

Technische und tarifliche Aspekte der Spannungshaltung

Auswertung bei vierzehn europäischen Übertragungsnetzbetreibern

Im Stromnetz müssen Spannung und Frequenz in Bereichen gehalten werden, die eine effiziente und sichere Energieversorgung gewährleisten. Seit der Entflechtung der Verteilungs- und Übertragungsnetze unterscheiden sich die Spannungshaltungskonzepte zusätzlich zu den nationalen Differenzen auch zwischen den Spannungsebenen. Im Rahmen einer Vergleichsstudie wurden die Konzepte und netznutzungsseitigen Modalitäten von vierzehn Übertragungsnetzbetreibern untersucht. Trotz zunehmender europäischer Standardisierung und neuer Netzkodizes lassen sich große Unterschiede zwischen den Ländern beobachten.

Im Stromnetz müssen die Netzfrequenz und die Spannung in Bereichen gehalten werden, die eine effiziente und sichere Energieübertragung gewährleisten. Bei vereinfachter Betrachtung ist die Netzfrequenz eine globale Eigenschaft und wird mit Wirkleistungsregelreserven nahe ihrem Sollwert gehalten. Dem entgegen erfordert die Spannungshaltung eine lokale Betrachtung und muss mit Blindleistung im jeweils sinnvollen Betriebsbereich der einzelnen Netzelemente gehalten werden.

Zur Auslotung potenzieller Verbesserungsmaßnahmen wurden die Spannungshaltungskonzepte ausgewählter europäischer Länder untersucht und miteinander verglichen. Es wurden vergütungsrelevante sowie technische Kriterien untersucht. Die Analyse schließt folgende Länder ein: Frankreich, Griechenland, Irland, Norwegen, Österreich, Italien, England und Wales, Dänemark, Spanien, Schweden und Deutschland. Alle Länder außer Deutschland – hier sind es deren vier – haben jeweils einen systemverantwortlichen Übertragungsnetzbetreiber. Für die Recherchen wurden Literatur ausgewertet [1] sowie Vertreter der Übertragungsnetzbetreiber befragt.

Erzeugungseinheiten und Blindleistungskompensationsanlagen für die Spannungshaltung

Direkt an das Übertragungsnetz angeschlossene konventionelle Kraftwerke sind in allen ausgewählten Ländern verpflichtet, an der Spannungshaltung teilzunehmen. Erforderlich ist dafür,

dass die Kraftwerke einen Spannungsregler nach Angaben des jeweiligen Übertragungsnetzbetreibers haben, der

kontinuierlich in Betrieb ist. Die untere Grenze des Blindleistungsfaktors der Erzeugungseinheiten wird bei Nenn-

