

Anschlüsse eines Mittelspannungstransformators.  
Bilder: FHNW



# Spannungsumstellung im Mittelspannungsnetz

## Auswirkungen auf die Blindleistungssituation und die Wirtschaftlichkeit

Marco Giovanelli et al.

Im Rahmen eines Studierenden-Projektes an der FHNW wurden die Auswirkungen einer Spannungsumstellung von 16 kV auf 20 kV in einem Mittelspannungsnetz für die Primeo Netz AG untersucht. Für eine Spannungsumstellung lassen sich grundsätzlich zwei Hauptmotive unterscheiden: Einerseits führt eine höhere Betriebsspannung zu einer grösseren Übertragungskapazität, andererseits werden die bei der Übertragung anfallenden Wirkleistungsverluste reduziert. Diese beiden Effekte sind allgemein bekannt und las-

sen sich mit einfachen elektrotechnischen Analysen nachvollziehen. Ein zusätzlicher Effekt einer höheren Betriebsspannung ist jedoch ein veränderter Blindleistungshaushalt des Netzes.

Zur Veranschaulichung dieses Effekts kann das PI-Ersatzschaltbild eines Leitungsabschnitts herangezogen werden (Bild 1). Wird bei konstanter Belastung die Betriebsspannung erhöht, reduziert sich der Strom  $I_2$ , wodurch die Längsverluste (Wirk- und induktive Blindleistung in  $R$  bzw.  $X$ ) sinken.

IN  
KÜRZE



Gleichzeitig steigen die kapazitiven Ströme  $I_{q1}$  und  $I_{q2}$  und damit die Querverluste (kapazitive Blindleistung), da bei konstanter Kapazität  $C_b$  der Strom mit zunehmender Spannung ansteigt. Wie stark sich die Blindleistungsbilanz verändert, hängt wesentlich von der Leitungstechnologie (Kabel oder Freileitung), von der Netztopologie sowie von den gewählten Spannungsniveaus ab.

Im untersuchten System von Primeo konnte gezeigt werden, dass durch eine Spannungserhöhung die jährlichen Wirkleistungsverluste bei gleicher Netzlast um etwa 25 % reduziert werden können. Dies stellt einen signifikanten Mehrwert dar.

### Spannungsqualität sicherstellen

Verteilnetzbetreiber sind gemäss SN EN 50160:2022 verpflichtet, die Spannung im Bereich von  $\pm 10\%$  der Nennspannung zu halten, sofern keine Störung vorliegt und das betrachtete Verteilnetz direkt oder indirekt an das Übertragungsnetz angebunden ist. In der durchgeführten Analyse konnten im Mittelspannungsnetz bei erhöhter Betriebsspannung keine Verstösse gegen dieses Kriterium festgestellt werden. Dies hängt auch damit zusammen, dass sich mit einer höheren Nennspannung die absolute Toleranz ebenfalls vergrössert.

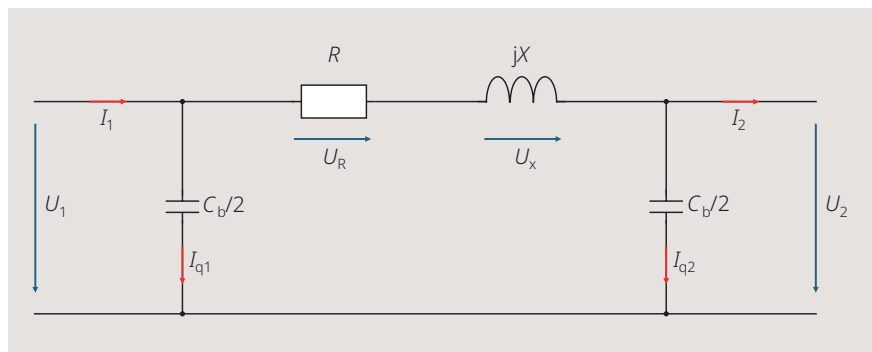
Für den Bezug oder die Lieferung von Blindleistung entstehen nicht grundsätzlich Kosten. Vielmehr bewirkt ein Bezug von Blindleistung (induktives Verhalten) eine Spannungsabsenkung am betroffenen Netzknoten und – in geringerem Ausmass – in der elektrisch nahen Umgebung. Eine Einspeisung von Blindleistung (kapazitives Verhalten) führt dagegen zu einer Spannungserhöhung am Netzknoten sowie in abgeschwächter Form auch an benachbarten Knoten.

