 6 801 | 15 426 | 1 345            | 11 366 | 4 756 | -1 261                        | 3 561 | 1 997 |
| erzeugte Wärme WP                                | fehlt  | 26 217 | 32 224 | 20 548 | 6 801 | 15 426 | 1 345            | 11 366 | 8 273 | 8 067                         | 8 565 | 4 778 |
| Wärmeverbrauch im NT-Netz                        | fehlt  | 1 472  | 3 714  | 3 421  | 0     | 3 087  | 580              | 1 437  | 2     | 3                             | 2     | 0     |
| Wärmeverbrauch im HT-Netz                        | fehlt  | 8 124  | 9 751  | 6 977  | 2 355 | 9 668  | 8 426            | 8 738  | 7 705 | 7 422                         | 7 951 | 4 320 |
| Speicherverluste [kWh]                           | fehlt  | 16 621 | 18 759 | 10 150 | 4 446 | 2 671  | -7 661           | 1 191  | 566   | 642                           | 612   | 458   |
| Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen FBH           | 3 582  | 2 400  | 3 819  | 5 006  | 3 053 | 3 708  | 629              | 1 482  | 5     | 35                            | 86    | 31    |
| Wärmeverbrauch in den Wohnungen HT               | 1 087  | 1 173  | 2 018  | 2 358  | 2 608 | 2 634  | 2 373            | 2 081  | 1 787 | 1 597                         | 2 098 | 1 821 |
| Verluste+RLT im HT-Netz (Bilanz)                 | -1 087 | 6 951  | 7 733  | 4 619  | -253  | 7 034  | 6 053            | 6 657  | 5 918 | 5 825                         | 5 853 | 2 499 |
| Wärmeverbrauch in RLT (gemessen seit 11.08.2017) |        |        |        |        |       |        |                  |        |       |                               |       |       |
| Absorber an Eisspeicher                          | fehlt  | fehlt  | fehlt  | fehlt  | fehlt | fehlt  | 760              | 506    | 13    | 9                             | 0     | 2     |
| Kühlung  | fehlt  | fehlt  | fehlt  | fehlt  | fehlt | fehlt  | 1                | 0      | 1     | 1 857                         | 5 413 | 2 225 |
|  |        |        |        |        |       |        | berechnete Werte |        |       | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |       |       |

Abbildung 51: Messwerte Wärme Messzeitraum 2015/2016

|  | 2017  |        |        |        |        |        |                  |       |       |                               |       |       |
|--|-------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| in kWh   | Okt   | Nov    | Dez    | Jan    | Feb    | Mrz    | Apr              | Mai   | Jun   | Jul                           | Aug   | Sep   |
| Wärme aus Eisspeicher an WP                      | 1 326 | 5 235  | 10 283 | 12 075 | 816    | 612    | 2 264            | 2 108 | 4 463 | 5 579                         | 2 457 | 1 220 |
| Wärme aus Solarabsorber an WP                    | 2 171 | 1 428  | 749    | 2 346  | 2 643  | 3 655  | 3 449            | 2 841 | 102   | 83                            | 143   | 2 939 |
| Strom WP (Bilanz)                                | 4 061 | 4 284  | 1 983  | -2 930 | 2 005  | 3 395  | 1 997            | 1 271 | -275  | -1 378                        | 580   | 1 782 |
| erzeugte Wärme WP                                | 7 558 | 10 947 | 13 015 | 11 491 | 5 464  | 7 662  | 7 710            | 6 220 | 4 290 | 4 284                         | 3 180 | 5 941 |
| Wärmeverbrauch im NT-Netz                        | 2 397 | 5 426  | 7 384  | 9 714  | 7 176  | 3 669  | 2 513            | 1 487 | 561   | 601                           | 532   | 2 011 |
| Wärmeverbrauch im HT-Netz                        | 4 382 | 4 939  | 5 169  | 5 615  | 4 872  | 5 171  | 4 575            | 4 470 | 3 621 | 3 622                         | 3 088 | 3 738 |
| Speicherverluste [kWh]                           | 779   | 582    | 462    | -3 838 | -6 584 | -1 178 | 622              | 263   | 108   | 61                            | -440  | 192   |
| Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen FBH           | 2 458 | 5 468  | 7 569  | 11 291 | 7 070  | 3 685  | 2 513            | 1 308 | 395   | 470                           | 680   | 2 179 |
| Wärmeverbrauch in den Wohnungen HT               | 2 395 | 2 948  | 2 979  | 3 303  | 2 825  | 2 831  | 2 377            | 2 409 | 1 880 | 1 969                         | 1 818 | 2 083 |
| Verluste+RLT im HT-Netz (Bilanz)                 | 1 987 | 1 991  | 2 190  | 2 312  | 2 047  | 2 340  | 2 198            | 2 061 | 1 741 | 1 653                         | 1 270 | 1 655 |
| Wärmeverbrauch in RLT (gemessen seit 11.08.2017) |       |        |        |        |        |        |                  |       |       |                               | 0     | 0     |
| Absorber an Eisspeicher                          | 0     | 2 541  | 4 057  | 91     | 5 883  | 7 199  | 4                | 2 632 | 1     | 0                             | 223   | 640   |
| Kühlung  | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0                | 112   | 3 349 | 3 060                         | 911   | 0     |
|  |       |        |        |        |        |        | berechnete Werte |       |       | fehlerbehaftet (Zählerdefekt) |       |       |

