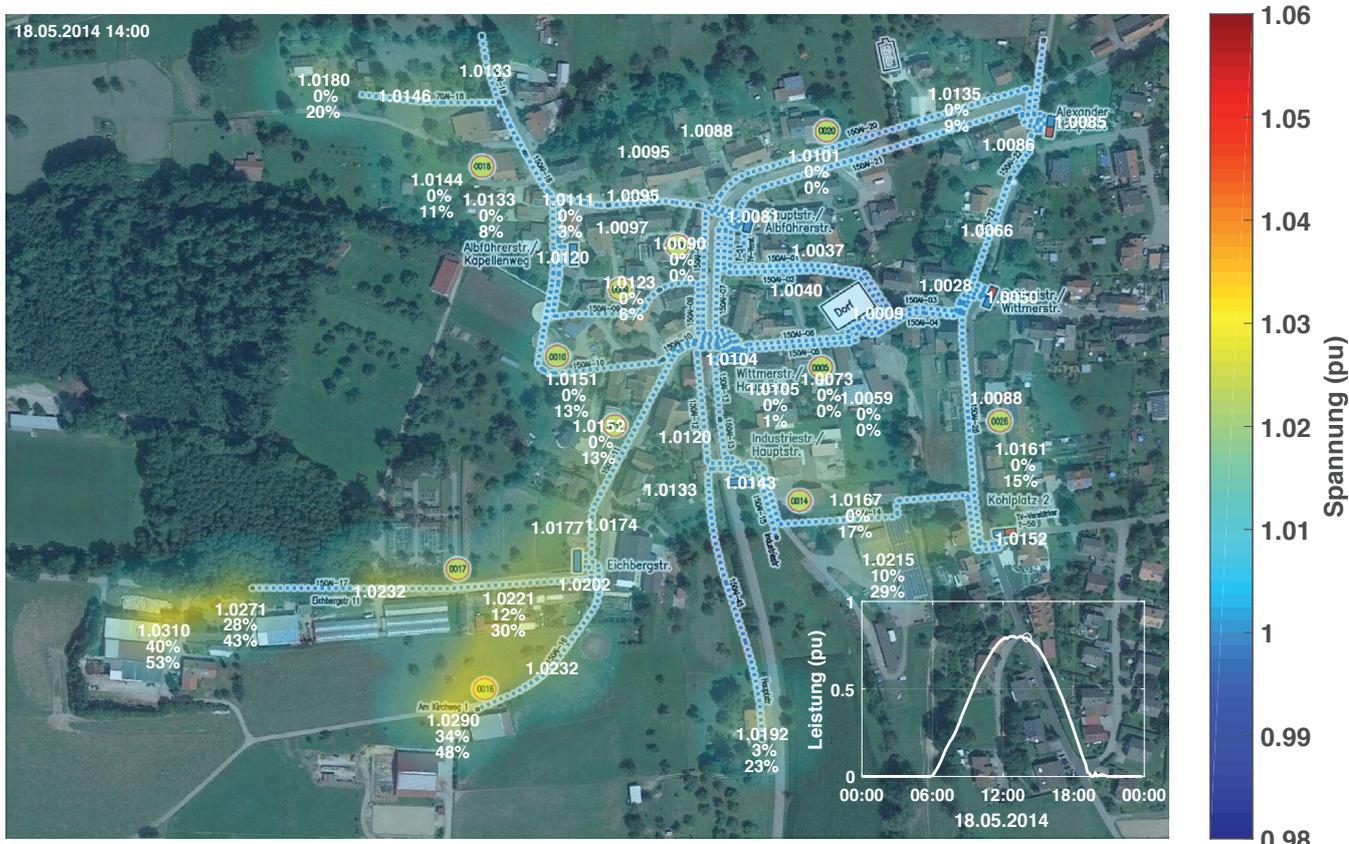


PV-ANLAGEN: PROBLEM UND TEIL DER LÖSUNG

Wird die Stromversorgung durch dezentrale Photovoltaik (PV)-Anlagen stark ausgebaut, drohen Ungleichgewichte, die sich durch Spannungsschwankungen im Stromnetz bemerkbar machen. Um diese Schwankungen auf das zulässige Mass zu beschränken, stehen Netzbetreibern verschiedene Instrumente zur Verfügung. Ein Forschungsprojekt der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Winterthur hat die Instrumente nun auf ihre Kosten untersucht. Die Wissenschaftler plädieren unter anderem dafür, zur Verminderung der Spannungsschwankungen direkt auf die PV-Anlagen zurückzugreifen: Deren Wechselrichter haben ein erhebliches Potenzial, um Stabilitätsprobleme zu vermindern.



