

# SPANNUNGSREGELUNG IN NIEDERSPANNUNGSNETZEN DURCH DEN EINSATZ GEREGLER ORTSNETZTRANSFORMATOREN

Autoren				
Name	Organisation	Adresse	e-mail / homepage	Telefon / Telefax
Dipl.-Ing. Andreas Becker (*)	Energie- Forschungszentrum Niedersachsen (TU Clausthal)	Am Stollen 19A 38640 Goslar Deutschland	andreas.becker@efzn.de  www.efzn.de	+495321-3816-8058  +495321-3816-8009
Dipl.-Ing. Benjamin Werther	Institut für Elektrische Energietechnik (TU Clausthal)	Leibnizstraße 28 38678 Clausthal- Zellerfeld Deutschland	benjamin.werther@tu-clausthal  www.iee.tu-clausthal.de	+495323-72-8101  +495323-72-2104
Dipl.-Ing. Johannes Schmiesing	E.ON Avacon AG	Taubenstraße 7 38106 Braunschweig Deutschland	johannes.schmiesing@eon- avacon.com  www.eon-avacon.com	+49531-3909-33971  +49531-3909-40322
Dr.-Ing. Ernst August Wehrmann	Institut für Elektrische Energietechnik (TU Clausthal)	Leibnizstraße 28 38678 Clausthal- Zellerfeld Deutschland	wehrmann@iee.tu-clausthal.de  www.iee.tu-clausthal.de	+495323-72-2595  +495323-72-2104

## 1. Ausgangslage und Zielstellung der Orientierungsstudie

Aufgrund des schnellen Wachstums regenerativer Erzeugungsanlagen in deutschen Mittel- (MS-) und Niederspannungs-(NS-)Netzen hat eine intensive Suche nach möglichen Lösungswegen begonnen, um die daraus resultierenden Probleme der Spannungshaltung zu beherrschen. Die Tatsache, dass immer mehr Erzeugungsanlagen mit medien-spezifisch hohen Gleichzeitigkeitsgraden und netzebenenbezogen relevanten Anschlussleistungen angeschlossen werden, führt zunehmend zu drohenden Verletzungen des oberen Spannungsbandes gem. DIN EN 50160 [DIN10]. Klassisch können punktuelle Verletzungen des Spannungsbandes indirekt durch eine örtliche Erhöhung der Kurzschlussleistung behoben werden, also durch Leitungs- oder Transformatorenzubau (im Folgenden als konventioneller Netzausbau bezeichnet). Nun handelt es sich bei der dezentralen Erzeugung inzwischen aber um eine flächendeckende Herausforderung, was die Frage nach neuen Technologien sowohl aus netzwirtschaftlicher als auch aus netztechnischer Sicht dringlich erscheinen lässt. Da konventioneller, auf eine pauschale Erhöhung der Kurzschlussleistung ausgerichteter Netzausbau zu geringen Auslastungsgraden der zusätzlichen Betriebsmittel führt, die selbst bei hohen Einspeiseleistungen oftmals weit unterhalb ihrer thermischen Belastbarkeit betrieben werden würden, stellt insbesondere ein ‚Downsizing‘ der klassisch im Umspannwerk befindlichen Spannungsregelung auf die Ortsnetzebene eine interessante Zukunftstechnologie dar. Sie ist vermutlich konkurrierenden innovativen Verfahren (Blindleistungsregelung, Lastmanagement, Speicherung) bezogen auf ihr Integrationspotenzial und die Nachhaltigkeit der Lösung überlegen. Deshalb wird ihr Einsatz im Hause E.ON Avacon (EAV) seit 2010 mit den Partnern Energie-Forschungszentrum (EFZN), Goslar und Maschinenfabrik Reinhausen (MR), Regensburg und FH Regensburg (FHR) intensiv untersucht.

Zentrale Herausforderung beim Einsatz selbstregelnder Ortsnetztransformatoren (rONT) ist es sicherlich, eine ebenso robuste wie auch kompakte und preiswerte Technologie zu finden. Dies geschieht im Wesentlichen auf der Herstellerseite. Daneben gibt es aber vor ihrem Einsatz eine Reihe weiterer Fragestellungen zum Verhalten des rONT insbesondere im Verbund mit anderen Netzbetriebsmitteln zu prüfen und wissenschaftlich zu untersuchen. Dies bezieht sich insbesondere auf Wechselwirkungen zwischen mehreren rONT und zwischen Ortsnetz- und Umspannwerksregelung (UW-Regelung). Zudem werden neben einer Eingrößenregelung (Monosensorbetrieb) auf Basis der Spannung an der Unterspannungsseite des rONT potenzielle Wirkungen einer Mehrgrößenregelung (Multisensorbetrieb) über abgesetzte Messungen im NS-Netz betrachtet.

Diese Fragestellungen wurden im Rahmen einer Studie im Jahr 2011 durch das EFZN bearbeitet. Sie werden im Folgenden auszugswise vorgestellt. Im abschließenden Kapitel wird ein Ausblick auf eine weitergehende, flächendeckende Dezentralisierung der Spannungsregelung in hochgradig erzeugungsgeprägten Verteilnetzen gegeben. Dieser basiert auf Untersuchungen im Rahmen einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen EAV und der TU Clausthal und soll eine langfristige Perspektive für den rONT-Einsatz in Verteilnetzen verdeutlichen.

