15. Symposium Energieinnovation, 14. bis 16. Februar 2018, Technische Universität Graz, www.EnInnov.TUGraz.at
ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

BLINDLEISTUNGSBILANZ IM SALZBURGER VERTEILNETZ

Christoph GROISS[1], David GRUBINGER[1], Roman SCHWALBE[2]

[1]Salzburg Netz GmbH, Bayerhamerstraße 16, 5020 Salzburg, Österreich +43/662/8882/2699,
christoph.groiss@salzburgnetz.at, www.salzburgnetz.at

[2]AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich

Kurzfassung: Dieses Paper widmet sich der Blindleistungsbilanz im Salzburger Verteilnetz. Es wird hierbei der Frage nachgegangen, in wie weit die aktuellen Blindleistungsflüsse an den verschiedenen Systemgrenzen beeinflusst werden können. Einerseits an den Übergabestellen zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber. Andererseits an den Systemgrenzen innerhalb des Verteilnetzes. Die Herausforderung der Blindleistungsbilanzierung in Salzburg liegt vor allem in den Schwachlastzeiten. Hier wird die Blindleistungserzeugung der (Kabel-)Querkapazitäten nicht durch den Blindleistungsverbrauch der Längsinduktivtäten von Transformatoren und Leitungen kompensiert. Potenzielle Abhilfe bieten die Blindleistungs-einstellungen von Erzeugungsanlagen sowie die Installation von Ladestromdrosselspulen.

Keywords: Potenziale, Blindleistung, Verteilnetz, Blindleistungsaustausch

1 Einleitung

Dieses Paper widmet sich der aktuellen Thematik des Blindleistungsaustauschs an verschiedenen Systemgrenzen im elektrischen Netz. Einerseits gilt es die Vorgaben an der Schnittstelle zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber einzuhalten. Andererseits lautet die Fragestellung in wie weit die Blindleistungsbilanz dezentral ausgeglichen werden soll, um Blindleistungsflüsse im Verteilnetz zu vermeiden. Im Rahmen des Projektes „DeCAS“ wird auf diese Fragestellungen näher eingegangen.

In diesem Paper wird zunächst die aktuelle Situation im Verteilnetz der Salzburg Netz GmbH dargestellt. Gerade der immer stärker werdende Verkabelungsgrad sowie auch der Zubau an dezentralen Erzeugungsanlagen bewirken eine Veränderung des Blindleistungsverhaltens. In weiterer Folge wird eine Potenzialabschätzung zur Beeinflussung der Blindleistungsbilanz gegeben und es werden unterschiedlicher Lösungsansätze dargestellt.

2 Ausgangssituation

In diesem Kapitel soll die derzeitige Situation der Blindleistungsbilanz im Salzburger Verteilnetz dargestellt werden. Kapitel 2.1 stellt die Blindleistungserzeugung von Freileitungen und Kabeln im Leerlauf dar. In Kapitel 2.2 wird beschrieben, wie groß der Blindleistungs-austausch mit dem Übertragungsnetz ist. Diese Gesamtbilanz wird in Kapitel 2.3 auf die einzelnen Umspannwerksebene heruntergebrochen. Kapitel 2.4 zeigt beispielhaft das Blindleistungsverhalten einer Pump-Speicher-Einheit. Kapitel 2.5 beschreibt das Blindleistungsverhalten eines Beispiel-Haushalts.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

2.1 Blindleistungserzeugung durch Leitungen im Leerlauf

In Tabelle 1 sind die Systemlängen der unterschiedlichen Leitungstypen des Verteilnetzes in Salzburg zu sehen. Aus den Parametern der Freileitungs- und Kabeltypen kann die Blindleistungserzeugung durch die Querkapazitäten bei Nennspannung berechnet werden (siehe Tabelle 1, dritte Spalte).

Tabelle 1: Systemlängen und Blindleistungserzeugung durch Querkapazitäten im Salzburger Verteilnetz

Leitungstyp	Systemlänge	Blindleistungserzeugung der Querkapazitäten
110-kV-Freileitung	577 km	18,8 MVAr
110-kV-Kabel	41km	28,1 MVAr
30-kV-Freileitung	1731 km	4,7 MVAr
30-kV-Kabel	1771 km	103,8 MVAr
10-kV-Freileitung	61 km	0,2 MVAr
10-kV-Kabel	723 km	10,3 MVAr
0,4-kV-Freileitung	604 km	0,0 MVAr
0,4-kV-Kabel	11537 km	0,5 MVAr

Tabelle 1 zeigt, dass mit 104 MVAr die Kabelkapazitäten des 30-kV-Netzes den größten Beitrag zur Blindleistungserzeugung des Salzburger Verteilnetzes liefern. Trotz der verhältnismäßig geringen Systemlänge des 110-kV-Kabelnetzes wird hierdurch ein signifikanter Beitrag geliefert, welcher sich zukünftig weiter erhöhen wird. Das Niederspannungsnetz weist mit 0,6 MVAr einen vernachlässigbaren Anteil auf. In **Summe** werden rund **166 MVAr** an **Blindleistung** durch die **Querkapazitäten** von Kabeln und Freileitungen erzeugt.

2.2 Blindleistungsbilanz an der Schnittstelle TSO/DSO

Abbildung 1 zeigt den Blindleistungsaustausch des Salzburger Verteilnetzes mit dem österreichischen Übertragungsnetz. Es sind hierbei die gemessenen Werte von drei Jahren in 15 min Zeitauflösung dargestellt. Der Wirkleistungsbezug (positiver Wert X-Achse) aus dem Übertragungsnetz tritt besonders in den Wintermonaten auf (orange gefärbte Punkte). Hingegen ist die Situation der Wirkleistungslieferung vor allem in den Sommermonaten (gelb gefärbte Punkte) vorzufinden.

Eine Blindleistungseinspeisung (negativer Q-Wert auf Y-Achse) bei gleichzeitigem Wirkleistungsbezug (Quadrant unten-rechts) stellt den häufigsten Betriebspunkt dar. Die maximale Blindleistungslieferung in das Verteilnetz beträgt 140 MVAr und befindet sich somit in der Größenordnung der Blindleistungserzeugung durch die Leitungs-Querkapazitäten.

Die Effekte der (nahezu) konstanten Blindleistungserzeugung der Querkapazitäten sowie des belastungsabhängigen Blindleistungsverbrauch der Längsinduktivitäten $Q_L = 3 \cdot I^2 \cdot X_L$ führen typischerweise zu einer quadratischen Kurvenform. In Abbildung 1 ist dieser Effekt nicht direkt erkennbar. Betrachtet man die Situation bei Wirkleistung gleich Null, so treten hier Blindleistungswerte im Bereich von ca - 120 MVAr bis + 50 MVAr auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier die Summe der beiden Übergabestellen dargestellt ist. Für das Ergebnis ist es entscheidend ob sich Erzeugung und Verbrauch lokal (z.B. innerhalb eines Umspannwerks) kompensieren oder ob die Situation „Null Wirkleistung“ durch einen Bezug im nördlichen Teilnetz bei gleichzeitiger gleich großer Einspeisung im südlichen Teilnetz zustande kommt.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

