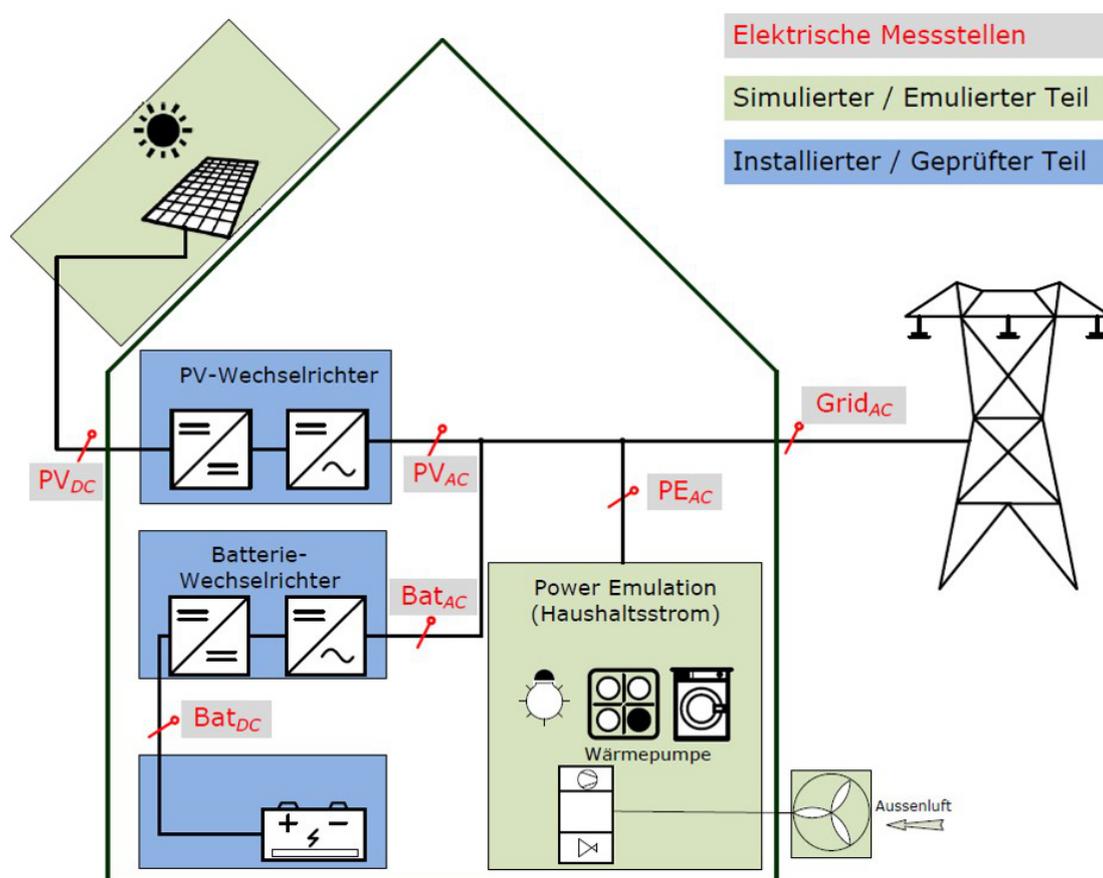


EIN JAHR VERKÜRZT AUF DREI TAGE

Immer häufiger werden Photovoltaik-Anlagen mit einem Batteriespeicher ergänzt, um den Solarstrom in grösserem Umfang selber nutzen zu können. Ein Forscherteam der Ostschweizer Fachhochschule hat nun einen dreitägigen Testzyklus für solche Speichersysteme entwickelt. Mit ihm lassen sich die Jahreskennzahlen von Speichern ziemlich genau ermitteln und die Umwandlungsverluste quantifizieren. Von den Prüfergebnissen profitieren Hersteller, Händler, Installateure, aber auch die interessierte Öffentlichkeit. Batteriespeichersysteme können jetzt objektiv miteinander verglichen werden.

