

Einsatz Elektronisch Regelbarer 10kV-/20kV-Ortsnetztransformatoren (ERT) zur Einhaltung des Spannungsbandes sowie der Energieflussoptimierung im Smart Grid

Jonas Claus*, Günter Schulz, Frank Schalow, Wolfgang Frey

ct.e Controltechnology Engineering GmbH; Westring 303, 44629 Herne; 02323/925130,
claus@cte-ingenieure.de, www.cte-ingenieure.de

Sächsisch-Bayerische Starkstrom-Gerätebau GmbH; Ohmstraße 1, 08496 Neumark;
037600/83140, frank.schalow@sbg-neumark.de, www.sgb-smit.com

regionetz GmbH; Zum Hagelkreuz 16, 522249 Eschweiler; 02403 /701662,
wolfgang.frey@regionetz.de, www.regionetz.de

Kurzfassung:

Durch die zunehmende Anzahl regenerativer elektrischer Erzeugungsanlagen (EA) im Nieder- und Mittelspannungsverteilstromnetz (NS- und MS-Verteilnetz) ergeben sich veränderte Anforderungen der Spannungshaltung für die Netzbetreiber. Neben dem klassischen Netzausbau können etwa regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT) eingesetzt werden, um dieser Herausforderung zu begegnen. Einen solchen RONT als Elektronisch Regelbaren Transformator (ERT) hat die *ct.e GmbH* mit Partnern aus Industrie und Forschung entwickelt. Der ERT der jüngsten Generation erfüllt die Ecodesign-Richtlinien der *Europäischen Kommission* und hat alle normativ geforderten Prüfungen für Standardtransformatoren erfolgreich absolviert. Nach Abschluss aller Prüfungen wurde ein ERT im Mai 2017 im 20 kV-Verteilnetz der *regionetz GmbH* installiert. Den ausgewählten Netzabschnitt zeichnen sein ländlicher Charakter, Photovoltaikanlagen (PVA) im NS-Netz sowie Windkraftanlagen (WKA) und eine Biogasanlage (BGA) im MS-Netz aus.

Die Felderprobung hat gezeigt, dass der ERT seiner Aufgabe der Spannungsanpassung erfolgreich nachkommt. Die aufgetretenen Spannungsabweichungen konnten primär auf eine erhöhte regenerative Einspeisung bei Schwachlast zurückgeführt werden, die eine Spannungsabsenkung erforderlich machten. Grundsätzlich ist zwischen einer Einspeisung im NS- oder im MS-Netz als Ursache für Spannungsabweichungen zu unterscheiden. Beide Varianten können jedoch durch den ERT ausgeregelt werden. Treten Spannungsabweichungen unsymmetrisch auf, so lassen sich die betroffenen Außenleiter mithilfe des ERT auch individuell regeln.

Das universelle Steuer- und Regelmodul (SRM) erlaubt neben der Spannungsbandeinhaltung die Einbindung des ERTs in Smart Grids zur optimalen Lenkung auftretender Energieflüsse. Ein hierfür geeignetes Lösungskonzept wird als ergänzender ERT-Anwendungsfall vorgestellt und diskutiert. Gemeinsam mit der *TU Dortmund* und der *Stadtwerke Bochum Netz GmbH* wird zu diesem Thema derzeit ein Förderprojekt im Rahmen des *Klimaschutzwettbewerbs ErneuerbareEnergien.NRW* durchgeführt. Die eingesetzten Fördermittel stammen vom *Land Nordrhein-Westfalen* und aus dem *Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 „Investition in Wachstum und Beschäftigung“* der *Europäischen Union*.

Keywords: Regelbarer Ortsnetztransformator (RONT), Smart Grid, Spannungshaltung, Energieflussoptimierung

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren ist im Rahmen der Energiewende die Anzahl der regenerativen elektrischen EA im europäischen Verbundnetz und insbesondere im deutschen Energieversorgungsnetz deutlich gestiegen. Diese Veränderung in der Energieerzeugungsstruktur und die Volatilität regenerativ eingespeister Energie stellen die Netzbetreiber vor neue Herausforderungen. Es müssen normative Grenzwerte hinsichtlich Spannungshöhe und -qualität eingehalten und eine stabile Netzführung sichergestellt werden. Während die konventionelle elektrische Energieerzeugung weitgehend zentralisiert stattfand und die Energieverteilung in einer Top-Down-Topologie erfolgte, führt die Anbindung der regenerativen EA im NS- und MS-Verteilnetz zu bidirektionalen Energieflüssen auf diesen Spannungsebenen. Abhängig von der jeweiligen Last- und Erzeugungssituation stellt sich in dem zugehörigen Netzabschnitt die Spannung ein. Eine wichtige Aufgabe des Netzbetreibers besteht darin, die Spannung innerhalb seines Netzes in den zulässigen Grenzen zu halten. Hierzu ist eine Ertüchtigung des Verteilnetzes erforderlich. Konventionelle Maßnahmen sehen einen Leitungsaustausch zur Vergrößerung der Leiterquerschnitte vor. Dies bewirkt eine Verringerung der Spannungsfälle entlang des Übertragungsweges und begrenzt so die Spannungsabweichungen vom Sollwert. Alternativ können anstelle herkömmlicher Verteilnetztransformatoren, RONT, wie beispielsweise der von ct.e entwickelte ERT, eingesetzt werden. Diese bieten die Möglichkeit, die Spannung im NS-Netz innerhalb bestimmter Grenzen zu variieren und somit Grenzwertverletzungen zu vermeiden.

