



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 18. Dezember 2019

---

## Leuchtturm «Photovoltaik Fassade an PlusEnergieBau Sanierung Zürich»



Quelle: © Viridén + Partner AG, Zürich.



**Datum:** 18. Dezember 2019

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

Viridén + Partner AG  
Zweierstrasse 35, 8004 Zürich, [www.viriden-partner.ch.ch](http://www.viriden-partner.ch.ch)

Diethelm Fassadenbau AG  
Spielhof 1, 5626 Hermetschwil, [www.diethelm-ag.ch](http://www.diethelm-ag.ch)

ewz  
Tramstrasse 35, 8050 Zürich, [www.ewz.ch](http://www.ewz.ch)

e4plus AG  
Kirchenrainweg 4a, 6010 Kriens, [www.e4plus.ch](http://www.e4plus.ch)

GFT Fassadenbau AG (ehemals: Gasser Fassadenbau AG)  
Schuppisstrasse 7, 9016 St. Gallen, [www.gasserfassadentechnik.ch](http://www.gasserfassadentechnik.ch)

Zurfluh Lottenbach GmbH  
Hertensteinstrasse 44, 6004 Luzern, [www.zurfluhlottenbach.ch](http://www.zurfluhlottenbach.ch)

**Autor/in:**

Karl Viridén, Viridén + Partner AG, Zürich, [viriden@viriden-partner.ch](mailto:viriden@viriden-partner.ch)  
Andreas Büsser, Viridén + Partner AG  
Gerhard Emch, ewz, Zürich

**BFE-Projektbegleitung:**

Karin Söderström, [karin.soederstroem@bfe.admin.ch](mailto:karin.soederstroem@bfe.admin.ch)  
Stefan Oberholzer, [stefan.oberholzer@bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501241-01

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



## Zusammenfassung

Für die zwei zusammengebauten Mehrfamilienhäuser aus den 1980er Jahren an der Hofwiesenstrasse 22 und Rothstrasse 48 in Zürich wurde ein gesamtheitliches Sanierungskonzept mit einer optimalen Gebäudehülle und intelligenter Haustechnik erstellt. Auf der bestehenden Gebäudefläche wurde eine Verdichtung (räumliche Erweiterung) um zwei Geschosse vorgenommen.

Die Planung begann im Jahr 2014 und im September 2016 wurde die Renovierung der 22 Wohnungen sowie die Erweiterung um acht weitere Wohnungen auf dem Dach abgeschlossen und die Mieter konnten in ihre Wohnungen einziehen. Das Gebäude hat eine hinterlüftete „aktive Glasfassade“ und fügt sich in den urbanen Kontext mitten in Zürich ein. Diese dynamische Glasfassade produziert mit einer Leistung von  $110 \text{ W/m}^2$  Photovoltaikstrom und verwandelt das Gebäude nach der Renovierung fast zum PlusEnergieBau.

Das Projekt animiert Architekten und Planern in Zukunft hinterlüftete Fassaden vor allem als „aktive Glasfassaden“ zu planen. Wenn dies bei einer Renovierung (mit einer komplizierten Fassadenhülle) möglich ist, ist dies bei jedem neuen Gebäude einfach möglich.

Gemäss den Berechnungen nach SIA 2040 „SIA Effizienzpfad Energie“ unterschreitet das Gebäude mit  $48,0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  der nicht erneuerbaren Primärenergie den Zielwert um 60%. Bei der Treibhausgasemission wird der Zielwert um 39% mit  $9,2 \text{ kg CO}_2\text{-Äquivalente/m}^2\text{a}$  unterschritten.

Ziel des Projekts war es unter anderem einen hohen Eigenverbrauch zu erreichen. Im 1. Messjahr (2017+) beträgt der Eigenverbrauchsanteil 38.6% und Autarkiegrad 33.5%. Im 2. Messjahr (2018+) mit Batterie war der Eigenverbrauchsanteil bei 67.5% und der Autarkiegrad 57.4%.

Der spezifische Ertrag bei der Fassadenanlage liegt erwartungsgemäss tiefer als bei einer entsprechenden ertragsgleichen Dachanlage. Die jährliche Produktion pro installierter Leistung, gemittelt über die vier Fassaden (unter Berücksichtigung des hohen Anteils an Nordfassade), beträgt 30% vom Dachsystem erzeugter Energie. Die besten Module an Süd- oder Westfassade weisen mit 80 % zum Dachsystem einen viel höheren Anteil auf. Im Vordergrund stehen in diesem Projekt jedoch klar der Eigenverbrauchsanteil, die Reduktion der Rückspeiseleistung sowie der saisonale Ausgleich.

## Résumé

Un concept de rénovation holistique avec une enveloppe de bâtiment optimale et des techniques de construction intelligentes a été réalisé pour les deux maisons multifamiliales des années 1980 situées à la Hofwiesenstrasse 22 et à la Rothstrasse 48 à Zurich.

Sur le bâtiment existant, une densification (extension spatiale) a été réalisé sur deux étages.

La planification de la rénovation des 22 appartements et l'ajout de huit autres appartements sur le toit a commencé en 2014 et les travaux ont été achevés en septembre 2016, date d'emménagement des locataires.

Le bâtiment présente une "façade vitrée active" ventilée et s'inscrit dans le contexte urbain du centre de Zurich. La puissance crête de cette façade vitrée active est de  $110 \text{ W/m}^2$  et le bâtiment devient presque un bâtiment à énergie positive après la rénovation grâce à l'énergie photovoltaïque ainsi produite.

Le projet encouragera à futur les architectes et les planificateurs à planifier les façades ventilées avant tout comme des "façades en verre actif". Si cela est possible lors d'une rénovation avec une enveloppe de façade compliquée, cela est également possible avec tout nouveau bâtiment.



Le bâtiment, avec  $48,0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  d'énergie primaire non renouvelable se situe en dessous de la valeur cible de 60% selon les calculs de la norme SIA 2040 «SIA Energy Efficiency Path».

Les émissions de gaz à effet de serre se situent elles-aussi en dessous de la valeur cible de 39% avec  $9,2 \text{ kg CO}_2$  d'équivalent/ $\text{m}^2\text{a}$ .

L'objectif du projet était, entre autres, d'atteindre une part d'autoconsommation élevée. La part d'autoconsommation était de 38,6% et l'autosuffisance de 33,5% lors de la première année de mesure (2017+). L'ajout de batterie permet d'augmenter significativement ces chiffres au cours de la deuxième année de mesure (2018+) où la part d'autoconsommation était de 67,5% et le degré d'autosuffisance de 57,4%.

Comme prévu, le rendement spécifique de l'installation de façade est inférieur à celui d'une installation de toit équivalente. La production annuelle par unité de puissance installée, moyennée sur les quatre façades (compte tenu de la forte proportion de la façade nord), se monte à 30% de l'énergie produite par le système en toiture. Les meilleurs modules sur la façade sud ou ouest ont une part beaucoup plus élevée avec 80% du système de toiture. L'objectif du projet est axé sur l'autoconsommation, la réduction de la réinjection sur le réseau ainsi que la compensation saisonnière.

## Summary

For the two assembled multi-family houses from the 1980s at Hofwiesenstrasse 22 and Rothstrasse 48 in Zurich, a holistic refurbishment concept with an optimal building envelope and intelligent building services was created. On the existing building surface, a compaction (spatial extension) was made around two storeys.

Planning began in 2014, and in September 2016, the renovation of the 22 apartments and the addition of eight additional rooftop apartments were completed and tenants were able to move into their apartments. The building has a ventilated "active glass façade" and fits into the urban context in the middle of Zurich. This dynamic glass façade produces photovoltaic power with a capacity of  $110 \text{ W/m}^2$  and almost transforms the building into a plus energy building after the renovation.

In the future, the project will encourage architects and planners to plan ventilated facades above all as "active glass facades". If this is possible during a renovation (with a complicated facade envelope), this is easily possible with any new building.

According to the calculations according to SIA 2040 «SIA Energy Efficiency Path», the building with  $48.0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  of non-renewable primary energy falls below the target value by 60%. Greenhouse gas emissions fall below the target level by 39% with  $9.2 \text{ kg CO}_2$  equivalent/ $\text{m}^2\text{a}$ .

The aim of the project was, among other things, to achieve a high self-consumption. In the first year of measurement (2017+), the self-consumption share is 38.6% and self-sufficiency is 33.5%. In the second year of measurement (2018+) with battery, the self-consumption share was 67.5% and the degree of self-sufficiency 57.4%.

As expected, the specific yield of the façade installation is lower than that of a corresponding, equivalent roof installation. The annual production per installed capacity, averaged over the four facades (taking into account the high proportion of the north facade), is 30% of the energy generated by the roof system. The best modules on the south or west facade have a much higher share with 80% of the roof system. In this project, however, the focus is clearly on self-consumption, the reduction of recovery and seasonal compensation.



## Take-home messages

- Die Gewichtung der Ästhetik als „4. Dimension der Nachhaltigkeit“ ist ein wesentlicher Aspekt für den Durchbruch der „aktiven Glasfassade“ in den letzten Jahren.
- Die Photovoltaik produziert über die Fassade (vor allem Ost, Süd und West) einen konstanten Ertrag über den Tag, wie auch übers Jahr verteilt. Die Kombination von Fassade und Dach ergeben ein recht ausgeglichenes Produktionsprofil.
- Die gestalterische Freiheit für die „aktive Glasfassade“ (unterschiedliche Formate, freie Form, verschiedenen Farben und Textur, etc.) nimmt zu, bei gleichzeitigen sinkenden Investitionskosten.
- PlusEnergieBauten mit Batterien können zur Netzstabilität auf Quartierebene beitragen.

## Danksagung

An dieser Stelle möchten wir bei unseren Finanzierungspartner/-innen bedanken, die dieses Projekt ermöglicht haben:

- Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie (BFE), Mühlestrasse 4, 3063 Ittingen
- Kanton Zürich, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
- Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), Tramstrasse 35, 8050 Zürich
- EcoRenova AG, Zweierstrasse 35, 8004 Zürich
- Solarmarkt GmbH



# Inhaltsverzeichnis

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Zusammenfassung.....</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>Résumé .....</b>                                            | <b>3</b>  |
| <b>Summary .....</b>                                           | <b>4</b>  |
| <b>Take-home messages .....</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>Danksagung.....</b>                                         | <b>5</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                                | <b>6</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                             | <b>7</b>  |
| <b>1     Einleitung .....</b>                                  | <b>8</b>  |
| 1.1   Ausgangslage und Hintergrund .....                       | 8         |
| 1.2   Motivation des Projektes .....                           | 9         |
| 1.3   Projektziele .....                                       | 9         |
| <b>2     Anlagenbeschrieb .....</b>                            | <b>10</b> |
| <b>3     Vorgehen und Methode.....</b>                         | <b>15</b> |
| <b>4     Ergebnisse und Diskussion .....</b>                   | <b>16</b> |
| 4.1   Photovoltaik-Anlage.....                                 | 16        |
| 4.2   Energie- und Lastmanagement .....                        | 20        |
| 4.3   2000-Watt-Gesellschaft .....                             | 29        |
| 4.4   Netzbeeinflussung .....                                  | 30        |
| <b>5     Schlussfolgerungen und Fazit .....</b>                | <b>37</b> |
| <b>6     Ausblick und zukünftige Umsetzung.....</b>            | <b>38</b> |
| <b>7     Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b> | <b>39</b> |
| <b>8     Kommunikation .....</b>                               | <b>40</b> |
| <b>9     Publikationen .....</b>                               | <b>40</b> |



## Abkürzungsverzeichnis

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| a:    | Jahr                                |
| BIPV: | Building integrated Photovoltaik    |
| BSA:  | Bund Schweizer Architekten          |
| EBF:  | Energiebezugsfläche                 |
| PV:   | Photovoltaik                        |
| VHK:  | vorgehängten hinterlüfteten Fassade |



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

### **Energiepolitische Ausgangslage**

Vor dem Hintergrund der in der Gemeindeordnung der Stadt Zürich verankerten Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft sowie der Energiestrategie 2050 auf Bundesebene ist ein starker Ausbau der Stromproduktion aus neuen erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik zu erwarten. Dadurch verändert sich die Energieerzeugungsstruktur in zweierlei Hinsicht: Zum einen wird Strom vermehrt in dezentralen Anlagen erzeugt, zum anderen produzieren diese Anlagen den Strom wetterabhängig und damit fluktuierend, was die Herausforderungen bei dem zu jedem Zeitpunkt erforderlichen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch im Netz erhöht.

### **Ausgangslage bestehendes Objekt**

Beim Objekt Hofwiesenstrasse 22/ Rothstrasse 48 in Zürich handelt es sich um einen typischen Bau aus den frühen 80er Jahren, welcher bereits eine umfassende Sanierung benötigt. Das Gebäude liegt oberhalb des Schaffhauserplatzes und wird zweiseitig von einer stark befahrenen Strasse sowie von zwei Tramlinien umfahren. Der Hauptbahnhof Zürich befindet sich in der Nähe.

Die Eigentümerschaft stellte das Gebäude für ein Leuchtturmprojekt zur Verfügung. Für 30 Jahre übernimmt die EcoRenova die Fassaden- und die Dachkonstruktion im Contracting. Als Investorin für nachhaltige Pilotprojekte übernimmt sie damit das finanzielle Risiko.

Die EcoRenova AG hat bereits vor dem Umbau die Immobilienbewirtschaftung der Liegenschaft übernommen. Damit bestand die Möglichkeit durch eine im nachhaltigen Bauen erfahrene Verwaltung sowohl Vermietung als auch Betrieb über Jahre optimal zu gewährleisten.

### **Projektbeschreibung**

Das Objekt mit 20 Wohnungen und 2 Büros musste vor allem innen umfassend saniert werden. Gemäss der Bauordnung und Abklärung in einer Vorstudie konnte ein Potential für eine Aufstockung um zwei Geschosse mit weiteren 8 Wohnungen realisiert werden.

Das 4-geschossige Wohngebäude aus den 80er Jahren wurde als 2-Schalenmauerwerk mit einer Zwischendämmung von 8 cm erstellt. Die äussere Schale konnte aus statischen Gründen die Anforderungen der neu hinterlüfteten Fassadenhaut nicht aufnehmen und musste abgebrochen werden.

Der Energieeffizienz wurde eine hohe Bedeutung beigemessen. Zuerst wurde der Bedarf an Wärmeenergie maximal gesenkt. Die Gebäudehülle ist optimal mit U-Werten um die 0.09 bis 0.12 W/m<sup>2</sup>K gedämmt. Der Heizwärmebedarf mit Wohnungslüftung beträgt 10,2 kWh/m<sup>2</sup> a Energiebezugsfläche (EBF).

Die Energieproduktion erfolgt an Fassade und Dach über Photovoltaik und teilweise mit thermischen Sonnenkollektoren mit einer Absorberfläche von 15.4 m<sup>2</sup>.

Die Speicherung der Wärme und des elektrischen Stromes sowie der Bezug und Verbrauch werden aufeinander abgestimmt.

Für sämtliche Geräte mit Strom wurden die besten technischen Standards gewählt.



## 1.2 Motivation des Projektes

Zur Erreichung des PlusEnergieBau-Standards oder auch Minergie-A wird bei mehrgeschossigen Gebäuden die Aktivierung der Fassade unerlässlich. Photovoltaik muss zur Energieproduktion in die Fassade integriert werden. Für ArchitektInnen ist jedoch der gestalterische Spielraum für ein Projekt/ eine Fassade wichtig.

Deshalb wurde die Zielsetzung auch in dieser Hinsicht gelegt, eine Gebäudehülle zu entwickeln, welche neben den schützenden, ästhetischen und energetischen Anforderungen auch als Energielieferant dient. Es stellen sich folgende Herausforderungen:

- Integration der PV-Module auf einer bestehenden Gebäudehülle mit vorgegebenem Fensterraster
- Hohe ästhetische und technische Anforderung an die PV-Module wie Farbe, Erträge (Fassade mit Teilbeschattungen und diffuser Lichtanteil), Verkabelung usw.
- Entwicklung einer kostengünstigen, flexiblen und demontierbaren Montageart der PV-Module auf eine „wärmebrückenfreie“ Unterkonstruktion
- Umgang mit Toleranzen, Massgenauigkeiten wie Dummies, Fensterzargen usw.

Die hinterlüftete Photovoltaikfassade stellt eine besondere Herausforderung, die sich kostenintensiv auswirkt und nicht bei allen Altbauten in dieser Masse besteht. Nebst den vielen Gebäudekanten weist das bestehende Gebäude für seine Grösse eine relative hohe Gebäudehüllzahl von 1.13 auf. Ein gut geplanter Neubau mit gleicher Energiebezugsfläche könnte zukünftig ohne Weiteres die Gebäudehülle um 30 % und somit auch die Fassadenkosten um 30% reduzieren.

Die hinterlüftete Fassadenkonstruktion mit Photovoltaik-Bekleidung erfüllt hohe ästhetische Ansprüche und sollte zukünftig preislich mit hinterlüfteten Glasfassaden konkurrenzfähig sein.

## 1.3 Projektziele

Für ein Mehrfamilienhaus aus den 80er-Jahren in Zürich wurde ein gesamtheitliches Sanierungskonzept mit einer optimalen Gebäudehülle und intelligenter Haustechnik zum PlusEnergieBau erstellt. Der Planungswert gemäss SIA 2040 unterschreitet die Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft\*. Die hinterlüftete Fassadenkonstruktion mit Photovoltaik-Bekleidung („aktive Glasfassade“) erfüllt hohe ästhetische Ansprüche und sollte zukünftig preislich mit hinterlüfteten Glasfassaden konkurrenzfähig sein. Die Maximierung des Eigenverbrauchs der aus der Photovoltaik produzierten Energie wird angestrebt. Dazu werden die Wärmepumpe und ein Teil der Elektrobezüge zur Lastverschiebung einbezogen. Zudem werden Aussagen zu Auswirkungen auf die Netzstabilität (innerhalb des Quartiers) und deren Konsequenzen gemacht.

in Stichworten:

- Gesamtheitliche Sanierung und Unterschreitung der Anforderungen der 2000-Watt Gesellschaft um mindestens 50 %
- Entwicklung „bezahlbarer“ photovoltaikintegrierter Fassade mit hohen ästhetischen Ansprüchen
- Optimierung des PV-Eigenverbrauchs inkl. Lastverschiebung auf Gebäude- und Quartierstufe
- Erkenntnisse über Auswirkungen und Massnahmen auf das (Quartier-)Netz

\*Die Unterschreitung der Anforderungen der 2000 Watt-Gesellschaft um 50 % und PlusEnergieBau wurde in Absprache mit dem BFE zugunsten der höheren Anforderung an die Ästhetik aufgehoben.