Abbildung 52: Messwerte Wärme Messzeitraum 2016/2017

| Verbrauch HT [kWh/Monat] | Okt 15 | Nov 15 | Dez 15 | Jan 16 | Feb 16 | Mrz 16 | Apr 16 | Mai 16 | Jun 16 | Jul 16 | Aug 16 | Sep 16 | Summe |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Wohnung 1                | 18     | 13     | 14     | 17     | 17     | 38     | 14     | 15     | 21     | 15     | 70     | 45     | 297   |
| Wohnung 2                | 10     | 9      | 55     | 395    | 480    | 444    | 401    | 384    | 286    | 233    | 368    | 313    | 3378  |
| Wohnung 3                | 60     | 123    | 147    | 125    | 114    | 116    | 94     | 82     | 59     | 14     | 105    | 87     | 1126  |
| Wohnung 4                | 85     | 97     | 146    | 126    | 139    | 154    | 109    | 78     | 119    | 53     | 49     | 66     | 1221  |
| Wohnung 5                | 14     | 77     | 383    | 358    | 398    | 335    | 333    | 297    | 243    | 228    | 271    | 244    | 3181  |
| Wohnung 6                | 184    | 90     | 191    | 224    | 193    | 143    | 205    | 190    | 120    | 137    | 124    | 127    | 1928  |
| Wohnung 7                | 81     | 78     | 95     | 97     | 113    | 143    | 127    | 102    | 73     | 82     | 103    | 66     | 1160  |
| Wohnung 8                | 12     | 8      | 11     | 13     | 16     | 10     | 16     | 161    | 196    | 161    | 145    | 157    | 906   |
| Wohnung 9                | 86     | 94     | 123    | 95     | 111    | 150    | 116    | 97     | 88     | 63     | 89     | 66     | 1178  |
| Wohnung 10               | 126    | 141    | 176    | 174    | 183    | 178    | 156    | 152    | 138    | 118    | 142    | 122    | 1806  |
| Wohnung 11               | 92     | 110    | 95     | 108    | 163    | 153    | 130    | 123    | 91     | 54     | 113    | 117    | 1349  |
| Wohnung 12               | 138    | 141    | 174    | 175    | 183    | 194    | 181    | 130    | 106    | 109    | 117    | 75     | 1723  |
| Wohnung 13               | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 53     | 76     | 0      | 0      | 1      | 0      | 7      | 137   |
| Wohnung 14               | 6      | 0      | 26     | 64     | 70     | 89     | 3      | 0      | 6      | 68     | 78     | 78     | 488   |
| Wohnung 15               | 93     | 100    | 140    | 153    | 140    | 114    | 117    | 69     | 74     | 67     | 86     | 90     | 1243  |
| Wohnung 16               | 71     | 69     | 95     | 110    | 105    | 113    | 123    | 91     | 50     | 70     | 63     | 69     | 1029  |
| Wohnung 17               | 11     | 23     | 147    | 124    | 183    | 207    | 172    | 110    | 117    | 124    | 175    | 92     | 1485  |

