Kooperationsszenarien für Bahnstrom- und Landesversorgungsnetz

Autor(en): **Burger, Andreas / Scherer, Marc / Buser, Manuel**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **103 (2012)**

Heft 12

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857374

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Kooperationsszenarien für Bahnstrom- und Landesversorgungsnetz

Eine Analyse des technischen Potenzials

Das Bahnstromnetz und das allgemeine Landesversorgungsnetz der Schweiz unterscheiden sich sowohl bei den betrieblichen, als auch den regulatorischen Rahmenbedingungen. Dennoch besteht grundsätzlich ein Potenzial, falls beide Systeme bei der Netzregelung zusammenarbeiten. Nachfolgend wird dieses Potenzial evaluiert.

Andreas Burger, Marc Scherer, Manuel Buser, Philipp Wenk

In der Schweiz werden grundsätzlich zwei unterschiedliche Stromnetze betrieben: Das Bahnstromnetz sowie das allgemeine Landesversorgungsnetz (Drehstromnetz). Die **Tabelle** listet die wichtigsten Charakteristika beider Netze auf. Ein wesentlicher Unterschied findet sich in der Grösse der Netze. Das Bahnstromnetz ist ein kleines Verbundnetz zwischen den Schweizerischen Bundesbahnen SBB, der Deutschen Bahn DB und den Österreichischen Bundesbahnen ÖBB. Es ist wesentlich kleiner als das kontinentaleuropäische Verbundnetz mit 24 synchron verbundenen Ländern.

Trotzdem haben beide Netze bei gleichen physikalischen Gegebenheiten die zwei zentralen Herausforderungen der Stromversorgung zu bewältigen: In jedem Moment so viel elektrische Energie zu erzeugen, wie benötigt wird, und diese vom Ort der Produktion zum Ort des Verbrauches zu bringen.

Wenn das Gleichgewicht zwischen Stromproduktion und -verbrauch nicht eingehalten wird, hebt oder senkt sich die Frequenz im jeweiligen Netz. Den Echtzeitprozess der Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichts fasst man unter dem Begriff der Netzregelung zusammen. Technisch funktioniert die Netzregelung in beiden Netzen ähnlich; organisiert ist sie aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen jedoch unterschiedlich.

Netzregelung im Drehstromnetz

Ein Grossteil der europäischen Drehstromnetze ist entflochten. Das bedeutet, die einzelnen Glieder der Wertschöpfungskette elektrischer Energie sind voneinander getrennt – so auch in der Schweiz. [1] Die Bilanzgruppen haben dabei die Aufgabe, durch Lastprognosen und Energiebeschaffung eine bestmögliche Ausgeglichenheit für mindestens jede Viertelstunde zu organisieren (Energiebilanz). Die Verantwortung für die Netzregelung hingegen – also die Kompensation der Abweichungen in Echtzeit (Leistungsbilanz) – obliegt der Übertragungsnetzbetreiberin Swissgrid.

Da die Übertragungsnetzbetreiberin keine eigenen Kraftwerkskapazitäten besitzt, schreibt diese die Reserven der Netzregelung im Rahmen der Systemdienstleistungen marktbasiert aus. Dabei werden die Produkte der Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung unterschieden. Die Primärregelung dient der Stabilisierung der Netzfrequenz im ganzen Verbundnetz. Die Sekundär- und Tertiärregelung hingegen haben zum Ziel, Abweichungen zwischen geplantem und tatsächlichem Austausch einer Regelzone fortlaufend auszugleichen.

Die Sekundärregelung ist durch einen automatisch arbeitenden Netzregler realisiert. Die Tertiärregelung ist ein manueller Korrekturmechanismus, um den Arbeitspunkt des Netzreglers anzupassen. Letzterer entspricht einem PI-Regler, der den saldierten Lastfluss an den Grenzleitungen mit dem geplanten saldierten Austausch mit dem Ausland vergleicht. Die Differenz ergibt, wie in **Bild 1** dargestellt, die Unausgeglichenheit der Schweiz.

Durch die Einstellung der Parameter des PI-Reglers können Charakteristika wie Empfindlichkeit und Regelzykluszeit gesteuert werden. Am Ausgang des PI-Reglers steht das Stellsignal, mit welchem alle an der Sekundärregelung beteiligten Erzeugungseinheiten parallel angesteuert werden.

