

# Innovative Methode zur elektronischen Einstellung der Versorgungsspannung in Ortsnetzen mit Solaranlagen

Günter Schulz / ct.e Controltechnology Engineering GmbH in Herne / [schulz@cte-ingenieure.de](mailto:schulz@cte-ingenieure.de)

## Kurzfassung

Die Anzahl von Photovoltaik-Anlagen zur Stromerzeugung, die in Niederspannungs-Ortsnetze der öffentlichen Stromversorgung einspeisen, hat seit Inkrafttreten des Gesetzes für den vorrangigen Anschluss von Erneuerbaren Energien im Jahr 2000 (EEG) sowie den zwischenzeitlich verabschiedeten Novellen 2004 und 2009 erheblich zugenommen. Um alle auch zukünftig zu erwartenden EEG-Anschlüsse ohne negative Auswirkungen auf die Spannungsqualität realisieren zu können, ist häufig ein Netzausbau zu Lasten des Netzbetreibers erforderlich. Auf Basis von zwei vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten F&E-Projekten zur elektronischen Einstellung der Netzspannung in Ortsnetzen mit dezentraler Einspeisung aus Solaranlagen wurde der Prototyp eines elektronisch regelbaren 10 kV-Ortsnetztransformators von der ct.e GmbH in Herne entwickelt und erprobt. Dies geschah in Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern aus den Häusern RWE Rhein-Ruhr Verteilnetz GmbH in Wesel und Starkstrom-Gerätebau GmbH in Neumark/Sachsen. Die vorgestellte Methode stellt eine kostengünstige Alternative zum primärtechnischen Netzausbau dar, die nach Erreichen der Marktreife den finanziellen Aufwand für die bedarfsgerechte Netzanpassung begrenzen und zugleich technische Verbesserungen herbeiführen kann.[1]

## Abstract

The number of photovoltaic (PV)-generators in public distribution grids has significantly increased due to financial incentives for photovoltaics by German law (EEG). To guarantee the tolerances for the voltage, a grid expansion is sometimes necessary for the utility's. In two R&D-Projects (from North Rhine-Westphalia co-financed) for an electronic voltage regulation of decentralized feeding from PV, was developed a 10kV-prototype of an electronic regulated transformer. This visualised method shows a cost-effective alternative in relation to conventional grid expansion, when this system will reach marketability.

## 1 Einleitung

Im Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich (EEG-Novelle von 2009) wurden die Anreize zu einer Breitereinführung von Anlagen zur Stromerzeugung aus regenerativen Energien gegenüber den bisherigen gesetzlichen Regelungen (EEG 2000 und EEG-Novelle 2004) noch einmal deutlich erhöht. Über einen weiteren deutlichen Ausbau der Erneuerbaren Energien im Strombereich soll deren Anteil bis 2020 auf mindestens 30 % der gesamten Stromversorgung steigen. Die EEG-Prognose der vier Übertragungsnetzbetreiber sowie des Leipziger Instituts für Energie aus September 2010 zeigt **Bild 1**. Nach 2020 soll deren Anteil kontinuierlich weiter erhöht werden. Netzbetreiber sind verpflichtet, Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien und Grubengas unverzüglich und vorrangig an ihr Netz anzuschließen. Diese Pflicht besteht auch dann, wenn die Abnahme des Stromes erst durch Optimierung, Verstärkung oder Ausbau des Netzes möglich wird.[2]

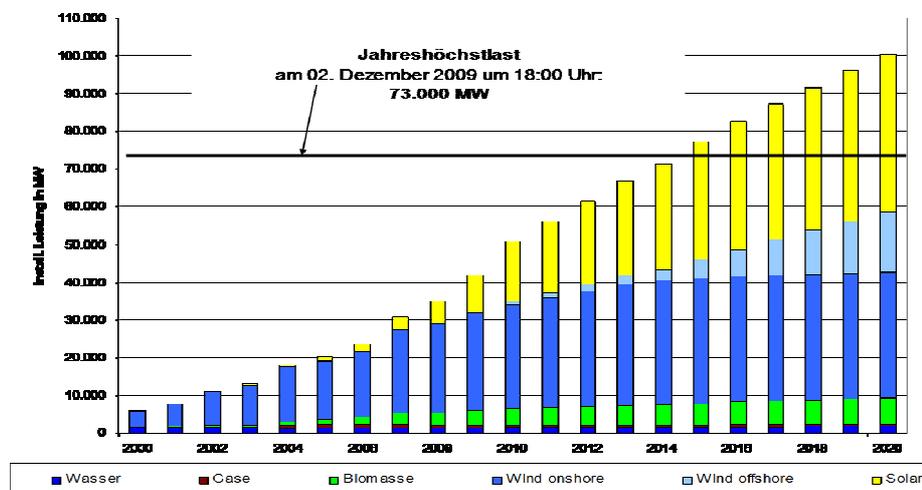


Bild 1: EEG-Prognose (September 2010)

