



**Innovative Lösungen  
und Betriebsmittel  
für das Verteilnetz  
der Zukunft**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt

# Spannungsqualität



Abbildung 25: Einbau rONT in Ortsnetzstation, Nütheimer Straße (Aachen)

Spannungsqualität – vor allem, was die Grenzwerte der zulässigen Spannungsanhebung durch dezentrale Erzeugungseinheiten (EZE) nach VDE AR-N 4105 ([VDE11]) angeht – ist immer häufiger ein beschränkender Faktor für die Installation dezentraler EZE in Niederspannungsverteilungsnetzen.

Regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) tragen dazu bei, diese Beschränkungen kurzfristig und kosteneffizient abzubauen (vgl. [KER10], [HIL13], [MAT16]). Doch es bleiben Hemmnisse. Diese zu beseitigen war das Ziel des Verbundprojekts „Spannungsqualität in zukünftigen Verteilungsnetzstrukturen“.

Der Maschinenfabrik Reinhausen GmbH ist es gelungen, durch neue Regelalgorithmen den Funktionsumfang regelbarer Ortsnetztransformatoren hinsichtlich der

Nutzung abgesetzter Spannungssensoren zu erweitern. Die Funktionserweiterungen werden durch das Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) im Laborversuch validiert, bevor sie im Feldversuch der STAWAG in der Praxis erprobt werden. Ferner werden die Potenziale der Funktionserweiterungen vom IFHT analysiert – mit dem Ziel, das Integrationspotenzial von Niederspannungsverteilungsnetzen für Strom aus dezentralen EZE zu steigern.

## Ziele

Aktuelle Untersuchungen weisen einen hohen Ausbaubedarf der Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze in Deutschland aus. Der Ausbaubedarf in der Niederspannungsebene kann dabei durch den Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren signifikant gesenkt werden (vgl. [DEN12], [BMW14]).

### Kurzfristige Lösungen mit langen Nutzungsdauern erforderlich

Der überwiegende Anteil des prognostizierten Netzausbaubedarfs wird innerhalb der nächsten Dekade erwartet. Entsprechend müssen Technologieoptionen kurzfristig einsetzbar sein. Sie sollten langfristig nutzbar sein, um gegenüber konventionellen Betriebsmitteln (mit Nutzungsdauern von 40 Jahren und mehr) keine unangemessen erhöhten Planungs-, Wartungs- und Erneuerungsaufwände zu verursachen. Die Vielzahl notwendiger Netzausbaumaßnahmen verlangt ferner nach kurzen Entscheidungsprozessen und die Vielzahl betroffener Netzbetreiber verlangt nach einfachen Regeln oder Verfahren zur Bestimmung der jeweils kosteneffizientesten Netzausbaumaßnahme. Die Notwendigkeit, neue und aufwendige Softwarewerkzeuge anzuwenden, um den Nutzen von Technologieoptionen zu beurteilen, oder hohe Aufwände für die Installation oder Konfiguration (etwa optimierte Kennlinien für das Blindleistungsmanagement) in Bestandsnetzen hingegen bedingen einen großen Bedarf, das Netzplanungspersonal entsprechend zu qualifizieren. Dies hindert eine Vielzahl an Netzbetreibern an der kurzfristigen Nutzung in der Praxis. Regelbare Ortsnetztransformatoren erfüllen diese Anforderungen und stehen daher im Fokus dieses Forschungsvorhabens.

Es ist zu untersuchen, wie der Nutzen von rONT für die Integration dezentraler Erzeugungseinheiten mit vertretbarem Aufwand in kurzer Zeit bewertet werden kann und wie sich die Planungsschritte in die bestehenden Planungsgrundsätze für Niederspannungsverteilungsnetze einfügen lassen. Dazu werden Planungshilfen für den Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren entwickelt.

### Keine Beeinträchtigung des Netzbetriebs zulässig

Die verfügbaren Technologieoptionen sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt wenig verbreitet und so verfügt man über nur geringe Betriebserfahrungen. Es ist davon auszugehen, dass die überwiegende Anzahl der Netzbetreibern nur mit wenigen oder keinen der verfügbaren Technologieoptionen bereits Erfahrung gesammelt hat. Das verwundert vor allem deshalb nicht, da sich die Technologieoptionen in einer Vielzahl möglicher Ausprägungen darbieten, die teilweise noch prototypischen Charakter haben. Für regelbare Ortsnetztransformatoren ist zwar die grundsätzliche Funktionsweise der Spannungsregelung mittels Sammelschienenregelung von Hochspannungstransformatoren bekannt. Verfahren zur Spannungsregelung mittels Informationen aus abgesetzter Sensorik in Niederspannungsverteilungsnetzen sind jedoch bisher nicht erprobt. Ferner zeichnen sich Netze der Niederspannungsebene durch andere Strukturen und Betriebsweisen aus als Netze höherer Spannungsebenen, die im Praxiseinsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren zu berücksichtigen sind, um auf deren Betriebsverhalten Einfluss nehmen können. Ausgewählte Beispiele sind:

- offene Betriebsweise der vorherrschenden Strahlen-, Strang- und Ringnetzstrukturen mit der Möglichkeit, Umschaltungen durch manuelles Einsetzen oder Entfernen von Sicherungen vorzunehmen
- häufig kein digitales Netzabbild oder keine automatisierte Aktualisierung des digitalen Netzabbilds (z. B. nach Umschaltmaßnahmen)
- Einsatz von Blindleistungsmanagement bei bestehenden EZE und neu installierten Anlagen mit „Standardparametrierung“ nach dem  $\cos \varphi$  (P)-Verfahren
- in der Regel keine Zustandserfassung oder Einbindung von Betriebsmitteln in Netzleitsysteme

Daher ist zu untersuchen, welche Wechselwirkungen zwischen regelbaren Ortsnetztransformatoren und dem Blindleistungsmanagement dezentraler EZE auftreten und welche Einflüsse geplante Schaltmaßnahmen und Auslösungen des Schutzsystems in Netzen mit regelbaren

Ortsnetztransformatoren haben. Ferner ist zu ermitteln, wie die technischen Eigenschaften und die Zuverlässigkeit verfügbarer Kommunikationsmedien die Zuverlässigkeit, den Nutzen und die Funktionsweise von regelbaren Ortsnetztransformatoren beeinflussen.

Im realen Netzbetrieb ist daher in Feldversuchen das Verhalten von regelbaren Ortsnetztransformatoren mit verschiedenen Regelungsalgorithmen und abgesetzter Sensorik zu erproben. Um die Versorgungszuverlässigkeit nicht zu beeinträchtigen, werden den Feldversuchen



Abbildung 26: rONT mit Steuerschrank der Maschinenfabrik Reinhausen

Laborerprobungen vorangestellt. Diese dienen darüber hinaus dazu, das Verhalten von rONT in einer Vielzahl von Situationen zu erproben, die im realen Netz nur quasizufällig eintreten und nicht reproduziert werden können (etwa Spannungseinbrüche in vorgelagerten Netzebenen). Die Feldversuche sind durch geeignete Auswahl der Netze, Ausstattung mit Messtechnik und Wahl der jeweils zu erprobenden Regelungsverfahren des rONT sowie durch Auswertung der aufgezeichneten Messwerte wissenschaftlich zu begleiten.

