

Blindleistungsflüsse von Photovoltaik - Wechselrichtern mit einem Leistungsfaktor von Eins

ANDREAS SPRING⁽¹⁾ • GEORG WIRTH⁽¹⁾ • GERD BECKER⁽¹⁾ • ROBERT PARDATSCHER⁽²⁾ • ROLF WITZMANN⁽²⁾ •
JOHANNES BRANTL⁽³⁾ • SEBASTIAN SCHMIDT⁽³⁾

(1) Hochschule München · Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Arbeitsgruppe des Labors für Solartechnik und energietechnische Anlagen im Studiengang REE
80335 München · Tel: 089/1265-3483 · Fax: 089/1265-3403
<http://www-lse.ee.hm.edu> · andreas.spring@hm.edu

(2) Technische Universität München · Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze
80333 München

(3) Bayernwerk AG Assetmanagement
93049 Regensburg

1. Einführung und Problemstellung

Die erzeugte Leistung von Photovoltaik (PV) Anlagen stellt einen immer größeren Anteil an der elektrischen Energieversorgung in Deutschland dar. Ende des Jahres 2013 sind bereits mehr als 35,5 GW_p [BUR-13] installiert von denen sich 80 % [ENE-13] in der Niederspannungsebene befinden. Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen zur Gewährleistung der erforderlichen Netzstabilität. Durch den rasanten Zubau sind vor allem in Niederspannungsnetzen die Einspeiseverhältnisse zunehmend unbekannt. Durch diese hohen Einspeiseleistungen, die den Verbrauch vor allem in ländlichen Gebieten zeitweise deutlich übersteigen, werden dezentrale PV Anlagen zur dimensionierenden Größe bei der Netzplanung. Weiterhin treten in diesen Gebieten Rückspeisungen in die Mittel- und in die Hochspannungsebene, sowie hohe Spannungen an Netzausläufern mit niedriger Kurzschlussleistung auf. Diese Spannungsanhebungen müssen in den normativen Grenzen der DIN EN 50160 [DIN-50160] von $\pm 10\%$ der Nennspannung liegen, sowie die Anwendungsrichtlinie Niederspannung VDE-AR-N 4105 [VDE-4105], welche einen maximalen Spannungshub von 3 % erlaubt, erfüllen. Im Hinblick auf die Spannungshaltung sind PV Wechselrichter der neueren Generation mit einer Blindleistungsregelung ausgestattet. Durch die Einspeisung und Abnahme von Blindleistung kann die Spannung am Netzverknüpfungspunkt in gewissen Grenzen geregelt werden. Dem überwiegenden Teil der bereits verbauten Wechselrichter liegt jedoch eine Leistungsfakturvorgabe von Eins ($\cos(\varphi) = 1$) zugrunde. Dies bedeutet es soll ein reiner Wirk- und kein Blindleistungsfluss auftreten. Diverse Laboruntersuchungen sowie Untersuchungen in vermessenen Niederspannungsnetzen zeigen eine Abweichung des Wirk- vom Scheinleistungsfluss und damit einen Blindleistungsfluss von PV Wechselrichtern trotz einer Leistungsfakturvorgabe von Eins. Das Ausmaß dieser unbeabsichtigten Blindleistungsflüsse, so-

wie die Untersuchung der Abhängigkeit der Blind- von den eingespeisten Wirkleistungsflüssen ist Gegenstand des hier vorliegenden Beitrags. Die unbeabsichtigten Blindleistungsflüsse haben eine Auswirkung auf die Netzspannung und die Verluste im Netz.

Die gewonnenen Ergebnisse stammen einerseits aus Laboruntersuchungen an der Hochschule München [WAG-13] und andererseits aus dem Projekt „Netz der Zukunft“ [BAY-13], das von der Bayernwerk AG initiiert wurde und in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München und der Hochschule München bearbeitet wird. Ziel des Forschungsprojekts ist ein besseres Verständnis der Einflüsse einer großen Anzahl von dezentralen regenerativen Erzeugern auf das Verteilnetz. Das Projektgebiet umfasst ein Mittelspannungsnetz mit einer hohen PV Durchdringung von durchschnittlich über 5 kW_p pro Hausanschluss [SPR-13a]. In dem betrachteten Netzgebiet Seebach sind an insgesamt rund 320 EEG Anlagen Lastgangzähler verbaut, die mit einer zehnminütigen Auflösung unter anderem die Wirk- und Blindleistungsflüsse erfassen. Die einzelnen Ortsnetze des E-Gebiets Seebach sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Netzgebiet Seebach mit den vermessenen Niederspannungsnetzen. Quelle: BayernAtlas

2. Untersuchung der Blindleistungsflüsse von PV Invertern im Labor

Im Labor für Solartechnik und Energietechnische Anlagen der Hochschule München stehen diverse Wechselrichter für Untersuchungen zur Verfügung. Es handelt sich um typische, kommerzielle Geräte im einstelligen kW-Bereich, die in privaten Aufdachanlagen Verwendung finden. Analysiert werden sowohl einphasige Inverter einerseits mit hoch- oder niederfrequenten Transformator, andererseits trafolose Inverter spezieller Topologie (HERIC, H5), als auch dreiphasige Wechselrichter. Um unabhängig vom aktuellen Globalstrahlungsangebots zu sein, wird ein PV Generator Simulator (Spitzenberger Spies – PVS 7000 [PVS-7000]) verwendet. Dieser reprodu-