Die Stromnetzbetreiber setzen die gesetzlichen Vorgaben zum Anschluss dezentraler Einspeiser am gesamtwirtschaftlich günstigsten Verknüpfungspunkt konsequent um. Große Anlagen zur Stromerzeugung aus regenerativen Energien werden in der Regel weitab der Lastschwerpunkte errichtet, so dass in den nächsten Jahren eine nennenswerte Vergrößerung der mittleren Transportentfernung in den Stromnetzen mit entsprechenden Folgen für die Auslastung der Netze eintreten wird. Im EEG wurde – auch für den Fall, dass mehrere Erzeugungsanlagen mit einer Anlagenleistung bis 30 kW an einen Niederspannungsstrang angeschlossen werden – der Hausanschluss als günstigster Netzanschlusspunkt festgelegt. Ein gegebenenfalls erforderlicher Netzausbau erfolgt zu Lasten des Netzbetreibers.

Gleichzeitig sind die Anforderungen der Netzkunden an die Versorgungsqualität, besonders durch den vermehrten Anschluss sensibler Verbrauchsgeräte, deutlich gestiegen. Für die Netzbetreiber besteht die Herausforderung darin, die Anpassung der Netzinfrastruktur an die erhöhten Anforderungen mit möglichst geringen Mehrkosten für die Netzkunden zu bewältigen.

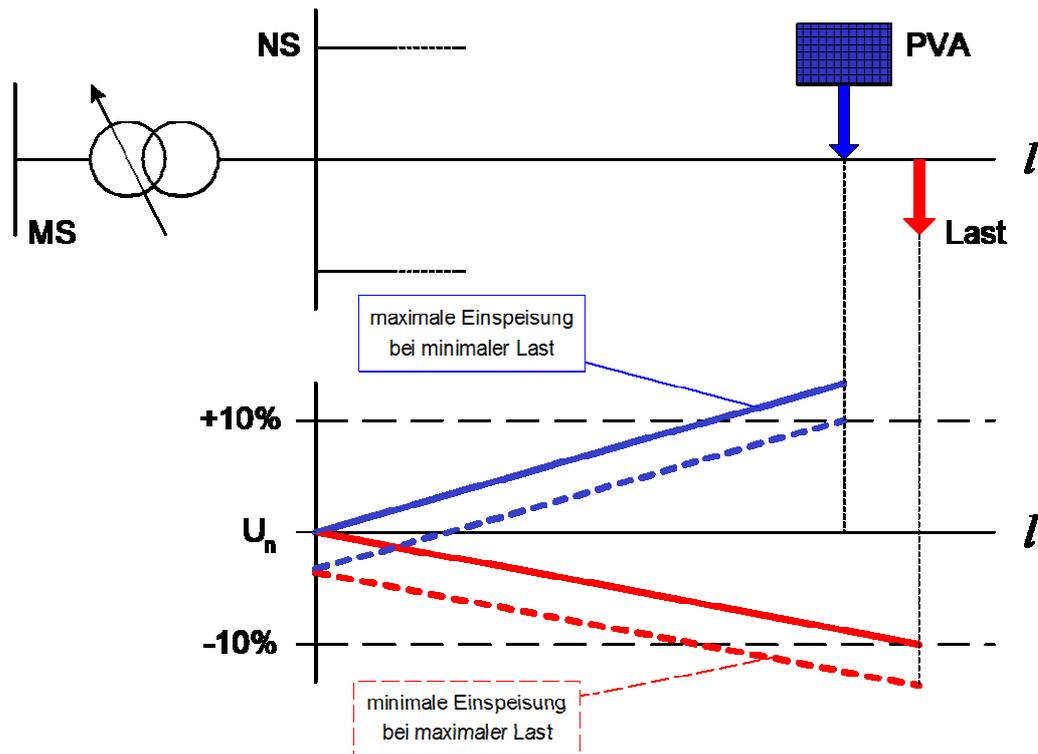
Durch die Zunahme dezentraler Einspeisung aus regenerativen Stromerzeugungsanlagen und aus Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung entwickeln sich die Stromnetze auch in den unteren Spannungsebenen mehr und mehr zu einer Energiedrehscheibe, die die eingespeiste elektrische Energie jederzeit aufnehmen soll und – sofern die Abnahme elektrischer Energie im betroffenen Abschnitt geringer ist – diese Energie sogar in die nächst höhere Spannungsebene einspeist.