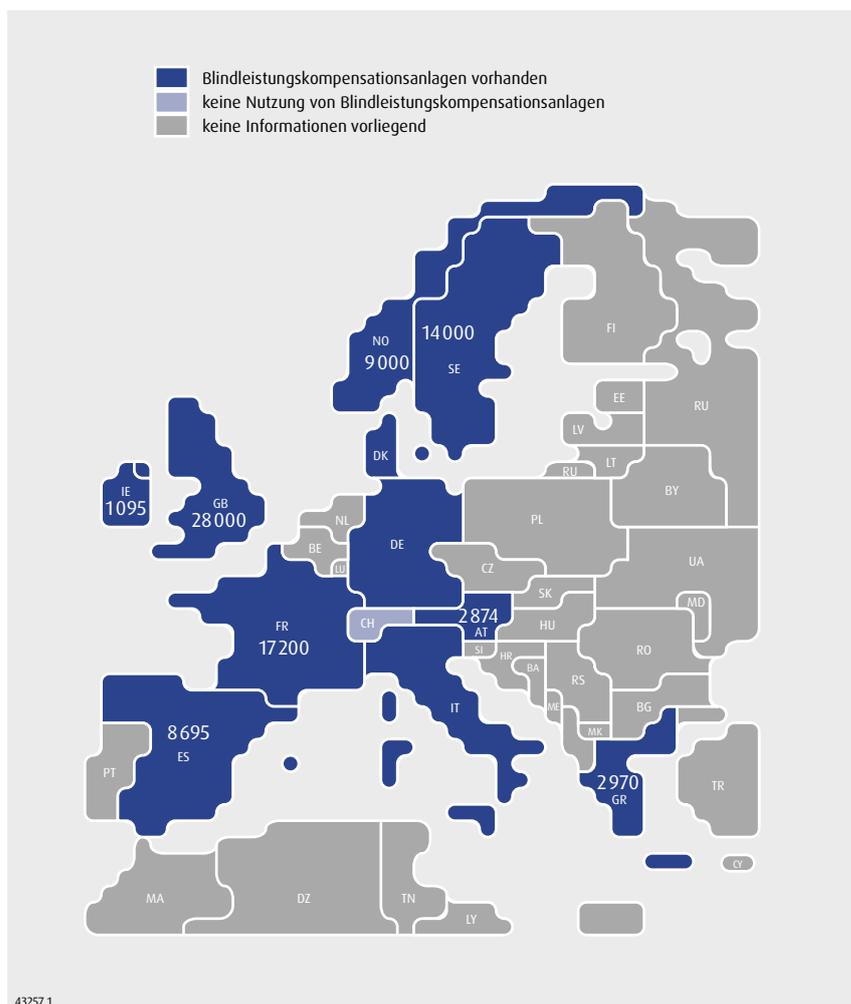


Bild 1. Länder, in denen Blindleistungskompensationsanlagen zur Spannungshaltung genutzt werden und installierte Gesamtleistung je Land in Mvar

wirkleistung und Nennspannung in den jeweiligen Regularien der untersuchten Übertragungsnetzbetreiber definiert. Außerdem wird der Blindleistungsfaktor in Bezug auf den Spannungsbereich ausgedrückt und dadurch der Betriebsbereich definiert, den ein Kraftwerk ohne Beschränkung der Wirkleistungsabgabe durchfahren muss. Beispielsweise muss in Deutschland – unabhängig von der Nennleistung – der vereinbarte Auslegungsbereich für den Leistungsfaktor bei Nennwirkleistungsabgabe innerhalb weniger Minuten durchfahren werden können. Bezüglich Periodizität bestehen keine Einschränkungen, das heißt, der beschriebene Vorgang muss beliebig oft möglich sein.

In Deutschland muss bei der 50 Hertz Transmission GmbH jede anzuschließende Erzeugungseinheit im Nennbetriebspunkt vorgegebene Blindleistungsanforderungen am Netzanschlusspunkt erfüllen. Bei der Amprion GmbH muss die Erzeugungseinheit im Nennbetriebspunkt die Grundan-

forderungen bezüglich der technischen Fähigkeit zur sofortigen Blindleistungsabgabe beziehungsweise -aufnahme am Netzanschlusspunkt ohne vorherige Anpassung der Wirkleistungsabgabe erfüllen. Der durch die Leistungsfaktorgaben angeforderte Bereich muss bei Nennwirkleistung innerhalb von maximal 10 min durchfahren werden können.

In England müssen Synchrongeneratoren bei Nennwirkleistungsabgabe mit einer Blindleistung betrieben werden können, die am Netzanschlusspunkt einem Leistungsfaktor von 0,85 übererregt und bis 0,95 untererregt entspricht. Alle Synchrongeneratoren müssen in einem Spannungsbereich $\pm 5\%$ der Nennspannung an den Anschlusspunkten ins Übertragungsnetz voll betriebsfähig sein. Zusätzlich bestehen in England Vorgaben für Asynchrongeneratoren. Diese müssen bei Nennwirkleistungsabgabe mit einem Leistungsfaktor von 0,95 übererregt und bis 0,95 untererregt betrieben werden können.

