



**Schlussbericht** 28. November 2014

---

# **MEHRFAMILIENHAUS MIT ELEKTRO- MOBILITÄT IN RUPPERSWIL, AG**

---

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden  
CH – 3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Fachhochschule Nordwestschweiz – FHNW  
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik – HABG  
Institut Energie am Bau – IEBau  
St. Jakobs Strasse 84  
CH – 4132 Muttenz  
[iebau.habg@fhnw.ch](mailto:iebau.habg@fhnw.ch)

**Projektpartner**

Setz Architektur  
Obermatt 33  
CH – 5102 Rupperswil  
[info@setz-architektur.ch](mailto:info@setz-architektur.ch)

Spline AG  
Seestrasse 93  
CH – 8800 Thalwil  
[sc@spline.ch](mailto:sc@spline.ch)

**Autoren:**

Dipl.-Ing. Falk Dorusch, [falk.dorusch@fhnw.ch](mailto:falk.dorusch@fhnw.ch)  
Dr.-Ing. Monika Hall, FHNW, [monika.hall@fhnw.ch](mailto:monika.hall@fhnw.ch)  
Prof. Dr. Achim Geissler, FHNW, [achim.geissler@fhnw.ch](mailto:achim.geissler@fhnw.ch)

**Mitarbeit:**

Dipl.-Ing. Matthias Zemp, Enerprice Partners AG, [m.zemp@enerprice-partners.ch](mailto:m.zemp@enerprice-partners.ch)

**BFE-Bereichsleiter:** Andreas Eckmanns

**BFE-Programmleiter:** Rolf Moser

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** SI/500645 // SI/500645-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

# Inhaltsverzeichnis

|        |                                                |    |
|--------|------------------------------------------------|----|
| 1.     | Ausgangslage                                   | 7  |
| 1.1.   | Projektziele                                   | 7  |
| 1.2.   | Gebäudedaten                                   | 8  |
| 1.3.   | Energieinformationssystem und Referenzwerte    | 8  |
| 2.     | Grundlagen und Vorgehen                        | 10 |
| 2.1.   | Verwendete Abkürzungen und Begriffe            | 10 |
| 2.2.   | Betrachtungszeitraum                           | 11 |
| 2.3.   | Messkonzept                                    | 12 |
| 2.4.   | Datenerfassung und -auswertung                 | 14 |
| 2.5.   | Weitere Datenquellen                           | 14 |
| 3.     | Ergebnisse                                     | 15 |
| 3.1.   | Klimatische Rahmenbedingungen                  | 15 |
| 3.1.1. | Solare Einstrahlung                            | 15 |
| 3.1.2. | Aussenlufttemperatur                           | 15 |
| 3.2.   | Energiebilanz                                  | 16 |
| 3.2.1. | Kumulierter PV-Ertrag und Elektrizitätsbezug   | 16 |
| 3.2.2. | PV-Ertrag                                      | 17 |
| 3.2.3. | Gesamtelektrizitätsbezug                       | 18 |
| 3.2.4. | Haushaltsstrom                                 | 19 |
| 3.2.5. | Bezugsmuster                                   | 22 |
| 3.2.6. | Wärmepumpe                                     | 23 |
| 3.2.7. | Lüftung                                        | 24 |
| 3.2.8. | Heizwärme/Warmwasser                           | 24 |
| 3.3.   | Arbeitszahlen                                  | 28 |
| 3.4.   | Elektromobilität                               | 29 |
| 3.5.   | Konventionelle Mobilität                       | 30 |
| 3.6.   | Möglichkeiten zur Lastverschiebung [2]         | 30 |
| 3.7.   | Zeitlich begrenzter Wärmepumpenbetrieb         | 32 |
| 3.7.1. | Heizung                                        | 32 |
| 3.7.2. | Warmwasserbetrieb                              | 32 |
| 3.7.3. | Temperaturverhalten                            | 33 |
| 3.7.4. | Reduktion des Elektrizitätsbezugs aus dem Netz | 34 |
| 3.8.   | Netzverhalten                                  | 34 |
| 3.8.1. | Netzeinspeisung, Netzbezug, Eigenverbrauch     | 34 |
| 3.8.2. | Eigendeckungsrate und Gleichzeitigkeit         | 37 |
| 3.9.   | 2000-Watt Tauglichkeit                         | 41 |
| 3.9.1. | Berechnung gemäss Merkblatt SIA 2040           | 41 |
| 3.9.2. | Anforderung nach Merkblatt SIA 2040            | 43 |
| 3.9.3. | Auf Messungen basierende Bewertung             | 43 |
| 3.9.4. | 2000-Watt-Tauglichkeit des Hauses              | 44 |
| 4.     | Fazit                                          | 45 |

|      |                                                                                    |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. | Technische Gesamtbetrachtung                                                       | 45 |
| 4.2. | Gebäudekonzept                                                                     | 47 |
| 4.3. | Gebäudetechnik                                                                     | 47 |
| 4.4. | Rechtliche und preisliche Aspekte eines Mehrfamilienhauses mit Solarstromerzeugung | 48 |
| 4.5. | Nutzereinbindung                                                                   | 50 |
| 4.6. | Bonus-Malus-System                                                                 | 51 |
| 4.7. | Nutzen der Elektromobilität                                                        | 51 |
| 4.8. | Berücksichtigung im Standardisierungs- und Planungsprozess                         | 52 |
| 5.   | Literatur                                                                          | 53 |
| 6.   | Anhang                                                                             | 55 |

## Projektbeiträge

Das Projekt wurde von Frau Dr. Monika Hall und Herrn Falk Dorusch an Institut Energie am Bau der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitet. Die Erfassung und Bereitstellung der Messdaten lag im Verantwortungsbereich der Firma Spline AG. Das Gebäude wurde während des Projektes vom Gebäudeeigentümer, Herrn Werner Setz betreut. Die rechtlichen und preislichen Aspekte wurden von Herrn Matthias Zemp erarbeitet.

# Zusammenfassung

Um den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Gebäuden auf das in der Energiestrategie 2050 geforderte Niveau zu senken, ist der konsequente Einsatz der verfügbaren Techniken erforderlich. Ein möglicher Ansatz stellt die gebäudeeigene Solarstromerzeugung, die optimierte Nutzung des Elektrizitätsertrags im Gebäude sowie die Verringerung des Energieverbrauchs dar. Der Abschlussbericht des Projektes *Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität in Rapperswil* fasst die über einen Zeitraum von 31 Monate gesammelten Erkenntnisse zusammen. Der Bericht ist als Zusammenfassung des Projekts zu lesen. Er zeichnet ein Gesamtbild der energetischen Situation des Gebäudes. Detaillierte Informationen zu den vorangegangenen Untersuchungsperioden sind in den drei Zwischenberichten des Projekts dokumentiert [1], [2], [3]. Nachfolgend sind die wesentlichen Erkenntnisse des Projekts aufgeführt:

- In der Gesamtschau zeigt sich das Gebäude als gelungenes harmonisch und funktional gestaltetes System auf aktuellem, bauphysikalischem und gebäudetechnischem Stand. Das Gebäude entspricht den Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft.
- Das detaillierte Energiedaten-Monitoring ermöglicht neben der Gesamtbilanzierung des Gebäudes auch Rückschlüsse auf einzelne Verbraucher sowie deren zeitliches Verhalten.
- Die grosse Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach liefert über den gesamten Projektzeitraum mehr Elektrizität als alle Verbraucher im Gebäude benötigen.
- Der Gesamtelektrizitätsbezug verteilt sich zu 45% auf den Haushaltsstrombezug. 23% entfallen auf den Betrieb der Wärmepumpe (16% für die Gebäudebeheizung, 7% zur Bereitung von Warmwasser). 19% des Elektrizitätsbezugs werden für das Elektroauto aufgewendet, je 6% entfallen auf die mechanische Lüftung des Gebäudes sowie auf den Allgemeinstrombezug.
- Die Verschiebung und Begrenzung der Laufzeiten der Sole-Wasser-Wärmepumpe in den Tag eignet sich sehr gut zur Steigerung des Eigenverbrauchs. Damit kann die im Gebäude selbst genutzte Elektrizitätsmenge um etwa 1'000 kWh gesteigert werden. Die Eigendeckungsrate steigt von 21% auf 34%.
- Das Energie-Informationssystem wird von den Mietern kaum genutzt und hat nur einen geringen Einfluss auf deren Energiebezug. So übersteigt der Heizwärmebezug die Orientierungswerte des Energieinformationssystems um ca. 57%, da die Raumlufttemperaturen in allen drei Heizperioden deutlich über den Vorgabewerten liegen. Der Warmwasserverbrauch liegt etwa 10%, der Haushaltstrombezug etwa 11% über den Vorgabewerten.
- Die Etablierung eines Bonus-/Malus-Systems für den individuellen Energiebezug der Mieter erfordert einen hohen organisatorischen Aufwand und ist wegen der geringen Erstattungsbeträge für Mieter und Vermieter uninteressant.
- Das Elektroauto trägt nicht zur besseren Nutzung den Solarertrags bei. Die Ladung der Fahrzeugakkus erfolgt oft zu Zeiten, an denen kein PV-Strom verfügbar ist.
- Die Bewohner sind mit dem Komfort des Gebäudes sehr zufrieden.
- Aus rechtlicher Sicht stellen Elektrizität produzierende Mehrfamilienhäuser neue Anforderungen an das Mieter-/Vermieterverhältnis. Der Gebäudeeigentümer kann gegenüber dem Mieter nicht direkt als Energielieferant auftreten sondern muss die Lieferung von selbst erzeugtem Strom mit Hilfe des Mietrechts regeln.

Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der wesentlichen Energiedaten für die drei untersuchten Perioden des Projekts sowie die Daten des Gesamtzeitraumes.

Tabelle 1 Vergleich der Verbrauchergruppen, des PV-Ertrags und der meteorologischen Bedingungen für das erste, zweite und dritte Betriebsjahr.

|                                                       | 1. Betriebsjahr<br>(01.10.11-30.09.12) | 2. Betriebsjahr<br>(01.10.12-30.09.13) | 3. Betriebsjahr<br>(01.10.13-30.04.14) | Gesamtzeitraum<br>(01.10.11-30.04.14) |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Haushaltsstrom für alle drei Wohnungen                | 6'584 kWh (50%)                        | 6'013 kWh (42%)                        | 4'124 kWh (43%)                        | 16'721 kWh                            |
| Elektr. Wärmepumpe, Heizung/Kühlung                   | 2'163 kWh (16%)                        | 2'168 kWh (15%)                        | 1'753 kWh (18%)                        | 6'084 kWh                             |
| Elektr. Wärmepumpe, Warmwasser                        | 906 kWh (17%)                          | 1'014 kWh (7%)                         | 814 kWh (9%)                           | 2'734 kWh                             |
| Elektroauto                                           | 1'792 kWh (14%)                        | 3'476 kWh (25%)                        | 1'859 kWh (19%)                        | 7'127 kWh                             |
| Lüftungsanlage                                        | 826 kWh (6%)                           | 887 kWh (6%)                           | 578 kWh (6%)                           | 2'291 kWh                             |
| Allgemeinstrom                                        | 940 kWh (7%)                           | 776 kWh (5%)                           | 436 kWh (5%)                           | 2'152 kWh                             |
| Gesamtverbrauch                                       | 13'210 kWh (100%)                      | 14'334 kWh (100%)                      | 9'564 kWh (100%)                       | 37'109 kWh                            |
| Gesamtverbrauch ohne Elektroauto                      | 11'419 kWh (86%)                       | 10'858 kWh (75%)                       | 7'704 kWh (81%)                        | 29'982 kWh                            |
| PV-Ertrag, Prognose: 18'157 kWh/a                     | 19'805 kWh (+9%)                       | 17'976 kWh (-1%)                       | 7'711 kWh (+11%)*                      | 45'492 kWh (+5%)                      |
| Überschuss / Defizit                                  | 6'659 kWh (50%)                        | 3'642 kWh (25%)                        | -1'853 kWh (-19%)                      | 8'383 kWh (23%)                       |
| Laufleistung des Elektroautos                         | 10'161 km                              | 15'822 km                              | 7'713 km                               | 33'696 km                             |
| Sonnenstunden, Langjähriges Mittel: 2'649 h           | 2'552 h (-4%)                          | 2'466 h (-7%)                          | 1'466 h (+44%)*                        | 6'484 h (-3%)                         |
| Globalstrahlung, Langjähriges Mittel: 1'050 kWh/(m²a) | 1'149 kWh/(m²a) (+9%)                  | 1'029 kWh/(m²a) (-2%)                  | 438 kWh/(m²a) (+11%)*                  | 2'616 kWh/(m²a) (+5%)                 |
| Aussentemperatur, Langjähriges Mittel: 9.2°C          | 11.3°C (+2.1K)                         | 10.6°C (+1.4K)                         | 6.1 °C (+1.5K) ***                     | 10.1 °C (+1.6 K)                      |
| Heizgradtage, Langjähriges Mittel: 3'199 Kd           | 3'243 Kd (+1%)                         | 3'395 Kd (+6%)                         | 2'753 Kd (-14%)*                       |                                       |
| Heizenergiebedarf***, 26 kWh/(m²a)                    | 27.8 kWh/(m²a) (+7%)                   | 27.9 kWh/(m²a) (+7%)                   | 30.6 kWh/(m²a) (-6%) ****              | 28.9 kWh/(m²a)                        |
| Warmwasserbedarf, 20.8 kWh/(m²a)                      | 12.2 kWh/(m²a) (-43%)                  | 17.5 kWh/(m²a) (-16%)                  | 14.4 kWh/(m²a) (-31%) ****             | 15.0 kWh/(m²a)                        |

\* gegenüber einem prognostizierten PV-Ertrag von 6'978 kWh für diesen Zeitraum

\*\*unter Berücksichtigung von 22 °C Raumtemperatur und Komfortlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung; Bezugswerte der drei Betriebsjahre sind mit den Heizgradtagen korrigiert

\*\*\* bezogen auf einen Zeitraum von sieben Monaten.

\*\*\*\* hochgerechnet auf 12 Monate

## 1. Ausgangslage

### 1.1. Projektziele

Gebäude mit lokaler Stromerzeugung werden immer öfter gebaut. Die Bilanz für den Energieverbrauch und die dezentrale Stromerzeugung für das Gesamtsystem "Gebäude" geht auf dem Papier immer auf. Für diese Phase fehlt i.d.R. die nötige Aufmerksamkeit. Energetische Zielwerte werden von Architekten und Energieplaner vorgegeben, ob sie tatsächlich erreicht werden, wird nicht überprüft. Gerade anspruchsvolle und innovative Energiekonzepte benötigen anfangs eine kompetente Einregulierung und Begleitung. Das haben Untersuchungen an anderen hoch effizienten Gebäuden, z.B. Kraftwerk B, Marché Kempthal, B35 deutlich gemacht.

Beim vorliegenden Projekt handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus (MFH) mit 3 Mieterparteien. Das Haus produziert mit der vorgesehenen Photovoltaikanlage mehr Elektrizität als für Heizung, Warmwasser, Lüftung und den gesamten Haushaltsstrom im Jahr benötigt wird. Ziel ist es, die überschüssige Stromproduktion möglichst lokal in Elektromobilität umzusetzen. Ein Elektroauto wird von Gebäudeeigentümer genutzt. Das Gebäude ist an das Verteilnetz des örtlichen Energieversorgers angeschlossen und wird nicht als Insel betrieben. Die zeitlichen Abweichungen zwischen Produktion und Verbrauch im Haus werden über das Stromnetz ausgeglichen.

Das Projekt liefert Echtzeitdaten in 15-Minuten-Auflösung. Das detaillierte Monitoring zeigt auf, wann Elektrizität und Wärme produziert und wofür diese genutzt werden. Die zeitlichen und mengenmässigen Energieflüsse werden damit transparent und können somit optimiert werden und eine Grundlage für zukünftige Gebäude mit lokaler Stromerzeugung bilden. Mit Hilfe strukturierter Untersuchungen sollen charakteristischer Zeiträume im Jahresverlauf betrachtet werden und ein möglicher Einfluss saisonaler und/oder klimatischer Einflüsse herausgestellt werden. Ein wesentlicher Aspekt ist die Gleichzeitigkeit von Elektrizitätsverbrauch und -produktion sowie die Einbindung der Mobilität.

Folgende Punkte stehen im Fokus des Projekts

- Detaillierte Sammlung von Messdaten zu thermischen und elektrischen Energieflüssen,
- Quantifizierung des Energiebezugs aller charakteristischer Verbraucher im Gebäude sowie Bestimmung des PV-Ertrags
- Erkennen, Identifizieren und Bewerten charakteristischer Einflussgrößen auf die Gleichzeitigkeit
- Einschätzung der Auswirkung von Lastverschiebemaßnahmen am Beispiel von drei Heizperioden
- Welchen Einfluss hat die Nutzung eines Elektroautos auf die Energiebilanz des Gebäudes?
- Welche rechtliche Einflüsse und Hindernisse existieren bei der Bewirtschaftung von vermieteten Gebäuden mit lokaler Stromproduktion
- Ist das Nutzerverhalten irgendwie wichtig?
- Erfüllt das Gebäude die Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft

Auf einem Infodisplay im Wohnzimmer sowie über ein Internetportal können sich die Bewohner über ihren Energiebezug informieren. Der Umgang mit dem Infodisplay sowie mit dem Internetportal und das Bonus- / Malus-System soll durch Rückmeldungen der Mieter und durch von Gebäudeeigentümer gesammelte Erfahrungen evaluiert werden.

## 1.2. Gebäudedaten

Das untersuchte Gebäude ist ein kleines, in Massivbauweise errichtetes Mehrfamilienhaus in Rupperswil im Kanton Aargau (Schweiz). Das zweigeschossige, unterkellerte Gebäude hat eine beheizte Wohnfläche von 320 m<sup>2</sup> (Abbildung 1). Im Erd- und Obergeschoss befindet sich je eine Wohnung mit einer beheizten Fläche von 135 m<sup>2</sup>. Die Balkone sind nach Westen orientiert. Im Kellergeschoss befindet sich ein nach Osten ausgerichtetes Studio mit einer beheizten Fläche von 50 m<sup>2</sup>. Das Gebäude ist mit Minergie-P-ECO (AG-005-P-ECO) zertifiziert und hat den Schweizer Solarpreis 2012 in der Kategorie PlusEnergieBau gewonnen [1]. Detaillierte Daten zum Gebäude können [2] entnommen werden.



Abbildung 1: Ansichten des untersuchten Mehrfamilienhauses (Quelle: Setz Architektur, FHNW IEBau).

Die Wärme für Heizung und Warmwasser wird zu 100% mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe erzeugt. Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Fussbodenheizung. Das Gebäude verfügt über eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Bei Aussenlufttemperaturen über 20 °C wird die Zuluft über einen Wärmetauscher geführt und über die umgewälzte Sole vorgekühlt.

Die Photovoltaik-Anlage mit rund 103 m<sup>2</sup> Panelfläche, ist nach Süden mit einem 10 Grad-Neigungswinkel ausgerichtet. Die Nenn-Leistung beträgt 20 kW<sub>p</sub> und es wird mit einem Ertrag von rund 18'000 kWh/a gerechnet. Die Anlage ist so geschaltet, dass erst der Verbrauch im Gebäude gedeckt und nur der Überschuss in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird.

## 1.3. Energieinformationssystem und Referenzwerte

Das Energie-Informationssystem zeigt für jede Wohnung den Haushaltsstromverbrauch und Wärmebezug an und erlaubt einen Vergleich mit hinterlegten Tages-, Wochen-, Monats-, und Jahresmaximalwerten.

Die Referenzwerte des Energiebezuges für Heizwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom werden basierend auf den Werten des Energienachweises des Gebäudes sowie auf Erfahrungswerten des Gebäudeeigentümers monatsweise festgelegt. Informationen zu den Referenzwerten sind in [1] zu finden. Innerhalb eines Monats wird die monatliche Energiemenge gleichmässig auf die einzelnen Tage verteilt. Die Abbildung 2 zeigt die prozentuale Verteilung der Referenzwerte über die Monate eines Jahres.

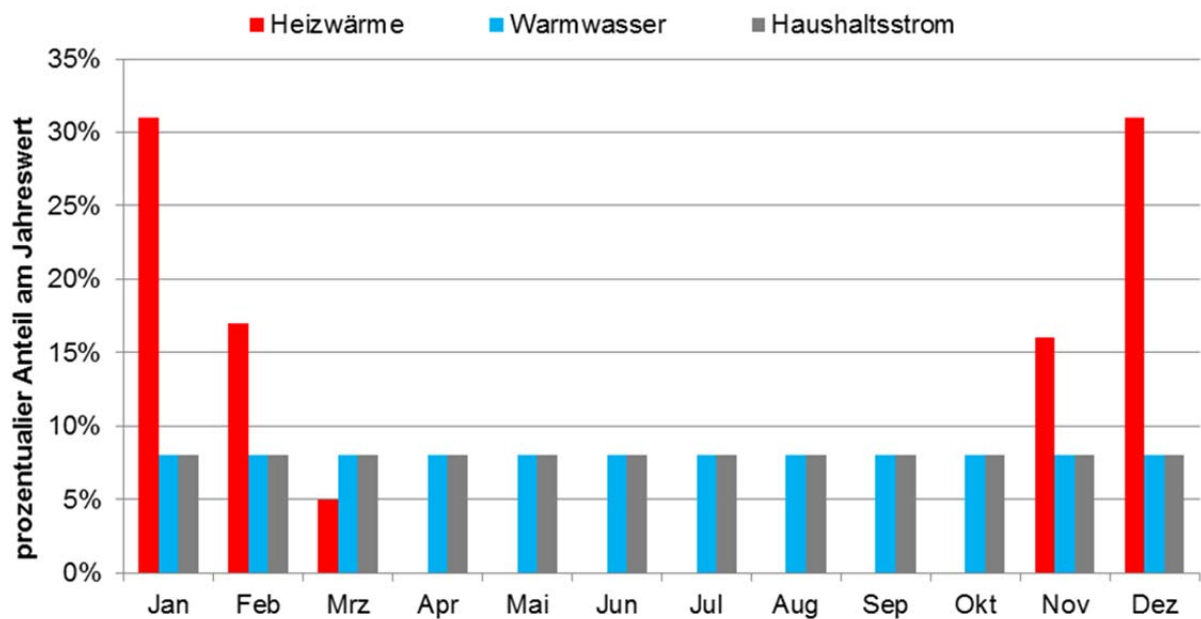


Abbildung 2: Die prozentuale Verteilung der Referenzwerte über die Monate eines Jahres.

In jeder Wohnung des Gebäudes ist ein LED-Balkendisplay installiert. Die Anzeige (Abbildung 3, linkes Bild) stellt den Haushaltstrom- und Wärmebezug eines Tages in sechs grünen und zwei roten Leuchtsegmenten dar. Bei Energiebezug im Tagesverlauf verringert sich die Anzahl der angezeigten Segmente im Display, der Balken sinkt in den "roten Bereich" ab. Zusätzlich haben die Mieter die Möglichkeit, ihren Tages-, Wochen-, Monats- und Jahresenergiebezug für Heizwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom über eine Internetseite abzurufen (Abbildung 3, rechtes Bild). Die jeweilige Energiemenge wird als Säulendiagramm dargestellt, dessen Wert sich mit zunehmendem Energiebezug erhöht.



Abbildung 3: Das Energie-Informationssystem, links: LED-Display der Wohnung, rechts: Darstellungen auf der Internetseite.

## 2. Grundlagen und Vorgehen

### 2.1. Verwendete Abkürzungen und Begriffe

Folgende Abkürzungen werden im nachfolgenden Text verwendet:

|                  |                                   |
|------------------|-----------------------------------|
| AZ               | Arbeitszahl                       |
| BJ               | Betriebsjahr                      |
| EEG              | Erneuerbare-Energien-Gesetz [1]   |
| EG               | Erdgeschoss                       |
| elektr           | elektrisch                        |
| EBF              | Energiebezugsfläche [2]           |
| HGT              | Heizgradtag(e)                    |
| HZ               | Heizung                           |
| KEV              | Kostendeckende Einspeisevergütung |
| Mon              | Monat / monatsweise               |
| OG               | Obergeschoss                      |
| Öv               | Öffentlicher (Nah-)Verkehr        |
| PE <sub>NE</sub> | Primärenergiebedarf               |
| PV               | Photovoltaik                      |
| RT               | Raumtemperatur                    |
| therm            | Thermisch                         |
| THG              | Treibhausgas (-emission)          |
| UG               | Untergeschoss                     |
| WW               | Warmwasser                        |
| ZB               | Zwischenbericht                   |

Zusätzlich werden die nachfolgend genannten Begriffe verwendet:

Der *Bilanzzeitraum*  $T$  ist der Zeitraum, für den die Bilanzierung durchgeführt wird z.B. ein Jahr (Anlehnung an [1]).

Der *Bilanzierungszeitschritt*  $\tau$  ist ein diskretes Zeitintervall (z.B. eine Stunde, ein Monat) im Bilanzzeitraum (Anlehnung an [1]). Ist der gewählte Bilanzierungsschritt ein Vielfaches des *Mess- oder Simulationsintervalls*  $\Delta t$ , werden entsprechend  $\tau/\Delta t$  Intervalle aufsummiert. Bei dem betrachteten Projekt ist das Messintervall  $\Delta t = 15$  min.

Der *Eigenverbrauch*  $EV$  bezeichnet die Menge an Elektrizität, die im Bilanzierungszeitschritt gleichzeitig von der PV-Anlage des Gebäudes erzeugt ( $E_{PV}$ ) und von den Verbrauchern im Gebäude bezogen wird ( $E_{ges}$ ):

$$EV_{\tau} = \min(\sum_{i=1}^{\tau/\Delta t} E_{PV,i}; \sum_{i=1}^{\tau/\Delta t} E_{ges,i}) \quad [\text{kWh}] \quad \text{Gleichung 1}$$

Die *Eigendeckungsrate*  $EDR$  (demand cover factor) definiert das Verhältnis aus  $EV$  und  $E_{ges}$  für den Bilanzierungszeitschritt (in Anlehnung an [2]):

$$EDR_{\tau} = \frac{EV_{\tau}}{\sum_{i=1}^{\tau/\Delta t} E_{ges,i}} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Gleichung 2}$$

bzw. für einen Bilanzzeitraum:

$$EDR_T = \frac{\tau \cdot \sum_{i=1}^{T/\tau} EDR_{\tau,i}}{T} \quad [\%] \quad \text{Gleichung 3}$$

*Gleichzeitigkeit* besteht dann, wenn im Bilanzierungszeitschritt der Gesamtelektrizitätsbezug im Gebäude durch den PV-Ertrag vollständig gedeckt (100%  $EDR$ ) wird.

Für die Berechnung der folgenden Raten gilt dieselbe Methodik, wie sie für  $EDR$  gemäss den Gleichungen (1) bis (3) festgelegt wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden sie nur schematisch dargestellt.