## 2 Anlagenbeschreibung

Die Bauarbeiten inklusive "aktiver Glasfassade" und der Umgebung konnten im September 2016 abgeschlossen werden. Die Mieter der 28 Wohnungen konnten im Laufe des Septembers ihre Wohnungen beziehen. Die zwei Ladenmieter blieben während der Bauzeit in der Liegenschaft. Die Photovoltaikanlage auf dem Dach liefert seit dem 13. April 2016 Strom ans Netz. Im September des gleichen Jahres, konnte der letzte Wechselrichter den Photovoltaikstrom von der Fassade einspeisen. Die Einrichtung der Messinstallation dauerte bis November 2016.

### Photovoltaikanlagen Fassade und Dach

|                                    | Anlage Dach                    | Anlage Fassade                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Total                |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Modultyp                           | Winaico;<br>WSP 310 M6         | Glas/Glas-Module monokristalline<br>PVP Photovoltaik GmbH, Wies/A                                                                                                                                                                                                                                              |                      |
| Wechselrichter                     | SolarEdge 25k<br>3-phasig      | 8 Stück SolarEdge 25k / 17k<br>3-phasig                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |
| Leistungsoptimierer                | SolarEdge Opti-<br>mierer P700 | SolarEdge Optimierer P700                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                      |
| Installierte Leistung<br>(DC)      | 31 kW <sub>p</sub>             | 159 kW <sub>p</sub><br>S/O/W/N: ca. 25/23/22/30 %                                                                                                                                                                                                                                                              | 190 kW <sub>p</sub>  |
| Aufstellwinkel                     | 15°                            | 90°                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                      |
| Anzahl Module aktiv                | 100 Stück                      | 1'545 Stück<br>S/O/W/N: ca. 25/23/22/30 %                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1'645 Stück          |
| Leistung Modul                     | 310 W <sub>p</sub>             | 28 – 170 W <sub>p</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                      |
| Leistung pro m <sup>2</sup>        | 188 W <sub>p</sub>             | 110 W <sub>p</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                      |
| Installierte Fläche<br>aktiv       | 165 m <sup>2</sup>             | 1'586 m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1'751 m <sup>2</sup> |
| Installierte Fläche<br>passiv      | -                              | 34 m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                      |
| Geplanter Ertrag                   | 28'600 kWh/a                   | 53'100 kWh/a                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 81'700 kWh/a         |
| Anzahl monokristalli-<br>ne Zellen | 6'000 Stück                    | 50'746 Stück                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 56'746 Stück         |
| Glasaufbau Module<br>Fassade       |                                | <ul style="list-style-type: none"><li>• 4 mm Frontglas TVG satiniert mit Digital-Keramikdruck</li><li>• Einkapselungsfolie EVA (Ethylen-Vinylacetat-Copolymer)</li><li>• Zellen 5.13 W/Zelle von Gintech</li><li>• Einkapselungsfolie EVA</li><li>• 4 mm Rückglas TVG</li></ul> Gesamtdicke von 8.5 +/- 0.05mm |                      |

Abbildung 1: Angaben zu Photovoltaikanlagen

### Ausgangslage Fassadenkonstruktion

Das Prinzip der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF) gewährleistet als eines der sichersten Fassadensysteme einen dauerhaften Schutz des Gebäudes. Anders als bei Wärmedämmverbundsys-



temen gibt es bei der VHF eine konstruktive Trennung der Funktionen Wärme- und Witterungsschutz. Dadurch entsteht eine Lebenserwartung von mehr als 50 Jahren und die Gewähr eines einfachen Rückbaus mit Trennung der Bauteile.

### **Unterkonstruktion**

Die statische Brücke zwischen Rohbau und Fassadenbekleidung bildet die primäre Unterkonstruktion. Dabei ist immer der Spagat zwischen notwendiger Stabilität und möglichst geringen Wärmebrücken zu machen. An der Hofwiesenstrasse wurde diese Aufgabe mit der Kombination aus Edelstahlkonsolen für Fassadengewicht und Windlast und aus wärmebrückenfreien GFK-Konsolen nur für Windlast gelöst. Diese Verbindung schafft den aktuell kleinstmöglichen Wärmebrückeneffekt. Eine entscheidende Bedingung, um die guten Leistungen der Dämmpakete nicht durch viele durchgehende Metallteile zu schwächen.

Für die sekundäre Unterkonstruktion wurde ein einfaches Schienensystem aus Aluminium angewandt. Jede Glasreihe steht dabei unten auf einer horizontalen Schiene und ist oben ebenfalls an einer Schiene zurückgebunden. Das System wurde so gewählt, dass die PV-Module nicht angehoben sondern nur eingekippt und fixiert werden müssen. Das vereinfacht sowohl Ein- und Ausbau wie auch das Handling mit der Verkabelung der Photovoltaik.

### **Befestigungstechnik der Fassadenpanele (Module) - Klebetechnik**

Die Vorteile der elastischen Klebetechnik sind, dass über die Klebstoffverbindung die auftretenden Kräfte durch Eigengewicht und Wind in die Fläche eingeleitet werden können. Spannungsspitzen, die bei gerahmten oder geklemmten Modulen im Glasrandbereich entstehen können, werden über die Elastizität des Klebstoffes ausgeglichen. Dieses Prinzip wurde auch bei der Hofwiesenstrasse konsequent angewandt. Dabei werden pro Glas zwei vertikale Aluminiumprofile seitlich randnah aufgeklebt. An den Enden dieser Profile liegen die Klammern, welche in die vorgängig beschriebenen Tragschienen eingreifen können.

Die Klebetechnik bedingt zwar ein hochwertiges Glas-Glas-Modul, weil nur auf glatten Oberflächen von Glas oder Aluminium zuverlässig geklebt werden kann. Der Verzicht auf eine seitliche Rahmung bringt aber dennoch eine Kostenreduktion von ca. 5%.

### **Anforderungen an die aktive Glasfassade**

*Möglichst geringe Anzahl von Modul-Grössen anstreben:* Geringere Kosten, da einfachere Prozessabwicklung in der Planung, Produktion und Montage.

*Jedes Modul demontierbar:* Jedes PV Modul kann durch einen ausgebildeten Monteur mit geringem Aufwand demontiert werden. Konzept bezüglich der Zugänglichkeit erarbeiten (z.B. Einsatz Skyworker).

*Möglichst keine Beschattung:* Optimierte Bank-, Sturz- und Brüstungsausbildung.

*Geringe Verschmutzung:* Schmutzwasser wenn möglich gegen das Gebäude (z. Bsp. Dachfläche) abführen. Wenn nicht anders möglich (z.B. Fensterbank), genügend Gefälle und ausreichender Vorsprung zur Fassade.

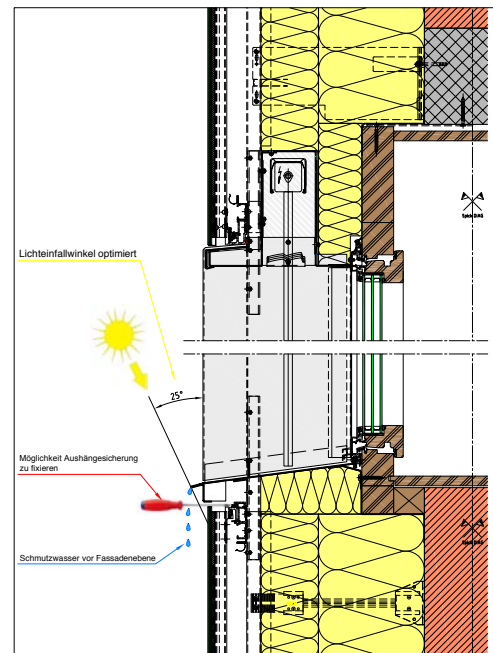
*Schwarzer Hintergrund:* Damit die Installationen durch die offenen Fugen nicht sichtbar in Erscheinung treten, wurden alle Installationen, Profile und Dämmungen in schwarz gehalten.



**Brandschutz:** Die Fassadenkonstruktion hat die Anforderung entsprechend des Brandschutzes zu erfüllen. Bezüglich der PV-Anlage hat VKF (Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen) ein Brandschutzmerkblatt 'Solaranlagen' herausgegeben, [www.praever.ch/de/bs/vs](http://www.praever.ch/de/bs/vs)

**Elektro-Installationen, Sicherheit:** Die Anwendung und Einhaltung relevanter Normen im elektrischen Bereich sind Voraussetzung für die Planung und Installation. Swissolar (Schweizerische Fachverband für Sonnenenergie) hat ein Merkblatt Nr. 6 'Sammlung von anwendbaren Vorschriften' herausgegeben.

**Verkabelung PV-Module:** Verkabelung ohne Zug auf Steckverbindung und Verbindungskabeln; die Kabel an der Unterkonstruktion fixieren, damit bei den Kabelanschlussstellen kein Knicken auftreten und infolge Zuglast kein Kabelbruch entsteht kann; eine saubere Beschriftung der Kabelverbindungen.



**Abbildung 2:** Detailschnitt Fenster aktive Glasfassade

**Leistungsoptimierer (Optimizer):** Platzierung in der Hinterlüftungsebene ist sinnvoll; diese sollten jedoch ohne grossen Aufwand zugänglich sein; möglichst kurze und direkte Verkabelungsdistanzen realisieren, um grössere Leistungsverluste zu vermeiden und Kabelkosten einzusparen; Leitungsführung in der Hinterlüftungs- oder in der Dämmebene möglich.

**Montage:** Klare Logik der Modulbeschriftung ist äusserst wichtig; gute Terminierung mit Anlieferungskonzept; Verlege-Anleitung für Unterkonstruktion, Blitzschutz, PV-Module und Verkabelung abgeben inkl. Instruktion auf der Baustelle; Messkonzept und Protokollierung während der Montage definieren.

**Gerüstanker:** PV Module bei den Gerüstankern können nicht montiert werden; entsprechend ist ein Konzept bezüglich Montageablauf ausarbeiten.

**Unterhalt und Reinigung:** Konzept für Unterhalt der Fassade erarbeiten.

**Anlagedokumentation:** vollständigen Anlagedokumentation erstellen und dem Anlageinhaber und -betreiber abgeben.

### **Module für die aktive Glasfassade und Leistungsoptimierer**

Das Gebäude weist rund 1'650 aktive Module in Fassade und Dach auf.

Von den 18 verschiedenen Modultypen an der Fassade sind 13 Modulformate mit Zellen ausgestattet. Diese 13 Modultypen unterscheiden sich nicht nur in der Grösse, sondern auch in der Anzahl der verbauten PV-Zellen. Bei den grösseren Modulen wurden mehrere in einem String an die Optimierer angeschlossen.

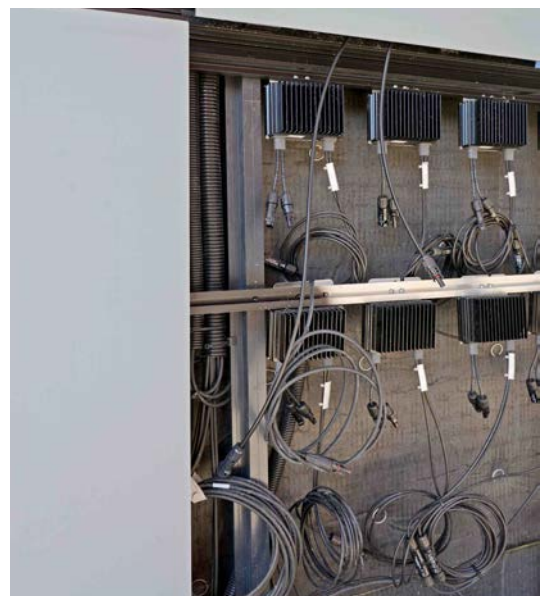


| Modul-<br>typ | MPP Leis-<br>tung | Leer-<br>laufspannung | Kurzschluss-<br>strom | MPP Span-<br>nung | MPP<br>Strom | Ge-<br>wicht | Zel-<br>len | Flä-<br>che |
|---------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|               | W                 | V                     | A                     | V                 | A            | kg           | -           | m2          |
| A             | 155               | 32.45                 | 6.16                  | 26.78             | 5.79         | 31           | 48          | 1.376       |
| A1            | 115               | 24.34                 | 6.16                  | 19.87             | 5.79         | 31           | 36          | 1.376       |
| B             | 105               | 21.63                 | 6.16                  | 18.14             | 5.79         | 23           | 32          | 1.001       |
| C             | 75                | 16.22                 | 6.16                  | 12.96             | 5.79         | 19           | 24          | 0.834       |
| D             | 50                | 10.82                 | 6.16                  | 8.64              | 5.79         | 14           | 16          | 0.639       |
| E             | 50                | 10.82                 | 6.16                  | 8.64              | 5.79         | 13           | 16          | 0.57        |
| G             | 175               | 36.50                 | 6.16                  | 30.24             | 5.79         | 36           | 54          | 1.584       |
| H             | 115               | 24.34                 | 6.16                  | 19.87             | 5.79         | 26           | 32          | 1.152       |
| I             | 85                | 18.25                 | 6.16                  | 14.69             | 5.79         | 22           | 27          | 0.96        |
| K             | 55                | 12.17                 | 6.16                  | 9.50              | 5.79         | 17           | 18          | 0.736       |
| L             | 55                | 12.17                 | 6.16                  | 9.50              | 5.79         | 15           | 18          | 0.656       |
| N             | 55                | 12.17                 | 6.16                  | 9.50              | 5.79         | 15           | 18          | 0.683       |
| O             | 35                | 8.11                  | 6.16                  | 6.05              | 5.79         | 11           | 12          | 0.497       |
| P             | 25                | 6.08                  | 6.16                  | 4.32              | 5.79         | 9            | 9           | 0.414       |

**Abbildung 3:** Modultypen

Auf Grund der teilbeschatteten Fassadenflächen (Fassadenabsätze, Balkone usw.) und der Möglichkeiten, die verschiedenen Fassadenflächen miteinander zu koppeln, wurde als Verkabelungssystem das System von Solaredge gewählt.

Die Leistungsoptimierer wurden mehrheitlich ganz unten an der Fassade positioniert, so dass sie ohne die Notwendigkeit eines Gerüsts ausgetauscht werden können. Dies dient der Sicherheit und verringert den Aufwand von Wartungsarbeiten. Dafür wird durch die zusätzliche Länge der Kabel ein leicht höherer Leistungsverlust in Kauf genommen.



**Abbildung 4:** Installation der Leistungsoptimierer im zugänglichen Sockelbereich



### Auslegung der Batterie

Eines der Projektziele war die Maximierung des Eigenverbrauches, wofür eine möglichst grosse Speicherkapazität benötigt wird. Daher war letztlich der für die Batterie eingeplante Finanzbetrag massgebend für die Dimensionierung: 150 kWh / 36 kW.

Aus wirtschaftlicher Sicht wäre eine Speicherkapazität von rund 100 kWh optimal gewesen, wie die Analyse der Produktions- und Verbrauchsdaten Juni bis August 2017 zeigten.

Aus ökologischer Sicht sollte auf eine Batterie aktuell verzichtet werden. Die Umweltwirkungen einer Batterie sind heute noch höher als diejenigen des Stromnetzes in der Schweiz



**Abbildung 5:** Batterieschränke im 2. Untergeschoss

### Umweltkennwerte

### UBP13 g CO<sub>2eq</sub>

|                                                            | UBP13 | g CO <sub>2eq</sub> |                   |
|------------------------------------------------------------|-------|---------------------|-------------------|
| 1 kWh Strom lokal mit PV erzeugt (Flachdachanlage)         | 112   | 81                  | (KBOB 2016)       |
| 1 kWh Strom lokal mit PV erzeugt (Schrägdachanlage)        | 124   | 77                  | (KBOB 2016)       |
| 1 kWh Strom lokal mit PV erzeugt (Fassadenanlage)          | 175   | 115                 | (KBOB 2016)       |
| 1 kWh Strom aus dem Netz bezogen (Schrägdachanl.)          | 174   | 96                  | (KBOB 2016)       |
| 1 kWh Strom lokal via Batterie verbraucht (Schrägdachanl.) | 224   | 109                 | (treeze/ewz 2015) |
| 1 kWh Strom vom Netz ewz bezogen, Anteil Verteilnetz ewz   | 31    | 5                   | (treeze/ewz 2018) |

**Abbildung 6:** Umweltkennwerte des Stroms

Im Sinne der Eigenverbrauchsoptimierung läuft die Batterieregelung im Modus "Eigenverbrauch". Es wurden keine netzdienlichen Massnahmen vorgesehen. Die Batterieregelung im Modus "Peak Shaving" wurde lediglich während einer kurzen Periode getestet und diese lief sehr gut.

Batterie Varta flex storage, 150 kWh, 36 kW von Solarmarkt GmbH.



### 3 Vorgehen und Methode

Im 2015 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auswahl und Produktion der Module unter Berücksichtigung der Gestaltung
- Einfache Fassadenkonstruktion, Lösungen mit Normdetails, wenn möglich einheitliche Dämmstärken (damit nicht jede Fassade eine andere Stärke aufweist)
- Wärmebrückenfrei und flexible Unterkonstruktion
- Nicht sichtbare und einfach demontierbare Aufhängung der PV-Module
- Einfache und kostengünstige Lösung der Zargenausbildung (Anforderung: Ausbildung Leibung, Sturz (Storenkasten), Fensterbank, gestalterisches Element, Aufnahme Toleranzen, addierbar usw.