Abbildung 53: Wärmeverbrauch HT in den Wohnungen 2015/2016

| Verbrauch HT [kWh/Monat] | Okt 16 | Nov 16 | Dez 16 | Jan 17 | Feb 17 | Mrz 17 | Apr 17 | Mai 17 | Jun 17 | Jul 17 | Aug 17 | Sep 17 | Summe |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Wohnung 1                | 110    | 82     | 76     | 82     | 68     | 70     | 56     | 88     | 54     | 63     | 22     | 37     | 808   |
| Wohnung 2                | 292    | 397    | 498    | 457    | 380    | 479    | 175    | 358    | 342    | 361    | 241    | 312    | 4292  |
| Wohnung 3                | 116    | 184    | 151    | 209    | 165    | 150    | 186    | 161    | 95     | 205    | 159    | 127    | 1908  |
| Wohnung 4                | 102    | 131    | 158    | 129    | 135    | 141    | 89     | 108    | 41     | 51     | 49     | 1      | 1135  |
| Wohnung 5                | 301    | 396    | 382    | 422    | 345    | 293    | 289    | 274    | 180    | 244    | 202    | 267    | 3595  |
| Wohnung 6                | 130    | 217    | 230    | 232    | 247    | 245    | 168    | 178    | 131    | 82     | 134    | 165    | 2159  |
| Wohnung 7                | 88     | 110    | 136    | 144    | 122    | 134    | 113    | 102    | 84     | 88     | 83     | 88     | 1292  |
| Wohnung 8                | 209    | 250    | 272    | 363    | 295    | 309    | 226    | 252    | 199    | 130    | 175    | 258    | 2938  |
| Wohnung 9                | 94     | 80     | 105    | 117    | 108    | 130    | 112    | 93     | 89     | 45     | 82     | 90     | 1145  |
| Wohnung 10               | 151    | 172    | 192    | 199    | 179    | 222    | 117    | 130    | 154    | 131    | 113    | 97     | 1857  |
| Wohnung 11               | 150    | 198    | 204    | 299    | 252    | 221    | 172    | 173    | 53     | 142    | 132    | 168    | 2164  |
| Wohnung 12               | 125    | 163    | 212    | 204    | 184    | 178    | 151    | 137    | 133    | 101    | 119    | 121    | 1828  |
| Wohnung 13               | 8      | 5      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 13    |
| Wohnung 14               | 95     | 98     | 114    | 145    | 116    | 124    | 125    | 94     | 80     | 78     | 64     | 80     | 1213  |
| Wohnung 15               | 121    | 133    | 158    | 199    | 144    | 125    | 136    | 121    | 96     | 94     | 76     | 107    | 1510  |
| Wohnung 16               | 96     | 110    | 89     | 100    | 84     | 8      | 255    | 137    | 148    | 148    | 165    | 162    | 1502  |
| Wohnung 17               | 207    | 222    | 2      | 2      | 1      | 2      | 7      | 3      | 1      | 6      | 2      | 3      | 458   |