Der veränderte Blindleistungsaustausch wirkt sich jedoch nicht ausschliesslich auf die betrachtete Netzebene aus. Da Blindleistungserzeugung und -verbrauch stets im Gleichgewicht stehen müssen, erfordert eine höhere Blindleistungsproduktion – beispielsweise infolge einer Spannungserhöhung in der Mittelspannungsebene – einen entsprechenden Verbrauch an anderer Stelle. Ein solcher Verbrauch kann etwa durch ein im Netzgebiet gelegenes Kraftwerk erfolgen, das die zusätzliche Blindleistungsproduktion kompensiert.

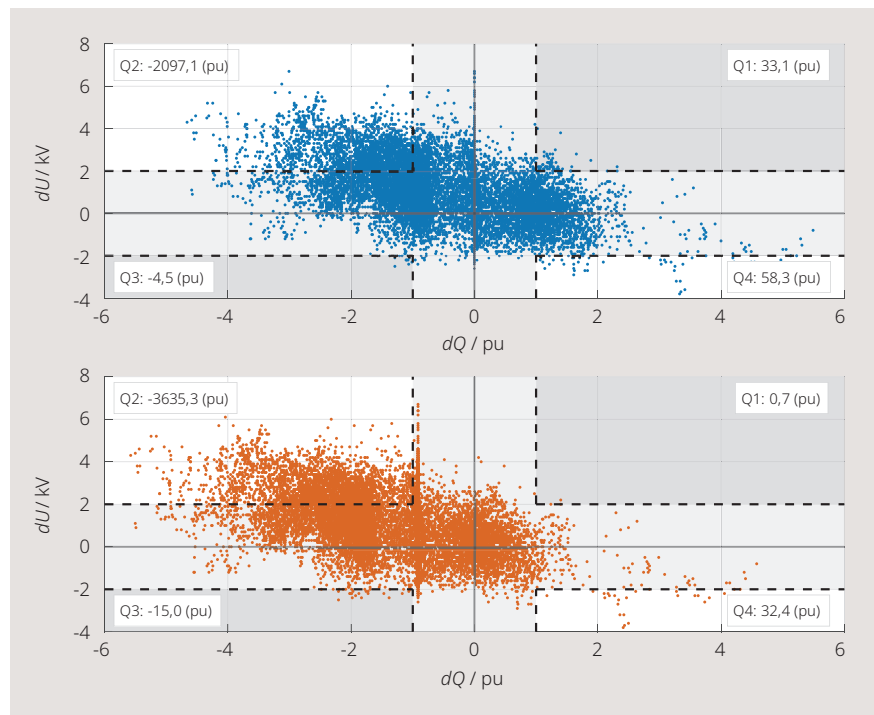
Kann diese Kompensation nicht im eigenen Versorgungsgebiet erfolgen, wird die überschüssige Blindleistung vertikal mit der höheren Spannungsebene ausgetauscht. Für Verteilnetzbetreiber mit Anschluss an das Übertragungsnetz bedeutet dies, dass der Blindleistungsaustausch mit Swissgrid abgerechnet wird.