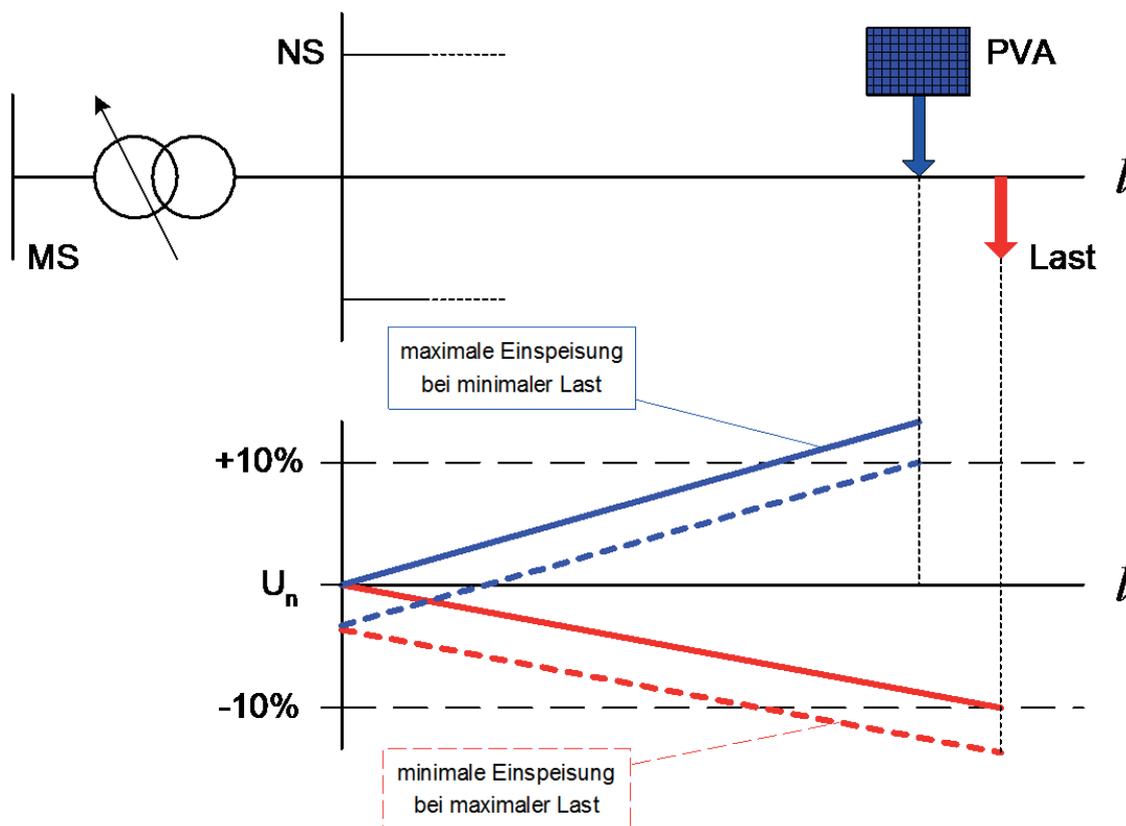


Abbildung 1: Spannungshaltung mithilfe regelbarer Transformatoren

Abbildung 1 zeigt die Wirkungsweise eines RONT beim Einsatz zur Spannungshaltung. Es ist ersichtlich, dass durch eine Anpassung der Spannung am Transformator trotz des Spannungsfalls über die Leitungslänge die Spannung an allen Punkten innerhalb des zulässigen Spannungsbandes gehalten werden kann. Der konventionelle Netzausbau würde dies durch eine Verringerung des Winkels der aufgetragenen Spannung erreichen.

Außerdem kann es zu Rückspeisungen aus dem NS- in das MS-Netz sowie einer Übertragung der Energie über große Distanzen zu einem entfernten Verbraucher kommen. Mit zunehmenden Übertragungsdistanzen und der Anzahl der Spannungstransformationen steigen die Übertragungsverluste. Um dem entgegenzuwirken, ist eine lokale Nutzung der eingespeisten Energie zielführend. In einem aktuellen Forschungsprojekt zur Energieflussoptimierung im Smart Grid unter Einsatz eines ERT und weiterer smarter Komponenten, wird gemeinsam mit der *Stadtwerke Bochum Netz GmbH* und dem *Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³)* der *TU Dortmund* eine Regelstrategie entworfen, die es erlaubt, die Energieflüsse im Smart Grid optimal zu lenken. Diese soll anschließend in einem realen Verteilnetzabschnitt der *Stadtwerke Bochum Netz* in Anwendung gebracht sowie hinsichtlich ihrer Wirksamkeit geprüft werden. Dafür sind detaillierte Systemanalysen, rechnergestützte Simulationen und komplexe Stabilitätsbetrachtungen erforderlich. Durch die energieflussorientierte Regelung der Verteilnetzkomponenten soll insbesondere der Nutzungsgrad der regenerativen Erzeuger erhöht und somit der Anteil der regenerativ eingespeisten Energie im deutschen Energiemix vergrößert werden. Darüber hinaus sollen die Übertragungsverluste gesenkt werden. Dies hat direkte und indirekte Auswirkungen auf den Ausstoß von CO₂ und anderen klimawirksamen Emissionen.

2 Elektronisch Regelbarer Transformator

Seit 2003 hat *ct.e* in mehreren Forschungs- und Entwicklungsprojekten den ERT entwickelt. Nachdem die Funktionalität des Prinzips nachgewiesen [1] und ein vorserienreifer 10 kV-Prototyp realisiert und erprobt wurde [2], ist eine Kleinserie von fünf Transformatoren im Verteilnetz der *RWE Rhein-Ruhr* im Regelbetrieb eingesetzt und validiert worden [3]. Hierauf aufbauend hat *ct.e* in einem durch *progres.nrw* und den *Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung* geförderten Projekt eine serienreife Variante des ERT zum Einsatz in 10 kV- und 20 kV-Netzen entwickelt [4].