Im 2016 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Abschluss der Bauarbeiten und Inbetriebnahme
- Auswertung der Konstruktion und Photovoltaikanlage an Fassade und Dach
- Definition der Beschreibung der Wärmepumpenregelung.
- Definition des Messkonzeptes.
- Festlegung der Untersuchungsziele für das Jahr 2017 und Erarbeitung der Referenzszenarien mit der Produktionserwartung der PV-Anlagen respektive der Produktions- und Verbrauchserwartung der Wärmepumpenanlage.

Im 2017 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auswertung der Daten des solaren Anlagenteils (PV-Anlagen).
- Auswertung der Daten des hydraulischen Anlagenteils (WP-Anlagen).
- Befragung und Auswertung zum Benutzerverhalten.
- Auswertung der Energieeffizienz anhand der 2000-Watt-Gesellschaft
- Festlegung und Bestellung des Batteriespeichers (Installation im März 2018).

Im 2018 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auswertung der Daten des solaren Anlagenteils (PV-Anlagen).
- Auswertung der Daten zum Batteriespeicher.
- Auswertung der Daten des hydraulischen Anlagenteils (WP-Anlagen).

Im 2019 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Auswertung der Daten des solaren Anlagenteils (PV-Anlagen) bis Abschluss 2. Messjahr.
- Auswertung der Daten zum Batteriespeicher.
- Untersuchung der Netzbeeinflussung anhand von Simulationen.



## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Photovoltaik-Anlage

#### Messjahr 1 und 2

Das erste Messjahr dauerte vom 1. Februar 2017 bis zum 31. Januar 2018 und wird in diesem Bericht mit 2017+ bezeichnet. Die Periode des ersten Messjahres weist am Standort Zürich Fluntern 109% der Sonnenstunden im Vergleich zur Normperiode 2001-2010 auf.

Das zweite Messjahr dauerte vom 1. April 2018 bis zum 31. März 2019 und wird in diesem Bericht mit 2018+ bezeichnet. Die Periode des zweiten Messjahres weist am Standort Zürich Fluntern hohe 126 % der Sonnenstunden im Vergleich zur Normperiode 2001-2010 auf.

#### Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad

Während die Istwerte im Messjahr 2017+ die Erwartungen übertreffen, liegen die Istwerte für das Messjahr 2018+ etwas unter den Erwartungen. Ob dies auf den aussergewöhnlichen Sommer 2018 zurückzuführen ist oder die Erwartungen zu hoch angesetzt waren, wird erst die Auswertung der Folgejahre zeigen.

Trotz der hohen Sonnenscheindauer ist der Gesamtertrag im Messjahr 2018+ gegenüber dem Messjahr 2017+ nahezu gleichgeblieben. Vermutlich dürften die hohen Temperaturen und die sehr lange Warmperiode den Ertrag begrenzt haben. Ein Indiz dafür ist, dass auch der solare Ertrag auf dem gesamten Stadtgebiet Zürich im Jahr 2018 trotz höherer installierter Leistung gegenüber dem Vorjahr geringer war.

| Jahr                  | 2017+ | 2018+ |
|-----------------------|-------|-------|
| Autarkiegrad          | 33.5% | 57.4% |
| Eigenverbrauchsanteil | 38.6% | 67.5% |

Aus Sicht der Eigenverbrauchsoptimierung kann ein Batteriespeicher nie zu gross sein. Allerdings hätte ein grösserer Speicher im Messjahr 2018+ den Eigenverbrauchsanteil lediglich im Monat März 2019 geringfügig positiv beeinflusst. Ein Batteriespeicher ist ein Tagesspeicher und kein saisonaler Speicher und diese Aufgabe hat die Batterie angesichts der hohen Werte der Autarkie in den Sommermonaten sehr gut erfüllt. Aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht ist der installierte Batteriespeicher mit 150 kWh jedoch zu gross.

#### Spezifischer Ertrag

Der Photovoltaik-Ertrag der gesamten Anlage liegt bei rund 75'076 kWh im Messjahr 2017+ und 78'127 kWh im Messjahr 2018+.

Die Module, welche sich innerhalb von Balkon- oder Terrassennischen befinden, hatten auf Grund der Beschattung durch die Geometrie und durch davorstehende Gartenmöbel und Pflanzen, einen sehr geringen Ertrag. Auf einen Anschluss kann in solchen Situationen in Zukunft verzichtet werden.

Die verschiedenen Ausfälle oder Probleme bei den Leistungsoptimierern im Messjahr 2017+ führten zu einem nur sehr geringen Ertragsverlust und haben keine Auswirkung auf den Gesamtertrag.

Der spezifische Ertrag liegt erwartungsgemäss tiefer als bei einer entsprechenden ertragsgleichen Dachanlage. Im Vordergrund stehen in diesem Projekt jedoch klar der Eigenverbrauchsanteil, die Reduktion der Rückspeiseleistung sowie der saisonale Ausgleich.



| Messjahr | Fassadenanlage                                         | Dachanlage                                              | Gesamtanlage                                           |
|----------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2017+    | 289 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>29 kWh/m <sup>2</sup> *a | 939 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>176 kWh/m <sup>2</sup> *a | 395 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>43 kWh/m <sup>2</sup> *a |
| 2018+    | 304 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>31 kWh/m <sup>2</sup> *a | 960 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>180 kWh/m <sup>2</sup> *a | 411 kWh/kW <sub>P</sub> *a<br>45 kWh/m <sup>2</sup> *a |

Abbildung 6: Übersicht Spezifischer Ertrag

### Leistung der Module

Die farbigen Module bringen in etwa die erwartete Leistung, gemäss den Angaben des PV-Lieferanten. Das Schwachlichtverhalten ist somit kein grosses Thema bzw. steht nicht im Vordergrund.

Die Entwicklung der Module für die „aktive Glasfassade“ schreitet zügig voran. Es werden neue Module auf den Markt kommen, die eine lichtdurchlässigere Beschichtung für den Farbton aufweisen und Leistungswerte über 130 W<sub>p</sub>/m<sup>2</sup> ermöglichen bzw. die Verluste durch die Beschichtung minimieren.

### Werte Photovoltaik-Anlage im Messjahr 2017+

Im Messjahr 2017+ hat die PV-Anlage Fassade und Dach einen Ertrag von Total 75'076 kWh produziert, die Fassadenanlage 45'977 kWh (61%) und die Dachanlage 29'099 kWh (39%). In der folgenden Tabelle wurden die Flächen optimiert, d.h. alle Flächen, wo es keine oder nur minimale Erträge gab, wie Balkonnischen, Flächen unter Vorsprüngen, wurden weggelassen.

|                                        | Nord    | Ost      | Süd    | West   | Total Fassade/<br>Differenz |
|----------------------------------------|---------|----------|--------|--------|-----------------------------|
|                                        | S+162 ° | S- 108 ° | S- 18° | S+72 ° |                             |
| Neigung                                | 90°     | 90°      | 90°    | 90°    |                             |
| Fläche optimiert (m <sup>2</sup> )     | 460     | 330      | 340    | 300    | 1'430 / - 156               |
| Leistung (kW <sub>p</sub> )            | 40.5    | 33.1     | 35.3   | 29.6   | 138.5 / -20.5               |
| Jahresertrag (kWh/a)                   | 7'622   | 7'628    | 16'538 | 14'189 | 45'977 / ± 0                |
| Ertrag/Leistung (kWh/kW <sub>p</sub> ) | 188     | 230      | 468    | 479    |                             |
| Jahresertrag/m <sup>2</sup> (kWh)      | 16.5    | 23.1     | 48.6   | 47.3   |                             |
| Prozentanteil                          | 16.5 %  | 16.6 %   | 36.0 % | 30.9 % | 100 %                       |

Abbildung 7: Messwerte PV-Anlage Fassade mit Flächen optimiert (ohne Flächen ohne oder fast keine Erträge)

### Spezifischer Ertrag von Fassadenmodule ohne Eigenverschattung

Für die Ermittlung von Ertrags-Referenzwerten, wurden die Module mit dem höchsten Jahresertrag pro Fassadenausrichtung ermittelt und auf einen Quadratmeter Fläche berechnet. Diese 'beste Module' befinden sich in den oberen Bereichen der jeweiligen Fassadenfläche.

Auf Grund der verschiedenen Modulgrösse wurde für die Berechnung eine durchschnittliche Zellenzahl von 34.88 auf einen Quadratmeter eingesetzt.



|                                                      | Nord    | Ost     | Süd    | West   |  |
|------------------------------------------------------|---------|---------|--------|--------|--|
|                                                      | S+162 ° | S-108 ° | S-18 ° | S+72 ° |  |
| Bestes Modul<br>Jahresertrag/m <sup>2</sup><br>(kWh) | 39.9    | 47.8    | 81.8   | 81.0   |  |
| Ertrag/Leistung<br>(kWh/kW <sub>p</sub> )            | 365     | 438     | 749    | 742    |  |

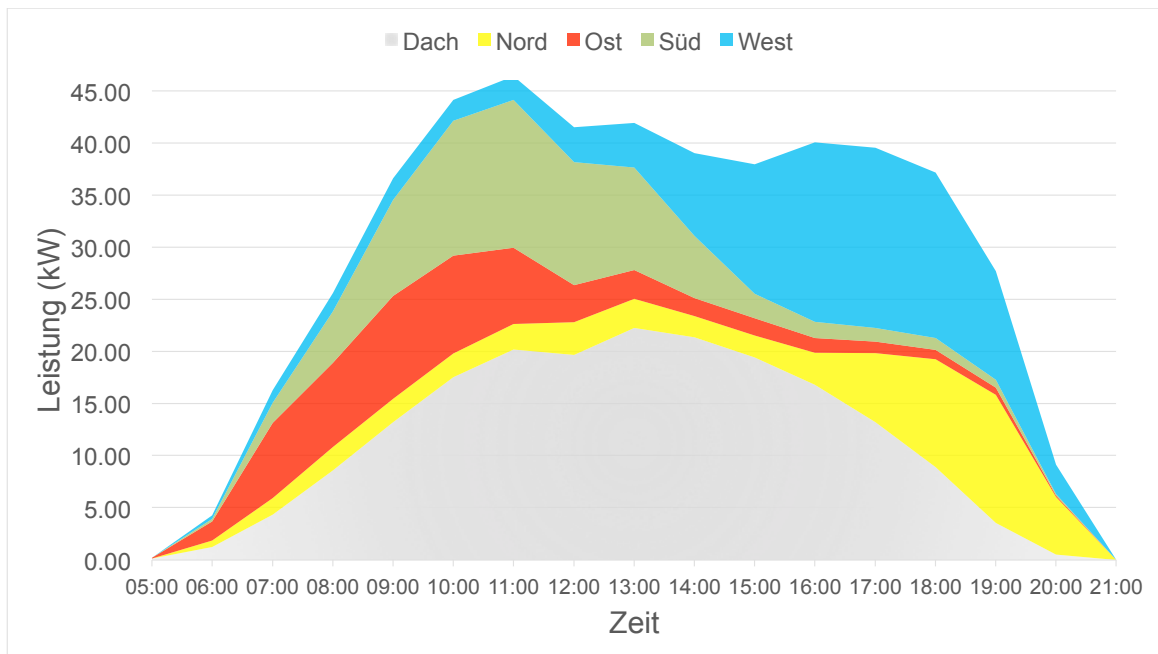
**Abbildung 8:** Spezifischer Ertrag von Fassadenmodulen ohne Eigenverschattung pro m<sup>2</sup>

|                                           | Ost 1. Fläche | Ost 2. Fläche | West 1. Fläche | West 2. Fläche | Total Dach |
|-------------------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|------------|
|                                           | S-108 °       | S-108 °       | S+72 °         | S+72 °         |            |
| Neigung                                   | 20°           | 10°           | 20°            | 10°            |            |
| Fläche (m <sup>2</sup> )                  | 44.5          | 33            | 52.8           | 34.7           | 165        |
| Leistung (kW <sub>p</sub> )               | 8.4           | 6.2           | 9.9            | 6.5            | 31         |
| Jahresertrag<br>(kWh/a)                   | 7'199         | 5'755         | 9'463          | 6'682          | 29'099     |
| Ertrag/Leistung<br>(kWh/kW <sub>p</sub> ) | 860           | 928           | 954            | 1026           | 939        |
| Jahresertrag/m <sup>2</sup><br>(kWh)      | 161.8         | 174.4         | 179.2          | 192.5          | 176        |

**Abbildung 9:** Messwerte PV-Anlage Dach Messjahr 2017+

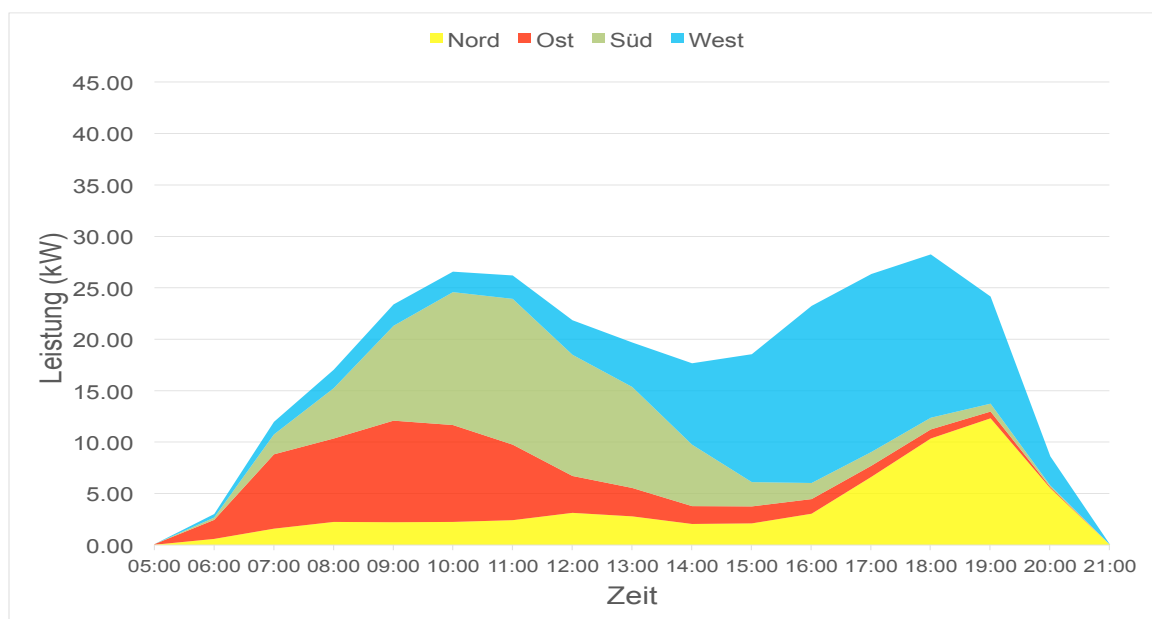
### Auswertung Tagesertrag vom 8. Juni 2017

Die Auswertung eines sonnigen Tages am 8. Juni 2017 zeigt einen konstanten Produktionsablauf über den Tag. Eine Dachanlage, die wie beim Leuchtturmprojekt im Idealfall eine Ost-Westausrichtung aufweist, hat eine jeweils mehr oder minder steil ansteigende Ertragskurve mit Ertragsspitze über Mittag danach wieder einen abfallenden Ertrag. Reine Südanlagen haben eine ausgeprägte Ertragsspitze über Mittag. Dank der „aktiven Glasfassade“ ist der Ertrag zwischen 9 und 18 Uhr relativ konstant mit zwei kleinen Spitzen um 11 Uhr und 16 bis 17 Uhr (Sommerzeit).



**Abbildung 10:** Auswertung Tagesertrag vom 8. Juni 2017 von Fassade und Dach

Am 8. Juni 2017 wurde 485 kWh Solarstrom produziert. Das Dach weist einen Anteil von 39 % auf, die Fassaden 12 % (Nord), 12 % (Ost), 16 % (Süd) und 21 % (West). Diese spezielle Ertrags-Verteilung an der Fassade kommt durch eine Verschattung der Ostfassade durch die Nachbargebäude, in den Morgenstunden, zustande. Die Südfassade hat durch den steilen Sonnenstand im Sommer auch einen relativ geringen Ertrag im Verhältnis zu den anderen Jahreszeiten. Die Dachanlage gleicht über den Tag die Fassaden sehr gut aus. Dies wird in der Abbildung ersichtlich, wenn nur die Fassadenerträge aufgezeichnet werden.



**Abbildung 11:** Auswertung vom 8. Juni 2017 nur Erträge der Fassaden (ohne Dach)



## 4.2 Energie- und Lastmanagement

### Reduktion der Rückspeiseleistung

Aufgrund der Neigung und Ausrichtung der Fassadenanlagen wird die theoretische, maximale Produktionsleistung von 190 kW<sub>P</sub> reduziert auf rund 82 kW<sub>P</sub> für eine ertragsgleiche Dachanlage.

Aufgrund der Neigung und Ausrichtung der Fassadenanlagen ergibt sich zudem ein flacheres Tagesprofil der Solarstromproduktion, wodurch die effektive maximale Produktionsspitze nochmals tiefer ausfällt.