Die heutigen Stromnetze sind in ihrer Funktionsweise auf den Lastfluss vom Kraftwerk zum Verbraucher dimensioniert. Das Qualitätsmanagement beim Netzbetreiber stellt sicher, dass die Qualitätskriterien für die Spannungsqualität entsprechend DIN EN 50160 an allen Kundenanschlüssen des Netzes eingehalten werden. Die neue Herausforderung an die Stromnetze besteht darin – auch unter Berücksichtigung von Energieflüssen in alle Richtungen innerhalb der Spannungsebenen und über die Umspannebenen hinweg die Einhaltung der Spannungsqualität sicherzustellen und dabei die Kosten für den in vielen Fällen erforderlichen Netzausbau möglichst gering zu halten. Neben den Kosten für die Netzausbaumaßnahmen bindet die hohe Zahl an Neuanschlüssen von EEG-Anlagen in nennenswertem Umfang Planungsressourcen beim Netzbetreiber. Zur Prüfung des Anschlussvorhabens und der Verträglichkeit mit dem bestehenden Netz sowie der Wahl des volkswirtschaftlich günstigsten Anschlusspunktes ist üblicherweise eine aufwändige Netzberechnung erforderlich.

## 2 Spannungsbandproblematik

Wir alle nehmen es heute als selbstverständlich, dass wir Elektro-Haushaltsgeräte, Unterhaltungselektronik oder Computer nach unserem persönlichen Belieben kaufen und zu Hause an eine Steckdose anschließen können. Dies funktioniert aber nur dadurch, dass Netzbetreiber und Gerätehersteller im ständigen Kontakt normative Regeln, z.B. Europannormen, geschaffen haben und beide Seiten ihre Produkte entsprechend dimensionieren und jeweils zeitnah neue Herausforderungen in Angriff nehmen. Vor diesem Hintergrund zeichnet sich auf europäischer Ebene aktuell eine Verschärfung der Qualitätskriterien für die Spannungsqualität entsprechend EN 50160 ab. Im vorliegenden Entwurf für eine modifizierte EN 50160 sind die Anforderungen der europäischen Regulierer, wie sie im Third Benchmark Report on Power Quality und weiteren daraus entwickelten Dokumenten formuliert wurden, berücksichtigt. Der zwischen Geräteherstellern, Regulierern und Netzbetreibern einvernehmlich abgestimmte Textentwurf beinhaltet, dass die Netzbetreiber zukünftig insbesondere beim Thema Spannungsband erhöhte Anforderungen bezüglich der Einhaltung der Grenzwerte erfüllen müssen.

Nach derzeitiger Norm gilt für langsame Spannungsänderungen an allen Anschlusspunkten der Niederspannungsnetze eine Spannungstoleranz im Bereich  $\pm 10\%$  unter normalen Bedingungen, d.h. zu 95% der Zeit eines Jahres. In bestehenden Netzen ohne dezentrale Einspeisung wird die mögliche Plus-Toleranz teilweise ausgenutzt, um auch bei Starklast die zum Netzausläufer hin abnehmende Spannung innerhalb des Toleranzbereichs zu halten. Mit dem zunehmenden Anschluss von Einspeisern im Niederspannungsnetz kommt es durch die häufig und innerhalb kürzester Zeit wechselnden Einspeiseleistungen an bestimmten Stellen zeitweise zu einem erheblichen Spannungsanstieg, besonders in Netzausläufern. Das schränkt nunmehr die bisherige Nutzung der Plus-Toleranz ein, so dass die Netzbetreiber in stärkere oder zusätzliche Ortnetztransformatoren oder neue bzw. stärkere Leitungen investieren müssen, um das Spannungsband nach wie vor einzuhalten (**Bild 2**).



**Bild 2:** Spannungsbandproblematik bei zu hoher Einspeisung

Insofern sind innovative technische Lösungsansätze erforderlich, die durch Maßnahmen zur Erhöhung der Aufnahme-fähigkeit bestehender Netze den Netzausbau soweit möglich vermeiden oder minimieren. In zwei F&E- Projekten wurde als Alternative zu den hohen Investitionskosten für eine Netzverstärkung ein Ortsnetztransformator mit elektronischer Regelung der Ausgangsspannung untersucht. Ziel ist die Integration der zunehmenden Einspeisung aus dezentralen, regenerativen Erzeugungsanlagen mit minimalen zusätzlichen Kosten.

