

Netzplanung in Niederspannungsnetzen

# Unsymmetrie in NS-Netzen durch dezentrale PV-Anlagen

Um Beschädigungen von Netzkomponenten und Verbrauchergeräten zu vermeiden, gibt die DIN EN 50160 [1] ein Spannungsband von  $\pm 10\%$  vor. Netzplaner haben daher die Aufgabe, ihre Netze auch für Ausnahmesituationen so auszulegen, dass diese Grenze nicht über- beziehungsweise unterschritten wird. In diesem Aufsatz wird die Wirkung unsymmetrisch angeschlossener PV-Anlagen auf das Niederspannungsnetz analysiert und anschließend eine Planungsempfehlung gegeben.

Aufgrund der historischen Entwicklung wurden Netze lastgetrieben geplant und ausgelegt. Frühere Untersuchungen empfehlen, im Starklastfall die HS/MS-Übergabestelle mit einer Slackspannung von  $104\%$  zu betreiben, um eine Spannung von  $90\% \cdot U_n$  an keinem Netzknoten zu unterschreiten [2]. Unter der Annahme heterogener Netzstrukturen<sup>1</sup> muss sichergestellt sein, dass im Einspeisestrang eine Spannung von  $110\% \cdot U_n$  nicht überschritten wird. Aktuelle Forschungen zeigen anhand der Aufteilung des Spannungsbands, dass dies kaum mehr möglich ist [3].

Die derzeitigen Planungsrichtlinien umfassen für die Mittelspannungen einen erlaubten Spannungshub durch die dort angeschlossenen dezentralen Einspeiser von  $2\%$  im Vergleich zum Fall ohne Einspeisung [4]. In der Niederspannung dürfen dezentrale Erzeuger bis zu einem Spannungshub von  $3\%$  angeschlossen werden [5]. Der Spannungsfall im MS-Netz verursacht von NS-Anlagen wird in keiner der Richtlinien geregelt, obwohl dieser durchaus beträchtliche Werte annimmt [3]. Der in der Niederspannung vorgeschriebene Spannungshub von  $3\%$  wird in den meisten Fällen in der Praxis von Netzplanern durch eine symmetrische Berechnung ausgeschöpft und berücksichtigt daher keinen Sicherheitsabstand für Unsymmetrien. Diese Vernachlässigung ist angesichts der großen Zahl unsymmetrisch angeschlossener Anlagen – bis zu  $60\%$  in manchen Netzen [6] – nicht gerechtfertigt und kann eine Ursache für Spannungsüberschreitungen sein.

Alle Aussagen und Rechnungen in diesem Aufsatz gehen von einer Worst-Case-Betrachtung aus, bei der unsymmetrisch an-

geschlossene Anlagen mit nur einer Phase verbunden sind und darüber hinaus immer die gleiche Phase für einen unsymmetrischen Anschluss genutzt wird. Die »Lieblingsphase« der Installateure ist in dieser Arbeit willkürlich auf L2 festgelegt.

### Auswirkungen unsymmetrischer Einspeisung auf die Spannung

Die beiden hauptsächlichsten Unterschiede zwischen symmetrischer und einphasiger Einspeisung bestehen darin, dass zum einen die dreifache Leistung über eine Phase fließt, die über die Leitungs-

impedanzen zu einem viel größeren Spannungshub führt. Darüber hinaus ist die Summe des Stroms über alle drei Phasen ungleich null, so dass der Rückleiter Strom führt, was auch hier einen Spannungsfall zur Folge hat. In Bild 1 sind anhand eines Zeigerdiagramms die Unterschiede für ein Leitungsstück beispielhaft dargestellt. Wichtig ist hierbei in allen Fällen die Betrachtung der Phasen-Neutralleiter-Spannung, da diese Spannung von einem Verbraucher oder einer Einspeiseanlage gesehen wird. Im weiteren Verlauf wird diese Spannung daher als Verbraucherspannung bezeichnet.