In Italien sind Kraftwerke mit einer Nennscheinleistung größer als 10 MVA verpflichtet, an der primären Spannungsregelung teilzunehmen. Kraftwerke mit einer Nennscheinleistung größer als 100 MVA müssen an der sekundären Spannungsregelung teilnehmen.

In Griechenland ist die Teilnahme aller am Übertragungsnetz angeschlossenen Kraftwerke mit maximaler Wirkleistung größer als 2 MW obligatorisch. In Spanien sind alle Erzeugungseinheiten mit nominaler Wirkleistung größer als 30 MW, die direkt am Übertragungsnetz angeschlossen sind, verpflichtet, an der Spannungshaltung teilzunehmen.

Außer den Kraftwerken müssen in Irland, Dänemark und Norwegen auch Erneuerbare-Energien-Anlagen einen Beitrag zur Spannungshaltung leisten. In Spanien sind Erneuerbare-Energien-Anlagen verpflichtet, ihren Blindleistungsaustausch in einem Leistungsfaktorband halten zu können. Außer in der Schweiz leisten in allen betrachteten Ländern auch Blindleistungskompensationsanlagen

Tarifrelevante Aspekte und Vergütungen			
Land	Kriterien für Vergütung der Spannungshaltung	Vergütung für Spannungshaltung durch aktiv geregelte Betriebsmittel, beispielsweise Kraftwerke	Leistungsfaktor kostenfreier Austausch an (ungeregelten) Netzknoten, beispielsweise Verteilungsnetze
Schweiz	in über 80 % der Fälle konformes Verhalten, kalkuliert auf 15-min-Basis	0,27 Ct/kvarh; fixe Preise für alle aktiven Teilnehmer (Kraftwerke und Verteilungsnetze mit Betriebsmitteln). Für Kraftwerke im Phasenschieberbetrieb bestehen bilaterale Abkommen.	Tieflastband und $\cos \varphi \geq 0,9$
Frankreich	Blindleistungsband und Zahl der Stunden, in denen an der Spannungshaltung teilgenommen wurde	0,006 Ct/kvarh; variabler Preisanteil identisch für alle aktiven Teilnehmer. Es gibt zusätzlich einen fixen Preisanteil in Ct/kvarh (teilweise in einem sensiblen Bereich). Die Vergütung ist abhängig davon, ob Kraftwerke an der primären oder sekundären Regelung teilnehmen.	$\cos \varphi \geq 0,9$
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> ■ 50 Hertz Transmission: Der Blindleistungsaustausch (kapazitiv/induktiv) am Netzanschlusspunkt des jeweiligen Kraftwerks wird vergütet. ■ Amprion: Vergütet wird jede eingespeiste induktive Blindenergie durch die direkt am Übertragungsnetz angeschl. Kraftwerke. ■ Transnet BW: Vergütet wird die eingespeiste induktive Netto-Blindenergie auf Übertragungsnetzseite. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 50 Hertz Transmission: Vergütet wird entsprechend bilateral abgeschlossener Blindleistungsverträge. ■ Amprion: Vergütet wird die angeforderte und eingespeiste induktive Blindenergie; fixe Preise für alle Kraftwerke. ■ Transnet BW: Kraftwerke erhalten eine individuell und bilateral vereinbarte Vergütung. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 50 Hertz Transmission: keine Vorgabe eines Leistungsfaktors; abgestimmte Spannungsbänder an den Netzanschlusspunkten. ■ Amprion: Leistungsfaktor $\cos \varphi \geq 0,9$ beziehungsweise individuell vereinbarter Wert für Letztverbraucher und Verteilungsnetzbetreiber ■ Tennet TSO: Leistungsfaktor mit 0,95 (ind.) $\leq \cos \varphi \leq 1$ ■ Transnet BW: derzeit keine fixe Vorgabe.
Österreich	Pauschalvergütung	Pauschalvergütung	$\cos \varphi \geq 0,9$ (Endkunden)
Schweden	keine Vergütung	keine	$\cos \varphi = 1$ (Verteilungsnetze)
England	Blindleistungsaustausch am Einspeisepunkt	0,32 Ct/kvarh; fixe Preise, für alle am Übertragungsnetz angeschlossenen Kraftwerke identisch	$\cos \varphi \geq 0,95$
Griechenland	keine Vergütung	keine	$\cos \varphi \geq 0,95$ (Endkunden)
Italien	keine Informationen vorliegend	keine	$\cos \varphi \geq 0,9$
Irland	Überwachung des Erreichens der Blindleistungsvorgabe für Kraftwerke oder der Spannungsvorgabe für Windparks, HGÜ und SVC	0,014 Ct/kvarh: induktive Blindleistungsfähigkeit 0,014 Ct/kvarh: kapazitive Blindleistungsfähigkeit (für Kraftwerke, HGÜ und Windparks)	$0,95 \text{ (induktiv)} \leq \cos \varphi \leq 1$
Dänemark	keine strengen Regeln; fixe Vergütung, unabhängig von aktueller Blindenergie	keine Vergütung für Kraftwerke innerhalb der obligatorischen Bereitstellung; Vergütung für Kraftwerke/Phasenschieber mit Blindleistungsfähigkeit außerhalb der obligatorischen Bereitstellung: monatlich fixe Preise, gemäß bilateraler Verträge nach Ausschreibung	ein freies Mvar-Band ist vorhanden; keine konkrete Information vorliegend
Norwegen	Bei einer installierten Kraftwerksleistung > 10 MVA kann die Spannungshaltung unterstützt werden. Wenn die Kraftwerke mit mehr als 40 % (kapazitiv) bzw. 20 % (induktiv) der aktuellen Wirkleistung unterstützen, gibt es eine zusätzliche Vergütung.	0,00025 Ct/kvarh: fixer Preisanteil für alle Kraftwerke; zusätzliche Vergütung, wenn das Kraftwerk maßgeblich zur Spannungshaltung beiträgt (siehe Definition in Spalte 2): kapazitiv: $0,012 \times \text{durchschnittlicher Elspot-Preis} \times \text{MVAh}$ außerhalb des definierten Bands, induktiv: $0,007 \times \text{durchschnittlicher Elspot-Preis} \times \text{MVAh}$ außerhalb des definierten Bands	$\pm 20 \text{ Mvar}$
Spanien	keine Vergütung	keine	in Spitzenlastzeiten $\cos \varphi \geq 0,95$ (induktiv) oder $\cos \varphi$ kapazitiv; in Niedriglastzeiten $0,95 \text{ (induktiv)} \leq \cos \varphi \leq 1$