## 2. Technische Kriterien für den Verknüpfungspunkt dezentraler Erzeugungsanlagen

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die zentrale Herausforderung bei der Integration einer hohen Anzahl kleinerer Erzeugungsanlagen, wie sie sich in deutschen MS- und NS-Netzen finden, meist nicht in der thermischen Tragfähigkeit der Betriebsmittel, sondern in der Spannungshaltung liegt. Dabei ist der zuständige Verteilnetzbetreiber normativ verpflichtet, die Einhaltung von DIN EN 50160 [DIN10] sicherzustellen. Dies bedeutet insbesondere zu verhindern, dass die Niederspannung Spannungswerte über  $1,1 U_N$  und die Mittelspannung Spannungen über  $1,1 U_C$  aufweist. Das ist deshalb schwierig, weil Verteilnetze klassisch lastseitig dimensioniert sind und im Sinne eines effizienten Materialeinsatzes bei relativ geringen Querschnitten lastseitig hohe Spannungsfälle aufweisen. Damit bieten übliche Aufteilungen der Spannungsbänder für einen erzeugungsbedingten Spannungsanstieg wenig Raum. Der erzeugungsbedingte Spannungsanstieg im Netz wird dabei auf Basis von BDEW / FNN – Richtlinien [BDE08] [FNN11] durch eine hilfswise Prüfung des erzeugungsbedingten, relativen Spannungshubs begrenzt – hilfswise deshalb, weil die Überprüfung lediglich eine Indikation, aber keine Berechnung einer Normverletzung ermöglicht. Richtlinienseitig sind für den relativen Spannungshub in der MS-Ebene 2% und in der NS-Ebene 3% zugelassen. Diese Grenzwerte werden bei üblichen Verteilnetztlängen und insbesondere speisepunktfernen Anschlüssen deutlich unterhalb der Grenzen der thermischen Tragfähigkeit der eingesetzten Betriebsmittel verletzt, was häufig zu Netzausbau oder entfernteren Anschlusspunkten für den Erzeugungskunden führt.

Dabei droht bei hohen Anschlussleistungen in den nachgelagerten NS-Netzen die Gefahr, dass der sowieso schon stärker begrenzte MS – Spannungshub durch Vernachlässigung der NS-Ebene zudem auch noch unterschätzt wird.

## 3. Ansätze zur Last- und Erzeugungsstruktur

Zur Analyse des neuen Betriebsmittels rONT ist eine angepasste Last- und Erzeugungsstruktur zur Anwendung gekommen. Prinzipiell lassen sich die in den Kapiteln 5 und 6 durchgeführten Untersuchungen folgendermaßen unterscheiden: Zum einen ist der Einsatz eines / mehrerer rONT unter realistischen Lastszenarien erprobt worden. Hierfür sind reale Messreihen (siehe Abbildung 1) von aggregierten Last- und Erzeugergruppen, welche in einem weiteren Forschungsprojekt erzeugt wurden, sowie real gemessene Mittelspannungsprofile verwendet worden. Ergänzt wurden diese Zeitreihen durch Auswertungen gemessener Einzelhaushaltslastgänge und deren Überlagerung zu Summenlastkurven. Zum anderen sind zur Analyse spezifischer Bedingungen und zur Anregung gewünschter Effekte synthetische, sprunghafte Lastgänge zur Anwendung gekommen (siehe Abbildung 8).

Die beschriebenen Summenprofile sind in unterschiedlicher Anordnung und mit unterschiedlichen Skalierungsfaktoren auf die im folgenden Kapitel beschriebenen Netzstrukturen verteilt worden. Von besonderem Interesse ist dabei der Fall, dass sich im NS-Netz eine Ungleichverteilung zwischen Verbrauch- und Erzeugungsleistung einstellt. Die Variante, dass neben einem lastdominierten Stationsabgang gleichzeitig ein erzeugungsdominierter Abgang vorhanden ist, stellt eine besonders kritische Konstellation dar und führt zu entsprechend hohen Anforderungen an das neue Betriebsmittel. Sie wird daher in dieser Veröffentlichung vornehmlich verwendet und beschrieben.

## 4. Verwendete Netzstrukturen und implementiertes Reglerkonzept für den rONT

In der zugrunde liegenden Studie wurden generelle Auswirkungen und Beeinflussungen eines rONT betrachtet, so dass verschiedene Netzparameter variiert werden mussten. Da dies bei realen Netzstrukturen zu einer nicht überschaubaren Anzahl von zu verändernden Parametern führen würde, wurden die Untersuchungen an Netzstrukturen mit reduzierter Ordnung durchgeführt. Zur Bestimmung realistischer Parametergrößen wurden diese anhand von realen Netzen abgeleitet.

Bei der verwendeten Netzstruktur 1 handelt es sich um ein NS-Netz, das von einem starren MS-Netz (mit variabler Spannung) über einen stufbaren Ortsnetztransformator versorgt wird (siehe Abbildung 1). Mit dieser Netzstruktur wurden die Stellmöglichkeiten des rONT im NS-Netz sowie die Möglichkeit, im NS-Netz hervorgerufene Spannungsabfälle auszuregulieren, untersucht. Der Einfluss der verwendeten Eingangsgrößen des Reglers ist dabei ebenfalls betrachtet worden.

