

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 103 (2012)

Heft: 9

Artikel: Potenzial von Ortsnetztransformatoren mit Spannungsregelung unter Last

Autor: Lehmann, Dirk

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857337>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 07.02.2026

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

Potenzial von Ortsnetztransformatoren mit Spannungsregelung unter Last

Ein Beispiel aus der Praxis

Um Verteilnetzstrukturen für zunehmende Schwankungen zu wappnen, hat die Arbon Energie als schweizweit erstes Unternehmen Anfang Februar einen regelbaren Ortsnetztransformator gekauft. Nachfolgend werden Vorteile für die Spannungsregelung diskutiert, die nun auch unter Last möglich ist.

Ortsnetztransformator für die einzelnen US-Stufen, bei OS-Stufe 1, bei Belastungen zwischen Leerlauf und Nennlast aufgezeigt. Die OS-Stufen 2–5 lassen sich analog darstellen.

Tabelle 1 und **Bild 1** im Vergleich zu der Betrachtung ohne Lastregelung (in **Tabelle 1** ist dafür jeweils der Wert bei US-Stufe 2 für die jeweiligen OS-Stufen zu nehmen) verdeutlichen, dass Ortsnetztransformatoren mit unterspannungsseitigem Lastregelbereich eine grössere Spannungsbandbreite für die Regelung bereithalten. Darüber hinaus ermöglicht die Fähigkeit, unter Last schalten zu können, eine deutlich flexiblere Anpassung an die sich häufig ändernde Netzsituation. Hier ergibt sich nun allerdings eine Einschränkung. Während bei Betrachtung im spannungslosen Zustand sich ein nahezu übergangslos einstellbares Spannungsband ergibt (**Tabelle 1**), zeigt **Bild 1**, dass im Betrieb aufgrund des nicht lastschaltfähigen unterspannungsseitigen Stufenschalters Lücken im einstellbaren Spannungsband vorhanden sind. Die Einstellungsmöglichkeit von $\pm 5\%$ scheint daher nicht optimal, kleinere Schritte wären vorteilhafter. Technisch bedingt ist dies jedoch problematisch. Aufgrund des Windungsverhältnisses und der Tatsache, dass ein Abgriff nur nach vollständigen Windungen erfolgen kann, stellen 5%, beim betrachte-

Dirk Lehmann

Im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Änderungen der Struktur der Verteilnetze durch regelbare Lasten und dezentrale Einspeisungen ergeben sich erhöhte Anforderungen für den Bereich der Spannungsregelung. Ein adäquates Mittel stellen regelbare Ortsnetztransformatoren dar.

Nun ist ein einstellbarer Ortsnetztransformator an sich nichts Neues. Ortsnetztransformatoren, die oberspannungsseitig mehrere, meist drei Anzapfungen haben, gibt es schon einige Jahrzehnte. Der neue Transformator der Arbon Energie wird oberspannungsseitig sogar fünf Anzapfungen aufweisen. Das Übersetzungsverhältnis kann somit im spannungslosen Zustand beispielsweise um $2 \times \pm 3\%$ verstellt werden. Seit einigen Jahren gehen die Entwicklungen nun dahin, dass, wie bei Hochspannungstransformatoren üblich, auch bei Ortsnetz-

transformatoren ein Umschalten unter Last möglich sein soll. Dazu wird unterspannungsseitig ein Regler eingebaut, der eine Spannungsanpassung unter Last ermöglicht. Mit den zusätzlich unterspannungsseitigen drei Anzapfungen, die ein Verstellen des Übersetzungsverhältnisses um weitere beispielsweise $\pm 5\%$ ermöglichen, ergeben sich insgesamt fünfzehn mögliche Spannungseinstellungen. In **Tabelle 1** werden die Übersetzungsverhältnisse am Transformator dargestellt. Die angegebenen Spannungen ergeben sich bei Leerlauf des Transformators.