Das deutsche Dorf Dettighofen aus der Vogelperspektive: Gelb markiert sind Stellen im Netz mit erhöhter Spannung. In dem abgebildeten Netz sind Wirk- und Blindleistungsregelung aktiv. Foto: ZHAW

Der Ausbau der Photovoltaik schreitet voran. In Dettighofen, einer deutschen Gemeinde an der Grenze zum Kanton Schaffhausen, sind so viele Dächer mit PV-Modulen ausgerüstet wie kaum wo. Rund 45 Prozent des Stroms, den Bewohnerinnen und Bewohner verbrauchen, werden am Ort mit Solaranlagen erzeugt. Damit ist Dettighofen ein Musterchüler der «Energiewende». Aber nicht nur das: In der Landgemeinde lässt sich auch untersuchen, welche Folgen ein starker Ausbau von dezentralen Stromerzeugungsanlagen auf das Versorgungsnetz hat. Genau das ist in Dettighofen seit 2014 mit zwei Forschungsprojekten der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) geschehen. Die beteiligten Wissenschaftler konnten in den Studien zeigen, dass die dezentrale Einspeisung von PV-Strom das Netz punktuell stark belastet. So lag die Netzspannung an den Einspeisepunkten zeitweilig fünf bis sieben Prozent über dem Normwert von 230 Volt.

Abweichungen der Netzspannung von der Norm sind nicht ungewöhnlich. Die Netzspannung liegt nicht exakt bei 230 Volt, sondern schwankt um diesen Wert, liegt also mal höher (in Momenten, wo die Stromproduktion grösser ist als der Verbrauch) und mal tiefer (in Momenten, wo der Verbrauch über der Produktion liegt). Allerdings dürfen die Spannungsabweichungen nicht zu gross werden. Sonst besteht die Gefahr, dass die angeschlossenen EDV-Anlagen und weitere

Elektrogeräte sowie ggf. auch das Netz selber Schaden nehmen. Aus dem Grund sind nach den Normen der International Electrotechnical Commission IEC 60038:1983 maximal Abweichungen von 10% zulässig, die Spannung muss also zwischen 207 und 253 Volt liegen.

Gezielte Massnahmen an ausgewählten Netzpunkten

Die in Dettighofen gemessenen Spannungsschwankungen lagen also noch innerhalb der zulässigen Werte. «Wir wissen von den Untersuchungen in Dettighofen, dass ein Ausbau der Photovoltaik nicht unmittelbar problematisch ist, denn unsere Stromnetze sind robust ausgelegt», sagt Markus Niedrist, Leiter Bereich Netz beim Elektrizitätswerk des Kantons Schaffhausen (EKS), zu dessen Versorgungsgebiet Dettighofen gehört. Trotzdem muss man die Problematik nach Auskunft des Netzexperten im Auge behalten: «Wir müssen die Entwicklung in den kommenden Jahren beobachten und an den Netzpunkten, wo kritische Belastungen drohen, gezielte Massnahmen ergreifen.»

Elektrizitätswerke haben eine ganze Reihe von Instrumenten zur Hand, um Spannungsabweichungen zu begegnen und so die Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten. Das Wichtigste besteht im Bau starker Stromnetze. Die rund 700 Schweizer Elektrizitätswerke achten traditionellerweise auf