### 3 Netztechnische Anforderungen

In der Projektspezifikation wurden zunächst für ein Funktionsmuster eines elektronisch regelbaren Transformators die technischen Anforderungen an Funktionalität und Betriebssicherheit formuliert. Die betriebsüblichen Forderungen an Verfügbarkeit, Personenschutz, Bediensicherheit und Umweltschutz sind einzuhalten. Umgeschaltet wird zwischen den Wicklungsanzapfungen des Transformators über einen elektronischen Stufenschalter mit Lastschalteigenschaften. Die Regelung erfolgt durch Umschaltung des Transformator- Übersetzungsverhältnisses in Abhängigkeit von Netzlast und Spannungsniveau im Niederspannungsnetz.

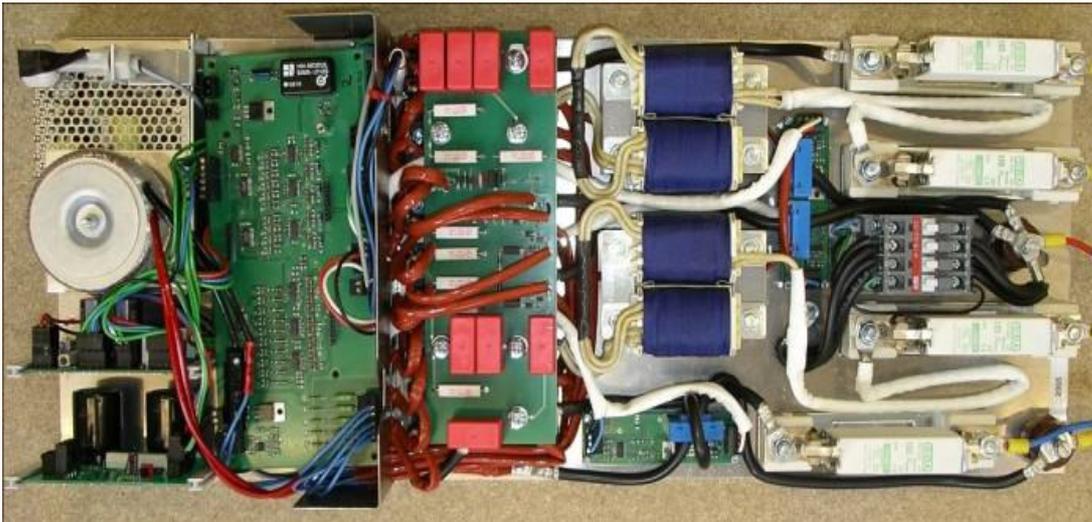
Für den Transformator und die Leistungs- und Steuerelektronik war eine Compactstation aus dem Hause SBG vorgesehen. Damit ist eine funktionelle Einheit von der Mittelspannungs-Schaltanlage über den Transformator bis zur Niederspannungsverteilung in einer EVU-typischen Compactstation entstanden. Von zentraler Bedeutung für den Einsatz im Stromverteilungsnetz ist ein störungsfreier Betrieb der gesamten Anordnung, d.h. sowohl der primärtechnischen Komponenten wie auch der elektronischen Komponenten. Hardware und Software des Reglers waren so zu konzipieren, dass der Ausfall von einzelnen Teilfunktionen der Elektronik oder der Steuerung einen Weiterbetrieb des Transformators ggf. mit Einschränkungen bezüglich der Regeleigenschaft zulässt.

Für die Kunden am angeschlossenen Niederspannungsnetz dürfen durch die Schaltvorgänge des Reglers keine Beeinträchtigungen der Spannungsqualität durch Netzzrückwirkungen entstehen. Bei den elektronischen Komponenten war besonderes Augenmerk auf die Langlebigkeit der Produkte zu legen. Zur problemlosen Einbindung in vorhandene Mittelspannungsnetze war eine dezentrale, eigenständig regelnde Einheit ohne leittechnische Anbindung zu konzipieren. Ziel ist die Nutzung eines regelbaren Transformators über eine lange Lebensdauer bei minimalen Betriebs- und Wartungskosten.

