

# WENN ALGORITHMEN DEN PV-VERBRAUCH STEUERN

Wenn Haushalte Strom nicht nur konsumieren, sondern auch produzieren, werden sie zu Prosumern. Die wachsende Zahl von Prosumern führt in der Elektrizitätsversorgung zu neuen Fragestellungen. Um diese zu erforschen, hat die Berner Fachhochschule in Biel das «Prosumer-Lab» eingerichtet. Forscher des *Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique SA* (CSEM) haben dieses Labor nun für die Untersuchung von Energiemanagementsystemen genutzt, mit denen sich der Eigenverbrauch von Photovoltaik (PV)-Strom erhöhen lässt. Die Resultate zeigen: Der Beitrag der Energiemanager zur Erhöhung des Eigenverbrauchs sollte nicht überschätzt werden. Und: Die Systeme müssen richtig konfiguriert werden, damit unerwünschte Effekte vermieden werden.



Unterschiedliche Batterietypen wie beispielsweise die DC-gekoppelten Batterien auf dem Foto sind im Prosumer-Lab als Hardware vorhanden. Sie werden über einen Wechselrichter angeschlossen, welcher hier von Yoann Moullet, Assistent im Prosumer-Lab, eingestellt wird. Foto: BFH

Nach dem rasanten Ausbau in den letzten Jahren zählt die Schweiz über 84'000 PV-Anlagen. Viele Besitzer decken mit dem Solarstrom einen Teil ihres eigenen Bedarfs. Auch Bauern produzieren – neben Wärme – eigenen Strom, wenn sie Gülle und organische Abfälle in landwirtschaftlichen Biogasanlagen vergasen. Die Beispiele zeigen: Der Trend geht hin zur dezentralen Produktion. Um diesen Paradigmenwandel zu beschreiben, hat sich der Begriff «Prosumer» etabliert: Prosumer konsumieren nicht nur Strom, den sie von aussen beziehen, sondern sie produzieren auch Strom, den sie selbst verbrauchen oder anderen Konsumenten über das allgemeine Netz zur Verfügung stellen.

### Prosumer als Forschungsgegenstand

Mit dem Erstarren der Prosumer wandelt sich die Stromversorgung. Früher war das Stromnetz darauf ausgelegt, den

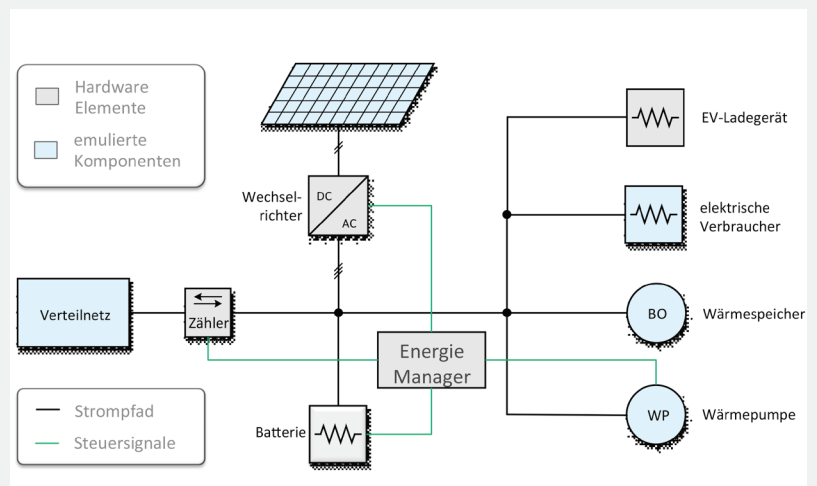
in grossen Wasser- und Kernkraftwerken produzierten Strom auf die Haushalte zu verteilen. Heute fliesst Strom von dezentralen Kraftwerken ins Netz. Die Betreiber der Verteilnetze stehen vor der Frage, ob diese die Belastungen durch die dezentrale Stromeinspeisung bewältigen und ob die Netzstabilität auch bei einem fortschreitenden Ausbau der dezentralen Produktion gewahrt bleibt. Betroffen von dieser Herausforderung ist auch die BKW Energie AG, die im Kanton Bern und in angrenzenden Kantonen rund eine Millionen Menschen mit Strom versorgt.