Als *Eigenverbrauchsrate*  $EVR$  (supply cover factor) wird das prozentuale Verhältnis aus dem Eigenverbrauch gemäss Gleichung 1 und dem PV-Ertrag bezeichnet:

$$EVR = \frac{EV}{E_{PV}} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Gleichung 4}$$

Die *Residuallast*  $E_{res}$  ist die Menge an Elektrizität, die abzüglich der im Gebäude selbst verbrauchten Menge an Elektrizität aus dem Netz bezogen wird. Die Residuallast entspricht der Differenz zwischen Nachfrage (Gesamtelektrizitätsbezug) im Gebäude und Angebot (PV-Ertrag):

$$E_{res} = E_{ges} - E_{PV}, \quad E_{ges} > E_{PV} \quad [\text{kWh}] \quad \text{Gleichung 5}$$

Als *Netzbezugsrate*  $NBR$  wird der prozentuale Anteil der Residuallast (Gl. 4) am Gesamtelektrizitätsbezug bezeichnet:

$$NBR = \frac{E_{res}}{E_{ges}} \cdot 100 = 100\% - EDR \quad [\%] \quad \text{Gleichung 6}$$

Die *Netzeinspeisung*  $ES$  quantifiziert die Menge an PV-Ertrag, die nicht unmittelbar zum Zeitpunkt der Erzeugung im Gebäude selbst genutzt werden kann und daher an das Elektrizitätsnetz abgegeben („eingespeist“) wird:

$$ES = E_{PV} - EV, \quad E_{PV} > E_{ges} \quad [\text{kWh}] \quad \text{Gleichung 7}$$

Als *Netzeinspeiserate*  $NSR$  wird das prozentuale Verhältnis von Netzeinspeisung und dem gesamten PV-Ertrag definiert:

$$NSR = \frac{ES}{E_{PV}} \cdot 100 = 100\% - EVR \quad [\%] \quad \text{Gleichung 8}$$

Der Graustrom ist die Elektrizitätsmenge, die in den Wohnungen zusätzlich zur Elektrizitätsmenge der direkt monitorierten Verbraucher „Kühlschrank“, „Kraftverbraucher“, „Geschirrwaschmaschine“ und „Dampfabzug“ bezogen wird.

Die Arbeitszahl wird durch das Verhältnis aus Nutz- und Betriebsenergie berechnet:

$$NSR = \frac{E_{Nutz}}{E_{Betrieb}} \quad [\%] \quad \text{Gleichung 9}$$

## 2.2. Betrachtungszeitraum

Der Abschlussbericht fokussiert sich auf den Zeitraum von 31 Monaten zwischen 01.10.2011 und 30.04.2014. Zur weiteren Beschreibung saisonaler Besonderheiten erfolgt eine Unterteilung in die folgenden fünf Perioden:

|                   |                           |                           |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| Winter 2011/2012: | 01.10.2011 bis 30.04.2012 | } 1. Betriebsjahr (1.BJ)  |
| Sommer 2012:      | 01.05.2012 bis 30.09.2012 |                           |
| Winter 2012/2013: | 01.10.2012 bis 30.04.2013 | } 2. Betriebsjahr (2. BJ) |
| Sommer 2013:      | 01.05.2013 bis 30.09.2013 |                           |
| Winter 2013/2014: | 01.10.2013 bis 30.04.2014 | } 3. Betriebsjahr (3. BJ) |

### 2.3. Messkonzept

Ein Datenerfassungssystem, bestehend aus saldierenden Elektrizitätsmengen-zählern, Wärmemengen-zählern, Durchflussmessgeräten und Temperatursensoren dient zur Erfassung von Verbrauchs- und Klimadaten im und am Gebäude. Die Abbildung 4 zeigt eine schematische Übersicht der Messstellen.

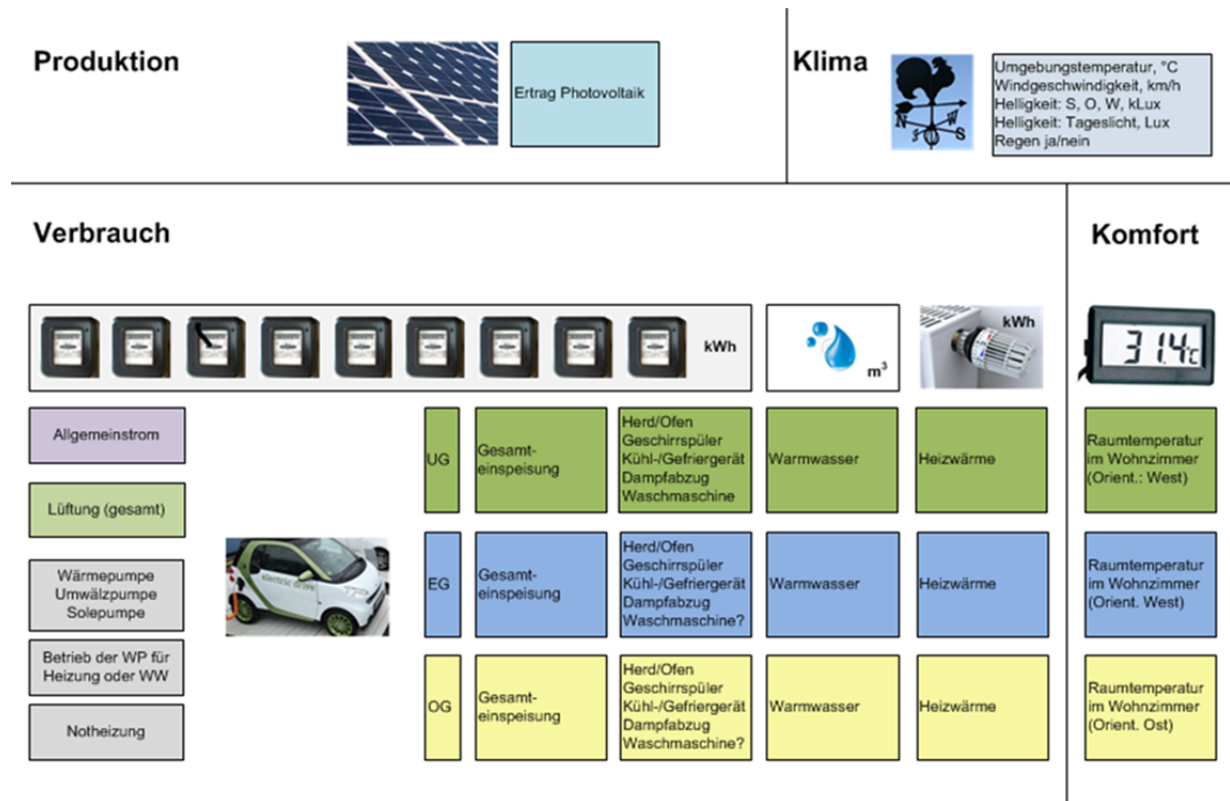


Abbildung 4: Die schematische Übersicht der Messstellen im Gebäude.

An 45 Datenpunkten werden folgende Verbrauchs- und Klimadaten mit 15- minütiger Zeitauf- lösung erfasst:

#### Elektrizität

- Ertrag der Photovoltaikanlage
  - Elektrizitätsbezug für das Elektroauto
  - Allgemeinstrom
  - Elektrizitätsbezug für die Lüftung aller drei Haushalte
- je Haushalt werden separat erfasst:
- Herd/Ofen und Waschmaschine/Tumbler
  - Kühlschrank, Gefriergerät
  - Geschirrspüler
  - Dunstabzugshaube
  - Graustrom (Beleuchtung, Unterhaltung, sonstige Elektrogeräte)

### *Wärmeerzeugung*

- Elektrizität Wärmepumpe
- Betriebsstatus Heizen, Warmwasser, darauf basierend erfolgt die Berechnung des Elektrizitäts-bedarfs zur Warmwasserbereitung)
- Elektrizität Umwälzpumpe Erdwärmesonde
- Elektrizität Umwälzpumpe Heizung / Warmwasser
- Elektrizität.Notheizstab für Heizung

### *Wärmeverbrauch*

- Warmwassermenge je Haushalt
- Heizwärme je Haushalt

### *Komfort*

- Innenraum (je Wohnung 1x): Raumtemperatur

### *Klima*

- Wetterstation: Aussenlufttemperatur, Helligkeit, Windgeschwindigkeit

Das Messkonzept im Gebäude bleibt über die gesamte Projektdauer unverändert. Zusätzlich zur automatischen Messwerterfassung werden seit Sommer 2012 in einem monatlich aktualisierten Protokoll Informationen zum individuellen Elektrizitätsbezug des Nagelstudios in der Erdgeschosswohnung erfasst. Die gefahrenen Autokilometer der Mieter werden einmal jährlich erhoben.

Für Elektrizitäts- und Heizwärmzähler sind die technischen Spezifikationen bekannt. Es werden folgende Messungenauigkeiten angenommen:

| Messgrösse                          | Einheit | Prinzip                               | Messungenauigkeit |
|-------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------|
| Elektrizität:<br>EMU32x4            | kWh     | Elektrizitätszähler,<br>10 Impulse/Wh | Klasse 1 IEC 1036 |
| Heizwärme:<br>Kamstrup Multical 402 | kWh     | Wärmezähler,<br>10 Wh /Puls           | ± 5 Wh            |

Für Warmwasserverbrauch und Aussen-/Raumtemperatur sind keine Sensorspezifikationen bekannt. Basierend auf [3] werden folgende Messunsicherheiten angesetzt:

| Messgrösse                  | Einheit        | Prinzip                        | Messungenauigkeit |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|-------------------|
| Warmwasser                  | m <sup>3</sup> | Durchflusszähler,<br>10 l/Puls | ± 5 l             |
| Raum- &<br>Aussentemperatur | °C             | PT 100                         | ± 0,3 K           |

## 2.4. Datenerfassung und -auswertung

Messdatenunterbrüche traten in den folgenden Zeiträumen auf:

- 01.02.2012 9:00 Uhr bis 13.02.2012 14:00 Uhr
- 02.10.2012, 19:00 Uhr bis 03.10.2012, 4:00 Uh
- 11.06.2013, 3:00 Uhr bis 11:00 Uhr
- 09.11.2013 23:00 Uhr bis 11.11.2013 0:00 Uhr
- 12.03.2014 8:00 Uhr bis 13.03.2014 8:45 Uhr

Die fehlenden Werte dieser Unterbrechungszeiträume werden interpoliert. Seit 01.07.2013 treten in zunehmenden Masse Inkonsistenzen in der Messwerterfassung auf. Die Zählerstandsabfragen erfolgen nur noch sporadisch, was zu einem erheblichen Verlust an zeitlicher Auflösung führt. Als Ursache für die Aufzeichnungsprobleme konnte ein fehlerhaft messender Elektrizitätszähler (Geschirrwashmaschine in der UG-Wohnung) identifiziert werden. Der betroffene Zähler wurde am 15.10.2013 ausgetauscht.

Ab 09.11.2013 waren wiederholte Aussetzer bei der Messwerterfassung zu beobachten, die wiederum auf einen fehlerhaften Elektrizitätszähler (Dampfzug, EG-Wohnung) zurückzuführen sind. Dieser Fehler wurde nach Austausch des entsprechenden Elektrizitätszählers am 22.12.2013 behoben.

Als Folge der fehlerhaften Messwerterfassung können zwischen 01.07.2013 und 15.10.2013 sowie zwischen 09.11.2013 und 22.12.2013 keine 15-Minuten- und Ein-Stunden basierten Betrachtungen (z.B. Gleichzeitigkeit, Lastgangsanalysen und Ladezeitpunktbestimmungen) mehr durchgeführt werden. Die Auswertungen, welche auf Tagessummen und -mittelwerten beruhen sowie die Monatsbilanzierungen sind davon nicht betroffen und werden bis zum Ende des 3. BJ fortgeführt.

Alle Auswertungen von Ein-Stunden-Summen- und Mittelwerten, von Tages- und Monatswerten werden aus den Rohdaten (15-Minuten-Werte) durch arithmetische Mittelung oder durch Aufsummieren berechnet.

## 2.5. Weitere Datenquellen

Die Daten zur solaren Einstrahlung werden aus dem Datensatz der Klimastation Buchs/Aarau gewonnen [4]. Die Distanz zwischen der Klimastation und dem Gebäudestandort beträgt etwa 3 km. Der Datensatz liefert Momentan-Werte mit 10-Minuten-Auflösung. Daraus werden Ein-Stunden Mittelwerte sowie Monatssummenwerte errechnet und zur Beschreibung der Einstrahlungssituation herangezogen.

Die Angaben zu langjährigen Aussentemperaturen und langjährigen solaren Einstrahlungen werden dem METEONORM 6-Datensatz entnommen [5].

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Klimatische Rahmenbedingungen

##### 3.1.1. Solare Einstrahlung

Die über die *gesamte Dauer des Projekts* gemessene Zahl an Sonnenstunden (Ein-Stunden-Mittelwert der solaren Einstrahlung  $>120 \text{ W/m}^2$ ) beträgt 6'490 h und liegt damit etwa 3% unter dem langjährigen Mittel eines vergleichbar langen Zeitraumes (6'680 h). Die über den Projektzeitraum kumulierte Summe aus Diffus- und Direktstrahlung am Standort Buchs/Aarau beläuft sich auf 2'616 kWh/(m<sup>2</sup>a) und liegt 5% über dem Langzeitwert eines 31-monatigen Zeitraumes (Abbildung 5).

Der *Winter 2013/2014* zeigte sich überdurchschnittlich sonnig. Die Zahl der Sonnenstunden weist mit 1466 h einen um 44% über dem langjährigen Mittel liegenden Wert auf. Die Globalstrahlungssumme des Winters beträgt 438 kWh/(m<sup>2</sup>a), was 111% der langjährigen solaren Einstrahlung des Zeitraums zwischen Oktober und April entspricht.

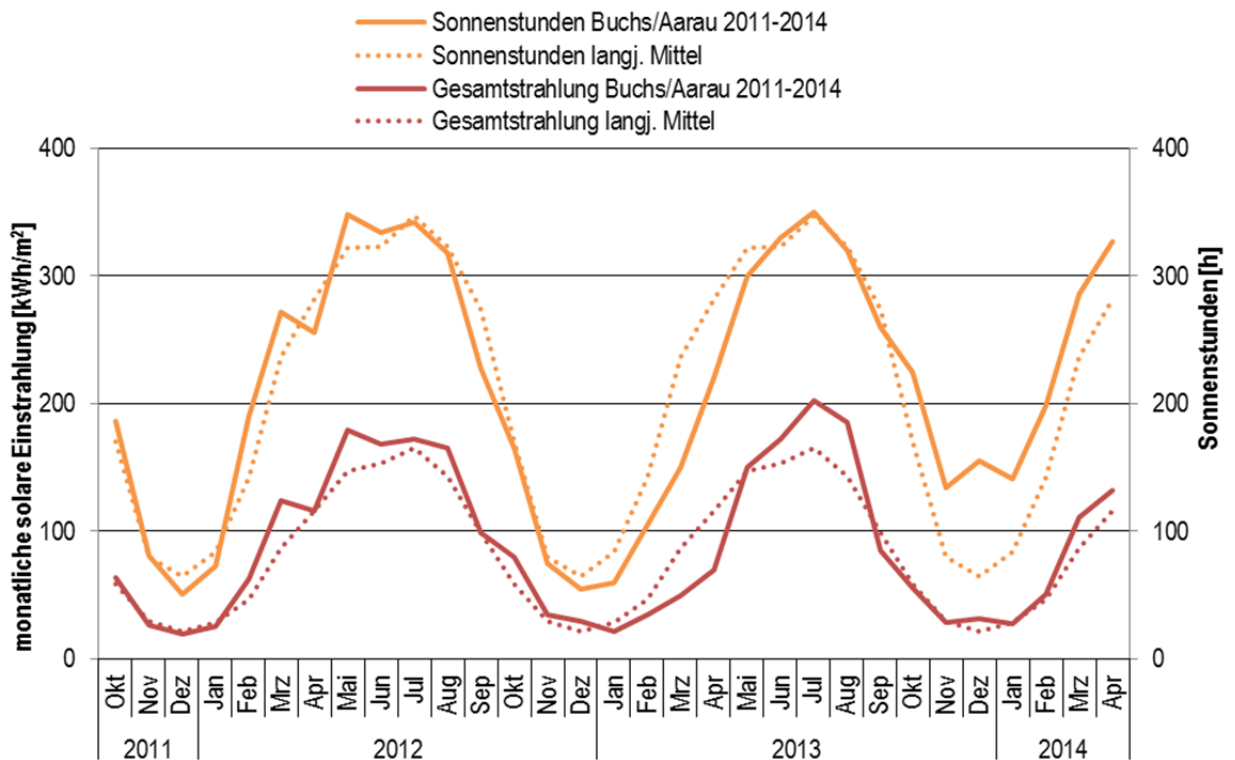


Abbildung 5: Der Monatsverlauf der Sonnenstunden und der solaren Einstrahlung zwischen Oktober 2011 und April 2014.

##### 3.1.2. Aussenlufttemperatur

Die durchschnittliche Aussenlufttemperatur des *gesamten Projektzeitraums* (Abbildung 6) liegt bei 10.1 °C und 1.6 K über der langjährigen Mitteltemperatur der Station Buchs-Aarau. Die Durchschnittstemperaturen der Monate Februar 2012 (-3.3 K), Februar 2013 (-0.9 K), März 2013 (-1.9 K) und Mai 2013 (-1.1 K) liegen unter den langjährigen Mitteltemperaturen der entsprechenden Monate. In den verbleibenden Monaten liegen die Durchschnittstemperaturen über den langjährigen Mitteltemperaturen. Im Juli 2013 überschreitet die Monats-Durchschnittstemperatur dem langjährigen Mittelwert um 4.3 K.

Die tiefste Tagesmitteltemperatur (-10.1 °C) wird am 06.02.2012 gemessen, der höchste Wert (29.6 °C) tritt am 19.06.2013 auf.

Für den *Winter 2013/2014* wird eine Durchschnittstemperatur von 6.1 °C gemessen. Dieser Wert liegt 1.5 K über der langjährigen Mitteltemperatur für den Zeitraum zwischen Oktober und April. Die tiefste Tagesmitteltemperatur (-1.9 °C) wird am 12.12.2013 gemessen, der höchste Wert (29.6 °C) tritt am 19.06.2013 auf.

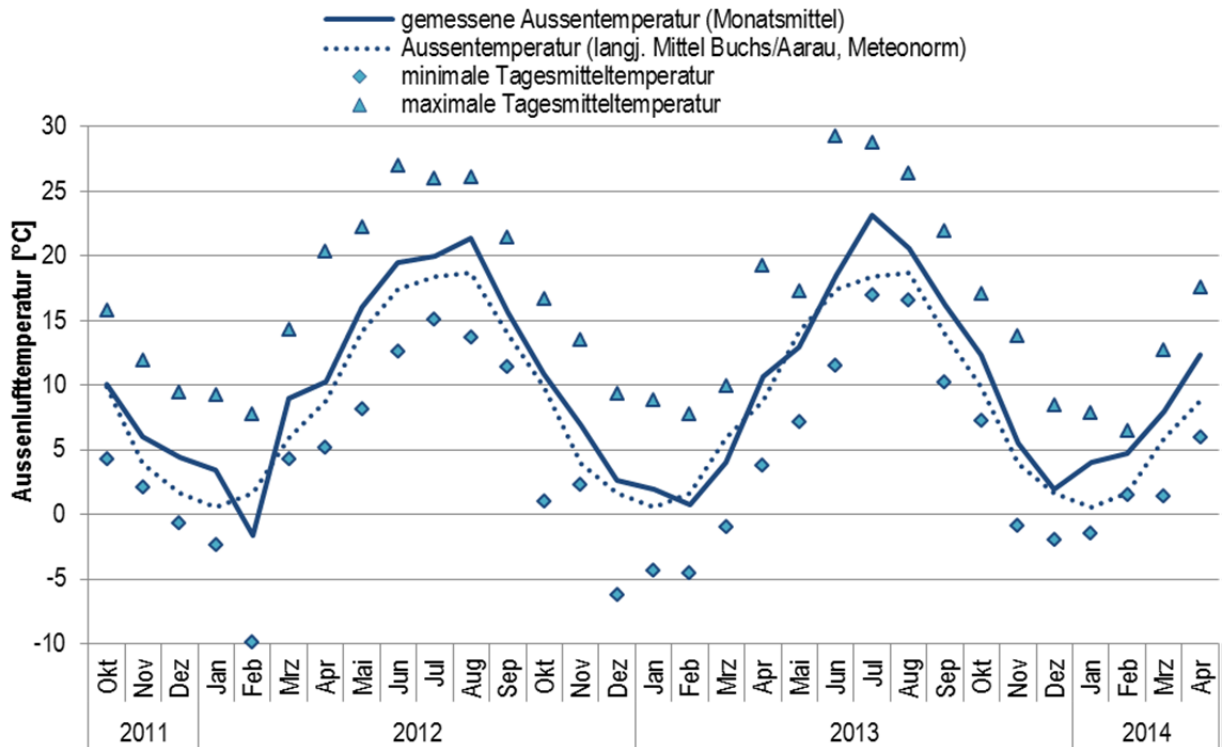


Abbildung 6: Der Verlauf der durchschnittlichen Monatstemperaturen zwischen Oktober 2011 und April 2014, der langjährigen Mitteltemperaturen sowie die minimalen und maximalen am Gebäudestandort gemessenen Tagesmitteltemperaturen.

### 3.2. Energiebilanz

#### 3.2.1. Kumulierter PV-Ertrag und Elektrizitätsbezug

Über den gesamten Projektzeitraum übersteigt der kumulierte PV-Ertrag den kumulierten Elektrizitätsbezug um 8'383 kWh. Dieser Wert entspricht etwa 23% des Gesamtelektrizitätsbezuges. Der kumulierte Verlauf des PV-Ertrags und des Gesamtelektrizitätsbezugs seit Projektbeginn ist in Abbildung 7 dargestellt. Es zeigt sich, dass der kumulierte Elektrizitätsbezug seit April 2012 stets unter den kumulierten Wert des PV-Ertrags liegt. Dies ändert sich bis zum Projektende nicht, obwohl der Verbrauch im Projektverlauf stetig ansteigt und die Elektrizitätsproduktion im Winter 2012/2013 hinter der Ertragsprognose zurückbleibt.

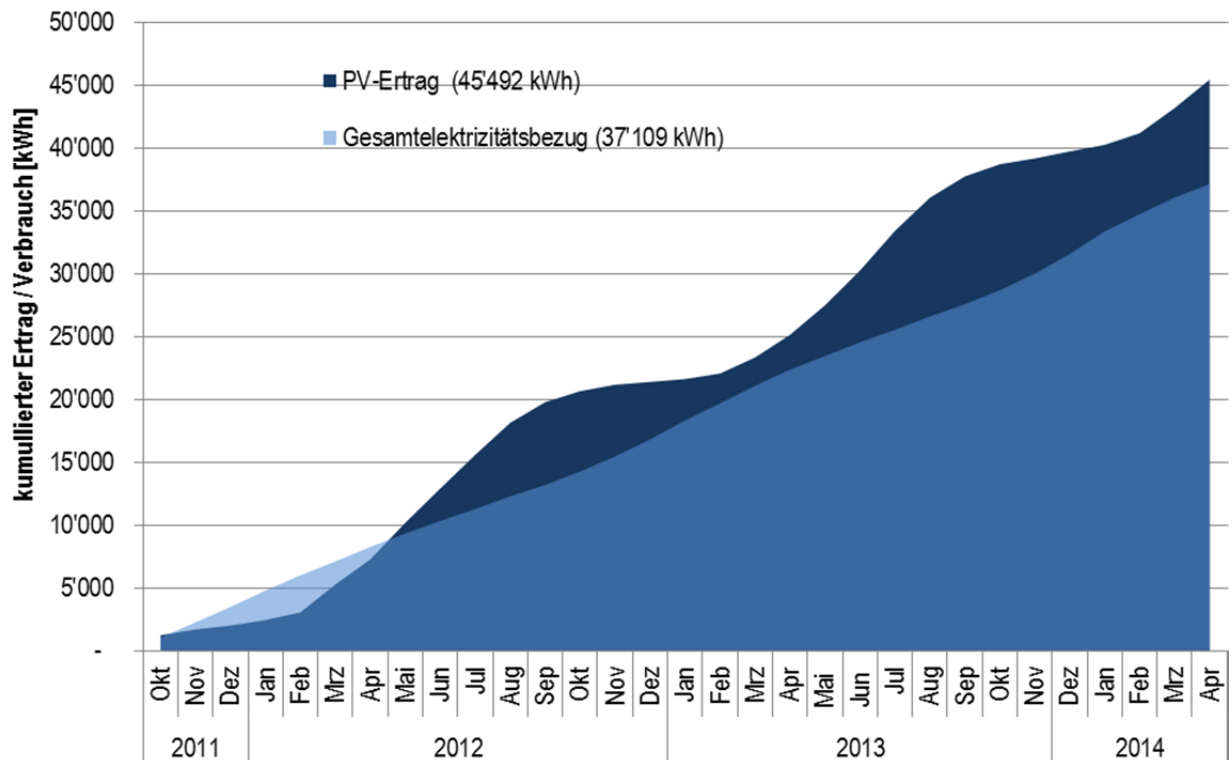


Abbildung 7: Der kumulierte PV-Ertrag im Vergleich zum kumulierten Gesamtelektrizitätsbezug zwischen Oktober 2011 und April 2014.

### 3.2.2. PV-Ertrag

Gesamthaft werden über die *Dauer des Projekts* 45'492 kWh Elektrizität solar erzeugt. Dies entspricht einem Mehrertrag von etwa 5% (2'200 kWh) gegenüber der Ertragsprognose des Gesamtzeitraums Oktober 2011 bis April 2014 (43'292 kWh). Die Mehrerträge fallen vorwiegend zwischen März und September an, während im Herbst und Winter die erzeugte Elektrizitätsmenge hinter der Prognose zurückbleibt. Der Verlauf der monatlich erzeugten Elektrizitätsmengen sowie die Monatswerte der Ertragsprognose sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die im *Winter 2013/2014* solar erzeugte Elektrizitätsmenge beträgt 7'711 kWh. Dies entspricht 111% der Ertragsprognose (6'978 kWh) für den Zeitraum zwischen Oktober und April. Der Ertrag bewegt sich zwischen 460 kWh im November 2013 und 2'263 kWh im April 2014. In den Monaten Oktober 2013, November 2013 und Januar 2014 liegen die realen PV-Erträge unterhalb der Prognosewerte, in allen anderen Monaten des Winters 2013/2014 übersteigen die Erträge die vorhergesagten Werte.

Verglichen mit den beiden vorangegangenen Winterperioden ergibt sich folgendes Bild:

- +44% (+2'346 kWh) gegenüber dem Winter 2012/2013,
- +6% (+427 kWh) im Vergleich mit dem Winter 2011/2012.

Die errechneten Mehrerträge gegenüber den vorangegangenen beiden Winterperioden lassen sich mit dem hohen Solarstrahlungsangebot belegen.