Die Menge der abrufbaren Leistung ist dabei auf die am Systemdienstleistungsmarkt beschaffte Leistung begrenzt. Für die Stabilität der Stromversorgung in einer Regelzone ist entscheidend, dass die beschaffte Regelreserve ausreichend gross ist. Es gilt, so viel Regelreserven zu beschaffen wie nötig (Versorgungssicherheit), und so wenig wie möglich (ökonomische Effizienz). Eine unter Übertragungsnetzbetreibern in Europa verbreitete Methodik der Regelleistungsdimensionierung basiert auf einem probabilistisch analytischen Verfahren. [3] Dabei werden die Mengen an Regelreserve ermittelt, die nötig wären, um 99,9 % aller Ereignisse abzudecken. In der Schweiz wird diese Grösse rollie-

	Bahnstromnetz	Kontinentaleuropäisches Drehstromnetz
Sollfrequenz	16,7 Hz [2]	50 Hz
Zulässiges Frequenzband	−530 mHz / +300 mHz	±200 mHz
Anzahl Phasen	2 (1)	3
Netzkennzahl (davon Beitrag Schweiz)	3300 MW/Hz (1200 MW/Hz)	27 400 MW/Hz (626 MW/Hz)
Schweizer Grenzleitungen	4	41
Spitzenlast Verbundnetz	3 GW	550 GW
Lastanteil Schweiz	700 MW	11 GW
Grad der Vermaschung	tief	hoch

Tabelle Gegenüberstellung der Netzcharakteristika von Bahnstromnetz und Drehstromnetz.
Stand: Oktober 2012, Angaben zu Last und Netzkennzahl sind Richtwerte.

rend ermittelt und so die Höhe der zu beschaffenden Sekundär- und Tertiärregelreserve festgelegt. [4]

Netzregelung im Bahnstromnetz

Das Schweizer Bahnstromnetz ist durch zwei Kuppelstellen mit dem Bahnstromnetz der Deutschen Bahn DB physikalisch verbunden. Auch hier muss, um die Netzfrequenz nahe dem Sollwert zu halten, ein Ausgleich zwischen geplanter und tatsächlicher Ausspeisung stattfinden.

Bei der vertikal integrierten Bahnstromversorgung liegen alle Glieder der Wertschöpfungskette – inklusive Systemführung und Netzregelung – in einer Verantwortung. Die SBB haben etwa die Möglichkeit, die Arbeitspunkte der eigenen Bahnstromkraftwerke innerhalb des gesamten Wirkleistungsbereichs zu verschieben. Leistungsreserven für Prognosefehler, Kraftwerksausfälle und andere unvorhergesehene Ereignisse werden global eingeplant. Der Übergang zwischen verschiedenen Arten von Regelleistung und dem Kraftwerkseinsatz ist fliessend, weshalb der Begriff der Systemdienstleistungen nur bedingt zutrifft. [5] Dies spiegelt sich auch in einem vorgegebenen fixen Bahnstrompreis wider, der nicht zwischen Energie- und Netznutzung unterscheidet. Dieser Tarif ist regulatorisch fixiert. [6]

Das Lastverhalten im Bahnstromnetz erfordert jedoch eine zeitlich hochaufgelöste Steuerung der Produktion. Im Bahnstromnetz kann ein einzelner Zug einen Lastanstieg von bis zu 5 % bewirken. Wie in **Bild 2** dargestellt, verstärkt der Taktfahrplan diesen Effekt, so dass Laständerungen von 50 % innerhalb weniger Minuten keine Seltenheit darstellen.

So wird auch im Bahnstromnetz ein Netzregler in Form eines PI-Reglers mit paralleler Aktivierung der Erzeugungseinheiten betrieben. Jedoch erfordert die Netz- und Lastcharakteristik die Wahl anderer Regelparameter. Aufgrund des kleinen Netzverbundes reagiert die Netzfrequenz sensibel auf Leistungsungleichgewichte, weshalb der Netzregler eine entsprechend schnelle Reaktion aufweisen muss.