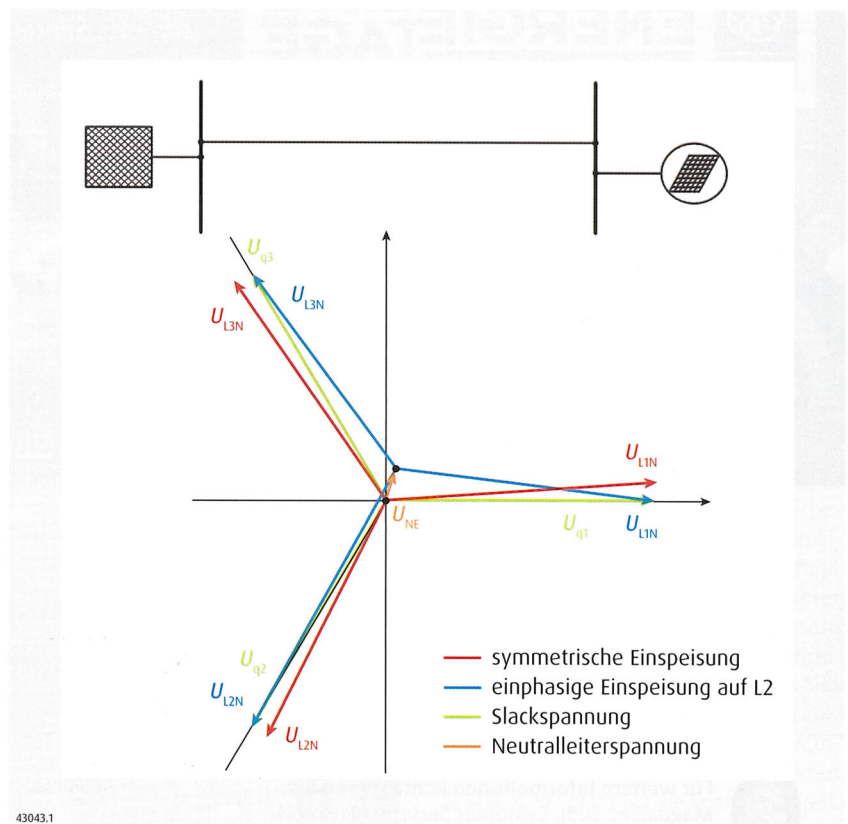


Bild 1. Zeigerdiagramm (nicht maßstabsgetreu) für jeweils eine symmetrische und einphasige PV-Einspeisung in ein Leiterstück

<sup>1</sup> Auftreten von Starklast- und Einspeisefall in zwei unterschiedlichen Strängen zum gleichen Zeitpunkt.