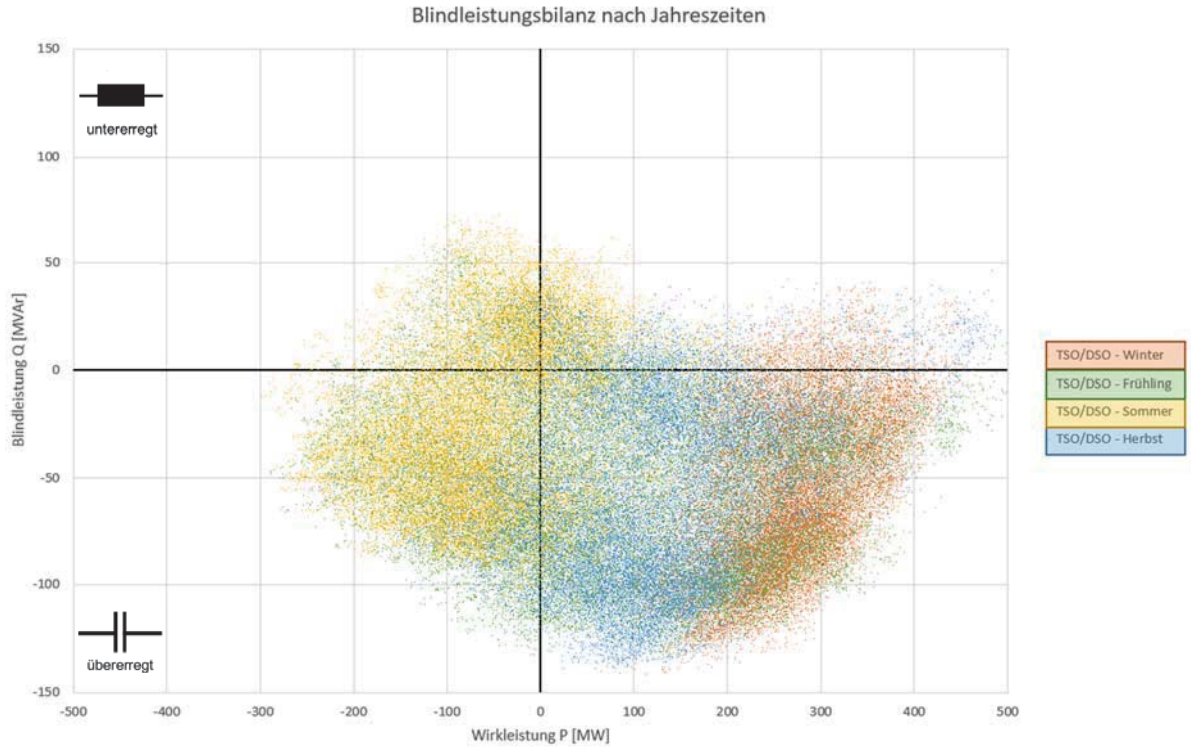

Abbildung 1: Blindleistungsaustausch TSO/DSO in Abhängigkeit der Wirkleistung

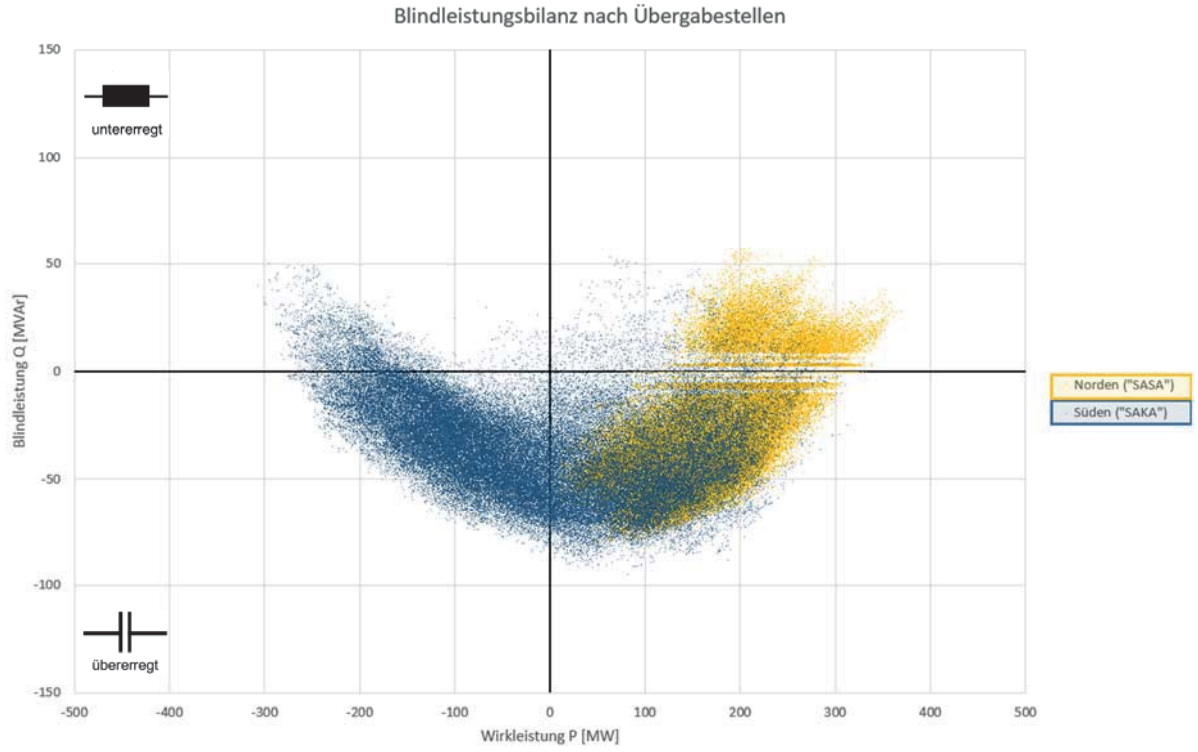

Abbildung 2: Blindleistungsaustausch TSO/DSO dargestellt nach Übergabestellen

Abbildung 2 zeigt nun das PQ-Diagramm für die beiden Überstelle getrennt. Die Punktwolke nimmt nun eher die Form einer quadratischen Funktion an. Weiters ist zu erkennen, dass das nördliche Teilnetz ausschließlich Wirkleistung aus dem Übertragungsnetz bezieht. Hingegen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

ist im südlichen Teilnetz die Rückspeisung in das Übertragungsnetz aufgrund der Wasserkraftwerke der häufigere Betriebszustand.

Zusätzlich wurde der Unterschied zwischen den Kalenderjahren 2014, 2015 und 2016 untersucht (hier nicht dargestellt). Die Charakteristik ist hierbei in allen Jahren gleich und es sind nur geringfügige Unterschiede festzustellen.

In weiterer Folge wurden diese PQ-Wertepaare verwendet, um hieraus die sin(φ)-Werte der einzelnen Zeitpunkte zu berechnen:

$$\sin\varphi\,(t) = \frac{Q(t)}{\sqrt{P(t)^2 + Q(t)^2}}$$

Diese berechneten Werte wurden dann in die übliche Darstellungsform mittels cos(φ) (induktiv und kapazitiv) umgerechnet. Hierbei wird in weiterer Folge immer das Verbraucherzählpfeilsystem angewendet. Ein positiver sin(φ)-Wert beschreibt den unterregten Betrieb („Verhalten wie eine Induktivität). Abbildung 3 zeigt das Histogramm der aufgetretenen cos(φ)-Werte des südlichen Teilnetzes („SAKA“) für alle 105216 Zeitpunkte. Wie auch in Abbildung 2 ersichtlich, gibt es im südlichen Teilnetz Punkte, in denen (nahezu) kein Wirkleistungsaustausch mit dem Übertragungsnetz stattfindet und Blindleistung geliefert wird. Dementsprechend treten cos(φ)-Werte bis 0 kapazitiv („übererregt“) auf. Im Gegensatz dazu gibt es nahezu keine cos(φ)-Werte im untererregten Betriebszustand welche unter 0,98 liegen.