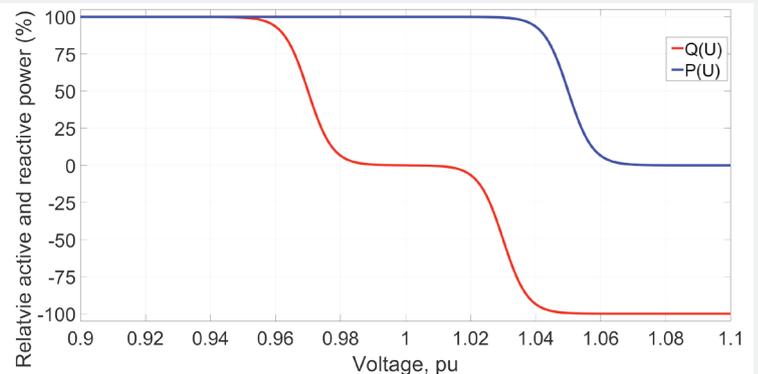


In Dettighofen (Süddeutschland) ist die Nutzung der Photovoltaik stark ausgebaut. Die Solarstrom-Produktion entspricht fast der Hälfte des Verbrauchs. Bild: PV-Anlage auf dem Feuerwehrhaus, die 2017 in Betrieb genommen wurde. Foto: Gemeinde Dettighofen

SO GEHT DIE SPANNUNGSHALTUNG ÜBER WIRK- UND BLINDLEISTUNG

Blindleistung ist eine Form von Leistung. Sie wird etwa benötigt, um bei Motoren oder Transformatoren das magnetische Feld aufzubauen. Beim Abbau dieser Felder wird sie ins Netz zurückgespeist. Im Gegensatz zur Wirkleistung kann die Blindleistung nicht in nutzbare Leistung – beim Motor die mechanische Leistung an der Welle – umgesetzt werden. Blindleistungsflüsse sind eigentlich unerwünscht, weil sie das Netz ebenfalls belasten und zusätzliche Verluste verursachen. Allerdings kann man sie bewusst nutzen, um im Netz einer Unter- bzw. Überspannung entgegenzuwirken. Moderne Wechselrichter von Photovoltaikanlagen, die die Aufgabe haben, den Gleichstrom aus den PV-Modulen in Wechselstrom umzuwandeln, verfügen heute über die Fähigkeit, Wirkleistung wie Blindleistung abhängig von der anliegenden Netzspannung zu regeln. Die Regelung der Wirkleistung wird auch als «aktive Leistungsregelung» bezeichnet, die Regelung der Blindleistung als «reaktive Leistungsregelung».

Die Grafik veranschaulicht beispielhaft, wie ein Wechselrichter Wirkleistung und Blindleistung abhängig von der aktuell anliegenden Spannung (siehe x-Achse) steuert: Fällt die Spannung mehr als 2% unter den Nominalwert, wird die Einspeisung von Blindleistung (rot) kontinuierlich auf +100% des Nennwertes erhöht. Übersteigt die Spannung hingegen den Nennwert um mehr als 2%, wird der Bezug von Blindleistung auf -100% erhöht (untererregter Betrieb). In beiden Fällen wird die Unter- bzw. Überspannung um typischerweise bis zu zwei Prozentpunkte reduziert, ohne dabei die Wirkleistung der PV-Anlage zu tangieren. Damit kann beispielsweise eine Überspannung von 104 auf 102% reduziert oder eine Unterspannung von 96 auf 98% angehoben werden.



Anders ist dies bei der Wirkleistung (blau): Diese wird im vorliegenden Fall ab einer Spannungsüberschreitung von 10% der Nennspannung (d.h. ab 253 Volt) kontinuierlich reduziert. Damit reduziert sich die Einspeiseleistung der PV-Anlage und sinkt bei einer Überspannung von 12% auf 0. Die beiden Kennlinien in der Grafik sind als Beispiele zu verstehen. Wie die Kennlinien in der Realität eingestellt werden, legt der Netzbetreiber fest. Eingestellt werden die Kennlinien bei der Installation durch einen Elektriker an der Anlage selbst.