ziert, bei Verwendung von Globalstrahlung- und Temperaturprofilen als Eingangsparameter, eine adäquate DC Ausgangsleistung. Es kann ein beliebiger Modultyp mit einer festen Anzahl seriell und parallel verbauter Module, begrenzt durch die DC Ausgangsleistung des Simulators, hinterlegt werden. Die DC Ausgangsleistung ist gleichzeitig die Eingangsleistung der untersuchten Wechselrichter. Diese wurde durch Parallel- und Reihenschaltungen stets so gewählt, dass der Inverter auch unter Vollast betrieben wird. Gleichzeitig wird die Einhaltung der Maximum Power Point (MPP) – Spannungsgrenzen des Inverters gewährleistet. Die von den untersuchten Inverters abgegeben Wirk- und Blindleistungen werden mit einem Power Quality Recorder (Fluke 1760 [FLU-1760]) gemessen und die Leistungsfaktoren berechnet. Die auftretenden Messungenauigkeiten sind mit der Methode der Fehlerfortpflanzung nach Gauß ermittelt und liegen deutlich unter den gemessenen Leistungsflüssen. Bei der Betrachtung der Blindleistung beziehen sich alle Angaben nur auf die 50 Hz Komponente. Die Verzerrungsblindleistung wurde nicht betrachtet. Diese kann, wie der Vergleich der 50 Hz Komponente mit der Gesamtblindleistung zeigt, vernachlässigt werden.

In ersten Untersuchungen der Blindleistung werden sinus- und rechteckförmige Globalstrahlungsverläufe betrachtet. Diese spiegeln zwar nicht die Realität wieder, es lassen sich jedoch sehr gut die Abhängigkeiten der Blindleistungsflüsse untersuchen [SPR-13b][WAG-13]. Dabei ergibt sich ein Zusammenhang zwischen den unbeabsichtigten Blindleistungsflüssen und der Auslastung des Wechselrichters und damit folglich der Amplitude der Globalstrahlung. Eine Abhängigkeit von der Frequenz der Globalstrahlungsänderung konnte hingegen nicht festgestellt werden. Um reale Begebenheiten zu untersuchen, insbesondere die Größenordnung der Blindleistungsflüsse, wird der PV Generator Simulator mit konkret gemessenen Globalstrahlungsprofilen gespeist. Es werden die Tagesprofile eines klaren und eines bewölkten Tages gewählt. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt.

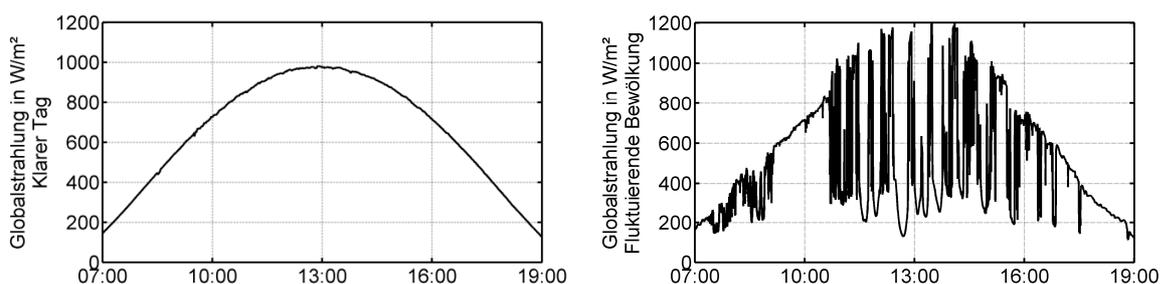


Abbildung 2: Globalstrahlungseingangsparametersätze des PV Generator Simulators zur Untersuchung der unbeabsichtigten Blindleistungsflüsse von PV Wechselrichtern.

Die sich ergebenden Wirk- und Blindleistungsflüsse für zwei exemplarische Inverter sind in Abbildung 3 zu sehen. Auf der linken Seite sind die Ergebnisse für das Tagesprofil eines klaren Tages und auf der rechten Seite die Ergebnisse eines Tages mit stark fluktuierender Bewölkung abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass beide Inverter unabhängig von der Globalstrahlungssituation zu einem unbeabsichtigten Blindleistungsfluss in den Netzen beitragen. Der Ver-

lauf der Blindleistung und der Wirkleistung ist antikorreliert. Der Inverter in Abbildung 3 oben zeigt einen deutlich raueren Verlauf der Blindleistung auf. Dieser bewegt sich zwischen 100 VAR kapazitiv (Verbraucherzählpeilsystem; spannungssteigernd) und 100 VAR induktiv (spannungsenkend) bei einer Nennleistung von 5 kW. Der Wechselrichter aus Abbildung 3 unten weist bei einem Nennleistungswert von 2,6 kW einen größeren Blindleistungsfluss auf. Dieser ist stets induktiv und erreicht im Volllastbetrieb einen Wert von 800 VAR. Damit hat dieser Inverter ein unbeabsichtigtes, stark netzspannungsenkendes Verhalten durch seine Blindleistungskomponente. Hier zeigt sich eine deutliche Reduktion des Leistungsfaktors. Dieser liegt im Volllastbetrieb bei 0,95. Damit wird ein Blindleistungswert von einem Drittel der eingespeisten Wirkleistung abgenommen.