2.1 Wirkprinzip

Das Wirkprinzip von RONTs basiert auf einer Anpassung des Übersetzungsverhältnisses des Transformators. Der ERT variiert hierzu die Windungszahl auf der Oberspannungsseite des Transformators. Herkömmliche Verteilnetztransformatoren verfügen über Stufenschalter, welche es ermöglichen, das Übersetzungsverhältnis des Transformators im freigeschalteten Zustand anzupassen. Im ERT werden hingegen drei leistungselektronische Umschalteneinrichtungen, sogenannte Kompaktleistungsmodul (KLM), eingesetzt, welche eine rückwirkungsarme Umschaltung unter Last ermöglichen. Die KLM sind in dem Transformator-kessel integriert und führen bei Bedarf die Umschaltungen der Transformatorstufe aus.

Neben den KLM verfügt der ERT über ein universell einsetzbares Steuer- und Regelmodul (SRM). In diesem laufen die Messdaten aus dem Netz zusammen und werden als Eingangsgrößen des hinterlegten Regelalgorithmus verwendet. Der prinzipielle Aufbau des ERT-Systems sind in Abbildung 2 dargestellt.

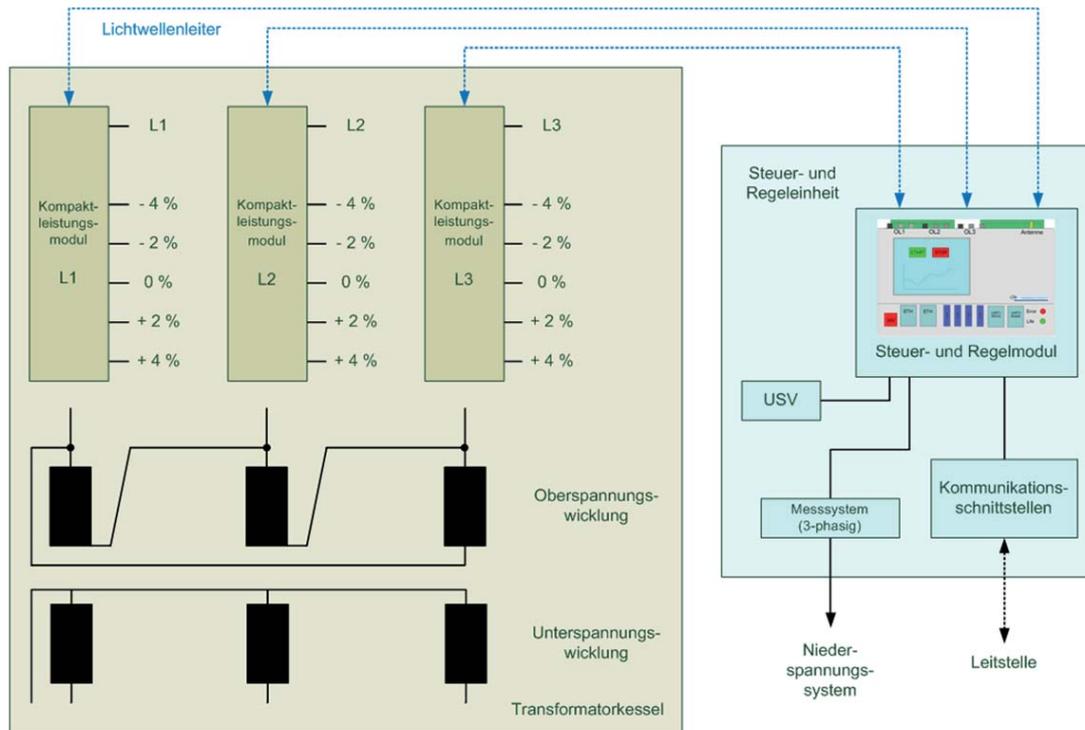


Abbildung 2: ERT-Systemaufbau

Erfordert die Netzsituation eine Umschaltung, wird dies vom SRM erkannt und gemäß hinterlegter Regelstrategie eine Umschaltung initiiert. Eine Umschaltung erfolgt, indem das SRM via Lichtwellenleiter einen entsprechenden Umschaltbefehl an die KLM der betroffenen Außenleiter sendet. Daraufhin ermittelt jedes KLM zunächst den idealen Schalt Augenblick in seiner Phase, um eine leistungsfreie Umschaltung zu generieren. Anschließend werden die KLM nacheinander von der aktuellen in die Zielstufe umgeschaltet. In Abbildung 3 wird eine ERT-Umschaltung anhand eines Ablaufplans dargestellt.

