

AUSWIRKUNGEN DER STANDARD-KENNLINIE FÜR COS $\Phi(P)$ NACH VDE-AR-N 4105 FÜR VERTEILNETZE MIT HOHER DICHTEN AN PV- ANLAGEN

Andreas Heier

Stadtwerke Pfarrkirchen, Äußere Simbacher Str. 7, 84347 Pfarrkirchen, Tel.: +49 8561 970-201, andreas.heier@swpan.de, www.swpan.de

Kurzfassung: Die Erhöhung der Aufnahmefähigkeit von Photovoltaikstrom in Verteilnetzen wurde bereits hinreichend untersucht [1]. Dabei wurde eine bis zu 48% höhere Einspeiseleistung durch Aufnahme induktiver Blindleistung von Wechselrichtern prognostiziert. Dieser Umstand führte vorher bereits auch durch andere Arbeiten (etwa [2]) zur Wegbereitung einer überarbeiteten Einspeiserichtlinie in Niederspannung, der VDE-AR-N 4105, dessen Erstausgabe im August 2011 veröffentlicht wurde und nun in der Ausgabe vom November 2018 aktuell anzuwenden ist.

In beiden Versionen der VDE-AR-N 4105 befindet sich eine Standard-Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ (Bild 6 alt und Bild 9 neu) und kommt somit auch weiterhin im Regelfall für die Blindleistungsbereitstellung der Wechselrichter zur Anwendung. In mehreren untersuchten Netzen regionaler Verteilnetzbetreiber (etwa der Stadtwerke Landshut, Dingolfing, Kelheim, Neustadt a. d. Donau, Pfarrkirchen oder der ÜZW Energie AG) konnte ein Zusammenhang zwischen Wirk- und Blindleistungsverhalten im Netz, sowie der Standard-Kennlinie hergestellt werden. Das in diesen Netzen vorherrschende Blindleistungsverhalten bezogen auf die Wirkleistung ist zum einen analog und zum anderen von hoher Durchdringung mit PV-Anlagen geprägt. Seit dem Zeitpunkt, in der die Kennlinie zur Anwendung kommt, erfolgte ein Zubau in Höhe von etwa 50% des gesamten Anlagenbestandes.

In der aktuell gültigen VDE-AR-N 4105 sind nunmehr mehrere Optionen für Blindleistungsbereitstellung angegeben innerhalb dessen eine Anlage betrieben werden kann. Hier eröffnen sich Möglichkeiten sinnvoll Blindleistungsmanagement zu betreiben.

Die Auswirkungen der Standard-Kennlinie auf das Blindleistungsverhalten im Netz wurden untersucht und dazu eine exemplarische Mittelfrist-Prognose des Blindleistungsverhaltens im Netz erstellt. Es wird die aktuelle Thematik zum Austausch von Blindleistung zwischen dem vorgelagerten und dem nachgelagerten Netzbetreiber in Verbindung mit den Auswirkungen der Standard-Kennlinie diskutiert und Lösungswege aufgezeigt, die es gilt weiter zu vertiefen und zu untersuchen.

Die untersuchten Netze sind stellvertretend für eine breite Masse an regionalen Verteilnetzen in Süddeutschland, vor allem dem südlichen Bayern, zu sehen. Daher sind die Ergebnisse auch von grundsätzlicher Bedeutung.

Keywords: Blindleistung, Photovoltaikanlage, VDE-AR-N 4105, Verteilnetz

1 Blindleistungsverhalten im Netz

Der Austausch von Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber soll in bestimmten

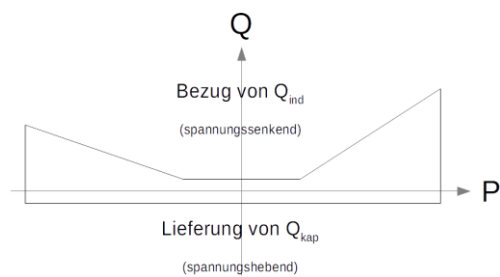


Abbildung 1: beispielhaftes vertragliches Blindleistungsband

Grenzen stattfinden. Vertraglich sind in der Regel Grenzen festgelegt, die möglichst einzuhalten sind oder erreicht werden sollen. Bei Lieferung und Bezug von Blindleistung liegen die gemessenen Werte derzeit noch regelmäßig außerhalb, daher ist es von Interesse hier eine möglichst verträgliche Lösung zu finden. Die Ursachen wurden analysiert und Gemeinsamkeiten festgestellt und herausgearbeitet. Die untersuchten Mittelspannungsverteilstnetze weisen durchwegs städtische und auch einen Anteil an