Im Messjahr 2018+ wurde die Batterie im Modus „Eigenverbrauchsoptimierung“ betrieben und hat dabei erheblich zur Senkung der Belastung am Hausanschluss beigetragen. Die maximale Rückspeiseleistung lag in derselben Grösse der maximalen Bezugs- respektive Verbrauchsleistung. Allerdings ist dies für das Verteilnetz nur von langfristigem Nutzen, wenn die bereitgestellte Hausanschlussleistung entsprechend reduziert würde und in der Folge die PV-Leistungsspitze durch die Wechselrichter bei Bedarf beschränkt würden. Wirksam wäre diese Beschränkung (Kappung) dann meist nur beim Ausfall der Batterieanlage.

| Messjahr                                                | 2017+                 | 2018+                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Installierte Produktionsleistung PV-Dach und PV-Fassade | 190.0 kW <sub>P</sub> | 190.0 kW <sub>P</sub> |
| Äquivalente Leistung einer ertragsgleichen Dachanlage   | 79.0 kW <sub>P</sub>  | 82.2 kW <sub>P</sub>  |
| Maximale effektive Produktionsleistung                  | 58.6 kW               | 58.4 kW               |
| Rückspeiseleistung bei maximaler Produktion             | 50.7 kW               | 0.0 kW                |
| Maximale effektive Rückspeiseleistung                   | 50.7 kW               | 48.2 kW               |
| Maximale effektive Bezugsleistung                       | 36.0 kW               | 46.5 kW               |
| Maximale effektive Verbrauchsleistung                   | 36.0 kW               | 46.5 kW               |

### Verluste durch den Batteriebetrieb

Die räumlichen Verhältnisse bedingen, dass die Wechselrichter der PV-Anlage auf dem Dach installiert sind und die Batterie im Keller. Durch diese AC-Anbindung wird der produzierte Solarstrom drei Mal anstatt einmal in Wechsel- beziehungsweise Gleichrichtern umgewandelt. Der erwartete Wirkungsgrad der Batterie liegt damit für die AC-Anbindung bei 80-85% gegenüber 90-95% für eine DC-Anbindung.

Der effektiv erzielte Wirkungsgrad im Messjahr 2018+ lag bei rund 75%. Die effektiven Verluste betrugen 7'544 kWh. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die mittleren Leistungswerte zum Laden und Entladen der Batterie zwischen 5 kW und 10 kW lagen und damit in einem ungünstigen Bereich lagen. Zudem führten die langanhaltenden hochsommerlichen Temperaturen dazu, dass die Ventilatoren zur Kühlung der Batterie häufig laufen mussten. Die Ursache dieser Verluste wird noch genauer untersucht werden.

### Saisonaler Ausgleich

Die Fassadenanlage bewirkt eine Verlagerung der Produktion vom Sommerhalbjahr in das Winterhalbjahr im Vergleich zu einer ertragsgleichen Dachanlage. Dieser Effekt war 2018+ mit 2.9% der Sommerproduktion deutlich geringer als 2017+ mit 3.7% der Sommerproduktion.

### Eigenverbrauchsoptimierung

Der auf Eigenverbrauch optimierte Regelbeschrieb zur Bereitstellung von Wärme aus der Wärmepumpe getrennt für Heizung und Brauchwasser mit regeltechnisch insgesamt vier Speicherpaaren und nach Möglichkeit angepasst an das PV-Angebot ist recht umfangreich und damit komplex. Insgesamt hat dies jedoch 2017 und 2018 gut funktioniert.



### Speichervolumen

In diesem Objekt sollte der Brauchwasserspeicher mindestens so gross sein wie der technische Speicher, um zu vermeiden, dass die Wärmepumpe in der Nacht laufen muss. Dazu hätten je zwei Speicherpaare für Heizung und Brauchwasser eingesetzt werden sollen. Mit der Batterie, welche ab dem zweiten Betriebsjahr eingesetzt wird, verliert dieser Punkt jedoch an Bedeutung.

### Energieeffizienz

In einem Objekt nach Minergie Standard oder besser liegt der Wärmebedarf für Brauchwasser typisch über dem für die Heizung. Aufgrund der für Brauchwasser benötigten höheren Temperaturen, sind eher tiefere Arbeitszahlen zu erwarten. Die Arbeitszahlen liegen mit 3.0 für 2017 und 2.6 für 2018 jedoch in einem guten Bereich für Luft-Wasserwärmepumpen. Der tiefere Wert im Messjahr 2018+ ist auf die lange und warme Sommerperiode zurück zu führen. Der Ertrag des Sonnenkollektors war sehr hoch und in der Folge musste die Wärmepumpe in den Sommermonaten vielfach nur den ineffizientesten Anteil für die Brauchwassererwärmung liefern.

### Sonnenkollektoren

Die 15.4 m<sup>2</sup> Absorberflächen der thermischen Sonnenkollektoren produzierten im Berichtsjahr 2017+ insgesamt 9'070 kWh Wärme und im Berichtsjahr 2018+ gar 9'457 kWh und umgerechnet 614 kWh/m<sup>2</sup> Absorberfläche.

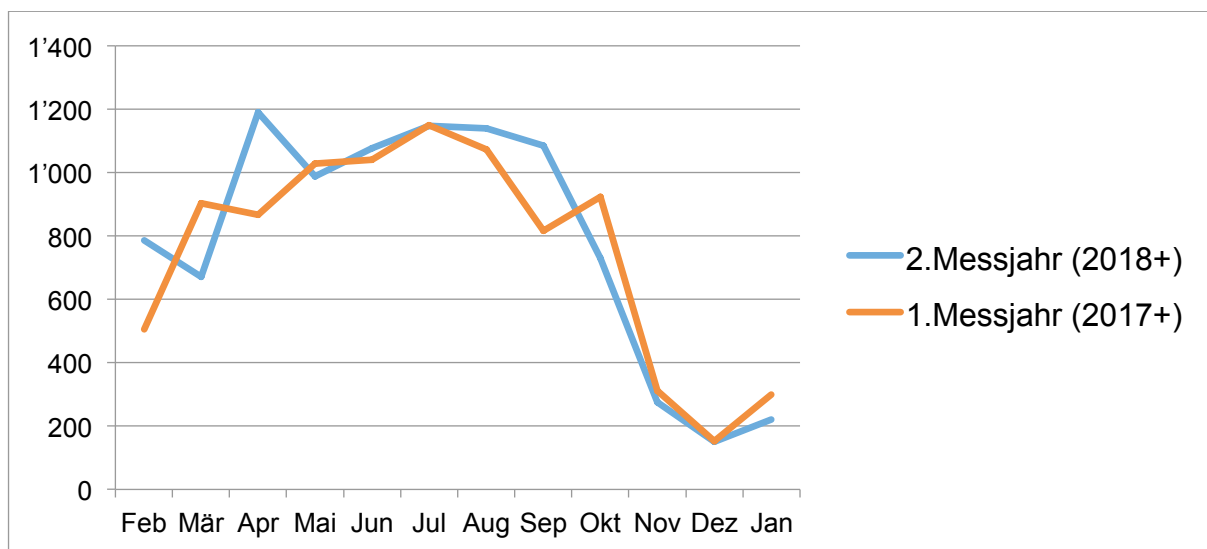


Abbildung 12: Auswertung Ertrag der thermischen Sonnenkollektoren in kWh pro Monat

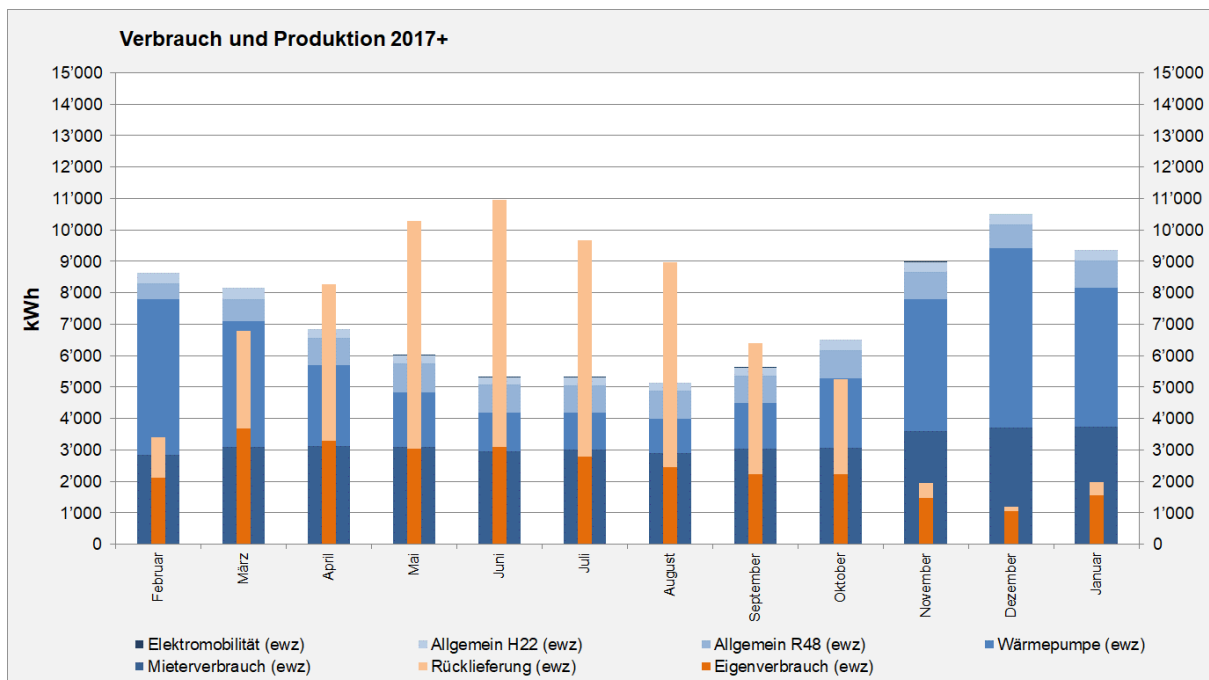
### Auswertungen im Berichtsjahr 2017+ ohne Batterie

Für die Auswertungen wurden folgende Verfahren zur Datenaufbereitung festgelegt:

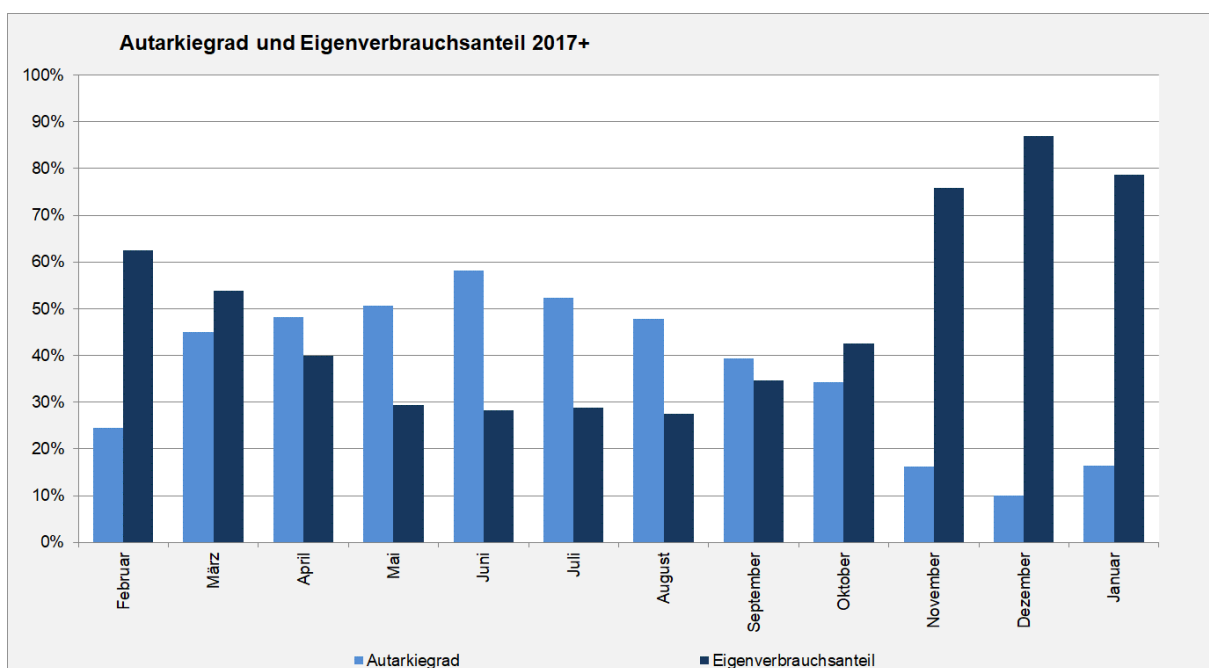
Alle elektrischen Messwerte wurden **harmonisiert**. Damit wird die Korrektur bezeichnet, welche nötig ist, so dass die Summe der einzelnen Unterzähler jeweils dem Zähler von ewz entspricht.

Neben den effektiven, harmonisierten Werten wurden separat **normalisierte** Werte berechnet. Die Normalisierung erfolgte aufgrund der Sonnenstunden der Messstation Zürich Fluntern. Die so erhaltenen Werte erlauben den Vergleich über mehrere Jahre sowie den Vergleich mit den Simulationen.

Das Jahresprofil der acht Teilanlagen und insbesondere der Fassadenanlage weist von März bis September einen erkennbar flacheren Verlauf auf als eine Dachanlage.



**Abbildung 13:** Verbrauch und Produktion (Messjahr 2017+)  
Da kein Elektroauto geladen wird, ist der Stromverbrauch „Elektromobilität“ auf diesem Zähler praktisch null.



**Abbildung 14:** Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil (Messjahr 2017+)

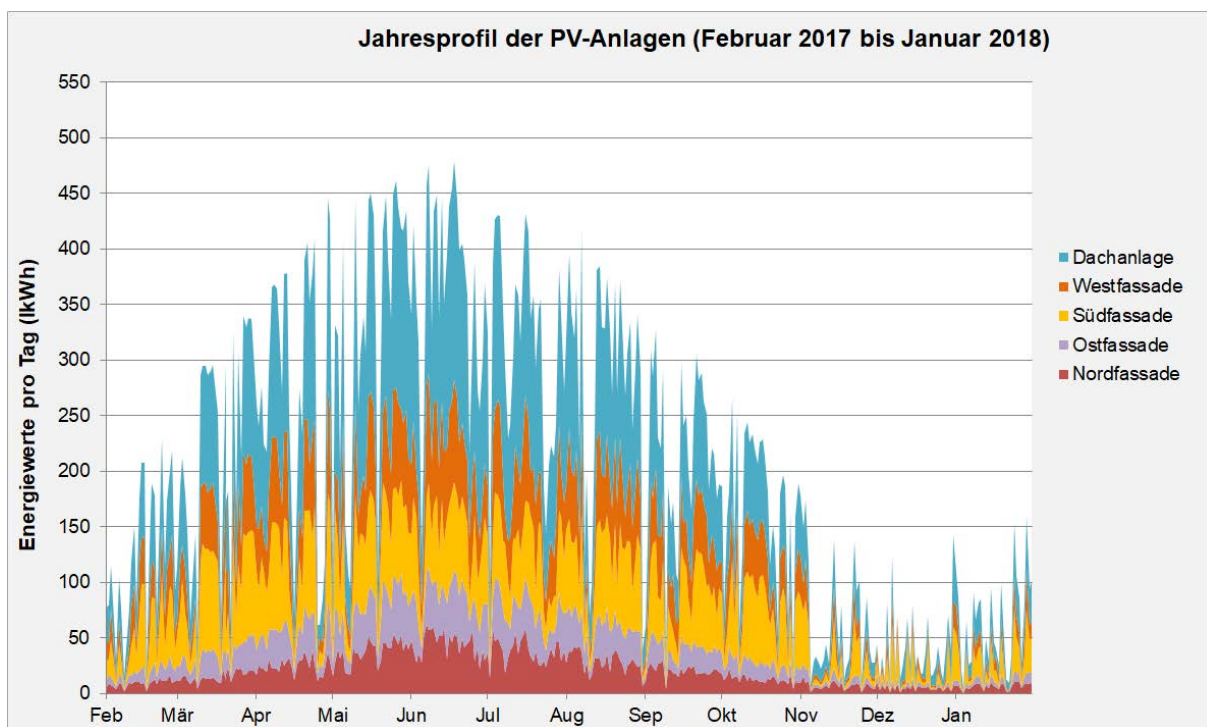


Abbildung 15: Jahresprofil der PV-Anlagen (Messjahr 2017+)

### Auswertungen im Berichtsjahr 2018+ mit Batterie

In der Jahresübersicht ist deutlich der warme und lange Sommer zu erkennen welcher in den Sommermonaten zu einer sehr hohen Autarkie geführt hat. Vom April bis zum September 2018 lag die Autarkie bei 95.3% (Eigenverbrauch 52.9%). Demgegenüber lag der Eigenverbrauchsanteil in den Monaten Oktober 2018 bis März 2019 bei 88.4% (Autarkie 34.3%).

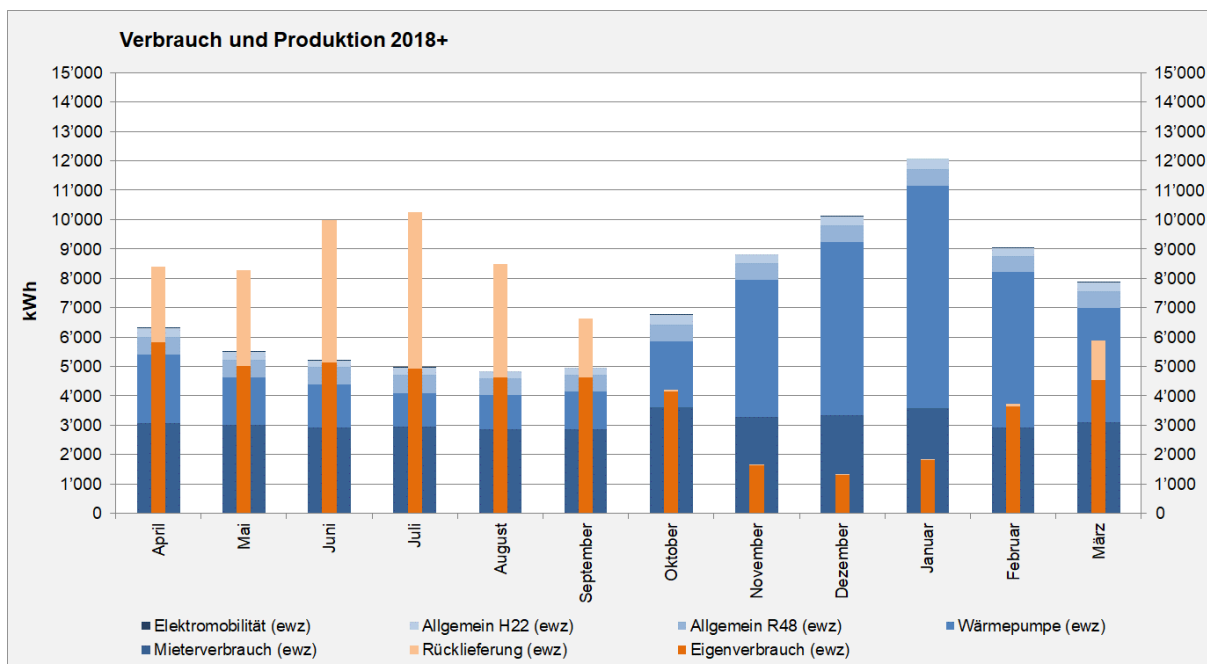


Abbildung 16: Verbrauch und Produktion (Messjahr 2018+)

Da kein Elektroauto geladen wird, ist der Stromverbrauch auf diesem Zähler sehr gering.