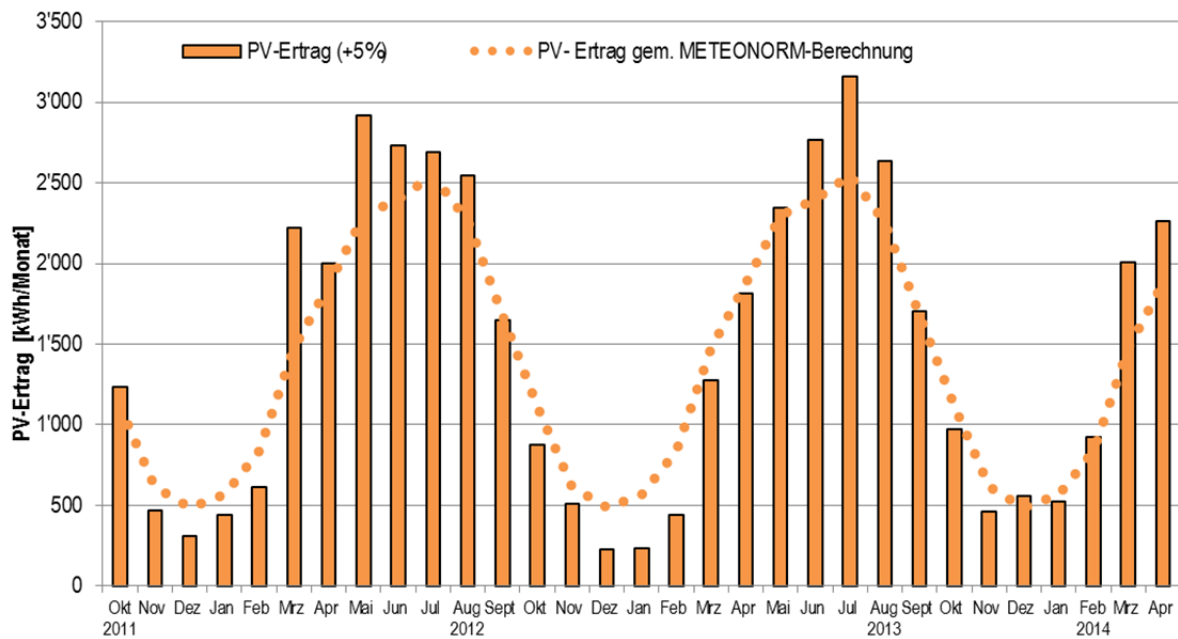


Abbildung 8: Die monatlichen Elektrizitätsmengen des prognostizierten und erreichten PV-Ertrags für den Winter 2013/2014.

### 3.2.3. Gesamtelektrizitätsbezug

Über die *gesamte Projektlaufzeit* werden insgesamt etwa 37'100 kWh elektrische Energie von allen Verbrauchern im Gebäude bezogen. Die monatlich bezogenen Elektrizitätsmengen (Abbildung 9) variieren zwischen 909 kWh im September 2012 und 1802 kWh im Januar 2014. Die Aufschlüsselung der Energiemenge auf einzelne Verbrauchergruppen zeigt, dass der Haushaltstrombezug der drei Wohnungen den grössten Anteil am Stromverbrauch aufweist. Der Stromverbrauch der Sole-Wasser-Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung und Gebäudebeheizung bildet den zweitgrössten Anteil. Die zum Laden der Fahrzeugakkus erforderliche Elektrizitätsmenge steht an dritter Stelle. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage und des Allgemeinstrom des Gebäudes spielen in der Gesamtbilanz eine untergeordnete Rolle. Die Abbildung 9 lässt erkennen, dass der Monatsverlauf der Energiemengen aller wesentlichen Einzelverbraucher eine Jahresdynamik mit Minimalwerten im Sommer und hohen Bezügen im Winter aufweist. Die Dynamik ist klimatisch durch den Anstieg des Heizwärmebezugs in den Herbst- und Wintermonaten bedingt und wird vom Betriebsenergiebezug der Wärmepumpe geprägt. Die Monatswerte des Haushaltstrombezugs weisen ebenfalls eine jahreszeitliche Fluktuation auf, die jedoch geringer ausfällt als die saisonale Schwankung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe.

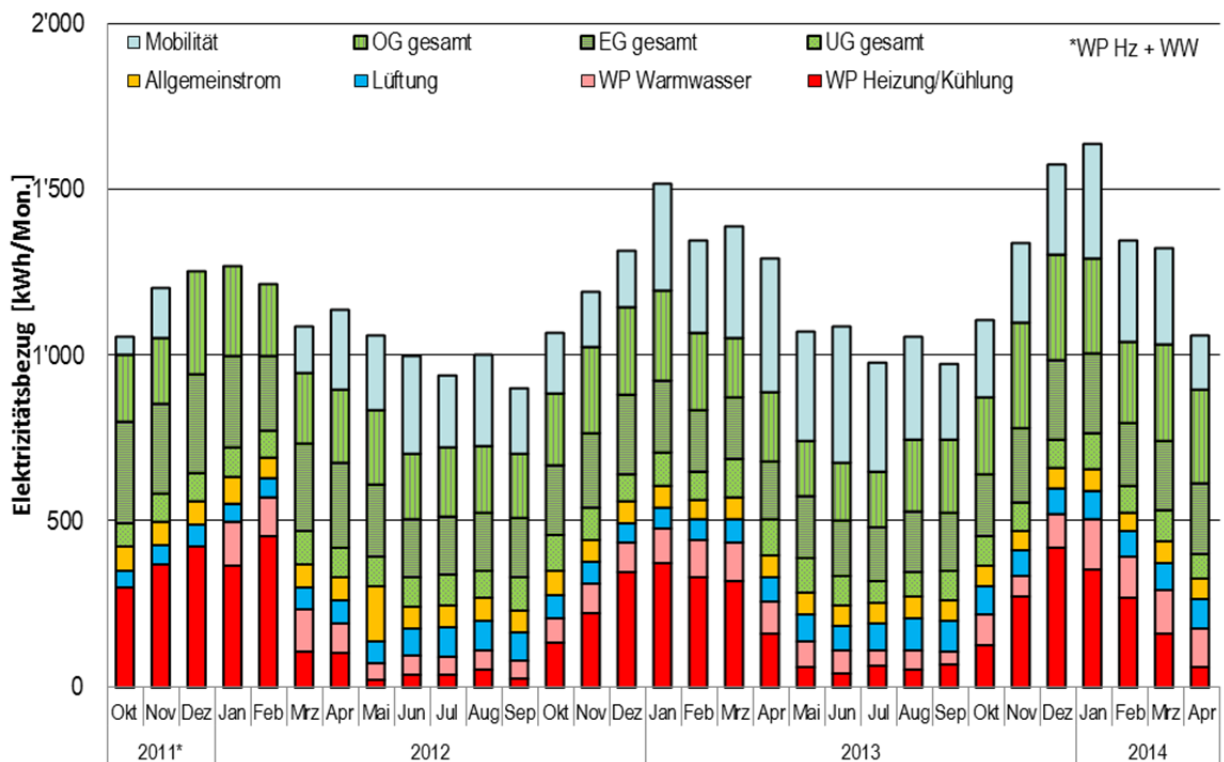


Abbildung 9: Die monatlichen Elektrizitätsmengen des Gesamtelektrizitätsbezugs sowie die Differenzierung in die Hauptverbrauchergruppen zwischen Oktober 2011 und April 2014.

Im *Winter 2013/2014* werden von allen Verbrauchern im Gebäude insgesamt 9'563 kWh Elektrizität bezogen. Der monatliche Gesamtelektrizitätsbezug bewegt sich zwischen 1064 kWh (April 2014) und 1802 kWh (Januar 2014). Im Vergleich zu den Winterperioden 2011/2012 (8'271 kWh) und 2012/2013 (9'191 kWh) ist ein Anstieg um 4% respektive um 16% sowie ein "Aufschwngen" des Stromverbrauchs gegenüber der vorangegangenen Winterperiode festzustellen. Zudem sind im Dezember 2013 und Januar 2014 die höchsten monatlich während der Projektlaufzeit bezogenen Elektrizitätsmengen zu beobachten. Dies ist vor allem auf das Ansteigen des Haushaltsstrombezugs, insbesondere in der OG-Wohnung, zurückzuführen. Andere Verbraucher haben nur einen geringen Einfluss auf den steigenden Gesamtelektrizitätsbezug.

#### 3.2.4. Haushaltsstrom

Im *Laufe des Projekts* beträgt die in den Wohnungen bezogene Elektrizitätsmenge (Haushaltsstrom) 16'721 kWh respektive 20.2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Diese Energiemenge entspricht etwa 45% des Gesamtelektrizitätsbezugs. Der Verlauf der Monatswerte über die Gesamtlaufzeit ist in Abbildung 10 wohnungsweise differenziert dargestellt.

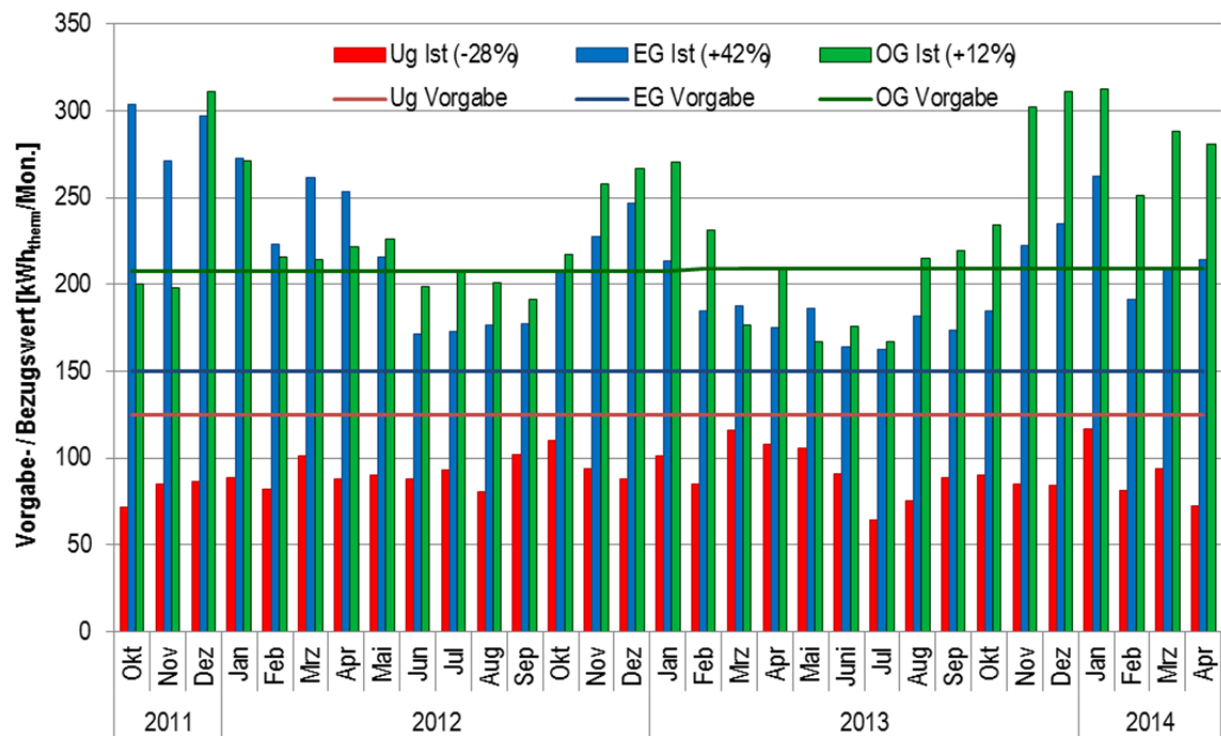


Abbildung 10: Die monatlichen Elektrizitätsmengen des Haushaltsstrombezugs im Vergleich zu den Vorgabewerten zwischen Oktober 2011 und April 2014, wohnungsweise differenziert.

Der Elektrizitätsbezug in den Wohnungen beläuft sich im *Winter 2013/2014* auf insgesamt 4'124 kWh. Diese Menge entspricht 43% des gesamten Elektrizitätsbezugs in diesem Zeitraum. Im Vergleich zum Winter 2011/2012 bleibt der Haushaltsstrombezug nahezu unverändert, gegenüber dem Winter 2012/2013 steigt er um 349 kWh (+9%) an.

Ein Grossteil der Elektrizität (60 bis 70%), die in den Wohnungen bezogen wird, fällt bei den nicht monitorierten Verbrauchern an. Dazu zählen die Wohnungsbeleuchtung sowie alle Elektrogeräte, die an die Steckdosen der Wohnungen angeschlossen sind. Die Weisse Ware (Geschirrspüler, Waschmaschinen, Tumbler, Elektroherde, Dampfanzüge, Kühlschränke) tragen zu 30 bis 40% zum Haushaltsstrombezug bei [3]. Der Anteil der Weissen Ware im untersuchten Gebäude fällt geringer aus als in [8] für die gesamte Schweiz ermittelt. Für die drei Wohnungen des Gebäudes ist folgendes zu beobachten:

#### UG-Wohnung

Über die gesamten Projektlaufzeit summiert sich der Haushaltsstrombezug der UG-Wohnung auf 2'809 kWh. Dieser Wert liegt 28% unterhalb des im Energie-Informationssystem definierten Vorgabewertes. Der Verlauf der Monatsbezüge über die Dauer des Projekts zeigt keine saisonalen Auffälligkeiten und keinen Trend zu steigenden oder sinkenden Werten. Der Haushaltsstrombezug der UG-Wohnung (623 kWh) liegt im Winter 2013/2014 29% unterhalb des im Energie-Informationssystem hinterlegten Vorgabewertes. Es zeigt sich, dass der Mieter der UG-Wohnung pro Monat zwischen 72 kWh und 117 kWh Elektrizität pro Monat bezieht und stets den monatlich festgelegten Vorgabewert einhält.

#### EG-Wohnung

Während der Projektlaufzeit werden in der EG-Wohnung insgesamt 6'629 kWh Elektrizität bezogen. Somit wird 39% mehr Haushaltsstrom bezogen, als im Energie-Informationssystem für die EG-Wohnung festgelegt ist. Der Haushaltsstrombezug des Winters 2013/2014

(1'520 kWh) überschreitet den im Energieinformationssystem hinterlegten Vorgabewert um 44%. Die Monatswerte bewegen sich zwischen 115 kWh und 263 kWh Elektrizität pro Monat. Alle Monatswerte überschreiten den Vorgabewert. Die Beobachtungen im Winter 2013/2014 bestätigen den bereits in den vorangegangenen Betrachtungen gezeigten Trend und zeigen, dass der Haushaltsstrombezug über das Jahr saisonal ausgeprägt verläuft. In den Sommermonaten (Juni bis September) geht der monatliche Haushaltsstrombezug zurück, im Herbst und Winter steigen die Monatswerte wieder an und erreichen zwischen November und Januar maximale Werte.

Die Nutzung der EG-Wohnung weist eine Besonderheit auf. Die Mieterin nutzt einen Teil der Wohnung gewerblich und betreibt neben den haushaltsüblichen Elektrogeräten zusätzlich weitere Stromverbraucher. Der Stromverbrauch der Zusatzgeräte wird seit Juni 2012 mit Hilfe von Zusatzzählern gemessen und manuell in einem Protokoll dokumentiert. Die Abbildung 11 zeigt eine Aufschlüsselung des Haushaltstrombezugs und des gewerblich bedingten Stromverbrauchs dieser Wohnung. Auch im Winter 2013/2014 sind die Zeitpunkte der Erfassung und die Längen der Erfassungszeiträume nicht vollständig deckungsgleich zu den Monatszeiträumen der übrigen Untersuchungen. Zur besseren Darstellbarkeit werden die Werte so gut es geht monatsweise zugeordnet. Es zeigt sich, dass über einen 30-Tage-Zeitraum zwischen 36 kWh und 55 kWh und für den gesamten Winter 2013/2014 295 kWh Elektrizität für gewerbliche Zwecke bezogen werden. Diese Energiemenge entspricht etwa 15% des Haushaltsstrombezugs der EG-Wohnung und bleibt im Vergleich zum Winter 2012/2013, in dem etwa 270 kWh Elektrizität für gewerbliche Zwecke bezogen wurde, auf etwa konstantem Niveau. Der überwiegende Teil dieses gewerblichen Stromverbrauchs entfällt auf den Betrieb des Computers (211 kWh). 48 kWh werden für das UV-Härtungsgerät, weitere 35 kWh für den Betrieb der Kasse benötigt.

Würde die Erdgeschosswohnung ausschliesslich privat genutzt und damit der gewerblich bedingte Zusatzstromverbrauch wegfallen, könnten die Vorgabewerte für den Haushaltstrom meist eingehalten werden.

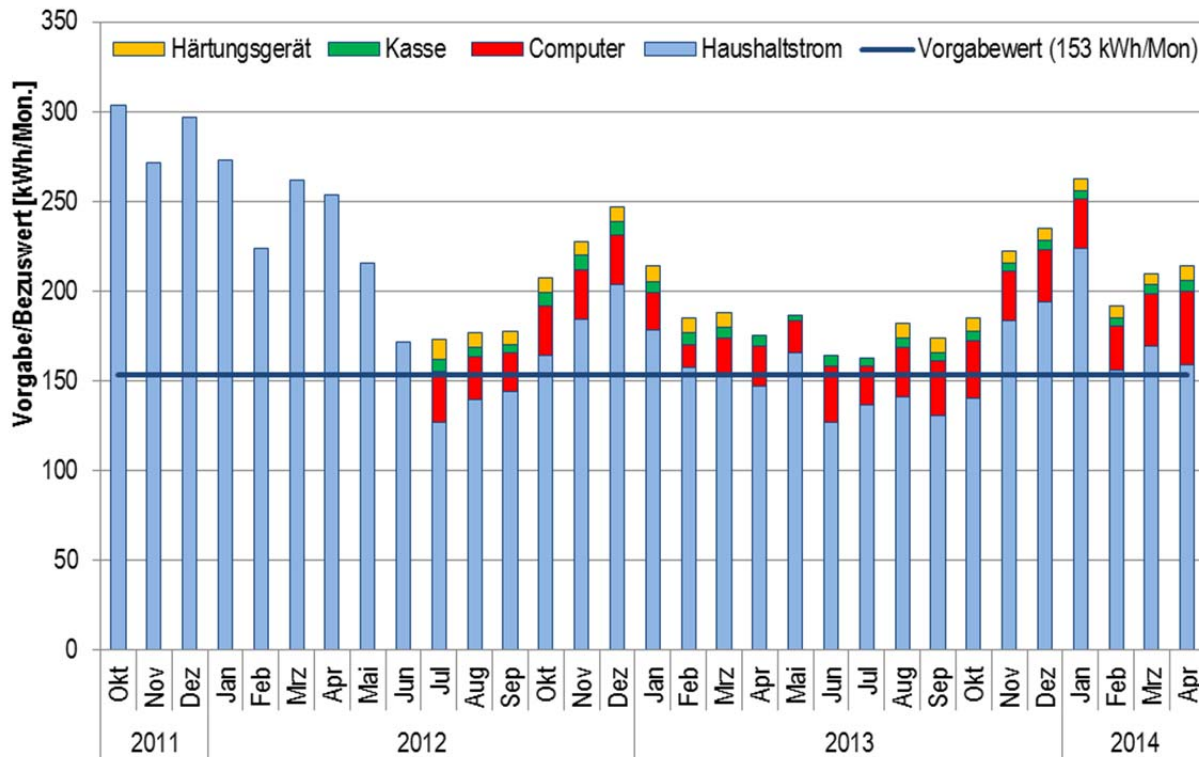


Abbildung 11: Die monatlichen Elektrizitätsmengen des Haushaltsstrombezugs und des gewerblich bedingten Strombezugs in der Erdgeschosswohnung (Oktober 2011 bis April 2014).

## OG-Wohnung

Im Projektzeitraum beträgt der Haushaltsstrombezug der Mieter der OG-Wohnung insgesamt 7'210 kWh und liegt damit 12% über den Vorgabewerten des Energie-Informationssystems. Der Verlauf der Monatsbezüge zeigt saisonale Schwankungen mit niedrigeren Werten in den Sommermonaten und höheren Werten im Winter. Im Winter 2013/2014 werden 1'980 kWh Haushaltsstrom verbraucht, was einer Überschreitung des Vorgabewertes von 35% entspricht. Die monatlichen Bezüge liegen zwischen 72 kWh und 117 kWh. Auffällig ist der erhöhte Wert ab Dezember 2013. Eine Rückfrage beim Gebäudeeigentümer ergab, dass dieser Effekt auf einen Mieterwechsel zurückzuführen ist.

### 3.2.5. Bezugsmuster

Zur Erkennung typischer Bezugsmuster, werden gemittelt Stundenwerte der bezogenen Elektrizitätsmenge in Abhängigkeit von Tageszeit und Wochentag wohnungsweise in Abbildung 12 dargestellt. Der Elektrizitätsbezug der Untergeschosswohnung zeigt ein Abend- und Wochenendmaximum. An Wochentagen wird in den Morgenstunden und im Tagesverlauf wenig Elektrizität bezogen. An Wochenenden steigt der Elektrizitätsbezug ab 9:00 Uhr an und sinkt erst gegen Mitternacht wieder ab. Der Elektrizitätsbezug der Erdgeschosswohnung weist einen gleichmässigen Bezug über den Tag mit reduziertem Bezug in den frühen Morgenstunden und einem steigenden Elektrizitätsbezugs ab 7:00 Uhr für alle Wochentage auf. An Sonntagen verschiebt sich Anstieg des Elektrizitätsbezugs auf 9:00 Uhr. Das Bezugsmuster der Obergeschosswohnung weist an Wochentagen um 6:00 Uhr erhöhten Elektrizitätsbezug aus. Im weiteren Tagesverlauf sinkt der Stromverbrauch ab und steigt gegen 17:00 Uhr wieder an. An Wochenenden steigt der Elektrizitätsbezug ab 10:00 Uhr an und verläuft gleichmässig über den Tag. Die Bezugsmuster der UG- und OG-Wohnung sind typisch für Wohnungen, deren Nutzer über den Tag abwesend sind. Das Bezugsmuster der EG-Wohnung deutet auf regelmässige Anwesenheit hin und kann mit der Nutzung des Nagelstudio erklärt werden.

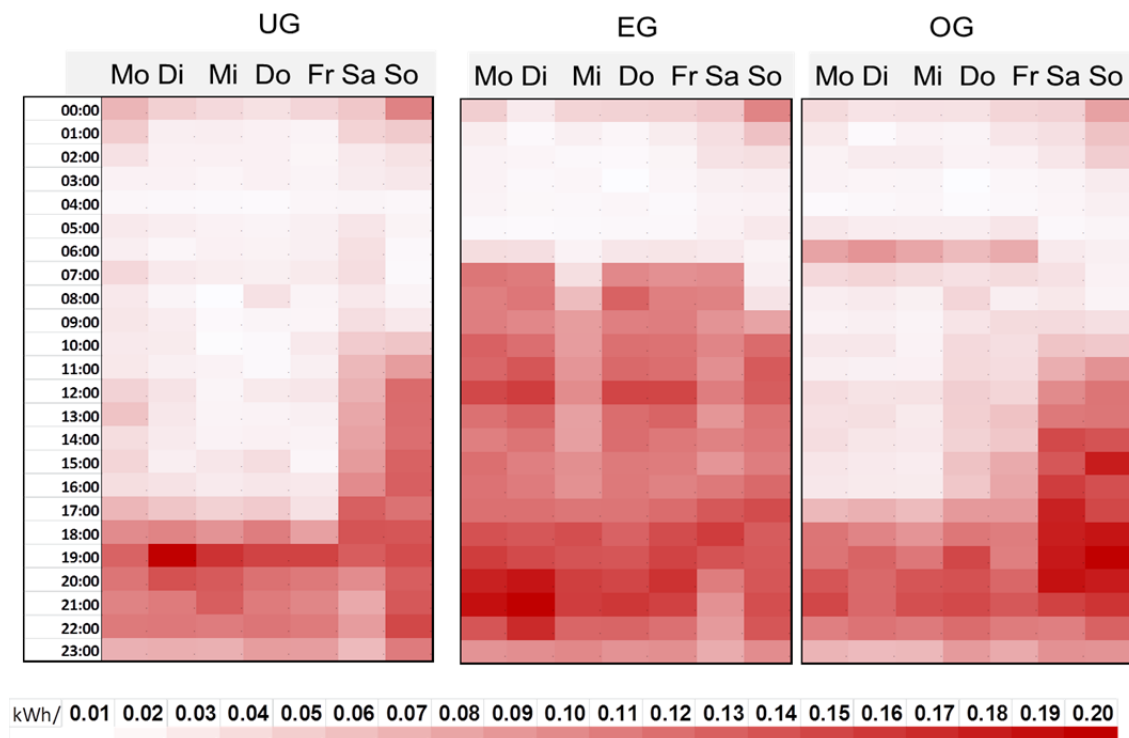


Abbildung 12: Die Stunden- und Wochenprofile des mittleren Elektrizitätsverbrauchs der einzelnen Wohnungen (Oktober 2011 – April 2014).

### 3.2.6. Wärmepumpe

Zwischen Oktober 2011 und April 2014 beläuft sich der Elektrizitätsbezug der Wärmepumpe auf insgesamt 8'818 kWh (23.7 kWh/m<sup>2</sup> EBF). Diese Energiemenge ist auf verschiedene Verbraucher unterteilt und gemäss Tabelle 2 differenziert.

Tabelle 2: Differenzierung der Elektrizitätsmengen der Wärmepumpe:

|                                                   | Wärmeerzeugung              |                            | Hilfsbetriebe |             |            |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|-------------|------------|
|                                                   | Betriebsenergie Heizbetrieb | Betriebsenergie Warmwasser | Solepumpe     | Umwälzpumpe | Notheizung |
| Elektrizität [kWh]                                | 6'084                       | 2'734                      | 180           | 560         | 21         |
| Proz. Anteil am Elektrizitätsbezug der Wärmepumpe | 69%                         | 31%                        | 2%            | 6%          | <1%        |

Etwa ein Drittel der bezogenen Elektrizität wird zur Aufbereitung des Warmwassers eingesetzt, zwei Drittel entfallen auf die Temperierung des Gebäudes. Eine geringfügige Elektrizitätsmenge wird benötigt, um die Zuluft der Komfortlüftungsanlage an Tagen mit hohen Aussenlufttemperaturen (> 20°C) abzukühlen. Dazu wird der aussenluftseitig im Komfortlüftungsgerät platzierte Wärmetauscher vom Volumenstrom der Erdsonde durchströmt [2]. Diese "Kühlfunktion" ist in den Monaten ausserhalb der Heizperiode (Mai bis September) in Betrieb. Die zusätzlich für die Zuluftkühlung eingesetzte Pumpenenergie erhöht den Elektrizitätsbezug im gesamten Projektzeitraum um etwa 80 kWh. Verglichen mit dem Stromverbrauch der Wärmepumpe und mit dem Gesamtelektrizitätsbezug ist dieser Wert vernachlässigbar gering. Der Stromverbrauch der Hilfsbetriebe fällt gering aus. Der niedrige Anteil des Elektrizitätsbezugs der Quellen- und Verteilpumpen am Gesamtverbrauch der Wärmepumpe verdeutlicht die Möglichkeiten beim Einsatz von energieeffizienter Pumpentechnik. Im Winter 2013/2014 bezieht die Wärmepumpe insgesamt 2'567 kWh Elektrizität. Im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Winterperioden (2'607 kWh im Winter 2011/2012 und 2'596 kWh im Winter 2012/2013) ist ein geringfügiger Rückgang des Betriebsenergiebezugs erkennbar. Die monatlichen Elektrizitätsmengen liegen zwischen 179 kWh im April 2014 und 567 kWh im Januar 2014. Der Wert für Januar 2014 ist zudem der höchste im gesamten Projektzeitraum gemessene monatliche Betriebsenergiebezug. Für den Winter 2013/2014 beträgt der Betriebsenergieanteil zur Warmwasserbereitung 814 kWh, was einem Anteil von ca. 32% am Betriebsenergiebezug der Wärmepumpe entspricht. Der Betriebsenergieanteil zur Warmwasserbereitung kann in den Monaten November und Dezember 2013, bedingt durch Datenprobleme, nicht differenziert werden. Die entstandenen Datenlücken wurden daher auf Erfahrungswerten extrapoliert. Die Abbildung 13 zeigt den Verlauf der monatlichen Elektrizitätsmengen der Hilfsbetriebe im Verlauf des Projektes.