**LABORPRÜFUNGEN MÜSSEN DAS VERHALTEN REGELBARER ORTSNETZTRANSFORMATOREN IM NORMALEN UND GESTÖRTEN BETRIEB ANALYSIEREN UND DAS VERHALTEN BEI BETRIEBLICHEN SCHALTMAßNAHMEN AUFZEIGEN.**

**FELDVERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN REGELUNGsalgorithmen LIEFERN DIE NÖTIGE PRAXISERFAHRUNG, UM HEMMNISSE FÜR DIE RONT-NUTZUNG ABZUBAUEN.**

**DAS VORLIEGENDE FORSCHUNGSVORHABEN TRÄGT DAZU BEI, REGELBARE ORTSNETZTRANSFORMATOREN KURZFRISTIG UND SICHER EINSETZEN ZU KÖNNEN.**

## Arbeiten und Ergebnisse

Schwerpunkte der Entwicklungstätigkeiten sind die in der „Weiterentwicklung der Regelungsalgorithmen“, die „Laborvalidierung“ sowie der „Aufbau und Betrieb des Feldversuchs“. Anhand ausgewählter Beispiele werden die wesentlichen Entwicklungen im Folgenden diskutiert.

### Weiterentwicklung der Regelungsalgorithmen

Zur Spannungsregelung mittels regelbarer Ortsnetztransformatoren sind sekundärtechnische Komponenten und durch diese ausgeführte Regelungsalgorithmen erforderlich. Diese überwachen die verfügbaren Regelgrößen und steuern den Laststufenschalter, der über Wicklungsanzapfungen im Transformator das wirksame Übersetzungsverhältnis unter Last verändern kann. Im vorliegenden Fall ist die Sekundärtechnik als speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit Feldbusklemmentechnik ausgeführt („Controller“), die anforderungsgerecht verschiedene Module zur Kommunikation und Messwertverarbeitung umfasst. Die folgenden Regelungsalgorithmen werden durch die Maschinenfabrik Reinhausen im Projekt entwickelt: Sammelschienenregelung, leistungs- und stromabhängige Sollwertanpassung, Regelung mit abgesetztem Sensor sowie Multisensorregelung (vgl. [MAT15]).

Die Sammelschienenregelung basiert auf der messtechnischen Erfassung der Spannung an der unterspannungsseitigen Sammelschiene des Transformators. Die Regelung stellt sicher, dass ein Toleranzbereich dieser Spannung eingehalten wird, sofern die mögliche Änderung des Übersetzungsverhältnisses dazu ausreichend ist. Liegt die Spannung außerhalb des Toleranzbereichs, wird nach einer vorgegebenen Verzögerungszeit das Übersetzungsverhältnis geändert. Dazu müssen alle Außenleiterspannungen gemessen werden – im vorliegenden Fall unmittelbar durch das Feldbusklemmensystem.

Die Regelung mittels leistungsabhängiger oder stromabhängiger Sollwertanpassung ist eine Variante der Sammelschienenregelung. In Abhängigkeit vom Leistungs- bzw. Stromfluss über den Transformator wird der Toleranzbereich der Sammelschienenregelung angepasst. Bei positivem Strom- bzw. Leistungswert (d. h., der Verbrauch überwiegt die Einspeisung im versorgten Niederspannungsnetz) wird der Toleranzbereich angehoben, um lastbedingten Spannungsabsenkungen entgegenzuwirken. Bei negativem Leistungs- bzw. Stromwert wird die Spannung abgesenkt, um einspeisebedingte Spannungsanhebungen zu kompensieren. Zusätzlich zur Spannung müssen der Strombetrag und die Phasenlage der Ströme aller Außenleiter gemessen werden – im vorliegenden Fall mittels Stromwandlern und einer integrierten Leistungsmessklemme des Feldbusklemmensystems.

Die Verfahren „Regelungen mit abgesetztem Sensor“ sowie „Multisensorregelung“ nutzen Spannungsinformationen von Sensoren an einem oder mehreren Punkten im Niederspannungsnetz. Sie erfordern die messtechnische Erfassung dieser Spannungen sowie deren Übertragung an den Controller, der die Regelungsalgorithmen ausführt und den Laststufenschalter ansteuert. Im vorliegenden Fall sind die notwendigen Sensoren analog zum Controller als speicherprogrammierbare Steuerungen mit Feldbusklemmentechnik aufgebaut. Diese verarbeiten die Messwerte, speichern diese lokal auf SD-Speicherkarten (zur späteren Auswertung des Feldversuchs) und übertragen die verarbeiteten Messwerte über eine beliebige (IP-basier-

### Die Verfahren „Regelungen mit abgesetztem Sensor“ sowie „Multisensorregelung“ nutzen Spannungsinformationen von Sensoren an einem oder mehreren Punkten im Niederspannungsnetz.

te) Kommunikationsstrecke. Im Projekt kommen dazu Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über Powerline-Kommunikation (PLC) bzw. VPN-Verbindungen über Mobilfunk (GPRS/UMTS) zum Einsatz. Die Messwertverarbeitung umfasst u. a. eine fortlaufende Änderungsüberwachung, um aus Gründen der Datensparsamkeit (besonders im Zusammenhang mit Mobilfunkverbindungen) Daten nur bei signifikanten Änderungen der Messgrößen zu übertragen. Abbildung 27 zeigt einen abgesetzten Sensor, installiert in einem Kabelverteilerschrank.

Das Verfahren „Regelung mit abgesetztem Sensor“ stellt – analog zur Sammelschienenregelung – sicher, dass

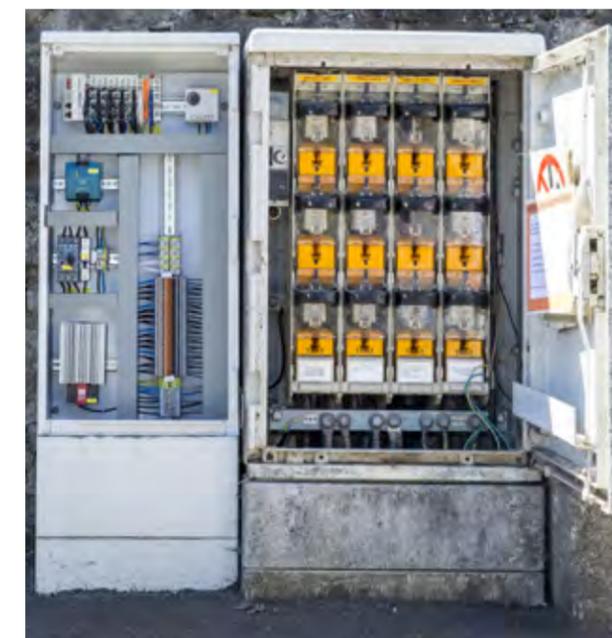


Abbildung 27: Abgesetzter Sensor neben Kabelverteilerschrank

an einem ausgewählten Messpunkt ein vorgegebener Toleranzbereich der Spannung eingehalten wird. Gerät die Spannung außerhalb dieses Toleranzbereichs, löst der Controller eine Stufenschaltung aus.

Mittels „Multisensorregelung“ werden die verfügbaren Messwerte aller abgesetzten Spannungssensoren sowie der Sammelschienenspannung ausgewertet und die optimale Stufe des rONT ausgewählt. Dabei gilt die Stufe als optimal, die zu einer Minimierung der Summe aller betragsmäßigen Abweichungen der Spannungen von einem vorgegebenen Sollwert führt.