### Regulatorische Vorgaben berücksichtigen

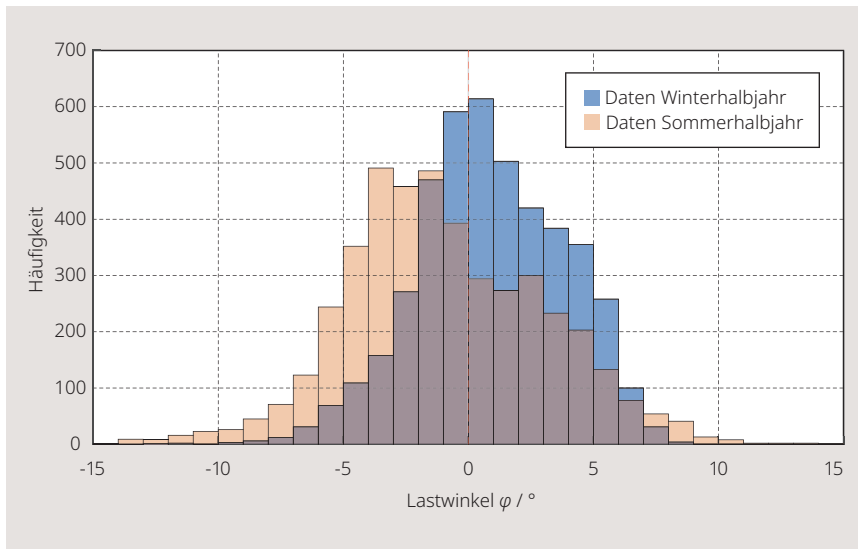
Vor diesem Hintergrund ist es zentral, die regulatorischen Vorgaben zur Spannungshaltung zu berücksichtigen. Seit dem 1. Januar 2020 gilt für alle Anschlussnehmer am Übertragungsnetz das neue Spannungshaltungskonzept von Swissgrid [1]. Dieses verpflichtet die Kunden, einschliesslich der Verteilnetzbetreiber, durch Regelung ihrer Blindleistungsabgabe bzw. -aufnahme aktiv zur Spannungshaltung beizutragen. Dabei wird zwischen Teilneh-



**Bild 1** Pi-Ersatzschaltbild einer Leitung.



**Bild 2** Einfluss einer Spannungserhöhung in der Mittelspannungsebene (NE5) auf den Blindleistungsaustausch mit Swissgrid. Dargestellt sind die Szenarien mit tiefer (oben) und hoher Betriebsspannung (unten). Q1 und Q3 kennzeichnen die konformen Bereiche, Q2 und Q4 die nicht konformen Bereiche.



**Bild 3** Histogramm der Lastwinkel  $\varphi$  im Sommer- und Winterhalbjahr. Positive Werte stehen für induktives, Negative für kapazitives Verhalten.

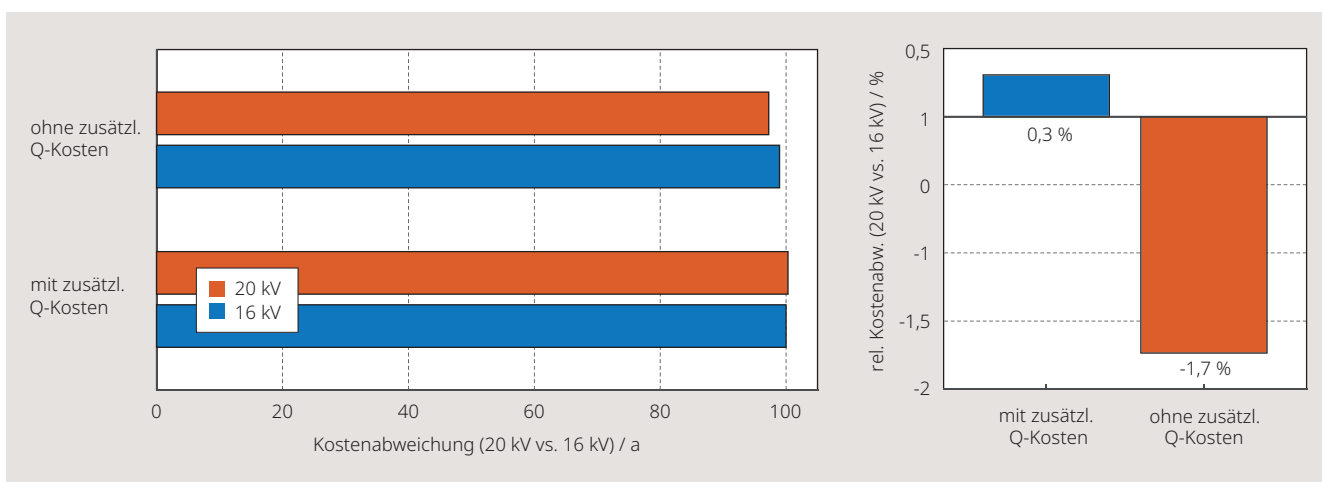
mern in aktiver Rolle und Teilnehmern in halbaktiver Rolle unterschieden. Für den in dieser Arbeit betrachteten Anschlusspunkt ist Primeo als halbaktiver Teilnehmer an das Übertragungsnetz angeschlossen.