Die erhobenen Messwerten lassen nicht erkennen, dass die Notheizung zur Bereitstellung von Raumwärme und/oder Warmwasser eingesetzt wird. Die erfassten Elektrizitätsmengen sind gering, die Betriebsdauer der Notheizung beschränkt sich auf einige kurze Zeiträume. Es wird davon ausgegangen, dass es sich um Einzelereignisse und/oder Aufzeichnungsartefakte handelt, die in keinem Zusammenhang mit den getroffenen Optimierungsmassnahmen stehen.

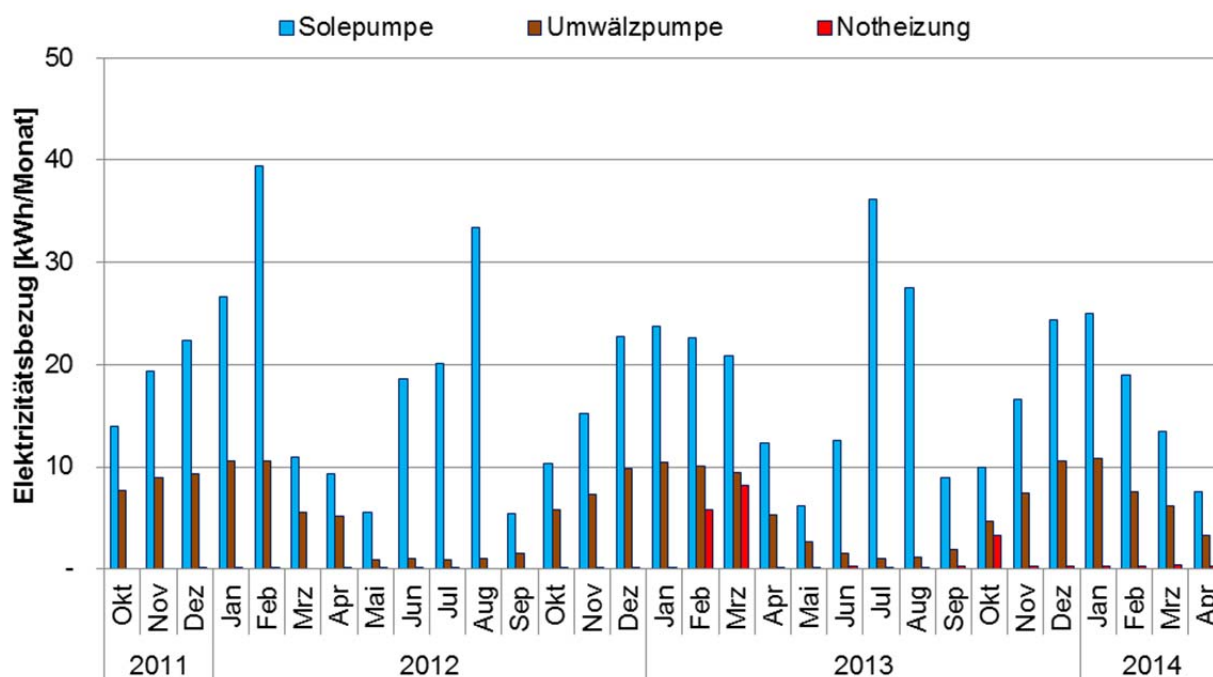


Abbildung 13: Die monatlichen Elektrizitätsmengen der Hilfsbetriebe für den Winter 2013/2014.

### 3.2.7. Lüftung

Für den gesamten Projektzeitraum beträgt der Betriebsenergieaufwand der Lüftungsanlage 2'291 kWh respektive 2.8 kWh/(m<sup>2</sup>a). Im Winter 2013/2014 beläuft sich der Elektrizitätsbezug auf 578 kWh bzw. auf die EBF hochgerechnet 3.1 kWh/(m<sup>2</sup>a). Gemäss Minergie-P-Antrag des Gebäudes liegt der geplante Elektrizitätsbedarf bei 2.2 kWh/(m<sup>2</sup>a). Dies ist niedriger als der gemessene Wert. Gegenüber dem Planwert wird über die 31 Monate des Projekts etwa 500 kWh mehr Elektrizität zum Betrieb der Lüftung aufgewendet. Möglicherweise führen Strömungsverluste im Luftverteilsystem, verschmutzte Filter oder ein höherer Druckverlust zu einer höheren Leistungsaufnahme. Es ist auch möglich, dass sich die Herstellerangaben zu niedrig angesetzt sind. Bedingt durch den kontinuierlichen Betrieb ist die Komfortlüftungsanlage ein Bandlastverbraucher. Die Bewohner beschreiben die Qualität der Raumluft als sehr angenehm. Die Einstellung der Lüftungsstufen durch die Bewohner ist nicht bekannt.

### 3.2.8. Heizwärme/Warmwasser

#### Planungs- und Orientierungswerte

Bei der Planung des Gebäudes wurde gemäss Minergie-Antrag ein spezifischer Heizwärmebedarf von 10.8 kWh/(m<sup>2</sup>a)<sup>1</sup> angesetzt. Für den Warmwasserbedarf wurde gemäss SIA 380/1 von 20.8 kWh ausgegangen [9]. Wie bereits im 2. ZB ausgeführt, veranschlagte die Planung eine EBF von 396 m<sup>2</sup>. Die reale beheizte Fläche des Gebäudes beträgt 320 m<sup>2</sup>. Ebenfalls liegt die mittlere gemessene Raumlufttemperatur mit 22 °C deutlich über dem Planungswert von 20 °C. Darauf basierend wird der spezifische Heizwärmebedarf bei realer EBF, 22 °C Raumlufttemperatur und unter Annahme eines thermisch wirksamen Aussenluftvolumenstroms<sup>2</sup> von 0.21 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>h) zu 26 kWh/(m<sup>2</sup>a) berechnet. Zur Orientierung können die

<sup>1</sup> Der Heizwärmebedarf berücksichtigt die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage.

<sup>2</sup> Gemäss Minergie-Antrag.

Mieter ihren Heizwärmebezug in einem Energieinformationssystem abfragen. In diesem System ist für den flächengewichteten Heizwärmedarf ein Wert von  $17.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  hinterlegt. Der spezifische Heizwärmedarf wurde mit einem Verteilschlüssel in monatliche, vom Außenklima abhängige Wärmemengen umgerechnet und im Energieinformationssystem gespeichert [3].

Der Jahres-Warmwasserbedarf ( $Q_{\text{ww}}$ ) wurde an die von  $60^\circ\text{C}$  auf  $50^\circ\text{C}$  verringerte Warmwassertemperatur und an die Zahl der Mieter pro Wohnung auf  $10.1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  angepasst. Darauf basierend werden pro Mieter  $1'000 \text{ kWh/a}$  Warmwasser als Referenzwert im Energieinformationssystem festgelegt.

#### Heizwärmebezug (gesamte Projektlaufzeit)

Über die 31 Monate des Projekts summiert sich der Heizwärmebezug auf  $26'400 \text{ kWh}$ . Der Verlauf der Monatswerte über die Gesamtlaufzeit ist in Abbildung 14 grafisch dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass die monatlichen Heizwärmebezüge in allen drei Heizperioden die Vorgabewerte des Energieinformationssystems übersteigen. Besonders auffällig sind die Überschreitungen in den Monaten Januar bis April. Über die drei Heizperioden ist zu beobachten, dass der spezifische, flächengewichtete und Heizgradtag-korrigierte Heizwärmebezug in den ersten beiden Wintern konstant bleibt. Im dritten Winter steigt der Wert an, obwohl der Winter wärmer als normal war. Dies ist hauptsächlich auf den überdurchschnittlich hohen Heizwärmebezug einer Mietpartei zurückzuführen. Im Vergleich mit dem temperatur- und flächenkorrigierten spezifischen Heizwärmebedarf ( $26 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ) respektive  $21'500 \text{ kWh}$  für 31 Monate) errechnet sich für die gesamte Dauer des Projekts ein Heizwärme-Mehrverbrauch von etwa  $4'900 \text{ kWh}$ .

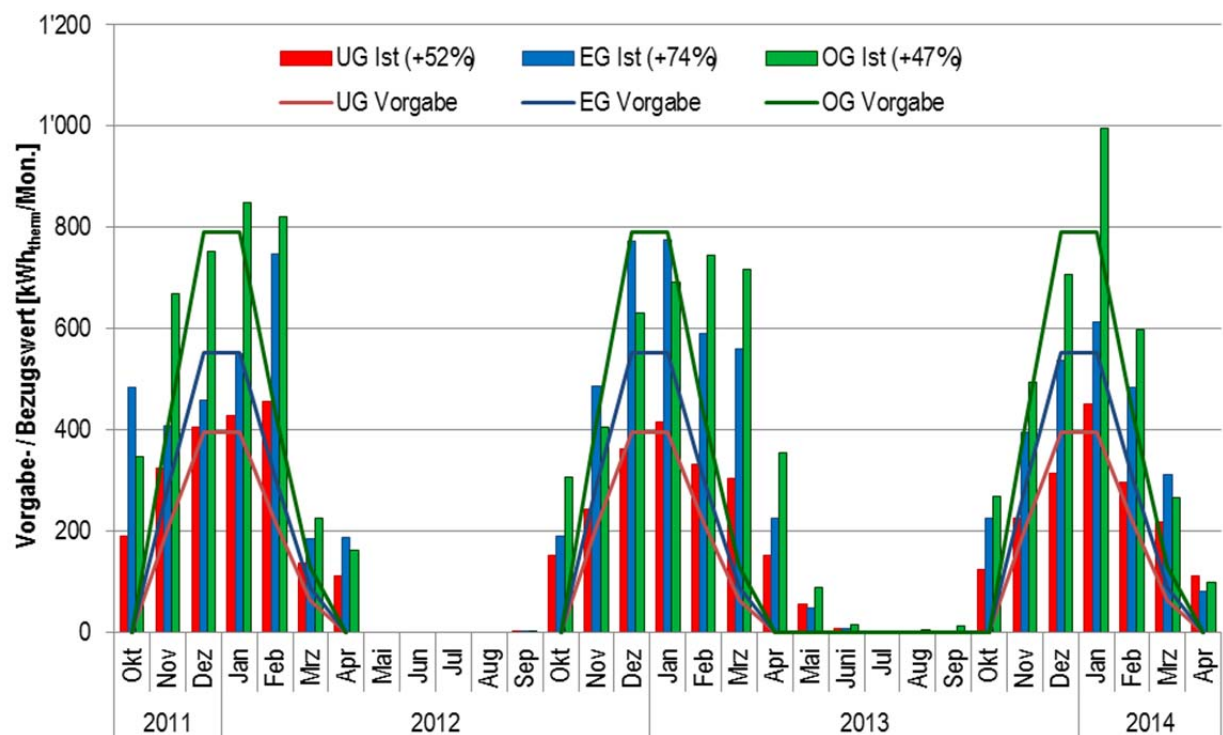


Abbildung 14: Die monatlichen Heizwärmebezugswerte des Gebäudes zwischen Oktober 2011 und April 2014.

### Heizwärmebezug im Winter 2013/2014

Die Tabelle 3 führt die absoluten und die flächengewichteten Werte des Heizwärmebezugs im Winter 2013/2014 auf und stellt sie den Werten der beiden vorangegangenen Heizperioden gegenüber.

Tabelle 3: Der Heizwärmebezug im Winter 2013/2014, Vergleich mit den Heizperioden 2011/2012 und 2012/2013:

|                                                                  | Dritter Winter<br>2013/2014 | Veränderungen des Heizwärmebezugs gegenüber |                             |                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                  |                             | Erster Winter<br>2011/2012                  | Zweiter Winter<br>2012/2013 | Angepasste<br>HZ-Bedarfs-<br>berechnung<br>( $Q_h$ : 26 kWh/(m <sup>2</sup> a)) |
| Heizwärmebezug<br>[kWh <sub>therm</sub> ]                        | 9'630                       | -21 (0%)                                    | +1'820 (+23%)               | +1'310 (16%)                                                                    |
| flächengewichtet *<br>[kWh <sub>therm</sub> /(m <sup>2</sup> a)] | 30.6                        | +10.1                                       | +9.9                        | +16.9                                                                           |

\* Bezogen auf 320 m<sup>2</sup> EBF und um die Heizgradtage der jeweiligen Heizperiode korrigiert (HGT: 1. Winter 0.99, 2. Winter: 1.08, 3. Winter: 0.87)

Trotz eines deutlichen Rückgangs der Heizgradtage als Folge einer milden Witterung steigt der flächengewichtete Heizwärmebezug gegenüber der angepassten Heizwärmebedarfsberechnung und gegenüber den Winterperioden 2011/2012 und 2012/2013 an.

Die Ursache für den Anstieg des Heizwärmebezugs liegt nach mündlicher Auskunft des Gebäudeeigentümers im geänderten persönlichen Verhalten einer Mietpartei begründet.

### Warmwasserverbrauch (gesamte Projektlaufzeit)

Während der Projektlaufzeit werden 234 m<sup>3</sup> respektive 10'300 kWh<sup>3</sup> verbraucht. Bezogen auf die EBF entspricht dieser Wert einem spezifischen Warmwasserverbrauch von 15 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Den Verlauf der monatlichen Warmwasserverbrauchswerte über die Gesamtlaufzeit zeigt Abbildung 15.

Im ersten und zweiten Betriebsjahr ist ein Jahresgang mit niedrigen Verbrauchswerten im Sommer und höheren Werten im Winter erkennbar. Im September 2013 steigt der Warmwasserverbrauch sprunghaft an und pegelt sich in den nachfolgenden Monaten auf hohem Niveau ein. Im Vergleich der monatlichen Verbrauchswerte mit den im Energieinformationssystem hinterlegten Werten ist die Überschreitung der Monatsvorgabe der Regelfall. Lediglich die Warmwasserverbräuche der EG-Wohnung liegen in der Nähe des Referenzwertes.

Verglichen mit dem Planwert gemäss SIA 380/1 (20.8 kWh/(m<sup>2</sup>a)) respektive 17'200 kWh für 31 Monate und 320 m<sup>2</sup> EBF) ergibt sich ein Minderverbrauch von etwa 7'000 kWh. Dies ist auf die geringe Mieterbelegung (80 m<sup>2</sup> pro Person) des Gebäudes zurückzuführen.

---

<sup>3</sup> Basierend auf einer Warmwassertemperatur von 50 °C

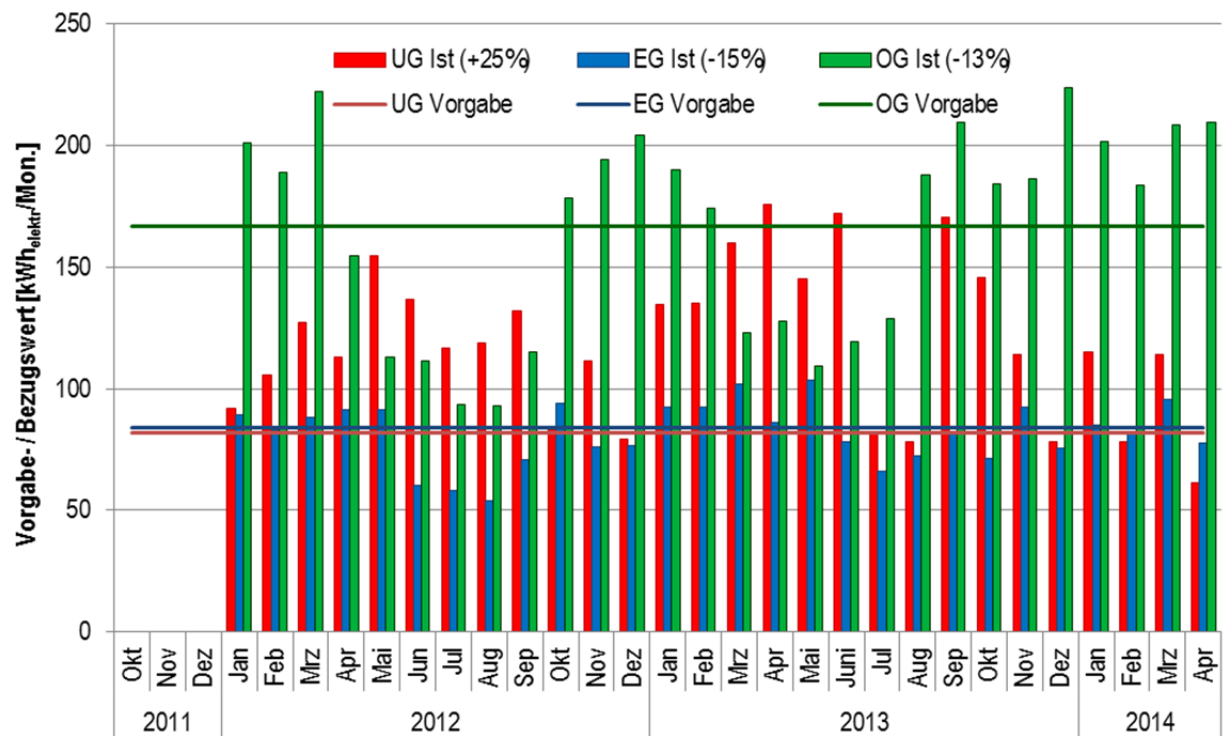


Abbildung 15: Die monatlichen Warmwasserverbrauchswerte des Gebäudes zwischen Oktober 2011 und April 2014.

#### Warmwasserverbrauch Winter 2013/2014

Die Tabelle 4 führt den Warmwasserverbrauch im Winter 2013/2014 auf und stellt sie den Werten der beiden vorangegangenen Betriebsjahre gegenüber.

Tabelle 4: Der Warmwasserverbrauch im Winter 2013/2014, Vergleich mit dem 1. und 2. BJ:

|                                           | 3.BJ <sup>4</sup> | Veränderung gegenüber |               |
|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------|
|                                           |                   | 2. BJ                 | 1.BJ          |
| Warmwasserverbrauch [kWh]                 | 2'690             | +100 (+2%)            | +1'100 (+32%) |
| Flächengewichtet [kWh/(m <sup>2</sup> a)] | 14.4 <sup>5</sup> | +0.3                  | +3.7          |

Der Warmwasserverbrauch im 3.BJ entspricht etwa dem Verbrauch des 2. BJ. Gegenüber dem 1. BJ ist ein deutlicher Anstieg erkennbar. Dies ist auf den am September 2013 ansteigenden Warmwasserverbrauch in der OG-Wohnung zurückzuführen.

<sup>4</sup> Der Warmwasserverbrauch des 3. BJ wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit vorangegangenen Betriebsjahren auf 12 Monate hochgerechnet.

<sup>5</sup> Bezogen auf 320 m<sup>2</sup> EBF, hochgerechnet auf 12 Monate

### 3.3. Arbeitszahlen

Basierend aus Ein-Tages-Werten des Heizwärmebezugs, Warmwasserverbrauch sowie des Elektrizitätsbezugs für Heizwärmeproduktion und Warmwassererzeugung werden die Arbeitszahlen für den Warmwasser- und den Heizbetrieb berechnet. Die Werte des Heizwärmebezugs und Warmwasserverbrauchs werden zur Vereinfachung und zur Reduktion des Messfehlers bereinigt. Alle Heizwärmebezugswerte kleiner  $10 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{d}$  sowie alle Warmwasserverbrauchswerte kleiner  $1.4 \text{ kWh}_{\text{therm}}/\text{d}$  (entspricht  $0.03 \text{ m}^3$ ) werden für die Berechnung der Arbeitszahlen nicht berücksichtigt. Die Betriebsweisen der Wärmepumpe werden in „Nachfragegeführt“ und „Optimiert“ unterschieden. Sie sind wie folgt charakterisiert:

|                  |                                                                                                                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nachfragegeführt | Die Rücklauftemperatur der Fussbodenheizung oder Temperatur im Warmwasserspeicher bestimmen den Betriebszeitpunkt der Wärmepumpe                                      |
| Optimiert        | Der Betriebszeitraum zur Heizwärme- und Warmwassererzeugung ist so auf die Tagesstunden beschränkt, dass eine hohe Übereinstimmung mit den PV-Ertragszeiten herrscht. |

Aus den Betriebsweisen und den gewählten initialen Nutzenergiemengen ergeben sich 309 Wertepaare für den nachfragegeführten Heizwärmebetrieb und für den nachfragegeführten Warmwasserbetrieb 168 Wertepaare. Im optimierten Betrieb können 285 Wertepaare für Heizwärme und 664 Wertepaare für Warmwasser genutzt werden.

Es wird geprüft, ob sich die Betriebsweisen des Warmwasser- und Heizbetriebs auf die Arbeitszahlen auswirken. Dafür werden die Nutz- und Betriebsenergiemengen der jeweiligen Betriebsweise über die Anzahl Wertepaare aufsummiert und zu einer mittleren Arbeitszahl verrechnet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Die Arbeitszahlen der Wärmepumpe bei nachfragegeführten und optimierten Betrieb.

|                         | Nachfragegeführter Betrieb          |                                      | Optimierter Betrieb                 |                                      |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                         | Arbeitszahl<br>Heizwärme<br>(n=309) | Arbeitszahl<br>Warmwasser<br>(n=168) | Arbeitszahl<br>Heizwärme<br>(n=285) | Arbeitszahl<br>Warmwasser<br>(n=664) |
| Mittlere<br>Arbeitszahl | 3.8                                 | 3.6                                  | 4.9                                 | 3.9                                  |

Die Optimierung der Betriebszeiten ergibt gegenüber dem nachfragegeführten Betrieb erkennbar höhere Arbeitszahlen sowohl im Heiz- als auch im Warmwasserbetrieb. Dies ist auf längere zusammenhängende Betriebszeiten und die reduzierte Zahl der Kompressorstarts zurückzuführen. Der Energiebezug der Wärmepumpe nimmt dadurch insgesamt ab.

### 3.4. Elektromobilität

Seit April 2012 steht ein Elektroauto kontinuierlich zur Verfügung. Das Fahrzeug wird ausschliesslich vom Gebäudeeigentümer genutzt, der nicht im Gebäude wohnt. Zwischen April 2012 und April 2014 werden etwa 34'000 km zurückgelegt, was in etwa der durchschnittlichen Fahrleistung aller Schweizer Personenfahrzeuge in einem vergleichbar langen Zeitraum entspricht [10].

Abbildung 16 zeigt den monatlichen Elektrizitätsbezug sowie die Anzahl der Ladezyklen pro Monat über den gesamten Projektzeitraum. In Abbildung 17 werden die monatlichen Fahrstrecken und der distanzbezogene Stromverbrauch des Elektroautos abgebildet. Die gestörte Messwerterfassung lässt für die Monate Juli bis September keine Bestimmung der Ladezyklen zu.

Für das Aufladen des Fahrzeugakkus werden insgesamt 7'127 kWh Elektrizität in 640 Ladezyklen bezogen. Die monatlich zurückgelegte Fahrstrecke liegt zwischen 600 km und 2'250 km. Gemittelt über den Projektzeitraum liegt sie bei 1'350 km. In den Sommermonaten werden pro Monat mehr Kilometer zurückgelegt, als im Winter. Pro Zyklus werden im Mittel 9.2 kWh Elektrizität in den Fahrzeugakku geladen. Der mittlere distanzbezogene Stromverbrauch liegt bei 21.1 kWh/100 km. Es ist zu beobachten, dass der distanzbezogene Stromverbrauch in den Wintermonaten etwa doppelt so hoch ausfällt, wie in den Sommermonaten. Dies ist vor allem auf die Beheizung des Fahrzeugs und die in der dunklen Jahreszeit häufigeren Fahrten mit Licht zurückzuführen.

Die Analyse der Bezugslastgänge zeigt, dass sich die Ladezeitpunkte im Laufe des Projekts zunehmend in die Abend- und Nachtstunden verschieben. Eine genauere Erläuterung der Auswirkungen auf den Bezugslastgang ist in Kapitel 3.8.1 zu finden. Dies wirkt sich auf den Lastgang des Elektrizitätsbezugs des Gebäudes aus und verringert den Anteil des selbst nutzbaren PV-Ertrags. Auf den Einfluss des Elektroautos auf den Eigenverbrauch und die Gleichzeitigkeit wird in Kapitel 3.8.2 näher eingegangen.

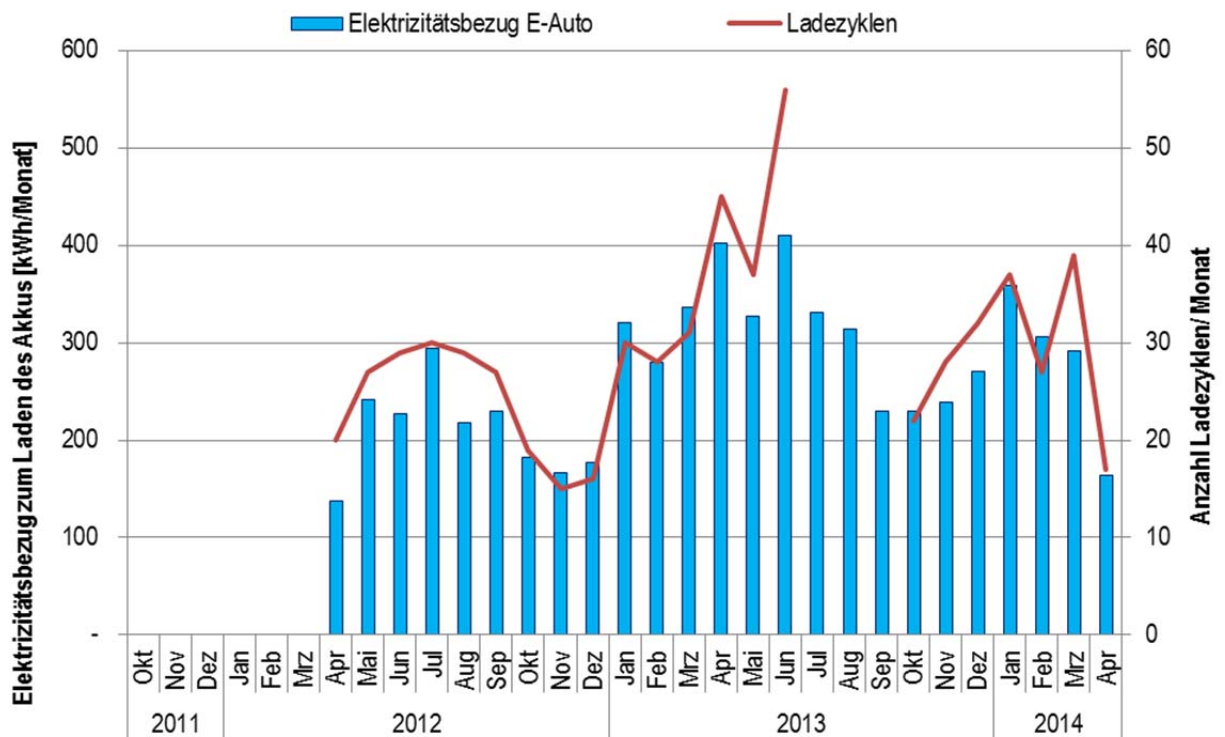


Abbildung 16: Der Elektrizitätsbezug und die Anzahl der Ladezyklen des Elektroautos im Zeitraum zwischen Oktober 2011 und April 2014.