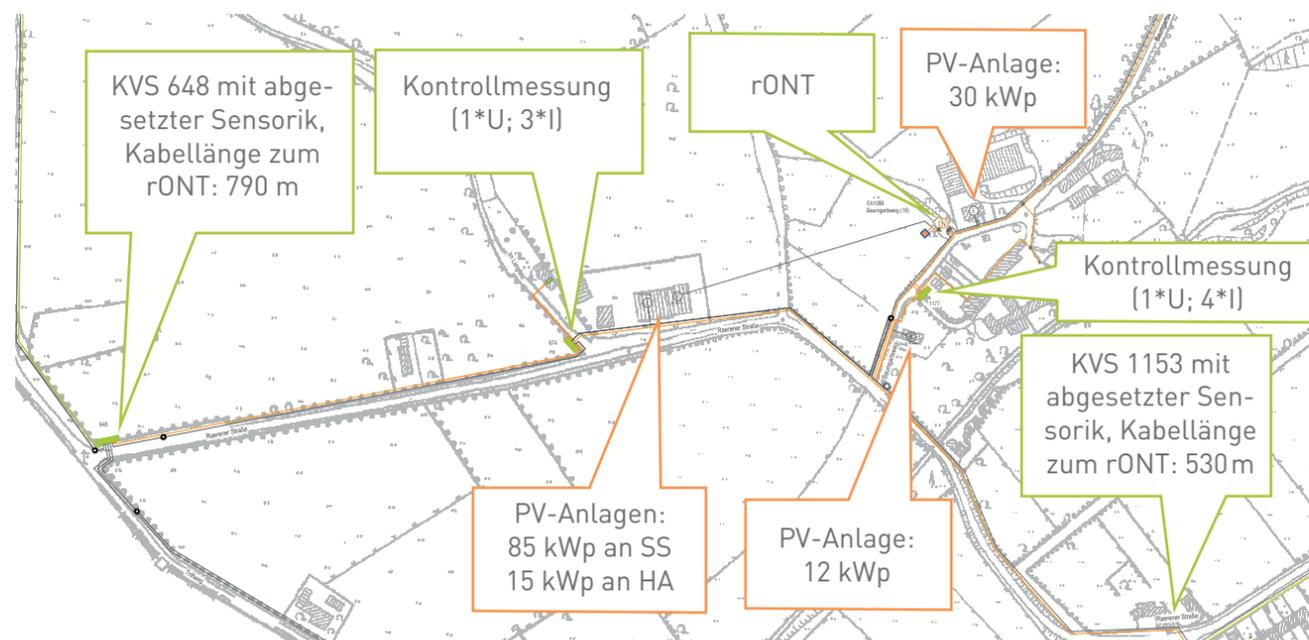


Abbildung 28: Netzgebiet im Bereich Baumgartsweg – georeferenzierte, maßstäbliche und lagerichtige Darstellung (Originaldaten); IFHT

### Aufbau und Betrieb des Feldversuchs

Ausgewählt werden die Netzgebiete für den Feldversuch in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern. Der örtliche Netzbetreiber INFRAWEST GmbH stellt digitalisierte Netzpläne sowie Informationen zu den angeschlossenen Kunden bereit, die für die Berechnung mittels probabilistischen Methoden aufbereitet werden. Dabei werden vor allem die folgenden Informationen übernommen:

- Eigenschaften der Transformatoren und Leitungen: Länge, Widerstands- und Induktivitätsbeläge, Strom- bzw. Leistungsbelastbarkeit

- Verknüpfung der Leitungen zu einem Knoten- und Kantenmodell, einschließlich des Zustands möglicher Trennstellen
- Eigenschaften der elektrischen Verbraucher: Differenzierung nach Haushalt/Gewerbe/Landwirtschaft, Jahresenergieverbrauch, Netzanschlusspunkt

Abbildung 28 zeigt als Beispiel das Netzgebiet „Baumgartsweg“ mit Informationen zu den installierten dezentralen EZE (Photovoltaikanlagen) sowie den installierten Messgeräten

### Kommunikationskonzept:

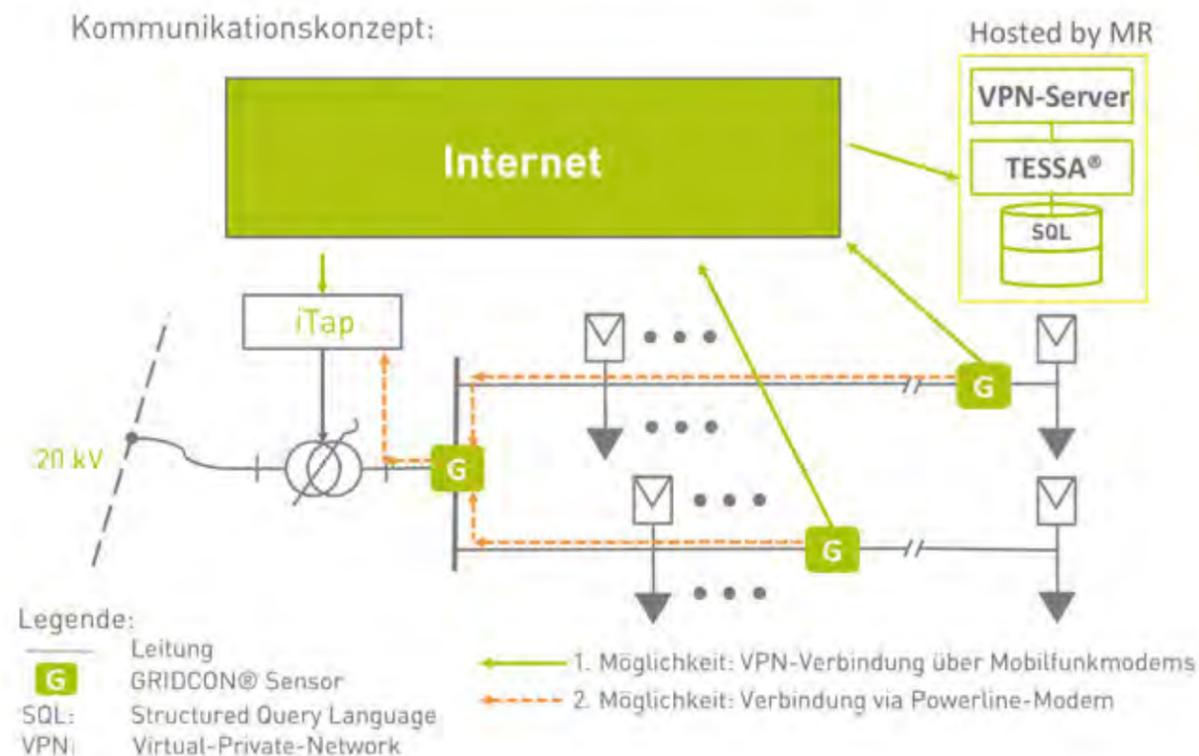


Abbildung 29: Kommunikationskonzept für rONT mit abgesetzten Sensoren; Maschinenfabrik Rheinhausen

Für alle sechs Netzgebiete des Feldversuchs werden Analysen mittels probabilistischer Leistungsflussrechnung durchgeführt, bei denen die vorhandenen Lasten und EZE berücksichtigt werden. Es werden in jeder Berechnung ganze Jahre in viertelstündiger Auflösung betrachtet (35040 Zeitpunkte je Zeitreihe). Die höchsten und niedrigsten Spannungen determinieren die bevorzugten Standorte für die Messgeräte im Feldversuch. Aus technischen Gründen ist die tatsächliche Installation in der Regel nur in Netzstationen und in bzw. an Kabelverteilerschränken möglich. Die Spannungsmessungen werden – soweit möglich – um Leistungsmessungen an den entsprechenden Standorten ergänzt. In jedem Netzgebiet werden Messgeräte an den ausgewählten Standorten zumeist unmittelbar neben bestehenden Kabelverteilerschränken aufgebaut und in neu errichteten Kabelverteilerschränken untergebracht (vgl. Abbildung 27). Die Anzahl der Messgeräte je Netzgebiet variiert. Mindestens zwei Messgeräte werden installiert und als „abgesetzte Sensoren“ mit Kommunikationsanbindung an den rONT ausgeführt. Weitere „Kon-

trollmessungen“ werden technisch identisch ausgeführt. Es erfolgt jedoch keine Anbindung an den rONT, sondern lediglich eine Datenaufzeichnung auf SD-Karten für die Auswertung des Feldversuchs.