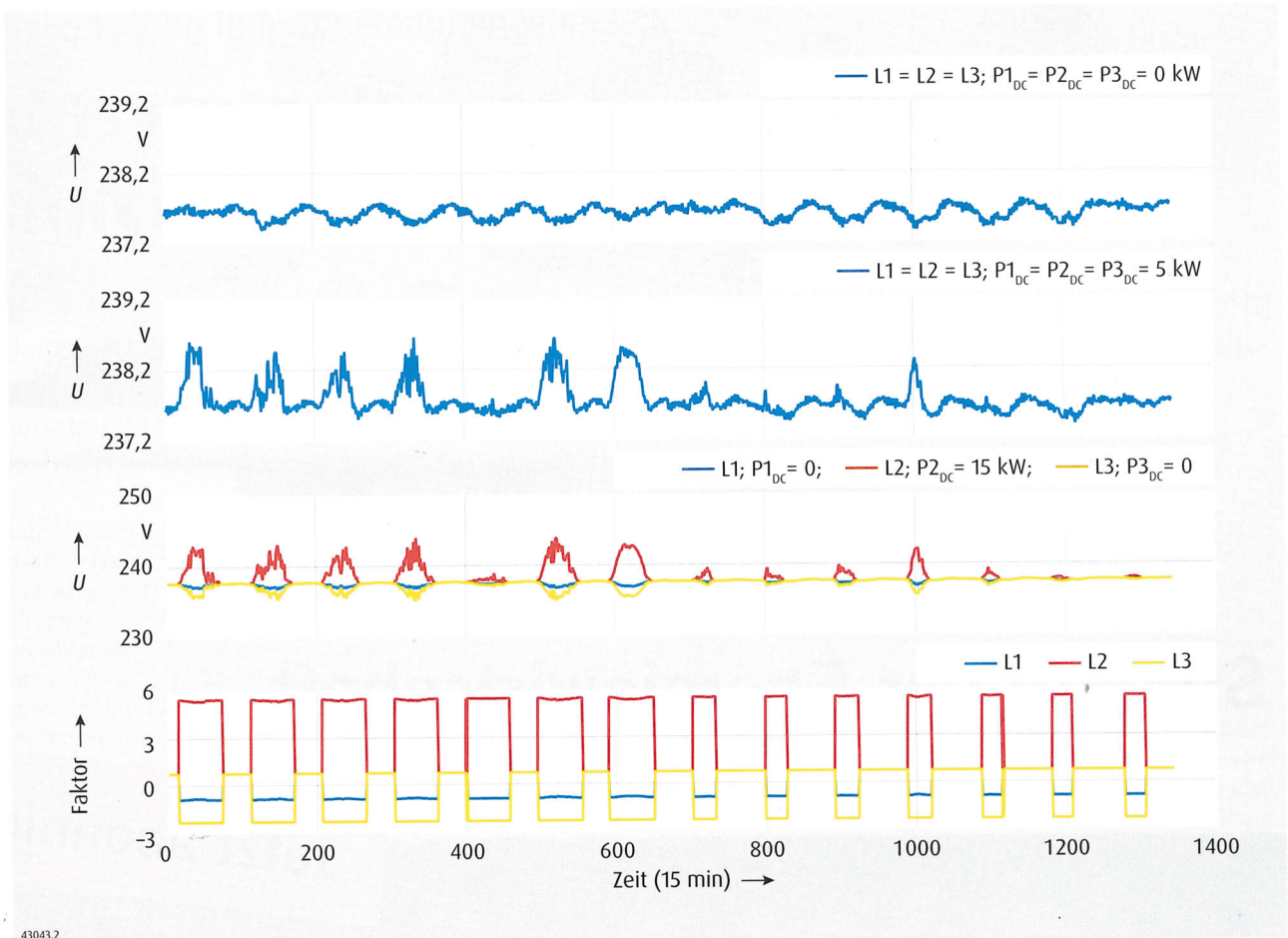


Bild 2. Verbraucherspannung und Faktor an einem exemplarischen Netzknoten für einen Untersuchungszeitraum von zwei Wochen

Im Fall der symmetrischen Einspeisung (rot) fließt kein Strom über den Neutralleiter. Alle drei Spannungszeiger  $U_{LN}$  (Leiter-Neutralleiter) sind aufgrund des ohmsch-induktiven Verhaltens der Leitung im Vergleich zu den Slackspannungen  $U_q$  leicht voreilend. Wird hingegen auf Phase L2 die gleiche Leistung einphasig eingespeist, kommt es zu einer Verschiebung des Sternpunkts an der PV-Anlage (orange). Die resultierende Spannung  $U_{L2N}$  wird dadurch erheblich vergrößert, wohingegen die beiden anderen Verbraucherspannungen unterschiedlich stark verkleinert werden. Die Ergebnisse und Phänomene dieses einfachen Beispiels lassen sich auch auf größere Netze übertragen. Dazu wurde ein reales Niederspannungsnetz vorstädtischer Prägung mit fünf installierten PV-Anlagen über einen Zeitraum von zwei Wochen simuliert.

Im ersten Fall wurde dabei eine symmetrische Einspeisung aller PV-Anlagen mit einer DC-Leistung von je 15 kW angenommen. Im zweiten Fall wurden die Anlagen einphasig betrieben, was in der Realität nur bis zu einer Leistung von 4,6 kVA je Netzanschlusspunkt zulässig

ist [5]. Darüber hinaus wurde zum Vergleich eine Simulation ohne Einspeisung durchgeführt und ein Faktor ermittelt, der nach Gleichung (1) berechnet wird. Lasten wurden bei der Simulation stets als symmetrisch angenommen.