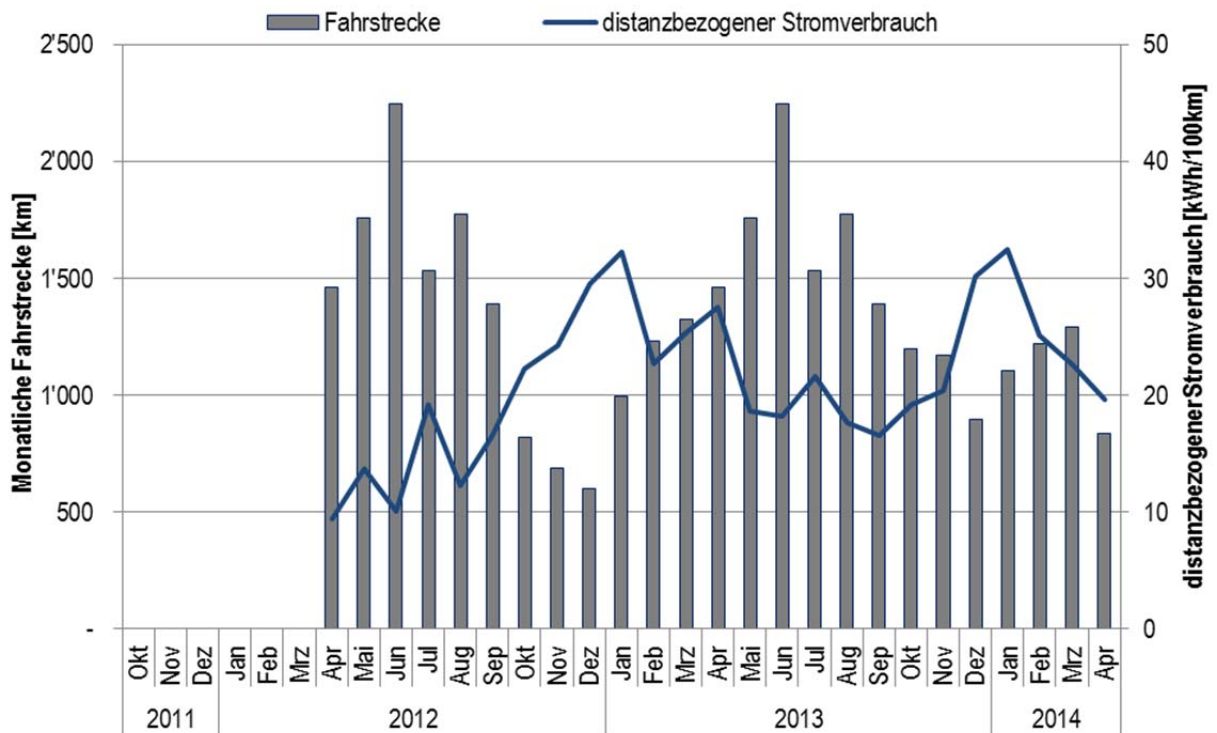


Abbildung 17: Die monatlichen Fahrstrecken und der distanzbezogene Stromverbrauch des Elektroautos im Zeitraum zwischen Oktober 2011 und April 2014.

### 3.5. Konventionelle Mobilität

Die Hausbewohner benutzen fünf konventionelle Personenfahrzeuge. Die Nutzung dieser Fahrzeuge wurde durch die Abfrage der jährlich zurückgelegten Fahrstrecken dokumentiert. Seit Juli 2012 summiert sich die zurückgelegte Gesamtstrecke auf etwa 153'000 km. Die jährlichen Fahrstrecken der einzelnen Fahrzeuge bewegen sich im Bereich von 5'000 bis 23'000 km/a.

### 3.6. Möglichkeiten zur Lastverschiebung [2]

Um die Gleichzeitigkeit von Verbrauch und PV-Ertrag zu erhöhen, wird auf Grundlage der ersten Heizperiode 2011/2012 evaluiert, welche Verbraucher ohne Komforteinbusse für die Nutzer aus den Abend- und Nachtstunden in die Tagesstunden verlegt werden können. Die Analyse zeigt, dass für den betrachteten Zeitraum zwischen 10-16 Uhr mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Synchronisation von Erzeugung und Bezug hergestellt werden kann. Zwischen Oktober 2011 – April 2012 wurden 7'284 kWh von der PV-Anlage erzeugt. Der Elektrizitätsverbrauch aller Verbraucher im Gebäude zwischen 10-16 Uhr beläuft sich auf 2'091 kWh, was einer Eigendeckungsrate von 25% entspricht.

Die grössten Einzelverbraucher, für welche separate Daten vorliegen, werden für eine mögliche Lastverschiebung bestimmt; dies sind die Wärmepumpe, die Geschirrspülmaschinen und das Elektroauto (Abbildung 18). Ihre ausserhalb des Zeitraums zwischen 10-16 Uhr bezogene Elektrizität kann als Verschiebepotenzial betrachtet werden. Mit 2'574 kWh beträgt ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch 31 %. Könnte der Betrieb dieser Verbraucher in die Tagesstunden verschoben werden, könnte sich die Eigendeckungsrate auf rund 62% erhöhen lassen. Das Verschiebepotenzial aus dem Zeitraum 16-10 Uhr setzt sich wie folgt zusammen:

- 2'194 kWh (26.5 % des Gesamtverbrauchs) entfallen auf die Wärmepumpe,
- 185 kWh (2.2 % des Gesamtverbrauchs) auf den Betrieb der Geschirrspüler,
- 195 kWh (2.4 % des Gesamtverbrauchs) werden zur Ladung der Akkumulatoren des Elektromobils eingesetzt (ab März 2012).

Die Wärmepumpe weist mit Abstand den höchsten Verbrauch auf. Die Verschiebung der Laufzeit der Wärmepumpe in die Tagesstunden ist die effektivste Massnahme, dies sich ohne technischen Mehraufwand umsetzen lässt. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass die Nutzer nicht in ihrer Handlungsfreiheit eingeschränkt werden.

Die Lastverschiebung der Spülmaschinen auf die Tagesstunden bietet einerseits nur ein sehr geringes Verschiebepotential und ist zudem (ohne Massnahmen an den Geräten) von einem aktiven Handeln der Nutzer abhängig. Trotzdem wurden die Mieter aufgefordert, mehr in den Tagesstunden zu spülen.

Die Verschiebung der Ladezeiten des Elektroautos in die Tagesstunden erhöht den Eigenverbrauch ebenfalls geringfügig (siehe Kapitel 3.8.2). Die Einschränkungen im Gebrauch des Fahrzeuges sind jedoch erheblich.

Somit ist die Wärmepumpe der einzige Verbraucher, der sowohl ein grosses Potential als auch eine geringe Beeinflussung der Nutzer aufweist. Bei optimaler Anpassung der Laufzeit der Wärmepumpe an den PV-Ertrag kann eine Eigendeckungsrate von bis zu 58% erreicht werden. Neben der Verschiebung der Betriebszeiten wäre die Einbindung eines Kurzzeit-Elektrizitätsspeichers in die Wärmepumpe denkbar. Damit könnten einerseits kurzzeitige Defizite bei PV-Ertrag ausgeglichen und die Wärmepumpe betrieben werden, wenn die momentane PV-Ertragsleistung nicht vollständig ausreicht. Ebenfalls wäre es möglich, den Kurzzeit-Elektrizitätsspeicher zur Versorgung der Verteil- und Umwälzpumpe während der Abend- und Nachtstunden einzusetzen. Der Einsatz eines Elektrizitätsspeichers wird in diesem Projekt nicht betrachtet.

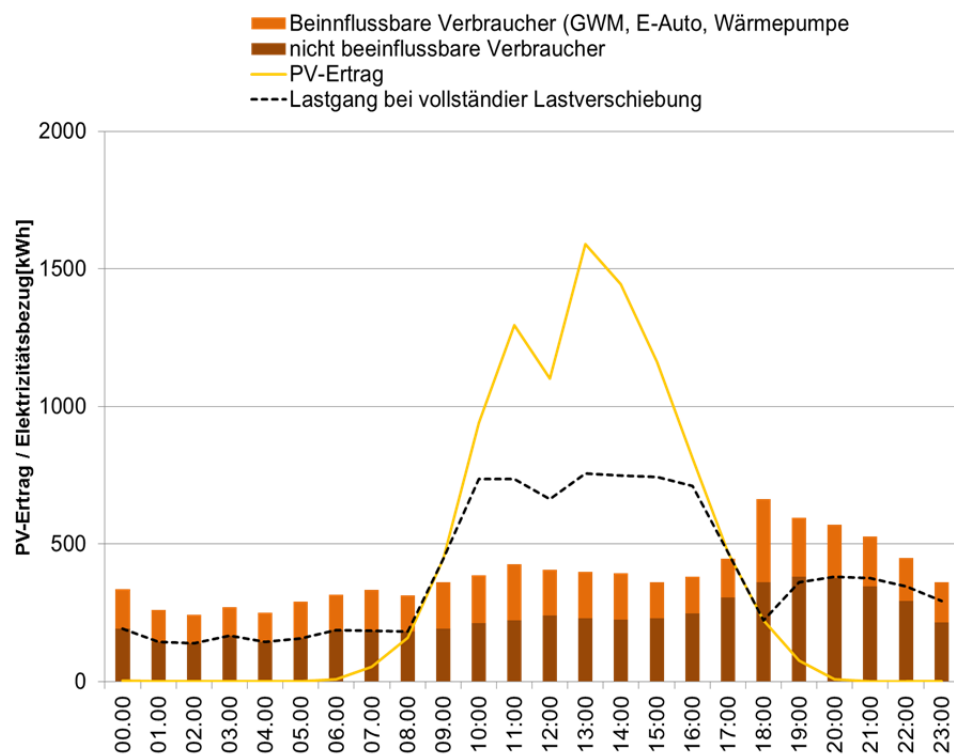


Abbildung 18: Mittlerer Tagesgang der PV-Erzeugung und des Elektrizitätsverbrauchs mit und ohne Lastverschiebung (Oktober 2011-April 2012).

### 3.7. Zeitlich begrenzter Wärmepumpenbetrieb

#### 3.7.1. Heizung

Die Laufzeit der Wärmepumpe für den Heizbetrieb ist in der ersten Heizperiode nicht eingeschränkt (hellblaue Linie, Abbildung 19 links). Im Herbst 2012 wird sie so eingestellt, dass sie nur zu Zeiten des günstigen Stromniedertarifs läuft (hellblaue Linie, Abbildung 19 rechts). Um den Eigenverbrauch zu erhöhen, wird die Laufzeit der Wärmepumpe für den Heizbetrieb ab dem 08.02.2013 auf die Tagesstunden 10-19 Uhr beschränkt (dunkelblaue Linie, Abbildung 19, rechts). Eine Beschränkung von 10-16 Uhr wurde nicht realisiert, da der Gebäudeeigentümer Bedenken hat, dass der kurze Zeitraum nicht ausreichend ist, um ausreichend Heizwärme zur Verfügung zu stellen.

#### 3.7.2. Warmwasserbetrieb

Ebenfalls ist die Laufzeit der Wärmepumpe für den Warmwasserbetrieb in der ersten Heizperiode nicht eingeschränkt (rote Linie, Abbildung 19 links). Sie wird ab dem 09.05.2012 auf 11-17 Uhr und ab dem 21.07.2012 auf 13-17 Uhr limitiert (rote Linie, Abbildung 19 rechts). Es ist zu beobachten, dass eine tägliche Betriebsdauer zwischen 30-120 min ausreicht, um den Warmwasserbedarf eines Tages zu decken. Im Mittel läuft die Wärmepumpe ca. eine Stunde am Tag. Während dieser Betriebszeit wird der Warmwasserspeicher (800 L) auf 50 °C erwärmt. Dazu werden durchschnittlich 3.2 kWh Elektrizität pro Tag aufgewendet. Trotz zeitlicher Limitierung ist die Warmwasserversorgung sichergestellt.

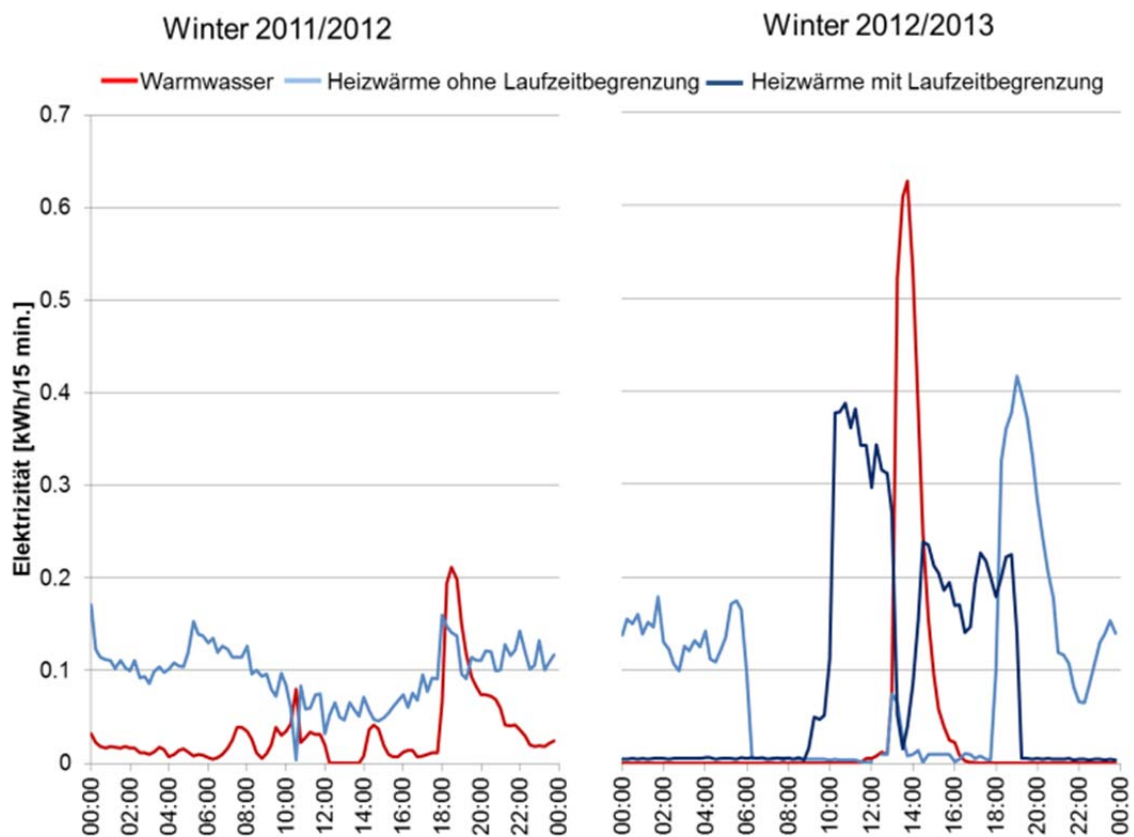


Abbildung 19: Der mittlere 15-min Energieverbrauch der Wärmepumpe im Heizungs- und Warmwasserbetrieb im Tagesverlauf bei wärmegeführten (links) und bei zeitlich begrenztem Betrieb (rechts) [11].

### 3.7.3. Temperaturverhalten

Der Einfluss der zeitlich begrenzten Heizwärmeproduktion auf den Tagesgang der Raumlufttemperaturen ist gering aber messbar.

Abbildung 20 zeigt die Raumlufttemperaturen exemplarisch für den Zeitraum 27.11.2013 bis 10.12.2013. Dieser Zeitraum ist die kälteste Periode im Winter 2013/2014 (minimal  $-5^{\circ}\text{C}$ ) und weist einen hohen Heizwärmebezug auf. Im Verlauf eines Tages steigen die Raumlufttemperaturen in allen drei Wohnungen an, sobald die Heizwärmeproduktion beginnt. Nach dem Abschalten der Wärmepumpe am Abend sinken die Raumlufttemperaturen wieder ab. Die dabei eintretenden Temperaturschwankungen erreichen maximal 1.5 K. Die Raumlufttemperatur der „kältesten“ Wohnung sinkt nur selten unter  $21^{\circ}\text{C}$  ab. Wie stark der Temperaturabfall durch die manuelle Fensterlüftung beeinflusst wird, ist nicht bekannt. Die sporadischen Temperaturrückgänge in der EG-Wohnung lassen die Annahme zu, dass trotz Lüftungsanlage Fenster und Türen manuell zum Lüften – wenn auch nur kurzzeitig – geöffnet werden und somit ein Teil der Temperaturreduktion darauf zurückzuführen ist.

Insgesamt zeigt sich, dass die auf die Tagesstunden beschränkte Laufzeit auch bei tiefen Aussenlufttemperaturen ausreicht, um einen hohen thermischen Komfort sicherzustellen. Die gewährleisteten Raumtemperaturen liegen dabei deutlich über der Auslegungstemperatur ( $20^{\circ}\text{C}$ ) gemäss SIA 380/1.

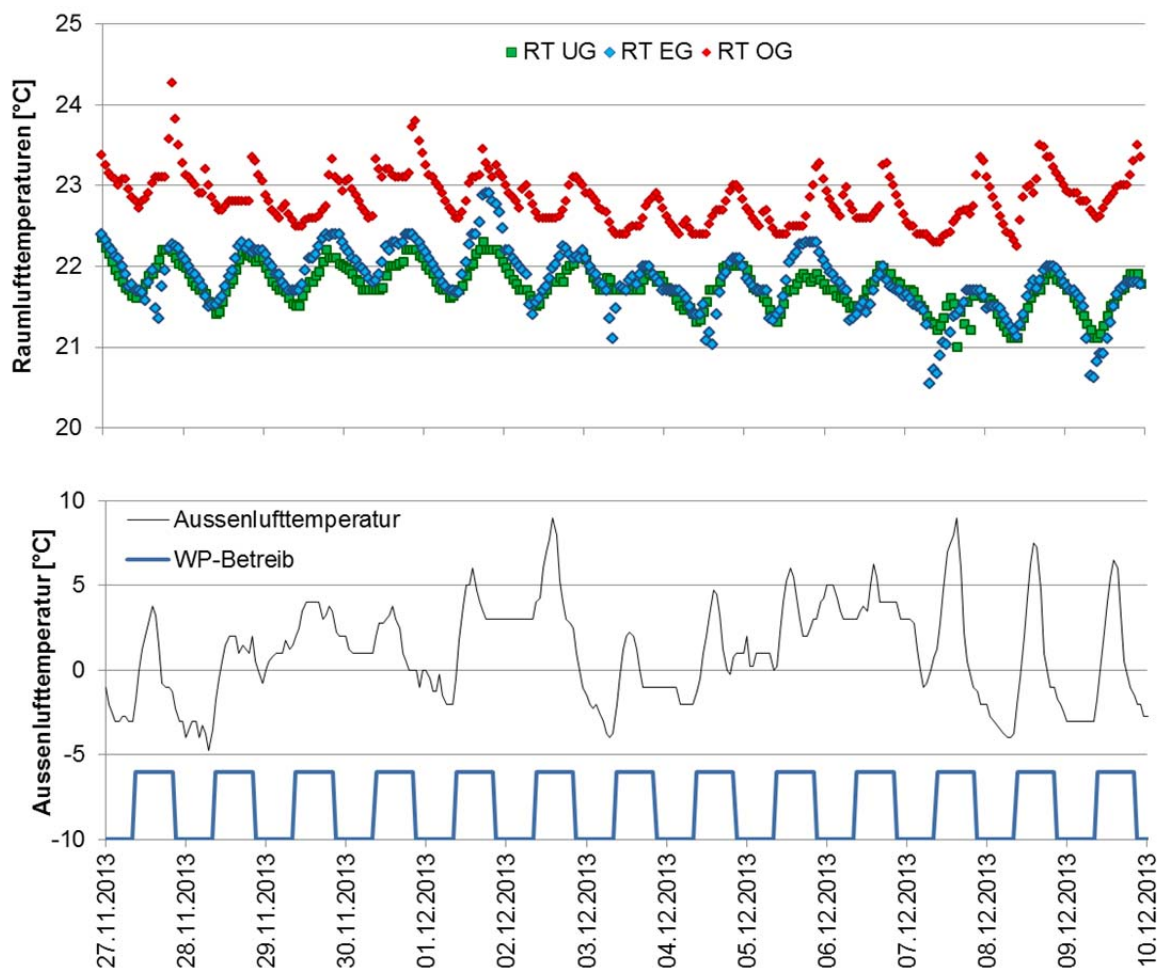


Abbildung 20: Das Verhalten der Raumlufttemperaturen „Wohnen“ für die drei Wohnungen bei zeitlich begrenztem Wärmepumpenbetrieb (Stundenmittelwerte).

### 3.7.4. Reduktion des Elektrizitätsbezugs aus dem Netz

Wie bereits am Beispiel der Heizperiode 2011/2012 abgeschätzt, kann die bessere Anpassung der Wärmepumpenlaufzeit an die PV-Ertragszeiten zur Erhöhung des Eigenverbrauchs und zur Verminderung des Elektrizitätsbezugs aus dem Netz führen.

Um die Wirkungsweise der Verschiebung der Wärmepumpe in die Tagesstunden zu evaluieren, wird das Elektroauto aus der Bilanz herausgenommen und die erste, zweite und dritte Heizperiode miteinander verglichen (Tabelle 6). Durch die Laufzeitbegrenzung konnte in der dritten Heizperiode gegenüber der ersten Heizperiode eine Steigerung des Eigenverbrauchs um etwa 1'000 kWh erzielt werden. Die Eigendeckungsrate steigt dadurch von 21% auf 34%.

Tabelle 6: Vergleich des Gesamt- und Eigenverbrauchs der ersten, zweiten und dritten Heizperiode (ohne Elektromobilität).

|                         | 1. Heizperiode<br>01.10.11-30.04.12 | 2. Heizperiode <sup>6</sup><br>01.10.12-30.04.13 | 3. Heizperiode<br>01.10.13-30.04.14 |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Gesamtverbrauch [kWh]   | 7'689                               | 7'327 (-5%)                                      | 7'892 (+3%)                         |
| Eigenverbrauch [kWh]    | 1'635                               | 1'882 (+15%)                                     | 2'682 (+64%)                        |
| Eigendeckungsrate [kWh] | 21%                                 | 26%                                              | 34%                                 |

## 3.8. Netzverhalten

### 3.8.1. Netzeinspeisung, Netzbezug, Eigenverbrauch

Die Einspeisung in das Stromnetz ist vom PV-Ertrag und von dem momentanen Eigenverbrauch im Gebäude abhängig. In Abbildung 21 ist der gemittelte stundenspezifische Verlauf des PV-Ertrags und der Einspeisung dargestellt. Aus Gleichung 7 ist ersichtlich, dass die Differenz zwischen PV-Ertrag und Netzeinspeisung der Eigenverbrauch ist. Ab Sommer 2012 ist im Lastgangprofil ein Absinken der Einspeisung während der Mittagszeit erkennbar, obwohl dies der Zeitraum mit der höchsten Einstrahlung ist. Dieser Rückgang ist, mit geringerer Ausprägung, auch in den Winterperioden 2012/2013 und 2013/2014 sichtbar. Die Ursache hierfür liegt im zeitlich begrenzten Wärmepumpenbetrieb für die Warmwasserbereitung. Diese Regelstrategie wirkt wie eine lastbeschränkte Ladesteuerung eines Batteriespeichers. Dadurch wird in den Mittagsstunden die Netzeinspeisespitze reduziert (peak shaving), wie es für die netzdienliche Betriebsführung eines Batteriespeichers empfohlen wird [12].

---

<sup>6</sup> Laufzeitbegrenzung WW-Betrieb seit Mai 2012, HZ-Betrieb seit Februar 2013, siehe Kapitel 3.7.1

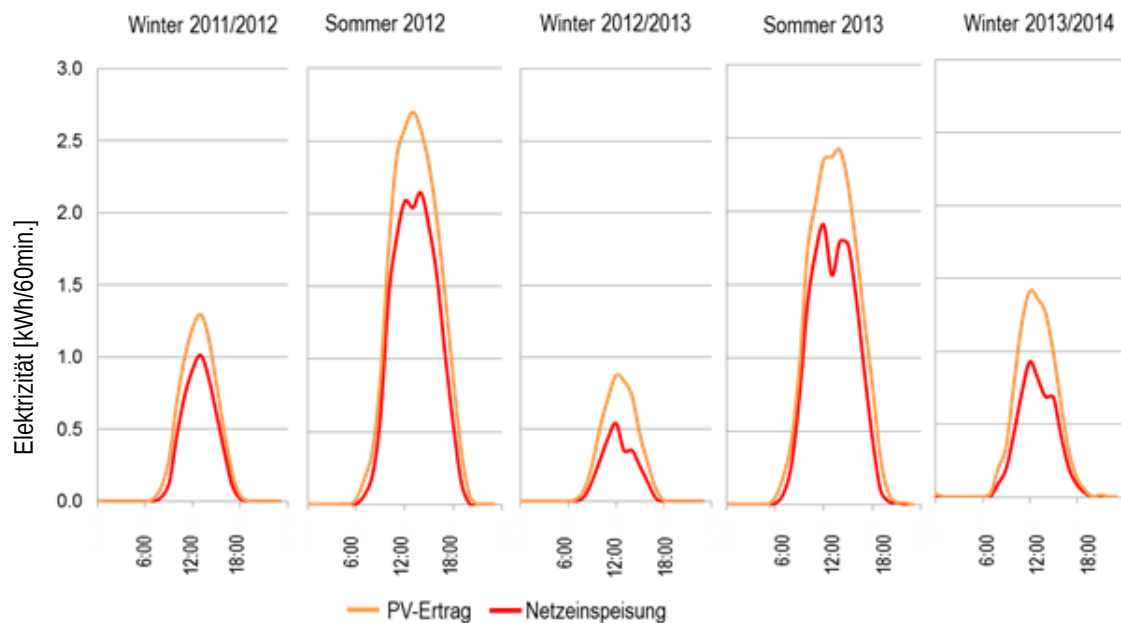


Abbildung 21: Lastgangprofile aus gemittelten stündlichen Werten für den PV-Ertrag und die Netzeinspeisung.

Die Lastgangprofile des Netzbezugs, des Gesamtbezugs sowie des Eigenverbrauchs sind in Abbildung 22 dargestellt. Es gibt jeweils mittags und abends ein Bezugsmaximum. Das Bezugsmaximum am Abend fällt im Sommer deutlich geringer aus, als im Winter. Im Sommer kann Eigenverbrauch im Mittel zwischen 6-20 Uhr, im Winter zwischen 9-16 Uhr realisiert werden. Im Winter ist der Netzbezug höher, als im Sommer. Die Ursache hierfür liegt sowohl bei dem geringeren PV-Ertrag als auch bei dem erhöhten Elektrizitätsverbrauch.

