

SOLARSTROM TROTZ VERSCHATTUNG

Damit Photovoltaik (PV)-Anlagen ein Maximum an Solarstrom produzieren, werden sie mit sogenannten Maximum Power Point (MPP)-Trackern ausgerüstet. Sind MPP-Tracker dezentral an den einzelnen PV-Modulen montiert, werden sie als «Optimizer» (dt. Leistungsoptimierer) bezeichnet. Wissenschaftler der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Winterthur haben Empfehlungen erarbeitet, in welchen Fällen der Verbau von Optimizern in PV-Anlagen wirklich einen Mehrertrag an Energie bringt.

Photovoltaik-Anlagen bestehen aus mehreren Solarmodulen, die in Serie geschaltet zu einem Stromkreis (Strang) verbunden werden. Am Ende jedes Strangs befindet sich ein Wechselrichter, der den von den Photovoltaikmodulen generierten Gleichstrom für die Netzeinspeisung in Wechselstrom umwandelt. Damit eine Solaranlage maximale Erträge bringt, enthält ein Strang-Wechselrichter üblicherweise einen MPP-Tracker: eine Elektronik-Komponente, die für die PV-Anlage abhängig von der aktuellen Sonneneinstrahlung den optimalen Arbeitspunkt aufspürt (engl.: «track»). Technisch betrachtet sind MPP-Tracker Gleichspannungswandler, die die



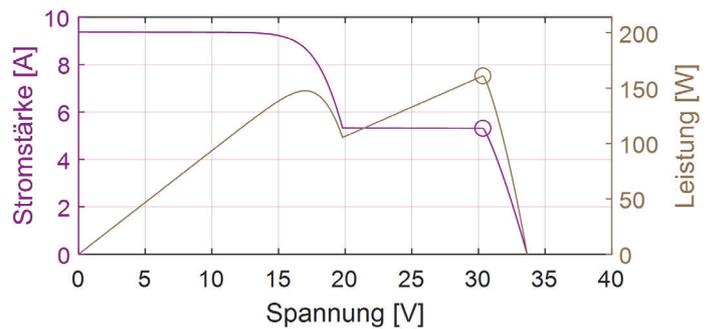
Optimizer haben das Potenzial, den Solarertrag zum Beispiel bei einer starken Teilverschattung durch Bäume zu steigern. Foto: Tigo Energy

Spannung im Stromkreis der PV-Anlage auf das gewünschte Niveau einstellen (vgl. Textbox unten).

Werden die Module einer PV-Anlage gleichmässig besonnt, erfüllen die MPP-Tracker des Wechselrichters ihre Aufgabe. Es kommt aber auch vor, dass einzelne Module etwa durch Kamine, Nachbarhäuser oder Bäume zeitweilig teilweise oder ganz verschattet werden, oder dass die Module einer Anlage unterschiedlich ausgerichtet sind und daher unterschiedlich stark besonnt werden. In solchen Situationen kann es sinnvoll sein, die Anlage nicht mit einem zentralen MPP-Tracker auszurüsten, sondern an die einzelnen PV-Module jeweils einen sogenannten Optimizer (auch: «Module Level Power Electronics»/MLPE) anzuschliessen: Diese Leistungsoptimierer enthalten selbst einen MPP-Tracker und sorgen so für den optimalen Arbeitspunkt jedes einzelnen Moduls. Optimierer können den Stromertrag im Vergleich zu zentralen MPP-Trackern erhöhen. Dieser Vorteil tritt allerdings nur in bestimmten Fällen ein. Zudem verursachen Optimierer Mehrkosten (ca. 40 bis 60 Franken pro Modul). Daher muss ihr Einsatz sorgfältig abgewogen werden.