ländlicher Struktur auf. Hier interessiert der Austausch an Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber. Allen gemein ist der in der Regel hohe Verkabelungsgrad. Im Mittelspannungsnetz ist die Kabelkapazität zu beachten, da hier eine kapazitive Ladeleistung merkbar in Erscheinung tritt, die wesentlich für das kapazitive Verhalten des Mittelspannungsnetzes ist. Das bisher induktiv wirkende Niederspannungsnetz wird durch die zunehmende Anzahl an leistungselektronischen Verbrauchern ebenfalls kapazitiver. In Summe ergibt sich daraus der typisch kapazitiv geprägte Austausch von Blindleistung mit dem vorgelagerten Netzbetreiber.

Die folgenden Ausführungen gelten für alle untersuchten Netze, jedoch erfolgt die Darstellung der Ergebnisse nur anhand eines einzigen Netzes.

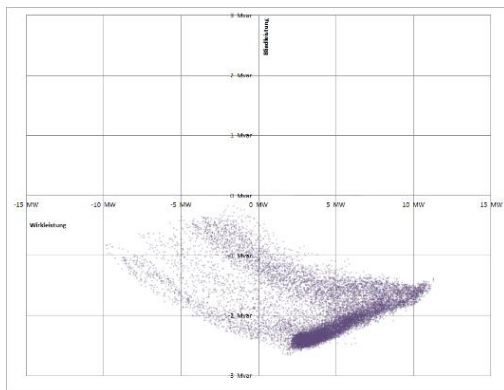


Abbildung 2: Blindleistungsverhalten eines Netzes

Dargestellt als Punktwolke, wobei die Blindleistung über die Wirkleistung aufgetragen wird, ergibt sich das typische Erscheinungsbild eines Verteilnetzes. Charakterisiert wird dies durch zwei ausgeprägte Bereiche oder Äste, die sich horizontal mit vertikalem Anstieg in Richtung Rückspeisung hin ausbreiten. Dazu kommt eine bezugsseitige Grenze, die linear verläuft und aufgerichtet erscheint. Diese Merkmale konnten in allen Netzen gefunden werden. Dabei sind hier immer die spezifischen Eigenschaften der einzelnen Verteilnetze für die individuelle Ausprägung der Merkmale zu berücksichtigen. In dieser Darstellung fehlt der zeitliche Zusammenhang zwischen Wirk- und Blindleistung.

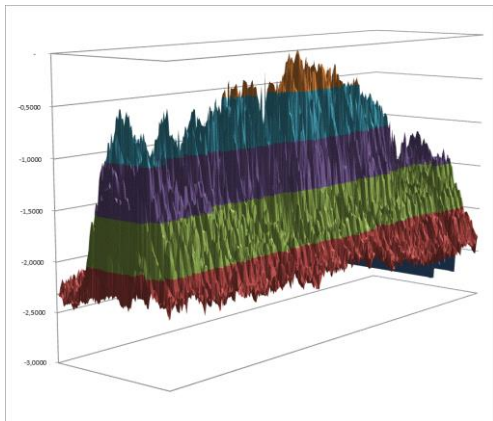


Abbildung 3: Blindleistungsgang in 3D

Der zeitliche Bezug stellt ein wesentliches analytisches Instrument dar, bei dem die Merkmale der Punktwolke in Abbildung 2 erklärbar werden. In Abbildung 3 werden die Messwerte mit zeitlichem Bezug als Blindleistungslastgang dreidimensional präsentiert. Die einzelnen Tage im Jahr werden mit Viertelstundenwerten über das selbige dargestellt. Hier fallen bereits einige Punkte auf. Tagsüber, besonders mittags wirkt die höhere Netzlast induktiv und liefert einen positiven Beitrag zum Austausch von Blindleistung. In lastschwachen Zeiten, vor allem nachts und an Sonn- und Feiertagen, verhält sich das