Bei Belastung entsteht ein Spannungsabfall, der sich, bei dem hier betrachteten 630-kVA-Transformator der Siemens, mit 4200 W Kurzschlussverlusten und 4,6% relativer Kurzschlussimpedanz bei einem $\cos \varphi = 0,95$ (US-seitig), zu 2,09% bzw. 8,78 V, bezogen auf 420 V, ergibt. In **Bild 1** sind die Spannungsverhältnisse am

Stufe OS	Stufe US	Anzapfung der Oberspannungswicklung	Anzapfung der Unterspannungswicklung		Übersetzungsverhältnis ü	Unterspannung bei 16,8 kV Oberspannung (Leerlauf)				
1	3	+ 6 %	≤	+ 1000 V	- 5 %	≤	- 21 V	17800 / 399 = 44,6	376,7 V	217,5 V
2	3	+ 3 %	≤	+ 500 V	- 5 %	≤	- 21 V	17300 / 399 = 43,4	387,1 V	223,5 V
1	2	+ 6 %	≤	+ 1000 V	0	≤	0 V	17800 / 420 = 42,4	396,2 V	228,7 V
3	3	0	≤	0 V	- 5 %	≤	- 21 V	16800 / 399 = 42,1	399,0 V	230,4 V
2	2	+ 3 %	≤	+ 500 V	0	≤	0 V	17300 / 420 = 41,2	407,8 V	235,4 V
4	3	- 3 %	≤	- 500 V	- 5 %	≤	- 21 V	16300 / 399 = 40,9	410,8 V	237,2 V
1	1	+ 6 %	≤	+ 1000 V	+ 5 %	≤	+ 21 V	17800 / 441 = 40,4	415,8 V	240,1 V
3	2	0	≤	0 V	0	≤	0 V	16800 / 420 = 40 = üN	420,0 V	242,5 V
5	3	- 6 %	≤	- 1000 V	- 5 %	≤	- 21 V	15800 / 399 = 39,6	424,2 V	244,9 V
2	1	+ 3 %	≤	+ 500 V	+ 5 %	≤	+ 21 V	17300 / 441 = 39,2	428,6 V	247,5 V
4	2	- 3 %	≤	- 500 V	0	≤	0 V	16300 / 420 = 38,8	433,0 V	250,0 V
3	1	0	≤	0 V	+ 5 %	≤	+ 21 V	16800 / 441 = 38,1	441,0 V	254,6 V
5	2	- 6 %	≤	- 1000 V	0	≤	0 V	15800 / 420 = 37,6	446,8 V	258,0 V
4	1	- 3 %	≤	- 500 V	+ 5 %	≤	+ 21 V	16300 / 441 = 37,0	454,1 V	262,2 V
5	1	- 6 %	≤	- 1000 V	+ 5 %	≤	+ 21 V	15800 / 441 = 35,8	469,3 V	271,0 V

Tabelle 1 Auswirkung der eingestellten Stufen auf das Übersetzungsverhältnis und die bei konstanter Oberspannung von 16,8 kV auftretende Unterspannung, sortiert nach Unterspannung.

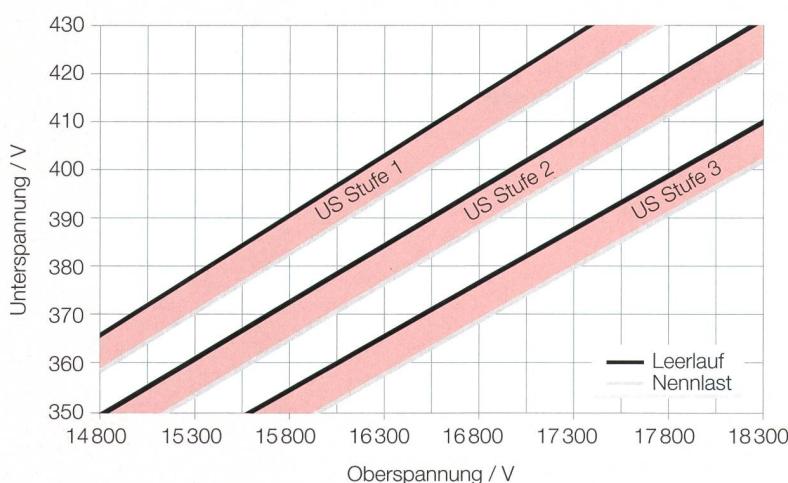


Bild 1 Spannungsverhältnisse bei OS Stufe 1.