Die Kommunikation zwischen rONT und abgesetzten Sensoren wird über zwei verschiedene Konzepte realisiert, die in Abbildung 29 gemeinsam dargestellt sind. Möglichkeit 1 nutzt mobile Internetverbindungen, über die der rONT und jeder einzelne Sensor die Daten durch einen VPN-Tunnel zum Server der MR übertragen, der diese unmittelbar weiterleitet. Diese Variante ermöglicht die Online-Auswertung über das System TESSA®. Dieses stellt Aufzeichnungs-, Trendanalyse- und Ereignisbenachrichtigungen bereit. Möglichkeit 2 nutzt die direkte Kommunikation mittels PowerLine Communication (PLC) und ist so unabhängig von Systemen Dritter (Mobilfunk, VPN-Server etc.). Die Möglichkeit der Online-Anbindung an das TESSA®-System über ein zentrales Modem in der Netzstation wird gegenwärtig erprobt.

### Prüfung der Regelungsalgorithmen im Laborversuch

Um unerwünschtem Betriebsverhalten im Feldversuch aufgrund von beschränkter Verbindungsqualität, Fehlern im Netz, Einflüssen betrieblicher Eingriffe in die Netzstruktur oder Funktionseinschränkungen der neu entwickelten Regelungsalgorithmen vorzubeugen, werden zur Absicherung des zuverlässigen und fehlerfreien Netzbetriebs zunächst Laborprüfungen im Zentrum für Netzintegration und Speichertechnologien (Abbildung 30) durchgeführt. Ferner werden auf Grundlage der Prüfungsergebnisse Hinweise für den Netzbetrieb mit rONT erarbeitet, die über den Feldversuch hinaus Gültigkeit haben. Die durchgeführten Untersuchungen umfassen die

Prüfung aller Regelungsalgorithmen hinsichtlich ihrer spezifizierten Funktionalität. Sie umfassen vor allem:

- Prüfung der Über- und Unterspannungsblockierung, ausgelöst durch fehlerhafte Messwerte oder Spannungseinbrüche
- Prüfung der automatischen Umschaltung zwischen Regelungsalgorithmen bei Kommunikationsausfall und -wiederkehr
- Prüfung des Verhaltens bei Schaltmaßnahmen im Netz (zweiseitige Speisung von Niederspannungsnetzen mit rONT, Umschaltung des abgesetzten Sensors auf anderen Netzbereich)

Wartungs- und Reparaturmaßnahmen im Netz (z. B. an Transformatoren oder Netzstationen) erfordern Veränderungen der Netzstruktur durch das Betriebspersonal, um auch, während die Maßnahme durchgeführt wird, eine Versorgung möglichst aller Netzkunden gewährleisten zu können. Dazu werden im Niederspannungsnetz offene betriebene Strangnetze zunächst für kurze Dauer zweiseitig versorgt, um so dann die betroffene Netzstation spannungsfrei schalten zu können. Mit konventionellen Ortsnetztransformatoren bedarf es dazu keiner besonderen Maßnahmen. Ebenso ist für rONT mit Sammelschienenregelung keine besondere Maßnahme notwendig, wie frühere Untersuchungen zeigen. Für die Dauer der zweiseitigen Versorgung bilden sich jedoch Kreisströme aus, die von der leistungs- und der stromabhängigen Sollwertanpassung detektiert werden können. Der Einfluss auf den Betrieb des rONT wird mit dem Laboraufbau nach Abbildung 31

analysiert. Ein regelbarer Ortsnetztransformator T2 mit leistungsabhängiger Sollwertanpassung versorgt über eine Kabelstrecke eine Last und eine Einspeisung und ist über eine weitere Kabelstrecke mit einem Ortsnetztransformator T1 verbunden. Diese Verbindung ist zunächst getrennt (S1 geöffnet) und wird zum Zeitpunkt  $t = 60$  s geschlossen. Es bildet sich aufgrund der Spannungsdifferenz zwischen den Sammelschienen beider Transformatoren ein Kreisstrom in Höhe von ca. 150 A. Für die leistungsabhängige Sollwertanpassung von T2 wirkt dieser Strom wie eine Einspeisung. Es resultiert eine Anpassung des Spannungssollwerts auf einen niedrigeren Wert. T2 verändert das Übersetzungsverhältnis von Stufe 4 auf Stufe 3. In der Folge ergeben sich mehrfach erhöhte Kreisströme, jeweils gefolgt von einer Veränderung der Stufe. Das Öffnen von S1 unterbricht den Kreisstrom und führt zur Rückkehr von T2 in Stufe 4.



Abbildung 30: Laborübersicht, links Wechselrichter und Laborsteuerung, mitte Netzstationen, rechts Niederspannungsnetzsimulator und Spannungseinbruchstestsystem; IFHT

**Nicht nur für den Feldversuch sind daher betriebliche Umschaltmaßnahmen der dargestellten Art bei aktivierter Regelung mit leistungsabhängiger Sollwertanpassung zu vermeiden.**

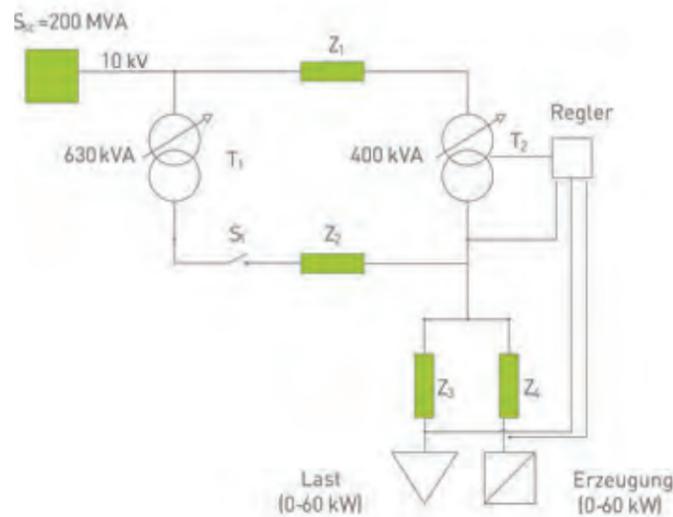


Abbildung 31: Laboraufbau und Ergebnisse, Parallelschaltung bei LASA-Regelung; IFHT