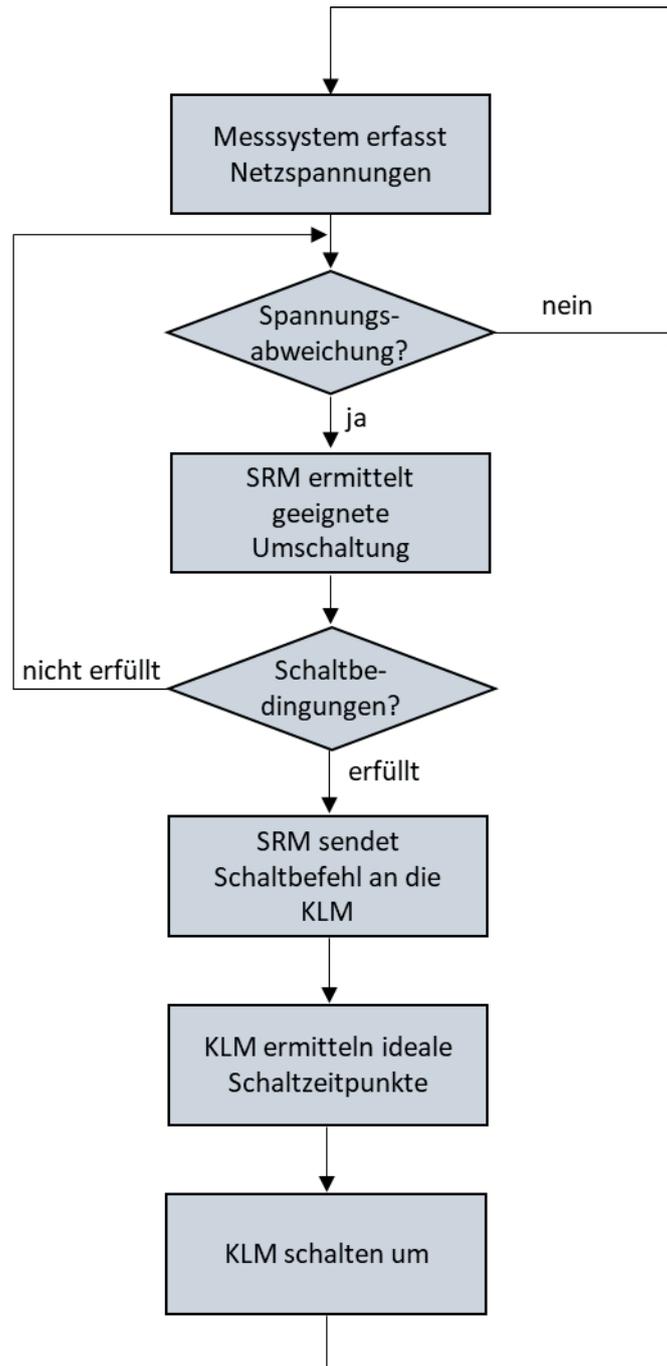


Abbildung 3: Ablaufplan einer ERT-Umschaltung

Durch die leistungsfreie Umschaltung und einer Stufung der Anzapfungen in 2 %-Schritten treten keine Rückwirkungen im Netz auf. So ist der ERT in der Lage, die Unterspannung unter Last in den Stufen -4% | -2% | 0% | $+2\%$ | $+4\%$ der Nennspannung zu regeln. Darüber hinaus überträgt das SRM täglich die dokumentierten Regleraktivitäten und im Bedarfsfall aktuelle Zustandsdaten via GSM-Modul an den Betreiber. Zusätzlich sind eine Anbindung weiterer Peripherie, eine Integration in übergeordnete Systeme und eine Fernparametrierung möglich. Daher bietet es diverse Einsatzmöglichkeiten und kann als zentrale Recheneinheit bei der Energieflussoptimierung im Smart Grid, zur Interaktion mit weiteren Netzkomponenten und zur Kommunikation mit der Netzleitstelle verwendet werden.

2.2 Prüfungen

Der ERT und insbesondere die KLM sind diversen Tests unterzogen worden. Es wurden Untersuchungen im Klimaschrank zur Verifizierung des zulässigen Temperaturbandes durchgeführt, die idealen Umschaltzeitpunkte mit einem speziellen 2 kV-Prüfsystem sowie im 20 kV-Prüffeld getestet und Stehwechselfeldspannungsprüfungen absolviert. Die hierbei in Anwendung gebrachten Prüfspannungen entsprechen denen unregelmäßiger Transformatoren.

Weiterhin ist insbesondere die Durchführung der Blitzstoßspannungsprüfung zu erwähnen, da diese die maximalen Isolationsanforderungen an ERT und KLM stellt. Die Prüfung ist im Prüffeld der *Sächsisch-Bayerischen Starkstrom-Gerätebau GmbH* durchgeführt worden. Der Scheitelwert der Prüfspannung wurde gemäß *DIN EN 60076-3* zu $\hat{U} = 125 \text{ kV}$ gewählt. [5] In Abbildung 4 sind die erfassten Messwerte in einer der Schaltstufen zu sehen.

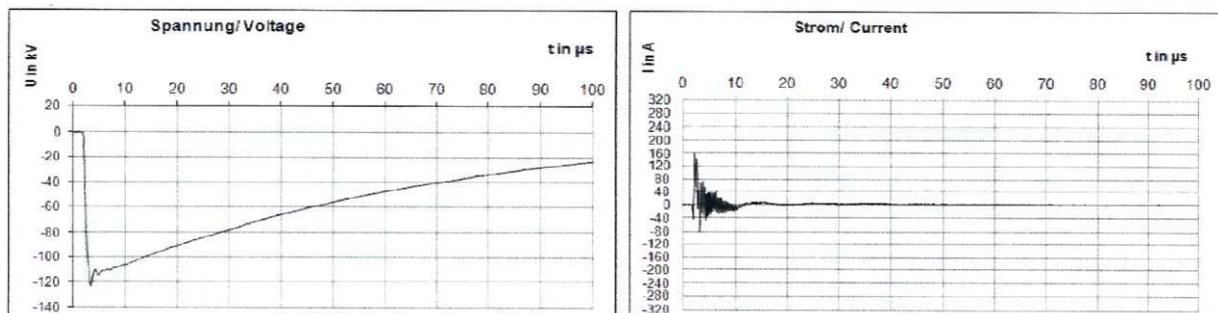


Abbildung 4: Spannungs- und Stromverläufe der Blitzstoßspannungsprüfung

In der Norm wird die Durchführung der Blitzstoßspannungsprüfung für die Hauptschalterstellung des Stufenschalters (0 %-Stufe des Transformators) vorgeschrieben. [5] Darüber hinausgehend wurde die Prüfung am ERT jedoch in jeder Schaltstufe bei voller Prüfspannung von 125 kV durchgeführt und erfolgreich bestanden.

3 Erprobung im Verteilnetz der regionetz GmbH

Im Mai 2017 wurde ein ERT mit einer Bemessungsleistung von 400 kVA im 20 kV-Verteilnetz der *regionetz GmbH* installiert, um die Funktionalität des Systems im realen Netzbetrieb zu erproben.

3.1 Charakteristika des Verteilnetzabschnitts

Der Verteilnetzabschnitt der *regionetz GmbH*, in dem die Erprobung des ERT erfolgt, zeichnet sich insbesondere durch eine ländliche Versorgungsstruktur der Region aus. Dies drückt sich in einem weitläufigen Niederspannungsabschnitt mit geringer Netzanschlussdichte und langen Leitungswegen aus. Mittelspannungsseitig befinden sich Windkraftanlagen (WKA) mit einer installierten Leistung von 4 MVA sowie eine Biogasanlage (BGA) mit einer installierten Leistung von 1,2 MVA in räumlicher Nähe des ERT. In dem Niederspannungsabschnitt der über den Transformator angebunden ist, befinden sich 72 Wohneinheiten sowie Photovoltaikanlagen (PVA) mit einer Peakleistung von 191 kVA_p. Abbildung 5 zeigt eine abstrahierte Darstellung des Verteilnetzabschnittes in Form eines Liniendiagramms.