$$Faktor = \frac{\Delta U_{unsym}}{\Delta U_{sym}} \quad (1)$$

mit

$$\Delta U_{unsym} = U_{unsym} - U_0$$

$$\Delta U_{sym} = U_{sym} - U_0$$

Dieser knotenscharfe Faktor ist ein Maß für die Spannungsänderung bei unsymmetrischer Einspeisung im Verhältnis zur symmetrischen Einspeisung. In Bild 2 ist exemplarisch für einen Knoten im Netz zu sehen, dass tagsüber der Spannungsanstieg der unsymmetrisch belasteten Phase rund sechsmal so groß ist wie im symmetrischen Fall. Da in den Nachtstunden keine PV-Leistung eingespeist wird, verhält sich das Netz symmetrisch und der Faktor nimmt einen Wert von eins an. Der sechsfache Anstieg der Spannung lässt sich durch folgende Überlegung erklären: Da über eine Phase die dreifache Leistung transportiert wird, kommt es

in erster Näherung zu einem dreifach höheren Spannungsanstieg im Leiter. Darüber hinaus hat die unsymmetrische Belastung zur Folge, dass auch der Neutralleiter Strom führt. Da die Impedanz des Neutralleiters bei den in der Niederspannung häufig verwendeten NAYY-Kabeln ähnliche Werte aufweist wie die der übrigen drei Leiter, kommt es auch hier zu einem Spannungsfall in gleicher Größenordnung. In Summe wird dadurch der sechsfache Spannungshub erreicht. Der Betrag der beiden anderen Phasen wird im Fall einer unsymmetrischen Netzbelastung erwartungsgemäß verringert (negativer Faktor). Diese Faktoren konnten auch für alle weiteren Knoten im Netz bestätigt werden. Das volatile Verhalten der Spannung im Fall ohne Einspeisung ist auf das individuelle zeitabhängige Verhalten der Lasten zurückzuführen.

### Veränderung des Integrationspotenzials unter Berücksichtigung der Unsymmetrie

Zur Bestimmung des PV-Integrationspotenzials eines Niederspannungsnetzes unter Berücksichtigung unsymmetrisch angeschlossener Anlagen muss zunächst



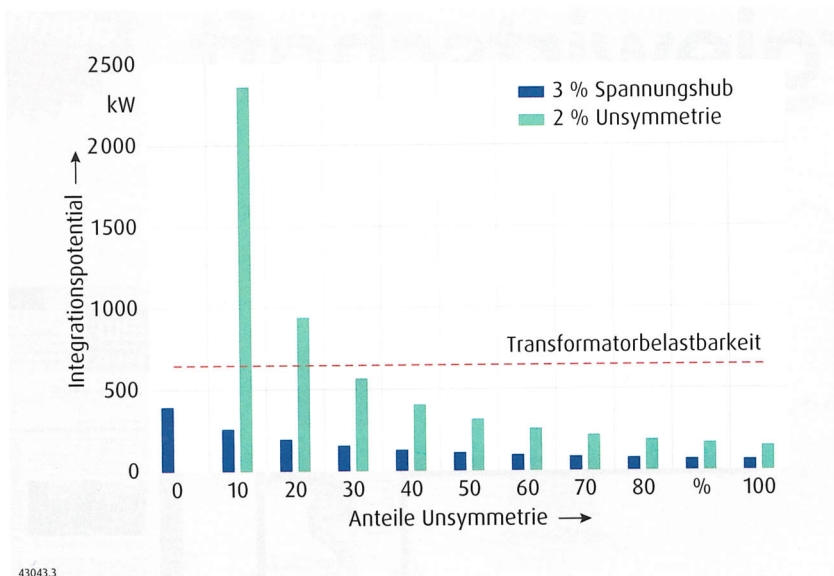


Bild 3. PV-Integrationspotenzial in Abhängigkeit von einer unsymmetrisch angeschlossenen Leistung im Bereich 0 bis 100 %

definiert werden, welche Grenzen es einzuhalten gilt. In [6] wurde dazu für den symmetrischen Fall das 3 %-Spannungshubkriterium nach [5] verwendet und im Fall unsymmetrischer Einspeisung ausschließlich die erlaubten 2 % Spannungsunsymmetrie [1] geprüft, die besagt, dass in keinem Knoten das Verhältnis der Gegensystemkomponente zur Mitsystemkomponente einen Wert von 2 % überschreiten sollte. In dieser Arbeit wurde neben der 2 %-Spannungsunsymmetriegrenze auch das 3 %-Spannungshubkriterium abweichend von [6] für jede