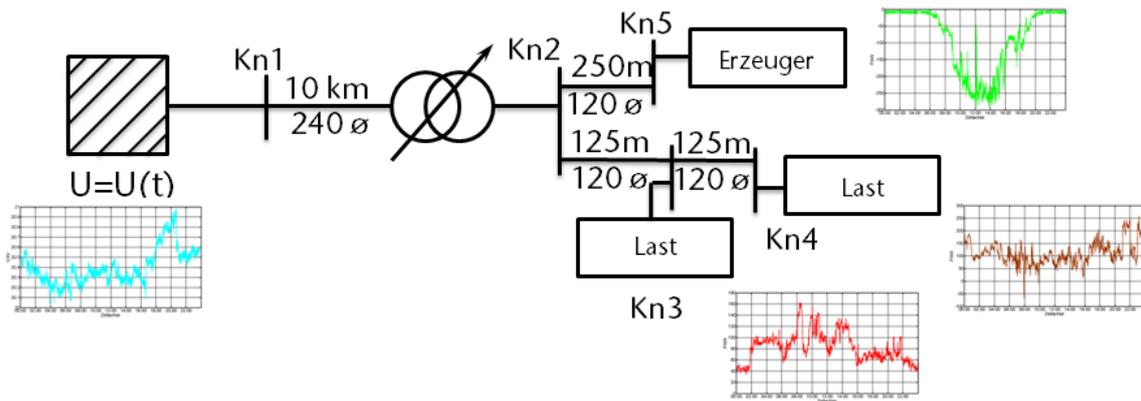


Abbildung 1: Netzstruktur 1

Bei der zweiten (in dieser Veröffentlichung betrachteten) Netzstruktur wird ein NS-Netz behandelt, das von zwei Seiten gespeist wird (siehe Abbildung 2). Dieser Fall ist in der Praxis zwar selten anzutreffen, muss aber beim Umschalten von Netzen – z.B. bei Wartungsarbeiten – beherrscht werden.

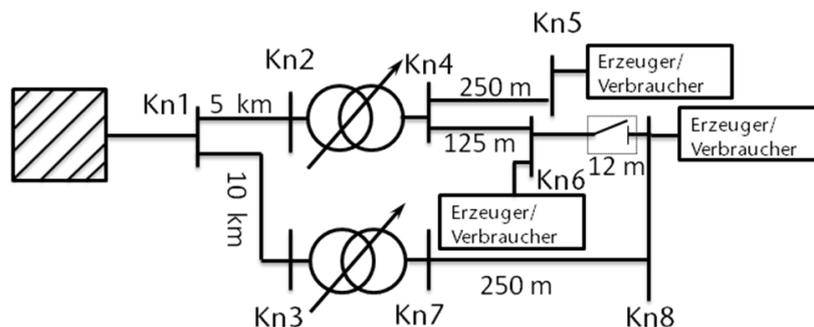


Abbildung 2: Netzstruktur 2

Ein Spannungsregler für Stufentransformatoren hat die Aufgabe, seine Istspannung innerhalb eines Totbandes zu halten. Um zu verhindern, dass bei einem kurzfristigen Verlassen des Toleranzbandes ein unnötiger Stufenbefehl ausgelöst wird, löst ein Spannungsregler den Stufenbefehl erst nach einer Verzugszeit aus. Diese Verzugszeit richtet sich nach dem verwendeten Regelverfahren. Ein typisches Verhalten ist das bei A.Eberle als " $\Delta U \cdot T = \text{CONST}$ " [AE09] und bei der Maschinenfabrik Reinhausen als "Integral" [RE09] bezeichnete Regelverfahren. Bei diesem Verfahren werden die Abweichungen vom Totband integriert, und nach Erreichen eines bestimmten Schwellwertes wird ein Stufenbefehl ausgelöst. Dies hat zur Folge, dass geringe Abweichungen „langsamer“ ausgeregelt werden als hohe. In Abbildung 3 ist die Abhängigkeit der Reaktionszeit von der Regelabweichung zu sehen.

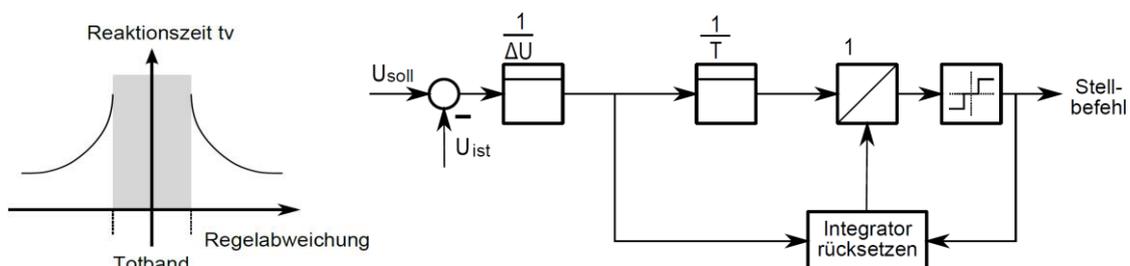


Abbildung 3: Gewünschtes Regelverhalten (links), Implementierte Reglerstruktur (rechts)

Diese Funktionsweise wurde mit der in Abbildung 3 zu sehenden Reglerstruktur realisiert. Dort wird die Regelabweichung zunächst durch die halbe Totbandspannung geteilt, damit die normierte Regelabweichung im Falle einer Totbandverletzung den Wert Eins erhält. In diesem Fall wird der Integrator freigegeben und die normierte Regelabweichung wird - mit dem Faktor  $1/T$  gewichtet - aufintegriert. Wenn der Integrator einen Betrag von Eins erreicht, wird ein Stufenbefehl ausgeführt. Die Konstante  $T$  gibt daher die längste Reaktionszeit des Reglers an.

## 5. Potenzial der Spannungsregelung durch rONT im Niederspannungsnetz

Um die prinzipielle Wirkungsweise eines rONT auf die unterlagerte NS-Ebene zu untersuchen, sind im Rahmen der zugrunde liegenden Studie eine Vielzahl an dynamischen Simulationen durchgeführt worden, wobei die in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Netz- und Reglerstrukturen sowie Last- und Erzeugungsszenarien zur Anwendung kamen. Weiterhin sind grundlegende Analysen mit Hilfe synthetischer Testprofile und durch Anwendung von Fortsetzungsmethoden vorgenommen worden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, welche die Unterschiede zwischen einem implementierten Mono- und Multisensorbetrieb beschreiben. Im vorgestellten Fall wird im Monosensorbetrieb die Sammelschienen-(SS-)Spannung an der Unterspannungsseite des rONT als alleinige Eingangsgröße verwendet. Im Multisensorbetrieb werden mehrere interessierende Knotenspannungen überwacht, die maximale und minimale Knotenspannung im Netz ermittelt und aus diesen beiden Größen ein Mittelwert als Eingangsgröße des Reglers gebildet (siehe Abbildung 4).