ten Transformator die kleinstmögliche Schrittweite dar. Kleinere Schrittweiten lassen sich nur durch aufwendige Änderungen im Transformatordesign erreichen. Außerdem ist zu beachten, dass eine geringere Schrittweite zu häufigeren Schalthandlungen führt, was wiederum die Lebensdauer des Stufenschalters verringert. Hier ist nun abzuwägen, ob die zusätzlichen Kosten den relativ geringen Nutzen zugewinn durch die feinere Stufung rechtfertigen.

In einer Netzstudie hat Siemens die Auswirkungen unterschiedlicher Schrittweiten auf die maximale Spannungsdifferenz Δu an einzelnen Netzknopen untersucht.

zwischen den Betriebsszenarien Starklast ohne dezentrale Einspeisung, Schwachlast mit maximaler dezentraler Einspeisung und Starklast mit maximaler dezentraler Einspeisung betrachtet. Die Ergebnisse sind in **Bild 2** dargestellt. Es wird deutlich, dass eine feine Stufung mit $2 \times 2\%$ zwar optimal ist, die Verbesserung der maximalen Spannungsdifferenz gegenüber einer Stufung mit $4,3\%$ aber relativ gering ist.

Neben den Lücken im Spannungsbereich während des Betriebs ergibt sich ein weiteres Problem hinsichtlich der Stufenstellung. Bei geringen Übersetz-

Dirk Lehmann

zungsverhältnissen, also bei Stufenkombinationen von OS-seitig Stufe 5–4 und US-seitig Stufe 1–2 (**Tabelle 1**, letzte 4 Zeilen), ergibt sich der Fall, dass die eingestellten Unterspannungen über dem Toleranzband von $230 \text{ V} \pm 10\%$ liegen und daher nicht nutzbar sind. Berücksichtigt man den Spannungsabfall bei Belastung um bis zu $8,78 \text{ V}$, erhöht sich die Zahl der nutzbaren Spannungseinstellungen um 2–3, je nach Belastung. Durch bauliche Veränderungen, die eine Stufung mit kleinerer Schrittweite, beispielsweise $4,7\%$, ermöglichen, kann die Nutzbarkeit weiter verbessert werden. Es werden aber kaum alle Einstellungen verwendbar zu machen sein.

Zusätzliche Verluste am Transformator

Die Vorteile der Regelbarkeit unter Last gehen zulasten von zusätzlichen Verlusten durch die unterspannungsseitige Lastregelung: im Leerlauf (Anzugsspule Vakuumenschütz) von zusätzlichen rund 25 W und zusätzlichen ca. 125 W Lastverlusten (zusätzliche Klemmstellen). Diese geringfügig höheren Verluste scheinen jedoch ein geringer Preis zu sein für die deutlichen Vorteile, die ein regelbarer Ortsnetztransformator für die Spannungsstabilität bzw. Spannungsqualität bietet.

Neben den Verlusten sind auch die zusätzlichen Kosten durch die Lastregelung von grosser Bedeutung. Eine Lastregelung bedarf eines erhöhten Konstruktionsaufwandes. Dies schlägt sich natürlich im Preis nieder, der im Gegensatz zu vergleichbaren Transformatoren ohne unterspannungsseitige Lastregelung etwa doppelt so hoch ist (die Angabe bezieht sich auf den oben beschrieben Transformator der Siemens).