Im Netz der Vorarlberger Energienetze GmbH, in der die Wirk- und Blindleistungsregelung für Photovoltaikwechselrichter seit einigen Jahren vorgeschrieben ist, kommt die Wirkleistungsabregelung praktisch nie zum Tragen (nur im geschwächten Netzbetrieb/Umschaltungen). Die Blindleistungsregelung hingegen kommt immerhin an vereinzelt Tagen im Jahr zum Einsatz. Diese Regelung macht es möglich, dass Photovoltaikanlagen – wenn zum Beispiel ein Netzgebiet wegen Reparatur- oder Instandhaltungsmassnahmen nur eine verminderte Leistungsfähigkeit aufweist – zumindest eine Resteinspeiseleistung erbringen können. Wer in Vorarlberg eine Photovoltaikanlage betreibt, muss die vom Netzbetreiber festgelegten Anschlussbedingungen einhalten und im Zuge eines Reports nachweisen, dass deren Wechselrichter die vorgeschriebene Wirk- und Blindleistungsregelung aufweisen und diese auch eingestellt ist. BV

leistungsfähige und dank entsprechender Reserven auch sichere Netze. Der Ausbau bzw. die Verstärkung von Kupferkabeln haben allerdings ihren Preis. Daneben gibt es eine ganze Reihe weiterer Möglichkeiten, um die wachsende Stromeinspeisung aus dezentralen Kraftwerken ohne Netzausbau zu

meistern. Dazu gehören verschiedene Arten der Spannungsregelung etwa in der Trafo-Station oder beim Wechselrichter von PV-Anlagen, aber auch Batteriespeicher oder das gezielte Zu- und Abschalten von elektrischen Verbrauchern (Demand Side Management).

Investitionskosten in Fr. pro kWp installierter PV-Leistung über 25 Jahre für verschiedene Massnahmen zur Spannungshaltung im Niederspannungsnetz								
	Netzausbau: Kupferkabel mit grösserem Querschnitt reduzieren den Leitungswiderstand und somit die Spannungserhöhung	Spannungsabhängige Wirk- und Blindleistungsregelung am Wechselrichter, kurz PQ(V) ctrl: vermindert die Netzspannung, aber auch die Menge des eingespeisten Stroms, wenn die Wirkleistungsregelung aktiv ist	Spannungsabhängige Blindleistungsregelung am Wechselrichter, kurz Q(V) ctrl: vermindert die Netzspannung, nicht aber die Menge des eingespeisten Stroms	Spannungsregler (engl. Line Voltage Regulator/ LVR): regelt die Spannung stufenweise in einem Leitungsabschnitt, wo er installiert ist, typischerweise in Prozentstufen	Regelbarer Ortsnetztransformatoren (engl. On-Load Tap Changer, OLTC): regelt die Spannung am Hoch-/Mittelspannungs-Transformator; wird immer häufiger auch zwischen Mittel- und Niederspannungsnetz eingesetzt	Batteriespeichersysteme: entlasten das Netz durch Zwischenspeicherung von Strom	Laststeuerung (engl. Demand Side Management/ DSM): steuert Elektrogeräte so, dass sie den Strom bei grosser Produktion aufnehmen, was das Netz entlastet	Kombination von Spannungsregler (LVR) mit dynamischer Wirk- und Blindleistungsregelung PQ(V)
Netze mit mittleren Industriebetrieben	-	-	-	-	-	-	-	-
Netze mit Kleinindustrie	-	-	-	-	-	-	-	-
Netze mit stadtnahen Einkaufszentren	55-155	65-80	60-80	45-55	-	>500	-	85-100
Urbane Netze mit Mehrfamilienhäusern	starkes Netz	50-70	50-70	40-50	50-60	starkes Netz	-	80-120
Urbane Netze mit Geschäftszentren bzw. Schulen	starkes Netz	40-60	40-60	75-85	55-65	starkes Netz	-	110-120
Netze in Dorfzentren	starkes Netz	30-35	30-35	70-80	90-100	starkes Netz	-	90-100
Netze in der Dorfperipherie	160-450	90-130	90-125	50-60	70-80	>350	-	120-150
Netze von Weilern	490-1700	390-430	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	>2'200	-	570-610