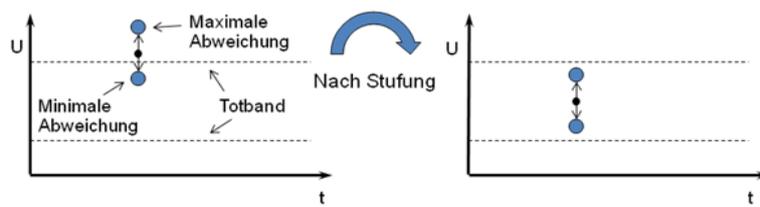


Abbildung 4: Prinzip des verwendeten Regelverfahren bei verteilter Messung

In Abbildung 5 wird eine variable Eingangsspannung angenommen, während in Abbildung 6 diese konstant gehalten wird. In beiden Fällen liegt die in Abbildung 1 dargestellte Netz- sowie Last- und Erzeugungsstruktur zu Grunde. Hierdurch lassen sich getrennte Aussagen über die Fähigkeit des rONT ableiten, zum einen beide Netzebenen zu entkoppeln und zum anderen Spannungsschwankungen innerhalb der NS-Ebene auszuregeln.

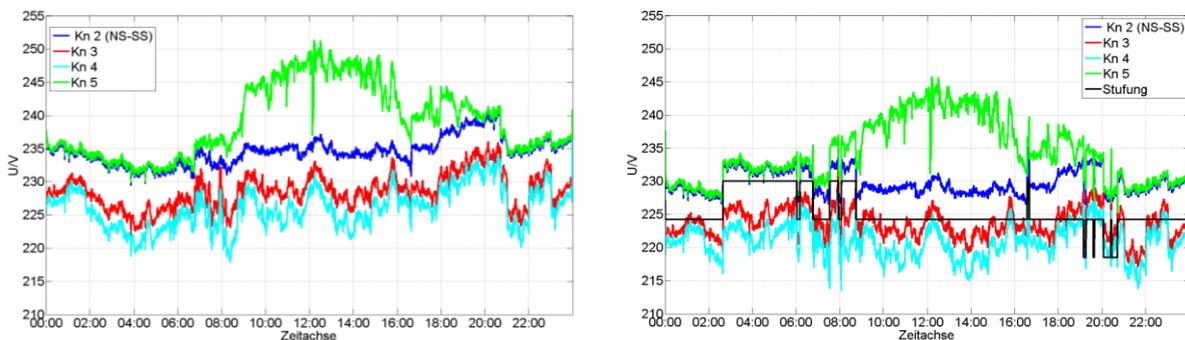


Abbildung 5: Spannungsverläufe bei veränderlicher Eingangsspannung  
Links: deaktivierter Regel; Rechts: Regelgröße ist Sammelschiene

Im linken Teil von Abbildung 5 (ohne Regler) lässt sich ein deutlicher Einfluss der MS-Ebene auf die NS-SS-Spannung erkennen. Diese führt in Kombination mit den NS-seitigen Netzbelastungen zu erheblichen Spannungsfuktuationen, welche kritisch einzustufen sind. Durch den Einsatz eines rONT im Monosensorbetrieb kann die MS-seitig eingepögte Überhöhung der Eingangsspannung reduziert werden und somit die entstehenden Spannungsspitzen im NS-Netz um ca. 3% reduziert werden.

Gleichzeitig kann eine weitere Reduzierung der minimal auftretenden Knotenspannung um ca. 2% festgestellt werden. Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass durch den Einsatz eines rONT beide Netzebenen entkoppelt werden und sich hierdurch erhebliche Vorteile (siehe Tabelle 1) ergeben können.

Mit Hilfe der folgenden Abbildung kann ferner die Frage beantwortet werden, inwieweit sich durch den Einsatz eines rONT NS-seitig ausgelöste Spannungsfuktuationen ausregeln lassen, die sich weniger an der NS-SS, aber deutlich an den Netzknoten darstellen. Hierfür wird im Gegensatz zu Abbildung 5 die Mittelspannung festgehalten und ein Vergleich zwischen Mono- und Multisensorbetrieb vorgenommen.

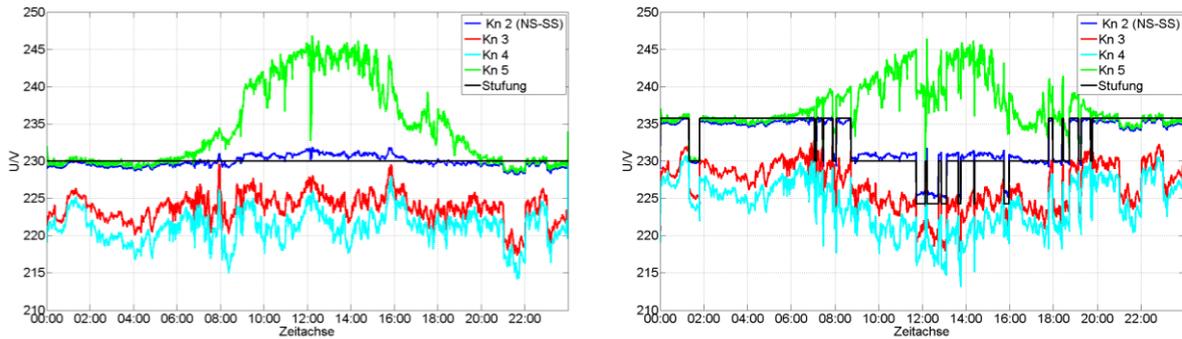


Abbildung 7: Spannungsverläufe bei konstanter Eingangsspannung  
Links: Regelgröße ist Sammelschiene; Rechts: Regelgröße sind Knotenspannungen