Siemens

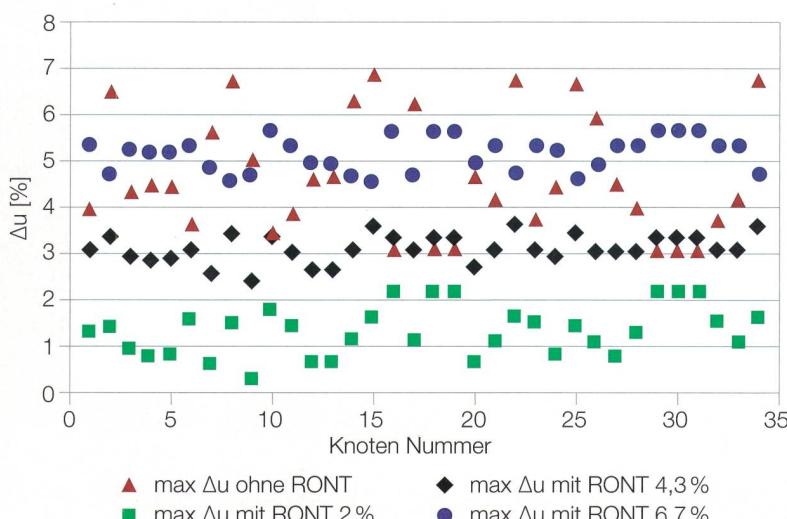


Bild 2 Vergleich der Spannungsdifferenz in Abhängigkeit der Stufung.

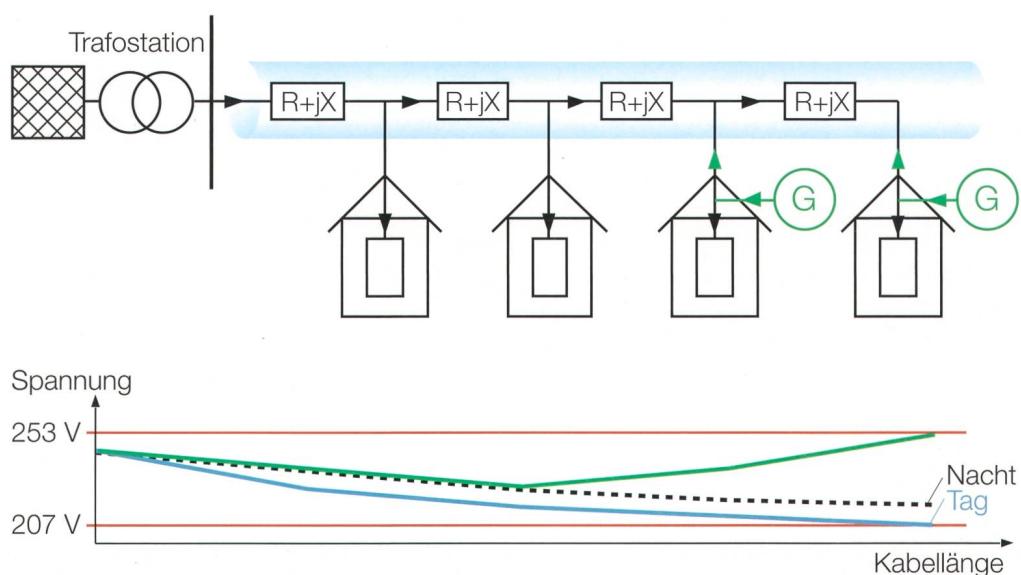
Die maximale Spannungsdifferenz, die für die Einhaltung des Spannungsbands wichtig ist, beträgt für die vier Fälle: Istzustand $\Delta u = 6,8\%$; $6,7\%$ Stufung $\Delta u = 5,5\%$; $4,3\%$ Stufung $\Delta u = 3,7\%$; $2 \times 2\%$ Stufung $\Delta u = 2,6\%$, RONT steht für regelbarer Ortsnetztransformator.

Funktionsweise der Lastregelung

Im Folgenden wird kurz die Funktionsweise der Lastregelung, so wie sie im oben genannten Transformator der Siemens verbaut ist, vorgestellt.