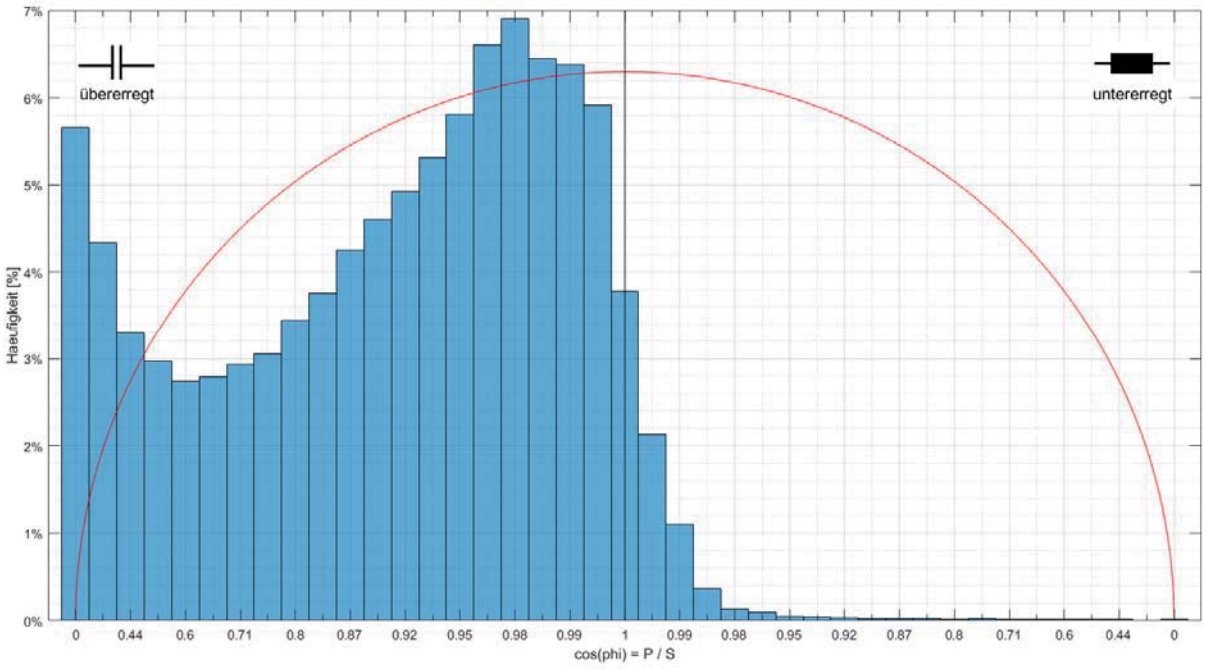

Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der cos(φ)-Werte des südlichen Teilnetzes ("SAKA")

Der rote Halbkreis in Abbildung 3 hat keine nähere Bedeutung. Er stellt einen Einheitskreis dar, um die gewohnte Darstellungsform zu symbolisieren, sodass die Histogrammbalken direkt einem gedachten PQ-Diagramm zugeordnet werden können.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

In Abbildung 4 sind die gleichen cos(φ)-Werte wie in Abbildung 3 dargestellt. Der Unterschied ist hier, dass entsprechend der Wirkleistungswerte zwei Gruppen gebildet wurden. Die Einteilung erfolgt nach dem Betrag der Wirkleistung. Die Flussrichtung hat keinen Einfluss. Für diese beiden Gruppen sind jeweils eigene Histogramm-Verteilungen dargestellt.

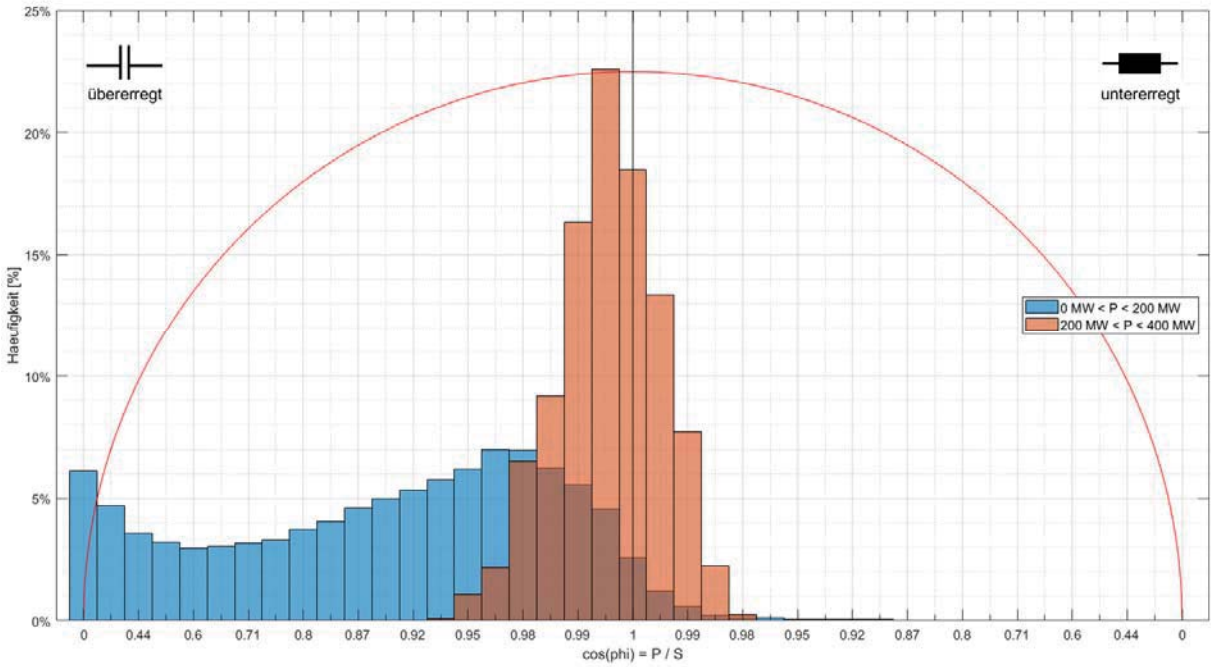

Abbildung 4: Häufigkeitsverteilung der cos(φ)-Werte des südlichen Teilnetzes ("SAKA") gruppiert nach Leistung

In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass bei hohen Auslastungen jeweils cos(φ)-Werte nahe eins erzielt werden. Dies gilt sowohl für Lieferung- als auch Bezugsrichtung. Im geringeren Leistungsbereich bis 200 MW treten im überregten Bereich cos(φ)-Werte von Null bis eins auf.

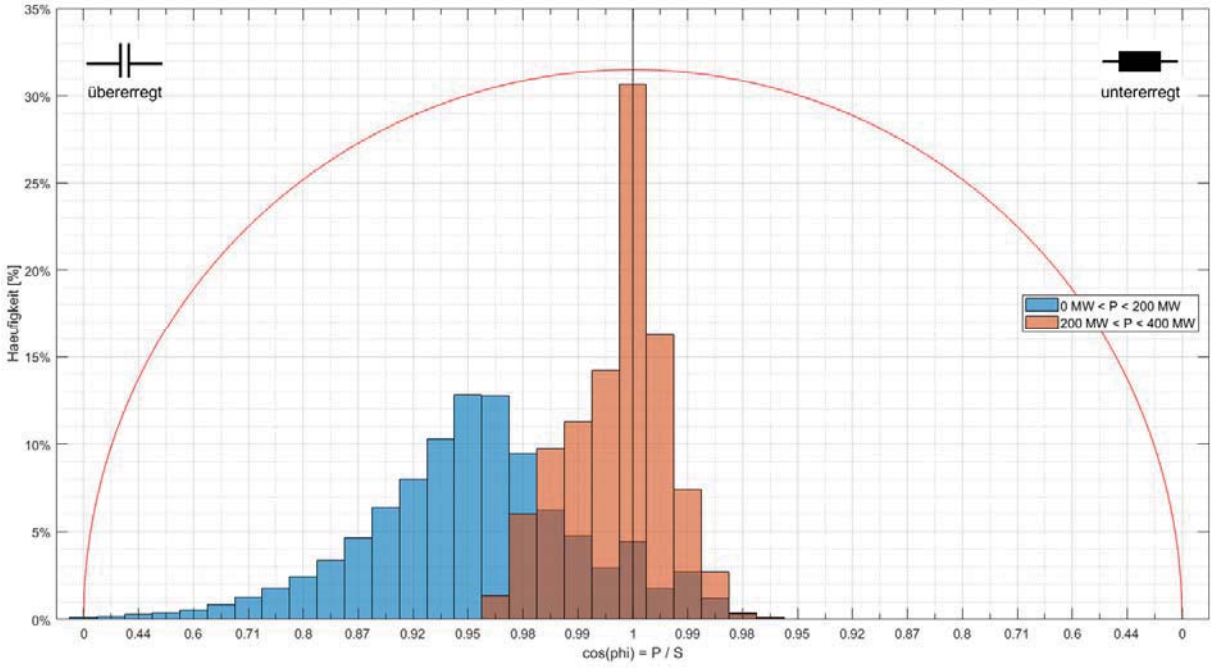

Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der cos(φ)-Werte des nördlichen Teilnetzes ("SASA") gruppiert nach Leistung

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der cos(φ)-Werte für das nördliche Teilnetz „SASA“. Es erfolgt ebenfalls eine Gruppierung entsprechend der Wirkleistungswerte. Wie im Scatterplot (siehe Abbildung 2) dargestellt, ist das nördlicher Teilnetz immer in Bezugsrichtung. Der Wirkleistungswert Null tritt hier nicht auf. Dementsprechend treten in Abbildung 5 keine extremen cos(φ)-Werte im Bereich Null auf. Die grundsätzliche Charakteristik ist hier ähnlich zum südlichen Teilnetz, dass bei hohen Belastungen die cos(φ)-Werte in Richtung eins tendieren.