In Abbildung 7 ist deutlich zu erkennen, dass die angeschlossenen Erzeuger und Verbraucher einen geringen Einfluss auf die SS-Spannung haben. Daher wird in der linken Abbildung keine Stufung ausgelöst. Ein Ausregeln von Spannungsänderungen im NS-Netz, die z. B. durch Erzeugungsschwankungen auftreten können, ist in dieser Konfiguration nicht möglich. Erst durch den Einsatz einer verteilten Messinfrastruktur liegen der Regelung Informationen über die im Netz vorherrschenden Spannungsverhältnisse vor und es werden Stufungen ausgelöst. Die untersuchte Extremsituation (separater Last- und Erzeugungsstrang), welche zu erheblichen Spannungsspreizungen im NS-Netz führt, zeigt gleichzeitig die Grenzen der neuen Technologie auf, da diese nur bedingt durch einen rONT ausgeregelt werden können. Durch die Studienergebnisse kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz einer verteilten Messinfrastruktur die Aufnahmefähigkeit eines NS-Netzes für dezentrale Erzeugungsleistung in bestimmten Netzstrukturen weiter erhöht werden kann. Diesem Mehrgewinn gegenüber dem Monosensorbetrieb steht jedoch ein größerer Aufwand für Mess- und Kommunikationstechnik als auch eine aufwendigere Parametrierung und Inbetriebnahme entgegen. Für ein endgültiges Fazit sind weitere Untersuchungen zum Multisensorbetrieb vorzunehmen.

## 6. Mögliche Wechselwirkungen zwischen mehreren rONT

Für den besonderen Betriebsfall, dass mehrere rONT in ein Verteilnetz einspeisen (siehe Abbildung 2), galt es im Speziellen zu untersuchen, ob diese sich gegenseitig zu einer Dauerschwingung anregen. Für diesen Untersuchungsgegenstand wurde eine Vielzahl von Simulationen durchgeführt. Exemplarisch ist in Abbildung 8 eine dieser Simulationen dargestellt.

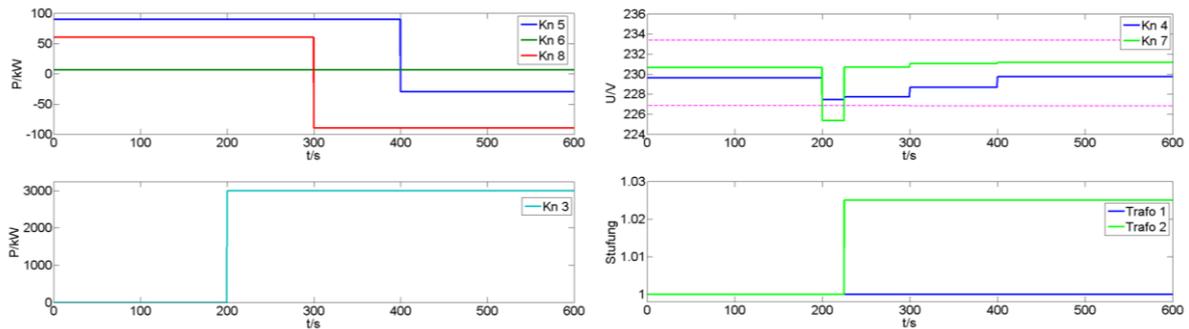


Abbildung 8: Exemplarische Simulation bei zwei rONT in einem NS-Netz, verwendete Lastverläufe (links), Spannungen an Transformatorsammelschiene und Stufenstellung der Transformatoren (rechts)

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass die aufgeschalteten Lastsprünge beide SS-Spannungen beeinflussen. Des Weiteren führt der mittelspannungsseitige Lastsprung (Kn3) zu einem Verlassen des Totbandes an Transformator 2, wodurch eine Stufung ausgelöst wird. Diese Stufung sorgt ebenfalls für eine Spannungsänderung am Regelknoten des ersten Transformators, jedoch ist diese Beeinflussung zu gering, um eine Stufung dieses Transformators hervorzurufen. In allen Simulationen, die in dieser Studie durchgeführt wurden, kam es zu keiner Schwingungsanregung. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, sollen die folgenden zwei Fälle aufgeführt werden:

- A) Beide Transformator-knoten besitzen eine starke elektrische Kopplung, d.h. die Stufung eines Transformators verursacht eine Spannungsänderung in der gleichen Größenordnung an der SS des zweiten Transformators.
- B) Beide Transformator-knoten sind schwach miteinander gekoppelt, d.h. die Stufung eines Transformators bewirkt an der SS des anderen Transformators eine wesentlich geringere Spannungsänderung.

### Fall A: Starke Kopplung

Wenn die Kopplung der beiden Netzknoten stark ist, heißt dies, dass die Impedanz zwischen den beiden Knoten gering ist. Damit befinden sich beide Transformatorspannungen in der gleichen Größenordnung. Wenn nun die Spannung eines Transformators außerhalb seines Totbandes liegt und die des anderen Transformators nicht, erfolgt nach Ablauf der Integrationszeit eine Stufung. Da die Rückwirkung auf den anderen Knoten geringer ist, wird dessen Spannung auch nach der Stufung im Totband liegen (siehe Abbildung 9).