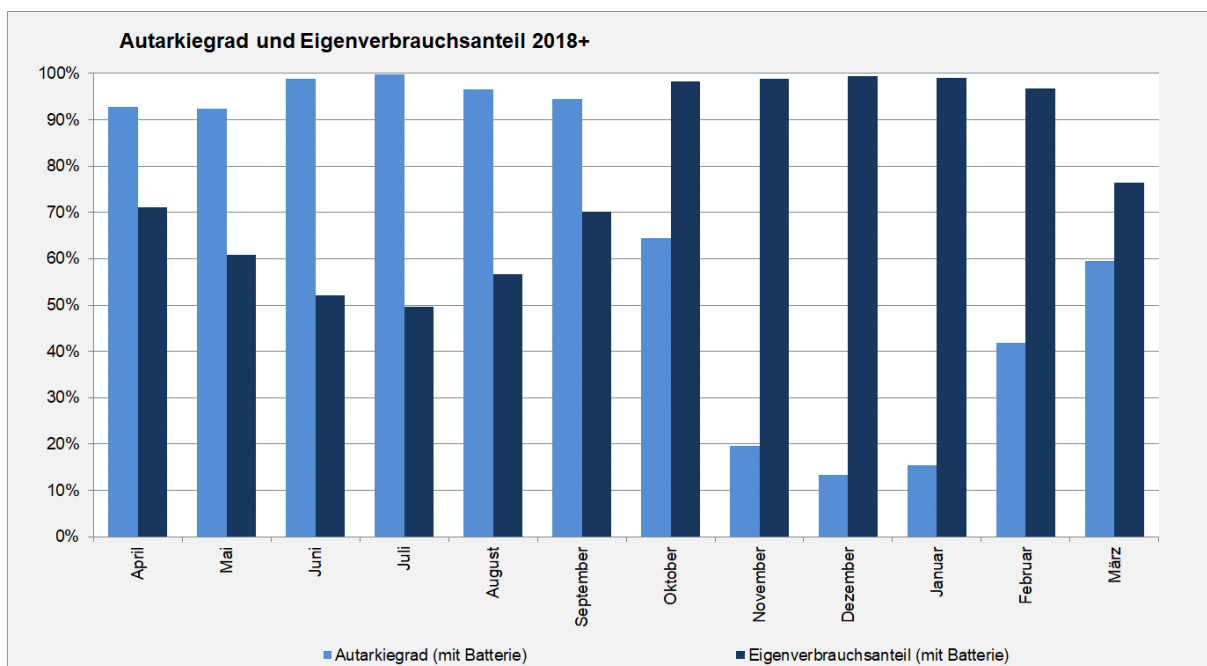


Abbildung 17: Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil (Messjahr 2018+)

Das Jahresprofil Messjahr 2018+ der acht Teilanlagen und insbesondere der Fassadenanlage weist von März bis September einen erkennbar flacheren Verlauf auf als eine Dachanlage.

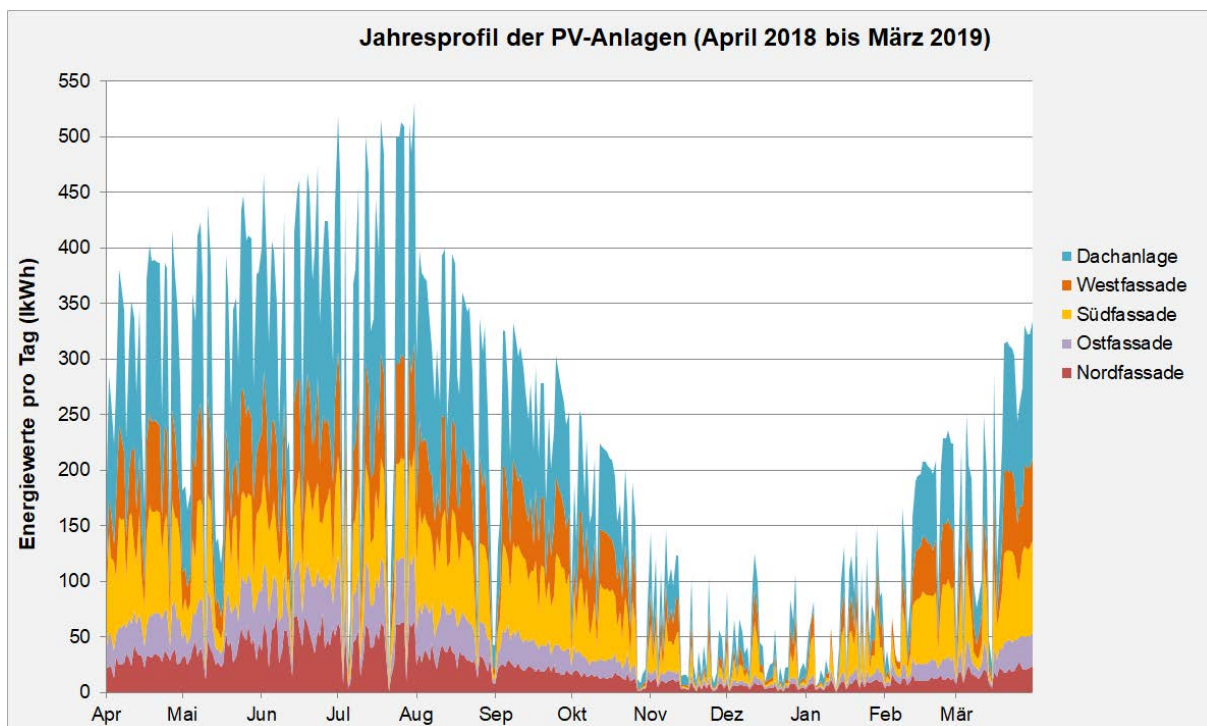
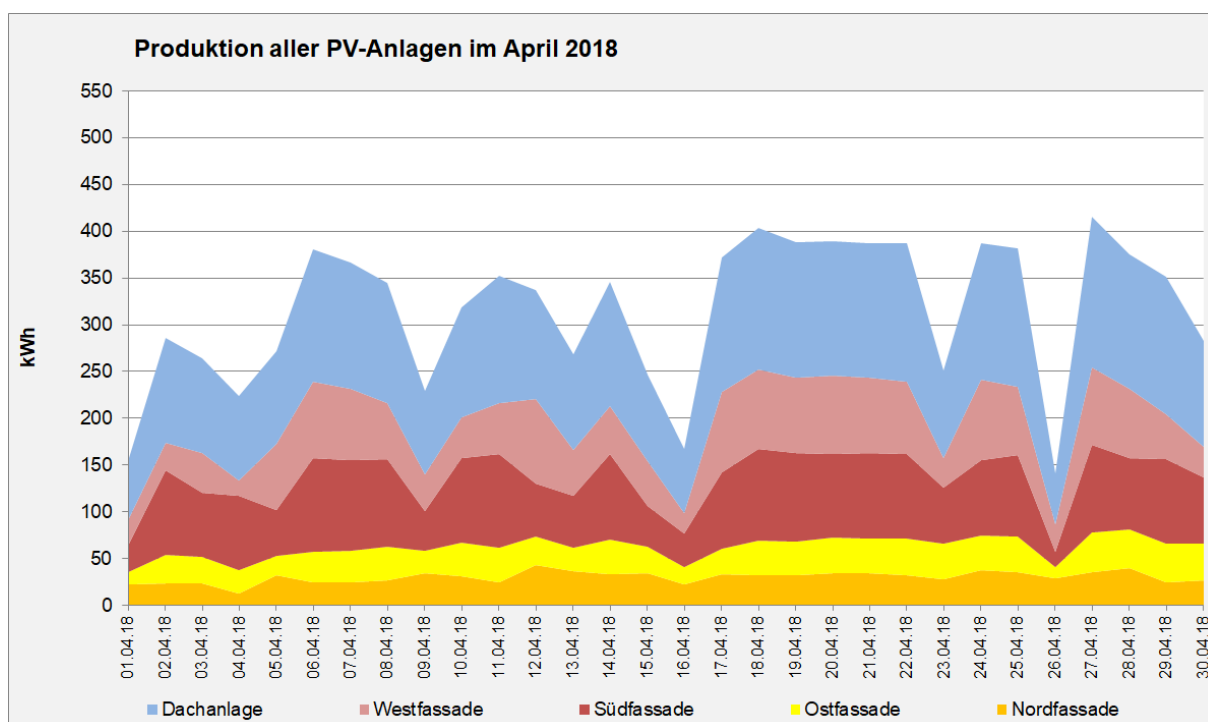
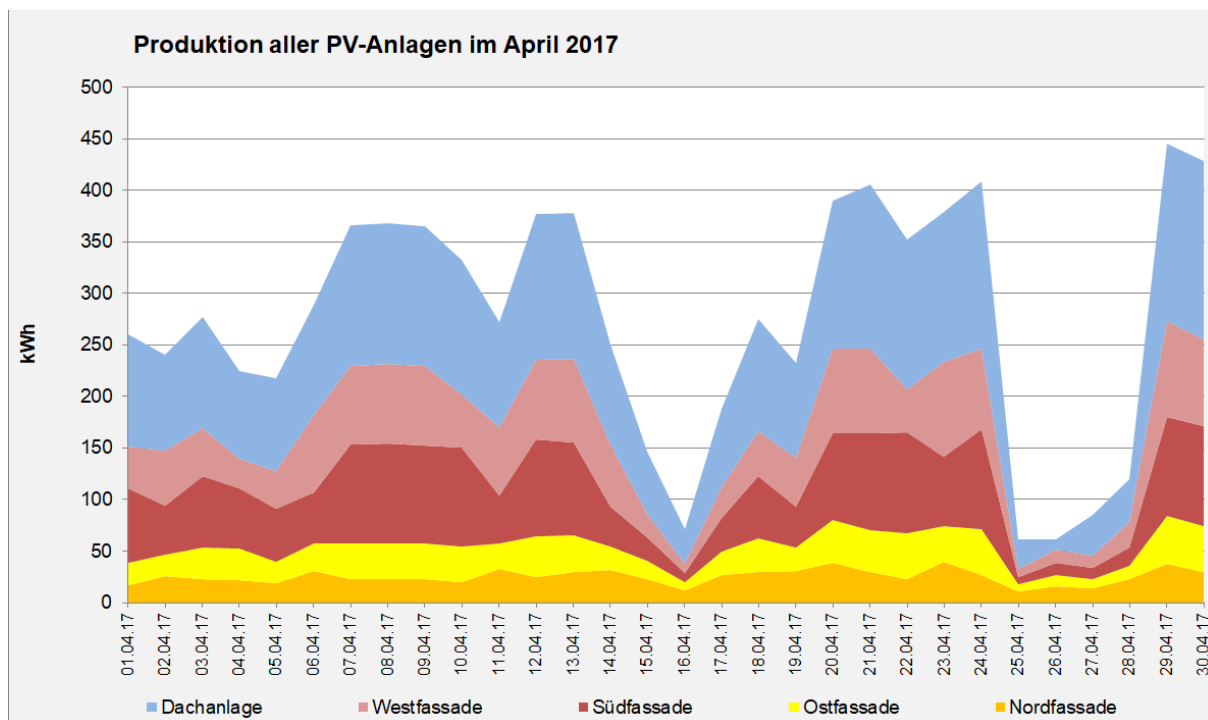


Abbildung 18: Jahresprofil der PV-Anlagen (Messjahr 2018+)



### Monatliche Erträge der PV-Teilanlagen in den Messjahren 2017+ und 2018+

Im Folgenden werden die Monatsprofile des PV-Ertrags von April, Juni, Oktober und Januar der Messjahre 2017+ und 2018+ dargestellt.



Abbildungen 19+20: Monatsprofile April (Messjahre 2017+ und 2018+)

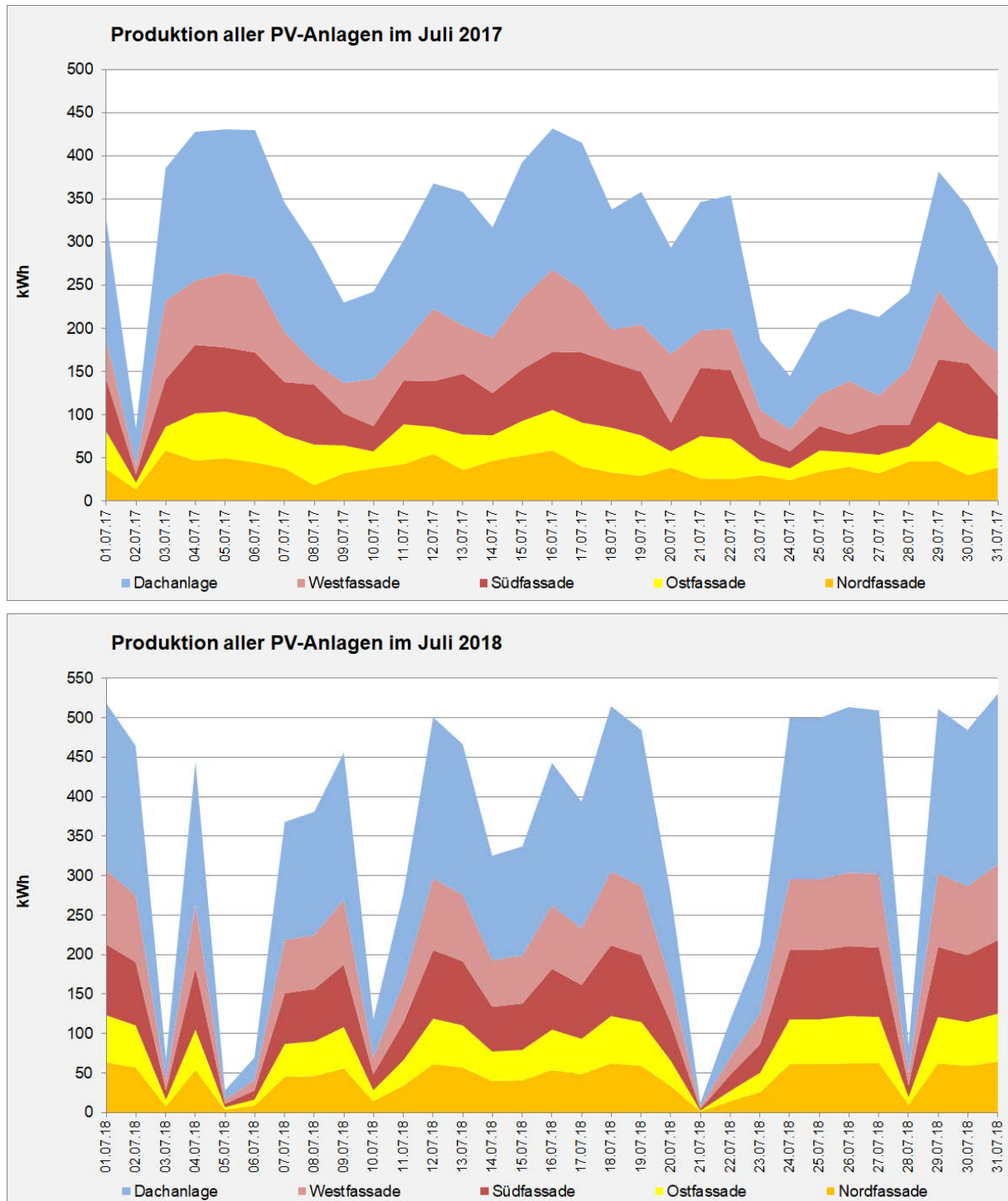


Abbildung 21+22: Monatsprofile Juli (Messjahre 2017+ und 2018+).

Am 21. Juli ist die Messung ausgefallen und ein „0“-Wert resultiert in der Grafik.