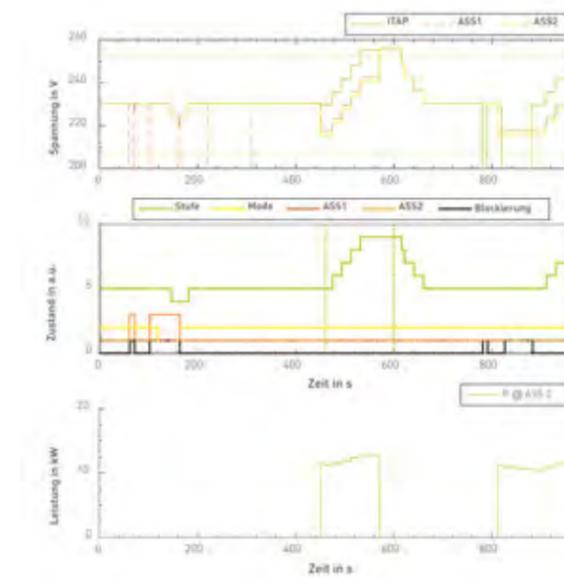
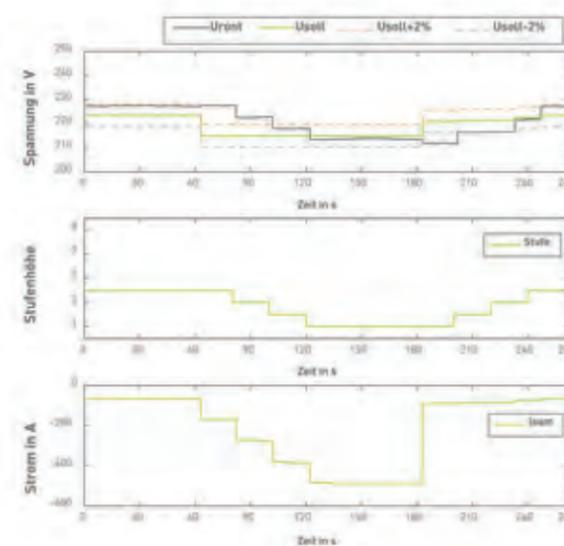


Abbildung 32: Mögliches Verhalten bei Ausfall der Kommunikationsverbindung; IFHT

Bei der Nutzung abgesetzter Sensoren werden deren Messwerte zur Vermeidung großer Datenvolumina nur bei signifikanter Änderung einzelner oder aller vorliegenden Messwerte übertragen, mindestens jedoch nach einem definierten Zeitintervall von 30 Minuten. Die Regelung des rONT arbeitet stets mit dem aktuellsten vorliegenden Wert. Erst nach Ablauf des Zeitintervalls („Time-out“) erfolgt mangels aktueller Werte eine Umschaltung auf die Sammelschienenregelung. Dies birgt die Gefahr, dass ein zwischenzeitlicher Fehler im abgesetzten Sensor oder ein Ausfall der Kommunikationsverbindung dazu führt, dass diese Werte nicht berücksichtigt werden können, auch wenn die Spannungswerte sich am Sensor signifikant ändern: Die Stufe wird also nicht geändert, obwohl die Spannung am Sensor vom Toleranzbereich abweicht. Eine andere mögliche Folge zeigt Abbildung 32. Der rONT arbeitet im Modus „Regelung mit abgesetztem Sensor“. Zum Zeitpunkt  $t = 450$  s verursacht eine sprunghafte Änderung einer ohmschen Last eine Veränderung der Spannung am Sensor um ca. 10 V. Der neue Spannungswert wird an den rONT übertragen, sodann bricht die Kommunikationsverbindung ab. Der übertragene Spannungswert liegt außerhalb des Toleranzbereichs und führt zu einer Änderung des Übersetzungsverhältnisses

nach einer vorgegebenen Verzögerungsdauer von 15 s. Die Spannung am Sensor wird in den zulässigen Bereich zurückgeführt, jedoch kann diese Änderung nicht übertragen werden. Im Regler liegt weiterhin die letzte übertragene Information vor, die eine Verletzung des Toleranzbereichs zeigt und zu mehreren Änderungen des Übersetzungsverhältnisses führt, bis letztlich die höchste Stufe erreicht ist.

Das Ergebnis des Laborversuchs zeigt, dass für ein derartiges Betriebsverhalten mehrere Ereignisse mit unbekannter Wahrscheinlichkeit in einer definierten Reihenfolge in kurzer Dauer eintreten müssen. Jedoch zeigt es zugleich, dass die Folgen von Kommunikationsabbrüchen stark ausgeprägt sein können (Spannungsanhebung um mehr als 25 V auf Werte größer als 253 V an der Sammelschiene) und betont damit die Wichtigkeit zuverlässiger Kommunikationsverbindungen für die Regelung mit abgesetztem Sensor. Es ist ferner übertragbar auf einen anderen Fall, der im Netzbetrieb mit rONT Beachtung finden muss: Wird durch Schaltmaßnahmen im Netz der abgesetzte Sensor auf einen anderen (nicht mit dem rONT verbundenen) Netzbereich umgeschaltet, so werden dem Regler ungeeignete Spannungswerte zugeführt, die in der Folge ebenfalls zum Anfahren der Extrempositionen des Stufenschalters führen können. Für das Regelungsverfahren „Multisensorregelung“ ist grundsätzlich ein ähnliches Verhalten feststellbar, jedoch tritt dieses aufgrund der Berücksichtigung mehrerer Sensoren sowie der Berücksichtigung der Sammelschienen-Spannung mit deutlich geringerer Wahrscheinlichkeit ein.

Zur Vermeidung unerwünschten Betriebsverhaltens sind die vollständigen Ergebnisse der Laborversuche und die daraus resultierenden Empfehlungen zu berücksichtigen. Für Feldversuche mit abgesetzter Sensorik werden im Regler die zulässigen Positionen des Stufenschalters begrenzt, sodass auch im Falle des Kommunikationsabbruchs und ungünstiger Bedingungen keine unzulässigen Spannungen eintreten können. In Abhängigkeit von der jeweils verfügbaren Kommunikationsinfrastruktur sowie der Netzstruktur und Versorgungsaufgabe können daher alle verfügbaren Regelungsalgorithmen jeweils in mindestens einem Feldversuchsnetz getestet werden. Auch für den regulären Netzbetrieb mit rONT sind daher alle Regelungsverfahren geeignet. Die Anforderungen an eine hohe Verfügbarkeit des Kommunikationssystems sowie Schulung des Betriebspersonals hinsichtlich oben genannter Empfehlungen sind jedoch notwendig.