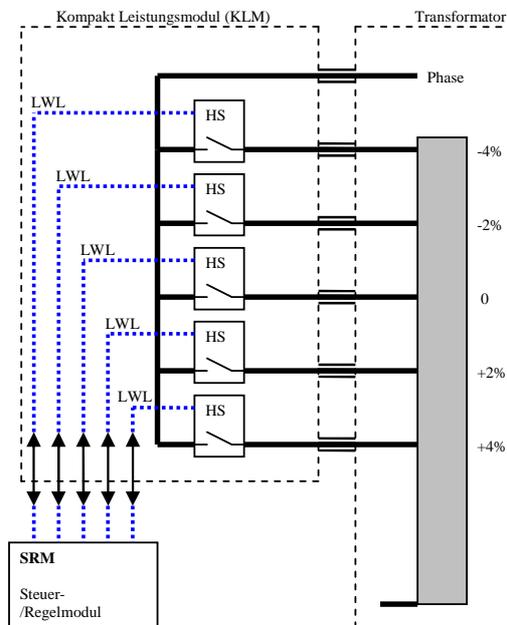
## 4 Realisierung eines Prototypen

Die theoretischen Grundlagen für die verwendeten Drehstromtransformatoren wurden bereits vor fast 120 Jahren durch ein entsprechendes Patent gelegt. Seither hat die Weiterentwicklung zu einem elektrischen Betriebsmittel mit hohem Wirkungsgrad, hoher Zuverlässigkeit und langer Lebensdauer geführt. In einem Standardtransformator besteht die Möglichkeit – nach Abschaltung und im spannungslosen Zustand des Transformators – eine Umstellung des Übersetzungsverhältnisses zur Voreinstellung des Spannungsniveaus im Niederspannungsnetz vorzunehmen.

Bei dem Prototyptransformator wurden die kurzschlussfesten Wicklungsanzapfungen der Stufen +4 /+2/ 0 /-2/-4% in einen angeflanschten Anschlusskasten geführt, in dem sich die Leistungselektronik auf 10kV – Potenzial befindet. Die Umschaltung zwischen den Anzapfungen erfolgt ohne Unterbrechung der Energieversorgung. Die Verbindung zwischen dem Kompaktleistungsmodul (**KLM-Bild 3**) und dem Steuer- und Regelmodul (**SRM-Bild 4**) erfolgt über Lichtwellenleiter.



**Bild 3:** Kompaktleistungsmodul



**Bild 4:** Einphasiges Prinzipschaltbild des Traforeglers

Ein Steuer- und Regelmodul (SRM) dient der Erfassung von Messwerten und Ansteuerung der Leistungsmodule gemäß Regelalgorithmus. Eine batteriegestützte Hilfsenergie ist nicht erforderlich. Statusdaten sowie Störmeldungen werden über ein GSM- Funkmodem per SMS an die Entwicklungsingenieure der Fa. ct.e in Herne übertragen.

Im Kompaktleistungsmodul (KLM) wird mit Hilfe von Halbleiterschaltern das Übersetzungsverhältnisses des Transformators unter Last und ohne Unterbrechung der Energieversorgung zwischen den Wicklungsanzapfungen umgeschaltet. Nach der Umschaltung werden je Phase die leitenden Thyristoren durch einen Kontakt überbrückt, so dass Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit des regelbaren Transformators genauso hoch ist wie bei konventionellen Geräten.

