

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 97 (2006)  
**Heft:** 15

**Artikel:** Feinstufige Lastflussregelung im Städtnetz  
**Autor:** Bonmann, Dietrich / Ravot, Jean-François / Fischer, Günther  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857703>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 11.05.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Feinstufige Lastflussregelung im Städtetz

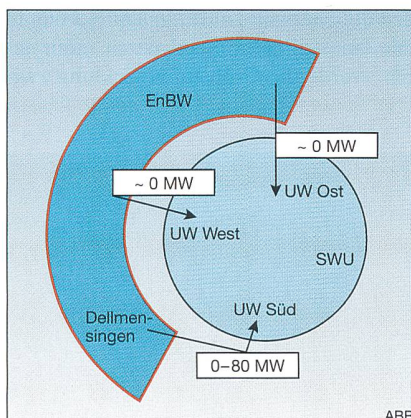
## Querregeltransformator optimiert Lastfluss

Ende November 2005 hat die SWU Energie einen Querregeltransformator mit 7° Regelbereich in Betrieb genommen. Die Regelaufgabe besteht darin, bis zu einem Grenzwert möglichst viel der Bezugsleistung der SWU Energie über eine zu günstigen Bedingungen gemietete Leitung zu führen. Gleichzeitig ist an zwei anderen Einspeisepunkten ein Export von Leistung aus dem Netz der Stadtwerke an das überlagerte Netz zu vermeiden. Wegen der niedrigen Netzimpedanzen wurde eine hohe Anzahl von 32 feinen Stufen von jeweils nur 0,22° gefordert, die es erlaubt, die maximale Einspeiseleistung genau einzuhalten. Der Querregler wurde mit zwei Aktivteilen in einem gemeinsamen Kessel ausgeführt, die digital geregelt werden.

Im Rahmen deregulierter Elektrizitätsmärkte ergeben sich zunehmende Leistungsflüsse über grössere geografische Entfernungen. Der Zubau von Windkraft-

*Dietrich Bonmann,  
Jean-François Ravot, Günther Fischer*

anlagen an oft verbraucherfernen Standorten führt ebenfalls zur Erhöhung von Leistungstransfers im Übertragungsnetz.



**Bild 1 Versorgungsgebiet der SWU Energie**

Das Versorgungsgebiet der SWU Energie wird über drei Einspeisungen aus dem überlagerten Netz der EnBW versorgt. Die Einspeisung über das UW Süd ist bis zu einer Grenze von 80 MW zu besonders günstigen Konditionen möglich. Eine Durchspeisung ins Netz der EnBW über die UW West und Ost ist unerwünscht.

Da die bestehenden Netze historisch nicht für diese neue Nutzungsweise konzipiert wurden, kann es auf verschiedenen Strecken zu Engpässen kommen. Um dies zu vermeiden, können mit Querregeltransformatoren Lastflüsse von überlasteten Leitungen auf oft vorhandene, parallele, wegen der Impedanzverhältnisse nicht voll ausgenutzte Leitungen umgeleitet werden. In den letzten Jahren wurden in Europa mehrere Projekte mit Querregeltransformatoren realisiert, die meist der Erhöhung oder Wiederherstellung der Übertragungssicherheit unter zunehmenden Energietransfers dienen. Das Marktgeschehen setzt aber auch ökonomische Anreize für andere Einsätze von Querregeltransformatoren.