Schnittstellen der beiden Netze

In der Schweiz bilden neun Umformerwerke, bestehend aus statischen und rotierenden Frequenzumformern der SBB sowie der Rhätischen Bahn RhB, die Schnittstellen zwischen dem Drehstrom- und dem Bahnstromnetz. Die Kopplung ist nicht synchron, der Lastfluss ist jedoch steuerbar. Dies ermöglicht die Abwicklung von Handelsgeschäften und den Energiebezug aus Kraftwerksbeteiligungen.

Die SBB nehmen dabei eine spezielle Rolle innerhalb der Schweizer Energieversorgung ein. Mit Blick auf die Bahnstromseite sind sie Betreiber des Bahnstromnetzes. Aus Sicht des Drehstromnetzes hingegen sind sie der bislang einzige Endkunde der Swissgrid und treten als Bilanzgruppenverantwortlicher mit einem einzigen saldierten Ein- und Ausspeisepunkt auf. Als Endkunde sind die SBB berechtigt, Systemdienstleistungen zu beziehen und zu liefern. Dieser bidirektionale Austausch findet heute bereits statt, die präqualifizierten Umformerwerke gelten als Erzeugungseinheiten zur Lieferung von Tertiärregelleistung. Gleichwohl wird über diese Schnittstellen Ausgleichsenergie für die Bilanzgruppe bezogen; wobei die SBB aufgrund ihrer vertikal integrierten Struktur die Möglichkeit haben, den Leistungsaustausch in Echtzeit zu steuern.

Trotz strukturellen und regulatorischen Unterschieden weisen das Schweizer Bahnstrom- und Drehstromnetz Gemeinsamkeiten auf, sodass Kooperationsformen zwischen den beiden Netzen angewandt werden können, die bereits unter Übertragungsnetzbetreibern in Europa bekannt sind.

Vergleich der benötigten Sekundärregelreserven

Um eine Vergleichbarkeit zwischen liberalisiertem und vertikal integriertem

Andreas Burger

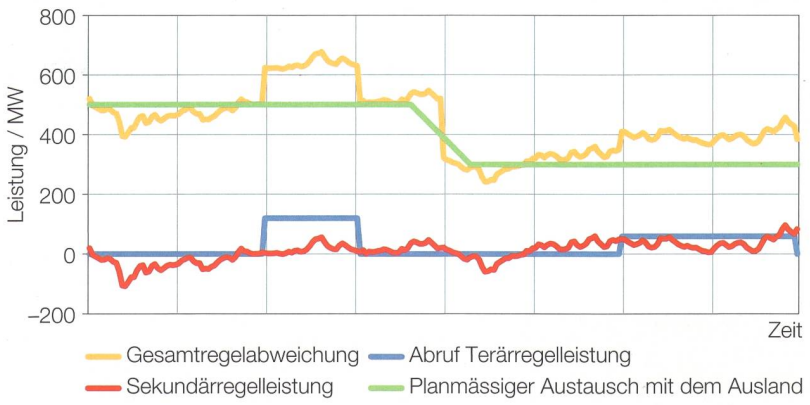


Bild 1 Exemplarische Darstellung der Netzregelung mit Sekundär- und Tertiärregelung in der Schweiz.

Marc Scherer

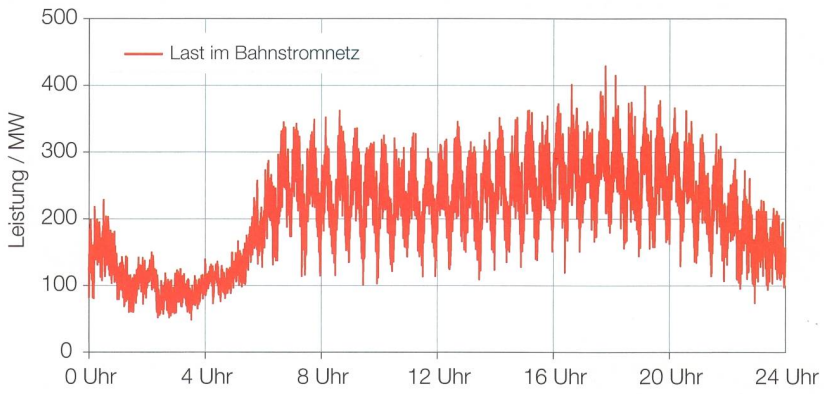
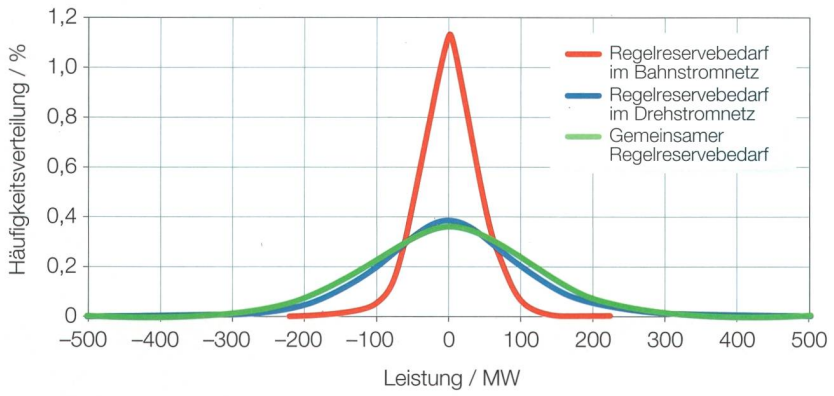