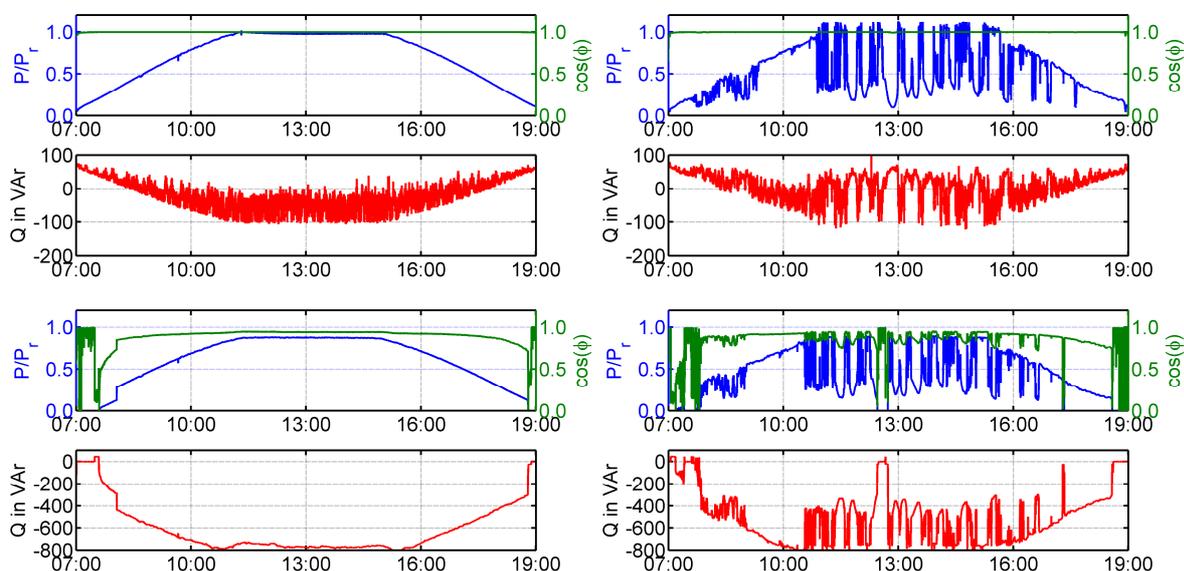


Abbildung 3: Verlauf der Wirk- und Blindleistung am Ausgang von zwei exemplarischen PV Wechselrichtern mit einer Leistungsfaktorvorgabe von Eins während eines klaren Tages (links) und eines Tages mit einer stark fluktuierenden Bewölkung (rechts). Bei hohen Blindleistungsflüssen stellt sich eine deutliche Abweichung des Leistungsfaktors von der Vorgabe ein.

Die Laboruntersuchungen zeigen, dass alle analysierten Wechselrichter mit einer Leistungsfaktorvorgabe von Eins einen Blindleistungsfluss hervorrufen. Dieser ist bei allen Invertern im Teillastbetrieb stets kapazitiv. Einzige Ausnahme ist der Wechselrichter aus Abbildung 3 unten. Mit zunehmender Auslastung sinkt der Blindleistungsfluss bei allen, bis auf einen, untersuchten Wechselrichter ab. Bei einem Großteil der betrachteten Inverter stellt sich im Volllastbetrieb ein induktiver Blindleistungsfluss ein. Damit weist hinsichtlich der Spannungshaltung die überwiegende Anzahl einen positiven Einfluss auf. Dies kann als positiver Effekt der unbeabsichtigten Blindleistungsflüsse betrachtet werden. Nachteilig ist festzuhalten, dass jeder einzelne Inverter durch den sich einstellenden Blindleistungsfluss einen zusätzlichen Beitrag zu den Netzverlusten liefert.

In Abbildung 4 sind die minimalen Leistungsfaktoren im Voll- und im Teillastbereich aller im Labor untersuchten Wechselrichter für den klaren (links) und den stark fluktuierenden (rechts) Tag veranschaulicht. Es treten teilweise starke Abweichungen der Leistungsfaktoren von der Vorgabe auf. Am besten ist die Spezifikation im Volllastbereich während des klaren Tages erfüllt. Mehr als zwei Drittel aller betrachteten Wechselrichter weisen einen minimalen Leistungsfaktor größer als 0,999 auf. Es wird kein Leistungsfaktor kleiner als 0,7 gemessen. Im Teillastbereich liegt hingegen nur noch bei weniger als einem Viertel der analysierten Wechselrichter der minimale Leistungsfaktor bei Werten größer 0,9. Am schlechtesten ist die Leistungsfaktorvorgabe im Teillastbereich während des Tages mit einer stark fluktuierenden Bewölkung erfüllt. Mehr als zwei Drittel aller Inverter arbeitet an diesem Tag mit minimalen Leistungsfaktoren kleiner als 0,7. Dies bedeutet, dass zu diesen Zeiten der Blindleistungsfluss größer als der Wirkleistungsfluss ist. Dies stellt eine deutliche Abweichung von der Spezifikation dar. Bei einer Vielzahl der Inverter tritt der minimale kapazitive Leistungsfaktor während eines tiefen Teillastbetriebs und somit sehr geringer Wirkleistungseinspeisung auf. Dadurch wird der Leistungsfaktor schon bei geringen Blindleistungsflüssen reduziert. Folglich ist ein kleinerer Leistungsfaktor nicht immer mit einem höheren Blindleistungsfluss gleichzusetzen. Weiterhin sind die Netzspannungsbeeinflussungen durch den Blindleistungsfluss zu Zeiten geringer Wirkleistungseinspeisung als weniger kritisch zu betrachten. Andererseits tritt der minimale induktive Leistungsfaktor bei einem Großteil der Inverter im Volllastbetrieb auf. Somit hat eine geringe Abweichung des Leistungsfaktors von der Vorgabe einen größeren Blindleistungsfluss zur Folge.