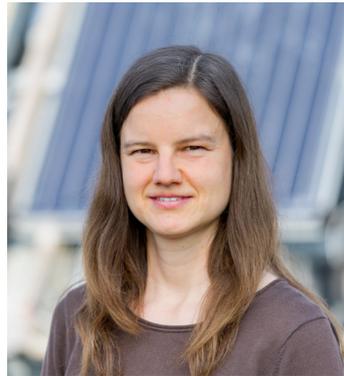


Aufbau des CCT-Bat-Prüfstands, hier für AC-gekoppelte Systeme, bei denen der Gleichstrom erst in Wechsel- und dann wieder in Gleichstrom umgerichtet wird, bevor er zur Ladung der Batterie herangezogen wird. Blau unterlegt sind die Komponenten des Batteriespeichersystems, das auf dem Prüfstand getestet wird. Um dies tun zu können, werden die Stromproduktion der PV-Anlage und der Stromverbrauch des Haushalts emuliert. Illustration: Schlussbericht CCT-Bat

Im Jahr 2020 wurde in der Schweiz soviel Photovoltaik (PV) zugebaut wie nie zuvor: Solarmodule mit einer Leistung von 476 MW wurden installiert, so dass der Schweizer Solarpark nun eine Leistung von nahezu 3000 MW aufweist und knapp 5 % des landesweiten Stromverbrauchs mit Solarstrom deckt. Die im Auftrag des BFE von Swissolar erstellte «Statistik Sonnenenergie 2020» belegt auch den anhaltenden Trend zum Einsatz von Batteriespeichern: Deren Verkauf nahm gegenüber dem Vorjahr um 65 % zu. Unterdessen werden 15 % aller PV-Anlagen auf Einfamilienhaus-Dächern mit einem Stromspeicher kombiniert. Per Ende 2020 summierte sich in der Schweiz die Speicherkapazität auf insgesamt 28'400 kWh. Die Beweggründe für den Einbau von Batteriespeichern sind vielfältig; sie reichen vom Wunsch nach Steigerung des Eigenverbrauchs über Technologiebegeisterung und Notstromvorsorge bis zu der Hoffnung, tiefe Rückliefer-tarife umgehen zu können.

Batterie mit Wechselrichter und Steuerung

Batteriespeicher sind eine bedeutende Komponente eines Stromversorgungssystems, das auf Photovoltaik fusst. Um so wichtiger ist es, Verhalten und Leistung solcher Systeme zu kennen. Dieses Wissen ist heute noch nicht in hinreichendem Mass verfügbar, wie Evelyn Bamberger, Forscherin am Institut für Solartechnik SPF an der Ostschweizer Fachhochschule (OST) in Rapperswil, betont: «Die Hersteller nennen zwar nutzbare Kapazität und Ladeleistung von Batterien, teils auch



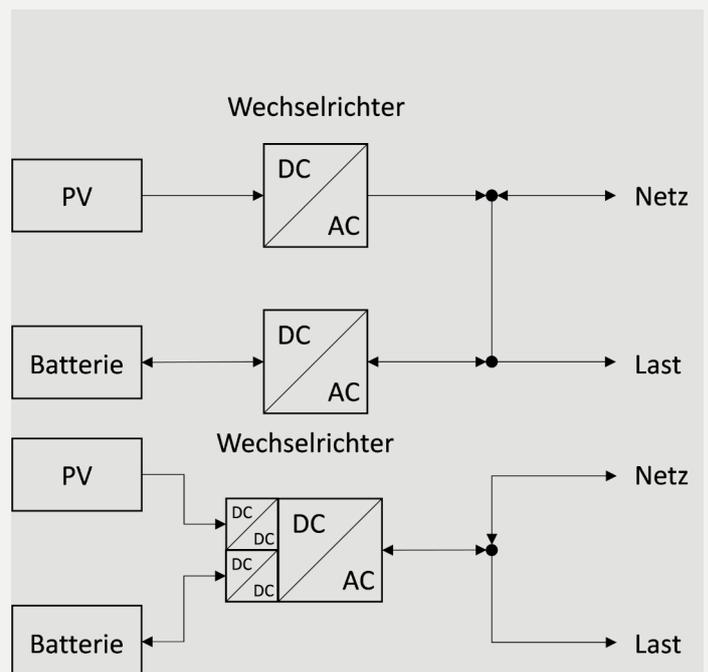
CCT-Bat-Projektleiterin Evelyn Bamberger. Die diplomierte Wirtschaftsingenieurin verantwortete früher bei einem Solartechnikunternehmen das Projektmanagement für grössere Solaranlagen. Seit sechs Jahren forscht sie am Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil. Foto: privat

maximale Wirkungsgrade des Batteriemoduls oder des Wechselrichters, zum Verhalten des Gesamtsystems im Betrieb aber fehlen meist Angaben.»