Ein Grossteil des Elektrizitätsverbrauchs im Gebäude wird während der Sommermonate im Zeitraum zwischen 6-20 Uhr durch den PV-Ertrag gedeckt (Basis: Stundenwerte). Somit wird der Netzbezug stark reduziert. Die beiden Mittagsspitzen im Sommer 2012 des Gesamtbezugs bzw. des Eigenverbrauchs resultieren aus den verschobenen Zeitpunkten der Warmwasserbereitung (siehe Kapitel 3.7.2).

Seit Winter 2012/2013 ist ein auffälliges Maximum zur Mittagszeit erkennbar, welches auf die zeitlich begrenzte Warmwassererzeugung zurückzuführen ist. Das Abendmaximum resultiert zum einen aus den Aktivitäten der Nutzer und zum anderen durch das Aufladen des Elektroautos. Die kleine Bezugsspitze um Mitternacht ist durch das Laden des Elektroautos bedingt. Der steile Anstieg des Gesamtbezugs in den Morgenstunden in den Winterperioden 2012/2013 und 2013/2014 ist eine Folge der Restriktion der Wärmepumpenlaufzeit für den Heizbetrieb.

Die modifizierte Betriebsstrategie für die Wärmepumpe führt zu einem hohen Eigenverbrauch, geringem Netzbezug und einer reduzierten Netzeinspeisung in den Mittagsstunden. Damit sinkt die Netzbelastung. Bei ungünstigen Wetterbedingungen führt die Strategie aber auch zu Netzbezugsspitzen in der Mittagszeit. Eine (zusätzlich) solargeführte Regelung der Wärmepumpe könnte hier Abhilfe schaffen.

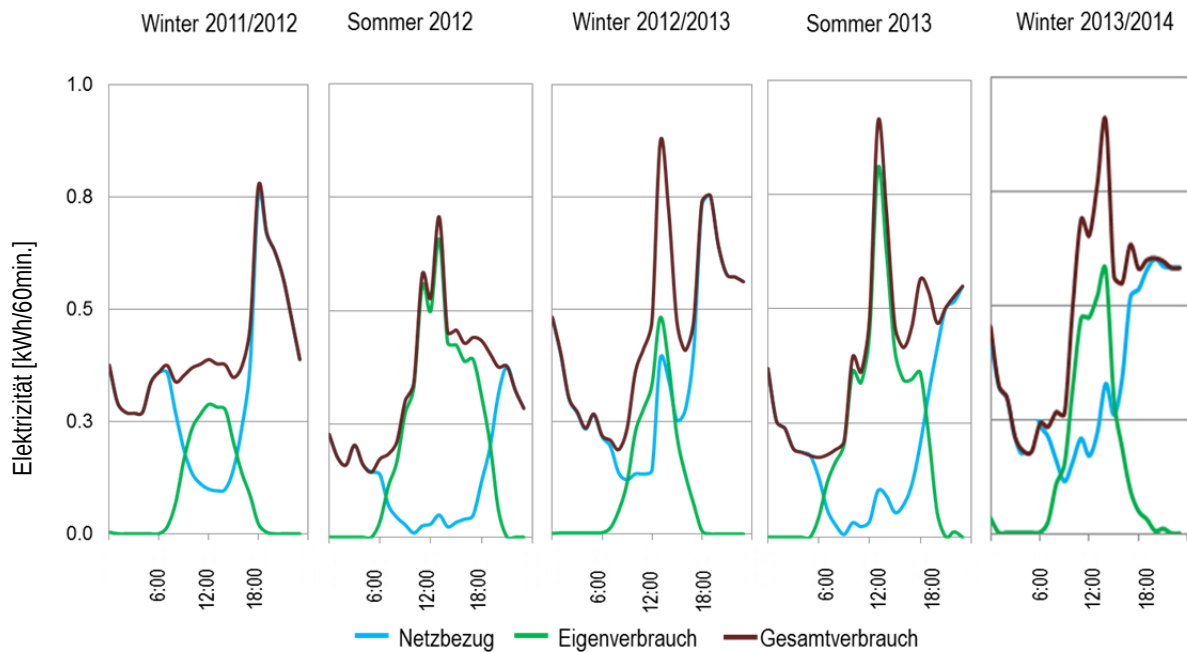


Abbildung 22: Lastgangprofile der gemittelten Ein-Stunden-Werte des Netzbezugs, des Gesamtbezugs und des Eigenverbrauchs.

Der Lastgang des Gesamtverbrauchs setzt sich aus fünf Hauptverbrauchern im Gebäude – dem Allgemeinstrom, der Lüftungsanlage, der Wärmepumpe, dem Strombezug der Wohnungen und dem Elektroauto – zusammen. Abbildung 23 zeigt die auf Stundenwerte gemittelten Energieverbräuche für die fünf Perioden von Winter 2011/2012 bis Winter 2013/2014. Die Laufzeitbeschränkung der Wärmepumpe und die vermehrte Nutzung des Elektroautos sind deutlich im Lastprofil des Gebäudes zu erkennen. Der Elektrizitätsverbrauch für die mechanische Komfortlüftungsanlage und den Allgemeinstrom bildet eine konstante Grundlast über das Jahr.

Der Verbrauch in den Wohnungen weist in allen Perioden einen Tagesgang auf, der morgens gegen 4 Uhr ein Minimum und gegen 20 Uhr ein Maximum erreicht. Das Profil zeigt deutlich, dass die Mieter hauptsächlich in den Abendstunden aktiv sind.

Im Winter 2011/2012 stand das Elektroauto erst ab März zur Verfügung und wurde hauptsächlich in den Tagesstunden geladen. Der Strombezug des Elektroautos verschiebt sich von fast ausschliesslichen Ladezeiten in den Tagesstunden (Sommer 2012) immer mehr in die Abend- und Nachtstunden (Winter 2012/2013, Winter 2013/2014). Im Sommer 2013 wird zusätzlich wieder verstärkt am Mittag geladen. Prinzipiell wird das Elektroauto im Sommer mehr geladen, als im Winter, da das Elektroauto im Sommer häufiger als im Winter genutzt wird. Im Winter ist die Reichweite infolge des Betriebs z.B. der Heizung, dem Scheibenwischer oder der Lüftung geringer. Der Nutzer nimmt im Winter vermehrt den öffentlichen Verkehr und einen konventionellen Dienstwagen in Anspruch.

Im Winter 2011/2012 lief die Wärmepumpe für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser nach Bedarf. Dies führt zu einem Mittags- und Abendmaximum sowie zu einer kontinuierlichen Heizphase während der frühen Morgenstunden. Ab Sommer 2012 führt die Laufzeitbegrenzung der Wärmepumpe für Warmwasser zu einem charakteristischen grossen Mittagsmaximum zwischen 12-16 Uhr.

Im Winter 2012/2013 wird die Heizwärme in den Abend- und Nachtstunden zwischen 18-8 Uhr zur Verfügung gestellt (Niedertarif), was zu einer Bezugsspitze zwischen 18-20 Uhr führt. Mit der Verschiebung der Laufzeit in die Tagesstunden (ab Februar 2013) wird die Heizwärme zwischen 10-19 Uhr erzeugt. In den übrigen Stunden läuft nur die Umwälzpumpe. Im Sommer 2013 sind noch geringe Heizphasen in den Morgen- und Nachmittagsstunden zu sehen, welche auf den kühlen Mai 2013 zurückzuführen sind. Der Lastgang im Winter 2013/2014 zeigt eine weitere zeitliche Konzentration des Wärmepumpenbetriebs in den Mittagstunden.

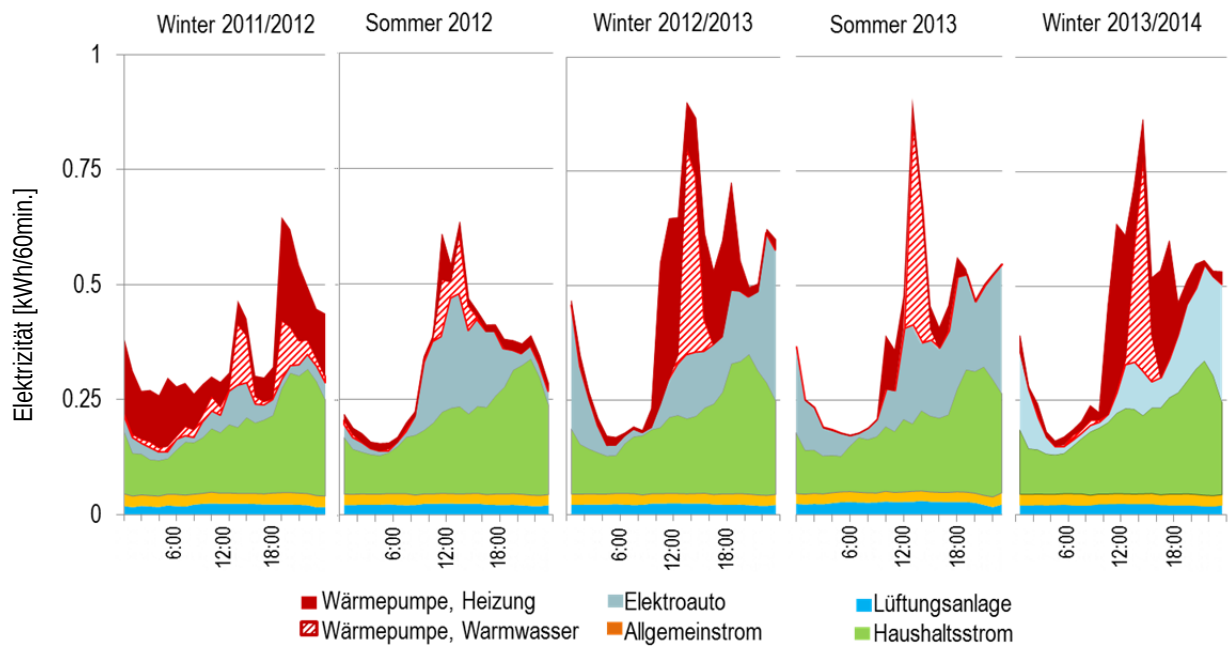


Abbildung 23: Die auf Stundenwerte gemittelten Energieverbräuche für einzelne Verbraucher für fünf Perioden.

### 3.8.2. Eigendeckungsrate und Gleichzeitigkeit

Die Abbildung 24 stellt die Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsdaten mit und ohne Berücksichtigung des Elektrizitätsbezugs des Elektroautos für den Zeitraum zwischen Oktober 2011 und April 2014 dar. Die Berechnungen erfolgten auf Basis der 15-Minuten-Werte. Diese Berechnungen konnten im Projektzeitraum für 829 Tage (19'896 Stunden, ca. 79'740 15-Minuten-Zeiträume) durchgeführt werden. An den verbleibenden 113 Tagen war die Messdatenerfassung gestört, wodurch keine Berechnungen möglich waren (siehe Kapitel 2.4). Die entsprechenden Zeiträume sind in der Abbildung 24 durch graue Felder hinterlegt. Die ermittelten Kennzahlen sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Der Einfluss des Elektroautos auf den Eigenverbrauch in Relation zum Gesamtelektrizitätsbezug und zum PV-Ertrag:

|                           |       | ohne Berücksichtigung des Elektroautos | mit Berücksichtigung des Elektroautos |
|---------------------------|-------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| PV-Ertrag,                | [kWh] | 36'975                                 | 36'975                                |
| Eigenverbrauch,           | [kWh] | 9'035                                  | 10'147                                |
| Gesamtelektrizitätsbezug, | [kWh] | 26'113                                 | 31'659                                |
| Eigendeckungsrate,        | [%]   | 34                                     | 32                                    |
| Eigennutzungsrate,        | [%]   | 24                                     | 27                                    |

Sowohl bei Einbezug des Elektroautos, als bei Vernachlässigung der entsprechenden Energiemengen, zeigen sich Eigendeckungsdaten, die im Vergleich zu anderen Nullenergiebauten (z.B. Effizienzhaus Plus, Berlin: EDR zwischen 15 und 25%) hoch ausfallen [13], [14]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass durch die getroffenen Massnahmen

bereits ein Maximum an solarer Deckung des Elektrizitätsverbrauchs erreicht wird und nur durch den Einsatz eines Elektrizitätsspeichers weiter gesteigert werden kann.

Die Ergebnisse der Eigendeckungs- und Eigennutzungsberechnungen sind abhängig von der gewählten zeitlichen Auflösung der diskreten Bilanzierungszeitschritte. Üblicherweise wird die Energiebilanz eines Gebäudes für den Bilanzzeitraum von einem Jahr als Netto-Jahresbilanz bestimmt. Für detaillierte Eigendeckungs- und Eigennutzungsberechnungen hat sich ein Bilanzierungszeitschritt von einer Stunde als geeignet erwiesen [11], [3]. Für die Gesamtdauer des Projektes werden Eigendeckungs- und Eigennutzungsraten mit und ohne Berücksichtigung des Elektrizitätsbezugs des Elektroautos berechnet (Abbildung 24).

Die Eigendeckungsrate bildet in Abhängigkeit des solaren Strahlungsangebots einen synchronen Jahresverlauf aus. Im Winter deckt der PV-Ertrag nur einen geringen Teil des Stromverbrauchs, daraus resultieren geringe Eigendeckungsraten von bis zu 10%. Im Sommer, bei hohem PV-Ertrag können bis zu 63% des monatlichen Stromverbrauchs gedeckt werden.

Erwartungsgemäss sind die Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsrate gegenläufig. Da die PV-Anlage des Gebäudes sehr gross dimensioniert ist, und der PV-Jahresertrag grösser als der Gesamtverbrauch ausfällt, kann im Sommer nur ein Teil des PV-Ertrags genutzt werden. Dies führt zu niedrigen Eigenverbrauchsrate zwischen 10 bis 20%. Auch kann während der strahlungsarmen Zeit nicht der gesamte PV-Ertrag im Gebäude selbst genutzt werden. Dadurch verharrt die Eigenverbrauchsrate in den Wintermonaten unterhalb des 100%-Wertes.

Der Einfluss des Elektrizitätsbezuges für das Elektroauto auf die Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsrate divergiert über die Projektdauer. Während die zum Laden des Fahrzeuges bezogene Elektrizitätsmenge zwischen April und September 2012 zu einer Steigerung der Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsrate führt, ist im weiteren Projektverlauf ein gegenteiliger Einfluss erkennbar. Ab Februar 2013 bleiben die Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsrate bei Einbezug des Elektroautos in die Kalkulation hinter den Werten zurück, die sich ergeben, wenn der Elektrizitätsbezug des Elektroautos unberücksichtigt bleibt. Dieser Fakt stützt die bereits in Kapitel 3.4 festgestellte Tatsache und zeigt, dass sich das Elektroauto negativ auf die Gleichzeitigkeit und die Energiebilanz des Hauses auswirkt.

Das zeitlich hoch aufgelöste Energiedatensystem ermöglicht die Berechnung der Eigendeckungsraten in 15-minütigen Zeitschritten. Diese Werte werden, in verschiedene Klassen zusammengefasst und farblich gekennzeichnet (Abbildung 25). Viertelstunden, in denen Gleichzeitigkeit herrscht, d.h. der PV-Ertrag den Gesamtverbrauch deckt, sind orange dargestellt. In Tabelle 8 werden die verwendete Farbskala und die Häufigkeiten der Klassen erläutert. Die Eigendeckungsrate verteilt sich bei rund 90% der Zeitschritte auf die Klassen „ $\leq 20\%$ “ und „100%“. Dass der grösste Teil, ca. 60%, eine Eigendeckungsrate von  $\leq 20\%$  aufweist, ist hauptsächlich durch den Elektrizitätsbezug in den Abend- und Nachtstunden bedingt. Dieser Wert kann nur mit Hilfe eines Batteriespeichers reduziert werden. Gleichzeitigkeit wird bei 28% der 15-min Zeitschritte erreicht. Für Stundenschritte ist der Anteil geringer, da die Gleichzeitigkeit bei Stundenzeitschritten weniger gut zu erreichen ist. Es zeigt sich, dass selbst in den Wintermonaten November bis Januar Viertelstunden mit mehr PV-Ertrag als Gesamtverbrauch auftreten. Meist steht in den Wintermonaten jedoch ein erhöhter Verbrauch einem geringen PV-Ertrag gegenüber. Der geringe PV-Ertrag kann im Winter durch eine schneebedeckte PV-Anlage (z. B. 06.02.2013.-15.02.2013) und Schlechtwetter nochmals reduziert werden.

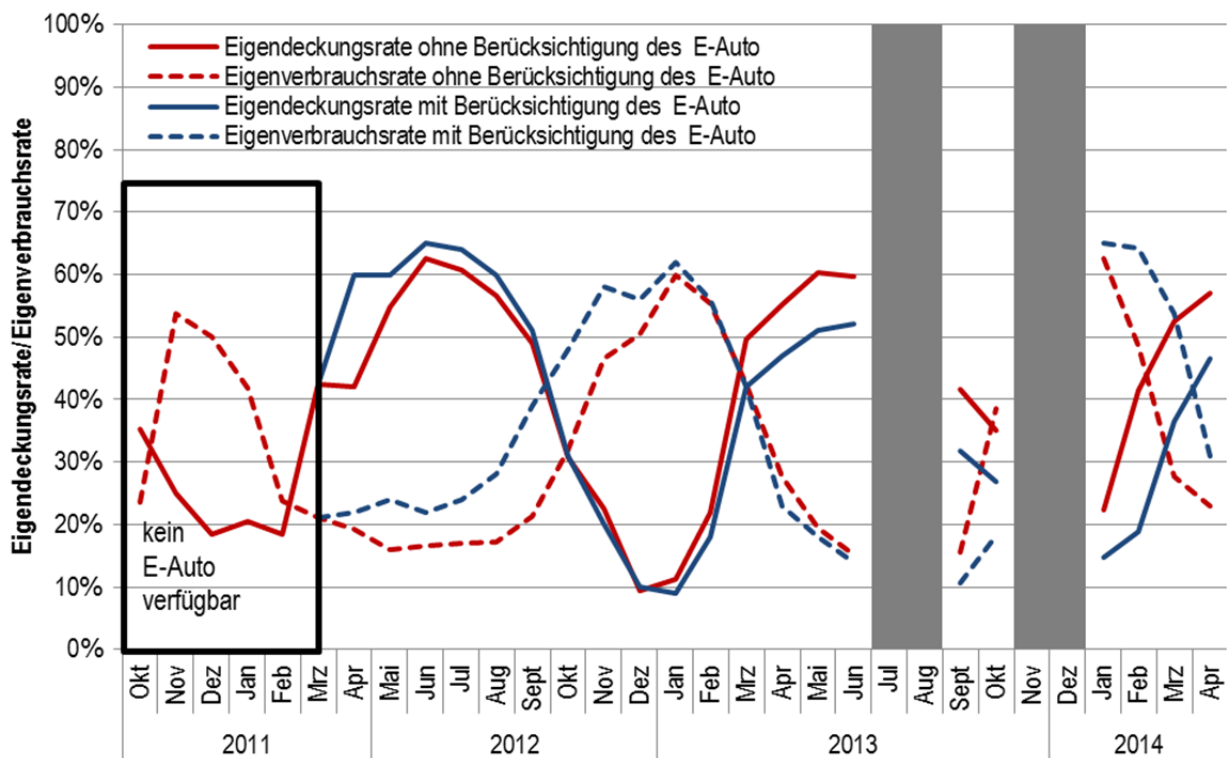


Abbildung 24: Die Eigendeckungs- und Eigenverbrauchsraten mit und ohne Berücksichtigung des Elektrizitätsbezugs des Elektroautos für den Zeitraum zwischen Oktober 2011 und April 2014, berechnet aus 15-Minuten-Werten. Die Zeiträume mit gestörter Datenerfassung sind grau hinterlegt.

Tabelle 8: Absolute und relative Häufigkeiten der verschiedenen Klassen der Eigendeckungsraten für 15-Minuten- und Ein-Stundenintervalle. Farb-Legende zu Abbildung 25:

| Farbcode                                                                            | Klasse der Eigendeckungsrate<br>[%] | Häufigkeiten der diskreten Ein-Stunden Zeitschritte<br>[-], [%] | Häufigkeiten der diskreten Viertelstunden Zeitschritte<br>[-], [%] |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|  | ≤ 20                                | 11'600, 60                                                      | 48'700, 61                                                         |
|  | 21 – 40                             | 710, 4                                                          | 2'770, 3                                                           |
|  | 41 – 60                             | 670, 3                                                          | 2'220, 3                                                           |
|  | 61 – 80                             | 820, 4                                                          | 1'980, 2                                                           |
|  | 81 – 99                             | 1'390, 7                                                        | 1'650, 2                                                           |
|  | 100                                 | 4'700, 24                                                       | 22'420, 28                                                         |

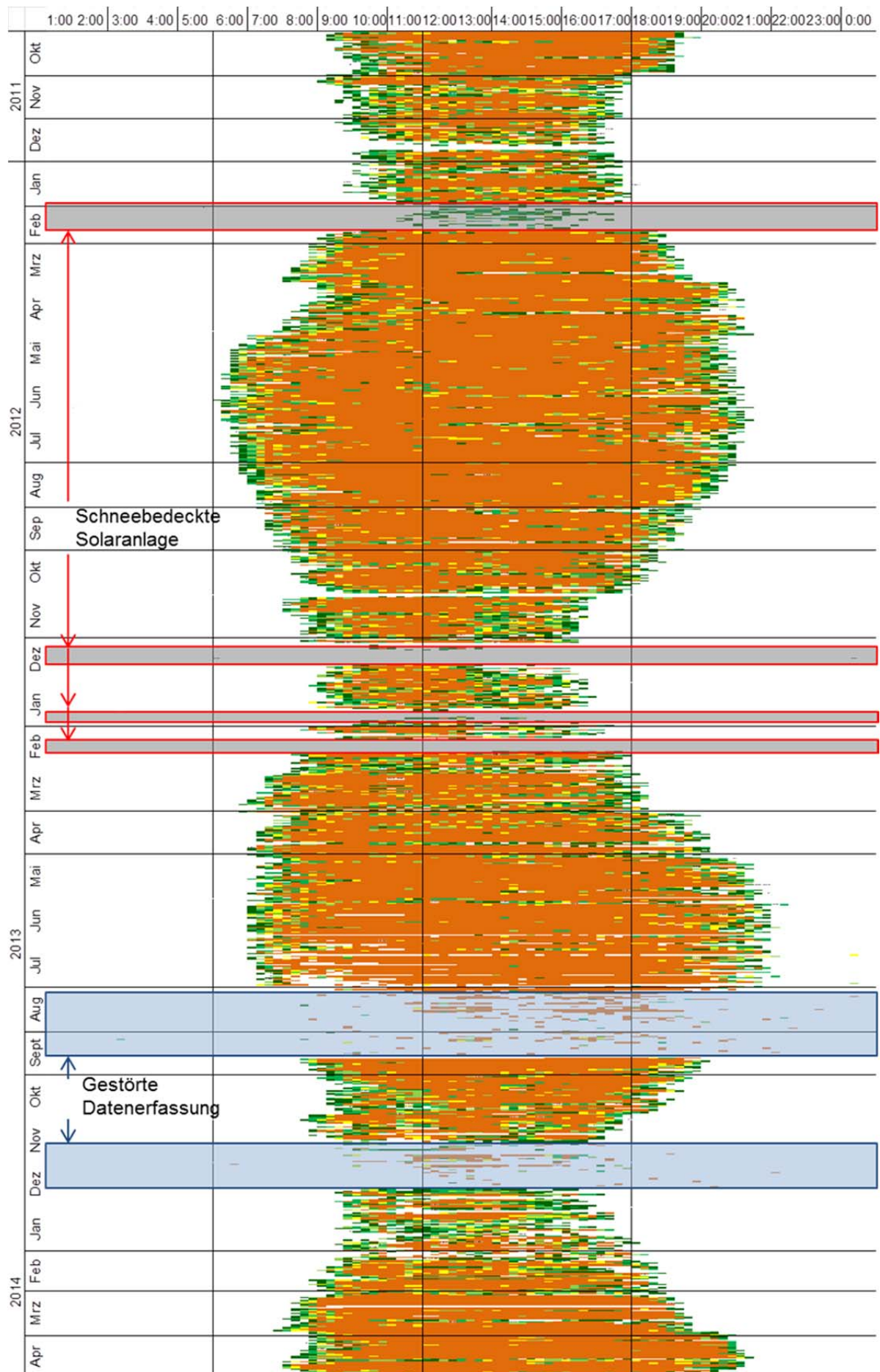


Abbildung 25: Eigendeckungsraten in 15 min-Zeitschritten.

### 3.9. 2000-Watt Tauglichkeit

Das Gebäude wird unter Zu-Hilfe-Name der Rechenhilfe gemäss Merkblatt SIA 2040, SIA-Effizienzpfad Energie [15] bewertet. Entgegen der üblichen Konventionen erfolgt die Bewertung nicht in einer frühen Projektphase, sondern erst am Ende der Messwert- und Datenerfassung. Dieses Vorgehen ermöglicht es, einen Vergleich zwischen Planwerten und der Realität herzustellen.