### Regelaufgabe in einem Städtetz

So haben zum Beispiel die Stadtwerke Ulm (SWU Energie) in Deutschland, eine Tochtergesellschaft der SWU Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH, über eine bestimmte Leitung zu günstigen Konditionen Leitungskapazität gemietet und können so bis zu 80 MW in das Städtetz einspeisen. Neben dieser Einspeisung über die Leitung Dellmensingen–Umspannwerk Süd gibt es noch zwei weitere über die Umspannwerke West und Ost, die die über 80 MW hinaus erforderliche

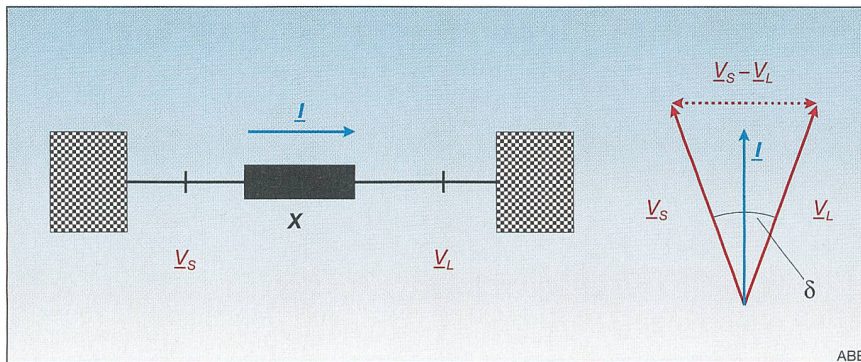
Leistung liefern und der Absicherung dienen sollen, deren Nutzung aber mehr kostet. Erste wirtschaftliche Betrachtungen ergaben, dass eine Regelung des Lastflusses auf der Leitung Dellmensingen–Umspannwerk Süd sich schnell amortisieren könnte. Die Regelung müsste bei gegebenem Verbrauch im Städtetz den Import über Dellmensingen–Umspannwerk Süd so hoch halten (aber kleiner 80 MW), dass der Import über die Einspeisungen West und Ost möglichst nahe null liegt (Bild 1). Grundsätzliche Betrachtungen bei der SWU Energie und bei ABB Bad Honnef bestätigten die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer Lastflussregelung mittels eines Querregeltransformators.

### Dimensionierung des Querregeltransformators

Zuerst musste jedoch die Dimensionierung des Querregeltransformators festgelegt werden. Der Stromfluss über eine Leitung erfordert eine Differenz der Spannung an ihren Enden. Bei Wechselstrom und dem überwiegend induktiven Widerstand von Übertragungsleitungen muss die Spannungsdifferenz dem Strom um ca. 90° voreilen, wenn lastseitig Strom und Spannung in Phase liegen sollen, was der Übertragung von Wirkleistung entspricht (Bild 2). Die Spannungsdifferenz ist somit eine «Querspannung». Anders ausgedrückt: Die Übertragung von Wirkleistung erfordert eine Phasendifferenz zwischen den Spannungen an den Leitungsenden.

Querregeltransformatoren regeln den Wirkleistungsfluss über eine Leitung zwischen zwei synchronen Netzen durch Einfügen einer zusätzlichen Querspannung. Kompensiert die Zusatzspannung einen Teil des «natürlichen» Spannungsabfalls  $X \cdot I$ , so erhöht sich bei gleich bleibender Spannungsdifferenz zwischen den Leitungsenden der Stromfluss.

Oder in Winkeln ausgedrückt: Wenn der Regeltransformator die Phasendifferenz zwischen den Leitungsenden vergrößert, so steigt der Wirkleistungsfluss (Bild 3). Im englischen Sprachraum wird daher von Phase Shifting Transformers oder Phase Angle Regulators gesprochen.



**Bild 2** Kopplung über eine Impedanz

Kopplung zweier synchroner Netze über eine Leitung mit Impedanz  $X$ . Die Beträge der Spannungen werden als gleich angenommen. Zum Wirkleistungstransport ist eine Phasendifferenz der Spannungszeiger an den Enden der Leitung notwendig.

Die unvermeidliche Impedanz des Regeltransformators hat den gleichen hemmenden Einfluss auf den Wirkleistungsfluss wie die Leitungsimpedanz. Eine hohe Impedanz des Regeltransformators erhöht daher den benötigten Regelbereich.