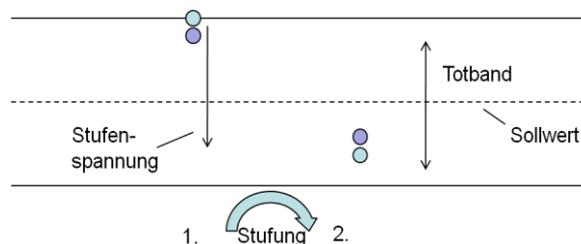


Abbildung 9: Erklärung für das Nichtauftreten einer Dauerschwingung bei starker Netzkopplung (Türkis: Spannung an der SS von Transformator 1; Lila: Spannung an der SS von Transformator 2)

## Fall B: Schwache Kopplung

Im Fall der schwachen Kopplung können die beiden Transformatorspannungen so weit auseinander liegen, dass die Stufung des ersten Transformators das Verlassen des Totbandes der zweiten Transformatorspannung verursacht (siehe Abbildung 10). Die darauf folgende Stufung des zweiten Transformators verursacht wiederum eine Spannungsänderung an der Sammelschiene des ersten Transformators. Diese ist auf Grund der schwachen Kopplung aber erheblich geringer als am zweiten, zuletzt stufenden Transformator und führt nicht zu einem erneuten Verlassen des Totbandes.

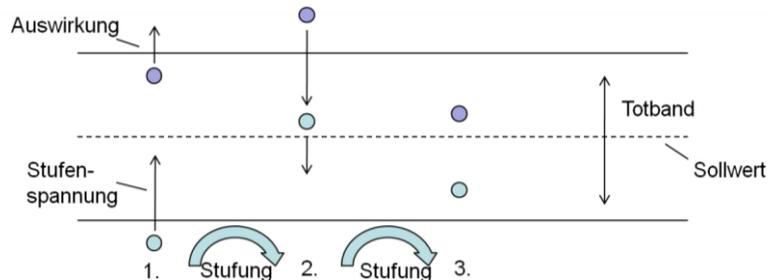


Abbildung 10: Erklärung für das Nichtauftreten einer Dauerschwingung bei schwacher Netzkopplung  
(Türkis: Spannung an der SS von Transformator 1; Lila: Spannung an der SS von Transformator 2)

## 7. Wechselwirkung eines rONT mit der UW-Regelung

Um die Rückwirkungen eines rONT auf einen geregelten HS- / MS-Transformator zu prüfen, wurden an einer Anordnung bestehend aus einem rONT (400 kVA) an dem eine das NS-Netz aggregierende Last angeschlossen ist, einer MS-Leitung (20 km, 240 mm<sup>2</sup>  $\varnothing$ ) und einem HS- / MS-Transformator verschiedene Analysen durchgeführt. Neben dynamischen Simulationen kamen hierbei auch Fortsetzungsmethoden zum Einsatz. Exemplarisch dargestellt ist der Fall, dass die Stufenstellung des rONT unter Verwendung unterschiedlicher Lasttypen verändert wird. Folgende Lasttypen kamen dabei zur Anwendung:

- P=200 kW und  $\cos\phi=1.00$
- P=200 kW und  $\cos\phi=0.95$
- P=200 kW und  $\cos\phi=0.85$
- Eine Impedanz, die bei Nennspannung eine Leistung von P=200 kW bei einem  $\cos\phi=0.95$  aufnimmt.

In Abbildung 11 ist für diese Fälle der Einfluss der Stufung des rONT auf die Sammelschienenspannung des HS- / MS-Transformator (also seiner Regelspannung) dargestellt.

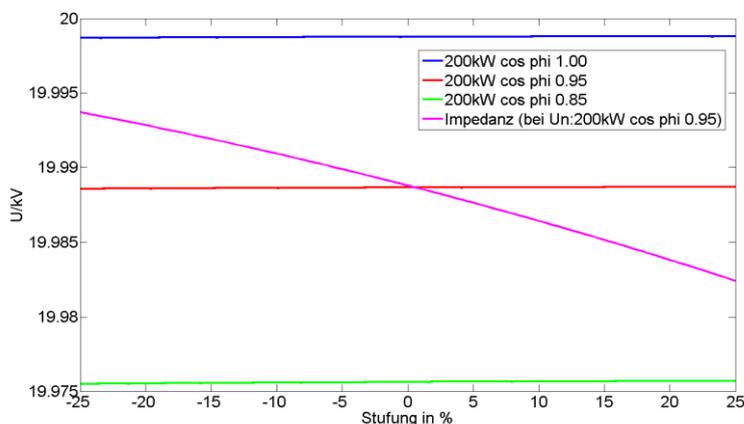


Abbildung 11: Rückwirkung eines NS-Transformators auf HS / MS-Sammelschienenspannung

Wie in Abbildung 11 zu sehen, wird die größte Spannungsänderung durch die Konstant-Impedanz-Last hervorgerufen. Die Spannungsänderungen in den anderen Lastfällen sind im Vergleich dazu marginal. Auch im Fall der konstanten Impedanz ist für eine Spannungsänderung von ca. 5 V an der Mittelspannungssammelschiene eine Stufendifferenz des rONT von 25% notwendig. Dies lässt den Schluss zu, dass die MS-Sammelschienenspannung nur vernachlässigbar von der Stufung eines rONT beeinflusst wird.