Mehrerträge von 1 bis 5 %

Optimizer sind seit gut zehn Jahren auf dem Markt. Bekannte Anbieter sind Huawei, SolarEdge und Tigo. Marketingleute



Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist wie der Fingerabdruck eines Solarmoduls: Sie beschreibt, wie viel Strom bei einer bestimmten Spannung (U) in einem Solarmodul fliesst, und dies bezogen auf eine bestimmte Sonneneinstrahlung. Im vorliegenden Fall bringt das Solarmodul den grössten Solarertrag (Leistung in Watt), wenn es mit einer Spannung von etwas über 30 Volt betrieben wird. Dieser optimale Arbeitspunkt wird durch den MPP-Tracker beim Wechselrichter bzw. durch den Optimierer direkt beim Solarmodul eingestellt, indem er die Spannung des Moduls auf gut 30 Volt regelt. Grafik: ZHAW

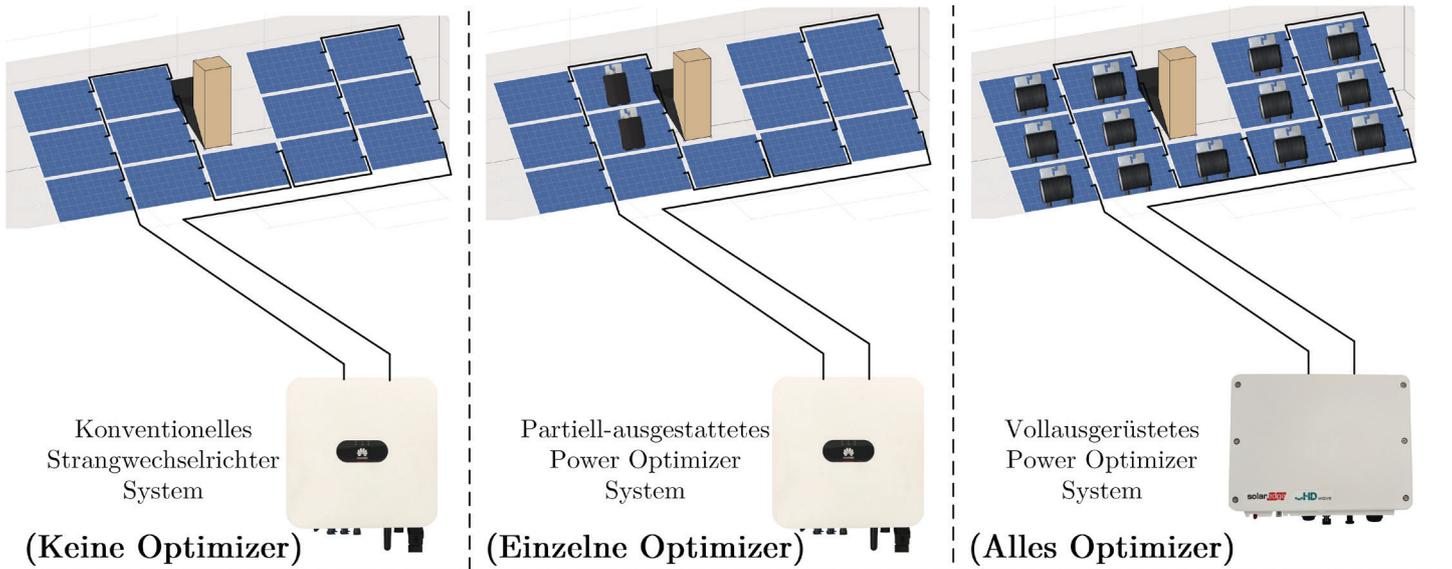
preisen die Komponenten bisweilen als wahre Wundergeräte an, indem sie Nutzern Ertragssteigerungen von 25 und mehr Prozent in Aussicht stellen. Die ZHAW befasst sich seit längerer Zeit mit dem Thema und konnte nachweisen, dass die Mehrerträge von Optimizern in den bis anhin untersuchten Fällen bei maximal 5 % liegen. Ein dreijähriges Forschungsprojekt mit dem Titel «Effizienzanalyse von dezentraler Pho-

ARBEITSPUNKT MIT MAXIMALER LEISTUNG

Wer aus Sonnenstrahlung ein Maximum an Solarstrom erzeugen will, muss seine Photovoltaik-Anlage zu jedem Zeitpunkt bei maximaler Leistung betreiben. Sogenannte MPP (Maximum Power Point)-Tracker in Wechselrichtern und Optimizern regeln automatisch die Spannung so, dass das Produkt aus Spannung und Strom (also die Leistung) einer Reihe von Modulen bzw. in einem einzelnen Modul maximiert wird. Der Arbeitspunkt mit maximaler Leistung wird gemeinhin als «Maximum Power Point» (MPP) bezeichnet.