Vor diesem Hintergrund hat ein Wissenschaftlerteam an der Berner Fachhochschule (BFH) mit Unterstützung der BKW ein Labor aufgebaut, das diese Fragen praxisnah untersucht. Das Prosumer-Lab ist Teil des Energy Storage Research Centers (ESReC), das BFH und CSEM in Biel betreiben. Das Labor er-

## EIN EINFAMILIENHAUS IM LABOR NACHGEBAUT

Um die elektrischen Systeme von Prosumern und ihre Wechselwirkung mit dem umgebenden Stromnetz untersuchen zu können, braucht es idealerweise ein Einfamilienhaus, bei dem sich alle Einstellungen zu Stromproduktion und -verbrauch möglichst wählen lassen. Denn nur so können alle denkbaren Betriebszustände, wie sie in der Realität vorkommen, untersucht werden.

Eine derartige Nachbildung des elektrischen Systems eines Einfamilienhauses leistet das Prosumer-Lab in Biel mit verschiedenen Komponenten: Ein Emulator erlaubt es, alle elektrischen Lasten eines Haushalts (von der Wärmepumpe über Backofen und Rasierapparat bis zum Handyladegerät) nachzubilden. Hinzu kommen acht weitere Emulatoren mit je 5 kW Leistung, welche die schwankende Stromproduktion einer PV-Anlage nachbilden können, und ein weiterer Emulator steht für den Netzanschluss des Hauses (dreiphasig, mit variabler Frequenz und Amplitude bis 50 kVA). Das nachgebaute Eigenheim im Prosumer-Lab umfasst ferner aktuell vier Batteriespeicher. Die Steuerung der Hardware-Komponenten erfolgt über ein Echtzeitsystem, programmiert mit MATLAB/Simulink. Thermische Parameter wie Raumtemperatur, Warmwasserbedarf oder Verluste von thermischen Speichern werden mit der Planungssoftware Polysun simuliert.



Das Prosumer-Lab besteht aus handfesten Hardware-Komponenten. Denn Emulatoren sind Geräte, die reale Stromflüsse erzeugen. Sie unterscheiden sich von Simulationen, welche Stromflüsse nur rechnerisch vergegenwärtigen. Die schematische Darstellung veranschaulicht die Komponenten des Einfamilienhauses, das die Forscher von BFH und CSEM ihrer Untersuchung von drei Energiemanagementsystemen zugrunde legten. BV

➤ Das Prosumer-Lab ist im Gebäude des Switzerland Innovation Park (fünf Gehminuten vom Bahnhof Biel) untergebracht. Für Führungen richten sich technisch interessierte Personengruppen an Steffen Wienands (steffen.wienands@bfh.ch).

möglicht es, die Stromversorgung eines Einfamilienhauses realitätsgetreu nachzubilden (vgl. Textbox S. 2). «Hier können Forschende der BFH, aber auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anderer Institutionen die Stromflüsse in einem Einfamilienhaus und die Wechselwirkungen mit dem Verteilnetz untersuchen», sagt BFH-Wissenschaftler Steffen Wienands.

### Drei Energiemanagementsysteme im Test

Das Labor ging Mitte 2018 in Betrieb. Ein Jahr später liegen erste Ergebnisse einer Untersuchung zu Energiemanagementsystemen vor. Solche Energiemanager bieten die Möglichkeit, Energieflüsse im Zeitverlauf aufzuzeichnen und auszuwerten, aber auch zu beeinflussen. Mehrere kommerzielle Anbieter haben solche Systeme in den letzten Jahren auf den Markt gebracht mit dem Versprechen, Einfamilienhaus-Besitzer könnten mit ihnen auch den Eigenverbrauch des selbst produzierten PV-Stroms erhöhen und damit Geld sparen, da die Netzeinspeisung von PV-Strom vielerorts relativ schlecht vergütet wird. Um den Eigenverbrauch zu steigern, schalten Energiemanagementsysteme elektrische Lasten wie beispiels-



Der schwarze Korpus im Prosumer Lab enthält die drei Energiemanagementsysteme, deren Leistungsfähigkeit BFH-Forscher Steffen Wienands und seine Kollegen im Rahmen eines aktuellen Projekts untersucht haben. Foto: B. Vogel

weise eine Wärmepumpe über ein Smart-Grid-Ready-Signal (vgl. Textbox unten) nach Möglichkeit zu Zeiten ein, wenn PV-Strom erzeugt wird. So wird die Wärmepumpe dann betrieben, wenn die PV-Anlage mehr Strom produziert, als im