## 8. Variation von Stufenspannung und Stufenanzahl

Neben simulatorischen Untersuchungen sind im Rahmen der zu Grunde liegenden Studie auch allgemeine, netzplanerische Überlegungen vorgenommen worden. In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen Stufenanzahl, Stufenspannung und der planerisch zu bestimmenden Mittelspannungsspreizung, welche der rONT ausregeln können muss, untersucht. Davon abhängig ist auch der primäre Nutzen, welcher sich in der Erweiterung des planerisch zulässigen Spannungshubes in der Niederspannung darstellt. Zunächst werden mögliche und typische Schwankungen der Mittelspannung definiert und hierauf aufbauend unter Annahme einer vorhandenen Stufenanzahl die notwendige Stufenspannung und der sich einstellende Nutzen bestimmt. Schließlich werden die eingangs angenommenen Parameter variiert, um somit erste Aussagen über sinnvolle Kombinationen treffen zu können.

Netzplanerisch wird bei EAV ein maximaler Spannungsfall über die NS- und MS-Ebene von je 5% zugestanden. Über den Ortsnetztransformator kann ein Spannungsfall von 3% angenommen werden. Weiterhin wird das Reglerband für den HS- / MS-Stufenregler mit einem üblichen Wert von  $\pm 3\%$  und der maximal zulässige Spannungshub (durch Erzeugungsanlagen in der MS-Ebene) mit 3% angenommen, sodass sich eine Spannungsspreizung in der Mittelspannung von

$$\Delta u_{MS} = \Delta u_{MS-Abfall,Betrieb} + \Delta u_{MS-Hub,Betrieb} + \Delta u_{MS-Reglerband} = 5\% + 3\% + 6\% = 14\%$$

ergibt (siehe auch Abbildung 12). Um diesen Bereich abzudecken, können verschiedene Stufenanzahlen und dementsprechende Stufenspannung ausgewählt werden. In dieser Beispielrechnung wird eine Stufenzahl von fünf angenommen, sodass eine Stufenspannung von 3,5% erforderlich wird.

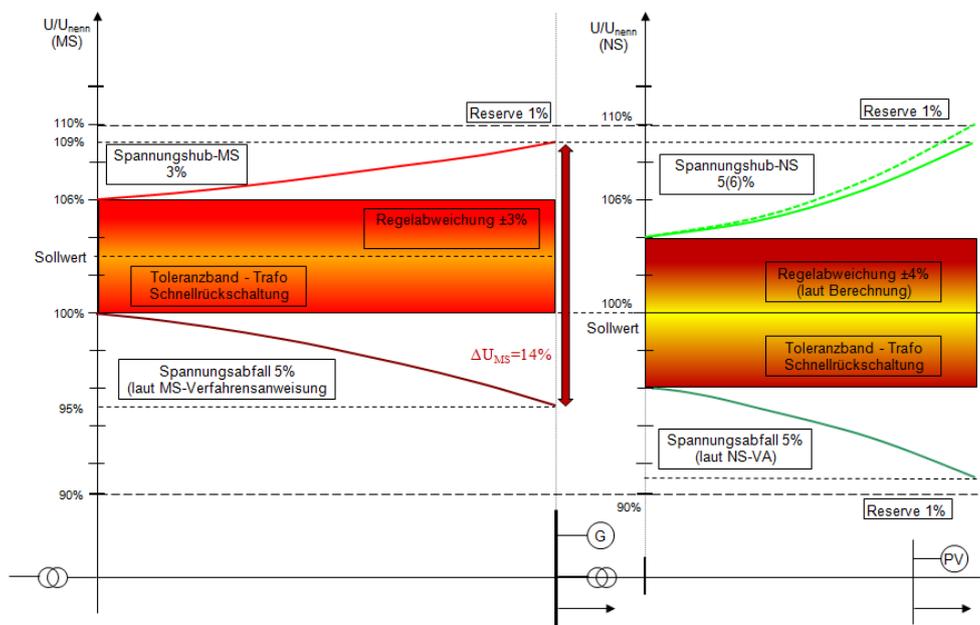


Abbildung 12: Zu beachtende Spannungsbänder und resultierender Spannungshub (exemplarisch)

Unter den weiteren üblichen Annahmen, dass das Reglertotband einen Anteil von 60% der Stufenspannung (ca. 2%) und das Band der Schnellrücksschaltung doppelt so groß wie das Totband (ca. 4%) gewählt wird, ergibt sich für das Niederspannungsnetz ein maximal zulässiger Spannungshub von:

$$\Delta u_{NS,max,zul} = \Delta u_{ges} - 2 \cdot \Delta u_{Reserve} - \Delta u_{Spannungsabfall,NS} - 2 \cdot u_{max,Regelabweichung}$$

$$= 20\% - 2 \cdot 1\% - 5\% - 2 \cdot 4\% = 5\%$$

Um den zulässigen Spannungshub durch Eigenerzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz möglichst groß zu gestalten, kann aus den ermittelten Werten der minimale Sollwert der Regelung festgelegt werden, um das Band möglichst an die unteren Grenzen anzupassen:

$$u_{soll,min,NS} = u_{untereGrenze} + \Delta u_{Spannungsabfall,NS} + \Delta u_{Reserve} + u_{max,Regelabweichung}$$

$$= 90\% + 5\% + 1\% + 4\% = 100\%$$

In diesem Beispiel ergibt sich somit als minimaler Sollwert für die NS-SS-Spannung ein Wert von 400 V (100% U<sub>N</sub>). Die durchgeführte Rechnung verdeutlicht, dass die Wahl der Stufenanzahl und der damit verbundenen Stufenspannung bei einer vordefinierten Mittelspannungsspreizung Einfluss auf die Höhe des erlaubten Spannungshubes im Niederspannungsnetz hat. Die nachfolgende Tabelle 1 enthält ausgewählte Fälle, welche sich durch die Variation der zuvor angenommenen Parameter ergeben.