Netz eher kapazitiv. Im Sommer ist tagsüber ein induktiveres Verhalten erkennbar als im Winter. Obwohl im Winter die Netzlast grundsätzlich höher ist, fehlt hier der induktive Beitrag durch PV-Anlagen. (Anm.: zum Jahresende hin fehlen zwei Messreihen in der Darstellung)

1.1 Einfluss der Last auf die Blindleistung

Nachdem die Ursachen für das typische Blindleistungsverhalten eruiert sind, wird nun der Fokus auf das Lastverhalten gelegt. Vorweg kann hier pauschal schon eine Aussage getroffen werden: Schwachlast korrespondiert mit kapazitivem und Starklast mit induktivem Verhalten.

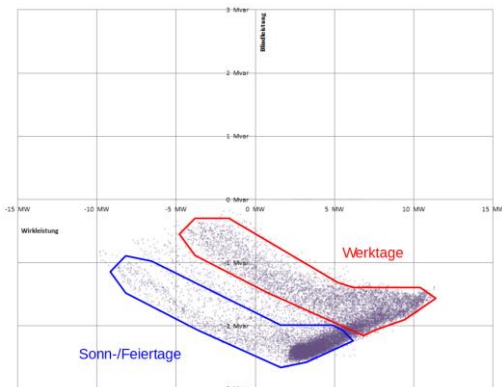


Abbildung 4: Einfluss der Wochentage

Mehrere markante Verhaltensweisen sind allgemein hier feststellbar. Wesentlich ist das Verbraucherverhalten an den unterschiedlichen Wochentagen. Sonn- und Feiertage sind lastarm und treten dementsprechend kapazitiv in Erscheinung. Werktags ist die Netzlast größer und daher im Verhalten induktiver [3].

Das Verhalten erklärt sich, wenn man die Physik dahinter betrachtet. Leerlaufende Kabel nehmen kapazitive Blindleistung auf. Mit zunehmender Last tritt die induktive Komponente in Erscheinung (es gilt: $I^2j\omega L$). Die markierten Bereiche in Abbildung 4 sind in den untersuchten Netzen typisch und mehr oder weniger ausgeprägt. Die in Erzeugungsrichtung hin ausgeprägten Äste stellen die tagsüber bei PV-Einspeisung auftretende Rückspeisung dar.

Das Verhalten erklärt sich, wenn man die Physik dahinter betrachtet. Leerlaufende Kabel nehmen kapazitive Blindleistung auf. Mit zunehmender Last tritt die induktive Komponente in Erscheinung

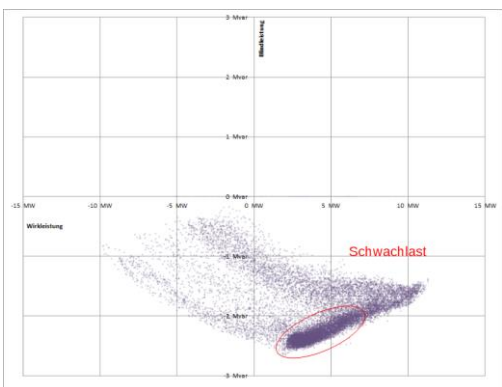


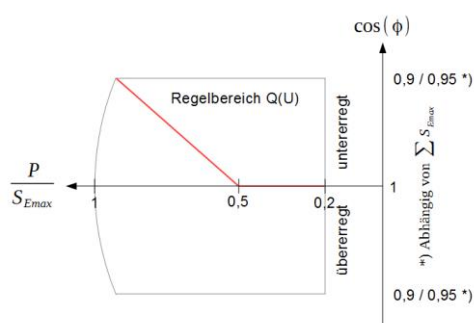
Abbildung 5: Einfluss der Schwachlastzeit

Auffallend ist zusätzlich der hohe Anteil an Messwerten am rechten unteren Rand der Punktwolke. Vor allem nachts ist der Bezug von Leistung der Normalfall. Die Werte der Punktwolke wurden daraufhin untersucht und so zeigt sich hier, dass die Werte mit nächtlicher Schwachlast zusammenhängen. In den untersuchten Netzen befinden sich hier in grober Näherung die Hälfte der Werte.