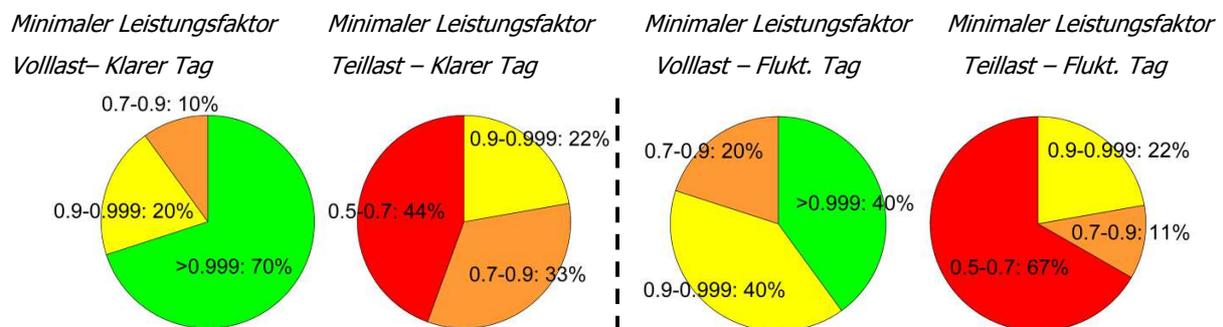


Abbildung 4: Verteilung der minimalen Leistungsfaktoren im Voll- und Teillastbereich aller im Labor untersuchten Inverter für einen klaren Tag und einen Tag mit einer stark fluktuierenden Bewölkung. Die minimalen Leistungsfaktoren, die sich an dem klaren Tag im Volllastbereich ergeben, weisen eine recht gute Einhaltung der Vorgabe auf (links). Die Größten Spezifikationsabweichungen liegen an dem fluktuierenden Tag im Teillastbereich vor (rechts).

Die im Labor gewonnen Ergebnisse werden im Folgenden durch Messungen im Feld überprüft. Alle dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die vermessenen Inverter eines Niederspannungsnetzes aus dem Projektgebiet. Das Niederspannungsnetz ist dem oben beschriebenen Netzgebiet Seebach unterlagert.

3. Untersuchung der Blindleistungsflüsse von PV Invertern im Feld

Bei der Untersuchung aller PV Inverter in den Niederspannungsnetzen im Projektgebiet Seebach zeigen sich wiederum Blindleistungsflüsse der Wechselrichter mit einer Leistungsfaktorvorgabe von Eins. Bei keinem einzigen im Untersuchungsgebiet vermessenen Inverter liegt ein konstanter Leistungsfaktor von Eins vor. Auffällig ist das Verhalten der Wechselrichter in den Nachtstunden. Zu Zeiten keiner Wirkleistungseinspeisung treten teils deutliche kapazitive Blindleistungsflüsse auf. Diese können auf das Verbleiben der Netzfilter am Netz zurückgeführt werden. Die minimalen induktiven und kapazitiven Leistungsfaktoren aller verbauten und vermessenen Inverter aus dem, hier beispielhaft vorgestellten, Niederspannungsnetz sind in Abbildung 5 gezeigt. Der Auswertungszeitraum beträgt ein Jahr, hier das Jahr 2011. Für jeden Inverter werden, falls Daten vorhanden, für jeden Monat der minimale induktive und minimale kapazitive Leistungsfaktor bestimmt. Wie später noch gezeigt wird ändert sich das Verhalten an einigen Messstellen über das Jahr hinweg. Dies kann auf Temperatureinflüsse sowie auf einen Wechselrichtertausch aufgrund von alterungsbedingter Neuinvestition oder Modulerweiterungen zurückgeführt werden. Die berechneten Leistungsfaktoren aus den Messwerten bestätigen die minimalen Leistungsfaktoren aus den Laboruntersuchungen. Im induktiven Bereich weisen 5 % aller Inverter einen minimalen Leistungsfaktor zwischen 0.9 und 0,999 auf. 95 % erfüllen die Leistungsfaktorvorgabe mit $\cos(\varphi)$ – Werten größer als 0,999 sehr gut. Im kapazitiven Bereich ergeben sich wiederum deutliche Abweichungen von der Leistungsfaktorvorgabe. Da einige Inverter sich nachts nicht vom Netz trennen und mit diesem in einem Blindleistungsaustausch stehen, beziehen sich die Leistungsfaktorberechnungen nur auf den Zeitraum in dem Wirkleistung in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird. Im Gegensatz zu den im Labor untersuchten Wechselrichtern werden im Feld einige Inverter vermessen, die auch im Vollastbetrieb ein kapazitives Blindleistungsverhalten (Verbraucherzählpeilsystem) aufzeigen. Dieser Blindleistungsfluss hat einen zusätzlichen Spannungshub bei einer hohen Wirkleistungseinspeisung zur Folge.