In der Ausgangsposition läuft der Energiefluss über einen angezogenen Schütz. Um nun auf eine höhere Stufe regeln zu können, wird für kurze Zeit ein Bypass mittels gezündeter Gleichrichterbrücke hergestellt (gesamte Umschaltzeit ca. 180 ms). Somit erfolgt die eigentliche Umschaltung lastlos. Nach erfolgreicher Umschaltung läuft der Energiefluss wieder über einen Schütz weiter.

Bild 3 Modell und Spannungsverlauf eines Strangs mit Einspeisung (grün: mit Einspeisung).



Integration von dezentralen Erzeugern

Die zukünftig vermehrte Einspeisung von dezentralen Energieerzeugern wie Photovoltaikanlagen und Kleinst-BHKWs stellt eine grosse Herausforderung für die Verteilnetzbetreiber dar.

Bisher war die Situation derart, dass die Spannung entlang eines Strangs durch die Lasten gesunken ist. Dieser Spannungsabfall lässt sich gut abschätzen und ist allenfalls leichten tageszeitlichen Schwankungen unterworfen. Der Transformator kann nun, dem Spannungsabfall und der Länge und Position des Strangausläufers im Netz entsprechend, gestuft werden. Durch zusätzliche Einspeisung von Kleinerzeugern wird jetzt die Spannung in den früher

reinen Verbrauchersträngen lokal angehoben. Teilweise in dem Ausmass, dass die Grenzen des zulässigen Spannungsbandes, $230\text{ V} \pm 10\%$ (1-phägige Betrachtung), erreicht bzw. überschritten werden. Hier kann nun ein Absenken der gesamten Strangspannung durch Regelung am Transformator nötig sein, da sonst bei Einspeisung durch dezentrale Energieerzeuger die obere Grenze überschritten wird. Die entsprechende Stufenstellung am Transformator führt wiederum dazu, dass, wenn keine Einspeisung stattfindet, die untere Grenze unterschritten werden kann. Die Spannung am Transformator muss daher wieder angehoben werden.

Aufgrund dieser von starken täglichen und tageszeitlichen Schwankun-

gen gezeichneten Einspeisung, gerade bei Photovoltaikanlagen, ist eine entsprechende Regelung unter Last auf der Unterspannungsseite sinnvoll bzw. sogar nötig. **Bild 3** zeigt, stark vereinfacht, einen typischen Spannungsverlauf mit und ohne dezentrale Einspeisung.

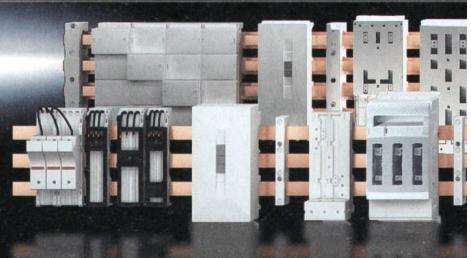
Verhältnis zu Smart Grid

Es ist deutlich geworden, wie wichtig regelbare Ortsnetztransformatoren, gerade vor dem Hintergrund der vermehrten dezentralen Einspeisung durch beispielsweise Photovoltaikanlagen, für die Spannungshaltung in Zukunft sein werden. Sie können einen wichtigen Beitrag für zukünftige Verteilnetze auf dem Weg hin zum Smart Grid leisten.

Rittal – Das System.

Schneller – besser – überall.

Stromverteilung von S bis XXL.



Résumé**Potentiel des transformateurs de distribution avec réglage de la tension en charge**

La part croissante des producteurs décentralisés suite au tournant énergétique constitue un nouveau défi. Des problèmes surgissent dans le domaine du réglage de la tension, notamment du fait de l'injection volatile des installations photovoltaïques. C'est la raison pour laquelle Arbon Energie SA a acheté un transformateur de distribution régulable lui permettant d'adapter, également sous charge, la tension dans le réseau de distribution en fonction de la situation du réseau. Les coûts supplémentaires qui découlent de la régulation de la charge sont moindres que ceux qui seraient engendrés par d'autres mesures d'adaptation du réseau. Combinés aux smart meters, ces transformateurs donnent naissance à un réseau intelligent avec réglage automatique de la tension. Les transformateurs régulables de réseau local constituent donc une nouvelle progression vers le smart grid.