Auf einen weiteren Punkt, der an sich selbsterklärend scheint, sei trotzdem hingewiesen. Im Mittel besteht etwa die Hälfte des Tages aus Dämmerung bzw. Nacht. Es ist zwar diese Eigenschaft vorwiegend auf die Schwachlastzeit zurückzuführen, jedoch gibt es auch Tage, an denen die Erzeugung im Netz minimal ist. Diese Messwerte befinden sich rechts oberhalb des markierten Bereiches. Dort sind Tage mit geringer Erzeugung enthalten, da diese ebenfalls mit stärkerem Bezug von Leistung aus dem vorgelagerten Netz einhergehen.

1.2 Einfluss der PV auf die Blindleistung

In Netzen mit hohem Anteil an PV-Anlagen ist Rückspeisung in das vorgelagerte Netz mittlerweile möglich, sicher ist jedenfalls in der Regel eine deutliche Reduzierung der Bezugsleistung tagsüber. Seit dem Anwendungsbeginn der VDE-AR-N 4105:2011-08 gab es in etwa einen Zuwachs von 50% bei PV-Anlagen in den Netzen. Damit kann ein wesentlicher Einfluss der Standard-Einstellungen bei Wechselrichtern auf das Blindleistungsverhalten vermutet werden. In der Tat sind derzeit in den untersuchten Netzen etwa 50% bis fast 300% Erzeugungsleistung bezogen auf die maximale Bezugsleistung installiert.



Seit 2011 wird die Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ nach VDE-AR-N 4105 bei Wechselrichtern zur Steuerung der Blindleistung als Standard verwendet. Abbildung 7 zeigt die Standard-Kennlinie, dargestellt im Verbraucherzählpfeilsystem. Dabei wird ab 50% Wirkleistung induktive Blindleistung bis zu einem gewissen $\cos \varphi$ bezogen. Die Idee dahinter ist die Absenkung der Spannung mit einhergehender Erhöhung des eingespeisten PV-Stromes.

Abbildung 7: Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ im Verbraucherzählpfeilsystem

Das vorher bereits beschriebene Blindleistungsverhalten im Netz zusammen mit einer Messwertanalyse bestätigen einen Zusammenhang zwischen dem tagsüber im Sommer induktiveren Blindleistungsverhalten und der Wechselrichter Kennlinie. Weiter stellt sich die Frage nach den typisch ausgeprägten Ästen der unterschiedlichen Wochentage.

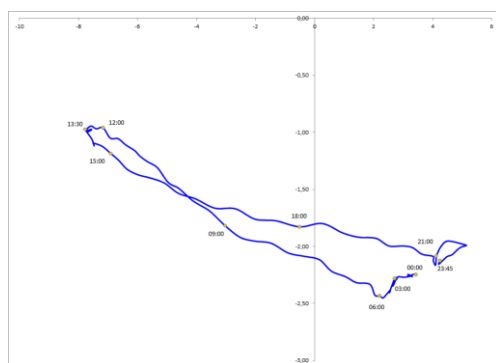


Abbildung 6: Tagesganglinie Sonntag

Auch hier zeigt sich wie in Abbildung 6 dargestellt ein deutlicher Zusammenhang zwischen Erzeugung und der Standard-Kennlinie. An diesem beispielhaften Sonntag im Juli lässt sich sehr anschaulich die Kennlinie beschreiben. Ab etwa 06:00 Uhr morgens erkennt man den Beitrag der PV-Anlagen an der Netzlast. Der Energiefluss beginnt sich in Richtung Rückspeisung zu bewegen und ab etwa 09:00 Uhr gibt es etwa 50% Erzeugungsleistung im Netz. Daraufhin tendiert die Tagesganglinie deutlich zu induktivem Verhalten, dass erst zum frühen

Nachmittag wieder abnimmt. Bedenkt man die Stromabhängigkeit der Kabelinduktanz, dann ist der erste leichte Anstieg zu Tagesbeginn bereits erklärbar. Der stärkere Anstieg tagsüber lässt sich jedoch nur mit der Auswirkung der Standard-Kennlinie plausibel erklären, da sich ab der Hälfte der Wirkleistung Wechselrichter induktiv verhalten und so spannungssenkend

wirken. Einen Anstieg nur mit der Kabelinduktanz zu begründen scheidet aus, da hier lediglich ein linearer Zusammenhang besteht und sich die Netztopologie nicht ändert.