Abbildung 54: Wärmeverbrauch HT in den Wohnungen 2016/2017

| Verbrauch NT [kWh/Monat] | Okt 15 | Nov 15 | Dez 15 | Jan 16 | Feb 16 | Mrz 16 | Apr 16 | Mai 16 | Jun 16 | Jul 16 | Aug 16 | Sep 16 | Summe |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Wohnung 1                | 79     | 83     | 0      | 57     | 0      | 368    | 46     | 60     | 0      | 2      | 3      | 2      | 700   |
| Wohnung 2                | 0      | 0      | 0      | 506    | 325    | 481    | 134    | 488    | 3      | 16     | 34     | 13     | 2000  |
| Wohnung 3                | 190    | 236    | 329    | 320    | 283    | 252    | 33     | 11     | 0      | 0      | 0      | 0      | 1654  |
| Wohnung 4                | 431    | 287    | 292    | 319    | 100    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 1429  |
| Wohnung 5                | 282    | 313    | 561    | 679    | 433    | 357    | 61     | 152    | 1      | 5      | 16     | 7      | 2867  |
| Wohnung 6                | 51     | 0      | 8      | 38     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 97    |
| Wohnung 7                | 147    | 55     | 162    | 293    | 106    | 151    | 43     | 65     | 0      | 0      | 0      | 0      | 1022  |
| Wohnung 8                | 0      | 0      | 0      | 0      | 108    | 731    | 18     | 4      | 0      | 0      | 0      | 0      | 861   |
| Wohnung 9                | 160    | 38     | 74     | 126    | 76     | 91     | 33     | 46     | 0      | 0      | 0      | 0      | 644   |
| Wohnung 10               | 128    | 124    | 280    | 368    | 163    | 230    | 45     | 21     | 0      | 0      | 2      | 0      | 1361  |
| Wohnung 11               | 160    | 60     | 191    | 325    | 166    | 86     | 52     | 38     | 0      | 0      | 7      | 2      | 1087  |
| Wohnung 12               | 125    | 0      | 6      | 63     | 61     | 0      | 0      | 1      | 0      | 1      | 1      | 1      | 259   |
| Wohnung 13               | 265    | 117    | 147    | 161    | 9      | 6      | 2      | 1      | 0      | 2      | 13     | 1      | 724   |
| Wohnung 14               | 241    | 206    | 172    | 149    | 30     | 18     | 0      | 0      | 1      | 4      | 8      | 4      | 833   |
| Wohnung 15               | 588    | 115    | 235    | 245    | 225    | 101    | 0      | 10     | 0      | 0      | 0      | 0      | 1519  |
| Wohnung 16               | 92     | 108    | 303    | 147    | 72     | 1      | 0      | 36     | 0      | 1      | 0      | 1      | 761   |
| Wohnung 17               | 584    | 658    | 1059   | 1210   | 896    | 835    | 162    | 549    | 0      | 4      | 2      | 0      | 5959  |

Abbildung 55: Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen 2015/2016

| Verbrauch NT [kWh/Monat] | Okt 16 | Nov 16 | Dez 16 | Jan 17 | Feb 17 | Mrz 17 | Apr 17 | Mai 17 | Jun 17 | Jul 17 | Aug 17 | Sep 17 | Summe |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Wohnung 1                | 153    | 237    | 292    | 425    | 290    | 80     | 163    | 38     | 5      | 0      | 0      | 0      | 1683  |
| Wohnung 2                | 398    | 821    | 876    | 1165   | 1046   | 817    | 592    | 389    | 136    | 135    | 117    | 362    | 6854  |
| Wohnung 3                | 155    | 431    | 477    | 719    | 374    | 206    | 176    | 96     | 12     | 5      | 5      | 51     | 2707  |
| Wohnung 4                | 41     | 156    | 364    | 487    | 247    | 172    | 172    | 79     | 4      | 10     | 21     | 180    | 1933  |
| Wohnung 5                | 239    | 423    | 602    | 883    | 802    | 590    | 241    | 108    | 87     | 150    | 186    | 594    | 4905  |
| Wohnung 6                | 0      | 164    | 80     | 408    | 140    | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 792   |
| Wohnung 7                | 180    | 358    | 513    | 689    | 312    | 71     | 0      | 6      | 0      | 0      | 0      | 0      | 2129  |
| Wohnung 8                | 2      | 100    | 132    | 212    | 80     | 77     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 11     | 614   |
| Wohnung 9                | 36     | 172    | 336    | 416    | 177    | 112    | 0      | 18     | 0      | 0      | 0      | 0      | 1267  |
| Wohnung 10               | 217    | 376    | 469    | 632    | 441    | 307    | 264    | 102    | 25     | 37     | 29     | 125    | 3024  |
| Wohnung 11               | 79     | 337    | 408    | 614    | 356    | 246    | 112    | 2      | 24     | 32     | 21     | 52     | 2283  |
| Wohnung 12               | 12     | 18     | 220    | 218    | 0      | 0      | 0      | 0      | 6      | 9      | 5      | 0      | 488   |
| Wohnung 13               | 0      | 0      | 534    | 882    | 329    | 0      | 0      | 1      | 29     | 46     | 23     | 21     | 1865  |
| Wohnung 14               | 0      | 62     | 125    | 453    | 277    | 15     | 0      | 0      | 0      | 178    | 175    | 1285   |       |
| Wohnung 15               | 224    | 447    | 544    | 875    | 435    | 30     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 2555  |
| Wohnung 16               | 253    | 546    | 637    | 840    | 619    | 0      | 0      | 28     | 15     | 7      | 10     | 233    | 3188  |
| Wohnung 17               | 469    | 820    | 960    | 1373   | 1145   | 962    | 793    | 441    | 52     | 39     | 85     | 375    | 7514  |