Phase geprüft. In den Simulationen wurden PV-Anlagen auf alle Knoten homogen verteilt und die Leistung so lange erhöht, bis es zu einer Grenzwertverletzung kommt. Abhängig vom Unsymmetrieanteil wurde außerdem ein gewisser Teil der Leistung einphasig, die restliche Leistung dreiphasig eingespeist. Aus Bild 3 wird deutlich, dass unabhängig vom Anteil unsymmetrisch angeschlossener Leistung immer zuerst das phasenscharfe 3 %-Spannungskriterium verletzt wird und dies zu einer spürbaren Reduktion des Integrationspotenzials führt. Werden

alle Anlagen komplett unsymmetrisch angeschlossen, beträgt das Integrationspotenzial aufgrund des sechsfachen Spannungsanstiegs nur noch ein Sechstel des ursprünglichen Werts.

Auch wenn in der Realität viele Anlagen in der Niederspannung unsymmetrisch angeschlossen sind, kann von einem Leistungsanteil von bis zu 20 % unsymmetrisch angeschlossener Leistung ausgegangen werden. In Bild 4 ist für diesen Ausschnitt noch einmal das Integrationspotenzial, das ausschließlich durch Überschreiten des phasenscharfen 3 %-Spannungshubkriteriums ermittelt wurde, dargestellt. Des Weiteren wurde die dazugehörige Spannungsunsymmetrie nach [1] bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die Werte deutlich unter dem vorgeschriebenen Grenzwert von 2 % liegen.

### Empfehlung für die Netzplanung

Im Aufsatz wurde gezeigt, dass unsymmetrisch – in diesem Fall einphasig – angeschlossene PV-Anlagen einen deutlich höheren Spannungshub zur Folge haben. Würden alle PV-Anlagen an die gleiche Phase angeschlossen werden, hätte das sogar einen sechsfachen Anstieg im Vergleich zum symmetrischen Betrieb zur Folge. In der Praxis wird das Anschlussgesuch einer PV-Anlage vom Netzplaner mit einer symmetrischen Rechnung durchgeführt und auf die Einhaltung des 3 %-Spannungshubkriteriums überprüft. Eine unsymmetrische Rechnung ist in vielen Fällen