## STEUERUNG MIT SMART-GRID-READY-SIGNAL

Damit ein Energiemanagementsystem eine Wärmepumpe optimal mit PV-Strom versorgen kann, müsste es jederzeit über deren Betriebszustand informiert sein. Solche Schnittstellen sind heute noch nicht auf dem Markt. Stattdessen werden Wärmepumpen bislang noch relativ rudimentär mit dem sogenannten Smart-Grid-Ready-Signal (kurz: SG-Ready) angesteuert. Das SG-Ready-Signal kann von der Wärmepumpe vier Betriebszustände «verlangen»:

*Signal 1:* Die Wärmepumpe läuft so, wie sie es auch ohne SG-Ready-Signal täte: Sinkt die Wassertemperatur unter den unteren Schwellenwert, springt die Wärmepumpe an; erreicht die Wassertemperatur den oberen Schwellenwert, schaltet die Wärmepumpe aus.

*Signal 2:* Die Wärmepumpe wird durch das SG-Ready-Signal angewiesen, für die Dauer von zwei Stunden keinen Strom zu beziehen (um so z.B. während der Mittagszeit das stark beanspruchte Stromnetz zu entlasten).

*Signal 3:* Die Wärmepumpe wird angewiesen, Strom zu beziehen, sofern dies möglich ist.

*Signal 4:* Die Wärmepumpe wird verpflichtet, Strom zu beziehen.

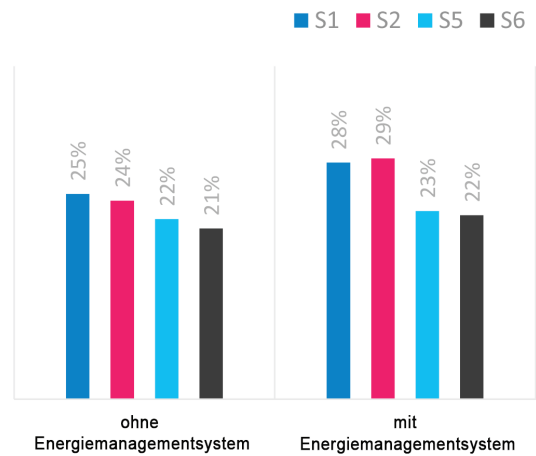
Die SG-Ready-Signale 3 und 4 können dafür genutzt werden, die Wärmepumpe dann in Betrieb zu nehmen, wenn viel PV-Strom vorhanden ist. Wie diese Steuerbefehle von den Wärmepumpen konkret umgesetzt werden, werde von den Herstellern allerdings unterschiedlich gehandhabt, sagt CSEM-Forscher Andreas Hutter. «Es war bei den von uns untersuchten Wärmepumpen oft unklar, wie sie auf SG-Ready-Signal 3 und 4 konkret reagierten. Ein Hersteller erhöht bei SG-Ready-Signal 3 die Schwellenwerte für das Heiz- und Brauchwarmwasser um 5 Grad, bei SG-Ready-Signal 4 dann um 10 Grad, um so Spielraum für eine zusätzliche Energieaufnahme zu schaffen. Das ist ein sinnvoller Ansatz, denn in einem 500 l-Tank kann man mit zusätzlichen 10 Grad immerhin 2 kWh elektrische Energie speichern (Annahme COP von 3). Doch insgesamt mussten wir feststellen, dass die Hersteller nicht gewährleisten können, dass bei SG-Ready-Signal 4 in jedem Fall Energie aufgenommen wird, wie es eigentlich sein müsste.» BV

übrigen Haushalt gebraucht wird. Die Wärmepumpe kann flexibel betrieben werden, da das bereitgestellte Warmwasser für Heizung und Brauchwasser in einem Boiler zwischengespeichert wird.