Mn

Damit dies in Zukunft realisiert werden kann, bedarf es der Sollwertbestimmung für den Transformator, damit dieser in der richtigen Stufe gefahren werden kann. Die richtige Stufe bestimmt sich aus dem Spannungsverlauf in einem Strang, und zwar derart, dass dieser in keinem Fall langfristig ausserhalb der Toleranzgrenzen liegt. Dazu ist eine Spannungsmessung an kritischen Punkten nötig. Solche kritischen Punkte sind Orte dezentraler Einspeisungen und volatiler Senken. Diesem Bedürfnis nach Online-Spannungsmessung kann mit den bei der Arbon Energie AG grossflächig eingebauten Smart Metern entsprochen werden. Die Spannung eines Strangs kann so an den kritischen Punkten, etwa einem Haushalt mit Fotovoltaikanlage, jederzeit ausgelesen und ein Sollwert am Transformator bestimmt werden. Über die Stufung kann dann die entsprechende Spannung eingestellt werden.

Die Regelung des Transformators erfolgt in einer ersten Stufe durch den Energieversorger. Anhand der Messda-

ten der Smart Meter an den kritischen Punkten wird dort eine Sollspannung am Transformator ermittelt und die nötige Stufung ferngewirkt. In einem weiteren Schritt ist eine automatische Stufung denkbar. Die ausgelesenen Spannungshöhen werden mittels entsprechend parametrierter Software ausgewertet, und der Schaltbefehl folgt automatisch.

Fotovoltaik im Übermass und andere Probleme

Zukünftig wird der Ausbau der Fotovoltaik-Energie trotz verringrigerer Einspeisevergütungen weiter zunehmen. In der Folge ist es möglich, dass zu bestimmten Zeitpunkten im Verteilnetz mehr Energie produziert als verbraucht wird. Dies ist eine völlig neue Situation für die Energieversorger, die jetzt mit ihrem Netz nicht mehr Verbraucher, sondern Erzeuger wären. Hier fehlen noch Betrachtungen, wie eine effiziente Rückspisung in das MS-Netz möglich ist. Die verbesserte Regelbarkeit durch den neuen Transformator kann sich hier als

nützlich erweisen. Hierzu sind allerdings noch Untersuchungen nötig, die die Verhältnisse im und am Transformator hinsichtlich der Ströme im Transformator insbesondere auf der Niederspannungsseite beurteilen.

Weitere Problembereiche, die sich im Niederspannungsnetz ergeben und die daher auch im Kontext von regelbaren Ortsnetztransformatoren behandelt werden müssen, sind: Auswirkungen der Lasten und Erzeuger im Netz, Oberschwingungen, der Blindleistungshaushalt und die Frequenzstabilität. Zum Letzteren ist besonders ein Punkt zu nennen, die sogenannte 50,2-Hz-Problematik. Hierbei handelt es sich um die Tatsache, dass sich momentan die meisten Solarwechselrichter bei Überfrequenz ab 50,2 Hz gleichzeitig abrupt vom Netz trennen. Dem Problem wird mit VDE-Vorschriften, die eine stufenweise Leistungsreduktion im Frequenzbereich zwischen 50,2 Hz und 51,5 Hz vorsehen, begegnet werden. Die Umrüstung der Altanlagen wird aber noch einige Zeit dauern.

Die im vorhergehenden Absatz genannten, aus Platzgründen nur angerissenen Probleme machen deutlich, dass noch viel Forschung nötig ist. Der Kauf eines regelbaren Ortsnetztransformators ist ein guter Anfang auf diesem Weg.

Angaben zum Autor

Dirk Lehmann studiert an der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen in Aachen Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Elektrische Energietechnik. Er absolvierte ein Praktikum bei der Arbon Energie AG und war dort in der Netzberechnung tätig.

dirk.lehmann1@rwth-aachen.de

Anzeige