2.3 Blindleistungsbilanz in Umspannwerken auf der Mittelspannungsebene

In diesem Kapitel wird die Blindleistungsbilanz auf Ebene der Umspannwerke (Hoch- auf Mittelspannung) dargestellt. Zur Auswertung werden jeweils die 15-min-Momentanwerte eines vollen Kalenderjahres herangezogen. Die Messwerte wurden jeweils auf der 30-kV-Seite der 110kV/30kV Umspanner aufgenommen. Dementsprechend ist in den folgenden Diagrammen der Blindleistungsbedarf der Umspanner selbst noch nicht beinhaltet. Die Darstellungen zeigen die Summe der Umspannwerksabgänge.

Entsprechend der Charakteristik der Wirk-/Blindleistungs-Scatter-Plots können die Umspannwerke grob in drei Kategorien gegliedert werden:

- Gebiete mit geringer Erzeugung (z.B. städtische Gebiete)
- Gebiete mit Erzeugungsanlagen auf Mittelspannungsebene
- Gebiete mit Seilbahn- und Beschneiungsanlagen

Abbildung 6 zeigt den Wirk-/Blindleistungs-Scatter-Plot des Umspannwerks Annaberg (30-kV-Sammelschiene) für das Kalenderjahr 2016. Alle Punkte befinden sich in der rechten Halbebene, da es zu keinem Zeitpunkt im Jahr zu einer Rückspeisung in das 110-kV-Netz gekommen ist.

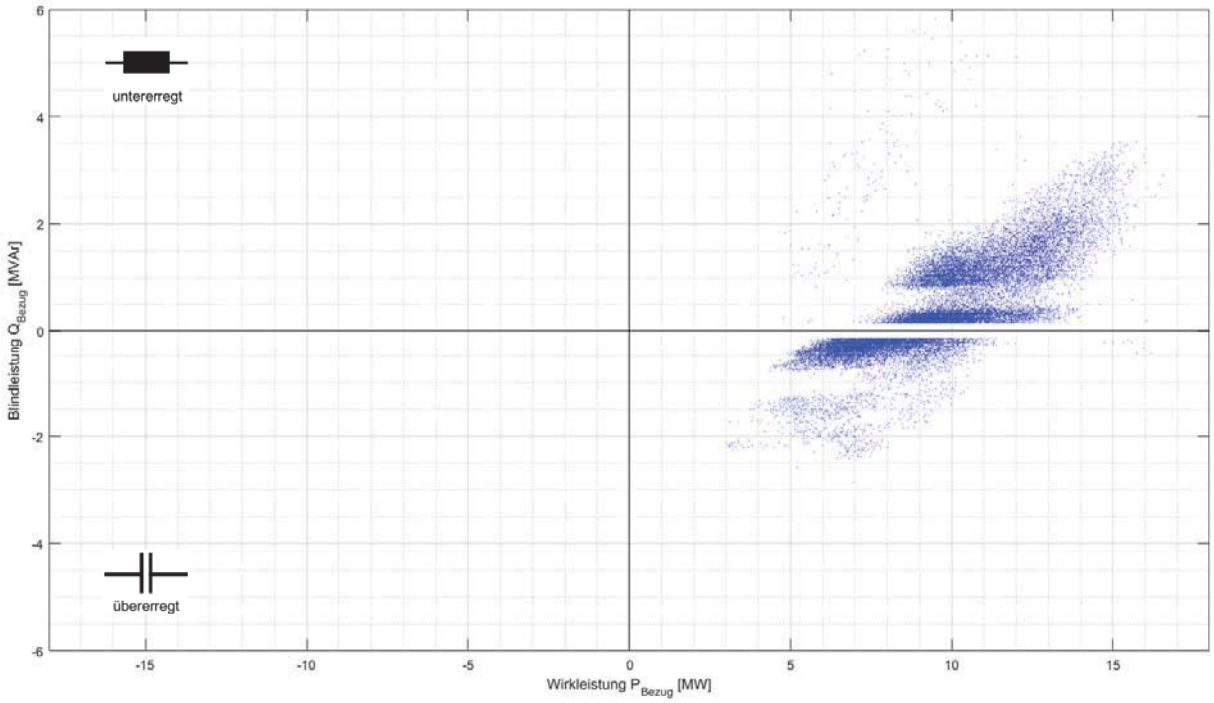

Abbildung 6: Scatterplot der Wirk- und Blindleistungen "Verbrauchergebiet" (Annaberg)

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Dieser Scatter-Plot ist stellvertretend für Gebiete mit keiner bzw. nur geringer Erzeugung auf Mittelspannungsebene. Umspannwerke in städtischen Gebieten weisen typsicherweise eine ähnliche Charakteristik auf. In Abbildung 6 ist weiters zu erkennen, dass bei geringerer Wirkleistung typischerweise eine Blindleistungslieferung auftritt. In Starklastzeiten wird hingegen Blindleistung bezogen.

Dieses Verhalten ist auch in Abbildung 7 zu erkennen. Das Umspannwerk „Lungau“ steht hier stellvertretend für Umspannwerke mit dezentralen Erzeugungsanlagen, welche in das Mittelspannungsnetz einspeisen. Im Gegensatz zu Abbildung 6 gibt es hier PQ-Wertepaare in der linken Halbebene, welche eine Wirkleistungseinspeisung in das überlagerte Netz darstellen.

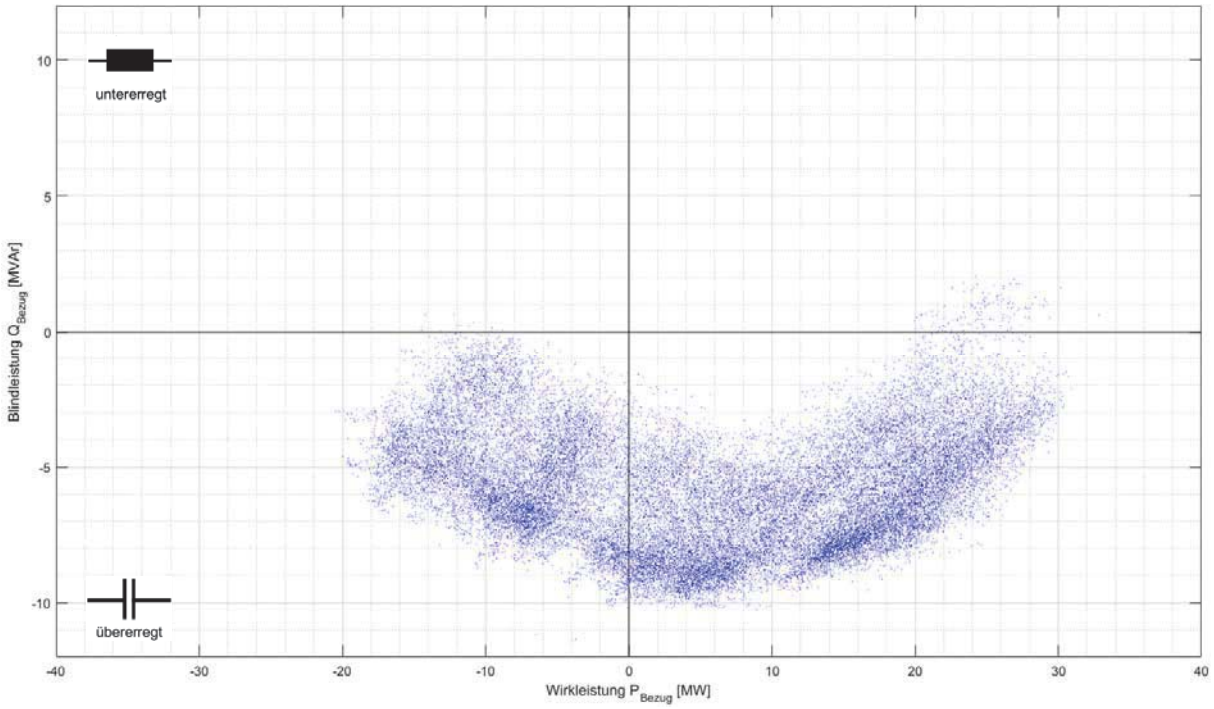

Abbildung 7: Scatterplot der Wirk- und Blindleistungen "Einspeisergebiet" (Lungau)