Diese Lücke will Bamberger mit einem Testzyklus schliessen, den sie zusammen mit einem Team der OST im Rahmen eines BFE-Projekts entwickelt hat. Der Testzyklus macht es möglich, die relevanten Jahreskennzahlen eines Batteriespeichersystems in einem dreitägigen Testverfahren zu eruieren. Ein Speichersystem umfasst die Batterie (einschliesslich Batteriemanagementsystem) sowie einen oder mehrere Wechselrichter, die den Gleichstrom aus der Batterie in Wechselstrom für das Netz umwandeln. Dritte Komponente ist das Energiemanagementsystem, das die Stromflüsse so steuert, dass überschüssiger Strom gespeichert bzw. die Batterie zum gewünschten Zeitpunkt entladen wird. Batteriespeicher gibt es als AC- oder als DC-gekoppelte Systeme (vgl. Textbox).

AC- VERSUS DC-GEKOPPELT

PV-Anlagen produzieren Gleichstrom, Batterien speichern Gleichstrom, das Stromnetz aber funktioniert mit Wechselstrom. Für die erforderliche Umwandlung des Stroms von Gleich- in Wechselstrom kennen Batteriespeichersysteme zwei unterschiedliche Spielarten, die etwa gleich verbreitet sind: Bei AC-gekoppelten Systemen wird der Gleichstrom aus der PV-Anlage über einen Umrichter in Wechselstrom umgewandelt – dieser steht nun für den Haushalt zur Verfügung oder kann ins Netz eingespeist werden. Will man Strom speichern, muss der Wechselstrom über einen zweiten Wechselrichter in Gleichstrom umgewandelt werden. Bei DC-gekoppelten Systemen fliesst der Gleichstrom aus der Solaranlage direkt in die Batterie (wobei die Spannung angepasst werden muss mit einem Gleichstrom-Gleichstrom-Umrichter). Bei diesem System ist nur ein Umrichter von Gleich- zu Wechselstrom nötig. BV



Drei Tage sind genug

Was ein Batteriespeichersystem (kurz: Batteriespeicher) leistet, lässt sich auf Grundlage der Herstellerangaben berechnen, ggf. auch unter Beizug einer Simulationssoftware wie Polysun. Um festzustellen, ob diese Werte wirklich zutreffen, muss der Batteriespeicher unter realen Bedingungen betrieben werden. Dies kann erreicht werden, indem der Speicher an Emulatoren angeschlossen wird, die reale Ströme aufnehmen (Ladung von PV-Strom) und abgeben (Entladung an Haushalt oder das Stromnetz) können und damit die realen Betriebsbedingungen wirklichkeitsnah nachahmen (Hardware-in-the-Loop-Konzept). Genau das ist der Ansatz des neuen Testverfahrens der OST: Der zu testende Batteriespeicher wird dort im Labor während drei Tagen als Hardware in the Loop unter realitätsnahen Bedingungen betrieben.

Die drei Tage des Testzyklus entsprechen einem typischen Tag im Sommer, im Winter und in der Übergangszeit. Der Batteriespeicher funktioniert also im Prinzip wie an diesen drei ausgewählten Tagen. Durch aufwändige Simulationen und Wiederholen bei wechselnden Einflussgrößen haben die OST-Forscherinnen und Forscher das Testprofil (also: PV-Produktion und Haushalts-Verbrauch) so ausgestaltet, dass sich die Messwerte der drei Tage auf ein Jahr hochrechnen lassen. Damit kann der Testzyklus mit hoher Zuverlässigkeit das Ver-



Globalstrahlung (also die auf die PV-Module eintreffende Solarstrahlung) des dreitägigen Testprofils. Der erste Tag steht für einen Tag im Sommer, der zweite für einen Tag in der Übergangszeit, der dritte für einen Tag im Winter. Grafik: Schlussbericht CCT-Bat