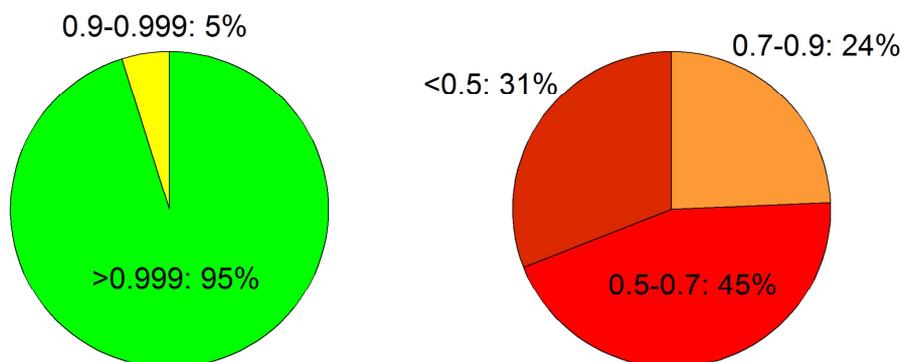


Abbildung 5: Minimaler induktiver (links) und kapazitiver (rechts) Leistungsfaktor der untersuchten Wechselrichter aus dem Projektgebiet. Alle Wechselrichter haben eine Leistungsfaktorvorgabe von Eins. Im kapazitiven Bereich liegen deutliche Abweichungen von der Vorgabe vor.

Nachdem durch Messungen im Labor sowie Auswertung von Feldmessungen dargelegt wurde, dass Wechselrichter mit einer Leistungsfaktorvorgabe von Eins zu unbeabsichtigten Blindleistungsflüssen in den Netzen beitragen, stellt sich die Frage, wie diese Blindleistungsflüsse charakterisiert werden können. Da sie von der Amplitude der Globalstrahlung und damit von der Auslastung bzw. Wirkleistungseinspeisung des Inverters abhängen wird diese Abhängigkeit quantifiziert. Das Ergebnis einer Großzahl der analysierten Inverter ist eine lineare und damit direkte Proportionalität mit positiver oder negativer Steigung. Diesen Invertoren kann ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Grades zugewiesen werden. Es ist durch den Y-Achsenabschnitt (keine Wirkleistungseinspeisung) und seine Steigung gekennzeichnet. Damit ist es möglich aus der eingespeisten Wirkleistung den Blindleistungsfluss des Inverters zu prognostizieren.

In Abbildung 6 ist der Wirk- und Blindleistungsfluss eines Inverters aus dem Projektgebiet über fünf Tage dargestellt. Es ist deutlich der hohe kapazitive Blindleistungsfluss in den Nachtstunden zu erkennen der auf das verbleiben der Filter am Netz schließen lässt. Sobald sich der Inverter auf das Netz aufsynchronisiert, sinkt der Blindleistungsfluss ab. Ab Erreichen von etwa 60 % der Nennleistung verhält sich dieser Wechselrichter induktiv. Im Volllastbetrieb wird ein Blindleistungswert von mehr als 500 VAR induktiv bezogen. Es liegt eine direkte Proportionalität mit negativer Steigung zwischen Wirk- und Blindleistung vor.

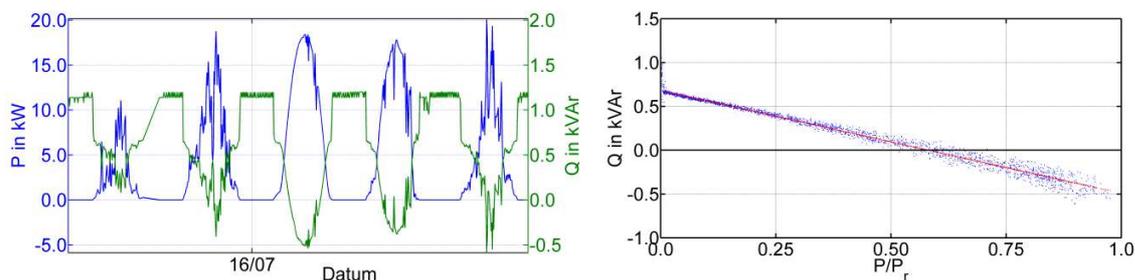


Abbildung 6: Verlauf der Wirk- und Blindleistungsflüsse eines beispielhaften Wechselrichters aus dem Projektgebiet Seebach über fünf Tage (links). Zusammenhang von Wirk- und Blindleistung dieses Wechselrichters (rechts). Es ist eine direkte Proportionalität mit negativer Steigung zu erkennen (blaue Punkte). Diese kann durch ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Grades beschrieben werden (rote Gerade).

Der Inverter aus Abbildung 7 verhält sich genau umgekehrt. Bei diesem korrelieren Wirk- und Blindleistung und es liegt eine direkte Proportionalität mit positiver Steigung vor. In den Nachtstunden tritt erneut ein stark kapazitives Verhalten auf. Mit Beginn der Synchronisation auf das Netz springt das Blindleistungsverhalten von den hohen kapazitiven Werten zu Zeiten keiner Wirkleistungseinspeisung in einen geringeren kapazitiven Bereich und die Blindleistung folgt der Wirkleistung. Im Volllastbetrieb werden von diesem Inverter über 400 VAR kapazitiv bezogen. Damit hat dieser Wechselrichter im Volllastbetrieb eine zusätzliche netzspannungssteigernde Wirkung aufgrund des unbeabsichtigten Blindleistungsflusses.