Abbildung 56: Wärmeverbrauch NT in den Wohnungen 2016/2017

## 10.5 Messdaten Wärme Korrektur HT-Netz

In den Wärmemengen der Wohnungen sind nicht enthalten:

- Wärmemenge HT Wohnung 13 aufgrund fehlerhaften Einbaus
- Wärmemenge der zweiten Übergabestationen Wohnung 6,10,14

Zur Berücksichtigung der Wärmemenge aus Wohnung 13 wird unterstellt, dass diese im Durchschnitt den gleichen Verbrauch hat wie die gleich geschnittenen Wohnungen in den anderen Regelgeschossen (Wohnung 5, 9).

Der Jahresverbrauch von Wohnung 5 betrug 3.595 kWh/a, der von Wohnung 9 1.145 kWh/a (vgl. Abbildung 54).

Es wird somit unterstellt, dass der Verbrauch von Wohnung 13 bei 2370 kWh/a liegt.

Die BGF der Wohnungen 6,10 und 14 beträgt jeweils ca. 161 m<sup>2</sup>. Die Verbräuche der gemessenen Übergabestation liegen somit bei 13,4 (Whg. 6), 11,5 (Whg. 10) bzw. 7,5 (Whg. 14) kWh/(m<sup>2</sup>a). Der Gebäudedurchschnitt liegt bei 12,4 kWh/(m<sup>2</sup>a). Um den Verbrauch nicht zu unterschätzen, wird für alle drei Wohneinheiten pauschal ein Wert von 15 kWh/(m<sup>2</sup>a) angenommen.

Mit diesen Werten ergibt sich ein korrigierter Gesamtverbrauch der Wohnungen von 34.1920 kWh/a bzw. 14,2 kWh/(m<sup>2</sup>a).

## 11 Literatur

[1] Lenz Weber Ingenieure.: EnEV Nachweis Effizienzhaus Plus, Frankfurt Riedberg, Errichtung eines Mehrfamilienhauses mit 17 Wohnungen auf einer Tiefgarage mit 10 Stellplätzen, 07.01.2015

[2] Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Erweiterter Steckbrief Begleitforschungsprojekt - Riedberg Frankfurt am Main, 2015

([http://www.forschungsinitiative.de/fileadmin/user\\_upload/Netzwerk\\_Effizienzhaus\\_Plus/Frankfurt\\_am\\_Main/Steckbrief\\_22\\_Frankfurt\\_Riedberg\\_2015.pdf](http://www.forschungsinitiative.de/fileadmin/user_upload/Netzwerk_Effizienzhaus_Plus/Frankfurt_am_Main/Steckbrief_22_Frankfurt_Riedberg_2015.pdf))

[3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wege zum Effizienzhaus Plus – Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude, Stand November 2016 ([http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/effizienzhaus\\_plus\\_broschuere\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/effizienzhaus_plus_broschuere_bf.pdf))

[4] Berechnungstool zur Bestimmung von Gradtagszahlen, Heizgradtagen und Klimafaktoren vom Institut für Wohnen und Umwelt

([http://www.iwu.de/fileadmin/user\\_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen\\_Deutschland.xls](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen_Deutschland.xls))

[5] Mitteilung der Regierung der Bundesrepublik Deutschland an die Kommission der Europäischen Union vom 15. August 2013 Bericht über die Berechnung des „Kostenoptimalen Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz“ gemäß Artikel 5 Absatz 2 und 3 Gebäuderichtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und der Rates vom 4. Januar 2003 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

[6] BKI Objektdaten Neubau: Kosten abgerechneter Bauwerke. N15. : BKI-Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, 2017