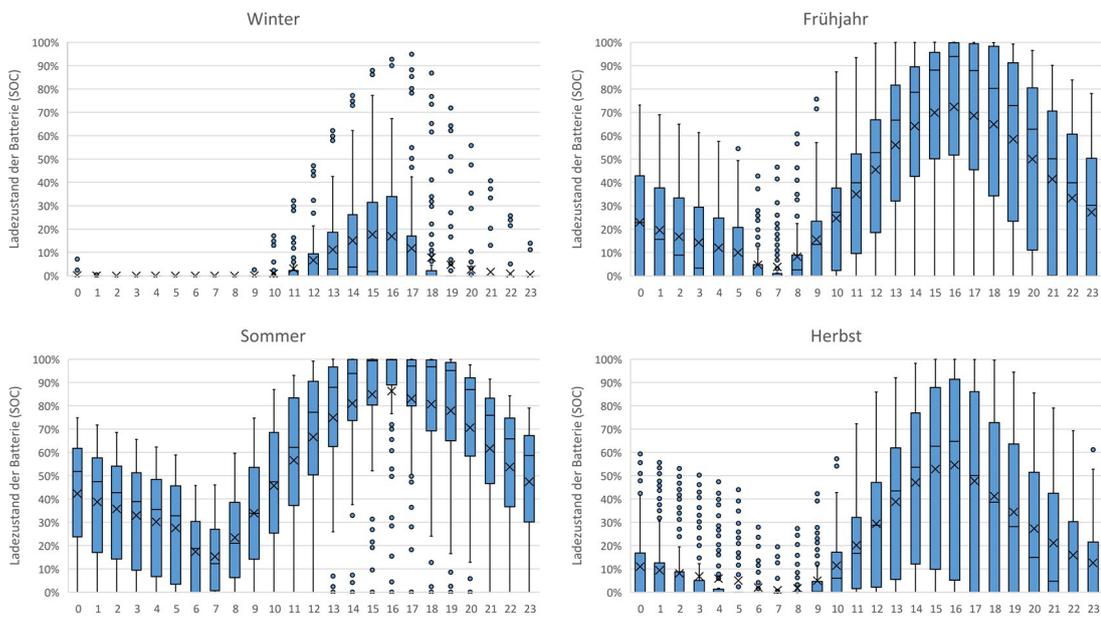
Mit diesen Emulatoren der Firmen Regatron (links) und Delta Elektronika (rechts) können Leistungen bis zu 10 kW respektive 45 kW erzeugt werden. Sie machen es möglich, Batteriespeichersysteme unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Foto: SPF

CONCISE CYCLE TEST FÜR BATTERIESYSTEME

Der im Haupttext dargestellte Prüfzyklus ist nur die jüngste Spielart eines schon länger angewandten Prüfverfahrens, für das auch die englische Bezeichnung «Concise Cycle Test» (CCT) verwendet wird. Concise Cycle Tests – auf Deutsch etwa: kurz gefasster Prüfzyklus – wurden am Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil ursprünglich zur Prüfung von Solarthermie-Anlagen in Kombination mit Öl- und Gaskesseln entwickelt. Die Grundidee: Man testet ein Solarsystem während einiger Tage unter so gewählten Bedingungen, dass die Messergebnisse das Verhalten des Systems während eines ganzen Betriebsjahres abbilden bzw. die Jahreswerte extrapoliert werden können.

Früher waren die Prüfzyklen zwölf Tage lang, später sechs Tage, jetzt – im Fall der Batteriespeicher – noch drei. Diese drei Tage bilden einen typischen Sommertag, einen typischen Wintertag und einen typischen Tag der Übergangszeit ab. Durch viel Probieren und Optimieren gelang es dem OST-Forscherteam, das Testprofil des CCT-Bat (Concise Cycle Test für Batteriespeicher) so zu gestalten, dass die Werte dieser relativ kurzen Testzeit auf ein Jahr extrapoliert werden können. Grundlage des Testprofils sind Wetterdaten der Stadt Zürich, der Stromverbrauch von Durchschnittshaushalten und eine PV-Anlage, die über das Jahr hinweg so viel Solarstrom produziert, wie der Haushalt verbraucht. Es gibt je ein Testprofil für ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus.

Der Testzyklus weist für einen getesteten Batteriespeicher Effizienz bzw. Verluste aus und zeigt überdies, wie gut er sein Ziel (z.B. Eigenverbrauchssteigerung, Tarifausnutzung, Leistungsbegrenzung) erreicht. Nicht direkt berücksichtigt wird im Testzyklus die Degradation der Batterie (alterungsbedingter Verlust an Speicherkapazität). Da der Prüfzyklus aber die Zahl der Lade-Entlade-Zyklen und den Ladezustand (SOC – State of Charge) erfasst, können daraus Rückschlüsse auf die Degradation gezogen werden. BV



Ladezustand der Batterie während eines typischen Tages in den vier Jahreszeiten (hier für den Batteriespeicher eines Mehrfamilienhauses), dargestellt mit Box-Plot-Diagrammen. Die Kreuze (x) zeigen für jede Stunde des Tages den Ladezustand, den die Batterie gemittelt über alle Saisonwerte hat (Median). Die blau eingefärbten Rechtecke markieren den Bereich, in dem die Hälfte der Werte liegen, die Punkte stehen für Ausreisser-Werte. Grafik: Schlussbericht CCT-Bat