Tafel 1. Zusammenfassende Darstellung tarifrelevanter Aspekte und Vergütungen

Pönale für Austausch außerhalb des kostenfreien Bereichs	Abrechnungsperiode
Kraftwerke (unkonforme Blindenergie) und Verteilungsnetze (außerhalb Leistungsfaktor): 1,21 Ct/kvarh; Tarif identisch für alle Teilnehmer	monatlich
1,34 bis 1,61 Ct/kvarh (je nach Spannungsebene der Kunden), wenn $Q/P > 0,4$ für jeden Einspeisungspunkt, 1. November bis 31. März (Montag bis Samstag von 6:00 bis 22:00 Uhr)	monatlich
<ul style="list-style-type: none"> 50 Hertz Transmission: keine Transnet BW: Keine Gebühren für Verteilungsnetzbetreiber, Endkunden oder Kraftwerke Amprion: fixe Preise in €/Mvarh und Jahr (identisch für alle Kraftwerke, wird jährlich angepasst). 	monatlich
keine	vierteljährlich
keine	keine
keine	monatlich
keine	keine
0,86 bis 1,1 Ct/kvarh für Endkunden, abhängig von Q/P -Verhältnis, Einspeisepunkt und Zeit	keine
keine	monatlich
Sollte es zu kleineren Abweichungen kommen, wird die Vergütung dennoch weiterhin gezahlt. Sollte es sich um eine größere Störung handeln, tritt Energinet.dk mit dem Kraftwerksbetreiber in Kontakt/Verhandlung; evtl. kann es zu einer Reduzierung der Vergütung bzw. zum Ende des Vertrages kommen.	monatlich
Verteilungsnetze: 3,3 €/kVar, wenn Blindleistungsaustausch >20 Mvar	jährlich
es gibt Strafzahlungen; keine weiteren Informationen darüber vorhanden	keine