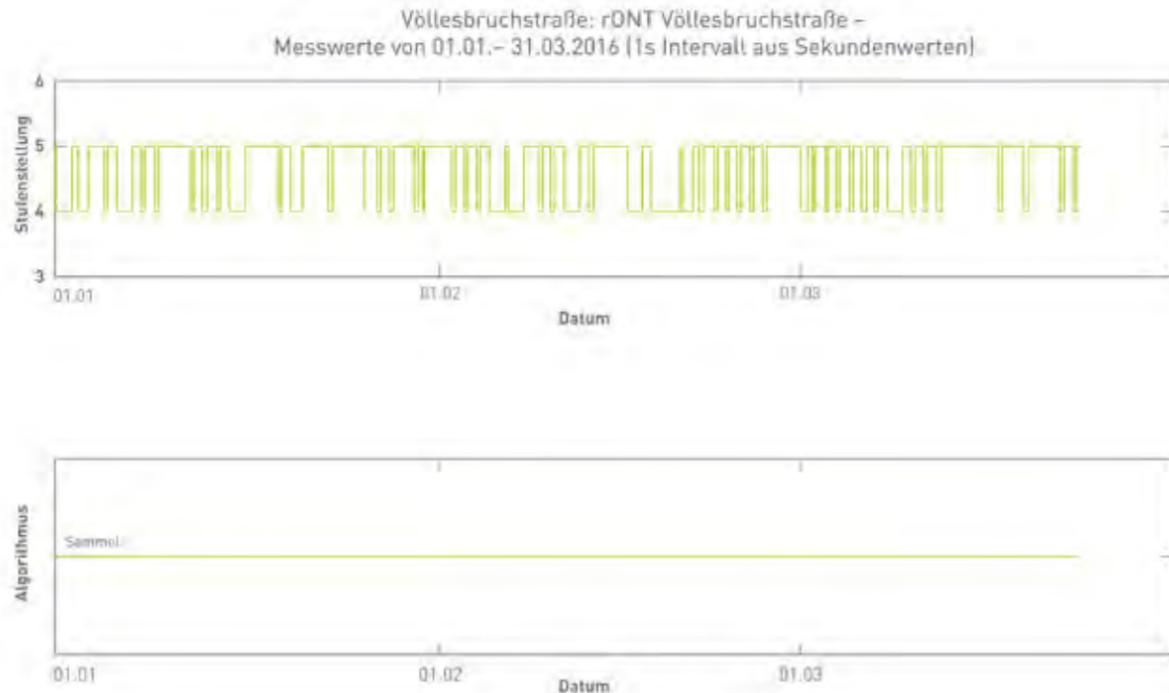


Abbildung 33: Stufenstellung im Modus Sammelschienenregelung über 3-Monats-Zeitraum; IFHT

### Erkenntnisse aus dem laufenden Feldversuch

Der laufende Feldversuchsbetrieb zeigt Tendenzen des Betriebsverhaltens des rONT mit verschiedenen Regelungsalgorithmen auf. rONT mit Sammelschienenregelung ändern wenige Mal pro Tag die Stufenposition. Mitunter bleibt diese auch für mehrere Tage unverändert. Aufgrund vergleichsweise stabiler Spannungen in den jeweils vorgelagerten Mittelspannungsnetzen ist dieses Verhalten plausibel. Die (mit Abstand) am häufigsten genutzten Stufenstellungen sind Stufe 5 (Nennübersetzungsverhältnis 20 kV / 0,4 kV) und Stufe 4 (20 kV / 0,39 kV). Dies deckt sich mit der Erwartung, da die lastgeprägten Netze mit gegenüber der Nennspannung leicht erhöhter Mittelspannung betrieben werden (Abbildung 33).

Die geringen Schwankungen der Spannungen im Mittelspannungsnetz zeigen sich auch in den Schwankungen der Sammelschienen-Spannung (unterspannungsseitig) ohne rONT. Für einen ausgewählten Tag liegen diese zwischen 224 V und 232 V. Sprunghafte Spannungsänderungen sind auf die Änderung des Übersetzungsverhältnisses des Hochspannungstransformators (HS/MS-Stufung) zurückzuführen (Abbildung 34 rechts). Die Regelung des rONT ist nicht mit der des Hochspannungstransformators koordiniert. Dadurch sind Schaltungen beider Transfor-

matoren in kurzer Folge möglich. Die Schwankungen der Spannung an der Sammelschiene steigen. Dass durch rONT der Toleranzbereich an der Sammelschiene eingehalten wird, sichert jedoch stets klar definierte Netzzustände im Niederspannungsnetz. Eindeutige Zusammenhänge zwischen den Schaltungen beider Transformatoren sind nicht erkennbar, sodass eine gegenseitige Wechselwirkung weitestgehend ausgeschlossen werden kann.

Erweiterte Regelungsverfahren (leistungsabhängige Sollwertanpassung, Regelung mit abgesetztem Sensor, Multi-sensorregelung) sind Gegenstand laufender Untersuchungen. Gegenwärtig ist die Multi-sensorregelung in einem Netzgebiet mit PLC-Kommunikationstechnik erfolgreich in Betrieb. Der rONT zeigt dort das gewünschte Verhalten, was die Umschaltung zwischen verschiedenen Regelungs-algorithmen betrifft. Abbildung 35 (unten) zeigt mehrere Umschaltungen zwischen den Regelungs-algorithmen „Multi-sensorregelung“ und „Sammelschienenregelung“ nach der erstmaligen Konfiguration der Multi-sensorregelung im rONT-Controller. Diese sind auf Unterbrechungen der Kommunikationsverbindungen zu den abgesetzten Sensoren zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme zurückzuführen. Wenn alle PLC-Modems im Netzgebiet nach wenigen Stunden erfolgreich synchronisiert sind, wird dauerhaft auf Multi-sensorregelung umgestellt.

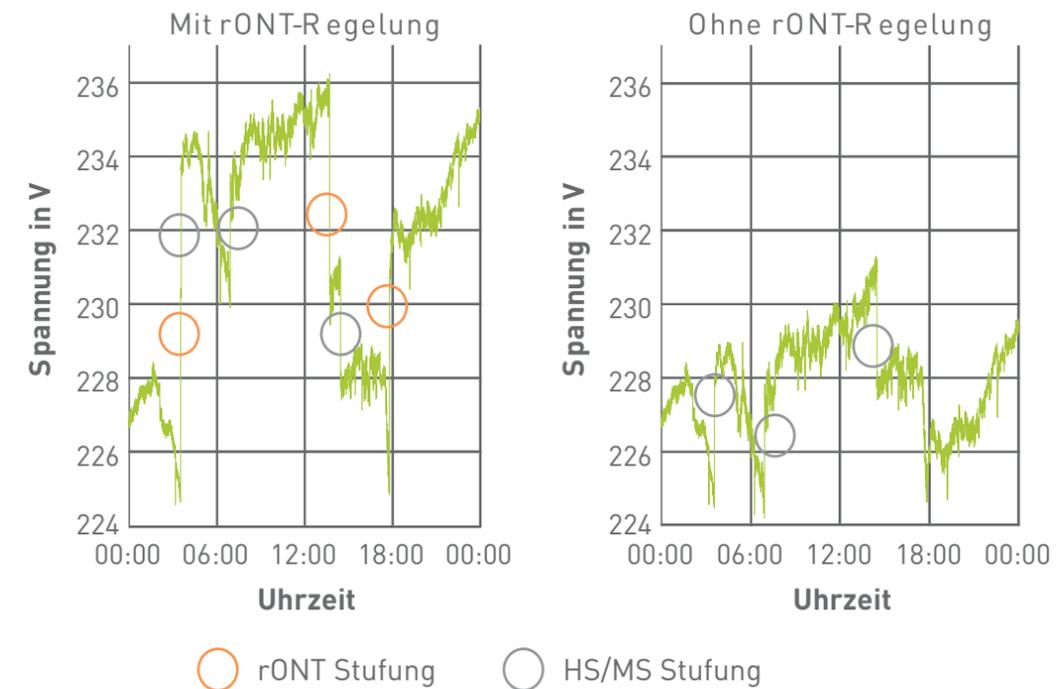


Abbildung 34: Spannungsverläufe an der Sammelschiene mit (gemessen) und ohne rONT (berechnet); IFHT