Bild 2 Aufgrund grosser Einzellasten und des Taktfahrplans weist das Schweizer Bahnstromnetz hohe Lastgradienten auf (Lastprofil von Mai 2011).



Andreas Burger

Bild 3 Der Vergleich der Häufigkeitsverteilungen zeigt, wie sich der Bedarf bei einer gemeinsamen Dimensionierung der Sekundärregelleistung verändern würde.

Umfeld herzustellen, werden im Folgenden die benötigten Mengen an Regelreserve beziehungsweise Sekundärregelreserve betrachtet. Dies unter der Bedingung, dass die Versorgungssicherheit in beiden Netzen gemäss dem 99,9 %-Kriterium gewährleistet ist. Zunächst wird der Anteil der Lastfolge im Bahnstromnetz isoliert, der zeitlich hochaufgelöst ausgeglichen werden muss. Ausgehend von den Betriebsprozessen ist die Definition des regulären Arbeitspunktes aller Kraftwerke als stündlicher Mittelwert der Last eine sinnvolle Methode. Die Abweichungen der Last von diesem Stundenmittelwert können als der Bedarf an Sekundärregelleistung im Bahnstromnetz geschätzt werden.

Für das Jahr 2011 ergibt sich im Bahnstromnetz mithilfe der oben beschriebenen Methode eine benötigte Sekundärregelreserve von ±145 MW. Im Verhältnis zur Netzgrösse ist dieser Bedarf – aufgrund der getakteten Reisefahrpläne und dem Verhältnis einzelner Verbraucher zur Gesamtlast – hoch, im Vergleich zu den ±400 MW im Schweizer Drehstromnetz. [4] Mit der Identifikation der benötigten Sekundärregelreserve im Schweizer Bahnstromnetz lassen sich nun Vergleiche anstellen.

Ansätze koordinierter Netzregelung

Da Netzregelung in den beiden Netzen unabhängig voneinander umgesetzt wird, kommt es systemimmanent zu Situationen, in denen entgegengesetzt Regelleistung aktiviert wird. Ein Einsparpotenzial liegt darin, diese gegenläufige Aktivierung der Sekundärregelung zu unterbinden. Dazu werden die Leistungsungleichgewichte addiert, und es müsste nur noch die verbleibende Abweichung im betreffenden Netz ausgeglichen werden, wobei ein zusätzlicher Lastfluss an den Frequenzumformern entstehen würde. Dieses Vorgehen ist durch das Konzept des Netzregelverbunds bekannt. [7]

Der zeitliche Anteil von gegenläufigen Abweichungen zweier unabhängiger Systeme liegt bei maximal 50 %. Die Gegenüberstellung auf Basis der historischen Messwerte aus 2011 ergibt eine Gegenläufigkeit von 46 %. Dabei wären absolut betrachtet 98 307 MWh mehr über die Umformerwerke geflossen. Darauf basierend lassen sich nachträglich die Regelreserven beider Systeme neu dimensionieren, da die Mittelwerteffekte zu einem veränderten Bedarf führten. Für 2011 hätte man dadurch im Schweizer Drehstromnetz rund ±11 MW (–2,8 %) und im Schweizer Bahnstromnetz rund ±7 MW (–4,8 %) weniger Sekundärregelreserve benötigt.