Die Forscher des CSEM untersuchten im Prosumer-Lab drei marktübliche Energiemanagementsysteme. Der Effekt auf den Eigenverbrauch fiel nüchtern aus: Die Eigenverbrauchsquote stieg bei typischen Systemkonfigurationen lediglich um ein bis fünf Prozentpunkte, abhängig vom Haushaltstyp (vgl. Grafik rechts). Trotz Einsatz der Energiemanager konnte im Durchschnitt kaum mehr als ein Viertel (25.5%) des im Jahresverlauf produzierten PV-Stroms direkt für den Betrieb der Wärmepumpe genutzt werden. Erst wenn der Haushalt mit einem 10 kWh-Batteriespeicher ergänzt wurde, stieg die Eigenverbrauchsquote merklich auf durchschnittlich 44%.

«Der Eigenverbrauch liesse sich – bei Verwendung desselben Batteriespeichers – weiter steigern, wenn die Energiemanagementsysteme mit verbesserten Algorithmen ausgerüstet würden (z.B. durch Einbezug von Wetter- und Verbrauchsprognosen)», sagt Dr. Andreas Hutter, Leiter der Gruppe Energiesysteme am PV-Center des CSEM. Ein höherer Eigenverbrauch wäre auch möglich, wenn auf dem Markt Schnittstellen für eine effizientere Kommunikation mit der Wärmepumpe verfügbar wären, mit der sich die Leistung der Wärmepumpe kontinuierlich an die verfügbare PV-Überschussleistung anpassen liesse, sagt Hutter. Ein anderer Weg besteht im Einbau grösserer Warmwasserspeicher, womit ein grösserer Teil des PV-Stroms in Form von Wärme gespeichert werden kann.

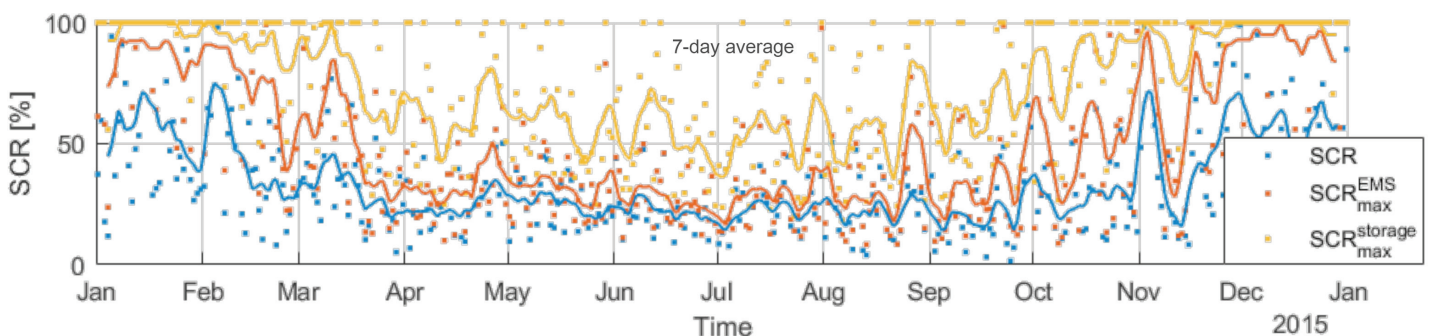
## Eigenverbrauch von Photovoltaikstrom



Die untersuchten Energiemanagementsysteme erhöhen den Eigenverbrauch an Solarstrom in einem schlecht isolierten Einfamilienhaus um einen Prozentpunkt (Szenario S5 und S6) bis maximal fünf Prozentpunkte in gut isolierten Häusern (Szenario S1 und S2). S1 und S5: das Haus wird von einer vierköpfigen Familie bewohnt. S2 und S6: das Haus wird von zwei erwerbstätigen Erwachsenen bewohnt. In der Grafik sind die Resultate eines Energiemanagers dargestellt; die Werte der anderen untersuchten Geräte unterscheiden sich nur unwesentlich. Grafik: CSEM/bearbeitet B. Vogel