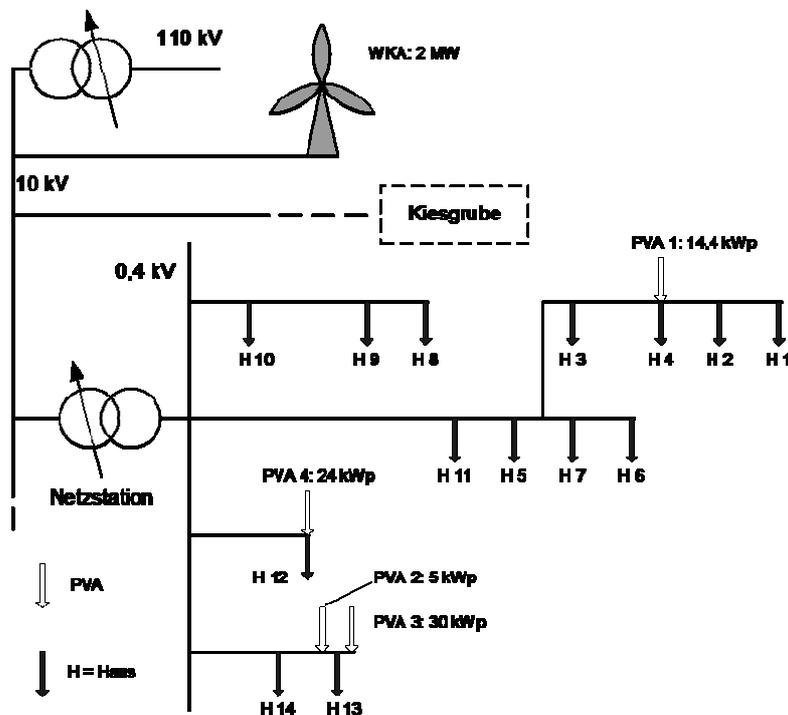
## 5 Netzerprobung bei RWE Rhein-Ruhr

Vor Einbau des regelbaren Transformators in ein öffentliches Netz war die Einhaltung der spezifizierten Anforderungen über geeignete Typ- Entwicklungs- und Funktionsprüfungen nachzuweisen. Im Prüffeld der Fa. SGB in Neumark/Sachsen wurden Hochspannungsprüfungen am Transformator sowie an den 10kV - Komponenten der Trafoverbindung und des Schaltschanks erfolgreich durchgeführt.

Umfangreiche Entwicklungs- und Funktionsprüfungen des regelbaren Prototyptransformators erfolgten im Hochspannungslabor der Technischen Fachhochschule Georg Agricola zu Bochum. Für die Analyse der Umschaltvorgänge wurde ein spezielles Messsystem für Hochspannungs-Potentialdifferenzen entwickelt, mit dem 3 Spannungen je Phase auf 10kV-Potenzial gemessen werden können.

Im Hochstromlabor der RWE Eurotest GmbH in Dortmund fanden umfangreiche Prüfungen zum Umschaltverhalten des Traforeglers bei schwankender Netzlast sowie bei langsamen und schnellen Änderungen der Einspeiseleistung statt. Nach erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen konnte im Januar 2010 die Netzerprobung bei RWE Rhein-Ruhr beginnen. Ausgewählt war ein ländliches Netz mit 2.250 m Niederspannungskabeln und -freileitungen, aufgeteilt auf mehrere Stromkreise (**Bild 5**). Angeschlossen sind 14 Haushalte mit einer maximalen Netzlast von 74 kW. Die installierte Leistung der angeschlossenen Photovoltaikanlagen beträgt 75 kWp. Auf der Mittelspannungsseite speist eine Windkraftanlage mit einer Leistung von 2 MW ein. Hierdurch und durch den mittelspannungsseitigen Betrieb einer Industriegroßanlage treten weitere Netzspannungsschwankungen auf. Zum Ausgleich dieser Spannungsänderungen wird mithilfe eines geregelten Stufenumschalters, der in einem 110kV/ 10kV- Transformator der vorgelagerten Umspannstation verbaut ist, das Potenzial des angeschlossenen 10kV- Netzes eingestellt. Für den Traforegler resultieren hieraus komplexe, sich überlagernde Netzzustände.

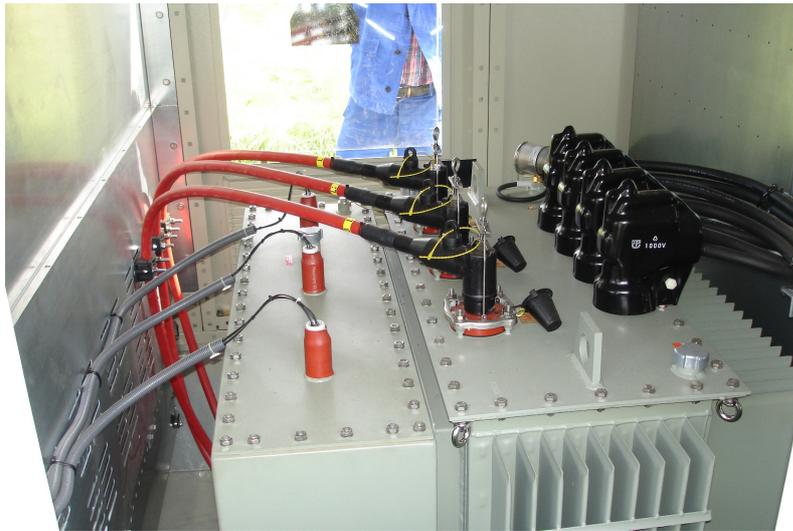
Während der Netzerprobung wurden umfangreiche Messungen zur Spannungsqualität durchgeführt. Auf der Niederspannungsseite wurde im ersten Schritt eine Leistungsflussregelung untersucht.