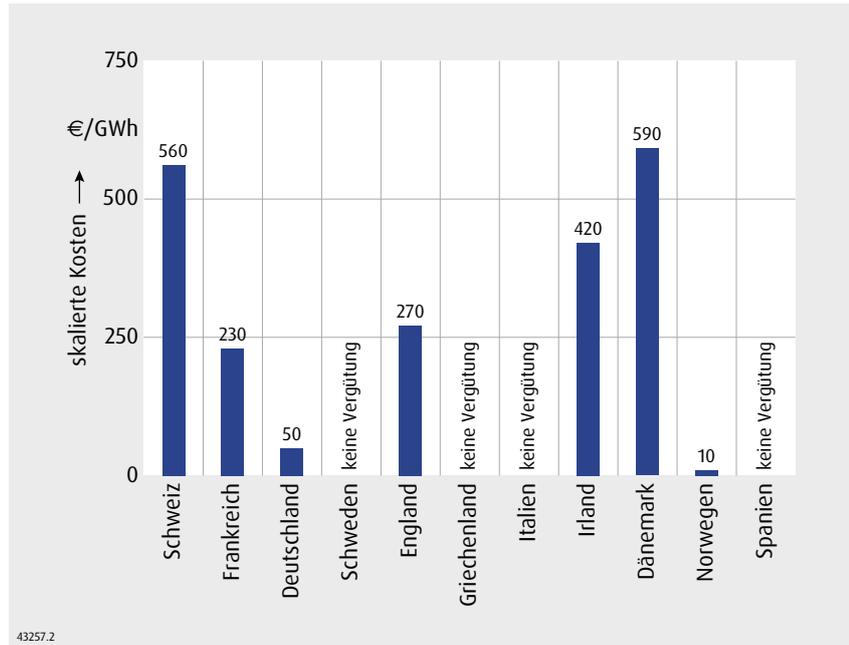


Bild 2. Skalierte Kosten in €/GWh zur Spannungshaltung je Energieverbrauch

im Übertragungsnetz einen relevanten Beitrag zur Spannungshaltung. In England, Frankreich, Norwegen, Schweden, Irland, Dänemark und Spanien werden auch HGÜ-Leitungen zur Blindleistungskompensation genutzt. In Bild 1 sind Länder mit installierten Blindleistungskompensationsanlagen – im Eigentum des Übertragungsnetzbetreibers oder im Eigentum Anderer – mit installierter Gesamtleistung der Anlagen dargestellt.

Tarifliche Aspekte und Vergütungen

Nach der Schilderung zur obligatorischen Teilnahme der Erzeugungseinheiten in den untersuchten Ländern werden die finanziellen Vereinbarungen verglichen. Jedes Land setzt eigene Kriterien, nach denen eine Vergütung für spannungstützende Blindenergie oder eine Verrechnung für nicht konformen Austausch stattfindet [2, 3]. Lediglich Schweden und Griechenland verzichten auf beides.

Kriterien zur Vergütung und Verrechnung

An den Anschlüssen der an das Übertragungsnetz angeschlossenen Verteilungsnetzbetreiber und Endkunden sind Grenzwerte zur Verrechnung des Blindenergieaustauschs definiert. In der Regel wird die ausgetauschte Blindenergie unterhalb eines Leistungsfaktors zwischen 0,9 und 0,95 tariflich verrechnet. Über diesem Leistungsfaktor geschieht der Austausch kostenfrei.

Kraftwerksbetreiber in Frankreich werden mit einem variablen Preisanteil vergütet. Falls sich ein Kraftwerk in

einem sensiblen Netzbereich befindet, bekommt es zusätzlich einen fixen Anteil. Ab 2017 bekommen alle Kraftwerke standortunabhängig einen fixen Vergütungsanteil.