## Hohe Anzahl feiner Stufen nötig

Lastflussberechnungen ergaben zunächst – unter Annahme eines 100-MVA-110-kV/110-kV-Querregeltransformators mit einer Kurzschlussspannung von 14% – einen notwendigen Regelbereich von 0 bis ca.  $11^\circ$  in einer feinen Stufung von mindestens 34 Stufen. Der Bemessungs-Kurzschlussstrom an der Sammelschiene betrug 19 kA.

Bei der detaillierten Betrachtung der Designoptionen für den Querregeltransformator ergab sich, dass eine Ausführung als Volltransformator durch die feine Stufung unwirtschaftlich sein würde. Die Spannung über eine Stufe macht beim gewünschten kleinen Regelbereich nur einen kleinen Teil der Strangspannung aus. Aus mechanischen Gründen benötigt man eine Mindestanzahl von Windungen pro Stufe, was umgekehrt eine hohe Anzahl von Windungen in der Stammwicklung und eine hohe Impedanz des Regeltransformators zur Folge hat.

Da die Sternpunktbehandlung auf beiden Seiten des Querreglers gleich war, war eine galvanische Trennung der Systeme im Transformator nicht unbedingt notwendig. Dies erlaubte, statt des Volltransformator-Konzepts eine reine Regeltransformator-Lösung mit Erregertransformator und Serientransformator zu wählen. Die Regelwicklungen lagen dadurch im Zwischenkreis, dessen Spannung so gewählt wurde, dass sich ausreichend viele Windungen pro Stufe ergaben. Die

physische Bauleistung konnte durch dieses Konzept auf die Regelleistung begrenzt werden, die bei kleinen Winkeln wesentlich kleiner ist als die Durchgangsleistung.

Die Durchgangsleistung  $P_S$  ist die übliche Scheinleistung:

$$P_S = 3 \cdot V_1 \cdot I_1$$

Wobei

$V_1$  Strangspannung der Leitung

$I_1$  Strom in der Leitung

Die Regelleistung ist gegeben durch:

$$P_S = 3 \cdot \Delta V_1 \cdot I_1 = P_S \cdot \sin \alpha$$

Wobei

$\Delta V_1$  Zwischen speisender Seite und Lastseite eingefügte Querspannung

$I_1$  Strom in der Leitung

$\alpha$  Der Querspannung entsprechende Phasenverschiebung zwischen lastseitiger Spannung und der Spannung auf der speisenden Seite

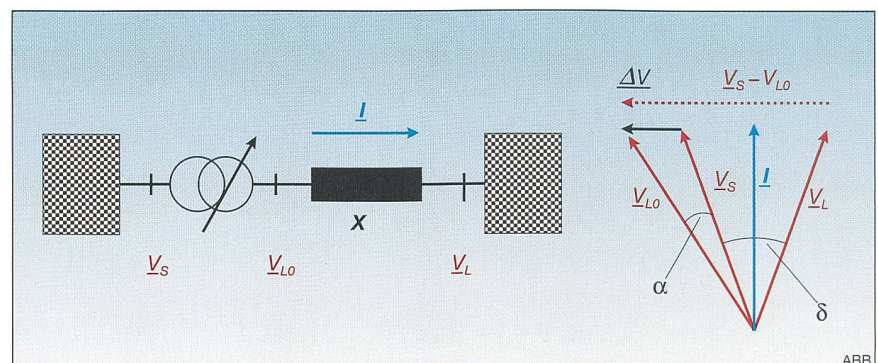
Bei einem Querregeltransformator mit zwei Aktivteilen beträgt die Bauleistung

$2 \cdot P_S$ . Bei  $11^\circ$  Regelbereich ergaben sich  $2 \cdot 19$  MVA statt 100 MVA.