2 Modellbildung und Prognose

Aus eigenen früheren Arbeiten sind Prognosewerte für mittelfristigen Zubau an Photovoltaikanlagen bekannt. Demnach wird nach heutigem Kenntnisstand für die Region eine Verdopplung der aktuell installierten Anlagenleistung innerhalb der nächsten 10 Jahre erwartet.

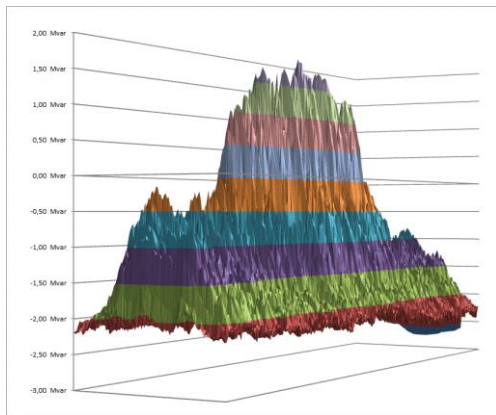


Abbildung 8: Blindleistungsmodell in 3D

Demgegenüber wird sich voraussichtlich eine Erhöhung der Netzlast vor allem durch Elektromobilität von lediglich etwa 15% einstellen. Auch wenn im Wirkleistungsbereich durchaus das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen Strom aus PV-Anlagen im Netz verbraucht, so verhalten sich beide induktiv (siehe hierzu VDE-AR-N 4100, Kapitel 10.6 für Ladesäulen). Beide wirken spannungssenkend und nehmen induktive Blindleistung auf. Somit erfolgt hier keine Aufrechnung über die Energieflussrichtung, sondern eine Addition. Diese Umgebungsvariablen wurden bei der Modellbildung berücksichtigt und so ein prognostizierter Blindleistungsverlauf basierend auf realen Messwerten erarbeitet. Im Beispielnetz beträgt die Prognose für den Austausch von Blindleistung etwa 100% in beide Richtungen.

Verdopplung der aktuell installierten Anlagenleistung innerhalb der nächsten 10 Jahre erwartet. Demgegenüber wird sich voraussichtlich eine Erhöhung der Netzlast vor allem durch Elektromobilität von lediglich etwa 15% einstellen. Auch wenn im Wirkleistungsbereich durchaus das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen Strom aus PV-Anlagen im Netz verbraucht, so verhalten sich beide induktiv (siehe hierzu VDE-AR-N 4100, Kapitel 10.6 für Ladesäulen). Beide wirken spannungssenkend und nehmen induktive Blindleistung auf. Somit erfolgt hier keine Aufrechnung über die Energieflussrichtung, sondern eine Addition. Diese Umgebungsvariablen wurden bei der Modellbildung berücksichtigt und so ein prognostizierter Blindleistungsverlauf basierend auf realen Messwerten erarbeitet. Im Beispielnetz beträgt die Prognose für den Austausch von Blindleistung etwa 100% in beide Richtungen.

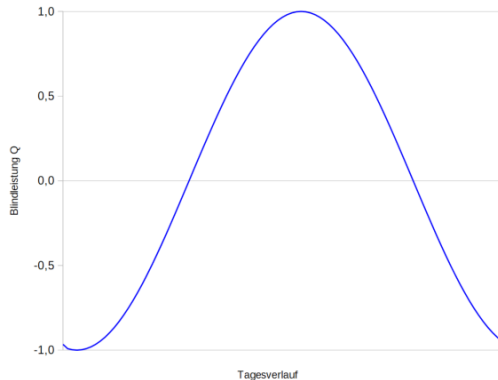


Abbildung 9: Prognosestag im Sommer

In erster Näherung kann ein typischer Prognosestag im Sommer mit hoher Erzeugungsleistung als eine Sinusfunktion nachgebildet werden. Hier zeigt sich deutlich die Aufnahme induktiver Blindleistung tagsüber und die Abgabe kapazitiver Blindleistung nachts. Wie eingangs beschrieben ist in den untersuchten Netzen die Erzeugungsleistung unterschiedlich und so variieren auch die Prognosemodelle entsprechend.