Die konsequente Weiterführung dieses Ansatzes mündet in der Überlegung, die Regelreserven beider Systeme zusammenzulegen und gemeinsam zu dimensionieren. Damit werden die Regelreserven gemeinsam genutzt, wobei der Bündelungseffekt eine Reduktion der Regelreserve in Aussicht stellt. [7] Die Untersuchung auf Basis der historischen Messwerte aus 2011 ergibt eine gemeinsame Sekundärregelreserve von ±500 MW. **Bild 3** zeigt die entsprechenden Verteilungen.

Im Vergleich zu einer unabhängigen Dimensionierung könnten gemäss diesem Ansatz ±45 MW eingespart werden. Diese hätten beispielsweise anteilsgerecht mit rund ±33 MW (–8,3 %) im Schweizer Drehstromnetz und ±12 MW (–8,3 %) im Schweizer Bahnstromnetz eingespart werden können.

Ausblick und Fazit

Die vorgestellte Untersuchung zeigt kooperative Ansätze zur Weiterentwick-

Résumé

Scénarios de coopération du réseau électrique ferroviaire et du réseau d'approvisionnement général du pays

Une analyse du potentiel technique

La Suisse a recours à deux réseaux électriques différents : le réseau électrique ferroviaire et le réseau d'approvisionnement général du pays (réseau triphasé). Etant donné qu'actuellement les réglementations de ces deux réseaux sont appliquées indépendamment l'une de l'autre, il peut arriver que la puissance de réglage soit activée de manière inverse. Dans le but de faire des économies, il faudrait éventuellement mettre un terme à ces activités contradictoires. Pour y parvenir, les déséquilibres de puissance devraient faire l'objet d'une somme algébrique. Seul l'écart restant devrait être compensé dans le réseau correspondant. Ceci donne lieu à un flux supplémentaire au travers des convertisseurs de fréquence entre les deux réseaux.

Les valeurs de 2011 affichent une proportion de 46 % de puissances de réglage opposées. Pour 2011, une réglementation coordonnée aurait permis d'économiser environ ±11 MW (–2,8 %) des réserves de réglage secondaire dans le réseau triphasé et environ ±7 MW (–4,8 %) dans le réseau électrique ferroviaire.

Par la suite, l'idée consisterait à mettre ensemble les réserves de réglage des deux systèmes et de les dimensionner en commun. Selon les valeurs pour 2011, 45 MW auraient pu être économisés au niveau de la réserve de puissance de réglage secondaire.

La question de savoir si ce potentiel technique réduirait les coûts reste à l'heure actuelle sans réponse. Il faudrait également analyser les interventions possibles dans le modèle de marché de la branche électrique, les implications juridiques et régulatoires, ainsi que les tâches en pleine mutation.

Mn

lung der beiden Schweizer Netzbetriebe auf. Konzepte, ähnlich denen eines Netzregelverbundes, werden zurzeit in Europa zwischen nationalen Übertragungsnetzen diskutiert; die Erweiterung dieser Überlegungen auf Bahnstrom- und allgemeinem Landesversorgungsnetz stellt die konsequente Weiterführung dar.

Ob aus dem technischen Potenzial wirtschaftliche Einsparungen resultieren würden, kann jedoch nicht abschliessend beantwortet werden. Um dies zu bewerten, müssen mögliche Eingriffe in das Marktmodell der Elektrizitätsbranche, die rechtlichen und regulatorischen Implikationen sowie die ändernden Pflichten untersucht werden.

Die Umsetzungskosten, aber auch die laufenden Kosten einer solchen Kooperation sind nicht beziffert. Zudem müssen die betrieblichen Prozesse und damit verbundenen operativen Veränderungen berücksichtigt werden. Dazu gehören im Speziellen veränderte Lastflüsse, die zu verstärkten Engpässen im Bahnstromnetz als auch an den Umformerwerken führen könnten.

Die für die Auswertungen gewählte Defizitwahrscheinlichkeit findet bis anhin im kontinentaleuropäischen Verbundnetz Anwendung. Nicht Gegenstand der Untersuchungen war indes, inwiefern dieses Kriterium in einem vergleichsweise kleinen Verbundnetz wie dem des Bahnstromnetzes die Versorgungssicherheit im gleichen Masse zu gewährleisten vermag.