Tabelle 1: Variation von Stufenanzahl und zulässiger MS-Spannungs-Fluktuationen

konstante Parameter		variierende Parameter		berechnete Parameter				
Reserve am UW in %	planerischer Spannungsabfall im NS-Netz in %	Spannungsspreizung Mittelspannung in %	angenommene Stufenanzahl	berechnete Stufenspannung in %	Reglertotband (60% d. Stufenbreite) in %	maximale Regelabweichung (Band der Schnellrücksschaltung) in %	minimal möglicher Sollwert in %	zulässiger Spannungshub im NS-Netz in %
2	5	10	3	5	3	6	2	1
2	5	18	3	9	5,4	10,8	6,8	-8,6
2	5	10	5	2,5	1,5	3	-1	7
2	5	14	5	3,5	2,1	4,2	0,2	4,6
2	5	18	5	4,5	2,7	5,4	1,4	2,2
2	5	10	9	1,25	0,75	1,5	-2,5	10
2	5	18	9	2,25	1,35	2,7	-1,3	7,6
2	5	10	13	0,83	0,5	1	-3	11
2	5	18	13	1,5	0,9	1,8	-2,2	9,4

Aus der Tabelle 1 wird ersichtlich, dass bei einer fest angenommenen Mittelspannungsspreizung und einer Erhöhung der Stufenanzahl die notwendigen Stufenspannungen abnehmen. Außerdem sinkt bei kleinerer Mittelspannungsspreizung und konstanter Stufenanzahl folglich die notwendige Stufenspannung und hierdurch ergeben sich größere Freiheiten in Bezug auf den zulässigen Spannungshub in der Niederspannung. Ferner kann aus der Tabelle 1 geschlossen werden, dass die Stufenanzahl einen enormen Einfluss auf den zentralen Nutzen, welcher in einer Erhöhung des Spannungshubes besteht, hat. Gleichzeitig hat die Stufenanzahl einen unmittelbaren Einfluss auf die Kosten dieses neuen Betriebsmittels und auf die Baugröße. Diese ist wiederum durch die Forderung, dass das Betriebsmittel rONT in bestehende Stationen eingebracht werden kann, limitiert, sodass sich ein unmittelbares Spannungsfeld ergibt.

## 9. Ausblick

Im Zuge des e-home – Energieprojektes 2020 [EHO12] untersucht E.ON Avacon mit seinen Projektpartnern seit Sommer 2011 nun praktisch den Einsatz mehrerer rONT in einem Ortsnetz und den Ausbau der hier vorgestellten Eingrößen- zu einer Mehrgrößenregelung. Neben technischen Fragen spielt dabei insbesondere die Frage des Mehrnutzens eines Überganges in den Multisensorbetrieb auf PowerLine-Basis eine große Rolle. Hierbei wird geprüft, ob der kommunikationsseitige Mehraufwand mit einem Mehrnutzen insbesondere in Hinsicht auf das Integrationspotenzial der Lösung korrespondiert.

Daneben gibt es noch einen weiteren Forschungsstrang, der auf Basis der vorliegenden Untersuchungen verfolgt wird: Die dezentrale Spannungsregelung. Wenn es im Zuge der dynamischen Entwicklung auf der Herstellerseite gelingt, eine ebenso robuste wie kompakte und preiswerte Technologie für rONT zu entwickeln, so ist zu erwarten, dass sich bei einem weiteren Zubau an dezentraler Erzeugung diese dem konventionellen Netzausbau vermutlich häufig überlegene Technologie rasch ausbreiten wird. Allerdings wird bisher lediglich ein bedarfsbezogener, punktueller Einsatz diskutiert. Dieser punktueller Einsatz löst zwar die Spannungshaltungsprobleme in der NS-Ebene, nicht aber die mindestens ebenso großen in der MS-Ebene, für die dann weiterhin konventioneller Netzausbau erfolgen müsste. Damit stellt sich die Frage, ob nicht in solchen Fällen ihr umspannwerkweiter, flächendeckender Einsatz und damit eine vollständige Dezentralisierung der Spannungsregelung (DSR) vorteilhaft sein kann.

Dafür wäre es wünschenswert, heute schon zu wissen, welche sicherlich erweiterte Regelfähigkeit solche DSR-fähigen Transformatoren aufweisen müssen, um den Entwicklungsprozess frühzeitig in zukunftssträchtige Bahnen zu lenken und insbesondere diejenigen Technologien nicht weiter zu verfolgen, die nur relativ geringe Regelbereiche abdecken können. Dies wird derzeit in weiteren Forschungsarbeiten untersucht. Detailliertere Überlegungen zu dieser Frage finden sich in [SCH11]. Ein Pilotprojekt auf diesem Gebiet ist für Ende 2012 geplant. Dann soll ein gesamter UW-Ring mit rONT ausgerüstet werden, in dem dann keine über [DIN10] hinausgehenden Restriktionen für das MS-Spannungsband mehr gelten.

### Literaturverzeichnis:

- [AE09] Bedienungsanleitung Spannungsregler REG-D™ (A.Eberle GmbH & Co. KG; Stand: 12.02.2009/03)
- [BDE08] Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Juni 2008
- [DIN10] DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.:2010
- [EHO12] aktuelle Informationen unter [www.ehomeprojekt.de](http://www.ehomeprojekt.de)
- [FNN11] VDE-AR-N 4105:2011-08: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, 2011
- [RE09] Bedienungsanleitung Spannungsregler TAPCON® 230 basic (Maschinenfabrik Reinhausen GmbH; Stand 2009)
- [SCH11] Johannes Schmiesing: „Das Konzept der dezentralen Spannungsregelung“ in: Handbuch Energiemanagement, EW Medien und Kongresse GmbH, Frankfurt / Main, 31. Ergänzungslieferung Dez. 2011