Gibt es in einem Gebiet viele PV-Anlagen, können im Netz Überspannungen entstehen, die der Netzbetreiber mit verschiedenen Massnahmen ausgleichen kann. ZHAW-Forscher haben in einem aktuellen Projekt die Kosten für solche Massnahmen in verschiedenen Netzarten errechnet. Felder ohne Werte konnten nicht berechnet werden. «Starkes Netz» bedeutet, dass in diesen Fällen keine speziellen Massnahmen zur Vermeidung von Unter-/Überspannungen nötig sind, weil die Netze robust genug sind. Um die Berechnungen vorzunehmen, haben die ZHAW-Forscher den verschiedenen Netztypen reale Netze zugrunde gelegt, für urbane Netze mit Mehrfamilienhäusern zum Beispiel ein Quartier in der Stadt Ilanz (GR), für Netze in Dorfzentren und der Dorfperipherie ein Netz aus der ländlichen Gemeinde Dettighofen (Baden-Württemberg) im Versorgungsgebiet des EKS. Tabelle: BFE-Schlussbericht/bearbeitet: B. Vogel

Kosten für Spannungshaltung

Ein Forscherteam der ZHAW hat die verschiedenen Instrumente in einer neuen Studie mit dem Namen CEVSol (vgl. Angaben am Schluss des Artikels) auf ihren Einsatz in verschiedenen Netztypen hin untersucht und insbesondere die Kosten pro installierte PV-Leistung über 25 Jahre verglichen. Dabei zeigte sich, dass Massnahmen zur Einhaltung der Normspannung vor allem in abgelegenen Gebieten hohe Kosten verursachen. Ferner wurde deutlich, dass Batteriespeicher – werden sie ausschliesslich zur Spannungshaltung eingesetzt – unter den verfügbaren Technologien zu den teuersten gehören, während die Regelung der Blind- und Wirkleistung direkt am Wechselrichter der Solaranlagen zu den günstigsten Massnahmen gehören (vgl. Tabelle S. 4). Vor diesem Hintergrund plädieren die Wissenschaftler in der von BFE, EKS und dem Elektrizitätswerk des Kantons Zürich geförderten Untersuchung für einen verstärkten Einsatz der Blindleistungsregelung, die in der Schweiz bisher kaum genutzt wird (vgl. Textbox S. 3). «Moderne Wechselrichter haben die Fähigkeit, die aktive und reaktive Leistung unter Berücksichtigung der aktuellen Netzspannung zu steuern», sagt Fabian Carigiet, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der ZHAW, und ergänzt: «Diese Tatsache hält neue Möglichkeiten nicht nur für Verteilnetzbetreiber bereit, sondern auch für die Aufsichtsbehörden. Die Verteilnetzbetreiber sollten die Möglichkeit haben, ihre Netze in der vollen Spannungs-Bandbreite – bis zu den 110% der Normspannung – zu betreiben, ohne die bisher geltenden Einschränkungen. Wenn also die Spannung diese Grenze erreicht, muss die Einspeiseleistung der Wechselrichter linear gegen null gefahren werden, so wie es die österreichischen Behörden bereits in ihrem nationalen technischen Regelwerk TOR D4 gemacht haben.»

Diese Empfehlung bedeutet, dass in gewissen Fällen der Ertrag an Solarstrom mit Rücksicht auf die Belastung des Netzes vermindert wird. Dies ist allerdings nur bei Einsatz der Wirkleistungsregelung am Wechselrichter der Fall. Wird hingegen nur die Blindleistung reguliert, kann eine Spannungserhöhung bis zu zwei Prozentpunkte abgemildert werden, ohne dass weniger Strom ins Netz eingespeist wird. «PV-Anlagen können zu Überschreitungen der Spannungslimiten führen, aber sie bieten mit ihren Wechselrichtern zugleich das Mittel, um dieses Problem zu lösen oder zumindest zu entschärfen; diese tief hängenden Früchte sollten wir ernten», sagt Prof. Dr. Franz Baumgartner, Photovoltaikexperte an der ZHAW. Diese Massnahme ist nicht nur effizient, sondern auch noch billig. Sie hat zudem den Vorteil, dass hier nur die Spannung



Moderne Wechselrichter für Solaranlagen (im Bild ein Produkt des Herstellers SolarMax) sind in der Lage, über die Regelung der Wirk- und der Blindleistung einen Beitrag zu leisten, um einspeisebedingte Überspannungen im Netz zu vermeiden. Foto: SolarMax

punktuell im Netz reduziert wird, während zum Beispiel moderne, regelbare Ortsnetztransformatoren alle Anschlüsse, die von einer Trafostation abgehen, betreffen, unabhängig davon, ob sie aktuell mit Spannungsproblemen kämpfen oder nicht.