#### 3.9.1. Berechnung gemäss Merkblatt SIA 2040

##### *Planwerte Mobilität*

Der Energiebedarf, der zur Befriedigung der Individualmobilität der Bewohner des Gebäudes erforderlich ist, hängt von den nachfolgend aufgeführten Kennwerten ab. Für Alltagsmobilität wird gemäss Merkblatt SIA 2039 von einer Jahresdistanz von 15'150 km/Person ausgegangen sowie die Personenwagenflotte 2050 angesetzt. Die Tabelle 9 führt die eingesetzten Parameter auf. Der Planwert für die Mobilität ergibt sich zu 127 MJ/(m<sup>2</sup>a) bzw. 35.3 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Tabelle 9: Verwendete Faktoren zur Berechnung der Planwerte Mobilität gemäss Merkblatt SIA 2039:

| Anforderung                                                                                       | Faktor | Bemerkung                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Personenwagenverfügbarkeit                                                                        | 1.00   | da PKW jederzeit verfügbar                                                                                        |
| Verfügbarkeit eines Dauerabos für den öffentlichen Verkehr<br>(GA, Jahresabo, Monatsabo, Gleis 7) | 0.25   | CH-Durchschnittswert, Standardvorgabe                                                                             |
| Siedlungstyp                                                                                      | 0      | keine Kernstadt                                                                                                   |
| ÖV-Güte am Gebäudestandort                                                                        | E      | Keine direkte Anbindung an den Öffentlichen Verkehr (Abbildung 26)                                                |
| Anzahl der eigenen und gemieteten Park- und Garagenplätze pro Haushalt                            | 1      | Jeder Wohnung im Haus steht mindestens ein Stellplatz zur Verfügung, die Anzahl an Parkplätze/Person beträgt 1.33 |
| Distanz vom Gebäudestandort zum nächsten Detailhandelsgeschäft mit 20 bis 40 Beschäftigten        | 1.07   | Annahme, das sich ein Detailhandelsgeschäft im Ort in 3 km Distanz befindet                                       |

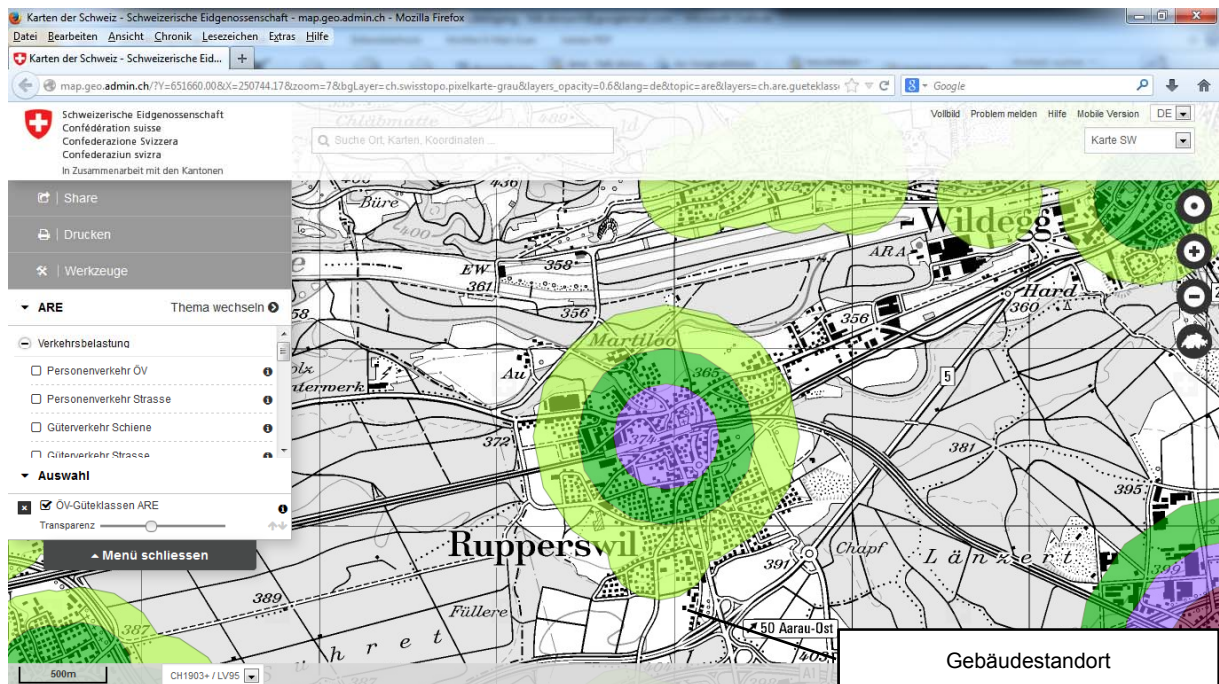


Abbildung 26: GIS-Auszug zur Güte der Anbindung an den öffentlichen Verkehr am Gebäudestandort. [13]

#### Planwerte Erstellung:

Die folgenden Angaben wurden einer Masterarbeit [17] entnommen. Wie bereits erwähnt, weist das Gebäude eine Diskrepanz der Nutzungskennzahlen in der Planung und im realen Betrieb auf. Für die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen, wird von einer EBF von 396 m<sup>2</sup> ausgegangen.

Basierend auf den Angaben zur Materialisierung des Gebäudes und einer Lebensdauer von 60 Jahren wird für die Erstellung, den Ersatz defekter Gebäudekomponenten sowie die Entsorgung von einem Energiebedarf (Graue Energie) von 191 MJ/(m<sup>2</sup>a) respektive 53 kWh/(m<sup>2</sup>a) ausgegangen. Gemäss [17] betragen die flächengewichteten Planwerte der Treibhausgasemissionen für die Erstellung des Gebäudes 3.7 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

#### Planwerte Betrieb:

Die nachfolgenden Angaben wurden dem Minergie-P-Antrag bzw. der Masterarbeit entnommen:

Tabelle 10: Planwerte Betrieb: Flächenbezogene und absolute Primärenergienmengen:

|                                 | Planwerte                                      | Total<br>bezogen auf EBF=396 m <sup>2</sup> |
|---------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Heizwärme                       | 10.8 kWh <sub>therm</sub> /(m <sup>2</sup> a)  | 4'277 kWh/a                                 |
| Warmwasser                      | 20.8 kWh <sub>therm</sub> /(m <sup>2</sup> a)  | 8'237 kWh/a                                 |
| Lüftung                         | 2.16 kWh <sub>elektr</sub> /(m <sup>2</sup> a) | 855 kWh/a                                   |
| Hilfsbetriebe                   | 0.2 kWh <sub>elektr</sub> /(m <sup>2</sup> a)  | 79 kWh/a                                    |
| Raumbeleuchtung, Haushaltsstrom | 17.0 kWh <sub>elektr</sub> /(m <sup>2</sup> a) | 6'784 kWh/a                                 |

Unter Berücksichtigung der Arbeitszahlen des Minergie-P-Antrags für Heizwärme und Warmwasserbetrieb ( $AZ_{WW} = 2.7$ ,  $AZ_{HZ} = 3.2$ ) ergibt sich ein geplanter Elektrizitätsbezug von 12'100 kWh/a respektive von 30.6 kWh/(m<sup>2</sup>a) / 110 MJ/(m<sup>2</sup>\*a). Der flächengewichteten Planwert der Treibhausgasemissionen für den Betrieb des Gebäudes beträgt 4.5 kg/m<sup>2</sup>.

### 3.9.2. Anforderung nach Merkblatt SIA 2040

Im Merkblatt SIA 2040 werden für die Kategorie Neubau die folgenden Richtwerte an nicht erneuerbarer Primärenergie und Treibhausgasemissionen angegeben:

|             |                           |                             |                       |
|-------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Erstellung: | 110 MJ/(m <sup>2</sup> a) | 30.6 kWh/(m <sup>2</sup> a) | 8.5 kg/m <sup>2</sup> |
| Betrieb:    | 200 MJ/(m <sup>2</sup> a) | 55.6 kWh/(m <sup>2</sup> a) | 2.5 kg/m <sup>2</sup> |
| Mobilität:  | 130 MJ/(m <sup>2</sup> a) | 36.1 kWh/(m <sup>2</sup> a) | 5.5 kg/m <sup>2</sup> |

Daraus ergibt sich ein Zielwert von 440 MJ/(m<sup>2</sup>\*a) respektive von 122 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und ein Wert für Treibhausgasemissionen von 16.5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.

### 3.9.3. Auf Messungen basierende Bewertung

#### *Messwerte Betrieb*

Der gemessene Endenergiebezug ist unter Berücksichtigung der gemessenen Nutzenergiemengen und der assoziierten Arbeitszahlen des optimierten Wärmepumpenbetriebs ( $AZ_{WW} = 3.9$ ,  $AZ_{HZ} = 4.9$ , siehe Kapitel 3.3) in Tabelle 11 aufgeführt. Als Primärenergiefaktor wird gemäss Merkblatt SIA 2040 ein auf dem CH-Verbrauchermix basierender Wert von 2.64 angenommen, der Treibhausgasemissionskoeffizient beträgt 0.041 kg/MJ [15]. Für den gesamten Projektzeitraum errechnet sich die netto zurückgelieferte Endenergiemenge auf -16'385 kWh. Auf den Bezug von 43'256 kWh Primärenergie konnte verzichtet werden. Flächengewichtet und auf den Zeitraum eines Jahres normiert beträgt die netto eingesparte Primärenergiemenge 188 MJ/(m<sup>2</sup>a) bzw. 52.3 kWh/(m<sup>2</sup>a).

Tabelle 11: Die Nutz- und Endenergiemengen sowie die netto zurückgelieferte Endenergiemenge, gemittelt über den gesamten Projektzeitraum:

|                                           | Warmwasser<br>[kWh <sub>therm</sub> /a] | Heizwärme<br>[kWh <sub>therm</sub> /a] | Haushaltsstrom<br>[kWh <sub>elektr</sub> /a] | Endenergie<br>[kWh <sub>elektr</sub> /a] |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| UG                                        | 1'239                                   | 2'245                                  | 1'092                                        | 1'863                                    |
| EG                                        | 890                                     | 3'600                                  | 2'576                                        | 3'529                                    |
| OG                                        | 1'858                                   | 4'335                                  | 2'805                                        | 4'155                                    |
| Lüftung                                   |                                         |                                        |                                              | 887                                      |
| Betriebseinrichtungen<br>(Allgemeinstrom) |                                         |                                        |                                              | 833                                      |
| Summe Gebäude                             |                                         |                                        |                                              | 11'267                                   |
| PV-Ertrag                                 |                                         |                                        |                                              | -17'610                                  |
| netto zurückgelieferte<br>Endenergiemenge |                                         |                                        |                                              | -6'343                                   |

### Messwerte Mobilität

Die Mieter des Gebäudes nutzen fünf konventionelle Personenfahrzeuge für alltägliche und berufliche Mobilitätsbedürfnisse. Der Obergeschosswohnung sind zwei PKW zugeordnet, wobei ein Wagen als Dienstwagen deklariert ist. Der Privat-PKW der Obergeschosswohnung wird vorwiegend für Fahrten zum Arbeitsort eingesetzt. Mit dem Dienstwagen werden auch Privatfahrten unternommen. Daher wird er in die Betrachtungen mit einbezogen.

Das Elektroauto wird nicht betrachtet; es zählt nicht zum Bilanzperimeter, da der Fahrer nicht in dem Gebäude wohnt. Gemäss Merkblatt SIA 2039 wird davon ausgegangen, dass ein Teil des mobilitätsinduzierten Energieverbrauchs externen Aktivitäten (Berufsausübung, Konsum) zuzuordnen ist und lediglich 46% beim Gebäude verbleiben.

Angaben zur Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel durch die Mieter des Gebäudes stehen nicht zur Verfügung. Weiterhin ist nicht bekannt, ob und wie viele Flugreisen unternommen werden. Daher wird davon angenommen, dass die Mieter ihre Alltagsmobilität zum grössten Teil mit dem Auto bestreiten.

Im Projektzeitraum legten die Mieter des Gebäudes insgesamt 153'000 km mit ihren PKW zurück. Davon können definitionsgemäss 70'380 km dem Gebäude zugeordnet werden. Um Vergleichbarkeit der durch konventionelle Mobilität verursachte Energiebezug mit dem Energiebezug des Gebäudes herzustellen, wird der gemäss Merkblatt SIA 2039 definierte Primärenergiefaktor (nicht erneuerbar) vom 1.7 MJ/km respektive 0.91 kWh/km sowie ein Treibhausgas-Emissionskoeffizient der Flotte 2050 von 0.087 kg/km verwendet [18]. Darauf aufbauend, ergibt sich ein Wert von ca. 18'100 kWh<sub>PE</sub>/a respektive 57 kWh/(m<sup>2</sup>a). Somit erweist sich die konventionelle Individualmobilität als grösster Einzelposten in der Energiebilanz des Gebäudes.

### 3.9.4. 2000-Watt-Tauglichkeit des Hauses

Der Vergleich der Bezugswerte, Richtwerte und Planwerte mit den Zielwerten zeigt folgendes Bild:

Tabelle 12: Der Vergleich der Messwerte, Richtwerte, Planwerte und Zielwerte des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PE<sub>NE</sub>) und der Treibhausgasemissionen (THG):

|            | Richtwerte                                   |                                              | Planwerte                                    |                                              | Messwerte                                    |                                              | Abweichung<br>PE <sub>Messwert</sub> /<br>PE <sub>Richtwert</sub> |
|------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|            | PE <sub>NE</sub><br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] | THG<br>[kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] | PE <sub>NE</sub><br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] | THG<br>[kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] | PE <sub>NE</sub><br>[kWh/(m <sup>2</sup> a)] | THG<br>[kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] |                                                                   |
| Erstellung | 30.6                                         | 8.5                                          | 53.0                                         | 3.7                                          | 53.0                                         | 3.7                                          | +73 %                                                             |
| Betrieb    | 55.6                                         | 2.5                                          | 30.6                                         | 4.5                                          | -52.3                                        | -7.7                                         | -194 %                                                            |
| Mobilität  | 36.1                                         | 5.5                                          | 29.7                                         | 5.3                                          | 57.0                                         | 10.5                                         | +58 %                                                             |
| Zielwert   | 122                                          | 16.5                                         | 118.8                                        | 13.5                                         | 58.0                                         | 6.4                                          | -53%                                                              |

Sowohl die aufsummierten Planwerte als auch die bei Realnutzung gemessenen Werte halten den Zielwert von 122 kWh/(m<sup>2</sup>a) ein. Die Treibhausgasemissionen unterschreiten den Zielwert ebenfalls. Dies wird nur erreicht, da der hohe Solarstromertrag zu "negativen" Werten für Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen im Betrieb führt und damit die oberhalb der Richtwerte liegenden Werte für Erstellung und Mobilität kompensiert.

Die Zielerreichung ist jedoch nur eine Momentaufnahme und lediglich retrospektiv für den betrachteten Projektzeitraum gültig. Sie ist hauptsächlich vom hohen PV-Ertrag abhängig. Treten beispielsweise Alterungserscheinungen an den PV-Modulen auf, würde der PV-Ertrag durch andere Effekte (Verschmutzung, sinkender Wechselrichterwirkungsgrad, steigende Übergangswiderstände in Folge von Korrosion an elektrischen Verbindungen) zurückgehen oder würde die PV-Anlage im Laufe der Gebäudenutzung komplett ausfallen, könnte der Zielwert nicht mehr eingehalten werden [19]. Diese möglichen Ertragsrückgänge lassen sich

nicht durch Verbesserungen der Energieeffizienz bei den Haushaltsgeräten oder der Haustechnik erreichen. Somit relativiert sich der hohe Anspruch der Gebäudeplaner, und zeigt, dass eine Nutzereinbindung und Sensibilisierung für energieeffizientes Verhalten dringend geboten ist.

Einen Beitrag könnte die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energie im Mobilitätsbereich leisten. Das am Gebäude befindliche Elektroauto deutet bereits in diese Richtung. Allerdings wären am Gebäude weitere Elektrofahrzeuge erforderlich, die direkt durch die Gebäude-PV-Anlage geladen werden müssten. Um den Richtwert Mobilität einzuhalten, wäre zusätzlich einen Mehrertrag an Solarstrom von etwa 18'000 kWh/a erforderlich. Diese Elektrizitätsmenge kann von der bestehenden PV-Anlage nicht bereitgestellt werden. Auch müssten besondere Anstrengungen unternommen werden (z.B. durch den Einsatz eines lokalen, gebäudegebundenen Elektrizitätsspeichers), um erneuerbar produzierte Elektrizität stets in ausreichender Menge vorzuhalten.

## 4. Fazit

### 4.1. Technische Gesamtbetrachtung

Das **Messkonzept des Gebäudes** wurde mit der Zielsetzung konzipiert, ein möglichst detailliertes Bild der elektrischen und thermischen Energieflüsse im Haus zu liefern. Es sollten sowohl die wesentlichen Energiemengen der Gebäudetechnik erfasst als auch ein Einblick in die Energiebezüge der Haushalte gewonnen werden. Von grossem Interesse sind der Einfluss des Elektroautos sowie die Möglichkeiten der Nutzung des PV-Ertrags. Wesentlich war es, eine Balance zwischen Datengranularität und Datenmenge zu finden und eine sinnvolle Auswertung der erfassten Daten sicher zu stellen.

Diese Herausforderung ist gelungen. Das angewendete Messkonzept sowie die Detaillierungstiefe der Messpunkte erlauben sowohl die Aufstellung komplexer übergreifender Energiebilanzen auf Gebäude- und Wohnungsebene als auch Einzelverbraucher der Wohnungen sowie der Gebäudetechnik zu betrachten. Aus Sicht des Gebäudes ist die Energiesituation mit dem gewählten Messkonzept ausreichend detailliert abgebildet.

Zur besseren Bilanzierung der Nutzenergiemengen sollten die folgenden Temperaturmessungen an der Wärmepumpe vorgenommen werden:

- Quellenseite Temperaturmessung am Ein- und Austritt der Erdsonde,
- Abgabeseitige Erfassung der Vor- und Rücklauftemperaturen,
- Messung der Temperatur im Warmwasserspeicher.

Ebenfalls wäre es hilfreich, die Zu- und Fortlufttemperaturen der Komfortlüftungsgeräte zu messen. Diese Zusatzinformation liessen bessere Rückschlüsse auf die Wärmepumpeneffizienz sowie die Speicher-, Verteil- und Lüftungsverluste zu.

Als Defizit des Messkonzepts ist der Detaillierungsgrad der Datenpunkte auf Wohnungsebene zu nennen. So gelingt es nicht, zwischen Grund- und Spitzenlastverbraucher zu differenzieren. Auch kann der Anteil der zur Wohnraumbelichtung aufgewendeten Elektrizität nicht erfasst werden. Der Haushaltsstrom sollte entweder sehr detailliert auf dem Niveau des Einzelgerätes erfasst werden, oder zu typischen Verbrauchergruppen wie folgt zusammengefasst werden:

- *Raumbelichtung*: alle fest- und ortsveränderlich installierten Beleuchtungskörper,
- *Grundlastverbraucher*: Steckdosen für Unterhaltungselektronik / mobile Kommunikation / Computer / kleine Küchengeräte (Mixer),
- *Hochlastverbraucher*: Waschmaschine, Elektroherd und Ofen, je eine Steckdose für Staubsauger pro Raum, Küchensteckdosen (für Mikrowelle, Wasserkocher, Toaster).

Ebenfalls sind die **Probleme bei der Messwerterfassung** zu erwähnen. Bedingt durch fehlerhaft arbeitende Elektrizitätszähler sowie durch Totalausfälle von Zählern treten Datenlücken auf. Fehlerhafte Elektrizitätszähler störten zudem die Datenkommunikation des Bussystems. Die Auslesegeschwindigkeit des Messdatenloggers ist begrenzt. Unter ungünstigen Bedingungen war es nicht möglich, alle mit dem Datenlogger verbundenen Elektrizitäts- und Wärmemengenzähler im gleichen Durchlauf zu erfassen. Dadurch fällt der im nächsten Loggerdurchlauf erfasste Messwert höher aus und führt zu einer Verfälschung der Datenchronologie. Der Detaillierungsgrad des Messkonzepts und die Granularität der erfassten Messwerte führten zu einer grossen Anzahl an Einzelwerten. Eine automatische Plausibilisierung der Werte synchron zur Messwerterfassung ist im Messsystem nicht vorgesehen. Dies bedingt eine zusätzliche nachträgliche Identifikation und Filterung nicht plausibler und/oder fehlerhafter Messwerte. Die Aufzeichnung der Energiemengen als kumulierte Zählerstände und das Auslesen der Momentansalden erfordert eine zusätzliche Nachbearbeitung. Um die Werte von 15-Minuten- oder Ein-Stunden-Leistungen zu erfassen, ist eine aufwändige Differenzbildung zwischen Momentan- und Vorläuferwert nötig. Dies führt zu einem hohen Rechenaufwand. Gegen Ende des Projekts wurde ein Überlauf des Datenservers beim IT-Partner bemerkt. Die aufgelaufene Datenmenge überstieg das erwartete Volumen und führte zu unerwarteten Problemen. Der Verbleib der gesammelten Messwerte nach Projektende war ebenfalls ungeklärt. Zur Entlastung des IT-Partners und um die zeitlich unbegrenzte Verfügbarkeit für weitere Auswertungen zu sichern, wurde die Datenbank auf einen Server der FHNW überführt.

Aus Sicht des **Datenschutzes** sind auf das Einzelgerät zurückgehende Energiedaten-Monitoring-Systeme, welche die Informationen mit kleiner zeitlicher Granularität sammeln, kritisch zu bewerten. Die Informationen können so ausgewertet werden, dass ein Rückschluss auf persönliche Verhaltensweisen möglich wird oder die Anwesenheit in bestimmten Räumen abgelesen werden kann. Bei der Konzeption zukünftiger Energiedaten-Monitoring-Systeme an Gebäuden sollte ein Kompromiss aus Detailierungstiefe und Datenschutz gefunden werden. Bei Veröffentlichung von Messwerten muss sichergestellt werden, dass aus den publizierten Informationen nicht auf die Identität der Bewohner geschlossen werden kann.

Die **Kommunikation** zum IT-Partner war zeitweise erschwert. Dadurch gingen wichtige Informationen, z.B. Hinweise auf gestörte Datenerfassung verloren. Notwendige Reaktionen auf technische Probleme wurden oft erst mit zeitlicher Verzögerung realisiert. Es sollte daher vor Projektbeginn ein verbindlicher Serviceauftrag definiert werden.

Die während des Projekts durchgeführte Veränderungen an der Haustechnik, wie beispielsweise die Optimierung der Betriebszeiten der Wärmepumpe und die Anpassung der Fördermengenströme der Lüftungsanlage wurden durch den Gebäudeeigentümer zeitnah dokumentiert und verständlich kommuniziert. Dadurch gelingt es sehr gut, deren Einfluss auf die Energiesituation des Gebäudes abzuleiten.

Aus den gesammelten Erfahrungen sind folgende Punkte bei einem Monitoring zu beachten:

- Automatische Überprüfung der Messwerte etablieren,
- Automatische Warnung bei Unregelmässigkeiten im Messbetrieb,
- Klärung über den Verbleib der Messdaten nach Beendigung des Projekts,
- Bereitstellung genügend Speicherkapazität während des Projekts,
- Definition der Zuständigkeit mit externen IT-Partner,
- Festlegung der Reaktionszeiten bei Problemen im Messbetrieb,
- Sicherstellung des fehlerfreien Weiterbetriebs des Messsystems bei Ausfall eines oder mehrerer Messfühler und/oder Datenpunkte.

Die zur Verfügung stehende Dachfläche ( $149.1 \text{ m}^2$ ) wird durch die installierte **PV-Anlage** ( $102.7 \text{ m}^2$ ) zu etwa 70% ausgenutzt. Die geringe Neigung der Anlage ( $10^\circ$ ) führt zum schlechteren Abrutschen von Schnee, zum langsameren Abfließen von Regen und zur Ansammlung von Staub und anderen festen Materialien als bei steiler geneigten Modulen. Wasserflecken, feste Ablagerungen oder Bewuchs verringern den Solarertrag. Eine weitere Vergrößerung der Anlage ist nicht möglich, da dies die Begehbarkeit des Daches einschränken würde. Aus derzeitiger Sicht besteht keine Möglichkeit zur konstruktiven Verbesserung der PV-Anlage. Perspektivisch sollte darauf geachtet werden, dass die am östlichen Grundstücksrand stehende Baumreihe so gepflegt wird, dass der Baumwuchs nicht zu einer Zunahme der Anlagenverschattung führt.

#### 4.2. Gebäudekonzept

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, dass das Gebäude als gelungenes, harmonisch und funktional gestaltetes System die Erwartungen des Bauherren und der Bewohner vollumfänglich erfüllt. Die erforderlichen Technologien für eine vollständig regenerative Energieversorgung sind heute bereits verfügbar und haben sich in der Baupraxis bewährt. Bisher wird die Reduktion des Energieverbrauchs eines Gebäudes mit steigenden Investitionen bei der Erstellung gleichgesetzt. Im vorgestellten Projekt ist es gelungen, diese scheinbare Kausalität zu durchbrechen und ein energieeffizientes Gebäude zu üblichen Erstellungskosten zu bauen und am Markt zu etablieren<sup>7</sup>.

Ebenfalls zeigt das Projekt, dass die Investition in den aktuellsten Stand des Wärmeschutzes und in hocheffiziente Gebäudetechnik deutliche Einsparpotenziale eröffnet und damit die bisher nur unzureichend etablierte Praxis der Betriebsoptimierung bei Wohngebäuden vorantreibt. Zudem genügt das Gebäude in seiner Konzeption den Visionen einer 2000-Watt-Gesellschaft, was durch den Praxisvergleich bei realer Nutzung belegt werden kann.

#### 4.3. Gebäudetechnik

Das Gebäude verfügt über eine Sole-Wasser-Wärmepumpe (Heizleistung  $8.9 \text{ kW}$ , Bohrlochtiefe  $180 \text{ m}$ , Erdsondenlänge  $360 \text{ m}$ ), einen technischen Speicher ( $200 \text{ L}$ ) als Heizungspuffer sowie einen Warmwasserspeicher ( $800 \text{ L}$ ). Die Komfortlüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung minimiert die Lüftungswärmeverluste. Das gewählte Gebäudetechnikkonzept besteht aus erprobten Komponenten. Es ist sehr gut an die Gegebenheiten des Gebäudes angepasst und benötigt wenig Platz im Gebäude.

Der Umstand, dass der Betriebsenergieaufwand der Nebenaggregate (Sole- und Verteilpumpen) sehr gering ausfällt, zeigt, dass das System hydraulisch gut abgeglichen wurde.

Das exegetische Niveau der Heizwärmeerzeugung liegt nahe am abgabeseitig geforderten Niveau der Niedertemperaturheizung. Bedingt durch die Leitungsführung der Heiz- und Warmwasserverteilung innerhalb des Dämmperimeters des Gebäudes kommen die Verteilverluste der Wärmebilanz des Hauses als passive Warmegewinne zu Gute.

Zur Warmwasser- und Heizwärmeherzeugung wird im gesamten Projektzeitraum ausschliesslich die Umweltwärme der Erdsonde sowie die Betriebsenergie des Wärmepumpenkompressors genutzt. Der Einsatz des Elektrodirektheizstabes zur Wärmeerzeugung war zu keinem Zeitpunkt der Untersuchungsperiode erforderlich.

Im Vergleich zu ähnlich konzeptionierten Bauten (z.B. Bolleystrasse 35, Zürich, [20]) können alle in diesem Projekt beschriebenen Massnahmen durch einfache Anpassungen an der Wärmepumpensteuerung realisiert werden. Konstruktive Veränderungen an der Gebäudetechnik waren nicht erforderlich.

Der in der Literatur geäusserten Aussage, dass die Kopplung von Photovoltaik und Wärmepumpe weder wirtschaftlich sinnvoll, noch netzdienlich sei [14], kann mit den Ergebnissen dieses Projekts widersprochen werden. Vielmehr zeigt sich, dass einfache Optimierungsmassnahmen an der Wärmepumpe die Eigennutzung des Solarstroms deutlich verbesserten und die Menge des selbst genutzten Stroms um etwa  $1'000 \text{ kWh/a}$  erhöhen. Zudem wird das Netz entlastet, die Mittagsspitze der ins Netz zurückgespeisten Elektrizität vermindert und

---

<sup>7</sup> Mündliche Auskunft Werner Setz zu Grundstücks- und Erstellungskosten

der Netzbezug reduziert. Finanziell wirken sich die Massnahmen nicht auf die Energiekosten der Mieter aus. Eine Rückerstattung der geringen eingesparten Beträge ist mit hohem organisatorischem Aufwand verbunden und wird vom Gebäudeeigentümer nicht in Betracht gezogen.

#### **4.4. Rechtliche und preisliche Aspekte eines Mehrfamilienhauses mit Solarstromerzeugung**

Gemäss Mietrecht Art. 257a muss der Mieter die Nebenkosten nur bezahlen, wenn er dies mit dem Vermieter besonders vereinbart hat. Gemäss Art. 257b muss der Vermieter dem Mieter auf Verlangen Einsicht in die Belege gewähren.