Das Konzept differenziert zwischen einem konformen und einem nicht konformen Blindleistungsaustausch. Ein konformer Austausch wirkt spannungsstabilisierend: Bei zu tiefer Spannung wird Blindleistung bereitgestellt, bei zu hoher Spannung hingegen Blindleistung bezogen. Demgegenüber führt ein nicht konformer Austausch zu einer Vergrößerung der Abweichung von der vorgegebenen Sollspannung. Ein konformer Blindleistungsaustausch wird vergütet, während ein nicht konformer Austausch mit einer Pönale belastet wird.

Die Rolle des halbaktiven Teilnehmers unterscheidet sich von der des aktiven Teilnehmers ins-

besondere dadurch, dass für die Spannungsabweichung sowie den Blindleistungsaustausch Freibänder definiert sind, innerhalb derer keine Kosten oder Einnahmen anfallen. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass halbaktive Anschlussnehmer ihren Blindleistungsaustausch weniger stark beeinflussen können. In der durchgeführten Analyse wurde der Einfluss einer erhöhten Betriebsspannung in der Netzebene 5 auf den Blindleistungsaustausch am Übertragungsnetz mit Swissgrid untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine zusätzliche Blindleistungsproduktion, die im betroffenen Netzgebiet nicht kompensiert werden kann, erhebliche Auswirkungen auf den Blindleistungsaustausch hat. Der Blindleistungsaustausch wurde auf den am Anschlusspunkt zulässigen Austausch  $\Delta W_{Q,lim}$  normiert. Die zulässige Spannungsabweichung vom fahrplanbasierten Sollwert beträgt  $\pm 2$  kV. In Kombination mit  $\Delta W_{Q,lim}$  ergibt sich daraus das sogenannte Freiband. Im Szenario mit der aktuellen Betriebsspannung von 16 kV wird 2150 pu nicht konforme Blindenergie ausgetauscht und knapp 40 pu konforme. Wird die Betriebsspannung in der Mittelspannungsebene erhöht und die zusätzliche Blindleistungsproduktion nicht kompensiert, steigt der nicht konforme Austausch um 70 % auf 3670 pu. Der konforme Austausch ändert sich praktisch nicht (Bild 2).

Grundsätzlich ist das Netz im Winterhalbjahr tendenziell induktiv und im Sommerhalbjahr vermehrt kapazitiv. Dies hängt damit zusammen, dass der Stromverbrauch im Sommer kleiner ist und die Netzlast durch die höhere Solarstromproduktion



**Bild 4** Relative Kostenänderung bei Spannungsumstellung von 16 kV auf 20 kV – Vergleich der Szenarien mit bzw. ohne zusätzliche Kosten für den nicht konformen Blindleistungsaustausch.

zusätzlich reduziert wird, was einen stark unter-natürlichen (und damit kapazitiven) Betrieb der Leitungen zur Folge hat. Im Winter ist hingegen die Produktion von Solarstrom deutlich niedriger, wäh-rend der Verbrauch steigt. Der höhere Energiebezug aus dem Netz führt zu einem eher induktiven Ver-halten, wenn die Last am Einspeisepunkt in das Mit-telspannungsnetz betrachtet wird. Zur Beschrei-bung dieses Phänomens dient der Lastwinkel  $\varphi$ , der die Phasenverschiebung zwischen Strom und Span-nung angibt (Bild 3).

Eine Spannungserhöhung verschiebt die Blind-leistungsbilanz einer Leitung in die kapazitive Richtung. Besonders im Sommerhalbjahr kann dies problematisch sein, da das Netz ohnehin kapazi-tiver geprägt ist. Bei tiefer Last nehmen die indukti-ven Längsverluste infolge des reduzierten Stroms ab, während die kapazitiven Querströme, die pri-mär von der Spannung abhängen, nahezu unver-ändert bleiben. Dies führt dazu, dass die Blindlei-stungsverluste relativ gesehen stärker durch kapazi-tive Anteile geprägt sind. Im Winterhalbjahr fällt dieses Problem weniger stark ins Gewicht, da das Netz dort durch den höheren Verbrauch insgesamt induktiver ist.