Referenzen und Anmerkungen

[1] Martin Beck: Netzregelung in der Schweiz: Von sieben zu einer Regelzone mit grenzüberschreitender Leistungsvorhaltung, ETG-Fachbericht 127, 2011.

[2] Ursprünglich lag die Sollfrequenz im Bahnstromnetz bei 16 2/3 Hz. Durch das Polpaarverhältnis 1:3 kann elektrische Energie an einer gemeinsamen Welle generiert werden. Die für die Frequenzumformung verwendeten, doppelt gespeisten Asynchronmaschinen arbeiten zur Regelung der Ausgangsfrequenz mit einem Schlupf am Läuferring. Dieser ist Null bei 16 2/3 Hz. Dieser Betriebszustand führt zu einer einseitigen Abnutzung der Bürsten an den Schleifringen. Seit der Neudefinition der Sollfrequenz zu 16.7 Hz im Jahr 1995 wird in diesem Betriebszustand ein Schlupf provoziert, wodurch die einseitige Abnutzung abnimmt.

[3] Marc Scherer: Richtige Regelreservedimensionierung – Validierung und kontinuierliche Anpassung, EW – das Magazin für die Energiewirtschaft, 110 (24), S. 62–65, 2011.

[4] Swissgrid AG: Grundlagen Systemdienstleistungsprodukte, Version 6.4, April 2012.

[5] Brendan Kirby, Eric Hirst: Unbundling Electricity – Ancillary Services, Power Engineering Review, IEEE 16, S. 5–6, 1996.

[6] Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahn-Netzzugangsverordnung vom 7. Juni 1999 (AB-NZV), SR 742.122.4.

[7] Marc Scherer, Bernd Geissler: Das Konzept Netzregelverbund – Hintergründe der Kooperation von Übertragungsnetzbetreibern, Bulletin SEV/VSE 5/2012, S. 27–29, 2012.