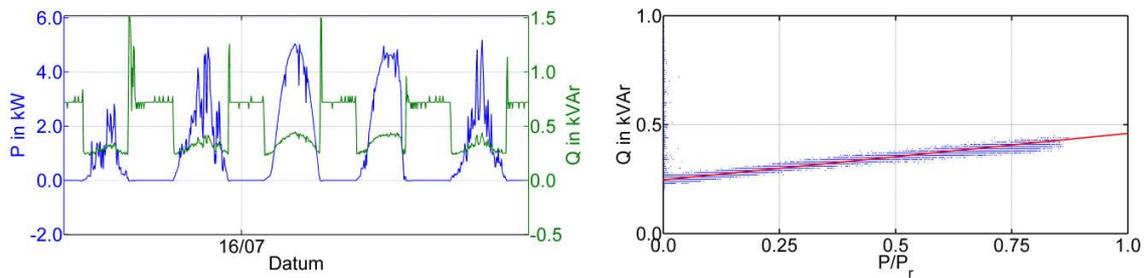


Abbildung 7: Verlauf der Wirk- und Blindleistungsflüsse eines beispielhaften Wechselrichters aus dem Projektgebiet Seebach über fünf Tage (links). Zusammenhang von Wirk- und Blindleistung dieses Wechselrichters (rechts). Es ist eine direkte Proportionalität mit positiver Steigung zu erkennen (blaue Punkte). Diese kann durch ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Grades beschrieben werden (rote Gerade).

Neben den sich proportional verhaltenden Invertern zeigen die Messwerte auch einige wenige Wechselrichter bei denen kein linearer Zusammenhang zwischen Wirk- und Blindleistung besteht. Dieses Verhalten liegt bei keinem der im Labor untersuchten Wechselrichter vor. Abbildung 8 zeigt dazu einen beispielhaften Wirk- und Blindleistungsverlauf über mehrere Tage. Mit beginnender Wirkleistungseinspeisung sinkt die Blindleistung im kapazitiven Bereich ab. Ab etwa 20 % der Nennleistung beginnt der Blindleistungsfluss der Wirkleistung zu folgen bis bei etwa 85 % Auslastung eine Art Sättigung zu erkennen ist. Diese Abhängigkeit kann durch ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Grades nur grob angenähert werden. Eine deutlich bessere Abschätzung der unbeabsichtigten Blindleistung dieses Inverters liefert ein Blindleistungsausgleichspolynom 3. Grades. Dies ist in grün auf der rechten Seite in Abbildung 8 zu sehen.

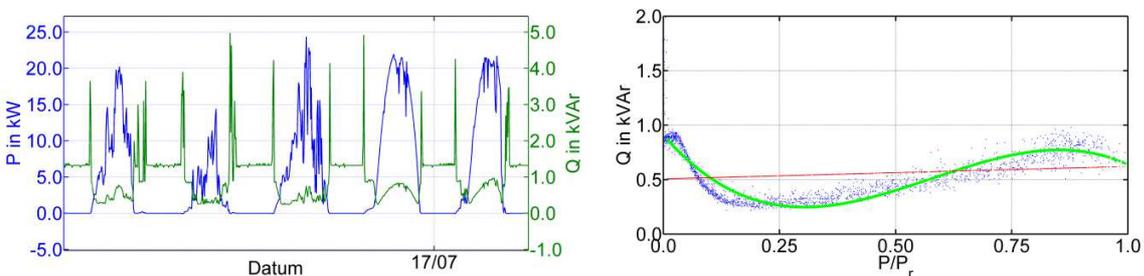


Abbildung 8: Verlauf der Wirk- und Blindleistungsflüsse eines beispielhaften Wechselrichters aus dem Projektgebiet Seebach über fünf Tage (links). Zusammenhang von Wirk- und Blindleistung dieses Wechselrichters (rechts). Während ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Grades die Abhängigkeit der Blind- von der Wirkleistung nur grob abschätzen kann, kann durch ein Blindleistungsausgleichspolynom 3. Grades eine deutliche bessere Näherung erreicht werden (grüne Kurve).

Um sämtliche Blindleistungsausgleichspolynome der untersuchten Wechselrichter aus dem Projektgebiet vergleichen zu können, werden in einem ersten Schritt für jeden Inverter Ausgleichspolynome 1. Grades betrachtet. Wie weit dies zulässig ist und welche Fehler hervorgerufen werden ist im Folgenden dargestellt. Für jeden Wechselrichter wird pro Monat ein Blindleistungsausgleichspolynom erstellt. Dieses ist in Abhängigkeit des Y-Achsenabschnittes und der Steigung in Abbildung 9 eingetragen. Es ergeben sich folglich pro Wechselrichter bis zu zwölf

Marker (falls Messwerte für das gesamte Jahr vorliegen). Bei einer Großzahl der Inverter liegen die Marker der einzelne Monate nahe zusammen. Dies sind Wechselrichter bei denen die lineare Proportionalität stark ausgeprägt ist. Divergieren die einzelnen Marker eines Inverters liegt eine schlechtere Proportionalität vor. Für die meisten Wechselrichter, mit Ausnahme des in weiß und dunkelblau dargestellten Inverters, liegt eine ausgeprägte lineare Proportionalität vor. Bei den beiden Ausnahmen sollte auf Ausgleichspolynome höherer Ordnung zurückgegriffen werden. Zwei Wechselrichtermesspunkte ändern im Laufe des Jahres ihr prinzipielles Verhalten. Diese sind in Abbildung 9 mit einem Doppelpfeil gekennzeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass hier ein Wechselrichteraustausch stattgefunden hat.