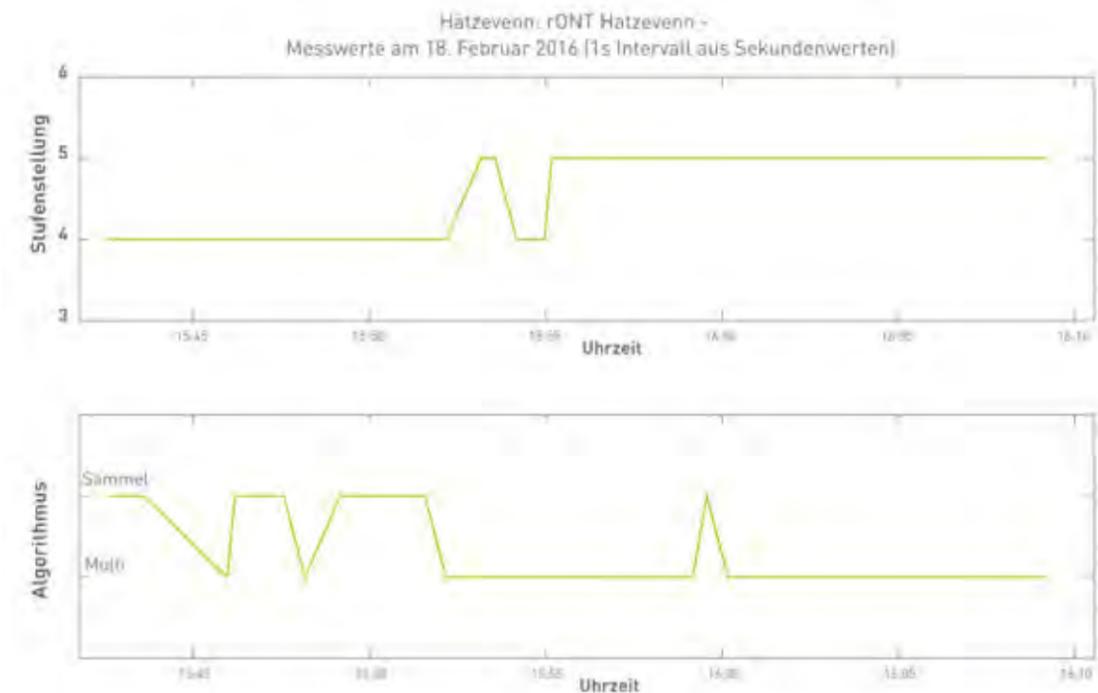


Abbildung 35: Automatische Umschaltung des Regelungsalgorithmus; IFHT

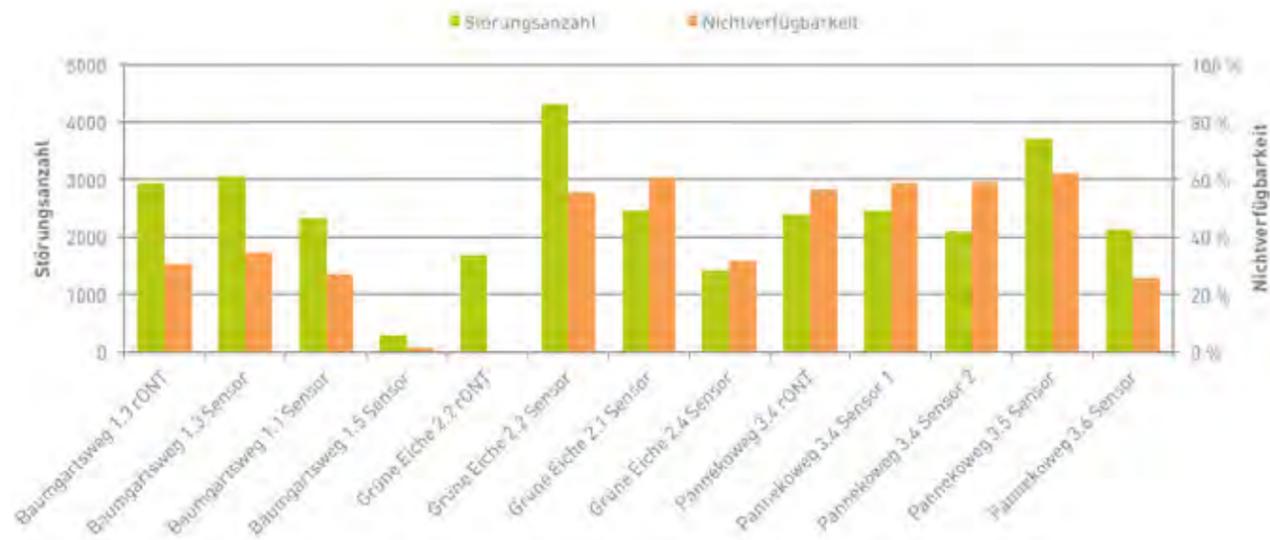


Abbildung 36: Abbrüche und Nichtverfügbarkeit der GSM-Verbindungen an verschiedenen Standorten; IFHT

In Netzen, die mit GSM-Technologie zur Anbindung der Sensoren an den rONT ausgestattet sind, können hingegen keine ausreichend zuverlässigen Kommunikationsverbindungen für die Regelung mit abgesetztem Sensor oder für die Multisensorregelung aufgebaut werden. An verschiedenen Standorten brechen die Verbindungen

mit unterschiedlicher Häufigkeit und Dauer sowie ohne erkennbaren Zusammenhang ab. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Verbindungen aller Sensoren sowie des rONT zum Internet zeitgleich verfügbar sein müssen, ergeben sich unzureichend geringe Gesamtverfügbarkeiten (vgl. Abbildung 36).

**ERFOLGREICHE LABORVALIDIERUNG ERMÖGLICHT DIE NUTZUNG ALLER REGELUNGSLGORITHMEN IM FELD.**

**LAUFENDE FELDVERSUCHE ZEIGEN ERWARTETES VERHALTEN DES RONT MIT WENIGEN SCHALTHANDLUNGEN BEI SAMMELSCHIENEN-REGELUNG IN NETZEN MIT STABILER MITTELSPANNUNG.**

## Planungshilfen für den Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren

Regelbare Ortsnetztransformatoren heben die Beschränkungen des Integrationspotenzials für Photovoltaikanlagen (PV) von Niederspannungsverteilungsnetzen durch Vorgaben der statischen Spannungshaltung in der Regel auf. Dies vereinfacht die Planungsaufgabe hinsichtlich des (gegenwärtigen und zukünftigen) Nutzens von rONT zur Integration von PV-Anlagen (und anderen dezentralen Erzeugungseinheiten). Das von den Parametern Transformatorbemessungsleistung, Anzahl versorgter

Netzstrahlen und Leitungstyp abhängige Integrationspotenzial kann in Unkenntnis der Ausprägung weiterer Netzstrukturparameter (z. B. Länge der Netzstrahlen, Positionen der Lasten und Einspeisung) übersichtlich dargestellt und als Planungshilfe herangezogen werden. Abbildung 37 zeigt das Integrationspotenzial für Kabelnetze (NAYY 4x150). Für Netze mit fünf oder mehr Netzstrahlen ist es typischerweise höher als die Transformatorbemessungsleistung (vgl. auch [MAT16]).