Mit der Bauleistung wurde auch die Kurzschlussleistung des Querregeltransformators deutlich kleiner als beim Volltransformator, was den notwendigen Querregelbereich und damit die Baugröße weiter verminderte. Nach erneuten Lastflussrechnungen mit auf den Bereich von 5 bis 6,4% verminderter Transformatorimpedanz wurde der Regelbereich auf 0 bis  $7^\circ$  in 32 Stufen à  $0,22^\circ$  festgelegt. Eine zusätzliche Regelung der Längsspannung zur Steuerung von Blindleistungsflüssen erwies sich als nicht notwendig.

## Ausführung des Querregeltransformators

Der Auftrag für den Querregeltransformator samt Regeleinrichtung wurde der ABB AG – Division Energietechnik – Transformatoren in Bad Honnef erteilt. Bild 4 zeigt das Schaltbild des Querregeltransformators mit Serientransformator und Erregertransformator. Die Serienwicklungen wurden ohne Mittenanzapfung ausgeführt, da sich das Übersetzungsverhältnis 110 kV/110 kV mit dem Winkel nur um höchstens 0,75% ändert. Die Regelung erfolgte mit einem im Sternpunkt angeordneten Laststufenschalter mit Grob/Fein-Wähler. Wegen der feinen Regelung ist mit einer hohen Anzahl von Stufenschaltungen pro Jahr zu rechnen. Aus diesem Grund wurde der Stufenschalter mit Vakuumschaltkammern spezifiziert, um den Wartungsaufwand zu minimieren. Die Transformatorimpedanz hat im Netz der SWU im Vergleich zu den Leitungsimpedanzen einen grossen Einfluss auf den Lastfluss. Um den üblicherweise auftretenden Sprung in der Transformatorimpedanz zu minimieren, wurde die Grobstufenwicklung zwi-



**Bild 3** Kopplung über einen Querregler

Kopplung zweier synchroner Netze über eine Leitung mit Querregler, der eine Zusatzspannung  $\Delta V$  aufträgt, die den Spannungsabfall an der Leitungsimpedanz teilweise kompensiert. Der Wirkleistungstransport nimmt zu.

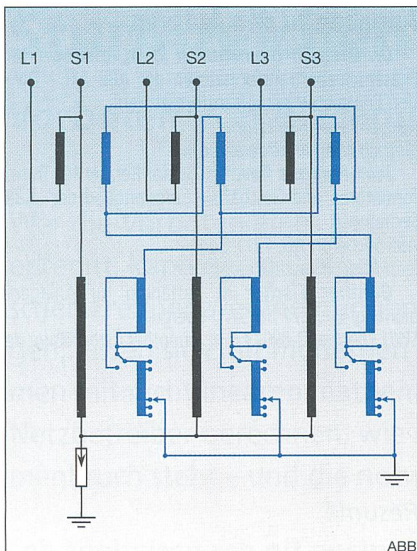


Bild 4 Schaltbild des Querregeltransformators

Oben der Serientransformator, unten der Erregertransformator mit Stufenschalter mit Grob/Fein-Wähler

schen den Lagen der zweilagig ausgeführten Feinstufenwicklung angeordnet.

Beide Aktivteile und der Laststufenschalter konnten in einem gemeinsamen Kessel untergebracht werden (Bild 5).

### Regelparameter spezifizieren

Die Regelung soll bei gegebenem Verbrauch im Städtetz den Import über Dellmensingen–Umspannwerk Süd möglichst hoch halten (maximal 80 MW). Gleichzeitig soll es zu möglichst geringen Exporten (Durchspeisung) aus dem Städtetz über die Umspannwerke West und Ost kommen. Solange der Gesamtleistungsbedarf unter 80 MW liegt, ist der erste Regelparameter diese Gesamtleistung, der zweite eine einstellbare Rück-