In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass in fast allen Zeitpunkten die Situation einer Blindleistungserzeugung vorliegt. Diese Situation wird aber z.T. durch den Blindleistungsbedarf des 110kV/30kV-Umspanners kompensiert (hier nicht dargestellt). Grundsätzlich kann beobachtet werden, dass auch hier in Schwachlastzeiten eine stärkere Blindleistungserzeugung stattfindet als in Starklastzeiten. Dies gilt sowohl für die Wirkleistungslieferung als auch für den Wirkleistungsbezug.

Abbildung 8 zeigt das Umspannwerk „Hinterglemm“, welches stellvertretend für Gebiete mit Seilbahn- und Beschneiungsanlagen steht. Die Grundcharakteristik ist ähnlich zu städtischen Gebieten (siehe Abbildung 6). Der Unterschied liegt in der Häufigkeit der auftretenden Wertepaare. Hier sind sehr häufig verhältnismäßig kleine Wirkleistungsbezüge bis ca. 10 MW zu beobachten. Hiermit verbunden ist eine Blindleistungslieferung in das überlagerte Netz. Verhältnismäßig selten treten Lastspitzen bis ca. 40 MW auf. Diese Lastspitzen sind verbunden mit einem Blindleistungsbezug bis ca. 10 MVAr. Hier ergeben sich cos(φ)-Werte von ca. 0,97 induktiv.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

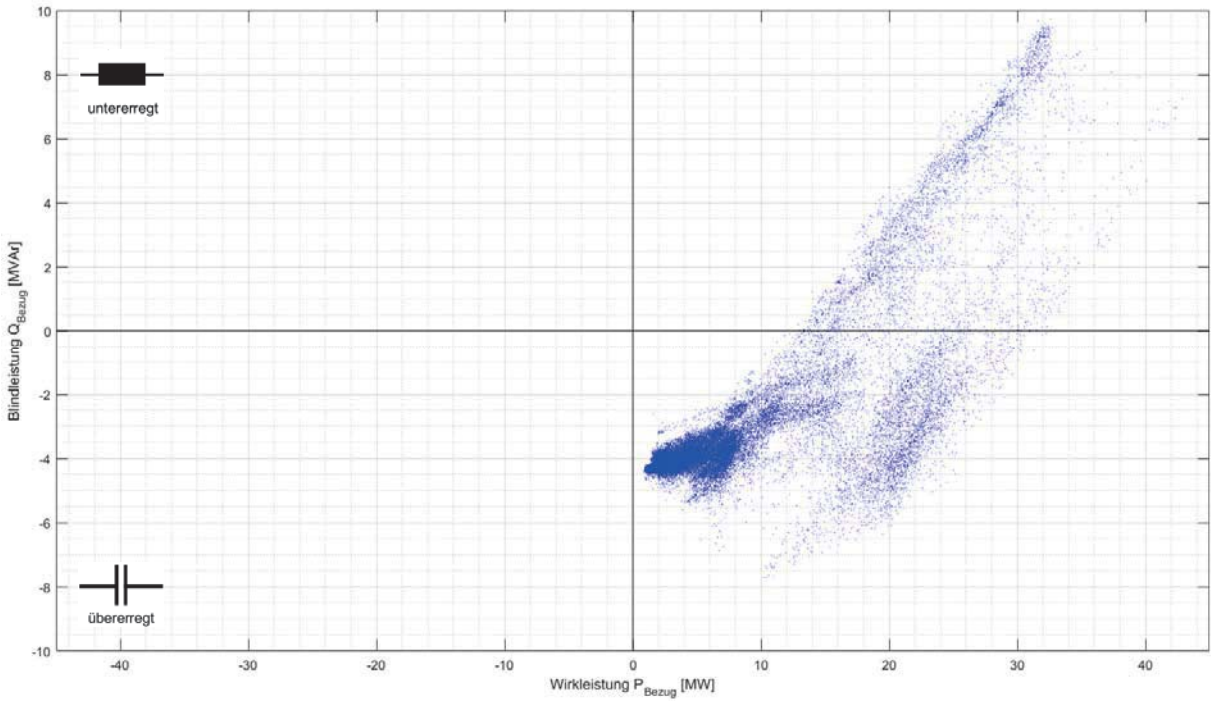

Abbildung 8: Scatterplot der Wirk- und Blindleistungen "Skigebiet" (Hinterglemm)

2.4 Blindleistungsverhalten einer Pumpspeichereinheit

Dieses Kapitel zeigt Beispielhaft das Blindleistungsverhalten einer Pump-Speicher-Einheit. In Abbildung 9 ist das Histogramm der aufgetretenen cos(φ)-Werte zu sehen. Es handelt sich auch hier um 15-min-Werte über ein volles Kalenderjahr. Die cos(φ)-Werte sind hierbei nach den zugehörigen Wirkleistungswerten gruppiert, welche im Verbraucherzählpfeilsystem angegeben sind.

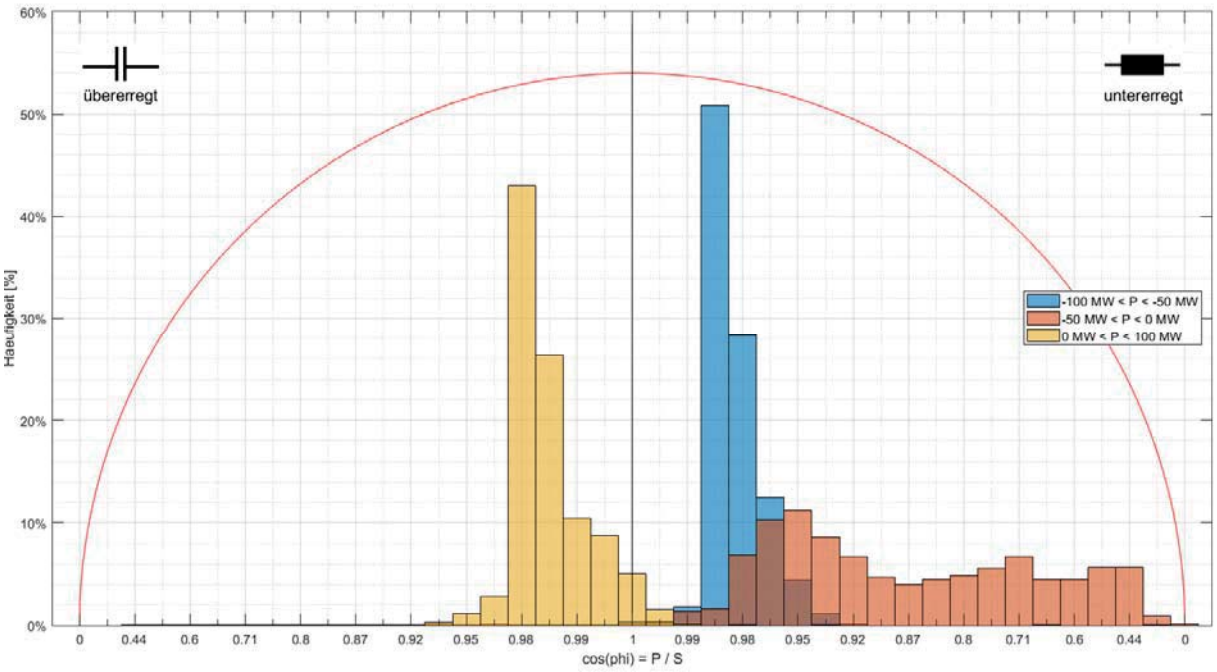

Abbildung 9: Blindleistungsverhalten eines Pumpspeicherkraftwerks

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Die positiven Wirkleistungswerte (gelbes Teilhistogramm) zeigen somit den Pumpbetrieb. Der Turbinenbetrieb wird in zwei Teilhistogramme dargestellt. Die geringeren Erzeugungsleistungen bis 50 MW in rot und die höheren Erzeugungsleistungen zwischen 50 MW und 100 MW in blau.