Während des Betriebs einer PV-Anlage wird der MPP kontinuierlich nachgeführt, indem die Spannung auf den gewünschten Wert angehoben oder abgesenkt wird. Die Anpassung der Spannung erfolgt technisch gesehen durch einen Gleichspannungswandler (DC-DC-Wandler). Wird für einen Strang aus PV-Modulen ein einziger DC-DC-Wandler eingesetzt, ist dies der MPP-Tracker als Teil eines DC-AC-Wechselrichters. Wird bei jedem Modul ein eigener DC-DC-Wandler eingesetzt, sind für den MPP-Tracker die Bezeichnungen «Optimizer» oder «Leistungsoptimierer» geläufig.

MPP-Tracker bzw. Optimierer benutzen unterschiedliche Algorithmen für die Spannungsregelung. Der einfachste heisst «Perturb-and-Observe» (P&O). Bei diesem Trial-and-error-Verfahren wird in regelmässigen Abständen (typischerweise pro Sekunde) die Spannung etwas verändert und anschliessend die Leistung gemessen – dies so lange, bis die höchste Leistung ermittelt ist. Weil sich der optimale Arbeitspunkt durch die Einstrahlung laufend verändert, wird das Verfahren kontinuierlich wiederholt. In gewissen zeitlichen Abständen wird das gesamte Spannungsspektrum nach Leistungsmaxima abgesucht, um auch «entlegene» optimale Arbeitspunkt aufzuspüren.



Die ZHAW-Wissenschaftler haben Solardächer verglichen, deren Module durchgehend (rechts), teilweise (Mitte) bzw. gar nicht (links) mit Optimizern ausgerüstet sind. Anders als man auf den ersten Blick vielleicht vermuten würde, bringt die All-Optimizer-Lösung (rechts) bei einer leichten Verschattung (Kamin) keineswegs den höchsten Solarertrag: Die Optimizer an den zeitweilig verschatteten Modulen steigern zwar den Ertrag dieser Module. Die Optimizer an den nicht verschatteten Modulen sind hingegen kontraproduktiv: Sie mindern den Ertrag der unverschatteten Module, was zur Folge hat, dass das gesamte Solardach weniger (!) Ertrag bringt, als wenn gar keine Optimizer installiert wären. Ob im abgebildeten Fall Optimizer auf ausgewählten Modulen sinnvoll sind, hängt davon ab, wie gross der Schattenwurf durch den Kamin tatsächlich ist. Grundsätzlich gilt: Es sollten nur stark verschattete Module mit Optimizern ausgerüstet werden, um diese dann mit den restlichen Modulen in Serie zu schalten. Illustration: ZHAW

tovoltaik-Leistungselektronik bei Teilbeschattung; hat diesen Befund bestätigt und weiter verfeinert. Die BFE-finanzierte Untersuchung ist das Ergebnis einer Teamarbeit am ZHAW-Institut für Energie und Fluid Engineering (IEFE) in Winterthur. Hauptautoren waren Cyril Allenspach, Wissenschaftlicher Assistent, und Prof. Franz Baumgartner, Leiter Photovoltaiksysteme am IEFE.

Optimizer bringen oft keinen Zusatznutzen

Um die tatsächliche Leistungsfähigkeit von Optimizern zu erforschen, haben die Wissenschaftler in Winterthur jeweils zehn Optimizer vier gängiger Modelle im Labor installiert und daran eine Vielzahl von Messungen vorgenommen. Sie untersuchten mit einem eigenentwickelten Simulationstool, das auf diesen Messdaten basiert, die Auswirkungen, wenn eine Dachfläche vollständig, teilweise oder gar nicht mit Optimizern ausgerüstet wird. Sie legten der Analyse verschiedene Arten von PV-Modulen und unterschiedliche Fälle von Verschattung zugrunde. Überdies wollten sie zum Beispiel wissen, wie schnell Optimizer bei Veränderung einer Verschattung reagieren.

