

Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden durch intelligente Regelungstechnik

Der Eigenverbrauchsmanager

Seit die neue Energieverordnung im April 2014 in Kraft getreten ist, hat jeder Photovoltaik-Betreiber das Recht auf Eigenverbrauch. Der natürliche Eigenverbrauch von Gebäuden ohne Massnahmen ist allerdings relativ gering (unter 30 %). Im Rahmen des laufenden Projekts «Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs in Gebäuden» des Bundesamts für Energie konnte in Simulationen gezeigt werden, dass durch regelungstechnische Massnahmen eine Verdoppelung des natürlichen Eigenverbrauchs möglich ist. Deshalb wurde in einem weiteren Projekt der Eigenverbrauchsmanager entwickelt, welcher bereits in ersten Gebäuden in Betrieb ist.

David Zogg

Die meisten Eigentümer einer kleinen Photovoltaikanlage auf dem eigenen Hausdach möchten den Strom ihrer Anlage selbst nutzen. Durch lokales Lastmanagement können die Geräte im Gebäude mit Sonnenenergie betrieben werden. Verschiedene Ansätze zu lokalem Lastmanagement wurden bereits in früheren Projekten [3] [4] untersucht. Dort hat sich klar gezeigt, dass sich grössere Verbraucher wie Wärmepumpen, Warmwassererwärmer und Elektromobile (bzw. Plug-in-Hybride) lohnen. Bei kleineren Haushaltgeräten wie Waschmaschinen, Geschirrspüler, Tiefkühltruhen usw. lohnt sich der Aufwand hingegen nicht und es sind Komforteinbussen zu erwarten. Deshalb wird in diesem Projekt auf grössere Verbraucher fokussiert (Abb. 1).

Beim Eigenverbrauchsmanager wird der Benutzer in den Mittelpunkt gestellt. Eine ansprechende Visualisierung im Wohnzimmer macht das Geschehen für alle Bewohner erlebbar. Der Eigenverbrauchsmanager koordiniert aufgrund der Benutzerwünsche automatisch den Betrieb aller Geräte.

Eigenverbrauch lohnt sich

Ohne Eigenverbrauchsmanager sind Bezug und Einspeisung beliebig zeitlich verschoben (Abb. 2). Für die Einspeisung ist gesetzlich nur der Energiepreis (Beispiel 10 Rp./kWh) garantiert. Beim Bezug muss hingegen der Energiepreis plus die Netznutzung und Abgaben (Beispiel 21 Rp./kWh) bezahlt werden. Damit verliert der Betreiber bei verschobenem Betrieb 11 Rp./kWh.

Mit dem Eigenverbrauchsmanager wird der Verbrauch zeitlich auf die lokale Produktion abgestimmt (Abb. 3). Durch die zeitliche Abstimmung speist der Betreiber weniger Strom ins Netz. Der Eigenverbrauch wird deshalb mit dem Energiepreis bewertet (Beispiel 10 Rp./kWh).



Abb. 1: Gebäude mit Eigenverbrauchsmanager und betrachtete Komponenten wie Photovoltaikanlage, Wärmepumpe, Warmwassererwärmer, Elektromobil (Plug-in-Hybrid) und Haushaltgeräte.

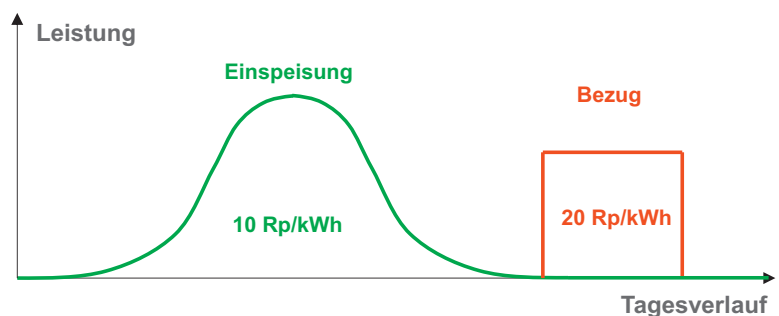


Abb. 2: Situation ohne Eigenverbrauchsmanager. Einspeisung und Bezug sind verschoben. Einspeisung zum Energietarif (Beispiel 10 Rp./kWh). Bezug zum gesamten Tarif inkl. Energie, Netz und Abgaben (Beispiel 21 Rp./kWh, Stromtarife variieren je nach Standort).