Die Schweiz hat mit einem Leistungsfaktor von 0,9 und dem zusätzlichen freien Tieflastband den größten verrechnungsfreien Raum. Gleichzeitig ist der Vergütungssatz im Vergleich zu den meisten anderen europäischen Ländern sehr großzügig ausgelegt. Dagegen wird bei Fehlverhalten in der Schweiz konsequent verrechnet, wohingegen in anderen Ländern darauf verzichtet wird, oder die Verrechnung wie in Frankreich zeitlich beschränkt ist. Tafel 1 fasst die unterschiedlichen Vergütungskonzepte der betrachteten Länder zusammen.

Werden die jährlichen Kosten für die Spannungshaltung mit dem jährlichen Energieverbrauch des ausgewählten Landes skaliert, so ist zu erkennen, dass diese Kosten in der Schweiz und in Dänemark im Vergleich mit den anderen Ländern sehr hoch sind. Ursächlich hierfür ist der große kostenfreie Bereich (Blindleistungstrichter) und der vergleichsweise hohe Ansatz der Vergütung (Bild 2).

Berechnungsgrundlage für die vergütete Blindenergie

Nicht nur das Vergütungskonzept, auch die jeweilige Berechnungsgrundlage unterscheidet sich in den betrachteten Ländern. In Tafel 2 sind die Basisanforderungen für eine Vergütung aufgelistet. Relevant für die Bewertung ist das lokale Fahrplanintervall (15, 30 oder 60 min).

Vergütung spannungsstützender Blindenergie	
Land	Bewertung
Schweiz	Die in der jeweiligen Viertelstunde ausgetauschte Netto-Blindenergie mit dem Übertragungsnetz ist zur Spannungshaltung maßgebend.
Frankreich	Die in der jeweiligen halben Stunde ausgetauschte Blindenergie wird berücksichtigt.
Deutschland	Die in der jeweiligen Viertelstunde ausgetauschte Netto-Blindenergie mit dem Übertragungsnetz ist zur Spannungshaltung maßgebend.
Österreich	Pauschalvergütung (vom Regulator genehmigt) für Erzeuger mit Vertrag
Schweden	verpflichtende Teilnahme ohne Vergütung
England	Die in der jeweiligen halben Stunde ausgetauschte Blindenergie wird berücksichtigt.
Griechenland	verpflichtende Teilnahme ohne Vergütung
Italien	keine konkreten Kriterien zur Bewertung der Konformität; Überwachung der Abweichungen relativ zu den Vorgaben. Am Einspeisepunkt des Verteilungsnetzbetreibers werden die ausgetauschte Blindenergie oder eine Messung auf der Seite des Übertragungsnetzbetreibers berücksichtigt.
Dänemark	fixe Vergütung unabhängig von aktueller Blindenergie
Spanien	verpflichtende Teilnahme ohne Vergütung

Tafel 2. Berechnungsgrundlage für eine Vergütung spannungsstützender Blindenergie

Schlussbemerkungen

Trotz zunehmender europäischer Standardisierung und neuer Netzkodizes bestehen signifikante Unterschiede bei den Spannungshaltungskonzepten europäischer Übertragungsnetzbetreiber.

Ausblick

Mit steigender Zahl verteilter, erneuerbarer Produktionsanlagen wachsen die Herausforderungen für Übertragungsnetzbetreiber. Prognoseungenauigkeiten und plötzliche Wetterumschläge ändern in Märkten mit hoher Penetration durch erneuerbare Energien das Produktionsmuster grundlegend und können zu lokalen Spannungsabfällen beziehungsweise Spannungsüberhöhungen führen. Zusätzlich sehen sich Übertragungsnetzbetreiber aufgrund der Verkabelung der Freileitungen vor allem zu Tieflastzeiten verstärkt mit globalen Spannungsüberhöhungen konfrontiert. Diese Trends erfordern die Erhöhung der verfügbaren Blindleistungskompensation in den Stromnetzen.