leistungsgrenze für die anderen beiden Einspeisepunkte. Dafür stehen Zählimpulse für die Gesamtbezugsleistung und für die Durchspeisungen zur Verfügung. Am Ort des Querreglers kann die Wirkleistung aus den analogen Strom- und Spannungswandlersignalen berechnet werden. Ferner gibt es zu Beginn jedes Viertelstundenintervalls einen Synchronisierimpuls. Solange aus den Umspannwerken West und Ost keine negativen Zählimpulse (Durchspeisung) anstehen, wird die durchschnittliche Wirkleistung pro Viertelstundenintervall durch den Querregler möglichst nahe an 80 MW oder einen anderen einstellbaren Sollwert gefahren. Da eine Stufung je nach Netzbedingungen schon eine Änderung um 3–4 MW bewirkt, wird über eine Trendberechnung während des Viertelstundenintervalls noch einmal nachgeregelt, um eine möglichst hohe Regelgenauigkeit bei einer möglichst geringen Schalthäufigkeit zu erzielen. Bei Auftreten einer Durchspeisung wird der Import im Umspannwerk Süd ab einer einstellbaren Grenze zurückgeregelt. Der Regler ist redundant vorhanden, sodass eine gegenseitige Überwachung auf Fehlfunktionen gewährleistet ist.

### Erste Betriebserfahrungen

SWU Energie konnte den Transformator und den Regler Ende November 2005 in Betrieb nehmen. Bild 6 zeigt die Qualität der Regelung über 8 Tage. Am Anfang der Aufzeichnungen ist die Regelung ausser Betrieb, und es fliesst der sich aufgrund der Leitungsimpedanzen, der Lastverteilung und der Übertragungswinkel im überlagerten Netz einstellende «natürliche» Lastfluss. Man erkennt einen ausgeprägten Tagesgang in der zu regelnden Leitung, der nach Einschalten der Rege-

# Ringkerntrafos nach Mass



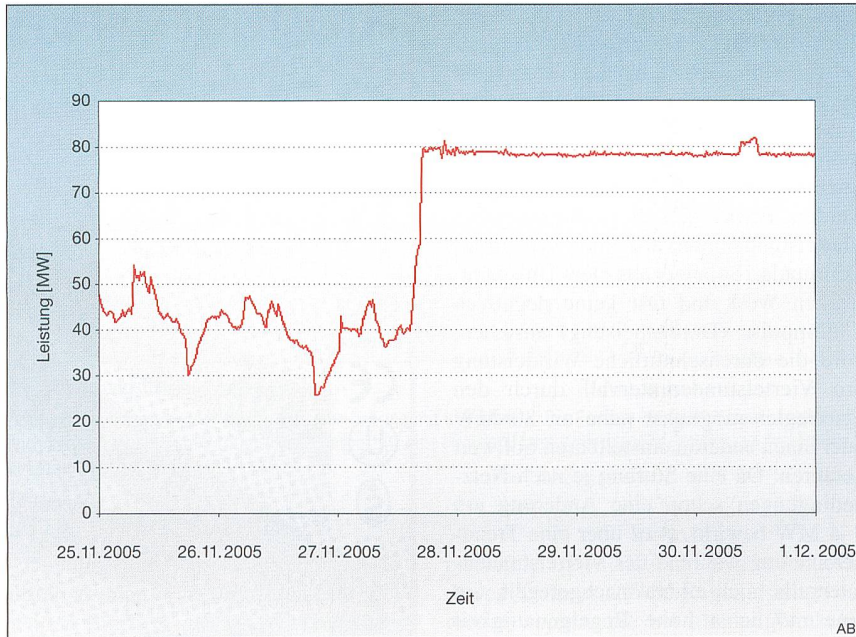


Bild 6 Inbetriebnahme des Querregeltransformators

Viertelstundenwerte vom 25.11.2005 bis am 1.12.2005. Die Grafik zeigt den Lastfluss vor und nach der Inbetriebnahme des Phasenschiebers.

lung fast völlig verschwindet (die größeren Schwankungen nach der Inbetriebnahme resultieren von Regelungsoptimierungen). Der Lastfluss entspricht den durchgeführten Berechnungen. Die Regelhäufigkeit konnte von durchschnittlich 300 Schaltungen pro Tag auf 30 reduziert werden, ohne die Regelgenauigkeit wesentlich zu verschlechtern.