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die lokale Blindleistungsregelung aktiv ist. Im Pumpbetrieb („Verbraucher“) wird die Spannung durch lokale Blindleistungserzeugung gestützt. Daher befinden sich die cos(φ)-Werte des gelben Histogramms in der linken Hälfte („übererregt“). Hingegen wird im Turbinenbetrieb gleichzeitig Blindleistung verbraucht. Dieser untererregte Betrieb verringert lokal die Spannung bei Wirkleistungseinspeisung. Bei großen Wirkleistungswerten stellt sich ein cos(φ) von ca. 0,985 ein. Das breite Band an cos(φ)-Werte bei geringen Wirkleistungswerten kann mit einer Q(U)-Kennlinie erklärt werden.

Das Beispiel eines Pumpbetriebs in den Nachtstunden zeigt die konkurrierenden Zielsetzungen. Aufgrund der lokalen Spannungsregelung wird Blindleistung erzeugt. Aus globaler Sichtweise der Blindleistungsbilanz des Salzburger Verteilnetzes wäre hingegen typsicherweiser ein Blindleistungsbezug wünschenswert. Hierzu sind detailliertere Netzbetrachtungen notwendig, um zu beurteilen, ob mit dem verfügbaren Spannungsband beim Pumpbetrieb in den Nachtstunden ein gleichzeitiger Blindleistungsverbrauch zulässig wäre.

2.5 Blindleistungsverhalten eines privaten Beispielhaushalts

In diesem Kapitel wird beispielhaft das Blindleistungsverhalten eines privaten Haushaltes dargestellt. Bei diesem Haushalt wurde über rund 5 Monate die Wirk- und Blindleistung im 1-Sekunden-Zeitraster gemessen. Der Jahresstromverbrauch liegt bei ca 3000 kWh. Die Beleuchtung erfolgt in diesem Haushalt ausschließlich über LEDs sowie Leuchtstoffröhren. Weiters sind mehrere Netzteile in Betrieb, welche typischerweise als Blindleistungserzeuger wirken. Demgegenüber steht als größerer Verbraucher ein Induktionsherd. Der Haushalt verfügt über keine Photovoltaikanlage und es tritt somit ausschließlich ein Wirkleistungsbezug auf.

Abbildung 10 zeigt die Verteilung der aufgetretenen cos(φ)-Werte über den gesamten Betrachtungszeitraum. Diese Häufigkeiten werden aus den Momentanwerten von Wirk- und Scheinleistung (1 Sekundenwerte) berechnet. Hierbei ist zu erkennen, dass eine Häufung von cos(φ)-Werten im Bereich 0,5 (übererregt) bis ca. 0,8 (übererregt) auftritt. Gleichzeitig ist der cos(φ)-Wert von 0,94 (untererregt) verhältnismäßig oft zu beobachten. Der Wert cos(φ) = 1 kommt hingegen vergleichsweise selten vor.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

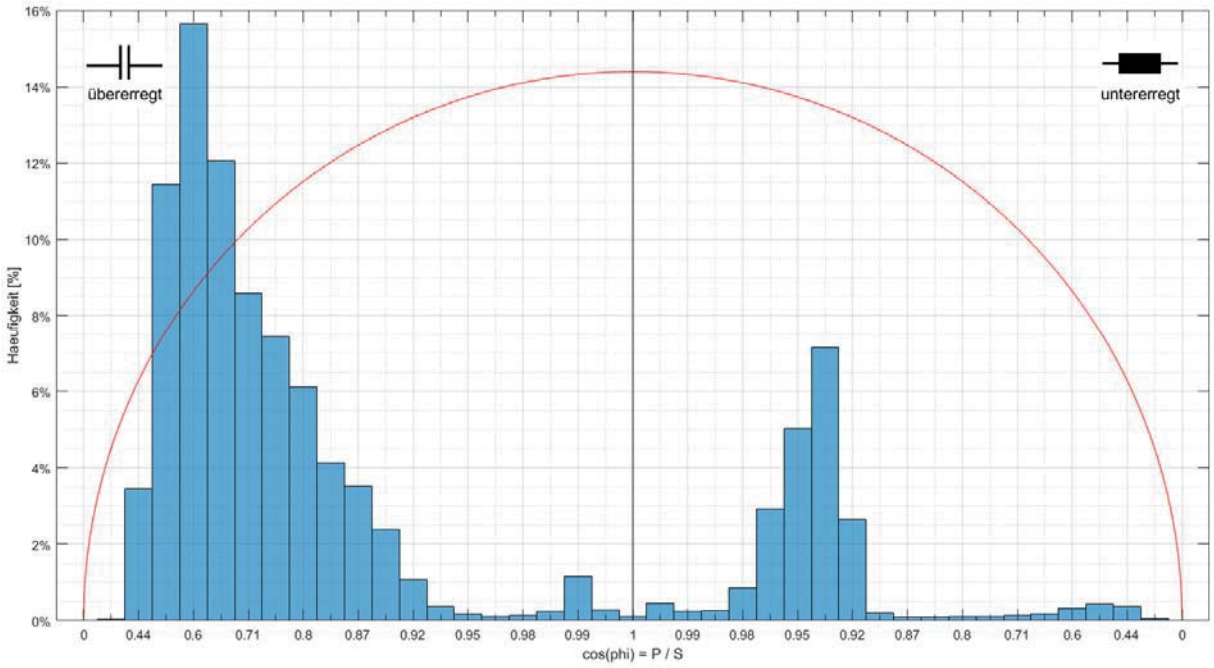

Abbildung 10: Häufigkeiten der Blindleistungswerte eines privaten Haushalts

Abbildung 11 zeigt das Histogramm der aufgetretenen cos(φ)-Werte des gleichen Beispielhaushalts. Im Unterschied zu Abbildung 10 sind hier die drei Wirkleistungsbereiche „kleiner 200 Watt“, „zwischen 200 und 2000 Watt“ sowie „mehr als 2000 Watt“ getrennt dargestellt. Jedes der drei Teil-Histogramme weist eine Summen-Häufigkeit von 100% auf. In die kleinste Wirkleistungskategorie fallen 49,9% der aufgenommenen Messwerte. Die Gruppe zwischen 200 und 2000 Watt stellt 47,8% der Werte dar. Die restlichen 2,3% der aufgenommen Werte liegen über 2000 Watt.