**Bild 5** : Vereinfachte Netzstruktur Ortsnetz Vissel

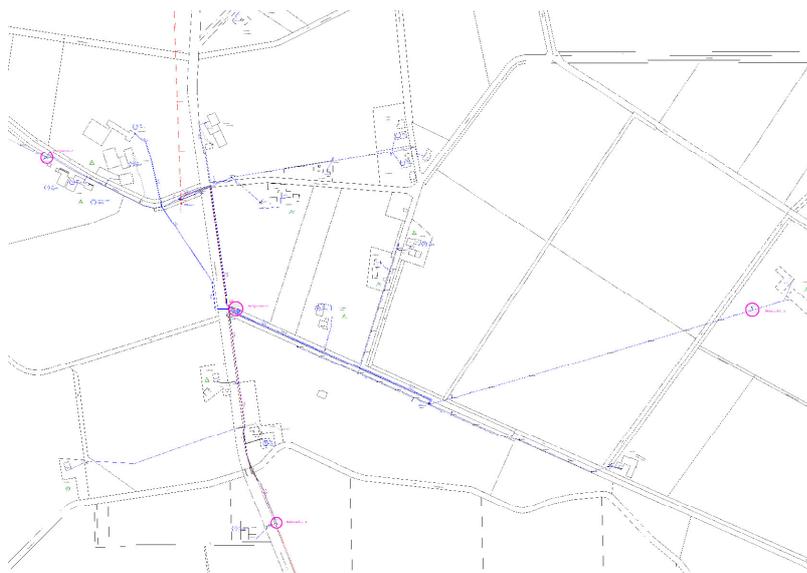
Im Rahmen der Netzerprobung bei RWE Rhein-Ruhr wurde insgesamt festgestellt, dass mit dem Prototyptransformator die hohen Anforderungen an die Betriebssicherheit der Anlage im Hinblick auf Verfügbarkeit, Arbeitssicherheit, Umweltschutz etc. erfüllt werden. Das Konzept des Transformators ermöglicht einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb. Mit der laufenden Netzerprobung wird der Regelalgorithmus weiter optimiert, so dass zukünftig mit einem minimalen Aufwand an Messtechnik eine optimale Einstellung des Spannungsniveaus in Niederspannungsnetzen mit dezentraler Einspeisung erreicht werden kann.

Die positiven Erfahrungen beim Einsatz des Prototyptransformators hat das Haus RWE veranlasst, die Herstellung einer Kleinserie von fünf elektronisch regelbaren Transformatoren in Auftrag zu geben. Ziel ist es, mit diesen Vorseriengeräten (**Bild 6**) an Standorten der RWE Regionalzentren Niederrhein, Neuss, Sieg, Münster und Osnabrück den Nachweis für eine problemlose, zielgerichtete Einbindung in verschiedene Mittelspannungsnetze zu führen. Mithilfe einer hierfür entwickelten Spannungsregelung, anstelle der im Prototypen untersuchten Leistungsflussregelung, soll die Einhaltung der Kriterien der neuen EN 50160 nachgewiesen werden. Das vom RWE-Regionalzentrum Osnabrück ausgewählte Verteilnetz im Ortsteil Voltlage sei an dieser Stelle exemplarisch angeführt.



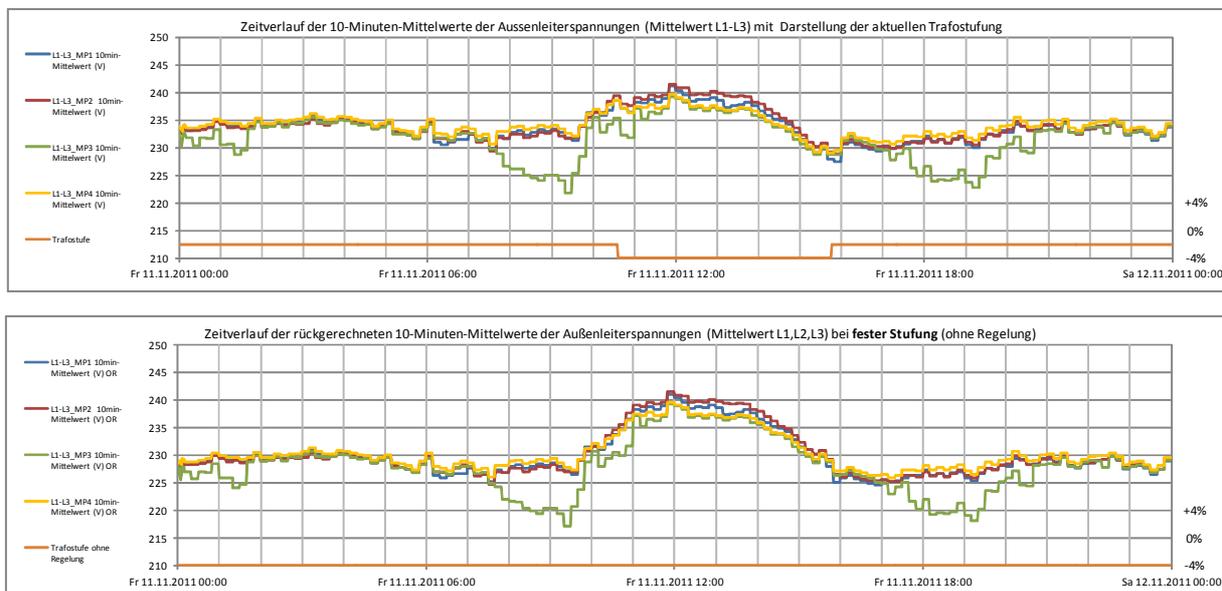
**Bild 6:** Anschlussbereich der regelbaren Tafos