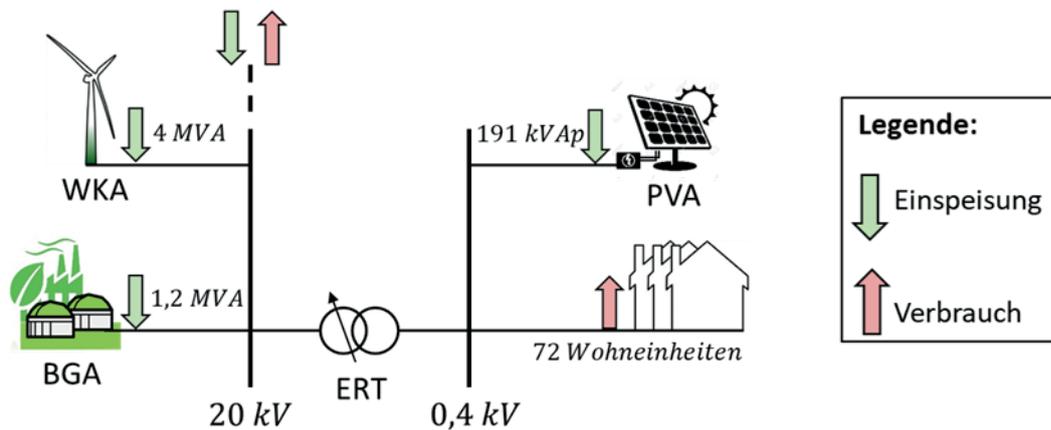


Abbildung 5: Liniendiagramm des Verteilnetzabschnittes

3.2 Einhaltung der Spannungsanforderungen

Die *DIN EN 50160* benennt Anforderungen an bestimmte Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Hinsichtlich der Spannungshöhe ist vorgeschrieben, dass in 95 % der Zeit eine Abweichung von maximal $\pm 10\%$ und nie eine von mehr als $+10\%$ oder -15% vom Spannungssollwert auftreten darf. Darüber hinaus ist festgelegt, dass die Unsymmetrie der Spannung in 95 % der Zeit maximal 2 % betragen darf. [6] Diese Normvorgaben haben als Grundlage beim Entwurf der ERT-Regelstrategie gedient. Die Erprobung im Verteilnetzabschnitt der *regionetz GmbH* hat sich hierbei auf die Einhaltung des Toleranzbandes von $\pm 10\%$ um den Spannungssollwert konzentriert. Ein Ausgleich von Unsymmetrien im Niederspannungsnetz ist mit dem ERT zwar möglich, wurde in diesem Fall jedoch nicht realisiert.

Während der Erprobung des ERT sind insbesondere Spannungserhöhungen und daraus resultierende Absenkungen der Transformatorstufe erforderlich gewesen. Die Ursache hierfür lässt sich im Wesentlichen auf eine hohe regenerative Energieeinspeisung bei geringem Verbrauch zurückführen. Hierbei lässt sich zwischen der regenerativen Einspeisung im Mittel- und Niederspannungsnetz als Ursache unterscheiden.

3.2.1 Einspeisung im Mittelspannungsnetz

Bei erhöhter Einspeisung im MS-Netz und geringem lokalen Verbrauch ist ein Spannungsanstieg in der MS die Folge, die sich über den Transformator auf das NS-Netz überträgt. Damit die EA Energie in das Netz einspeisen können, heben Sie die Spannung am Einspeisepunkt an. Durch die geringe lokale Last muss die Energie über weite Strecken transportiert werden, wodurch entlang der Leitung Spannungsfälle entstehen. Nimmt man an, dass die Spannung an den Umspannanlagen zum Hoch- oder Höchstspannungsnetz dem Sollwert entspricht, ergibt sich die Spannung, mit der die EA einspeisen aus, dem Sollwert zuzüglich des Spannungsfalls zwischen EA und Umspannwerk.

Im Rahmen der Felderprobung konnte die Fähigkeit des ERT zum Ausgleich von durch EA im MS-Netz hervorgerufene Spannungserhöhung nachgewiesen werden. Abbildung 6 stellt die Einspeise- und Lastsituation sowie die gemessenen NS-Verläufe am 12.10.2017, zwischen 02:00 Uhr und 03:00 Uhr dar. Bedingt durch die Uhrzeit war die Last im NS-Netz minimal und die PVA haben nicht eingespeist. Zugleich haben jedoch sowohl die WKA, als auch die BGA

ihre maximale Leistung bereitgestellt. Dementsprechend stieg die Spannung im Mittelspannungsnetz an, was sich über den Transformator auf das Niederspannungsnetz übertragen hat. Infolge der Spannungsüberhöhung hat das SRM eine Umschaltung des ERT initiiert und die KLM haben die Transformatorstufe daraufhin um 2 % gesenkt. Während die mittlere Spannung der drei Phasen vor der Umschaltung bei etwa 234 V lag, wurde sie durch die Umschaltung auf etwa 229 V gesenkt und somit die Abweichung vom Sollwert reduziert.