Positive Erfahrungen in Vorarlberg

Die Wissenschaftler der ZHAW verweisen in ihrer Studie wiederholt auf die Erfahrungen in Österreich. Dort ist die spannungsabhängige Blindleistungsregelung $Q(U)$ – anders als in der Schweiz – bereits weit verbreitet. «In Österreich wird jeder zweite Wechselrichter so gesteuert, dass er Blindleistung zur Reduktion von Spannungserhöhungen nutzt», sagt Diplomingenieur Frank Herb, zuständig für Netzplanung und Power Quality bei der Vorarlberger Energienetze GmbH. Der Vorarlberger Netzbetreiber verlangt von PV-Anlagen-Besitzern in seinem Netzgebiet seit 2015, dass sie in ihren Wechselrichtern die Blindleistungsregelstrategie $Q(U)$ aktivieren. Die Erfahrungen mit dieser Massnahme seien sehr positiv, sagt Herb. Damit sie als Netzbetreiber die Funktionsfähigkeit der Wechselrichter nicht länger auf Herz und Nieren prüfen müssen, werde zurzeit darauf hingearbeitet, dass die Hersteller der Wechselrichter ein Prüfzertifikat für ihre Geräte von einer Prüfanstalt einholen können.

Nach Auskunft von Herb kommt die Blindleistungsregelung auch im deutschen Allgäu zum Einsatz, wo die Vorarlberger Energienetze GmbH ebenfalls als Stromversorgerin tätig ist. Um der zunehmenden Einspeisung von PV-Anlagen gerecht zu werden, hat der Vorarlberger Netzbetreiber zudem einen Grossteil seiner Unterwerke mit erweiterten Spannungs-

reglern (Wirkstromkompoundierungen) ausgerüstet, welche den Sollwert für die Mittelspannung flexibel festlegen – bei geringer Last liegt er tiefer, bei hoher Last höher. «Dank dieser verschiedenen Massnahmen hat sich die Befürchtung, dass PV-Anlagen unser Netz an die Grenzen bringen, unterdessen erledigt», sagt Frank Herb. Die nächste Herausforderung sieht er bei der wachsenden Zahl von Ladestationen für Elektroautos, welche hohe Leistungen über eine lange Zeit aufweisen und damit lokale Unterspannungen nach sich ziehen könnten.

Nutzen der modernen Leistungselektronik

Ob sich die Schweizer Netzbetreiber von den positiven Erfahrungen beeindrucken lassen und die Blindleistungsregelung künftig zur Netzstabilisierung einsetzen, wird sich zeigen. Dazu die Einschätzung von Dr. Michael Moser, Leiter des Forschungsprogramms Netze beim Bundesamt für Energie: «Auf höheren Netzebenen wird die Spannung seit jeher durch eine gezielte Ein- und Ausspeisung von Blindleistung geregelt. Durch den Einsatz moderner Leistungselektronik in PV-Wechselrichtern steht diese Funktionalität nun auch zunehmend im Niederspannungsnetz zur Verfügung. Es ist daher naheliegend, diese Möglichkeit auszunützen, bevor andere Massnahmen zum Zug kommen.»

- Den **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt «Cost effective smart grid solutions for the integration renewable power sources into the low-voltage networks» (CEVSol) finden Sie unter:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=37871>
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Fabian Carigiet (fabian.carigiet[at]zhaw.ch), wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering der ZHAW.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Netze finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-strom.

LEHRGANG ZUR NETZ-EINBINDUNG VON PV-ANLAGEN

Das «Tech» in Winterthur ist nach der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich die zweitälteste Schweizer Ausbildungsstätte für Elektroingenieure. Heute ist die traditionsreiche Schule Teil der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW). Sie bildet 20% der Schweizer Fachhochschul-Ingenieure aus. Der dreijährige Bachelor-Lehrgang «Energie- und Umwelttechnik» unter der neuen Leitung von Prof. Franz Baumgartner hat einen Schwerpunkt in der elektrischen Netztechnik und fokussiert sich unter anderem auf die Einbindung von Photovoltaik-Anlagen ins Stromnetz. BV