Während der Inbetriebnahmearbeiten hat sich gezeigt, dass in diesem weitläufigen Netz (**Bild 7**) im Einschalt Augenblick Spannungsgradienten entstehen, die in den vg. Prüffeldern nicht simuliert werden konnten. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Optimierung der Schaltung des Kompaktleistungsmoduls genutzt.



**Bild 7:** Vereinfachte Netzstruktur Ortsnetz Voltlage

Der elektronisch regelbare Transformator (ERT) ist seit Oktober 2011 in Volltage in Betrieb. Erste Messresultate der Felderprobung sind in **Bild 8** wiedergegeben. Wie man daraus erkennen kann, wird bei einer Default-Stufenwahl von -4% für den Normalbetrieb der Spannungshöchstwert durch den Spannungsregler begrenzt. Entsprechende messtechnische Analysen werden an den weiteren 4 Standorten vorgenommen. Insgesamt bestätigen die bisherigen Ergebnisse die an das System gestellten Anforderungen.



**Bild 8:** Messresultate Felderprobung

## 6 Zusammenfassung

Die politischen Vorgaben zum Ausbau der Erneuerbaren Energien im Strombereich schaffen neue Herausforderungen, die grundsätzlich zu Mehrkosten im Netz führen. Darüber hinaus werden erhöhte Anforderungen an die Netzbetreiber zur Einhaltung der Versorgungsqualität durch die Teilnahme der europäischen Regulierer an der Entwicklung zur neuen EN 50160 erwartet.

Im Rahmen von zwei F&E- Projekten zur Erhöhung der Spannungsqualität in Niederspannungsnetzen mit dezentraler Einspeisung wurde ein Funktionsmuster eines kompakten universell elektronisch regelbaren 10 kV-Ortsnetztransformators entwickelt und für den Einsatz in einem Stromverteilungsnetz vorbereitet. Die vom Land Nordrhein-Westfalen im Rahmen der Landesinitiative Zukunftsenergien geförderten F&E- Projekte sind Kooperationsprojekte, die von einem Team aus Ingenieuren der Unternehmen der ct.e Controltechnology Engineering GmbH (Zuwendungsempfänger), RWE Rhein- Ruhr Verteilnetz GmbH, der Starkstrom- Gerätebau GmbH sowie Hochschulinstituten durchgeführt wurden. Nach Abschluss der F&E- Projekte im Dezember 2008 wurde das Funktionsmuster in einen netztauglichen Prototypen überführt. Dieser Prototyp befindet sich seit Januar 2010 störungsfrei im Einsatz.

Seit Juli 2011 befinden sich fünf Vorserienprodukte in einer flächendeckenden Felderprobung. Erste Resultate aus einer begleitend laufenden Messkampagne lassen erkennen, dass die mit dem elektronisch regelbaren Transformator verbundenen Erwartungen erfüllt werden.

Mehrere Netzbetreiber haben bereits Interesse an einer kostengünstigen und hochverfügbaren Lösung eines Ortsnetztransformators mit Spannungsregler bekundet, um die hohen Kosten für den Netzausbau zum Anschluss dezentraler Stromerzeugungsanlagen zu minimieren.

## 7 Literatur

- [1] E-Wirtschaft, Heft 25 „regenerative Energien“  
Heft 25, Dezember 2007
- [2] EEG 2009 - Gesetz zur Neuregelung des Recht der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften  
Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009, Teil I, Nr. 49,  
31. Oktober 2008