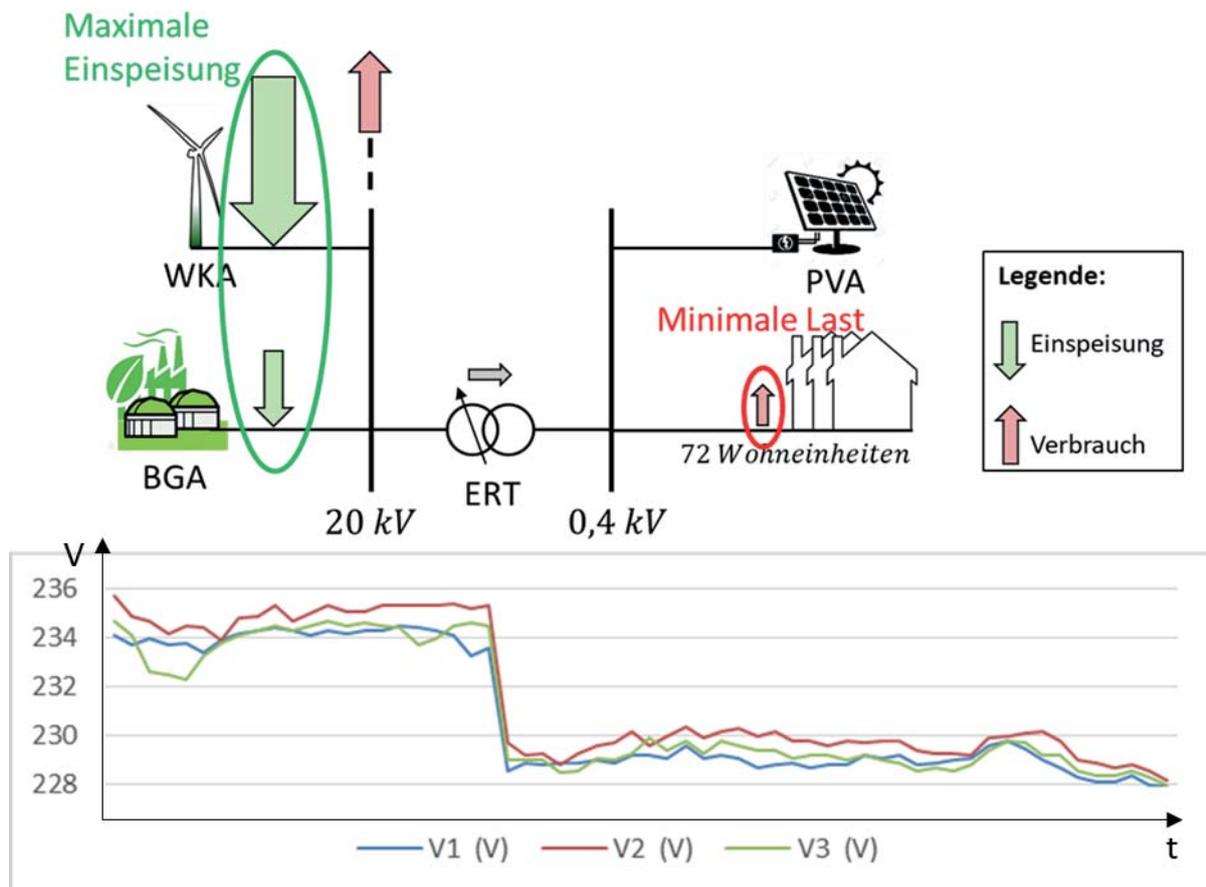


Abbildung 6: Einspeise-Last-Situation und Spannungsverlauf bei erhöhter Einspeisung im Mittelspannungsnetz

3.2.2 Einspeisung im Niederspannungsnetz

Erfolgt eine erhöhte regenerative Einspeisung im Niederspannungsnetz, während zugleich ein geringer Verbrauch im Netzabschnitt vorliegt, und ggf. darüber hinaus noch zusätzlich im Mittelspannungsnetz eine Einspeisung erfolgt, ergibt sich ebenfalls eine niederspannungsseitige Spannungsüberhöhung. Durch die Einspeisung der Energie durch die PVA wird die Spannung am Einspeisepunkt angehoben. Dies entspricht dem blau dargestellten Spannungsverlauf in Abbildung 1. In Abhängigkeit des Netzanschlusses der PVA gilt dies für eine oder alle drei Phasen. Durch den geringen lokalen Verbrauch, erfolgt darüber hinaus eine Rückspeisung aus dem Nieder- in das Mittelspannungsnetz. Daraus ergibt sich, vergleichbar zu dem in 3.2.1 beschriebenen Sachverhalt, eine zusätzliche Spannungserhöhung.

Der ERT konnte während der Erprobung ebenfalls den erfolgreichen Ausgleich von durch EA im NS-Netz hervorgerufene Spannungserhöhung demonstrieren. Abbildung 7 stellt die Einspeise- und Lastsituation sowie die gemessenen NS-Verläufe am 18.10.2017, zwischen

12:00 Uhr und 13:00 Uhr dar. Durch die Einspeisung der PVA wurde der geringe Leistungsbezug der Wohneinheiten gedeckt und es erfolgte eine Rückspeisung in die Mittelspannung. Darüber hinaus wurde transformatornah durch die WKA und die BGA Energie in das Mittelspannungsnetz eingespeist. Als Folge der Spannungsüberhöhung hat das SRM auch in diesem Fall die Transformatorstufe um 2 % gesenkt und damit den Spannungs-Istwert dem Sollwert angenähert. Dem zeitlichen Verlauf der Spannung in Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass die Spannung in Phase 1 höher war, als in den beiden anderen Außenleitern. Das ist auf Unsymmetrien zwischen Einspeisung und Verbrauch im Niederspannungsnetz zurückzuführen. Diese Unsymmetrien können durch einphasig angeschlossene PVA oder unterschiedliche Auslastung der Phasen durch Verbraucher hervorgerufen werden. Um dem entgegenzuwirken, verfügt der ERT über die Möglichkeit die Spannung phasenweise gesondert zu regeln, was in dieser Erprobung jedoch nicht realisiert wurde. Durch die separate Regelung der Phasen besteht die Möglichkeit, die Spannungsqualität nicht nur hinsichtlich der Spannungshöhe, sondern auch in Bezug auf Ihre Symmetrie sicherzustellen.