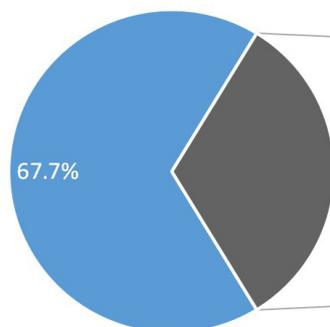
halten des untersuchten Batteriespeichers während eines Jahres quantifizieren. Oder mit den Worten von Evelyn Bamberger: «Wir können mit unserem Testzyklus innerhalb der kurzen Zeit von drei Tagen zeigen, ob ein Batteriespeicher tatsächlich leistet, was er zu leisten verspricht.»

Unterschiede bei Wechselrichter und Steuerung

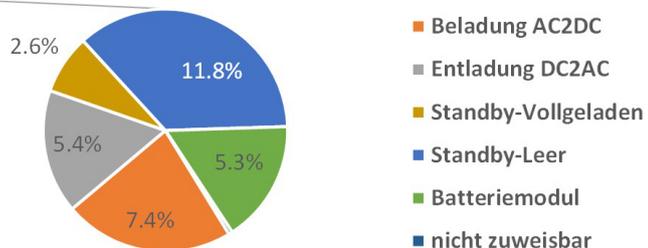
Nachdem der Testzyklus stand, machten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Probe aufs Exempel: Sie liessen vier Batteriespeicher für Einfamilienhäuser (Ladekapazität zwischen 2.25 und 7.7 kWh) den Textzyklus durchlaufen. Hier zeigte sich, dass der Testzyklus funktioniert und einen

Vergleich zwischen den Systemen erlaubt, da jeder Testzyklus unter den gleichen Bedingungen (Wetter, PV-Einspeiseprofil, Verbrauchsprofil des Haushalts) abläuft. Die Gesamtsystemeffizienz der vier Batteriespeicher lag zwischen 88 und 92 %. Diese Grösse gibt an, welcher Teil des PV-Ertrags über die Batterie, aber auch über Direktverbrauch oder Netzeinspeisung genutzt werden kann. Eine Gesamtsystemeffizienz von 88 bis 92 % heisst also, dass die Batteriespeicher die nutzbare Menge an Solarstrom um rund zehn Prozent schmälern (wobei gewisse Umwandlungsverluste auch ohne Batteriespeicher auftreten würden, da ein Wechselrichter in jedem Fall nötig ist). Der Anteil des selbst produzierten Stroms am selbst ge-

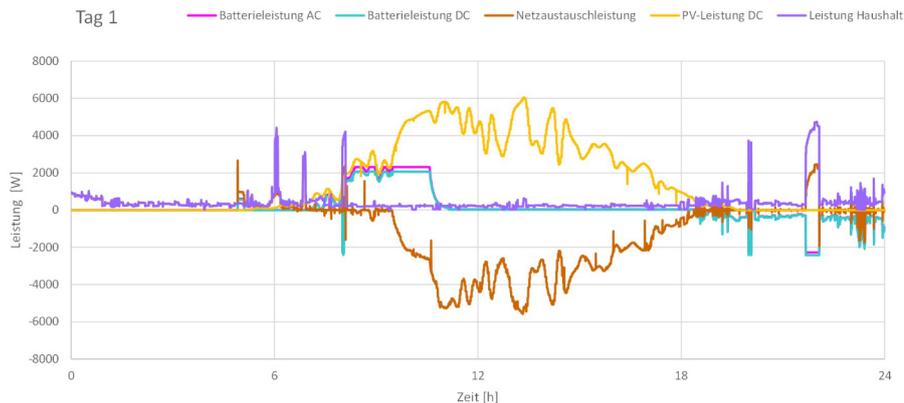
AC-Zykleneffizienz



Verluste



Verluste eines der untersuchten Batteriespeichersysteme (hier: AC-gekoppelt) während eines Lade-Entlade-Zyklus («AC-Zykleneffizienz»): Die Verluste entstehen durch die notwendige Umrichtung des Stroms bei Ladung und Entladung, durch Standby-Verluste in Ruhephasen und durch die Batterie. Die Verluste betragen in diesem Fall fast ein Drittel der gespeicherten Strommenge und sind damit relativ hoch. Von der AC-Zykleneffizienz zu unterscheiden ist die Effizienz des Gesamtsystems: Sie gibt an, welcher Teil des PV-Ertrags über die Batterie, aber auch über Direktverbrauch oder Netzeinspeisung genutzt werden kann. Die Effizienz des Gesamtsystems liegt bei rund 90 %. Grafik: Schlussbericht CCT-Bat