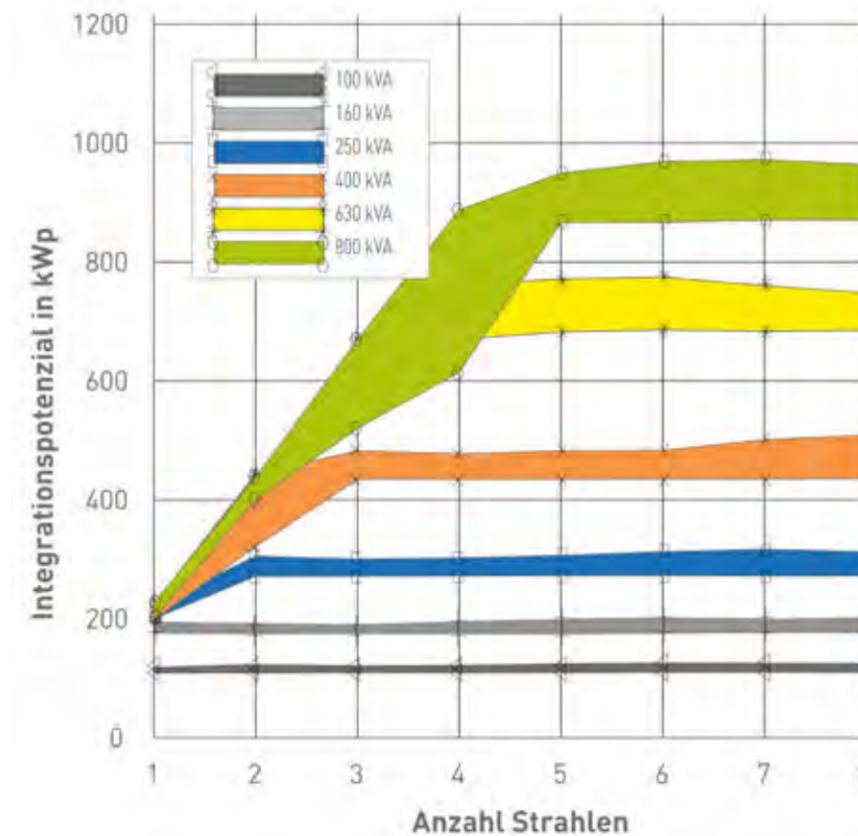


Abbildung 37: Integrationspotenzial für PV-Anlagen in Niederspannungsnetzen mit rONT; IFHT

## Empfehlungen für den Netzbetrieb mit rONT – „lessons learned“

Der bedarfsregere Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren als „Standardbetriebsmittel“, das Integrationspotenzials für dezentrale EZE zu erhöhen und konventionellen Netzausbau zu vermeiden, ist möglich und sinnvoll. Aus dem Aufbau und dem Betrieb des laufenden Feldversuchs sowie aus den Erkenntnissen der Laborversuche resultieren Anforderungen und Empfehlungen an den Netzbetrieb mit rONT.

### Qualifizierungsbedarf des Planungs- und Betriebspersonals

Es kann gezeigt werden, dass der regelbare Ortsnetztransformator die Planungsaufgabe zur Integration dezentraler Erzeugungsanlagen unter Gesichtspunkten der statischen Spannungshaltung vereinfachen kann. Es bedarf jedoch der Integration des rONT in die bestehenden Planungsgrundsätze unter Berücksichtigung weiterer Anforderungen (z. B. schnelle Spannungsänderungen).

Die Installation des rONT im Feld unterscheidet sich nur unwesentlich von der Installation eines konventionellen Ortsnetztransformators. Die Inbetriebnahme und – wie der laufende Feldversuch zeigt – gelegentliche Wartungs- und Entstörungsmaßnahmen im Betrieb erfordern jedoch die Konfiguration des Reglers und dazu notwendige Fähigkeiten (Kenntnis der verschiedenen Regelungsverfahren, Konfiguration IP-basierter Kommunikationsverbindungen) sowie entsprechende Ausstattung (Laptop, Kabel für spezielle Schnittstellen, geeignete Software und Berechtigungen im EDV-System). Eine Vereinfachung der Parametrierungsmöglichkeiten oder verschiedene „Sichten“ auf die Konfiguration für verschiedene Benutzergruppen können den Qualifizierungsbedarf in Grenzen halten. Diese Anforderungen gelten gleichermaßen hinsichtlich der genutzten IKT-Infrastruktur, die zukünftig den Stellenwert eines „Standardbetriebsmittels“ einnehmen muss. Routinemaßnahmen, wie etwa die Verlegung von Trennstellen, können im Netz mit rONT nicht mehr ungeachtet ihrer Konfiguration erfolgen.

### Zuverlässige Kommunikationslösung

Die automatische Umschaltung zwischen verschiedenen Regelungsalgorithmen des rONT stellt im Falle von Kommunikationsunterbrechungen eine sichere „Basisfunktionalität“ bereit. Nichtsdestotrotz kann unter besonderen Bedingungen bei kurzen Unterbrechungen ein ungewolltes Betriebsverhalten eintreten. PLC-Technologie zeigt im Feldversuch hinsichtlich dieser Anforderung deutlich bessere Eigenschaften und ist auch aus Gründen der Unabhängigkeit von Dritten (Mobilfunkprovider, VPN-Server) zu bevorzugen. Es zeigt sich jedoch, dass in einzelnen Netzen aufgrund unbekannter Einflüsse keine PLC-Verbindungen möglich sind. Dies erschwert die Auswahl und Planung sowohl des eingesetzten Regelungsalgorithmus wie auch der genutzten Kommunikationstechnologie extrem. Hier gilt es, robuste und zuverlässige Kommunikationslösungen für die Bedarfe zukünftiger Verteilungsnetze (weiter) zu entwickeln.

### Monitoring neuer Betriebsmittel sinnvoll

Die messtechnische Überwachung des Feldversuchs dient außer der wissenschaftlichen Auswertung auch der Absicherung des sicheren Netzbetriebs. Die (unbekannte) Zuverlässigkeit der IKT-Verbindungen und das damit einhergehende Betriebsverhalten sowie das Verhalten in Abhängigkeit von der eingestellten Parametrierung können überwacht werden. Im Bedarfsfall kann die Parametrierung angepasst werden. Aus den erhobenen Daten werden feldversuchsbegleitend Schlussfolgerungen hinsichtlich der allgemeinen Netzauslastung und Spannungshaltung gezogen. Diese geben u. a. Aufschluss über die Symmetrie und ermöglichen die Berechnung von Gleichzeitigkeitsgraden für die zukünftige Netzplanung.

## Es bedarf der Integration des rONT in die bestehenden Planungsgrundsätze



Abbildung 38: Bauernhof mit PV-Anlage, Pannekogweg (Aachen)

### Literaturverzeichnis

- [AP3] Hahulla, P.; Frings, R.; Zimmer, P.: Abschlussbericht AP3
- [BMW14] Büchner, J.; Katzfey, J.; Floercken, O. D. et al.: Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie). Forschungsprojekt Nr. 44/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Abschlussbericht, 2014.
- [DEN12] Agricola, A.-C.; Höflich, B.; Richard, P. et al.: Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. dena-Verteilnetzstudie, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin, 2012.
- [HIL13] Hille, C.; Gödde, M.; Potratz, F. et al.: Technologieoptionen für den Verteilungsnetzausbau in Deutschland - Marktanalyse und Bewertung. Schlussbericht. Aachen, 2013.
- [KER10] Kerber, G.: Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilungsnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikanlagen. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [MAT15] Matrose, C.; Cremer, M.; Schnettler, A. et al.: Control Algorithms for Voltage Regulated Distribution Transformers - Maximum Grid-Integration and Minimal Wear. 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - CIRED 2015. Lyon, Frankreich, 2015.
- [MAT16] Matrose, C.: Verfahren zur Bewertung der Einsatzpotenziale regelbarer Ortsnetztransformatoren in Niederspannungsverteilungsnetzen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2016.
- [VDE11] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.): VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. VDE-Verlag GmbH. Berlin, 2011.