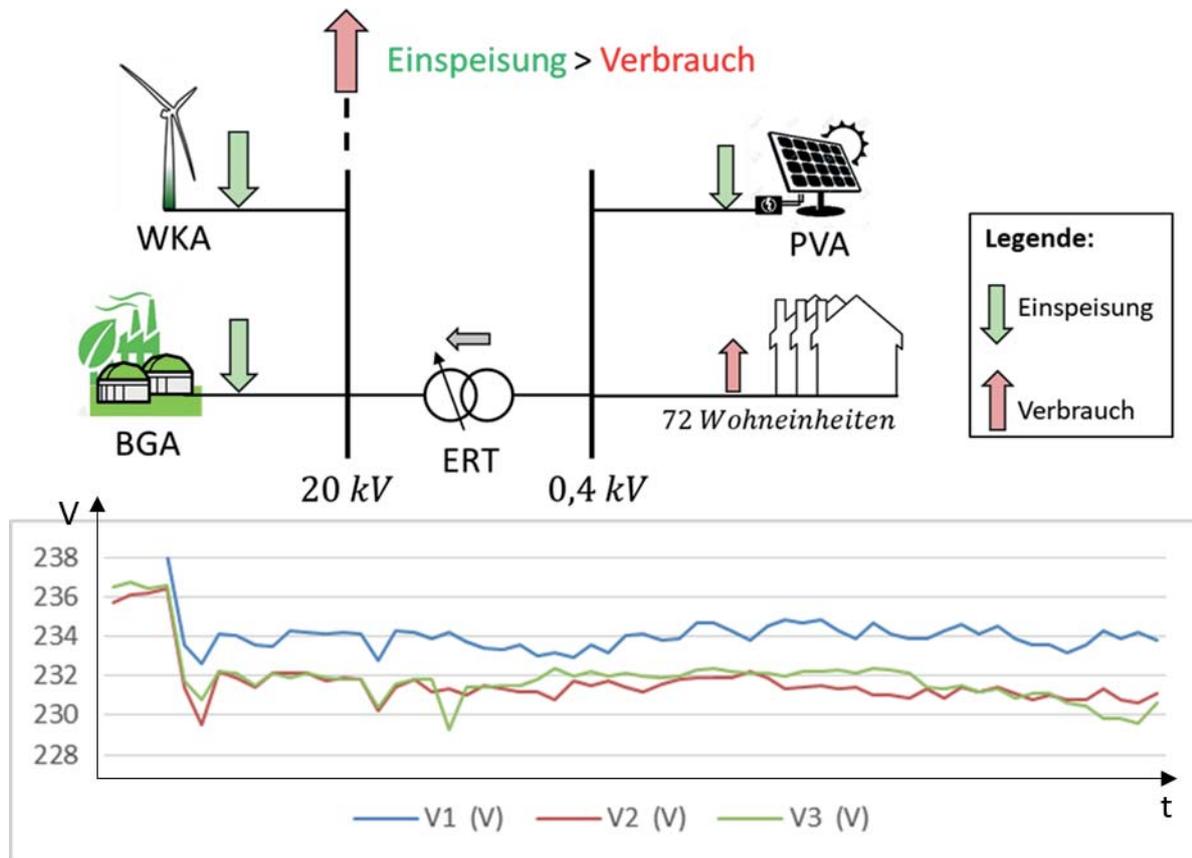


Abbildung 7: Einspeise-Last-Situation und Spannungsverlauf bei erhöhter Einspeisung im Niederspannungsnetz

4 Energieflussoptimierung im Smart Grid

Seit Anfang 2018 wird von ct.e in einem kooperativen Forschungsprojekt mit der *Stadtwerke Bochum Netz GmbH* und dem *ie³-Institut der TU Dortmund* der Einsatz des ERT in einem Smart Grid zur Optimierung der Niederspannungsenergieflüsse untersucht. Das Projekt trägt den Titel „Beitrag zur optimalen Lenkung der Energieflüsse in einem von regenerativen Energiequellen und Speichern geprägten kleinen Verteilnetzabschnitt mithilfe elektronisch regelbarer Verteilnetztransformatoren sowie Netzzustandssimulatoren zur Bildung eines

Smart Grids und Erreichung der Klimaziele“. Das Vorhaben wird im Rahmen des *Klimaschutzwettbewerbs Erneuerbare Energien.NRW* gefördert. Die eingesetzten Fördermittel stammen vom *Land Nordrhein-Westfalen* und aus dem *Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 „Investition in Wachstum und Beschäftigung“* der Europäischen Union. Das zentrale Projektziel besteht in der Senkung der CO₂-Emissionen. Dies soll durch eine Steigerung der Aufnahmekapazität des Netzes für regenerative EA und die Verringerung der Übertragungsverluste durch lokale Nutzung der eingespeisten Energie erfolgen.

Zur Erreichung der voranstehend genannten Ziele sieht das Projekt vor, dass ein geeigneter Verteilnetzabschnitt im Versorgungsnetz der *Stadtwerke Bochum Netz GmbH* mit einem ERT und weiteren smarten Komponenten (u.a. Netzspeicher) ausgestattet wird. Durch die Aufnahme von Messdaten an zustandsrelevanten Messpunkten soll eine Online-Netzzustandssimulation (State Estimation) erfolgen, anhand derer die aktuellen Energieflüsse im Netzabschnitt deutlich werden. Die gesammelten Daten werden an den ERT übermittelt, welcher diese auswertet und mithilfe eines multivariablen Mehrgrößenreglers geeignete Netzanpassungen ermittelt. Hierbei nimmt das SRM eine zentrale Rolle ein, da es als Recheneinheit die zusammengetragenen Daten auswertet und zugleich das Bindeglied zwischen dem NS-Netz und der Netzleitstelle darstellt. Die am SRM ausgewerteten Netzdaten werden inklusive ggf. erforderlicher Handlungsempfehlungen an die Netzleitstelle übermittelt.