Somit kann der Betreiber seine Geräte zum tiefen Energiepreis betreiben. Im Beispiel spart er 11 Rp./kWh durch Eigenverbrauch. Den Überschuss kann er wie bisher zu 10 Rp./kWh verkaufen. Zudem wird durch die Gleichzeitigkeit von Produktion und Verbrauch das Stromnetz entlastet.

Die Preise oben sind absichtlich gerundet, da die Tarifstrukturen je nach Standort und Elektrizitätswerk stark variieren. Die Situation muss mit dem Tarifblatt des Elektrizitätswerkes vor Ort betrachtet werden. Selbstverständlich spielt es auch eine Rolle, ob zusätzliche Vergütungen wie Herkunftsnachweise (HKN)

oder kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) möglich sind. Bei KEV lohnt sich der Eigenverbrauch nicht, da dort zum Teil über dem Netzbezugpreis eingespeist werden kann. Deshalb ist der Eigenverbrauchsmanager vor allem für Kleinanlagen mit Einmalvergütung (EIV) interessant.

Lastverschiebung durch thermische Speicherung

Das Gebäude ist ein idealer thermischer Speicher. Die Energie kann sowohl in den vorhandenen Wasserspeichern für Heizung und Brauchwarmwasser wie auch in der Gebäudemasse gespeichert werden. Dazu werden Standardschaltungen für Wärmepumpenanlagen betrachtet [6]. Eine häufig verbreitete Schaltung ist in Abb. 4 gezeigt. Die Pfeile stellen das Speicherpotenzial dar. Die Temperaturen der Speicher werden beim Laden nach oben (rot) oder beim Entladen nach unten (blau) gefahren.

In der Praxis spielt der Komfort im Gebäude eine grosse Rolle. Die Raumtemperatur darf die vom Benutzer vorgegebenen Grenzwerte nicht unter- oder überschreiten. Das Systemverhalten muss also unter Berücksichtigung der Gebädeträgheit dynamisch untersucht werden, was im BFE-Projekt [2] mit einem aufwendigen Simulationsmodell gemacht wird.

Bisherige Simulationen haben aufgezeigt, dass zwingend ein Raumfühler installiert sein muss, welcher die Raumtemperatur überwacht (Abb. 4, rechts). Zudem wird eine Leistungsmessung am Wechselrichter der Photovoltaik-Anlage installiert. Damit kann die Wärmepumpe unter Berücksichtigung der momentanen Produktion und des Raumkomforts optimal betrieben werden.

Kennzahlen für Eigenverbrauch und Autarkie

Als **Eigenverbrauch** ist derjenige Anteil der lokal produzierten Energie zu verstehen, welcher gleichzeitig selbst verbraucht wird. Er wird in kWh (Kilowattstunden) angegeben.

Die **Eigenverbrauchsquote** R_{eig} ist das Verhältnis zwischen Eigenverbrauch und Eigenstromproduktion. Sie wird in % (Prozent) angegeben:

$$R_{eig} = \frac{E_{eig}}{E_{prod}} = \frac{E_{ges} - E_{netz}}{E_{prod}}$$

E_{eig} Eigenverbrauch (kWh)

E_{ges} Gesamter Stromverbrauch (kWh)

E_{netz} Netzbezug (kWh)

E_{prod} Eigenstromproduktion (kWh)