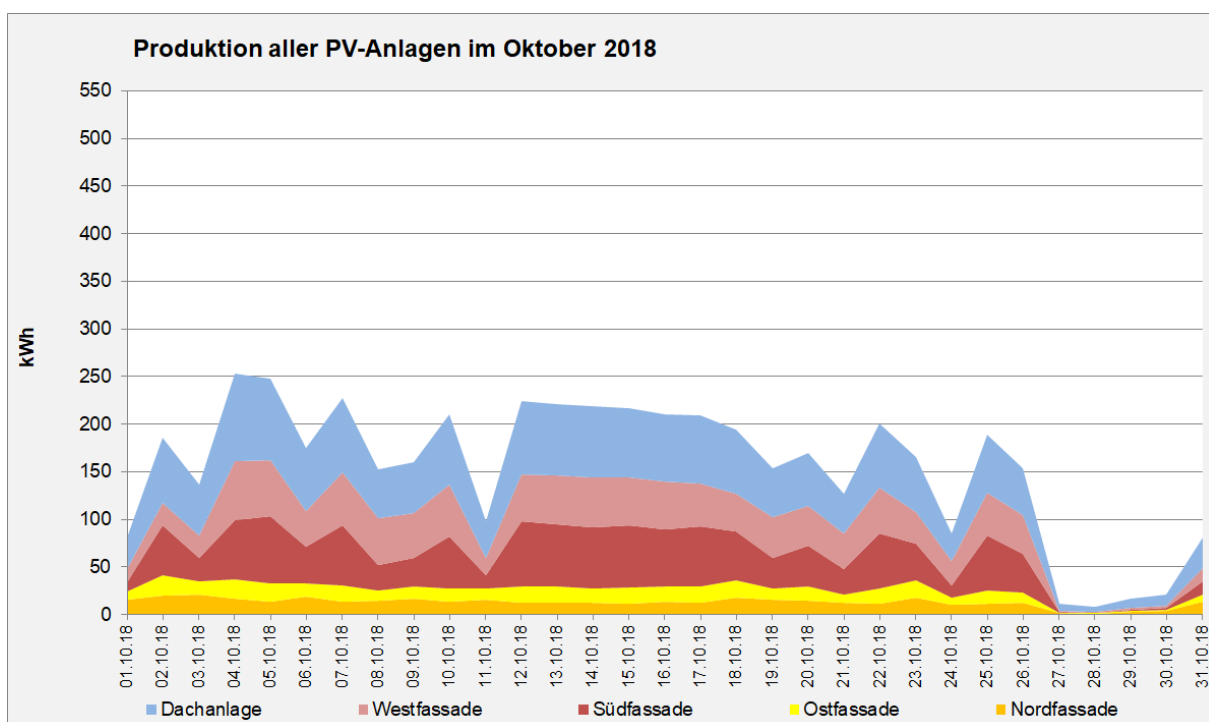
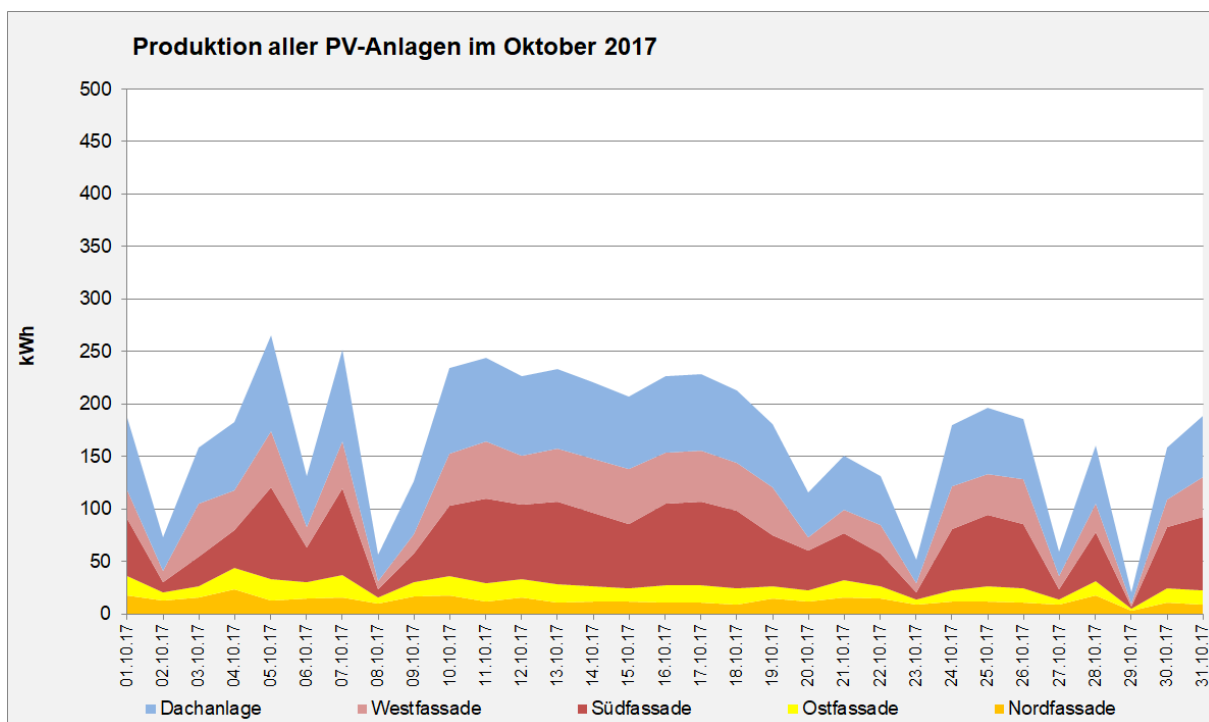


Abbildung 23+24: Monatsprofile Oktober (Messjahre 2017+ und 2018+)

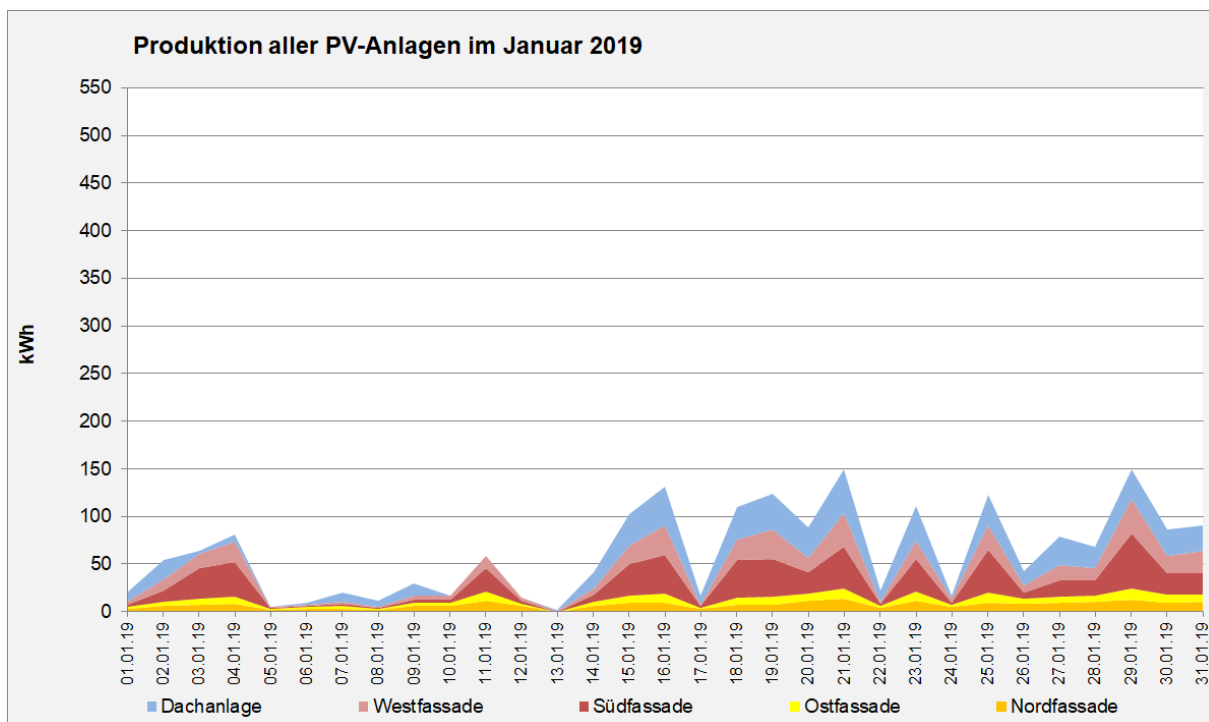
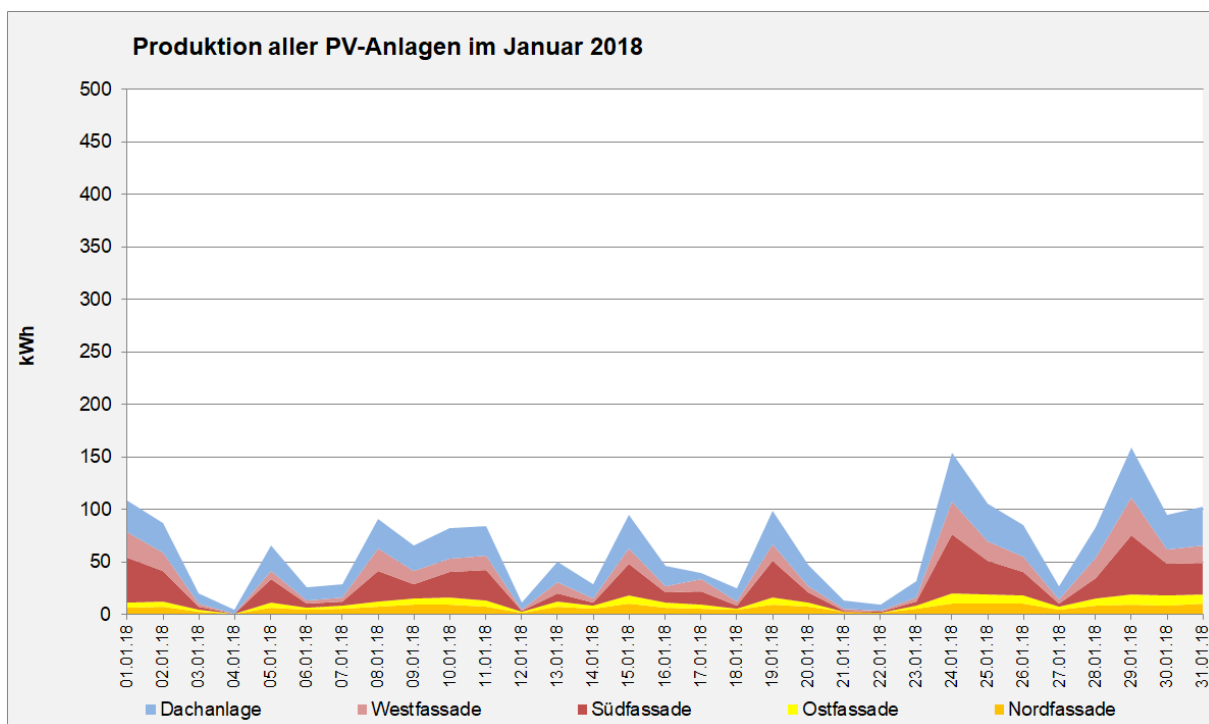


Abbildung 25+26: Monatsprofile Januar (Messjahre 2017+ und 2018+)



### 4.3 2000-Watt-Gesellschaft

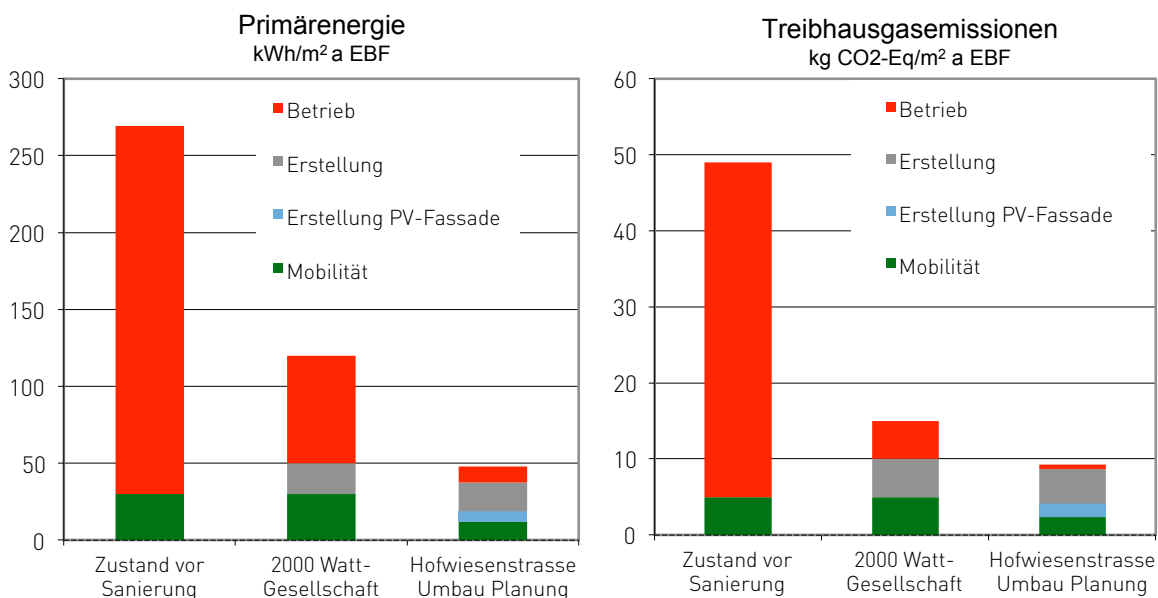
Eine umfangreiche Aussage zur Energieeffizienz eines Gebäudes wird mittels SIA 2040 „SIA-Effizienzpfad Energie“ gemacht. Im Zentrum steht die Bilanz für die nicht erneuerbare Primärenergie und die entsprechende Bilanz der Treibhausgasemission eines Gebäudes und der Mobilität über den ganzen Lebenszyklus. Langfristig soll eine Primärenergiedauerleistung von 2000 Watt pro Person und die Emission von maximal einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Person und Jahr angestrebt werden. Davon stehen für den Bereich Wohnen maximal 830 Watt zur Verfügung.

Für die Berechnungen pro Person wurde die durchschnittliche Mieterzahl von 47 Personen im Projekt verwendet. Die Angaben pro Quadratmeter beziehen sich auf die 2'870 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche A<sub>E</sub> bzw. EBF.

Gemäss den Berechnungen nach SIA 2040 „SIA Effizienzpfad Energie“ unterschreitet das Gebäude mit 48,0 kWh/m<sup>2</sup>a der nicht erneuerbaren Primärenergie den Zielwert von 120 kWh/m<sup>2</sup>a um 60 %. Bei der Treibhausgasemission wird der Zielwert von 15,0 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>a mit 9,2 kg CO<sub>2</sub>-Eq/m<sup>2</sup>a um 39 % unterschritten.

Bei der Betrachtung der 47 Mieter fällt die Bilanz ähnlich aus. Der Zielwert von 830 W/Person der nicht erneuerbaren Primärenergie wird mit 335 W/Person um 60 % unterschritten. Bei der Treibhausgasemission wird der Zielwert von 0,930 t CO<sub>2</sub>-Eq/Person mit 0,562 t CO<sub>2</sub>-Eq/Person um 40% unterschritten.

Somit erfüllt sowohl das Gebäude sowie die 47 Mieter die Anforderungen für eine nachhaltige Zukunft. Durch die zusätzliche Einsparung pro Person können die Mieter sogar mit etwas höheren Primärenergieleistungen im Bereich Freizeit, Ferien etc. noch die 2000-Watt Anforderung erfüllen.



**Abbildung 27:** Vergleiche Primärenergie und Treibhausgasemissionen

Ohne die Photovoltaikanlage an Fassade und Dach würde weniger Graue Energie aufgewendet, doch würden auch 26.1 kWh/m<sup>2</sup> a EBF weniger Photovoltaikstrom erzeugt. Die Zielwerte für nicht erneuerbare Primärenergie und die Treibhausgasemissionen würden nur noch um 15 % unterschritten.



| <b>Wohnen</b>            | Primärenergie nicht erneuerbar<br>[kWh/m <sup>2</sup> a] |             | Treibhausgasemissionen<br>[kg CO <sub>2</sub> -Eq/m <sup>2</sup> a] |             |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|
|                          | Richtwerte                                               | Benötigt    | Richtwerte                                                          | Benötigt    |
| <b>Erstellung</b>        | 20                                                       |             | 5.0                                                                 |             |
| mit PV-Fassade           |                                                          | <b>25.3</b> |                                                                     | <b>6.30</b> |
| mit normaler Glasfassade |                                                          | 18.8        |                                                                     | 4.55        |
| Betrieb                  | 70                                                       | <b>10.6</b> | 5.0                                                                 | <b>0.55</b> |
| <b>Mobilität</b>         | 30                                                       | <b>12.1</b> | 5.0                                                                 | <b>2.4</b>  |
| Zielwert                 | 120                                                      |             | 15.0                                                                |             |
| <b>Gesamt benötigt</b>   | <b>48.0</b>                                              |             | <b>9.2</b>                                                          |             |

| <b>Pro Person</b>      | Mittlere Leistung der<br>Primärenergie nicht erneuerbar<br>[W/Person] | Jährliche<br>Treibhausgasemission<br>[t CO <sub>2</sub> -Eq/Person] |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|                        |                                                                       |                                                                     |
| Zielwert               | 830                                                                   | 0.930                                                               |
| <b>Gesamt benötigt</b> | <b>335</b>                                                            | <b>0.562</b>                                                        |

Abbildung 28: Übersicht SIA-Effizienzpfad

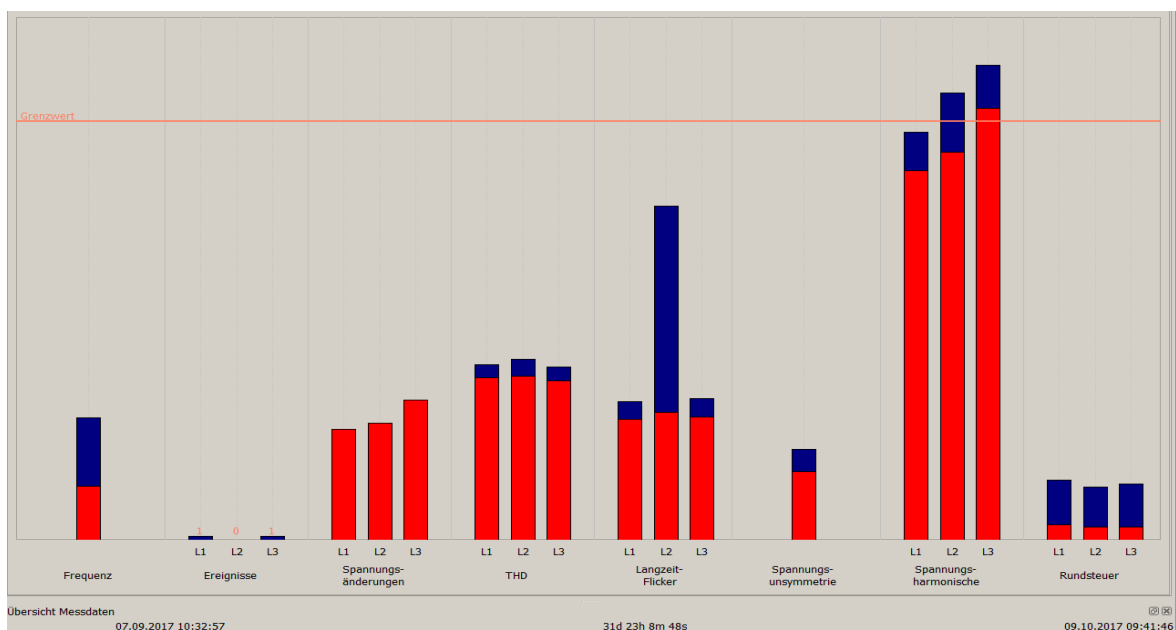
## 4.4 Netzbeeinflussung

### Power Quality Untersuchungen

Eine hohe Erzeugung könnte einen Einfluss auf die Spannungsqualität im Verteilnetz haben. Um diesen Einfluss genauer zu analysieren, wurden temporäre Messungen am Hausanschlusskasten (HAK) beim Leuchtturmprojekt PlusEnergieBau Hofwiesenstrasse 22/ Rothstrasse 48 durchgeführt. Um den Einfluss der Batterie auf die Spannungsqualität zu untersuchen, wurden Messungen einmal im Jahr 2017 (ohne Batterie) und einmal im Jahr 2018 (mit Batterie) durchgeführt. Die Messdauer betrug jeweils 3 bis 4 Wochen im Sommer, um möglichst viele sonnige Tage einzubeziehen.