3 Ergebnisse und Lösungsstrategie

3.1 Prognoseergebnis

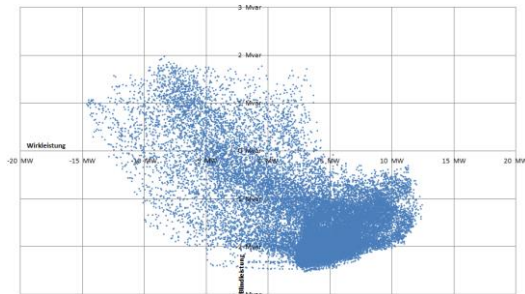


Abbildung 10: Prognoseergebnis



Abbildung 11: Q-Netzkenlinie für Prognosetag

Zukünftig wird es im Netz eine stark fluktuierende Blindleistung über den Tag und das Jahr geben. Im Grunde wird keine Entlastung beim Austausch von Blindleistung erreicht, sondern eine Zunahme. Ebenso wird mit einer Festkompensation, z. B. in Form einer Spule, keine alleinige und angemessene Lösung erreicht werden.

Die Standard-Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ wird sich verschärfend auf die Situation auswirken.

Für den typischen Prognosetag im Sommer kann eine Kennlinie wie in Abbildung 11 aussehen. In dieser Darstellung sind starke Vereinfachungen enthalten. Jedoch würde in der Praxis diese Kennlinie bereits ausreichen, da eine Kompensation stets auf Null einen sehr großen Regelaufwand bedeuten würde. Technisch einfacher und wirtschaftlich günstiger ist eine Regelung der Blindleistung um den Nullpunkt herum.

3.2 PV-Fingerabdruck

Der PV-Fingerabdruck findet sich in allen untersuchten Netzen. Dabei besteht dieser aus den in den Kapiteln 1.1 und 1.2 beschriebenen Merkmalen. Zusammengefasst notiert:

- jeweils für Sonn- und Feiertage, sowie für Werkzeuge ist ein individueller Bereich im Diagramm ausgebildet
- jeder Bereich hat zwei Steigungen, eine für tagsüber und eine für den anderen Zeitraum
- der Schwachlastbereich ist identifizierbar

3.3 Blindleistungsbereitstellung durch Wechselrichter

Die Systemverluste für leistungselektronische Bereitstellung von Blindleistung liegen heute bei rund 3% bei entsprechenden Geräten am Markt, bei Festspulen zum Vergleich ab minimal 1%.

Eingangs wurden Angaben über installierte Anlagenleistung in den untersuchten Netzen gemacht. Die Bandbreite liegt heute zwischen 50% und 300% mit einer prognostizierten Verdopplung der Erzeugungsleistung im Netz. Das Blindleistungspotenzial für Wechselrichter wird über einen $\cos \varphi$ von 0,95 abgeschätzt, da dies das schärfere Kriterium darstellt. Im Ergebnis ergibt sich heute ein Potenzial von ungefähr 16% bis 96% der maximalen

Bezugsleistung zur Bereitstellung von Blindleistung durch Wechselrichter mit einer möglichen Verdopplung des Potenzials.

3.4 Kennlinie zur Blindleistungsbereitstellung

Wechselrichter am Markt, die Blindleistung jederzeit nach Bedarf zu Verfügung stellen können, sind in der Lage bis zu 100% ihrer Nennleistung als Blindleistung auszutauschen. Daher ist eine dynamische Anpassung der Kennlinie, z. B. über Netzleittechnik, möglich.

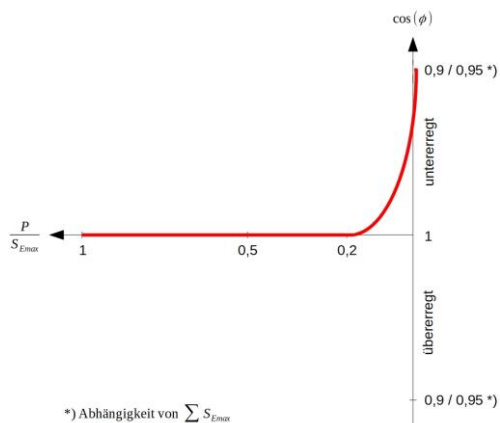


Abbildung 12: prototypische Kennlinie für Wechselrichter

Entwicklung für den Austausch von Blindleistung soll hier mitberücksichtigt und positiv beeinflusst werden. Abbildung 12 zeigt eine Kennlinie für einen Wechselrichter, wie sie prinzipiell beschaffen sein kann.