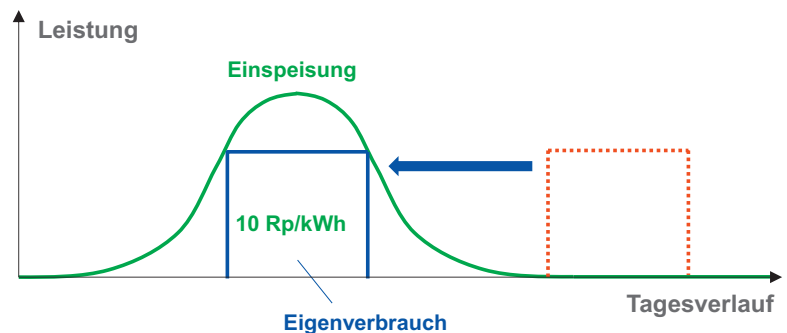


Abb. 3: Situation mit Eigenverbrauchsmanager. Einspeisung und Verbrauch decken sich zeitlich. Der Preis des Eigenverbrauchs entspricht dem Tarif des Energiepreises (Beispiel 10 Rp./kWh). Resultierende Einsparung 11 Rp./kWh.

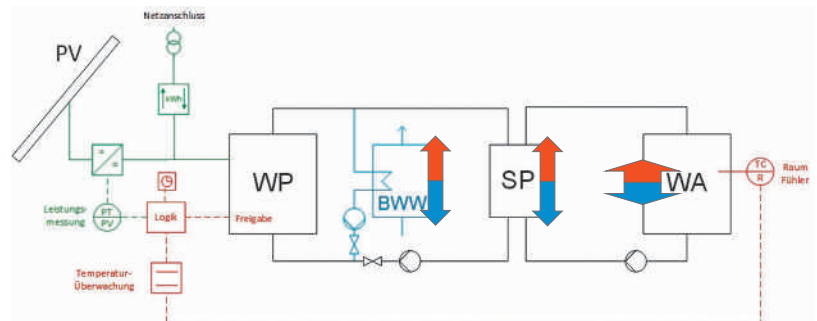


Abb. 4: Hydraulik-Schema nach STASCH 6 [6] mit Ergänzung von Photovoltaikanlage (PV), Leistungsmessung (grün) und Raumtemperatur-Überwachung (rot). WP = Wärmepumpe, BWW = Brauchwarmwasserspeicher, SP = Pufferspeicher für Heizung, WA = Wärmeabgabesystem mit Fussbodenheizung/Radiatoren und Gebäude. Speicherpotenzial durch Pfeile angedeutet: rot = Temperatur anheben, blau = Temperatur absenken.

Unter **natürlichem** Eigenverbrauch oder natürlicher Eigenverbrauchsquote versteht man die Werte, welche man ohne spezielle Optimierungsmassnahmen erreicht.

Unter **Autarkie** versteht man die Unabhängigkeit vom externen Stromnetz. Der **Autarkiegrad** R_{aut} ist das Verhältnis zwischen Eigenverbrauch und gesamtem Stromverbrauch. Er wird in % (Prozent) angegeben:

$$R_{aut} = \frac{E_{eig}}{E_{ges}} = \frac{E_{ges} - E_{netz}}{E_{ges}}$$

Steigerung des Eigenverbrauchs und der Autarkie

Erste Simulationsergebnisse aus [2] zeigen eindrücklich, wie hoch die Steigerung des **Eigenverbrauchs** durch regelungstechnische Massnahmen ist (Abb. 5). Die natürliche Eigenverbrauchsquote liegt für ein System mit Wärmepumpe und Brauchwarmwassererwärmung bei ca. 25-30% (Standard). Durch ein Zeit-

programm mit Verschiebung der Brauchwarmwasserladung auf die Mittagszeit und Verlagerung der Heizleistung auf den Tag durch gezielte Nachtabsenkung kann die Eigenverbrauchsquote immerhin auf ca. 40-45% gesteigert werden (manuell optimiert). Der Nachteil eines festen Zeitprogramms ist allerdings, dass die Verbraucher auch dann eingeschaltet werden, wenn keine Produktion vorhanden ist (die Sonne nicht scheint). Finanziell ist dies nachteilig, da dann zu Hochtarifzeiten am Tag teurer Strom bezogen werden muss. Deshalb ist es wichtig, dass die Verbraucher nur dann betrieben werden, wenn sie durch die effektive Produktion gedeckt sind. Genau dies ist im Eigenverbrauchsmanager realisiert. Damit wird eine Steigerung der Eigenverbrauchsquote auf 50-55% erzielt, was praktisch einer Verdoppelung gegenüber dem natürlichen Wert (Standard) entspricht. Zudem wird verhindert, dass Strom zu Hochtarifzeiten aus dem Netz bezogen werden muss. →