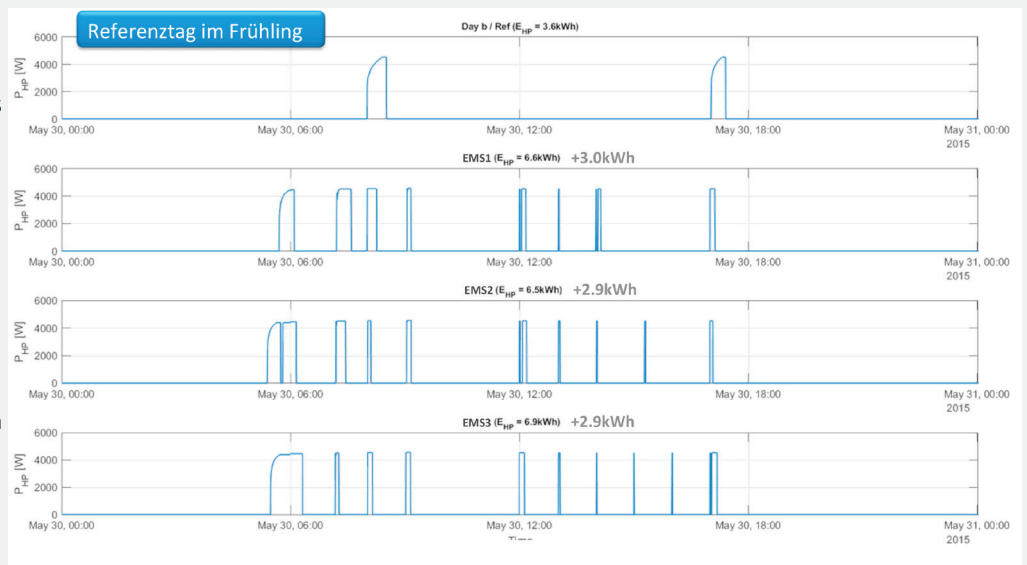
## Energiemanager richtig konfigurieren

Die Wissenschaftler haben im Prosumer-Lab auch die Stromflüsse beim Einsatz von Energiemanagementsystemen nachgebildet. Dabei zeigte sich erwartungsgemäss, dass ein erhöhter Eigenverbrauch von PV-Strom mit einer verminderten Netzeinspeisung im gleichen Umfang einhergeht. Wird aber mit einem höheren Eigenverbrauch auch der Netzbezug ent-



Die Grafik zeigt die Eigenverbrauchsrate (self consumption rate/SCR) für das untersuchte Einfamilienhaus mit PV-Anlage (Szenario S1). Die Kurven veranschaulichen den laufenden Mittelwert über die letzten sieben Tage. Die blaue Kurve zeigt die Eigenverbrauchsrate ohne Energiemanagementsystem. Die rote Kurve zeigt die (bei 24-Stunden-Bilanzierung) theoretisch maximal zu erreichende Eigenverbrauchsrate bei Einsatz eines optimalen Energiemanagementsystems an, wobei ein optimaler Steuerungsalgorithmus unter idealen Bedingungen es schaffen sollte, die Wärmepumpe immer dann zu betreiben, wenn die Sonne scheint. Die gelbe Kurve zeigt die dementsprechende maximal erreichbare Eigenverbrauchsrate an, die mit einem optimal gesteuerten Energiemanagementsystem und einer Batterie erreicht werden kann, wobei hier angenommen wird, dass eine unendlich grosse Speicherkapazität zur Verfügung steht. Grafik: CSEM

Die Grafik zeigt die Laufzeiten der Wärmepumpe eines Einfamilienhauses an einem Frühlingstag, zunächst ohne Einsatz eines Energiemanagementsystems (oberste Grafik), dann bei Verwendung von einem der drei getesteten Energiemanagementsysteme (zweite, dritte und vierte Grafik), wobei die Konfiguration der Energiemanagementsysteme bewusst schlecht gewählt wurde (sehr niedriger Einschaltpegel). Ohne Energiemanagementsystem läuft die Wärmepumpe einmal am frühen Vormittag und einmal um späten Nachmittag. Die Systeme setzen die Wärmepumpe am frühen Morgen in Betrieb, sobald die Sonne scheint und damit PV-Strom verfügbar ist. Auch am Nachmittag setzen sie die Wärmepumpe in Betrieb, allerdings immer nur für kurze Zeit. Der Grund: Die Temperatur im Warmwasserspeicher sinkt durch Wärmeverluste leicht ab; dies interpretieren die Energiemanager als Signal, diesen wieder aufzuheizen. Weil die Soll-Temperatur aber nur minimal unterschritten ist, läuft die Wärmepumpe nur für sehr kurze Zeit. Dies ist auch die Folge einer bewusst schlecht gewählten Konfiguration (sehr kurze Einschaltzeit der Wärmepumpe). Grafik: CSEM