Diese Ergebnisse beim Ulmer Stadtnetz zeigen, dass Querregeltransformatoren nicht nur zur Beeinflussung grossräumiger Lastflüsse eingesetzt werden können, sondern – bei Vorliegen entsprechender Anreize – auch im kleinen Massstab zur ökonomischen Optimierung eines Netzbetriebs.

#### Weiterführende Literatur

- IEC 62032, Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase Shifting Transformers, 1<sup>st</sup> Ed., 2005.
- Walter Seitlinger: Phase Shifting Transformers Discussion of Specific Characteristics, Cigré Session 1998, paper 12-306.
- E. M. Carlini, G. Manduzio, D. Bonmann: Power Flow Control on the Italian Network by Means of Phase Shifting Transformers, Cigré Session 2006, paper A2-206.
- J. Vankelecom, E. Jamouille, E. Jottrand: Impact de transformateurs déphaseurs dans le réseau 380 kV belge sur la capacité des transactions internationales, Revue E tijdschrift – 121<sup>e</sup> année, n° 3-2005 (Sept 2005), S. 26-38.
- D. Bonmann: Phase Shifting Transformers – Reliable Network Elements, 7<sup>th</sup> Intl. Conf. on Transformers TRAFOTECH 2006, Mumbai, India, 20.-21. Jan. 2006, pp I-22-I-28.

#### Angaben zu den Autoren

**Dr. Dietrich Bonmann** ist Produktmanager für Phasenschiebertransformatoren der ABB AG – Division Energietechnik – Transformatoren. ABB, D-53604 Bad Honnef, dietrich.bonmann@de.abb.com

**Jean-François Ravot** ist Senior-Berater für Transformatoren und Geschäftsleitungsmitglied der ABB Sécheron.

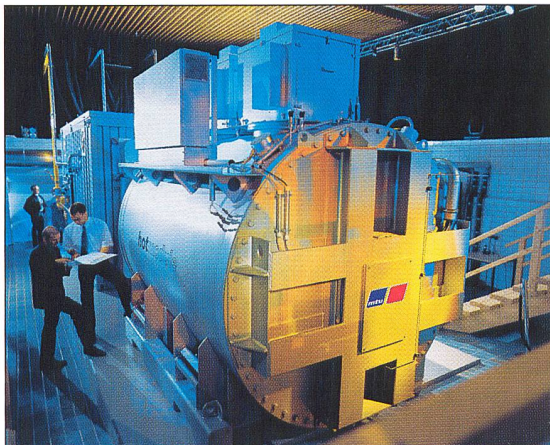
ABB Sécheron AG, 1211 Genf, jean-francois.ravot@ch.abb.com

**Günther Fischer** ist zuständig für Anlagenplanung/-bau E71 bei SWU Energie. SWU Energie, D-89073 Ulm, guenther.fischer@swu.de

#### Résumé

#### Réglage fin des variations de charge dans le réseau urbain

Le transformateur à réglage transversal permet d'optimiser le réglage de charge. Fin novembre 2005, SWU Energie (entreprise électrique d'Ulm) a mis en service un transformateur à plage de réglage de 7°. La tâche de réglage consiste à faire passer par une ligne louée à des conditions favorables le plus possible de la puissance consommée de SWU Energie, ceci jusqu'à une valeur limite donnée. Il s'agit en même temps d'éviter en deux autres points d'injection une exportation de puissance du réseau des entreprises municipales vers le réseau supérieur. Etant donné les faibles impédances du réseau, on demandait le nombre élevé de 32 gradins fins de 0,22° seulement, permettant de maintenir avec précision la puissance d'alimentation maximale. Le régulateur transversal a été réalisé avec deux parties actives placées dans un carter commun et a réglage numérique.



## Brennstoffzellen? Im Bulletin steht's.

BULLETIN

Abo: [www.electrosuisse.ch](http://www.electrosuisse.ch)