Außer den etablierten Kompensationstechnologien werden künftig – wie in England und Irland bereits der Fall – auch in Kontinentaleuropa HGÜ-Leitungsregelungen zur Spannungshaltung eingesetzt. Deren Teilnahme kann als obligatorisch oder freiwillig geregelt werden, wobei Übertragungsnetzbetreiber neue Technologien durch entsprechende Konzepte unterstützen sollten.

Weitere Optimierungen können durch die Unterschiede der länderspezifischen Produktionsparks erzielt werden, da diese Unterschiede bei grenzüberschreitenden Kooperationen zu Synergien führen. Die Schweiz, Frankreich und Österreich stellen diesbezüglich Überlegungen an. Als eine weitere Option bieten sich für gezielten Phasenschieberbetrieb eingesetzte Synchronmaschinen an. In diesem Kontext gibt es bereits Projekte, beispielsweise in Dänemark sowie in Deutschland.

Fazit

Der Blindleistungsaustausch zwischen dem Übertragungsnetz und den Verteilungsnetzen wird in allen betrachteten Ländern anhand eines Leistungsfaktors geregelt. Die ausgetauschte Blindleistung wird anhand dieses Faktors in einen kostenfreien und einen verrechenbaren Teil eingeteilt. Die Schweiz hat mit einem Leistungsfaktor und dem zusätzlichen freien Tieflastband den größten verrechnungsfreien Raum, während hingegen der Vergütungssatz an Kraftwerke im Vergleich zu den anderen Ländern großzügig gehandhabt wird. Alle untersuchten Länder außer der Schweiz haben Blindleistungskompensationselemente im Übertragungsnetz und setzen diese bei kritischen Spannungen aktiv als erste Maßnahme ein. Einige Länder haben zusätzlich automatisierte Systeme zur Aktivierung der Blindleistungskompensation installiert. Die grenzüberschreitende Kooperation der Übertragungs-

netzbetreiber und somit gegenseitige Unterstützung könnte im Bereich der ausgetauschten Blindleistung verstärkt werden.

In einigen Ländern wird über eine Überarbeitung der Spannungshaltungskonzepte aufgrund der massiven Zunahme erneuerbarer Energien und voranschreitender Verkabelung der Netze nachgedacht. Bei unzureichender lokaler Kompensation werden sich Spannungsprobleme der Verteilungsnetze künftig vermehrt auch auf das Übertragungsnetz auswirken.

Literatur

- [1] Katsampani, M.; Kerlen, U.: Analyse der Spannungshaltungskonzepte im Ausland. 28. November 2016, Revision 3.0, E-Netz AG.
- [2] Scherer, M.: Spannungshaltung im Schweizer Übertragungsnetz – Finanzieller Anreiz für Kraftwerks- und Verteilungsnetzbetreiber. ew Jg. 115 (2016), H. 3, S. 62 – 65.
- [3] Zigkiri, A.; Scherer, M.; Gallmann, J.; Roduner, C.; Cuderman, L.: On Centrally Coordinated Voltage Support in a Self-Dispatch System. IEEE PES General Meeting, Juli 2017, USA.

- >> Dipl.-Physik-Ing. **Ulrich Kerlen**, Partner und stellvertretender Geschäftsführer, E-Netz AG, Brugg/Schweiz
- Marina Katsampani**, MSc ETH, Projektingenieurin, E-Netz AG, Brugg/Schweiz
- Luka Cuderman**, MSc ETH, Abteilung Systemdienstleistungen, Swissgrid AG, Laufenburg/Schweiz
- Dr. Marc Scherer**, Leiter Betriebsführung, Swisscom Energy Solutions AG, Olten/Schweiz

- >> ulrich.kerlen@e-netzag.ch
- marina.katsampani@e-netzag.ch
- luka.cuderman@swissgrid.ch
- marc.scherer@swisscom.com

- >> www.e-netzag.ch
- www.swissgrid.ch