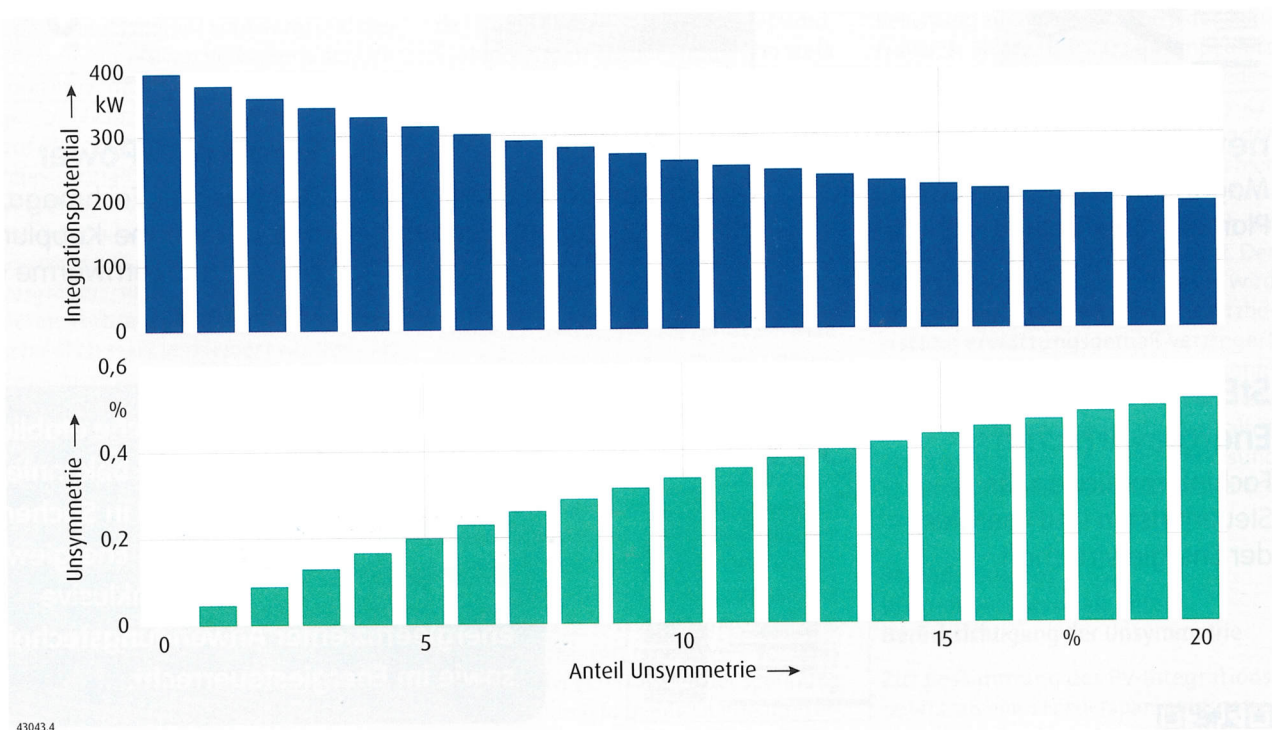
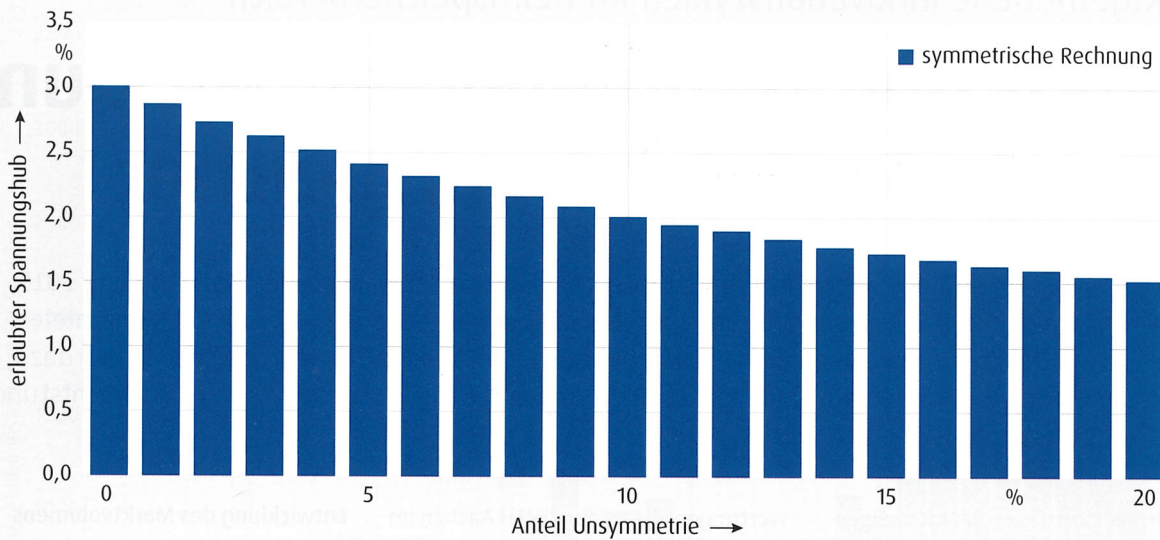


Bild 4. Integrationspotenzial und Spannungsunsymmetrie in Abhängigkeit von einer unsymmetrisch angeschlossenen Leistung