Wechselrichter werden in der Praxis eher in unterschiedlichen Stufen und ggf. auch kaskadiert angesteuert. Dazu muss auch die aktuelle Auslastung der Betriebsmittel beachtet werden, damit es nicht zur ungewollten Überlastung durch Blindleistung kommt. Weiter müssen auch die bereits installierten Wechselrichter bedacht werden, bei denen z. B. noch die Standard-Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ hinterlegt ist und die dann auch die Blindleistungsregelung beeinflussen. Da nicht immer alle Wechselrichter in die dynamische Blindleistungsregelung mit einbezogen werden, bietet es sich an, für diese eine angepasste Standard-Kennlinie vorzugeben. Die

4 Fazit und Ausblick

Blindleistung wird am Übergabepunkt bilanziert. Dabei wird idealerweise die induktive und die kapazitive Blindleistung jeweils möglichst vollständig kompensiert. Eine Blindleistungsbereitstellung über gewöhnliche Induktivitäten schafft nur vermeintliche Entlastung, da in Zukunft ein über den Tag stark fluktuierender Austausch von Blindleistung zu erwarten ist.

Die Standard-Kennlinie für $\cos \varphi(P)$ kommt derzeit im Regelfall zu Anwendung, da weder die aufgezeigten Auswirkungen den einzelnen Netzbetreibern vollumfänglich bewusst sind, noch den Fachbetrieben die Folgen ihres Handelns.

Speziell die Blindleistungsbereitstellung von Wechselrichtern kann hier dienlich sein, da diese in ausreichender Anzahl im Netz vorhanden sind. Zurzeit fehlen noch die Anreize für die Installation von blindleistungsfähigen Wechselrichtern bei den Anlagenbetreibern. Dazu wurden bereits Strategien entwickelt, beschrieben und diskutiert¹. Mit Schaffung eines Blindleistungsmarktes und entsprechenden Anreizen wird sich die Anzahl der hierfür benötigten Wechselrichter erhöhen. Dafür kommen alle Erzeugungsanlagen in Frage, bei den Wechselrichter zu ersetzen oder neu zu installieren sind. Mit der installierten Anlagenleistung in den untersuchten Netzen ist es grundsätzlich möglich, die Blindleistung zu kompensieren

¹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/beschaffung-und-verguetung-von-blindleistung.html>

oder zumindest wesentlich zu beeinflussen. Somit stellt dieses Instrument für Netze mit hohem Anteil an PV-Anlagen eine Lösungsstrategie dar, die zum einen dynamisch ist und sich zum anderen auf eine zunehmende Anzahl an Erzeugungsanlagen stützen wird.

Weiterer Entwicklungsbedarf liegt im Bereich der Kennlinien. Hier sind die Kennlinien jeweils entweder an die individuelle Betriebsweise des Netzes anzupassen oder zu standardisieren und die Ausgleichsenergie zu beschaffen. Wobei die Anwendung blindleistungsoptimierter und standardisierter Kennlinien zukünftig noch zu untersuchen ist.

Abschließend noch ein Hinweis auf die die Regelung nach $\cos \varphi(U)$. Bei steigender Netzspannung, aufgrund von dezentraler Einspeisung, wird hier eine ähnliche Strategie verfolgt. Es wäre noch zu untersuchen, ob diese Betriebsweise die gleichen Auswirkungen hat, wie beschrieben.

Referenzen

- [1] Georg Kerber, "Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen", Dissertation TU München 2011
- [2] Witzmann, R.; Kerber, G.; "Empfehlung zur Richtlinie zum Anschluss von Erzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz"; Report / Forschungsbericht; FG Elektrische Energieversorgungsnetze / VBEW 2009
- [3] Andreas Wutzer, "Analyse des Blindleistungsaustausches im Verteilnetz und Konzepterstellung zum Blindleistungsmanagement für einen sicheren und netzkonformen Betrieb", Masterarbeit Stadtwerke Landshut 2017