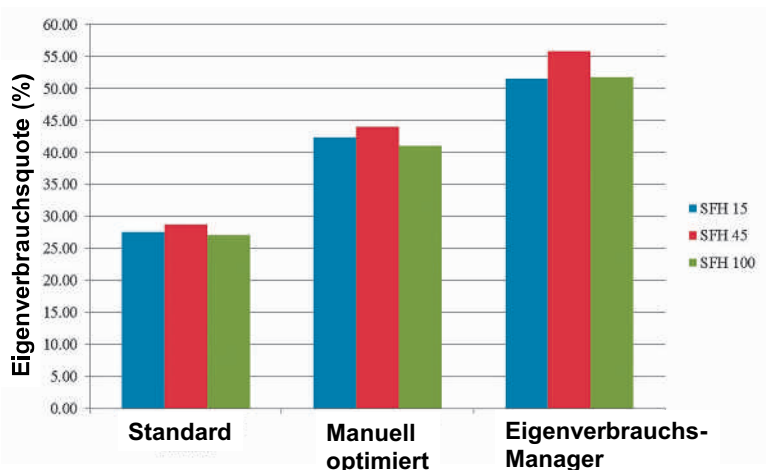


Abb. 5: Eigenverbrauchsquote ohne Massnahmen (Standard), mit manueller Optimierung über Zeitprogramme und mit Eigenverbrauchsmanager für ein System mit Wärmepumpe und Warmwassererwärmung. SFH15 = Einfamilienhaus mit jährlichem spezifischem Verbrauch von 15 kWh/m² (Minergie-P), SFH45 = 45 kWh/m² (Neubau nach MuEn), SFH100 = 100 kWh/m² (sanierter Altbau) gemäss [7]. Basierend auf Jahres-Simulationen mit Wetterdaten aus Zürich.

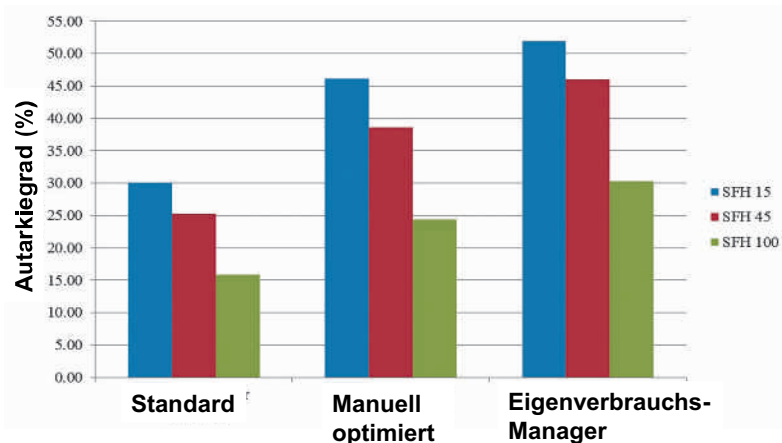


Abb. 6: Autarkiegrad ohne Massnahmen (Standard), mit manueller Optimierung über Zeitprogramme und mit Eigenverbrauchsmanager für ein System mit Wärmepumpe und Warmwassererwärmung. Legende siehe Abb. 5.