Das Projekt ist im Januar 2018 angelaufen. Der ausgewählte Netzabschnitt wird derzeit in eine Simulationsumgebung überführt, um aussagefähige Netzknoten zur Erfassung der Datenbasis für die State Estimation zu ermitteln. Zur Validierung der Simulationsergebnisse werden darüber hinaus Messgeräte im Netz installiert. Durch die Simulation real aufgetretener Netzsituationen können die Rechenergebnisse mit den realen Messwerten verglichen werden.

Weiterhin wird die Integration des ERT in das Netz vorbereitet. Die Inbetriebnahme des ERT ist für Juni 2018 geplant. Zuvor werden zunächst die Komponenten gefertigt und einer gesonderten Stückprüfung unterzogen. Anschließend erfolgen die Integration in den Transformator und ein abschließender Systemtest.

Außerdem werden die Aufgaben bzw. Dienste der interagierenden, im Projekt eingesetzten Komponenten sowie ihre Schnittstellen definiert. Dies dient zur Ermittlung geeigneter Kommunikationsstrukturen sowie zur Festlegung der auszutauschenden Daten und ihrer Formate.

5 Zusammenfassung

Die mit der Energiewende einhergehenden Veränderungen in der Energieversorgungsstruktur stellen Verteilnetzbetreiber vor neue Herausforderungen und machen Netzausbaumaßnahmen erforderlich. Neben dem konventionellen Netzausbau kann alternativ ein RONT (z.B. der ERT) zur Einhaltung des Spannungsbandes eingesetzt werden.

Der ERT hat alle normativ geforderten Prüfungen für Standardtransformatoren und insbesondere eine erweiterte Blitzstoßspannungsprüfung absolviert und erfolgreich bestanden. Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen wie etwa Temperaturtests durchgeführt, um den Betriebsbedingungen eines Transformators Rechnung zu tragen. Das System wurde zur Felderprobung in einem Netzabschnitt der *regionetz GmbH* integriert. Im Rahmen dessen wurde nachgewiesen, dass das System ein wirksames Mittel gegen

Spannungsabweichungen im NS-Netz darstellt. Es ist besonders zu beachten, dass sowohl Spannungsabweichungen durch regenerative EA im Mittel- als auch im Niederspannungsnetz ausgeregelt werden können. Darüber hinaus hat die Erprobung gezeigt, dass neben Abweichungen der Spannungshöhe auch Unsymmetrien im Niederspannungsnetz auftreten. Der ERT bietet die Möglichkeit, jede Phase gesondert zu regeln, um so den Unsymmetrien im Niederspannungsnetz entgegenzuwirken.

Weiterhin wird in einem aktuellen Forschungsprojekt der Einsatz des ERT in einem Smart Grid zur optimalen Lenkung der Energieflüsse betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein gefördertes Kooperationsprojekt mit der *Stadtwerke Bochum Netz GmbH* und dem *ie³-Institut der TU Dortmund*. Die Förderung erfolgt im Rahmen des *Klimaschutzwettbewerbs Erneuerbare Energien.NRW* unter Einsatz von Mitteln des *Landes Nordrhein-Westfalen* und aus dem *Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 „Investition in Wachstum und Beschäftigung“* der *Europäischen Union*. Durch eine online Netzzustandssimulation und die Ableitung geeigneter Netzeingriffe mithilfe multivariabler Mehrgrößenregler soll die Aufnahmekapazität der Verteilnetze für regenerative EA gesteigert und die Übertragungsverluste reduziert werden. Hieraus resultiert eine Reduktion der CO₂-Emissionen und somit ein Beitrag zur Erreichung der Klimaziele.

Förderung

Das Projekt „Beitrag zur optimalen Lenkung der Energieflüsse in einem von regenerativen Energiequellen und Speichern geprägten kleinen Verteilnetzabschnitt mithilfe elektronisch regelbarer Verteilnetztransformatoren sowie Netzzustandssimulatoren zur Bildung eines Smart Grids und Erreichung der Klimaziele“ wird im Rahmen des *Klimaschutzwettbewerbs Erneuerbare Energien.NRW* gefördert. Die eingesetzten Fördermittel stammen vom *Land Nordrhein-Westfalen* und aus dem *Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) 2014-2020 „Investition in Wachstum und Beschäftigung“* der *Europäischen Union*.



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

6 Literatur

- [1] G. Schulz, „Innovative Methode zur elektronischen Einstellung der Versorgungsspannung in Ortsnetzen mit Solaranlagen,“ Vortrag. Graz, Feb. 16 2012.
- [2] G. Schulz, T. Christ, and M. Heinz, „Erfahrungen beim Einsatz eines elektronisch regelbaren 10kV-Verteilnetztransformators in Ortsnetzen mit dezentraler Einspeisung aus Solaranlagen,“ in *VDE Kongress 2010 Leipzig: E-Mobility ; Technologien, Infrastruktur, Märkte ; Kongressbeiträge ; 8. - 9. November 2010, Congress Center Leipzig*, 2010.
- [3] G. Schulz, „Innovative Methode zur elektronischen Einstellung der Versorgungsspannung in Ortsnetzen mit Solaranlagen,“ in *Alternativen für die Energiezukunft Europas: 12. Symposium Energieinnovation, 15. - 17. Februar 2012*, U. Bachhiesl, Ed., Graz: Verl. der TU Graz, 2012.

- [4] J. Fröhner, G. Schulz, J. Claus, and M. Lemkens, "Improving Power Quality by a 10 / 20 kV / 0.4 kV Voltage Regulated Distribution Transformer using Semiconductor Switching Devices," in *Proceedings of International ETG Congress 2015: Die Energiewende - blueprints for the new energy age : date: 17-18 Nov. 2015*, 2015.
- [5] *Leistungstransformatoren – Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft*, DIN EN 60076-3, 2014.
- [6] *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.:2010*, DIN EN 50160, 2011.