Messverlauf eines Batteriespeichers (hier: AC-gekoppelt) am ersten Tag des dreitägigen Prüfzyklus'. Tag 1 bildet den Sommer ab. Die fünf Leistungskurven stehen für die Batterieleistung AC (rosa), Batterieleistung DC (grün), Netzaustauschleistung (braun), PV-Leistung DC (gelb) und Bezug des Haushalts (lila). Bei Tag 1 sieht man beispielsweise, dass in den Morgenstunden der Speicher geladen wird und dann – weil die Aufnahmeleistung der Batterie ausgeschöpft ist – relativ schnell viel mehr PV-Leistung ans Netz abgegeben wird. Grafik: Schlussbericht-CCT Bat

brauchten Strom (Autarkiegrad) lag in der Studie bei 35 bis 47 %.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler weisen in ihrem Schlussbericht zuhanden des BFE darauf hin, dass sich die Batteriespeicher hauptsächlich bei Wechselrichter und Steuerung (Energiemanagementsystem) unterscheiden, während die Batterien (in allen vier Fällen Lithium-Ionen-Technologie) kaum Differenzen zeigten. «Umwandlungs- und Standby-Verluste machen einen wesentlichen Unterschied zwischen den Systemen aus», hält das Autorenteam im BFE-Schlussbericht fest (vgl. auch Abbildung S. 4 unten).

Graue Energie einbeziehen

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der OST wollen den Testzyklus in Zukunft weiter verfeinern. Er soll so modifiziert werden, dass er auch Batteriesysteme prüfen kann, die mit prognosebasierten Steuerungen ausgerüstet sind. Diese lernen aus Produktions- und Verbrauchsdaten der Vergangenheit und prognostizieren daraus den künftig erwarteten PV-Ertrag und Haushaltsstrom-Verbrauch, manche beziehen auch eine Wetterprognose mit ein. Die Algorithmen solcher Steuerungen sind das Ergebnis maschineller Lernprozesse. Zum Training der Algorithmen soll eine spezielle Anlernphase implementiert werden. Bisher wurde für die Anlernung das Drei-Tage-Profil mehrmals wiederholt, was zu einem gewissen Lerneffekt führte. Allerdings ist die Reihenfolge der Testtage sowohl auf der Verbrauchs- als auch der Erzeugungsseite untypisch und erschwert somit den Lernprozess des Algorithmus'. Die Testergebnisse lassen sich daher nicht unbedingt auf die gewählten Randbedingungen im Jahr extrapolieren.

Prognosebasierte Steuerungen sind notwendig, wenn Batteriesysteme nicht nur zur Eigenverbrauchssteigerung, sondern beispielsweise auch zur Begrenzung der Netzeinspeise- oder Netzbezugsleistung oder anderer Netzdienstleistungen, zur Ausnutzung flexibler Stromtarife oder zur Steuerung von flexiblen Verbrauchern wie Wärmepumpen oder Elektromobilen eingesetzt werden sollen. Eine weitere Stossrichtung der OST-Forschung besteht darin, ergänzend zur Effizienz und der Funktionsweise auch die Umweltbelastung der verschiedenen Batteriesysteme zu bewerten, wie etwa die graue Energie, die zur Herstellung der Batteriespeicher erforderlich ist.

- Der **Schlussbericht** zum Projekt «CCT-Bat – Heimspeicher Systemtest» ist abrufbar unter: www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67434
- Anwendungsbezogene Fragen zum neuen **Testverfahren** beantwortet Evelyn Bamberger, Institut für Solartechnik (SPF) an der Ostschweizer Fachhochschule (OST) in Rapperswil: [evelyn.bamberger\[at\]spf.ch](mailto:evelyn.bamberger[at]spf.ch).
- **Auskünfte** zu den Forschungsprojekten erteilt Dr. Stefan Oberholzer ([stefan.oberholzer\[at\]bfe.admin.ch](mailto:stefan.oberholzer[at]bfe.admin.ch)), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Batterien.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Industrielle Prozesse unter www.bfe.admin.ch/ec-batterien.