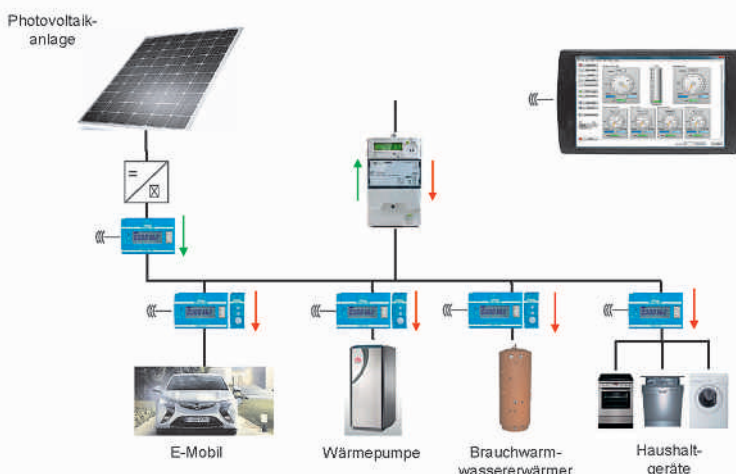


Abb. 7: Typische Installation mit zusätzlichen Energiezählern und Relais (blau), Datenübertragung per Funk. Geschaltete Verbraucher: Elektromobil, Wärmepumpe, Warmwassererwärmer. Nicht geschaltet: Haushaltgeräte.

Obige Betrachtung berücksichtigt noch kein Elektromobil. Mit Elektromobil kann die Eigenverbrauchsquote noch wesentlich gesteigert werden, was vor allem im Sommer interessant ist, um den produzierten Überschuss sinnvoll zu nutzen. Das Elektromobil kann als mobiler Energiespeicher angesehen werden, welcher die elektrische Energie mit einem sehr hohen Wirkungsgrad in Fortbewegung umsetzt. Aus heutiger Sicht ist dies finanziell interessanter als ein stationärer Batteriespeicher. Mit eigenem Strom der Photovoltaikanlage kann das Elektromobil zu 100% CO₂-neutral betrieben werden.

Der **Autarkiegrad** kann ebenfalls markant gesteigert werden (Abb. 6). Er ist allerdings stark abhängig vom Gebäudetyp. Naturgemäss haben gut isolierte Gebäude (SFH15) einen wesentlich höheren Autarkiegrad als schlechter isolierte Gebäude (SFH100). Je nach Gebäudetyp liegt eine Steigerung von 15–30% (Standard) auf 30–50% (Eigenverbrauchsmanager) drin.

Einfache Installation und vollständiger Datenschutz

Eine typische Installation ist in Abb. 7 dargestellt. Da die Datenübertragung zwischen den Komponenten über EnOcean®-Funktechnologie erfolgt, müssen keine zusätzlichen Leitungen verlegt werden. Das System eignet sich also bestens zur Nachrüstung und ist herstellerunabhängig. Zudem ist der Standby-Verbrauch der EnOcean®-Komponenten äusserst gering.

Es gelangen keine Energiedaten nach aussen ans Elektrizitätswerk oder ins Internet. Damit hat der Benutzer die volle Kontrolle und der Datenschutz ist vollständig gewährleistet.

Vom Elektrizitätswerk her ist die einzige Voraussetzung für die Eigenverbrauchs-optimierung ein saldierender Zweirichtungs-Zähler, welcher Nettobezug und Überschuss abrechnet. Gemäss Energieverordnung [1] ist das Elektrizitätswerk seit dem 01.01.2015 dazu verpflichtet, auf Wunsch des Eigentümers eine solche Installation vorzunehmen.

Für den Eigenverbrauchsmanager wird jeder grössere Produzent und Verbraucher mit einem internen Energiezähler versehen (Abbildung 7, blau). Bei den Verbrauchern muss zunächst entschieden werden, welche Geräte geschaltet werden. Wie eingangs erwähnt lohnen sich nur die grösseren Verbraucher wie Wärmepumpen, Brauchwarmwassererwärmer und Elektromobile. Die restli-

chen Haushaltgeräte wie Kochherd, Geschirrspüler und Waschmaschine werden im Allgemeinen nicht geschaltet. Deren Energieverbrauch wird summarisch mit einem Zähler erfasst.