Ein Hauptergebnis der Untersuchung: Bei unverschatteten oder leicht verschatteten Dächern mit einheitlicher Ausrich-

tung bringen Optimizer keinen Mehrertrag und verursachen nur zusätzliche Kosten. Bei Dächern mit mittelstarker Verschattung (z.B. durch einen Kamin und einen Baum) kann es sinnvoll sein, die am stärksten betroffenen PV-Module jeweils mit einem Optimizer auszurüsten. Der Einbau von Optimizern bei sämtlichen Modulen (All-Optimizer-Lösung) empfiehlt sich nur bei stark verschatteten Dächern, wenn die Module z.B. wegen Dachgauben unterschiedlich ausgerichtet werden müssen oder z.B. Häuser und Bäume in der Nachbarschaft



Blick ins Labor der ZHAW in Winterthur: Hier wurde an Optimizern eine Vielzahl von Messungen vorgenommen, um optimale Einsatzstrategien für diese Elektronikkomponenten zu ermitteln. Foto: ZHAW

| Szenarien | Keine Optimizer | Einzelne Optimizer | Alles Optimizer |
|--|-------------------------------------|--------------------|-----------------|
| Keine Verschattung | Empfohlen | ● | ● ● |
| Leichte Verschattung | Empfohlen | ✓ | ● |
| Mittlere Verschattung | ● | Empfohlen | ✓ |
| Starke Verschattung | ● | ✓ | Empfohlen |
| Lange Stränge + wenige Ausrichtungen | ✓✓ (mehrere zentrale MPPT) | ● | ✓ |
| Kurze Stränge + mehrere Ausrichtungen | ● ● (Änderung zukünftig möglich) | ✓ | ✓✓ |

- Empfohlen** -> Beste Lösung gemäss Ertragsanalyse
 ✓✓ -> Höchste Erträge (basierend auf Schätzung)
 ✓ -> Annehmbare Alternative
 ● -> Tiefe Performance
 ● ● -> Signifikanter Ertragsverlust
 ■ -> Basierend auf Schätzungen

Die Grafik bringt die Empfehlungen der ZHAW-Experten auf den Punkt: Liegt keine oder leichte Verschattung vor, ist ein zentraler MPP-Tracker am Wechselrichter der PV-Anlage angezeigt, auf Optimizer bei den einzelnen Modulen kann verzichtet werden. Bei mittlerer Verschattung lohnt sich der Einsatz von Optimizern an ausgewählten Modulen. Bei starker Verschattung ist eine All-Optimizer-Lösung sinnvoll. Der untere Teil der Tabelle enthält eine Differenzierung nach Länge der Modul-Stränge. Tabelle: ZHAW IEF Winterthur

starke Schatten werfen. Die Forscher haben ihre Empfehlungen in einer Tabelle zusammengefasst (siehe oben).

Franz Baumgartner geht davon aus, dass die Betreiber von PV-Anlagen den Ertragsvorteil von Optimizern oft überschätzen: «Bestenfalls jedes fünfte Solardach ist so stark verschattet, dass eine All-Optimizer-Lösung sinnvoll ist. Wenn diese Lösung heute in Ländern wie der Schweiz oder Holland bei zwei Drittel der Neuanlagen auf Einfamilienhäusern gewählt wird, darf man davon ausgehen, dass sich in den meisten Fällen der Einsatz nicht lohnt.» Baumgartner gibt in diesem Zusammenhang zu bedenken, dass Optimizer durch die Installation auf dem Dach hinter den Modulen einer hohen Wärmebelastung ausgesetzt sind und der Kunde auf den Handwerkerkosten sitzen bleibt, wenn ein vorzeitiger Austausch defekter Geräte erforderlich wird. «Dieses Risikos sollten sich Kunden bewusst sein, wenn sie sich für eine All-Optimizer-Lösung entscheiden», sagt Baumgartner.

Dem Schatten ausweichen

Ein zweites Ergebnis, das die ZHAW-Forscher mit Sensitivitätsanalysen untermauert haben, welche den Einfluss von Veränderungen (z.B. durch Positionierung der Module) auf den Jahresertrag aufzeigen: Statt Optimizer einzusetzen, kann es ratsam sein, die Module nur etwas weiter vom Verschattungsobjekt entfernt zu platzieren. Der Abstand soll so gewählt werden, dass in den Mittagsstunden eine Verschattung ausbleibt. Wissenschaftler der Hochschule entwickeln

gegenwärtig eine Lösung, um ihr internes Simulationstool auf dem Web frei zugänglich zu machen. Fachpersonen und Interessierte können darauf künftig selbstständig experimentieren und lernen, wie sich die Platzierung eines Modules auf den Ertrag auswirkt bzw. welche Anordnung auch ohne Optimizer einen maximalen Ertrag ermöglicht.