### Lohnt sich eine Spannungsumstellung finanziell?

In der erstellten Arbeit wurden die Gesamtkosten einer Spannungsumstellung den Kosten eines Weiterbetriebs ohne Spannungserhöhung gegen-übergestellt. Berücksichtigt wurden neben den bereits erläuterten Kostenunterschieden aus Blindlei-stungsaustausch und Wirkleistungsverlusten auch die Einsparungen beim Netzausbau infolge höherer Transportkapazität sowie die Investitionskosten für umschaltbare Transformatoren. Die Investitionskosten für den Trafoersatz wurden über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2026 bis 2085 berück-sichtigt. Dieser setzte sich aus einer 30-jährigen Vor-bereitungs- und Umstellungsphase sowie einer an-schliessenden 30-jährigen Betriebszeit zusammen. In dieser Zeit sollten die höheren Investitionskosten amortisiert werden. Als Kostenbasis dienten Preise und Verbrauchsdaten des Jahres 2024.

Die Investitionen in den Ersatz der Transformato-ren bilden den grössten Kostenblock: In der Ver-gleichsvariante ohne Spannungsumstellung beträgt ihr Anteil 88,1 %, mit Spannungserhöhung 89,4 %, wobei umschaltbare Ortsnetztransformatoren typi-scherweise Mehrkosten von 3 %  $\pm$  2 Prozentpunkten

## Changement de tension dans le réseau MT

### Conséquences en termes de puissance réactive et de rentabilité

Dans le cadre d'un projet d'étudiant réalisé à la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW), les conséquences d'une augmentation de la tension de 16 kV à 20 kV dans un réseau moyenne tension ont été étudiées pour Primeo Netz AG. Il existe deux raisons principales pour un tel changement : l'utilisation d'une tension d'exploitation plus élevée mène, d'une part, à une augmen-tation de la capacité de transport et, d'autre part, à une réduction des pertes de puissance active. Cela entraîne toutefois également une modification du bilan de puissance réactive du réseau. En principe, le réseau a tendance à être inductif pendant le semestre hivernal et davantage capacitif pendant la saison estivale. Une augmentation de la tension décale le bilan de puissance réactive d'une ligne dans la direction capacitive. Cela peut poser pro-blème, en particulier pendant le semestre estival, quand le réseau est de toute façon plus capacitif.

L'augmentation de tension étudiée dans le cadre du projet permet de réduire les coûts annuels liés aux pertes de puissance active d'environ 25%. Les réductions de coûts qui en résultent, combi-

nées aux économies réalisées dans le développe-ment du réseau du fait de l'augmentation des capa-cités de transport, peuvent amortir les coûts d'in-vestissement supplémentaires liés au changement de tension. Toutefois, si la production accrue de puissance réactive ne peut pas être compensée localement et que des contributions plus élevées doivent être payées pour l'énergie réactive non conforme, les économies annuelles ne s'élèvent plus qu'à 4%. Dans ces conditions, les coûts d'in-vestissement supplémentaires liés au changement de tension ne peuvent plus être amortis pendant la période considérée (60 ans, de 2026 à 2085).

Pour la planification et la mise en œuvre d'éven-tuels changements de tension dans le domaine de la moyenne tension (ainsi qu'à des niveaux supé-rieurs), il est donc indispensable d'effectuer un suivi systématique de la production accrue de puissance réactive. Les capacités de compensation existantes dans le réseau doivent être vérifiées et intégrées de manière quantitative dans le calcul global, afin d'évi-ter à l'avenir des coûts supplémentaires liés à l'échange de puissance réactive non conforme.

verursachen. Die übrigen Kosten entfallen auf Übertragungsverluste, den nicht konformen Blindleistungsaustausch sowie den geschätzten Investitionskosten für den Netzausbau.

Die Analyse zeigte, dass sich eine Spannungsumstellung knapp nicht rentiert, sofern die zusätzlich anfallende kapazitive Blindleistung nicht kompensiert werden kann (Bild 4). In diesem Fall entstehen Mehrkosten von rund 0,3 % gegenüber dem Referenzszenario. Kann die zusätzliche Blindleistung vollständig kompensiert werden, reduzieren sich die Gesamtkosten um etwa 1,7 %. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass die Verfügbarkeit und Dimensionierung der Blindleistungskompensation für die Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung ist.