Die Energiezähler und Relais werden im Elektroverteilschrank durch den Elektro-Fachmann installiert. Die Energiedaten werden über Funk an die Zentraleinheit im Wohnzimmer gesendet. Dort werden Sie im Regler verarbeitet.

Wärmepumpe und Warmwassererwärmer werden über die EW-Sperrsignale geschaltet. In Zukunft werden sich weitere Schnittstellen wie SGReady® [5] durchsetzen (SG für SmartGrid). Damit ist ein forciertes Betrieb auf höherem Temperaturniveau möglich, was für den Eigenverbrauch sehr interessant ist.

Aktuelle Produktion und Verbrauch aller Geräte im Blickfeld

Mit einer grafischen Darstellung der Leistungsverläufe kann das zeitliche Verhalten aller Produzenten und Verbraucher überwacht werden (Abbildung 8 oben). Über die Leistungsbilanz (Abb. 8 unten) wird der zeitliche Verlauf von Netzbezug und Einspeisung angezeigt. →

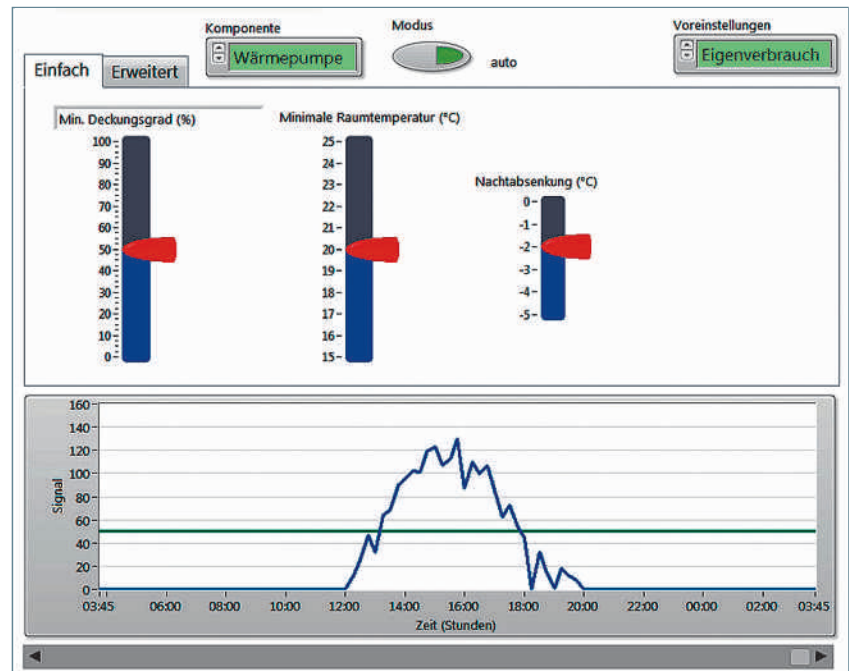


Abb. 9: Automatik-Modus für die Optimierung des Eigenverbrauchs, Beispiel Wärmepumpe. Vorgabewerte sind der minimale solare Deckungsgrad in % (Schieberegler links) sowie die minimale Raumtemperatur in °C (Schieberegler Mitte und rechts für Nachtabsenkung). Im Plot unten ist der Verlauf des solaren Deckungsgrads (blau) sowie der vorgegebene Schwellwert (grün) dargestellt. Beim Überschreiten des Schwellwerts wird die Wärmepumpe eingeschaltet.



Abb. 8: Bedienoberfläche mit Leistungsverläufen (kW) für alle Produzenten und Verbraucher (oben) und aktueller Leistungsbilanz (unten: positive Werte für Bezug, negative Werte für Einspeisung).



Abb. 10: Automatik-Modus für die Optimierung der Kosten, Beispiel Wärmepumpe. Vorgabewerte sind die Preisgrenze in Rp./kWh (Schieberegler links) sowie die minimale Raumtemperatur in °C (Schieberegler Mitte/rechts). Im Plot unten ist der Verlauf des variablen Strompreises (blau) sowie die vorgegebene Preisgrenze (grün) dargestellt. Beim Unterschreiten der Preisgrenze wird die Wärmepumpe eingeschaltet.