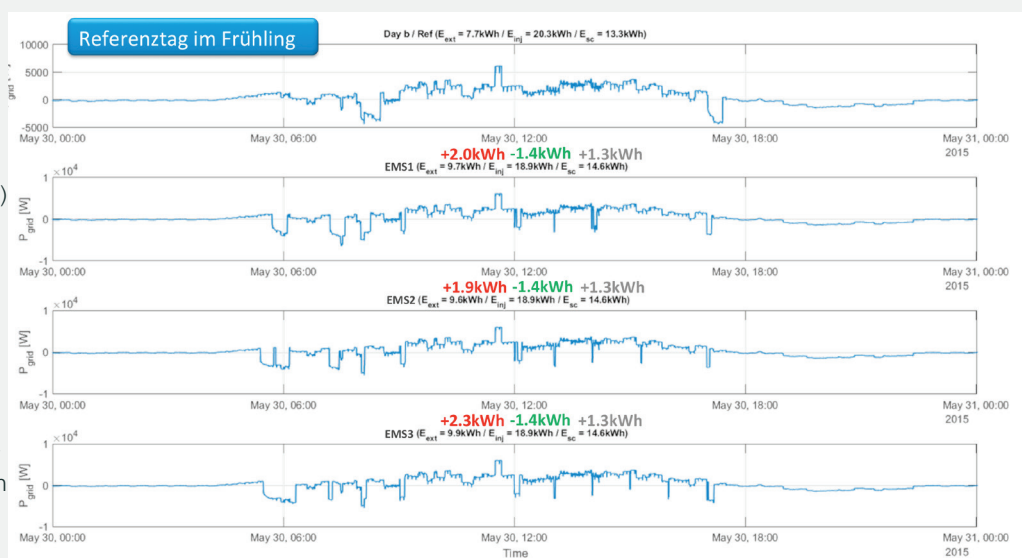


sprechend gesenkt? Nicht zwangsläufig, wie die Forscher zeigen konnten. Vielmehr steigt der Netzbezug im ungünstigen Fall sogar merklich an. Der Grund: Der Strom aus der PV-Anlage (z.B. typischerweise 2 kW im Winter) deckt den Bedarf der Wärmepumpe (typischerweise 3 kW) nicht vollständig; es muss daher zum Betrieb der Wärmepumpe auch Netzstrom bezogen werden. Steht nur wenig PV-Strom zur Verfügung,

muss relativ viel Netzstrom eingesetzt werden. «Zu diesem unerwünschten Effekt kommt es, wenn die Energiemanager schlecht konfiguriert sind, was in der Realität oftmals vorkommt», sagt Andreas Hutter.

Solche ungünstigen Effekte können vermieden werden, wenn der Einschaltpegel des Energiemanagers hoch genug

Hier wird dargestellt, wie sich die in der Grafik oben dargestellte Steuerung der Wärmepumpe auf den Strombezug auswirkt: Ohne Verwendung eines Energiemanagementsystems (ganz oben) werden vom PV-Strom 13.3 kWh für den Eigenverbrauch ( $E_{sc}$  = Energy self consumption) genutzt, weitere 20.3 kWh ins Stromnetz eingespeist ( $E_{inj}$  = Energy injected). Um den Haushalt mit Strom zu versorgen, müssen zudem 7.7 kWh aus dem Stromnetz bezogen werden ( $E_{ext}$  = Energy extern). Bei Einsatz der drei untersuchten Energiemanagementsysteme (zweite, dritte und vierte Kurve) in bewusst ungünstig gewählter Konfiguration wird der Eigenverbrauch über den Tag um 1.3 kWh ( $E_{sc}$ ; graue Zahl) erhöht und die Netzeinspeisung ( $E_{inj}$ ; grüne Zahl) entsprechend verringert. Dabei ist der Bezug aus dem Stromnetz nicht etwa konstant, wie man erwarten könnte, sondern steigt relativ stark an ( $E_{ext}$ ; rote Zahl). Schuld an diesem Effekt ist der zu klein gewählte Einschaltpegel der Energiemanager. Grafik: CSEM