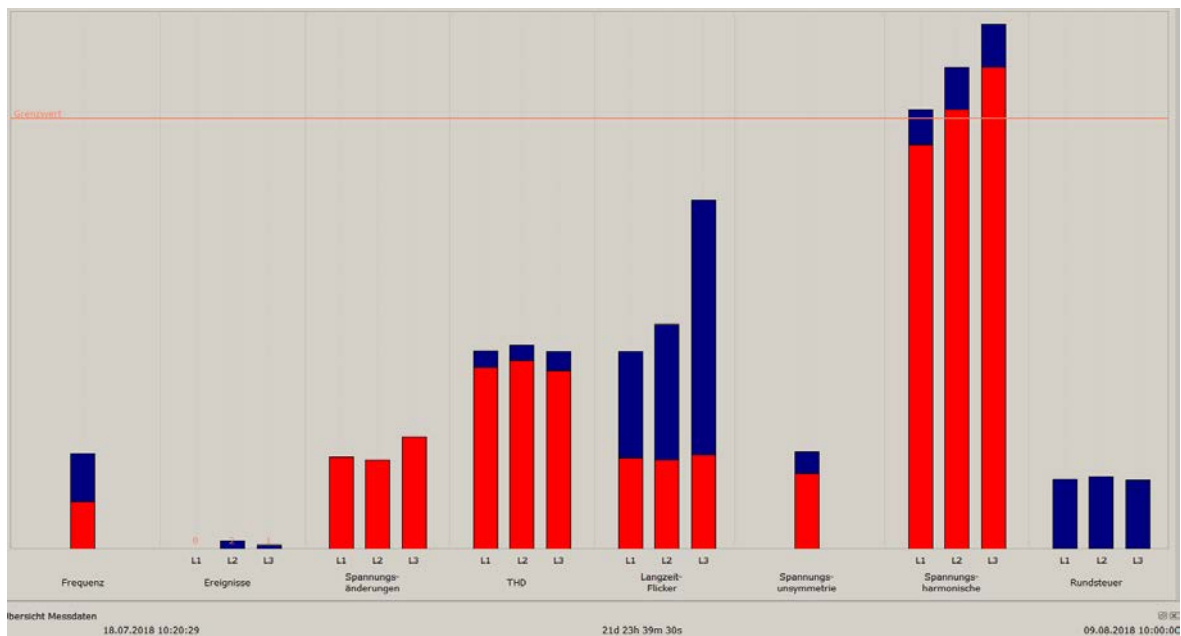
Die untersuchten Merkmale beziehen sich auf die europäische Norm EN 50160 (Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen). Die wesentlichen Qualitätsmerkmale nach dieser Norm sind Netzfrequenz, Spannungsänderungen (schnell und langsam), die Symmetrie der Leiterspannungen, Oberschwingungsspannungen, zwischenharmonische Spannungen und Unterbrechungen sowie Einbrüche der Spannung.

Die Ergebnisse der Messungen in den beiden Jahren sind in den Abbildungen 29 und 30 dargestellt. Dabei bilden die roten Balken 95% aller Messwerte und die blauen Balken 5% aller Messwerte ab. Das Spektrum der Spannungsharmonischen zeigt Peak-Werte bei der 15. Harmonischen. Eine weitere Analyse anderer Messungen im Netz hat gezeigt, dass diese hohen Werte durch andere Faktoren im Netz bedingt sind und mit der lokalen Stromerzeugung nichts zu tun haben.



**Abbildung 29:** Spannungsqualität nach EN50160, Messungen am HAK vom PEB im Jahr 2017 (ohne Batterie)

Bildschirmausdruck des Messgerätes: Die Qualitätsbedingungen sind eingehalten, wenn die rote Linie nicht überschritten wird (Grenzwert). Entlang der horizontalen Achsen die die einzelnen Qualitätskriterien für die drei Phasen (L1, L2, L3) dargestellt.



**Abbildung 30:** Spannungsqualität nach EN50160, Messungen am HAK vom PEB im Jahr 2018 (mit Batterie)

Bildschirmausdruck des Messgerätes: Die Qualitätsbedingungen sind eingehalten, wenn die rote Linie nicht überschritten wird (Grenzwert). Entlang der horizontalen Achsen die die einzelnen Qualitätskriterien für die drei Phasen (L1, L2, L3) dargestellt.

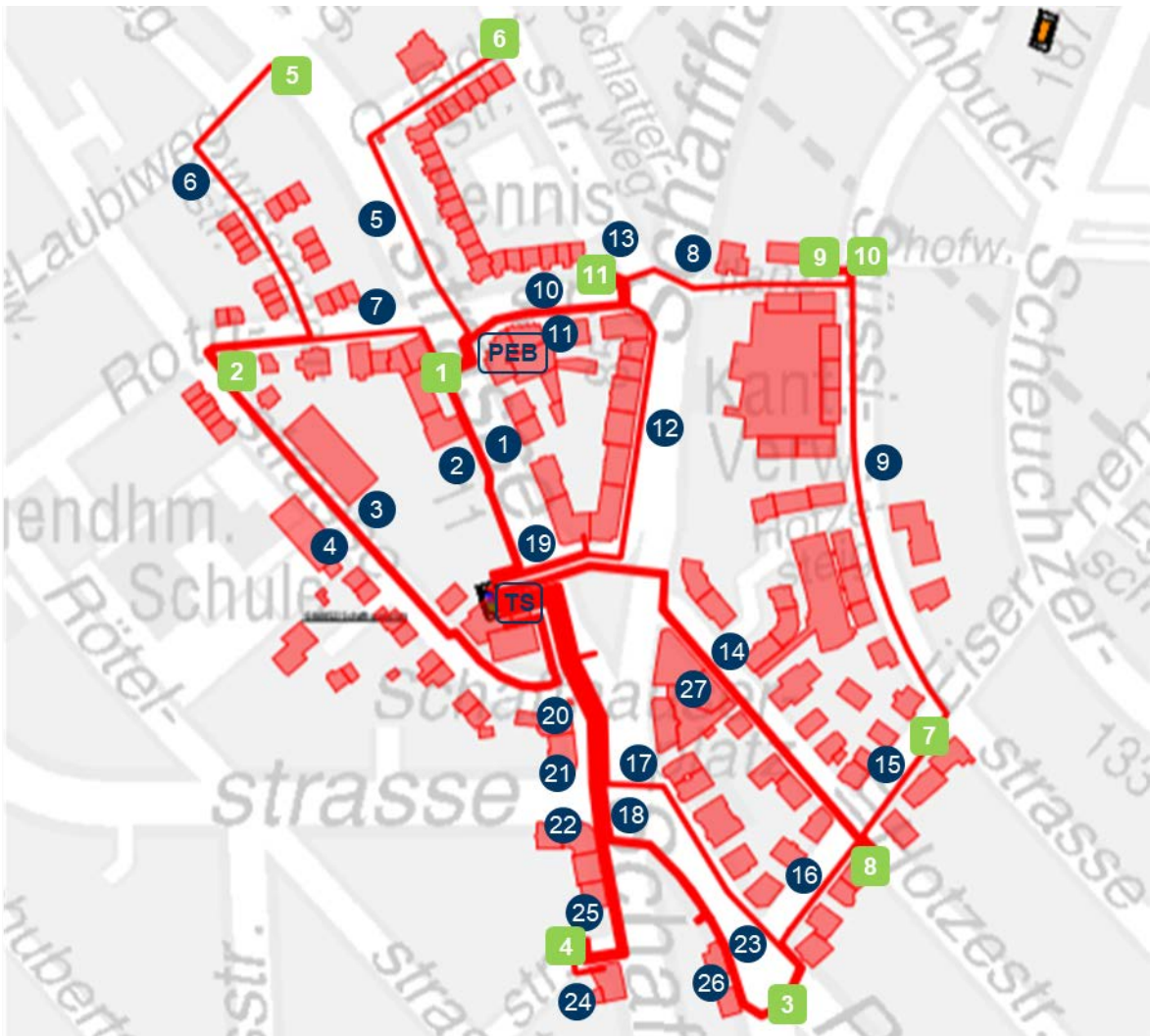
Wie den beiden Abbildungen zu entnehmen ist, sind die Ergebnisse der Messungen in beiden Fällen sehr gut und es kann kein Einfluss der grossen Erzeugung mit oder ohne Batterie auf die Spannungsqualität festgestellt werden.



### Untersuchung der Netzbeeinflussung anhand von Simulationen

Die nachfolgenden Simulationen zeigen, dass der Einsatz von grossen Batterien (Speicherkapazität liegt in der Grössenordnung von 1 kWh pro kW<sub>P</sub>) bei grossen PV-Anlagen (Produktion entspricht in etwa dem Verbrauch) zur einer deutlichen Minderung der Netzbelastung führen dürfte. Dies gilt selbst dann, wenn die Batterie im Modus Eigenverbrauch betrieben wird. Für die Simulation wurde auch der anspruchsvollste Fall berücksichtigt, wenn alle Gebäude im betrachteten Quartier PlusEnergieBauten sind. Streng genommen gilt dies nur für das betrachtete Gebiet, welches mit den Wohn- und Gewerbenutzungen durchaus typisch ist.

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, hat das MFH Hofwiesen-/Rothstrasse trotz hoher Erzeugung keinen negativen Einfluss auf die Stabilität des Verteilnetzes. Dies ist unter anderem auf das starke Netz in Zürich zurückzuführen. Da sich dies bei einer höheren Anzahl solcher Bauten ändern könnte, sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Dies lässt sich mit Simulationen untersuchen. Dafür wurde das Trafostationsgebiet vom MFH Hofwiesen-/Rothstrasse in der Software PowerFactory abgebildet. Dies ermöglicht, Lastflussrechnungen für verschiedene Szenarien und Bedingungen durchzuführen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Das Trafostationsgebiet ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Trafostation, der PEB, die einzelnen Stränge (blaue Kreise) und die Verteilkabinen (grüne Quadrate) sind im Bild markiert.





Für die Simulationsuntersuchung wurden verschiedene Szenarien definiert, um unterschiedliche Situationen analysieren zu können. Eine kurze Beschreibung der einzelnen Szenarien ist im Folgenden aufgelistet:

| Szenario | Beschreibung                                                                                                                      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Aktuelle Situation im Netz. PEB MFH Hofwiesen-/Rothstrasse <u>mit Batterie</u> .                                                  |
| 2        | Aktuelle Situation im Netz. PEB MFH Hofwiesen-/Rothstrasse <u>ohne Batterie</u> .                                                 |
| 3        | Jedes Gebäude im Strang vom PEB MFH Hofwiesen-/Rothstrasse und in seinem Parallelstrang ist selbst ein PEB <u>mit Batterie</u> .  |
| 4        | Jedes Gebäude im Strang vom PEB MFH Hofwiesen-/Rothstrasse und in seinem Parallelstrang ist selbst ein PEB <u>ohne Batterie</u> . |
| 5        | Jeder Strang im Netz hat ein PEB <u>mit Batterie</u> .                                                                            |
| 6        | Jeder Strang im Netz hat ein PEB <u>ohne Batterie</u> .                                                                           |

**Abbildung 32:** Szenarien für die Simulationsuntersuchung

Die Szenarien 1 und 2 bilden die aktuelle Situation im Netz ab und dienen hauptsächlich für den Vergleich mit den anderen Szenarien und die Validierung des Netzmodells.

Die Szenarien 3 und 4 stellen ein konzentriertes Wachstum von PEB dar, während die Szenarien 5 und 6 das verteilte Vorkommen von solchen Gebäuden im Netz modellieren.

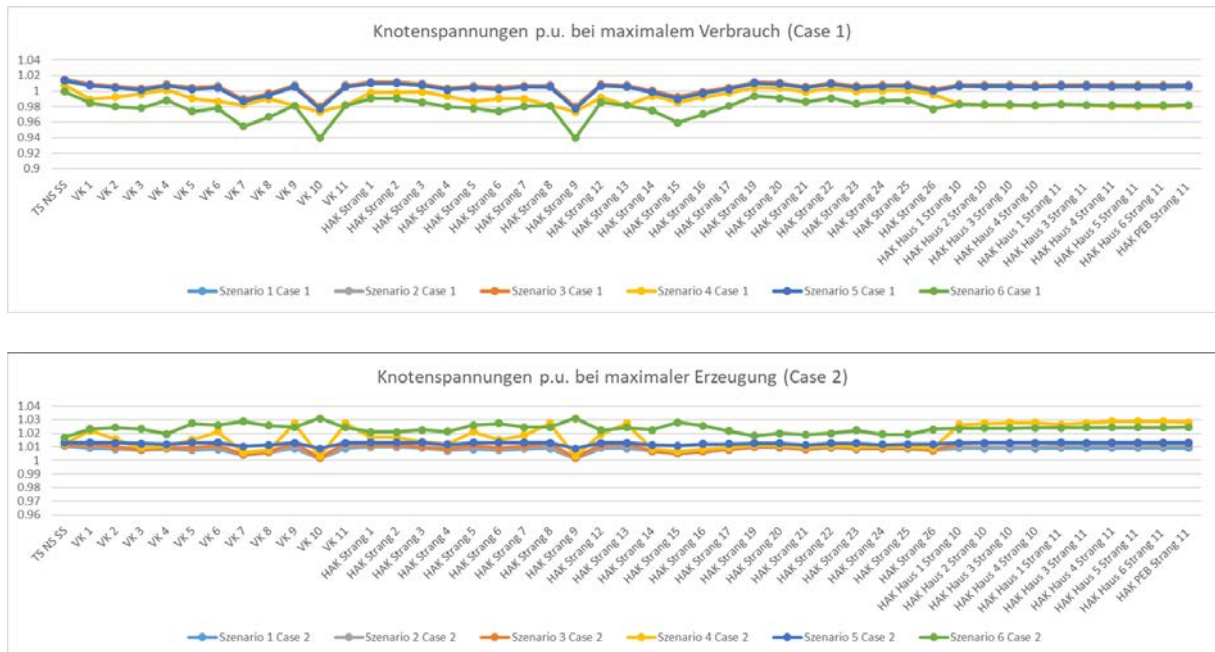
Die Lastflussrechnungen werden mit fixen Werten von Wirk- und Blindleistung für die einzelnen Verbraucher und Erzeuger im Netz durchgeführt. Es werden 2 Cases pro Szenario berechnet, damit die Extremfälle für das Netz berücksichtigt werden.

- Case 1 bildet den Fall mit maximalem Verbrauch und minimaler Erzeugung ab. Der maximale Verbrauch ist unter Berücksichtigung der Gleichzeitigkeit als mittlere Leistung berechnet aus dem jährlichen Energieverbrauch mit einem Zeitfaktor von 4000 Stunden. Die minimale Erzeugung ist in diesem Fall 0.
- Der Case 2 bildet den Fall mit minimalem Verbrauch und maximaler Erzeugung ab. Der minimale Verbrauch ist 30% des maximalen Verbrauchs. Dieser Wert ist ein Erfahrungswert. Der angenommene Wert für die maximale Erzeugung vom PEB ist der tatsächlich maximal gemessene Wert im Jahr 2018 und nicht die installierte Leistung.

Für jedes Szenario mit Batterieeinsatz wurde eine optimale Performance der Batterie angenommen. Das heisst insbesondere erfolgen keine Einschränkung durch Ladestände der Batterie.

Pro Szenario wurden Spannungswerte an jedem Knoten und Stromwerte von jeder Leitung berechnet. Für eine bessere Darstellung der Spannungsabweichungen wurden die berechneten Werte auf die Nennspannung (400 V) normiert.

Die Ergebnisse der Szenarien werden pro Case für einen direkten Vergleich in einem Diagramm abgebildet. In den folgenden 2 Diagrammen sind die Spannungswerte der 6 Szenarien dargestellt.



**Abbildung 33+34:** Knotenspannungen von allen Szenarien in Case 1 und Case 2

Die X-Achse beschreibt die Knoten im Netz. Der erste Knoten links ist die Niederspannungssammelschiene (NS SS) in der Trafostation (TS). Die weiteren Knoten sind die Verteilnkabinen (VK). Die Verbraucher und Erzeuger pro Strang wurden an einem Knoten modelliert (HAK Strang x). Die restlichen Knoten sind die einzelnen Verbraucher bzw. Häuser an den Strängen 10 und 11, die genauer modelliert wurden. Am Strang 11 ist der PEB und der Strang 10 ist der Parallelstrang dazu.

Laut ewz internen Richtlinien ist eine Spannungsabweichung von  $\pm 6\%$  von der Nennspannung noch im sogenannten sicheren Netzzustand. Eine grössere Abweichung nach oben oder nach unten führt dazu, dass der Netzzustand in den gefährdeten, kritischen oder auch gestörten Netzzustand übergeht. Diese Netzzustände sollen vermieden werden. In diesem Fall sollen Massnahmen eingeleitet werden, die entweder diese Netzzustände vermeiden oder die Situation wieder in den sicheren Netzzustand zurückführen.

Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, liegen die Spannungswerte trotz extremen Annahmen bei allen Szenarien im grünen Bereich. Lediglich einzelne Werte liegen an der Grenze zwischen dem sicheren und gefährdeten Netzbetrieb (Spannungsabweichung  $-6\%$ ).

Die Ausreisser bei den Spannungswerten sind die Knoten des Strangs 9 für das Szenario 6 Case 1, bei dem alle Stränge zusätzlich ein PEB ohne Batterie enthalten. VK 7 ist der Anfang und VK 10 ist das Ende des Strangs (der Schalter ist im VK 10 offen). Am Knoten "HAK Strang 9" sind alle Verbraucher und Erzeuger in der Mitte des Strangs zusammengefasst. Der Strang wird in Stich betrieben. Gleichzeitig sind die Spannungsunterschiede in den Strängen 10 und 11 bei den Szenarien 3 und 4 trotz der Extremfälle weniger stark. In diesem Zusammenhang sieht man, dass einzelne Stränge unterschiedliches Verhalten zeigen. Faktoren wie die aktuelle Belastung und die Netztopologie haben einen Einfluss auf die Spannung und müssen berücksichtigt werden.

Allgemein lässt sich sagen, dass die Spannungswerte beim Szenario 6 am schlechtesten sind. Bei diesem Szenario handelt es sich um eine Verteilung von PEB im ganzen Netz ohne Batterie. Das heisst jeder Strang enthält ein PEB. Wie erwartet sind die Spannungswerte bei maximalem Verbrauch

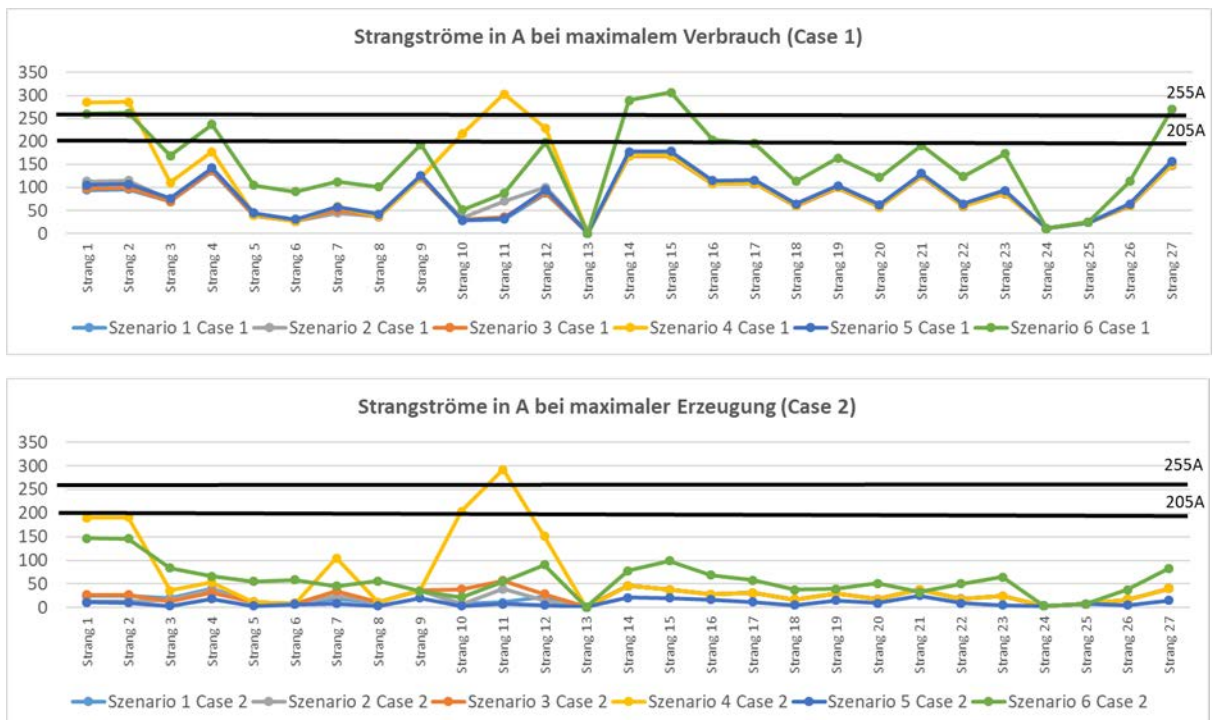


(Case 1) am niedrigsten und bei maximaler Erzeugung (Case 2) am höchsten. Mit Batterie sind bei beiden Cases die Abweichungen deutlich kleiner.

Bei allen Szenarien wurde der Einsatz der Batterie wie bereits erwähnt als optimal angenommen. Je nach Ladezustand der Batterie kann jedoch nur mit eingeschränkter Leistung ge- bzw. entladen werden. Es ist also zu erwarten, dass der tatsächliche Einfluss von Batterien zwischen den beiden simulierten Fällen mit und ohne Batterie liegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von Batterien den Spannungsänderungen entgegenwirken dürfte.

In den folgenden Diagrammen sind die berechneten Strangströme in Ampere dargestellt. Auch hier sind die Ergebnisse für einen besseren Vergleich zwischen den Szenarien pro Case in einem Diagramm zusammengefasst. Die X-Achse stellt hier die einzelnen Stränge dar.



**Abbildung 35+36:** Strangströme von allen Szenarien in Case 1 und Case 2

Hier sieht man, dass auch wenn keine starken Spannungsabweichungen beobachtet werden können, die Ströme bei einzelnen Strängen sehr hohe Werte annehmen können.

Bei den Strängen 13, 24 und 25 handelt es sich um Stränge in Stichbetrieb mit kleinen Verbrauchern und Kabeln mit kleinem Querschnitt. Aus diesem Grund wurden an diesen Strängen bei den Berechnungen kein PEB simuliert. Deswegen sind die Ströme dieser Stränge bei allen Berechnungen sehr niedrig und zeigen keine Unterschiede zwischen den Fällen.

Wie bereits erwähnt werden die Stränge 10 und 11 bei den Szenarien 3 und 4 sehr stark belastet, weil in diesen Fällen jedes Haus in diesen Strängen ein PEB ist. Ein Vergleich zwischen den Szenarien 3 (jedes Haus ist ein PEB mit Batterie) und 4 (jedes Haus ist ein PEB ohne Batterie) zeigt, dass lokale Überlastungen durch zentral platzierten PEB an einem Strang mit Batterien positiv beeinflusst werden können. Zusätzlich zu diesen zwei Strängen zeigen beim Szenario 4 auch die Stränge 1, 2 und 12



hohe Stromwerte. Diese Stränge verbinden die beiden Stränge 10 und 11 mit der Sammelschiene vom Trafo und werden dementsprechend auch stärker belastet. Auch hier ist der Effekt vom Einsatz der Batterien klar zu sehen.

Die Grenze für den sicheren Betrieb bei Kabeln mit einem Querschnitt von  $150 \text{ mm}^2$  ist 205 A. Wird dieser Wert überschritten spricht man von einem gefährdeten Netzzustand. Ab dem 255 A ist von einem kritischen Netzzustand zu sprechen. Die Dauer der Belastung für die Kabel spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Die eingesetzten Kabel in diesem Trafogebiet haben Querschnitte von  $150 \text{ mm}^2$  und  $185 \text{ mm}^2$ . Zur Vereinfachten Analyse werden die erwähnten Grenzen für den Strom einheitlich verwendet. Diese Grenzen sind in den Diagrammen gekennzeichnet.

Bei Strang 6 Case 1 (maximaler Verbrauch bei einer Verteilung von PEB ohne Batterie im Netz) ist fast jeder Strang um etwa 100% stärker belastet als in Szenario 2. Dies ist bedingt durch den hohen Verbrauch an jedem Strang. Für die Berechnungen wurden die Stränge mit einem PEB erweitert. Diese vereinfachte Annahme hat zum Teil eine vervielfache Erhöhung des Verbrauchs zur Folge, die die Erhöhung der Stromwerte in diesem Fall begründet. Ob es in der Praxis auch realistisch ist, jeden Strang mit einem grösseren Mehrfamilienhaus zu erweitern, war hier kein Teil der Analyse.

Generell ist die Belastung bei den Szenarien 5 und 6 bei maximaler Erzeugung (Case 2) niedriger als bei maximalem Verbrauch. Eine hohe Erzeugung wirkt in diesem Fall aufgrund der vereinfachten Modellierung bei jedem Strang positiv, kompensiert den Verbrauch und verringert somit den Strangstrom. Bei einer genaueren Modellierung der einzelnen Verbraucher an einem Strang sind bei den einzelnen Strangabschnitten höhere Belastungen zu erwarten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz der Batterie auch bei den Strangbelastungen einen positiven Effekt zeigt und eine deutliche Reduktion der Ströme zur Folge hat. Bei den durchgeführten Untersuchungen handelt es sich jedoch lediglich um eine Stichprobe. Die beobachteten Trends scheinen verallgemeinerbar, eine konkrete Bewertung bedarf jedoch immer einer detaillierten Untersuchung des entsprechenden Netzgebiets.



## 5 Schlussfolgerungen und Fazit

Eine Photovoltaikfassade auf der Ost-, West- und Südseite bewirkt ein flacheres Tagesprofil der Solarstromproduktion wodurch die effektive, maximale Produktionsspitze nochmals tiefer ausfällt. Dies hat wiederum einen positiven Effekt auf einen höheren Eigenverbrauchsanteil des Solarstromes. Die Fassadenanlage zeigt eindrücklich den saisonalen Ausgleich gegenüber einer reinen Dachanlage. In der Kombination von Fassaden- und Dachanlagen kann ein recht ausgeglichenes Produktionsprofil erreicht werden.

Die Photovoltaikintegration in die Fassade hat auch im städtischen Raum ein grosses Potential, sofern die Fassaden zu einem gewissen Grad besonnt sind. Wichtig sind eine geringe Eigenbeschattung und wenig Gebäuderücksprünge. Auch die Nordfassade kann durchaus mit einem Beitrag zu einer konstanteren Ertragskurve beitragen, wobei deren Rentabilität eher nicht gegeben ist. Balkonnischen oder andere stark beschattete Bereiche eignen sich hingegen nicht für eine Photovoltaikfassade. Dies bedeutet u.a., dass solche Flächen auf Grund der gestalterischen Anforderungen mit Dummies ausgeführt oder die PV-Module nicht angeschlossen werden.

Die Gewichtung der Ästhetik war ein wichtiger Erfolgsfaktor dieses Leuchtturmprojektes, auch wenn zurzeit noch eine (nennenswerte) Reduktion der PV-Leistung in Kauf genommen werden muss. Die Vielfalt an Farbe, Textur und Oberflächenbehandlung der Glasoberfläche, Einlagen wie Gewebe, freie Wahl der Grösse, usw. bietet den ArchitektInnen eine grosse Auswahl an. Dabei ist durchaus denkbar, dass einzelne Projekte wieder die einzelnen Solarzellen zeigen können.

Bei einer durchgehenden Besonnung der Ost-, Süd- und Westfassade können die Mehrleistungen gegenüber einer hinterlüfteten Bekleidungsplatte (Glas, Metall, Terracotta) für die zusätzliche Planung der Photovoltaik, Verstringung und Module innerhalb von 10 bis 15 Jahren durch den Stromertrag im Eigenverbrauch finanziert werden.

Zurzeit ist der Einsatz einer Batterie mit rund CHF 700 pro kWh Speicherkapazität nicht wirtschaftlich. Finanziell interessant wird der Einbau einer Batterie, sobald die Speicherkosten pro kWh geringer sind, als die Preisdifferenz für den Strom zwischen Einspeisung und Bezug vom Netz. Dieser Punkt wird voraussichtlich erreicht, wenn die Investitionskosten für eine Batterie im Bereich von CHF 400 pro kWh Speicher liegen werden, solange die Strompreise nicht steigen.



## 6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die gestalterische Freiheit in der Auswahl der Module für die „aktive Glasfassade“ wird immer grösser. Die Reduktion der Anzahl verschiedener Modulgrössen sind für die Investitionskosten nur noch bedingt relevant. Die Industrie in Europa hat sich auf diese Anfragen ausgerichtet und sieht diese mitunter als Chance sich gegen die preisgünstigen Normmodule aus China zu behaupten. Eine optimierte Anzahl von Modulgrösse zu planen ist Hinblick einer Vereinfachung in der Planung und der Logistik wünschenswert.

Die folgenden zwei Projekte mit „aktiver Glasfassade“ sind als Weiterentwicklung abgeschlossen bzw. in Planung: Ersatzneubau PlusEnergieBau Seewadel in Affoltern am Albis mit 14 Mietwohnungen (September 2019) und Ersatzneubau PlusEnergieBau Birnbaumstrasse in Zürich mit rund 22 Wohnungen und Gewerbefläche (Baueingabe 2019).

Die SIA Kommission 2062 wurde im 2019 ins Leben gerufen mit dem Ziel ein Merkblatt SIA 2062 Photovoltaik bis anfangs 2023 zu publizieren.

Mit dem erarbeiteten Know-how von früheren BIPV Projekten und vor allem mit dem Leuchtturmprojekt konnte ein EU Horizon2020 Projekt eingegeben und gewonnen werden. Das Projekt BIPVBOOST (No 817991) erfolgt mit der Schweizer Projektbeteiligung von Flisom, Ernst Schweizer AG, SUPSI und Viridén + Partner AG und läuft vom Oktober 2019 bis September 2023.

Im IEA PVPS Task15 „Enabling Framework for the acceleration of BIPV“ können die gewonnenen Erkenntnisse eingebracht und der internationale Wissenstransfer verstärkt werden.

ewz wird noch weitere Untersuchungen durchführen, insbesondere bezüglich den Auswirkungen auf das Verteilnetz sowie die Planung und Steuerung von PV-Anlagen. Die gewonnenen Erkenntnisse fliessen anschliessend in die Planung des Verteilnetzes ein. Dies, weil ewz davon ausgeht, dass der Zubau an Solaranlagen erheblich zunehmen wird, nicht zuletzt mit Anlagen, welche im Auftrag von ewz errichtet werden. Zudem werden die Erkenntnisse für die Gestaltung von Dienstleistungen für Prosumer genutzt.



## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Eine Nationale Zusammenarbeit erfolgt mit SUPSI, University of Applied Sciences in Canobbio und der Firma Ernst Schweizer in Hedigen in diversen Projekten.

Für die thermografische Auswertung wurde das Büro Lindenberg Energie GmbH, Franz Lindenberg beigezogen. Die Graue Energie der Fassade wurde durch die Firma treeze berechnet. Die Berechnungen für die Mobilität wurden vom Planungsbüro Jud, Zürich, vorgenommen.

Am 28. Feb. 2017 konnten im Rahmen der Einführung des Semesters an der Professur von Miroslav Sik das BFE Leuchtturmprojekt über 50 StudentInnen und Assistenten präsentiert werden. In diesem Rahmen waren zwei weitere bekannte Architekten BSA anwesend, die ihre BIPV-Projekte präsentierten. In dieser Form ist es das erste Mal, dass sich eine Semesterarbeit so intensiv mit Photovoltaik auseinander gesetzt hat, geschweige dann mit der Integration in die Fassade.

Im Herbstsemester 2019 hat die Professur für Architektur und Konstruktion von Annette Gigon und Mike Guyer das Thema „Stoff-Wechsel – Nullenergie- und Nullemissionshäuser in der Stadt“ als Entwurfsschwerpunkt gewählt. Zusammen mit den StudentInnen haben sie unter anderem auch die Besichtigung des Leuchtturmprojektes vorgenommen.

Einzelgespräche mit Architekten, Bauträger/ Immobilienbesitzer und weiteren Bauverständigen wurden geführt. Es konnte in einigen Projekten die „aktive Glasfassade“ initiiert werden, die in den nächsten Jahren zur Realisation kommen.

5. Sept. 2019 Abschluss von Jurierung Wettbewerb der Allreal mit sechs eingeladenen Architekturteams für ein Sanierungsprojekt von rund 12'000 m<sup>2</sup> Bürofläche mit Gastrobetrieb mit BIPV am Zürichsee.

International wurden Kongresse besucht, an denen nebst dem fachlichen Austausch auch potentielle PV-Hersteller kontaktiert werden konnten.



## 8 Kommunikation

Mit der Kommunikation wurde an der Swissbau am 14. Jan. 2016 begonnen. In den folgenden Jahren wurden insgesamt folgende Anzahl Aktivitäten unternommen:

| Jahr                        | 2016 | 2017  | 2018  | 2019  | Total        |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|--------------|
| Referate in der Schweiz     | 9    | 13    | 14    | 8     | <b>44</b>    |
| Referate im Ausland         | 5    | 3     | 8     | 8     | <b>24</b>    |
| Teilnehmende                | 480  | 1'090 | 1'430 | 1'500 | <b>4'500</b> |
| TV- und Radioausstrahlungen | 4    | 6     | -     | -     | <b>10</b>    |

### Preise

Am 20. Okt. 2017 wurde der „Solarpreis 2017“ und am 27. April 2018 der „Prixforix 2018 Publikumspreis des Fassadenawards“ verliehen. Der zweite Preis ist besonders erfreulich, da das Publikum aus 35 Projekten das BFE-Leuchtturmprojekt mit der Photovoltaikfassade ausgewählt hat.

## 9 Publikationen

Nach der Pressekonferenz vom 19. April 2016 wurde das BFE-Leuchtturmprojekt in den folgenden Presseartikeln erwähnt.

| Jahr           | 2016     | 2017      | 2018      | 2019      | Total            |
|----------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Anzahl Artikel | 91       | 31        | 40        | 16        | <b>178</b>       |
| Auflage (ca.)  | 510'000+ | 1'130'000 | 5'500'000 | 3'330'000 | <b>10,5 Mio.</b> |