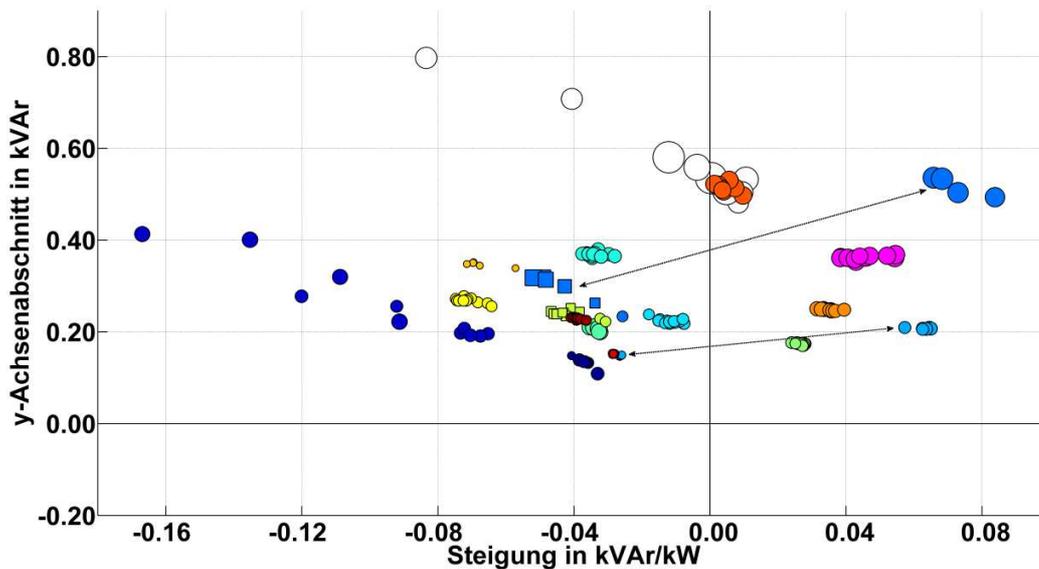


Abbildung 9: Blindleistungsausgleichsgeraden in Abhängigkeit der Steigung und des Y-Achsenabschnitts. Die Größe der Marker symbolisiert die maximale Blindleistung des Inverters. Liegt diese im kapazitiven Bereich vor ist der Wechselrichter durch einen Kreis gekennzeichnet; im induktiven durch ein Rechteck.

Die Größe der Marker beschreibt den absolut maximalen Blindleistungsfluss den der entsprechende Wechselrichter hervorgerufen hat. Der Maximalwert liegt bei 2,06 kVAr für einen Inverter mit maximaler Wirkleistungseinspeisung von 25,85 kW, symbolisiert durch den größten weißen Kreis. Ist ein Inverter durch einen Kreis dargestellt liegt der maximale Blindleistungsfluss im kapazitiven Bereich vor. Dies ist bei allen bis auf zwei Wechselrichter der Fall. Diese beiden Inverter weisen ihren maximalen Blindleistungsfluss im induktiven Bereich auf und sind durch Rechtecke gekennzeichnet.

Inverter die eine positive Steigung des Blindleistungsausgleichspolynoms sowie ihre maximale Blindleistung im kapazitiven Bereich aufweisen, verhalten sich im Volllastbereich kapazitiv. Es tritt folglich neben einer hohen Wirkleistungseinspeisung eine zusätzliche Blindleistungseinspeisung in das Netz auf. Diese Vergrößert den Hub der Netzspannung wodurch die Belastung des Systems in einen zunehmend kritischeren Bereich gesteigert wird. Ist die Steigung des Blindleis-

tungsausgleichspolynoms negativ reduziert sich die Blindleistungseinspeisung mit zunehmender Wirkleistungseinspeisung. Bei einer Großzahl der analysierten Wechselrichter liegt im Vollastbereich ein induktives Verbraucherverhalten vor. Die Konsequenz ist eine netzspannungsreduzierende Wirkung. Wird hingegen der Vollastbetrieb nicht erreicht verhalten sich die meisten Inverter kapazitiv. Prinzipiell ist die Anzahl der induktiven Inverter im Vollast- bzw. im nahen Vollastbetrieb größer, wohingegen der Blindleistungswert des einzelnen Inverters im kapazitiven Bereich größere Werte aufweist.

Diese Aussagen sind für das eine, hier beispielhaft vorgestellte, Niederspannungsnetz mit den dort verbauten Wechselrichtern gültig. Auswertungen weiterer Niederspannungsnetze zeigen ein davon abweichendes Verhalten der installierten PV - Wechselrichterflotte. Speziell die Auslastung der Inverter bei der ein Vorzeichenwechsel der Blindleistung stattfindet, ist zwischen den Invertersystemen sehr verschieden. Damit ist auch das Verhalten der Summe aller Invertersysteme eines Ortsnetzes stark davon geprägt welche Inverter verbaut sind.

Zur Beurteilung der Qualität der linearen Näherung kann der empirische Korrelationskoeffizient herangezogen werden. Dieser stellt ein Maß für die Güte dar und zeigt auf, wie genau eine beliebige Punktwolke durch eine Ausgleichsgerade beschrieben wird. Je näher der empirische Korrelationskoeffizient bei Eins liegt, desto exakter ist die Näherung durch eine Gerade. Zur Bestimmung des Korrelationskoeffizienten sind die Anzahl der Messwerte (n), der Mittelwert (\bar{x}, \bar{y} nach Formel 2) und die Standardabweichung (s_x, s_y nach Formel 3) der Punktwolke nach Formel 1 in Beziehung zu setzen.

$$r = \frac{1}{n-1} * \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x * s_y} \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{und} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{und} \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3)$$

Aus Abbildung 10 geht hervor, dass bei knapp vier Fünftel der untersuchten Wechselrichter der Korrelationskoeffizient zwischen 0,9 und 1,0 liegt. Damit ist bei diesen Wechselrichtern eine lineare Näherung bereits sehr genau. Für diese Inverter kann mit Hilfe der Blindleistungsausgleichsgeraden der Blindleistungsfluss aus der eingespeisten Wirkleistung recht genau simuliert werden. Allerdings zeigen sich bei 9 % der analysierten Inverter Korrelationskoeffizienten kleiner als 0,7. Hier liefert die lineare Näherung eine nicht zufriedenstellende Approximation, sodass mit Blindleistungsausgleichspolynomen höherer Ordnung gearbeitet werden sollte.