eingestellt wird. Anders ausgedrückt: Die Wärmepumpe soll nur dann für den Betrieb mit PV-Strom in Betrieb genommen werden, wenn so viel PV-Strom zur Verfügung steht, dass ein Grossteil des Bedarfs mit PV-Strom gedeckt werden kann. Zudem muss durch entsprechende Einstellung der Wärmepumpe sichergestellt werden, dass diese nicht für nur kurze Laufzeiten eingeschaltet wird. «Energiemanager helfen uns dabei zu erkennen, ob Wärmepumpen zweckmässig konfiguriert sind», sagt Hutter.

### Aktuell noch nicht rentabel

Die Studie der CSEM-Forscher im Prosumer-Lab der BFH lässt auch Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit der heute verfügbaren Energiemanager zu. Da diese Systeme den Eigenverbrauch steigern, helfen sie Geld zu sparen, da man mit einer ins Netz eingespeisten Kilowattstunde vielerorts weniger erhält als man für eine aus dem Netz bezogene Kilowattstunde bezahlt. Wie hoch der finanzielle Vorteil ausfällt, haben die Forscher exemplarisch für vier Haushaltstypen und drei Standorte errechnet, nämlich Koppigen (Vergütung für eingespeisten Strom so hoch wie der Preis von gekauftem Strom), Bern (mittlere Einspeisevergütung von 10 Rp./kWh) und Eggwil (tiefe Einspeisevergütung von 4 Rp./kWh). In Bern und Eggwil, wo sich der Einsatz von Energiemanagern lohnen sollte, lassen sich pro Jahr maximal 48 Fr. sparen, bei den meisten Szenarien allerdings deutlich weniger. Bei Anschaffungskosten von 1000 Fr. und mehr seien Energiemanager zur reinen Steigerung des Energieverbrauchs heute nicht rentabel, halten die Forschenden fest.

Wird zusätzlich zum Energiemanagementsystem eine Batterie (Kapazität 10 kWh) eingesetzt, lassen sich – abhängig von Szenario und Standort – im besten Fall bis zu 400 Fr. pro Jahr sparen. Doch auch das lohnt sich für den Eigenheimbesitzer heute kaum: Unter Berücksichtigung der Batteriekosten – rund 7000 Fr. inkl. Transport- und Installationskosten – resultieren Amortisationszeiten, die deutlich über der garantierten Lebensdauer der Batterie liegen (typischerweise 3000 bis 5000 Zyklen, also 8 bis 14 Jahre bei täglichen Lade-/Entladezyklen). Das Fazit: Bei Einsatz eines Energiemanagers und einer Batterie lässt sich der Eigenversorgungsgrad zwar deutlich erhöhen. Bis sich der Einsatz im Eigenheim-Bereich aber finanziell lohnt, müssten sich die Batteriekosten rund auf 300 Fr/kWh halbieren.

## PILOT-, DEMONSTRATIONS- UND LEUCHTTURM-PROJEKTE DES BFE

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat die im Haupttext dargestellten Untersuchungen an den Energiemanagementsystemen im Prosumer-Lab finanziell unterstützt. Das Projekt gehört zu den Pilot- und Demonstrationsprojekten, mit denen das BFE die Entwicklung von sparsamen und rationellen Energietechnologien fördert und die Nutzung erneuerbarer Energien vorantreibt. Das BFE fördert Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte mit 40% der nicht amortisierbaren, anrechenbaren Kosten. Gesuche können jederzeit eingereicht werden.

### ➤ Informationen unter:

[www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration](http://www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration)

- Informationen zum **Energy Storage Research Center** (ESReC) von BFH und CSEM unter: [www.esrec.swiss](http://www.esrec.swiss).  
Informationen zum **BFH-Zentrum Energiespeicherung** unter: [www.bfh.ch/energy](http://www.bfh.ch/energy).
- Informationen zum **CSEM** unter: [www.csem.ch](http://www.csem.ch)
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Dr. Men Wirz (men.wirz[at]bfe.admin.ch), verantwortlich für das Pilot- und Demonstrationsprogramm des BFE
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Netze finden Sie unter [www.bfe.admin.ch/ec-strom](http://www.bfe.admin.ch/ec-strom).