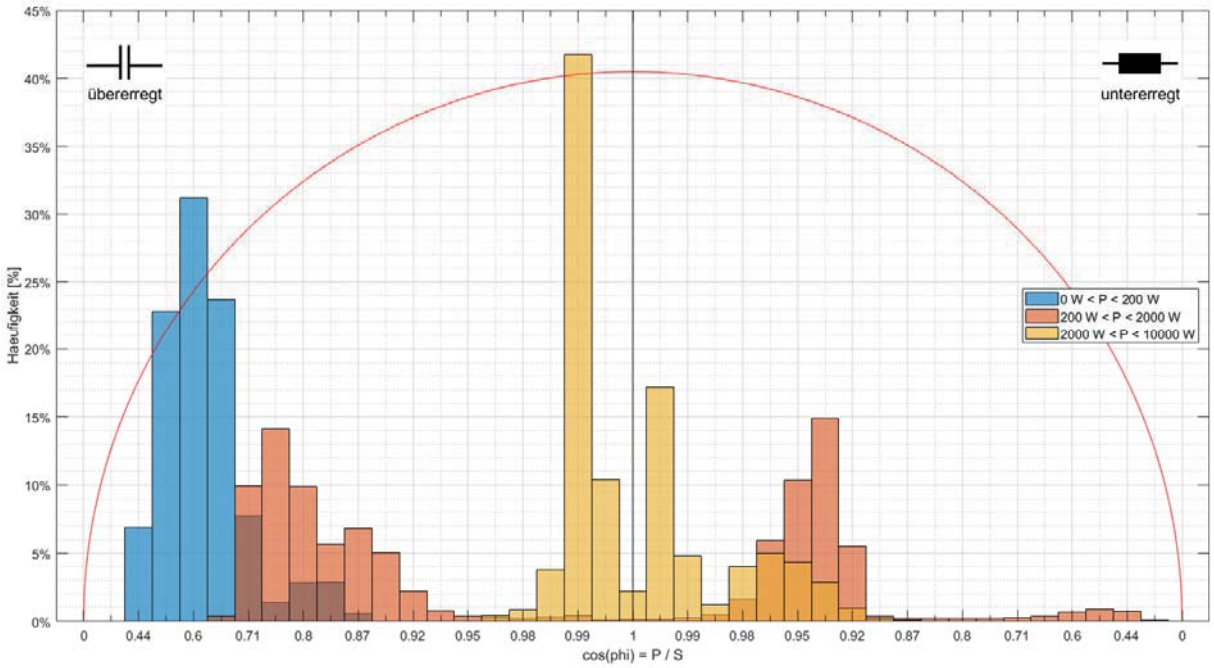

Abbildung 11: Häufigkeiten der Blindleistungswerte eines privaten Haushalts gruppiert nach Wirkleistungsbereichen

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Hierbei ist ersichtlich, dass bei geringen Wirkleistungsverbrauchswerten (blaues Teilhistogramm) cos(φ)-Werte von typischerweise 0,4 bis 0,7 kapazitiv auftreten. Hier ist die Blindleistungserzeugung von Netzteilen im Leerlauf zu beobachten. Der mittlere Wirkleistungsbereich (rot) weist einerseits kapazitives Verhalten (cos(φ) von 0,7 bis 0,9) auf. Andererseits tritt etwa gleich häufig induktives Verhalten mit einem cos(φ) von ca. 0,93 auf. Dies ist auf die jeweilige Lastsituation zurückzuführen. Der Betrieb des Induktionsherds kann hierbei den untererregten Bereich hervorrufen. Bei den selten auftretenden Verbrauchsspitzen mit mehr als 2000 Watt Bezug sind cos(φ)-Werte nahe 1 zu erkennen.

In Abbildung 12 sind die zugrundeliegenden PQ-Wertepaare dargestellt. Da der Haushalt keine Erzeugungsanlage aufweist, ist die X-Achse (Wirkleistung) ausschließlich in positiver Richtung dargestellt. Es sind hier mehr als 12 Mio. Datenpunkte abgebildet. Demensprechend sind im Diagramm aus Abbildung 12 viele Punkte im niedrigeren Wirkleistungsbereich überlagert. Jene Punkte mit mehr als 2000 W Wirkleistung entsprechen nur 2,3 % der Wertepaare (vgl. Abbildung 11).

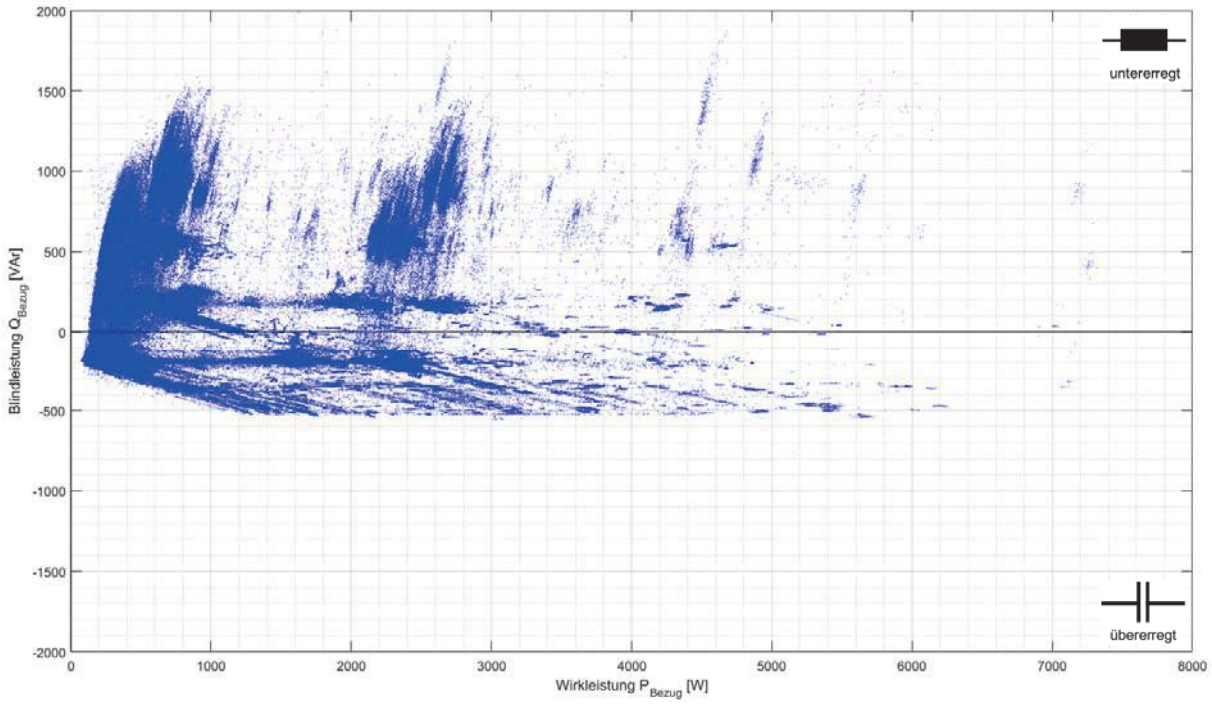

Abbildung 12: Wirk- und Blindleistungswerte eines privaten Haushalts

Anhand des Verteilungsmusters ist die Überlagerung unterschiedlicher Geräte mit jeweils spezifischem PQ-Verhalten zu erkennen. Eine Gerade im PQ-Diagramm beschreibt ein Geräteverhalten mit variabler Leistung aber konstantem cos(φ). Dies zeigt sich z.B. an den einhüllenden Geraden, welche sich aus dem Nullpunkt der Wirkleistung heraus bilden. Weiters ist eine gedankliche Begrenzungsgerade bei einer Blindleistungserzeugung von etwas mehr als 500 VAr zu erkennen.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

3 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Blindleistung

In diesem Kapitel werden die Potenziale einiger Möglichkeiten zur Blindleistungsbeeinflussung dargestellt. Die untersuchten Maßnahmen sind

- Änderung der Betriebsspannung im Hochspannungsnetz
- Blindleistungskompensation durch Ladestromdrosselspulen
- Blindleistungspotenzial von Erzeugungsanlagen

Weitere Maßnahmen wie z.B. die Beeinflussung des Spannungsniveaus im Mittelspannungsnetz sowie das temporäre Abschalten von redundanter Kabel sind in diesem Paper ohne Potenzialabschätzung angeführt. Dies gilt auch für die Blindstromkompensation von Kundenanlagen. Diese sind aufgrund der auftretenden Netzrückwirkungen so ausgelegt, dass bei geringer Auslastung typischerweise Blindleistung geliefert wird.

3.1 Änderung der Betriebsspannung im Hochspannungsnetz

Im Salzburger Verteilnetz sind die Umspanner von Hochspannung (110-kV-Ebene) auf Mittelspannung (30-kV-Ebene bzw. auch 60-kV-Ebene und 10-kV-Ebene) jeweils über den Stufensteller regelbar. Somit kann die Spannung der 30-kV-Ebene unabhängig vom Spannungsniveau der 110-kV-Seite geregelt werden. Die Änderung des Spannungsniveaus ΔU steht in einem nichtlinearen Zusammenhang mit der Änderung der Blindleistung ΔQ_C. Bezugswert stellt die Blindleistungserzeugung der Kapazitäten bei Nennspannung $Q_{C,N}$ dar.

$$\Delta Q_C = \left(\frac{U_N - \Delta U}{U_N}\right)^2 \cdot Q_{C,N} - Q_{C,N}$$

Im Folgenden wird beispielhaft von einer Variation der **Spannung** im Bereich **±5%** auf der 110-kV-Ebene ausgegangen. Diese Variation der Spannung bewirkt eine **Änderung** der Blindleistungserzeugung der **110-kV-Leitungen** im Bereich von ca. **±4,6 MVAr**.