In Mehrfamilienhaus mit eigener solarer Elektrizitätsproduktion beinhalten die Nebenkosten den Allgemeinstrom, den Strom für die Wärmepumpe und die Lüftung und sogar den individuellen Stromverbrauch. Durch die Eigenproduktion der Elektrizität im oder am Gebäude liegen keine Nebenkostenbelege von Dritten vor. Damit der Investor, bzw. Vermieter, seine Mehrinvestition in die Elektrizitätserzeugung amortisieren kann, sollte er im Mietvertrag die eigene Stromerzeugung, bzw. deren Verbrauch als Nebenkosten vereinbaren und sicher stellen, dass die eigene Elektrizitätsmessung als Beleg anerkannt wird.

Gemäss Stromgesetzgebung hat jeder Konsument, und damit der Mieter das Recht auf einen Stromanschluss durch den örtlichen Netzbetreiber. Der Energieverbrauch muss mit geeigneten Zählern gemessen und abgerechnet werden. Nach Inkrafttreten weiterer Strommarktliberalisierungsschritte hat der Konsument sogar das Anrecht auf freien Netzzugang und kann seinen Energielieferanten frei wählen. Ein Mehrfamilienhaus mit eigener solarer Elektrizitätsproduktion sollte gegenüber dem Netzbetreiber als Einzelkonsument auftreten.

Diese Form kommt dann einem Arealnetz, wie z.B. einem Shopping Center oder einem Industrieareal gleich. Nach Stromversorgungsgesetz Art. 4a sind solche Arealnetze, Netze von kleiner räumlicher Ausdehnung keine Elektrizitätsnetze, der Vermieter tritt also nicht als Netzbetreiber im Sinne des Gesetzes auf [21]. Gemäss Entscheid der ElCom zu Arealnetzen ist der Endkunde immer noch der Kunde des örtlichen Netzbetreibers, der Vermieter kann nicht als Energielieferant auftreten und die Benutzung des Netzes im Areal ist Sache des Mietrechts [22]. Der örtliche Netzbetreiber trägt zudem die Verantwortung für die Messung. Demzufolge fehlt für den Vermieter eine klare Rechtsgrundlage, um selbst erzeugten Strom dem Vermieter verrechnen zu können. Sowohl Mieter wie auch Netzbetreiber können dagegen vorgehen.

Es ist ratsam, mit dem Mieter die Energielieferung als Nebenkosten zu deklarieren und gleichzeitig einen Verzicht als Endkunde gegenüber dem Netzbetreiber und auf einen späteren Netzzugang zu vereinbaren. Idealerweise wird dieses Vorgehen auch mit dem örtlichen Netzbetreiber vereinbart.

Das Mehrfamilienhaus wird als ein Strom-Endverbraucher betrachtet (günstigere Messinfrastruktur) und ist konventionell mit individueller Messung und Abrechnung durch den Netzbetreiber ausgestattet:

##### **1. MFH mit *individuellen Kundenbeziehungen* zum Verteilnetzbetreiber:**

- + Rechtsklarheit
- + Unabhängigkeit von Mieter zum Vermieter
- Mehrkosten durch doppelte Messinfrastruktur, wenn auf Sparanreize nicht verzichtet werden soll (zuzüglich Infrastruktur unter Pkt. 3)
- Mehrkosten der Netznutzung an den Endverbraucher, keine Netzparität!
- separate Bilanzierung des Hauses, erschwert durch Auswahl von wählbaren Stromqualitäten.

2. MFH als *ein Endverbraucher* : Verzicht auf Nebenkostenabrechnung, dafür höherer Mietzins
  - + einfache Handhabe, klare Bilanzierung des Hauses möglich
  - + kaum rechtliche Konflikte (Obligationenrecht, Messwesen, Energiegesetzgebung)
  - für den Mieter kommt diese Lösung einer Flatrate gleich und es erlischt der Anreiz zum Energiesparen und zur Optimierung des Verbrauchs in Produktionszeiten
3. MFH als *ein Endverbraucher*: Detaillierte Energie-Verbrauchsmessung zeitnah (Strom, Warmwasser, Wärme), marginale und nicht zuweisbare Energieverbräuche mit Verteilschlüssel
  - + Bilanzierung des Hauses einfach
  - + individueller Anreiz für Sparen und Lastverschiebung
  - + Erkenntnisgewinn für langfristiges Optimieren
  - + kurzfristiges Erkennen von Fehlfunktionen und Fehlverhalten
  - teure und aufwendige Zusatzinvestition ohne effektiven Payback
  - Gläserner Mieter, Einblick in den persönlichen Energieverbrauch durch den Vermieter (wer duscht wie oft und wie lange) → Datenschutz
  - Rechtlicher Konflikt: Auftritt als Energieversorger (Stromgesetz Art. 4, Arealnetz)
  - Anforderungen an die Genauigkeit der Messinfrastruktur, wenn diese als Verrechnungsgrundlage genutzt wird

Empfehlung: Aufgrund der Rechtsunsicherheit ist bei den Varianten 2 und 3 zu empfehlen, dass bei der Elektroplanung für das Haus spätere Änderungen in Betracht gezogen werden, z.B. wenn ein Mieter auf einen Netzzugang beharrt, dass er dann ganz herkömmlich für den persönlichen Energieverbrauch (Licht, Kochen, E-Mobil-Steckdose) autonom vom Netzbetreiber versorgt und gemessen werden kann.

In diesem Pilotprojekt wurde die 1. Variante mit der 3. Variante ergänzt. Die erneuerbar produzierte Elektrizität wird über die KEV vergütet und vollumfänglich an die Swissgrid abgetreten. Die Mieter wurden über die installierte Gebäude- und Messtechnik aufgeklärt und gaben ihr Einverständnis für die Datenerfassung und Datenauswertung. Als Anreiz zum Sparen wurden Sollwerte vorgegeben und ein Bonus-/Malus-System kommt zur Abrechnung. Zudem verpflichteten sich die Mieter zum Strombezug mit „naturemade“ Qualität, damit der Energieverbrauch für das Haus als erneuerbar bilanziert werden kann.

Ein Messsystem mit einer solchen Transparenz dürfte nur bei einer kleinen Mietergruppe toleriert werden. Für eine grosse Gruppe von Mietinteressenten dürfte ein solches System nach Aussage des Gebäudeeigentümers auf Ablehnung stossen. Theoretisch besteht die Möglichkeit, den Datenzugang zu beschränken, entsprechende Datensicherheit könnte wohl aber nur durch einen dritten Dienstleister gewährleistet werden, was wiederum mit Mehrkosten verbunden wäre.

Alternativ zu oben beschriebenen Ansätzen sind Zwischenlösungen in Erwägung zu ziehen, welche die Integrität der Mieter weniger tangieren und trotzdem einen guten Anreiz zum Sparen oder zur Lastverschiebung setzen. Denkbar ist durchaus der Verzicht auf Lastprofilzähler, dafür Summenzähler mit verschiedenen Tarifstufen als Verrechnungszähler.

Die Wirtschaftlichkeit eines energieeffizienten Gebäudes mit Photovoltaikanlage im Allgemeinen wird beeinflusst durch den aktuellen Strompreis und die Tarifierung von Energiebezug, Netznutzung und Einspeisevergütung. Je nach Anlagengrösse, Amortisationsansatz und Förderung resultieren für eine PV-Anlage heute Gestehungskosten von 20-30 Rp/kWh. Demgegenüber kostet der Haushaltsstrom heute im Durchschnitt um 20 Rp/kWh. Der Haushaltstrompreis pro kWh setzt sich zusammen aus rund 9 Rp. Energie, 9 Rp. Netznutzung und 1 bis 2 Rp. Abgaben. Würde sämtlicher produzierter Strom im Haus verbraucht, dann kommt man heute bereits der Netzparität nahe. Tatsächlich aber wird tagsüber und im Sommer Strom ins Netz eingespeist (ohne Netznutzungsgebühr) und abends und im Winter wieder aus dem Netz bezogen. Verrechnungstechnisch wurde bis vor kurzem in der Regel sogar die gesamte erzeugte Elektrizität ins Netz eingespiessen (KEV) und der Eigenver-

brauch als Ganzes wieder aus dem Netz bezogen. Wenn der eingespiesene Strom nicht durch die KEV vergütet wird, dann ist der lokale Energieversorger heute verpflichtet, diesen Strom zu den geltenden Energietarifen (Hoch- und Niedertarif, ohne Netznutzungs- und Abgabenanteil) zu vergüten.

Bis anhin brauchte es eine Vereinbarung und die Kulanz mit dem örtlichen Netzbetreiber, wenn die selbst produzierte Elektrizität abrechnungstechnisch direkt für den Eigenverbrauch verwendet wurde. Neu wird dies möglich und nur die Überschüsse und Mehrbezüge werden mit dem Versorger verrechnet. Dadurch wird Netzparität möglich und es bietet Anreiz, mittels Lastverschiebung den Verbrauch möglichst der Produktion anzupassen.

Preisvergleich, nach heutigem Stand:

Gestehungskosten von selbst produziertem PV-Strom: ca. **20 Rp./kWh**

Mit dem neuen KEV-Ansatz – Einmalvergütung von 30% der Investitionskosten für Kleinanlagen bis 30kW kommt die selbst erzeugte kWh Strom im Falle von Eigenverbrauch auf oder unter das Niveau des Strompreises aus dem Netz.

- Abgeltung überschüssiger Elektrizität (Einspeisung): ca. **6-10 Rp./kWh**  
Überschüssiger Strom wird zu Tarif-/Marktpreisen des Energie Anteils vergütet.
- Kosten zusätzlicher Strombezug aus Netz: ca. **20 Rp./kWh**  
Strombezug, der die aktuelle PV-Produktion übertrifft, muss zum Tarif oder Marktpreis zuzüglich Netzkosten und Abgaben bezogen werden.

Nicht gleichzeitig genutzte Elektrizität wird demnach um den Netzzuschlag und Abgaben verteuert.

In die Zukunft betrachtet, wenn sich dieses System skaliert und mit dem Zubau von erneuerbaren Energien aus Wind- und Sonnenkraft, ist zu erwarten:

- dass die Abgeltung eingespeister Energie flexiblen Tarifen unterlegt werden dürfte und bei viel Sonne praktisch wertlos wäre.
- Dagegen wird der Strombezug an kalten und sonnenarmen Tagen eher teurer.
- dass sich die Erlöse aus Netznutzungsentgelten und Abgaben verringern. Als Folge müssen dadurch die Ansätze nach oben angepasst werden. Denkbar ist auch, dass in Zukunft auch ein Einspeisenetzentarif erhoben wird (Einspeisemodell), dies bedingt aber grössere rechtliche Anpassungen. Eher denkbar und heute rechtlich umsetzbar wäre ein Leistungstarif für die maximal bezogene Leistung innerhalb eines Monats oder eines Jahres.

Dadurch verstärkt sich der Anreiz für Lastmanagement und Lastverschiebung oder sogar zum Einbau eines lokalen Speichers.

#### 4.5. Nutzereinbindung

Nach Aussage der Mieter wird das Wohnungsdisplay zwar häufig beachtet, die Werte dienen den Mietern aber lediglich zur Orientierung. Sie nutzen es, um den ihren täglichen Warmwasser und Haushaltstrombezug abzufragen. Es wurde bemängelt, dass die vom Energieinformationssystem gelieferten Daten zu wenig aussagekräftig wären und keine Hinweise zur Verbesserung des persönlichen Energieverbrauchs liefern würde. Die am Display des Energieinformationssystems verwendeten Kurzbezeichnungen sind für einige Mieter missverständlich. So war nicht allen Mietern bekannt, welche Bedeutung den Abkürzungen "W" und "Ha" zukommt. Ausgeschriebene Bezeichnungen würden das Verständnis verbessern. Ein Mieter wünscht noch detailliertere Informationen über seinen persönlichen Energieverbrauch z.B. in Form einer Anzeige des Momentanverbrauchs einzelner Haushaltgeräte.

Die Rückmeldungen der Gebäudem Mieter ergeben weiterhin, dass nur wenig Interesse an Massnahmen zur Verbesserung der gebäudeinternen Energieeffizienz besteht. Eine verbes-

serte Effizienz der Gebäudetechnik geschieht meist im Verborgenen. Die damit erreichten Einsparungen sind für den Mieter nicht direkt erkennbar und werden nicht oder nur unzureichend wahrgenommen. Zudem erhält der Mieter die Rückmeldung erst mit der nächsten Betriebskostenabrechnung.

Trotz grosser beanspruchter Wohnfläche und einem hohen, aus Komfortansprüchen resultierenden Energieverbrauch, haben die Mieter den Eindruck, sich umweltfreundlich zu verhalten. Das Energie-Informationssystem hat die Mieter für energetische Fragen in ihrer Wohnung sensibilisiert. Hinweise und Empfehlungen für Veränderungen des persönlichen Verhaltens, welche zu einem verringerten Energieverbrauch führen könnten, wären eine Möglichkeit zur Weiterentwicklung des Systems. Hilfreich wäre beispielsweise, wenn das System Tipps zum effizienteren Umgang mit Energie liefern würde und den finanziellen Nutzen direkt ausweisen könnte. Wenn beispielsweise ersichtlich wäre, dass eine geringfügige Absenkung der Raumlufttemperaturen zu geringeren Wohnungsnebenkosten führen würde und das System den erzielbaren finanziellen Betrag beziffern könnte, würden Energiesparmassnahmen eher aus dem "Anreiz zum Geldsparen" als aus ökologischen Prestigegründen getroffen.

#### **4.6. Bonus-Malus-System**

Das Bonus-/Malus System des Gebäudeeigentümers basiert auf einer in Abhängigkeit des Nutzenergiebezugs gestaffelten Reduktion der jährlichen Nebenkostenabrechnung. Information zur Ausgestaltung des Systems liegen leider nur als mündliche Auskunft vor. Bezieht ein Mieter innerhalb eines Jahres weniger Nutzenergie als gemäss Energie-Informationssystem vorgesehen, verringert sich seine Nebenkostenabrechnung um einen definierten prozentualen Anteil. Umgekehrt steigt die Nebenkostenabrechnung, wenn sich der jährliche Nutzenergiebezug über den Wert des Energie-Informationssystems erhöht. Die Abrechnung erfolgt in jährlichen Intervallen. Der durch einen Minderverbrauch erreichte ökonomische Nutzen erreicht den Mieter dadurch erst mit zeitlicher Verzögerung. Der organisatorische Zusatzaufwand für die Rückvergütung oder Nachschlagsforderung an die Mieter stellt den Gebäudeeigentümer vor erhebliche organisatorische Herausforderungen. Im Verhältnis zu den ortsüblichen, durch das Mietpreisniveau erzielbaren Einnahmen fallen die Rückvergütungsbeträge in niedrigen zweistelligen Franken-Bereich nicht ins Gewicht. Für dieses Projekt erweist sich ein Bonus-Malus-System daher als nicht sinnvoll. Bei Neuvermietungen könnte ein Bonus-Malus-System jedoch als Alleinstellungsmerkmal wahrgenommen werden. Die zukünftige Gestaltung der Abrechnungsmethoden von Bonus-/Malus Systemen sollte hinreichend transparent und für den Mieter leicht verständlich sein [23].

Bei der Gestaltung zukünftige Anreizsysteme sollte verstärkt auf nichtmonetäre Motivation gesetzt werden. So ist es denkbar, positive Rückmeldungen über soziale Netzwerke aufzubauen oder einen kompetitiven Anreiz innerhalb der Mieterschaft oder in einer Community zu schaffen [24].

Die im Rahmen dieses Projekts getroffenen Optimierungen zur Steigerung gebäudeinternen Energieeffizienz lassen sich zwar als Energiemengen quantifizieren, wirken sich jedoch finanziell nicht aus und können nicht über ein Bonus-Malus-System vergütet werden.

#### **4.7. Nutzen der Elektromobilität**

Ein Elektrofahrzeug, welches am Gebäude geladen wird, verbessert nur dann die Gleichzeitigkeit, wenn sichergestellt werden kann, dass der Ladevorgang ausschliesslich mit überschüssigem PV-Strom erfolgt. Zwar zeigte der Vergleich der Eigendeckungsraten, dass das Elektroauto zur Nutzung des Solarertrags im Gebäude beiträgt. Im Laufe des Projekts sinkt der zur Ladung des Fahrzeugakkus selbst genutzte Solarstromanteil jedoch zunehmend ab. Im Gegenzug wird mehr Elektrizität zur Aufladung des Akkus aus dem Netz bezogen.

Im Kontext des gesamten, durch die Mobilität der Gebäudebewohner induzierten Energieverbrauchs spielt ein einzelnes, speziell vom Gebäudeeigentümer genutztes Elektroauto nur eine untergeordnete Rolle. Für die Befriedigung der Mobilitätsbedürfnisse aller Hausbewohner steht am Gebäude nicht genügend erneuerbar erzeugte Elektrizität zur Verfügung.

#### **4.8. Berücksichtigung im Standardisierungs- und Planungsprozess**

Momentan wird bei der Definition von Gebäudestandards die Eigendeckungsrate als Jahresbilanz auf Basis von Jahressummenwerten und mit gleichen bzw. symmetrischen Primärenergiefaktoren für Eigenverbrauch, Netzeinspeisung und -bezug bestimmt: z.B. bei MINERGIE-A entspricht dies der Kennzahl „Wärme“ [25]. Bei einem Nullenergiegebäude ist die Eigendeckungsrate in der „Null“ der Netto-Jahresbilanz enthalten [26] und bei einem Nullenergiegebäude muss der PV-Ertrag grösser als der Verbrauch sein [27] [28], was einer theoretischen Eigendeckungsrate von mehr als 100% entspricht.

Im Schweizer Verein MINERGIE wird diskutiert, ob die Gleichzeitigkeit beim Nullwärmeenergiestandard MINERGIE-A berücksichtigt werden soll. Dies könnte z.B. durch unterschiedliche, d.h. asymmetrische Primärenergiefaktoren für Eigenverbrauch, Netzeinspeisung und -bezug erfolgen. Ebenfalls wird diskutiert, die Gleichzeitigkeit als Jahresbilanz basierend auf Monatssummenwerten zu bilanzieren. Die aktuelle Fassung der SIA 416/1 [29] berücksichtigt bei der Berechnung des Gesamtenergiebedarfs eine Methode, welche die Eigenverbrauchsrate und die Primärenergie für Netzeinspeisung und -bezug mit asymmetrischen Faktoren gewichtet.

## 5. Literatur

- [1] M. Hall, R. Dott und F. Dorusch, „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität, 1. Zwischenbericht Heizperiode 2011/2012“, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz, 2012.
- [2] M. Hall, R. Dott und F. Dorusch, „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität, 2. Zwischenbericht Sommerperiode 2012“, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz, 2013.
- [3] M. Hall, Dott, R und F. Dorusch, „Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität, 3. Zwischenbericht 2. Betriebsjahr 2012/2013“, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz, 2013.
- [4] „www.solaragentur.ch“, [Online]. Available: [http://solaragentur.ch/dokumente//G-12-09-24%20Klein-Solarpreispublikation%202012-DEF\\_Setz\\_kleinste.pdf](http://solaragentur.ch/dokumente//G-12-09-24%20Klein-Solarpreispublikation%202012-DEF_Setz_kleinste.pdf). [Zugriff am 10 10 2014].
- [5] N. Lederle, „SEK: Standardlösungen zum effizienten Kühlen mit Wärmepumpen, Schlussbericht“, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau, Muttenz, 2010.
- [6] MeteoSchweiz, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, „Klimadaten Buchs/Aarau, Stundenwerte,“ 2012.
- [7] Meteonorm 6.1.0.9, „Globale Meteorologische Datenbank für Ingenieure, Planer und Bildung“, Bern, 2009.
- [8] J. Nipkow; Schweizerische Agentur für Energieeffizienz S.A.F.E, „Der Typische Haushalt-Stromverbrauch - Neue Haushalt-Kategorien und typische Stromverbrauchswerte“, Zürich, 2013.
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA 380/1, „Thermische Energie im Hochbau“, Zürich, 2009.
- [10] Bundesamt für Raumentwicklung, „Fahrleistungen der Schweizer Fahrzeuge. Ergebnisse der periodischen Erhebung Fahrleistungen (PEFA),“ Bern, 2002.
- [11] M. Hall, F. Dorusch und A. Geissler, „Optimierung des Eigenverbrauchs, der Eigendeckungsrate und der Netzbelastung von einem Mehrfamiliengebäude mit Elektromobilität“, Bauphysik, Bd. 36, Nr. 3, pp. 117-129, 2014.
- [12] R. Hollinger, T. Wille-Hausmann, J. Erge, S. T., N. Stillahn und T. Keifels, „Speicherstudie 2013-Kurzgutachten“, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de), 2013.
- [13] T. Staudacher, „Dezentrale Stromversorgung eines Einfamilienhauses“, BWK Das Energie-Fachmagazin, pp. 66-72, 2012.
- [14] A. Bedal, „Effizienzhaus mit Plus?“, Sonnenenergie, Nr. 2, pp. 26-28, 2012.
- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „SIA-Effizienzpfad Energie, Merkblatt SIA 2040“, Zürich, 2011.
- [16] Bundesamt für Raumentwicklung ARE, ÖV-Güteklassen – Berechnungsmethodik ARE, „WEB-GIS ARE mit ÖV-Güteklassen“, [Online]. abgerufen von: [http://map.geo.admin.ch/?Y=653000.00&X=174500.00&zoom=1&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers\\_opacity=0.5&layers\\_visibility=true&lang=de&topic=are](http://map.geo.admin.ch/?Y=653000.00&X=174500.00&zoom=1&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers_opacity=0.5&layers_visibility=true&lang=de&topic=are). [Zugriff am 04 09 2014].
- [17] A. L. Widmer-Paniagua, „Die Null des Nullenergiegebäudes“, Masterarbeit im MAS EN Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz, 2013.
- [18] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „Merkblatt 2039: Bauen und Mobilität in der 2000-Watt-Gesellschaft“, Zürich, 2011.

- [19] N. Ababacar, C. Abdérafi, K. Abdessamad, K. Cheikh, N. Pape und S. Vincent, „Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review,“ *Solar Energy*, Bd. 96, pp. 140-151, 2013.
- [20] L. Ullmann, R. Furter und A. T. De Neef, „Erfolgskontrolle – ZeroEmission-LowEx-Mehrfamilienhaus B35 Zürich“, Hochschule Luzern, Luzern, 2014.
- [21] Schweizerische Eidgenossenschaft, "Bundesgesetz über die Stromversorgung (Stromversorgungsgesetz, StromVG)", 2007.
- [22] Eidgenössische Elektrizitätskommission ElCom, Newsletter 08-2012: Strompreise 2013, Bern, 2012.
- [23] M. Bade, C. Hasse, B. Lunneburger, J. Pabst, K. Purr, M. Ollig, D. Osiek, S. Schneider, J. Schubert, J. Verlinden und B. Westermann, „Der Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand -Hintergrundpapier“, Umweltbundesamt, Dessau, 2014.
- [24] energie schweiz, „Wettbewerb *AppWelt EnergieSchweiz 2014* Innovative Smartphone- und Tablet-Apps zu den Themenbereichen Energieeffizienz“, Medieninformation 15.08.2014.
- [25] Verein Minergie, „Standard MINERGIE-A,“ [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch), 2014.
- [26] E. Voss, M. Musall und K. Lichtmess, „Vom Niedrigenergie- zum Nullenergiehaus: Standortbestimmung und Entwicklungsperspektiven“, *Bauphysik*, Bd. Heft 6, Nr. 32, pp. 424-434, 2010.
- [27] Innovationsgruppe Plusenergie-Gebäude, [www.energie-cluster.ch](http://www.energie-cluster.ch).
- [28] Reglement Plusenergiebauten für den Schweizer Solarpreis, [www.solaragentur.ch](http://www.solaragentur.ch).
- [29] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, „SIA 416, Kennzahlen der Gebäudetechnik“, 2007.

## 6. Anhang

Im Rahmen des Projekts wurden drei Zwischenberichte verfasst. Der Inhalt der Berichte versteht sich als Fortschreibung der gewonnenen Erkenntnisse. Die Zwischenberichte umfassen die folgenden Themenschwerpunkte

Der erste Zwischenbericht beschreibt:

- wie sich ein Mehrfamilienhaus mit Elektromobilität und lokaler Stromerzeugung am Stromnetz im Zeitraum zwischen Oktober 2011 und April 2012 verhält (Gleichzeitigkeit, saisonale Effekte),
- ob die berechnete Energiebilanz eingehalten wird,
- welcher Energieverbrauch welche Rolle spielt,
- wie sich der Energieverbrauch beeinflussen, optimieren und reduzieren lässt,
- wie die Nutzer das Energiemanagement wahrnehmen und damit umgehen,
- die Motivation der Bauherren, Mehrfamilienhäuser im Mietverhältnis mit lokaler Stromerzeugung zu erstellen

<http://www.fhnw.ch/habg/iebau/dokumente-1/afue/bau/zwischenbericht-mfh-e-mobilitaet-rupperswil.pdf>

Im zweiten Zwischenbericht wird darauf eingegangen:

- wie sich die Gesamtenergiebilanz zwischen April und Oktober 2012 entwickelt und in welchem Umfang Gleichzeitigkeit zwischen PV-Produktion und Elektrizitätsbezug erreicht werden kann und welche Werte sie für das erste Betriebsjahr erreicht,
- Wie die Nutzung des Elektroautos sowie das Aufladen der Fahrzeugakkus die Energiesituation des Gebäudes beeinflusst,
- Welchen Einfluss klimatische Sommerbedingungen haben und ob die Verschiebung der Betriebszeiten der Wärmepumpe in die Mittagszeit sinnvoll ist,
- Worauf die in der vorangegangenen Beobachtungsperiode gefundenen Auffälligkeiten im Elektrizitätsbezug einzelner Verbraucher im Gebäude zurückzuführen sind.

[http://www.fhnw.ch/habg/iebau/dokumente-1/afue/bau/ElektromobilitaetRupperswil2Zwischenbericht\\_2013.pdf](http://www.fhnw.ch/habg/iebau/dokumente-1/afue/bau/ElektromobilitaetRupperswil2Zwischenbericht_2013.pdf)

Der dritte Zwischenbericht beschreibt:

- die Gesamtelektrizitätsbilanz des zweiten Betriebsjahres,
- den Vergleich des Heizwärmebezugs und des Warmwasserverbrauchs zwischen ersten und zweiten Betriebsjahr,
- die charakteristischen Lastgangsprofile für die Elektrizitätsproduktion und den Bezug,
- die Analyse der Lastgänge des Gebäudes und die detaillierte zeitlich aufgelöste und fahreszeitlich differenzierte Untersuchung der Elektrizitätsflüsse im zweiten Betriebsjahr,
- die Untersuchung der Elektrizitätsbezüge aller massgeblichen Verbraucher im Gebäude im zweiten Betriebsjahr und deren Vergleich mit den Beobachtungen des ersten Betriebsjahrs,
- die Überprüfung, ob sich die Begrenzung der Betriebszeiten der Wärmepumpe auf das Lastverhalten des Gebäudes und die Raumlufttemperaturen in den Wohnungen auswirkt,
- die Auswertung der Messungen der Raumlufttemperatur in den unbeheizten Räumen des Untergeschosses.

<http://www.fhnw.ch/habg/iebau/afue/gruppe-bau/MFHmitElektromobilitaetZwischenbericht3.pdf>