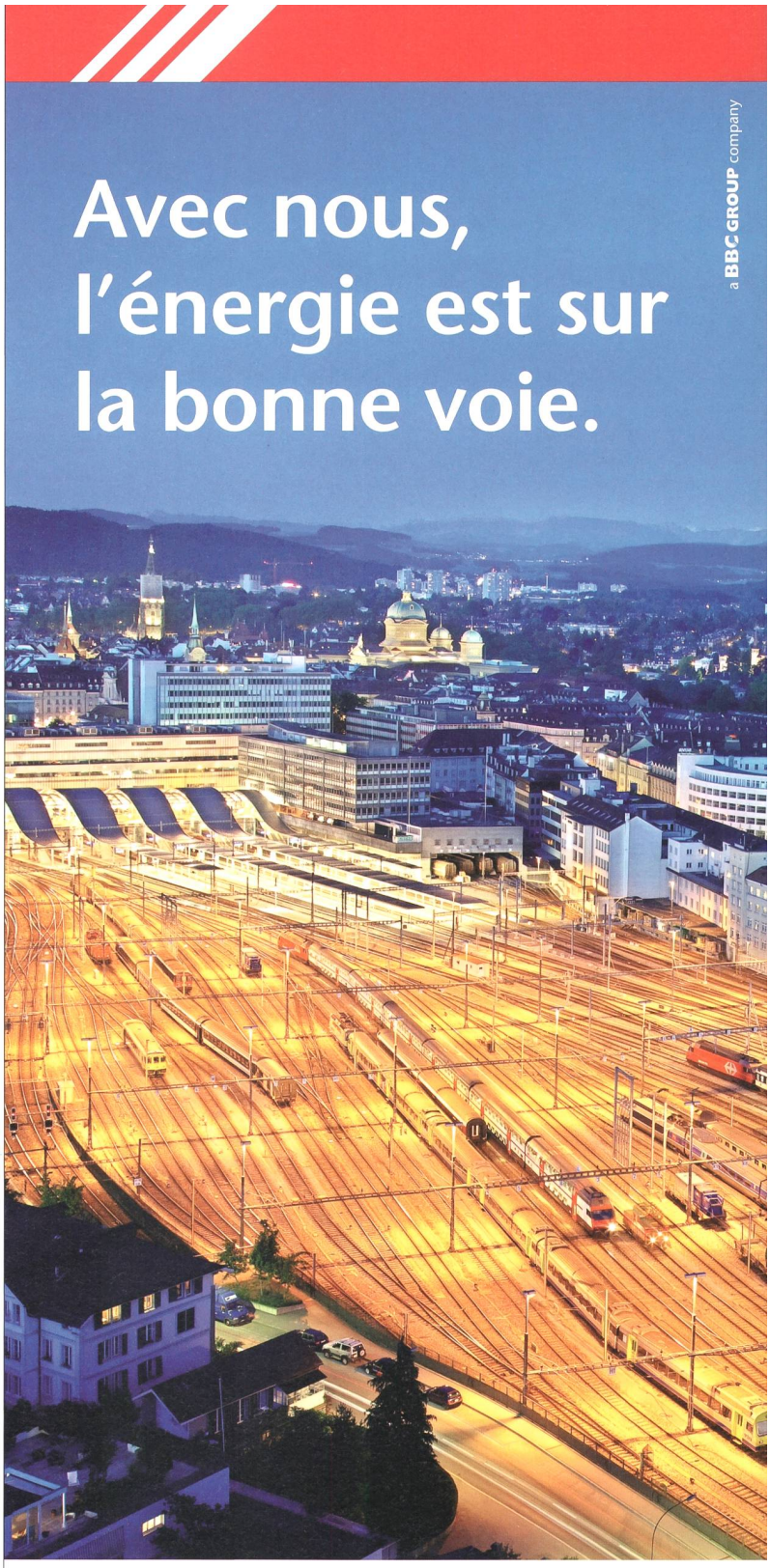
Angaben zu den Autoren

Marc Scherer, MSc ETH, ist Fachspezialist für Netzregelung und Produktentwicklung in der Abteilung Systemdienstleistungen von Swissgrid.
Swissgrid AG, 5080 Laufenburg
marc.scherer@swissgrid.ch

Andreas Burger, BEng, ist Student an der Hochschule Offenburg und arbeitet in der Abteilung Systemdienstleistungen von Swissgrid.
andreas.burger@swissgrid.ch

Manuel Buser, Dipl. El.-Ing. EPFL, ist Fachspezialist Betrieb Bahnstrom bei den Schweizerischen Bundesbahnen.
Schweizerische Bundesbahnen SBB, 3052 Zollikofen
manuel.buser@sbb.ch

Philipp Wenk, Dr. phil., ist Bereichsleiter sowie Führungsteammitglied bei SBB Infrastruktur Energie und leitet den Betrieb der Bahnstromversorgung.
philipp.wenk@sbb.ch



Nous sommes votre fournisseur de solutions complètes pour la distribution d'énergie et la connectique pour câbles dans les domaines de la moyenne et de la basse tension. Du conseil à la maintenance, vous bénéficiez du vaste savoir-faire de nos spécialistes et de notre service 24 h/24, synonyme d'énergie illimitée. Partout. A tout moment. **powersystems.cellpack.com**

CELLPACK
Power Systems

Concevoir, construire, connecter.

Elektro-Installations-Tester CA 6116

Genial einfach! Einfach genial!

Das Multi-Funktionsgerät für die Installationsprüfung. Leistungsfähig, schnell und genau. Für Industrie-, Dienstleistungs- und Wohnbereiche.

Technische Neuheiten:

- » Grosses graphisches Display
- » Auf Tastdruck - graphische Hilfe
- » Isolationsmessung 50/100/250/500/**1000 V** DC
- » Leistungs- und Leistungsfaktor-messung *
- » Leckstrommessung mit Auflösung 0.1 mA *
- » Netzqualität THD und bis zur 50. Oberwelle, Spannung und Strom *
- » Osciloscope für Spannung und Strom
- » Erdungsmessung ohne Netzspannung
- » Alphanumerische Hilfstastatur

** Zangen in Option*

www.chauvin-arnoux.ch

Chauvin Arnoux AG | Moosacherstrasse 15 | 8804 Au
Telefon 044 727 75 55 | Fax 044 727 75 56 | info@chauvin-arnoux.ch

CHAUVIN ARNOUX GROUP

electrosuisse VSE