Eigenverbrauchsoptimierung mit Komfortüberwachung

Im Eigenverbrauchs-Modus lässt die Software die Geräte dann laufen, wenn die Photovoltaik-Anlage genügend Strom liefert (Abb. 9). Für jedes Gerät kann vorgegeben werden, ab welchem solaren Deckungsgrad (%) es betrieben werden soll. Falls ein Deckungsgrad von 100 % gewählt wird, wird das Gerät vollständig mit Solarstrom betrieben. Dies ist allerdings nur bei einer optimalen Abstimmung der PV-Anlagengröße auf den Verbraucher möglich. Andernfalls können auch kleinere Deckungsgrade gefahren werden (Beispiel 50 % für Wärmepumpe).

Damit der Raumkomfort auch an kalten Wintertagen ohne solare Produktion immer eingehalten wird, kann die minimale Raumtemperatur vorgegeben werden. Die Raumtemperatur wird ständig mit einem Raumfühler gemessen und überwacht.

Kostenoptimierung nach dem Prinzip der Strombörse

Als wesentliche Innovation wird der interne Strompreis laufend aus dem externen Tarif und dem Anteil lokaler Produktion berechnet. Somit entsteht über den Tagesverlauf ein variabler Preis (Abbildung 10, blaue Kurve). Nachts liegt der variable Preis auf dem Nacht-

tarif (Beispiel 14 Rp./kWh bis 7:00 Uhr und ab 21:00 Uhr). Tagsüber schwankt der variable Preis zwischen dem Bezugspreis (21 Rp./kWh) bei 100 % Netzbezug und dem Einspeisepreis (10 Rp./kWh) bei 100 % solarer Deckung. Dazwischen setzt sich der Preis anteilmässig aus Bezugs- und Einspeisepreis zusammen.

Die Kostenoptimierung funktioniert prinzipiell wie an der Strombörse: Unterhalb einer gewissen Preisgrenze wird «Strom eingekauft», d.h. das Gerät wird eingeschaltet. Für jedes Gerät kann eine Preisgrenze vorgegeben werden. Im vorliegenden Beispiel wird das Gerät also sowohl in der Nacht wie auch am Nachmittag bei vorhandener Produktion betrieben.

Selbstverständlich ist die Software damit bestens gerüstet für ein zukünftiges SmartGrid mit variablen (externen) Tarifen. Damit könnte auch der Netzbetreiber auf die lokale Optimierung Einfluss nehmen. ■

Anfragen und Kontakt
Prof. Dr. David Zogg
Institut für Automation
Fachhochschule Nordwestschweiz
david.zogg@fhnw.ch
www.fhnw.ch/ia

Referenzen (Auswahl)

- [1] *Energieverordnung 730.01 (EnV) des Bundes, Stand 1. April 2014*
- [2] *D. Zogg, BFE-Projekt OPTEG, Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden, Konzept und Regelstrukturen, Jahresberichte 2013 und 2014 (Projekt laufend)*
- [3] *M. Wiederkehr, S. Koch, Lokales Lastmanagement, FHNW IAST / ETH, www.lokales-lastmanagement.ch*
- [4] *BFE-Projekt «Kraftwerk Haus im ländlichen Raum, Umsetzung von Strom-Lastmanagement im Gebäude mit Eigenerzeugung aus Photovoltaik», Vertrags-/Projektnummer 154392/103330, Schlussbericht, 31. August 2012*
- [5] *SG Ready, Regularium für das Label «SG Ready» für elektrische Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen, BWP Bundesverband Wärmepumpe e. V., Berlin, Jan 2013*
- [6] *BFE-Projekt Standardschaltungen für Kleinwärmepumpenanlagen, Teil 1: STASCH-Planungshilfen, H.R. Gabathuler, H. Mayer, Dr. Th. Afjei, 2002*
- [7] *The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, M. Haller, R. Dott, J. Ruschenburg, F. Ochs, J. Bony*