43043.5

Bild 5. Herabsetzung des symmetrischen 3 %-Spannungskriteriums – abhängig von einer unsymmetrisch angeschlossenen Leistung

nicht möglich, da Niederspannungsnetzbetreibern die Infrastruktur für unsymmetrische Netzberechnungen fehlt und auch die exakte Anschlussphase der PV-Anlage oft nicht bekannt ist. Aus diesem Grund soll die Planungsempfehlung nach wie vor von einer symmetrischen Rechnung ausgehen. Auf Basis dieser Prämisse wird eine Reduzierung des symmetrischen 3 %-Spannungshubs in Abhängigkeit vom Unsymmetrieanteil – Anteil unsymmetrisch angeschlossener Leistung im Verhältnis zur gesamten PV-Leistung – vorgeschlagen. Die neuen Grenzen für den Spannungshub können aus Bild 5 abgelesen werden.

Sind in einem Netz beispielsweise 10 % der Leistung unsymmetrisch angeschlossen, sollte der Netzplaner nur noch einen symmetrisch berechneten Spannungshub von 2 % zulassen. Damit ist sichergestellt, dass an keiner Phase ein Spannungshub > 3 % auftritt. Diese Kurve wurde für diverse Netze unterschiedlichen Typs ermittelt und hat nahezu für jedes Netz die gleichen Reduktionswerte. Eine Reduktion um rund 1 % entspricht darüber hinaus den Ergebnissen aus [3], die auf realen Messungen in einem Niederspannungsnetzgebiet beruhen.

**Fazit**

Wird ein Anschlussgesuch einer dezentralen PV-Anlage mit den aktuellen Richtlinien [4] und [5] geprüft, kann nicht mehr sichergestellt werden, dass in jedem Fall die obere Spannungsgrenze von 110 % · U<sub>n</sub> nach [1] eingehalten wird. Verantwortlich dafür ist unter anderem der viel höhere Spannungshub durch unsymmetrisch angeschlossene PV-Anlagen. Es wurde gezeigt, dass eine

einphasig angeschlossene Anlage einen um den Faktor sechs höheren Spannungsanstieg verursacht als im symmetrischen Fall. Um diesem Problem zu begegnen, wird eine Reduktion des 3 %-Spannungshubs vorgeschlagen, der von Netzplanern symmetrisch geprüft wird. Die Reduktion ist dabei in Abhängigkeit der unsymmetrisch angeschlossenen Leistung im Bezug zur gesamt installierten PV-Leistung durchzuführen. Somit wird sichergestellt, dass die Einhaltung des 3 %-Spannungshubkriteriums für jede Phase erfüllt ist. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Grafik in Bild 5 auf der Worst-Case-Annahme beruht, dass alle unsymmetrisch angeschlossenen Anlagen auf einer und darüber hinaus auf der gleichen Phase angeschlossen sind. Werden mehrere unsymmetrisch – sowohl einphasig als auch zweiphasig – angeschlossene Anlagen auf alle Phasen verteilt, fällt die Reduktion des 3 %-Spannungshubkriteriums geringer aus.

**Literatur**

- [1] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [2] Kerber, G.; Witzmann, R.: Empfehlung zur Richtlinie zum Anschluss von Erzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz. Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze, TU München, 2009.
- [3] Pardatscher, R.: Planungskriterien und Spannungsqualität in Mittel- und Niederspannungsnetzen mit hoher Photovoltaikeinspeisung. Verlag Dr. Hut, 2015.
- [4] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.

(BDEW): Technische Richtlinie – Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. 2008.

- [5] VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. VDE Verlag GmbH, 2011.
- [6] Engel, B.; Laudahn, S.; Marggraf, O.; Schnettler, A.; Potratz, F.; Gödde, M.; Witzmann, R.; Lindner, M.; Vennegeerts, H.; Patzack, S.: Vergleich von technischer Wirksamkeit sowie Wirtschaftlichkeit zeitnah verfügbarer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen mit starker dezentraler Einspeisung. FNN-Studie, 2014.



**Marco Wagler** M. Sc.,  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze,  
TU München, München



**Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann**,  
Extraordinarius,  
Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze,  
TU München, München

>> marco.wagler@tum.de  
rolf.witzmann@tum.de

>> www.hsa.ei.tum.de

43043