Im Gegensatz zu den Umspannern von Hoch- auf Mittelspannung sind die Transformatoren von Mittel- auf Niederspannung nicht als regelbare Stufensteller-Transformatoren ausgeführt. Das Spannungsniveau der Mittelspannungsebene bestimmt somit direkt jenes der Niederspannung. Eine Variation des Spannungsniveaus der Mittelspannung bietet sich daher nur bedingt zur Beeinflussung des Blindleistungshaushalts an. Nur in Netzgebieten mit genauer Kenntnis der Spannungsbandreserve an den Netzausläufern im Niederspannungsnetz wäre hier eine generelle Beeinflussung des Mittelspannungsniveaus möglich. Eine Umsetzungsmöglichkeit stellt hierbei die Stromkompoundierung im Mittelspannungsnetz dar. Mit einer entsprechenden U(I)-Kennlinie kann die Spannung im Mittelspannungsnetz abgesenkt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Blindleistungserzeugung von Leitungen stellt das Abschalten von parallelen Leitungen in Schwachlastzeiten dar. Hierbei sind vor allem schwach ausgelastete 110-kV-Kabelstrecken mit redundanter Leitungsführung zu nennen.

3.2 Blindleistungskompensation durch Ladestromdrosselspulen

Speziell in Schwachlastzeiten übersteigt die Blindleistungsabgabe von Freilungen und Kabel häufig die Blindleistungsaufnahme der Transformatoren. Daher kommen in

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

Hochspannungsnetzen häufig Ladestromdrosselspulen zum Einsatz. Diese werden typischerweise an der Tertiärwicklung (Dreiecksausgleichswicklung) von Höchst- auf Hochspannungs-Umformer angeschlossen [1, S. 433]. Hersteller von Ladestromkompensationsdrosselspulen führen diese üblicherweise als trockenisolierte Luftdrosselspulen auf Mittelspannungsebene (Tertiärwicklung) aus. Bei Systemspannungen bis 115 kV können trockenisolierte Luftdrosselspulen auch direkt an das Netz angeschlossen werden [2]. Typische Größenordnungen für Ladestromdrosselspulen bewegen sich im Bereich von 5 MVAr bis ca. 100 MVAr [1, S. 434] (je nach Spannungsebene und Dimensionierung).

3.3 Blindleistungspotenzial von Erzeugungsanlagen

Im Salzburger Verteilnetz sind derzeit (Stand Ende 2017) rund 70 MW an Photovoltaikleistung installiert. Die angegebene Zahl beschreibt hierbei die Engpassleistung (Minimum aus Modulleistung und Wechselrichterscheinleistung) und repräsentiert in etwa die installierte Wechselrichterscheinleistung. Im Falle einer $\cos(\varphi)$ Variation im Bereich 0,95 bzw. 0,9 bezogen auf die Nennleistung ergibt sich hieraus das in Tabelle 2 dargestellte Potenzial.

Tabelle 2: Potenzielle Blindleistung von PV-Wechselrichter in Salzburg

$\cos(\varphi)$ Bereich	Blindleistung Wechselrichter
cos(φ) 0,95	± 21,9 MVAr
cos(φ) 0,90	± 30,5 MVAr

Dieses theoretische Potenzial kann praktisch so nicht ausgeschöpft werden, da einerseits die Wechselrichter die Blindleistung entsprechend der lokalen Spannung einstellen müssen (siehe „Q(U)-Kennlinie“). Andererseits ist derzeit die Blindleistungsaufnahme und –abgabe nur während des Betriebs der PV-Anlage möglich. Prinzipiell ist aber zukünftig die Funktion des Blindleistungsmanagements auch ohne PV-Erzeugung realisierbar („Q at night“).

In gleicher Weise soll hier auch das Potenzial der Wasserkraftwerke abgeschätzt werden. Hierbei werden jene Kraftwerkseinheiten berücksichtigt welche direkt in das Verteilnetz der Salzburg Netz GmbH einspeisen und potenziell bzgl. Blindleistungsverhalten beeinflusst werden können. Die Generatorsummenleistung liegt bei rund 570 MVA. Werden wiederum unterschiedliche Betriebsbereiche von $\cos(\varphi)$ 0,99 bis 0,9 angenommen, so ergibt sich potenziell folgende Blindleistungsbandbreite (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Potenzielle Blindleistung von Wasserkraftwerken im Gebiet der Salzburg Netz GmbH

$\cos(\varphi)$ Bereich	Blindleistung Wasserkraftwerke
cos(φ) 0,99	± 80 MVAr
cos(φ) 0,95	± 178 MVAr
cos(φ) 0,90	± 248 MVAr

Auch hier handelt es sich um ein theoretisches Potenzial, welches praktisch nicht in vollem Umfang zur Verfügung steht. Einerseits da viele Generatoren bzw. Regelungen nicht für diese Betriebspunkte ausgelegt sind. Andererseits weil auch hier die Bedingung ist, dass der Generator am Netz sein muss, um die Blindleistung bereitzustellen bzw. zu beziehen.

ISBN 978-3-85125-586-7 DOI 10.3217/978-3-85125-586-7

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die maximale Blindleistungslieferung in das Übertragungsnetz ist in etwa in der Größenordnung der Blindleistungserzeugung des Verteilnetzes durch Querkapazitäten. Aufgrund der Systemlängen haben die Mittelspannungskabel des 30-kV-Netzes den größten Beitrag an der Blindleistungserzeugung im Salzburger Verteilnetz. Trotz der verhältnismäßig kurzen Kabelstrecken im 110-kV-Netz weisen diese den zweitgrößten Beitrag auf. Die Niederspannungsleitungen können aufgrund des geringen Spannungsniveaus im Hinblick auf die Blindleistungserzeugung vernachlässigt werden.

Die Herausforderungen der Blindleistungsbilanzierung liegt vor allem in Schwachlastzeiten. Der Blindleistungserzeugung der (Kabel-)Querkapazitäten steht hier kein Blindleistungsverbrauch durch die Längsinduktivitäten von Transformatoren und Leitungen gegenüber. Das Verbrauchsverhalten von privaten Haushalten wird die Herausforderung tendenziell verstärken, da auch hier eine Blindleistungserzeugung in Schwachlastzeiten zu beobachten ist.

Ein großes Potenzial zur Blindleistungsbeeinflussung weisen die Einstellungen der Erzeugungsanlagen auf. Der Einsatz von klassischen Ladestromdrosselspulen bietet sich ebenfalls zur Kompensation der Leitungskapazitäten an.

Im Projekt „DeCAS“ werden nun die resultierenden Blindleistungsflüsse über die unterschiedlichen Systemgrenzen analysiert. Einerseits soll die Fragestellung beantwortet werden, wie sich lokale Q(U)-Einstellungen auf die Gesamtbilanz auswirken. Hier im Speziellen die evtl. konkurrierenden Zielsetzungen der lokalen Spannungshaltung und der globalen Blindleistungsbilanz. Andererseits soll der Frage nachgegangen werden, welche Auswirkungen eine dezentrale Blindleistungskompensation auf unterlagerten Spannungsebenen im Vergleich zu wenigen zentralen Kompensationseinrichtungen mit sich bringt.

ACKNOWLEDGMENTS

This project has received funding in the framework of the joint programming initiative ERA-Net Smart Grids Plus, with support from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme.

Literatur

[1] Oeding, Dietrich / Oswald Bernd: Elektrische Kraftwerke und Netze, 7. Auflage, Springer Heidelberg, 2011

[2] Coil Innovation: Ladestromkompensationsdrosselspulen, http://www.coilinnovation.com/produkte/ladestromkompensations-drosselspulen/, abgerufen am 31.1.2018