Durch eine Spannungserhöhung können die jährlichen Betriebskosten um rund 25 % gesenkt werden. Die daraus resultierenden Kosteneinsparungen, kombiniert mit den Einsparungen beim Netzausbau infolge höherer Transportkapazitäten, können die zusätzlichen Investitionskosten der Spannungsumstellung amortisieren. Kann die erhöhte Blindleistungsproduktion jedoch nicht lokal kompensiert werden, sinken die jährlichen Kosteneinsparungen auf lediglich 4 %. Unter diesen Bedingungen sind die zusätzlichen Investitionskosten der Spannungsumstellung im Betrachtungszeitraum nicht mehr amortisierbar.

Für die Planung und Umsetzung möglicher Spannungsumstellungen in der Mittelspannung (und auf höheren Ebenen) ist es daher unerlässlich, die erhöhte Blindleistungsproduktion systematisch zu erfassen. Die vorhandenen Kompensationskapazitäten im Netz müssen geprüft und quantitativ in die Gesamtkalkulation integriert werden, um künftig Mehrkosten durch nicht konformen Blindleistungsaustausch zu vermeiden.

Zudem zeigt die durchgeführte Sensitivitätsanalyse eine hohe Abhängigkeit vom künftigen Energiebedarf: Mit steigendem Verbrauch nehmen die Vorteile der Spannungsumstellung zu. Erstens gewinnen die reduzierten Übertragungsverluste relativ an Gewicht; zweitens erhöhen sich die Ausbausparungen durch die zusätzliche Transportkapazität. Drittens geht eine höhere Last typischerweise

mit induktiveren Netzbelastungen einher, wodurch sich die Kosten des Blindleistungsaustauschs zusätzlich senken lassen.

Unter den getroffenen Annahmen erweist sich eine Spannungsumstellung als nur bedingt wirtschaftlich; die konkrete Beurteilung bleibt jedoch kontextabhängig. Ein aktuelles Praxisbeispiel für eine unter den gegebenen Rahmenbedingungen wirtschaftlich vorteilhafte Umsetzung ist die laufende Spannungsumstellung von Primeo Energie im Grossraum Basel, bei der die Betriebsspannung von 12,8 kV auf 20 kV erhöht wird. Dadurch steigt die übertragbare Leistung um rund 56 %, während die ohmschen Transportverluste bei gleicher Wirkleistung um 58 % sinken. Dies verdeutlicht, dass eine Spannungsumstellung eine vorausschauende Umsetzungsstrategie erfordert, um einen wirtschaftlichen Mehrwert zu erzielen. Empfohlen wird daher ein langfristiger Umstellungsplan, der die Beschaffung und den Ersatz durch umschaltbare Transformatoren in reguläre Wartungs- und Erneuerungsprogramme integriert. Parallel dazu sollten die im Versorgungsgebiet vorhandenen Kompensationsmittel systematisch erfasst und – unter Berücksichtigung des geänderten Blindleistungsaustauschs – in die Investitionskalkulation einbezogen werden. Die Behandlung der Blindleistung stellt dabei einen zentralen Einflussfaktor dar, auch wenn eine vollständige Kompensation nicht in jedem Fall Voraussetzung für eine wirtschaftliche Spannungsumstellung ist.

#### Referenz

[1] Markus Imhof, Konzept für die Spannungshaltung im Übertragungsnetz der Schweiz ab 2020, Swissgrid, 7. Januar 2019.

#### Link

> [www.primeo-energie.ch/spannungsumstellung](http://www.primeo-energie.ch/spannungsumstellung)

#### Autoren

**Marco Giovanelli** studiert an der FHNW.  
> FHNW, 5210 Windisch  
> [marco.giovanelli@students.fhnw.ch](mailto:marco.giovanelli@students.fhnw.ch)

**Prof. Dr. Martin Geidl** leitet das Institut für Elektrische Energietechnik der FHNW.  
> [martin.geidl@fhnw.ch](mailto:martin.geidl@fhnw.ch)

**Dieter Stich** leitet das Projekt Spannungsumstellung bei Primeo Netz AG.  
> Primeo Netz AG, 4142 Münchenstein  
> [d.stich@primeo-energie.ch](mailto:d.stich@primeo-energie.ch)

**Lauro Pedrini** ist Teamleiter Projektierung Trafostationen bei Primeo Netz AG.  
> [l.pedrini@primeo-energie.ch](mailto:l.pedrini@primeo-energie.ch)