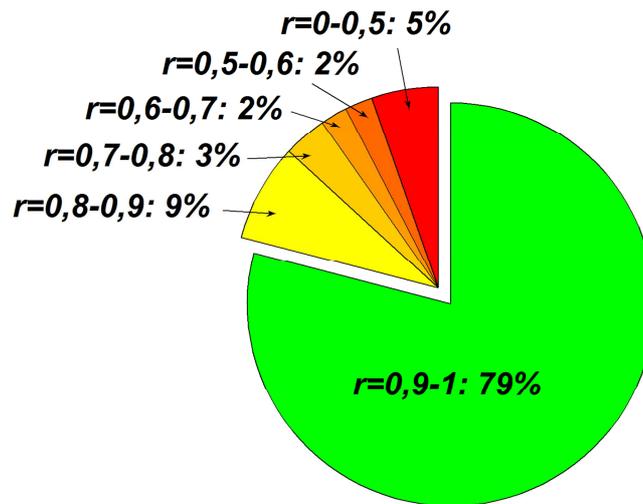


Abbildung 10: Empirischer Korrelationskoeffizient zur Bestimmung der Güter der Näherung durch lineare Blindleistungsausgleichspolynome. Werte nahe Eins bezeugen eine gute lineare Approximation.

Mit der hier vorgenommenen Charakterisierung ist es möglich die unbeabsichtigten Blindleistungsflüsse aus der eingespeisten Wirkleistung zu simulieren. Die einzige Voraussetzung ist das Wissen über den verbauten Wechselrichtertyp mit der zugehörigen Softwareversion. Dies kann für eine präzisere Spannungs- und Lastflusssimulation in Verteilnetzen verwendet werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

PV Wechselrichter mit einer Leistungsfaktorvorgabe von Eins tragen zu unbeabsichtigten und unkontrollierbaren Blindleistungsflüssen in den Verteilnetzen bei. Diese sind abhängig von der Amplitude der Globalstrahlung und damit von der Belastung des Wechselrichters. Dies haben Untersuchungen sowohl im Labor als auch im Feld gezeigt. Es ergeben sich deutliche Abweichungen des Leistungsfaktors von der Vorgabe und teilweise beachtliche Blindleistungsflüsse.

Ein Großteil der Inverter weist eine proportionale Abhängigkeit des Blindleistungsflusses von der eingespeisten Wirkleistung auf. Folglich kann diesen Invertertypen ein Blindleistungsausgleichspolynom 1. Ordnung hinterlegt werden. Dieses sollte bei Spannungs- und Lastflusssimulationen in Verteilnetzen mit PV Wechselrichterrichtern berücksichtigt werden. Damit ist eine präzisere Simulation der realen Netzverhältnisse möglich.

5. Literatur

[BAY-13] Bayernwerk AG, Forschungsprojekt „Netz der Zukunft“; Homepage: https://www.bayernwerk.de/pages/eby_de/Innovationen/Smart_Grid/Unsere_smart_grid_Forschungsprojekte/index.htm; Stand: Dezember 2013

[BUR-13] Burger B.; Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie im Jahr 2013; Fraunhofer – Institut für Solare Energiesysteme ISE; Freiburg; Oktober 2013

[DIN-50160] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, Deutsche Fassung prEN 50160, November 2008

[ENE-13] Energy Map; Homepage: <http://www.energymap.info/energieregionen/DE/105.html> , Stand: Dezember 2013

[FLU-1760] Fluke; Three-Phase Power Quality Recorder 1760, <http://www.fluke.com/fluke/dede/leistungsmessgeraete-und-netzqualitaets-analysatoren/netzqualitaetslogger/fluke-1760.htm?PID=56031>; Stand: Dezember 2013

[PVS-7000] Spitzenberger & Spies GmbH & Co. KG; Photovoltaic Generator Simulator – PVS 7000, <http://www.spitzenberger.de/Pruefsysteme-fuer-PV-Wechselrichter.aspx>; Stand: Dezember 2013

[SPR-13a] Spring A., Wirth G., Becker G., Pardatscher R., Witzmann R., Brantl J., Schmidt S., Untersuchung der Korrelation aus Tageslastgängen und PV Einspeisung zur Bestimmung der maximalen Netzbelastung, 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz Bad Staffelstein, März 2013

[SPR-13b] Spring A., Wirth G., Wagler M., Becker G., Witzmann R.; Reactive Power Flows of Photovoltaic Inverters with a Power Factor Requirement of One; 28th European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition; Paris Frankreich; September 2013

[VDE-4105] Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz–Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz; August 2011

[WAG-13], Wagler M.; Blindleistungsverhalten von PV Wechselrichtern im Niederspannungsnetz bei einer $\cos \varphi = 1$ Vorgabe; Master Arbeit; Hochschule München; Fakultät 04; München 2013