Eine weitere Erkenntnis des ZHAW-Teams betrifft kommerzielle Planungswerkzeuge für Photovoltaik-Anlagen wie z. B. PVSyst und PVSol. Der Vergleich der Planungswerte mit den Ergebnissen der eigenentwickelten Simulationssoftware ergab, dass diese Tools die Auswirkungen einer Verschattung auf den Ertrag nicht verlässlich quantifizieren. Die ZHAW-Forscher konnten zeigen, dass die Planungstools die Mehrerträge zum Teil «deutlich überschätzen», wie Cyril Allenspach sagt. Während die kommerziellen Tools für eine starke Verschattungssituation jährliche Mehrerträge durch Optimizer von +7,2 (PVSyst) und +14,6 % (PVSol) vorhersagten, konnten die ZHAW-Forscher bei der gleichen Simulation mit dem eigenen Simulationstool lediglich einen Mehrertrag von 2,2 % nachweisen.

Verlässliche Planungsgrundlagen

Die unzuverlässigen Ertragsprognosen der Tools haben verschiedene Gründe. PVSyst verlässt sich bei der Berechnung der Erträge auf Angaben in den technischen Datenblättern zum Wirkungsgrad der Optimizer. Dieser Wirkungsgrad wird in den Datenblättern allerdings um 1,5 bis 2 % überschätzt,



Leistungsoptimierer werden direkt am Photovoltaik-Modul angebracht und sind einer erheblichen Wärmebelastung ausgesetzt. Foto: Tigo Energy

weil bestimmte lastabhängige Zusatzverluste nicht berücksichtigt sind. Der Fehler bei PVsol wiederum rührt daher, dass das Planungswerkzeug lediglich berücksichtigt, welcher Flächenanteil eines Moduls verschattet ist, nicht aber, welche einzelnen Zellen von der Verschattung betroffen sind, was zu einer beträchtlichen Fehlprognose führt.

Internationaler Austausch

Die Verschattungsproblematik dürfte mit einem zunehmenden Ausbau der Photovoltaik weiter an Bedeutung gewinnen. Vor diesem Hintergrund möchte Franz Baumgartner Planern, Installateuren und Käufern von PV-Anlagen aussagekräftige Entscheidungsgrundlagen zur Verfügung stellen, die sie in die Lage versetzen, für jeden Verschattungsfall eine optimale Lösung zu finden. Hierzu will er die Datenblätter der Hersteller von PV-Leistungselektronik um einen Schattenwirkungsgrad ergänzen. «Diese Ergänzung wird es den Kunden erlauben, in einfacher Weise für eine typische Verschattungs-

situation die Performance unterschiedlicher dezentraler (Optimizer) und zentraler Systeme (im Wechselrichter integrierter MPP-Tracker) miteinander zu vergleichen», sagt Baumgartner.

Der ZHAW-Experte steht über die Photovoltaik-Fachgruppe der Internationalen Energieagentur (IEA PVPS Task 13) in einem engen Austausch mit ausländischen Expertinnen und Experten aus Forschung und Industrie. In diesem Rahmen entwickelt er gegenwärtig mit Partnern des Standardisierungskomitees TC82 der Internationalen Energieagentur eine technische Spezifikation, die die Grundlage schafft, um verschiedene technische Lösungen für einen bestimmten Verschattungsfall objektiv vergleichen zu können.

- Das ZHAW-Forschungsprojekt «Efficiency analysis of decentralized photovoltaic power electronics with partial shading» (EFFPVSHADE; Deutsch: «Effizienzanalyse von dezentraler Photovoltaik-Leistungselektronik bei Teilverschattung») läuft noch bis März 2024.
- Auskünfte erteilen Stefan Oberholzer, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Photovoltaik (erreichbar unter stefan.oberholzer@bfe.admin.ch), und ZHAW-Professor Franz Baumgartner (bauf@zhaw.ch).
- Weitere Fachbeiträge über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Photovoltaik finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-pv.