

ROLL-OUT VON ÜBER 950 REGELBAREN ORTSNETZTRANSFORMATOREN (rONTs) BEI ELEKTROAZPREDELNIE YUG ZUR STEIGERUNG DER NETZSTABILITÄT UND INTEGRATION ERNEUERBARER ENERGIEN

Pavlin DZHUMALIYSKI¹, Kevin LEIPOLD²

Kurzfassung:

Elektrorazpredelenie Yug (EP Yug), Teil der EVN-Gruppe, setzt im Rahmen seiner Netzmodernisierungsstrategie über 950 regelbare Ortsnetztransformatoren (rONTs) im südöstlichen Bulgarien ein. Ziel ist die Verbesserung der Spannungsqualität und die Erhöhung der Netzkapazität zur Integration dezentraler Erzeugung, insbesondere Photovoltaik. Die Standortauswahl erfolgte über einen mehrstufigen Prozess: Analyse von Gebieten mit hoher PV-Durchdringung, Bewertung technischer Machbarkeit und Berücksichtigung zukünftiger Last- und Erzeugungsentwicklungen. Ergänzend wurden Simulationen und Feldmessungen genutzt, um die Entscheidungsgrundlage zu objektivieren.

Bis November 2025 sind 230 rONTs erfolgreich in Betrieb genommen worden. Erste Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit der rONTs zur Reduzierung von Spannungsschwankungen und Einhaltung definierter Grenzwerte. Die Inbetriebnahme verlief nach gezielten Schulungen weitgehend reibungslos. Für die nächste Projektphase sind eine Standardisierung des Auswahlprozesses, die Priorisierung kritischer Netzbereiche sowie die Einführung digitaler Zwillinge und automatisierter Spannungsdatenerfassung geplant. Diese Maßnahmen sollen die Integration erneuerbarer Energien und die Vorbereitung des Netzes auf die Energiewende weiter beschleunigen.

Keywords:

Regelbare Ortsnetztransformatoren (rONTs), Netzmodernisierung, Integration erneuerbarer Energien, Spannungsregelung

¹ Dzhumaliyski, Elektrorazpredelenie Yug EAD, Hristo G. Danov Str. 37, 4000 Plovdiv, pavlin.dzhumaliyski@elyug.bg, +359 88 28 34837, www.elyug.bg

² Leipold, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, Falkensteinstr. 8, 93059 Regensburg, k.leipold@reinhausen.com, +49 171 54 39 90 7, www.reinhausen.com

1 Einleitung

Das Verteilnetz steht vor beispiellosen Herausforderungen, die durch die rasante Transformation des Energiesektors verursacht werden. Grenzen des Verteilnetzes treten zunehmend zutage, da die beschleunigte Integration dezentraler Energiequellen (DER), siehe Abbildung 1, kritische Spannungsschwankungen und Kapazitätsengpässe erzeugt. Dieser Trend wird durch regulatorische und marktseitige Dynamiken verstärkt, einschließlich der bevorstehenden Liberalisierung für Privatkunden, die neue Wettbewerbsbedingungen schafft und die Netzbetreiber zwingt, ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Qualität sicherzustellen.

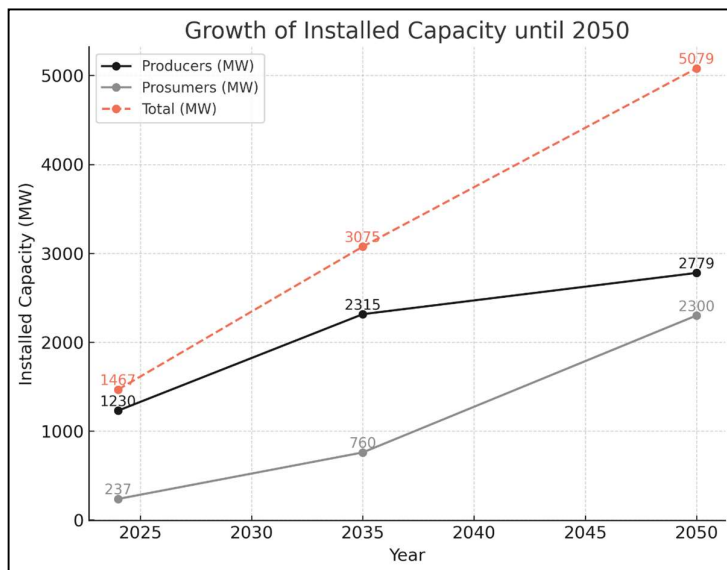


Abbildung 1: Unternehmensprognose des Wachstums der zu installierten PV-Leistung bis 2050.

Gleichzeitig steigen die Erwartungen der Kunden. Endverbraucher verlangen schnellere Genehmigungen für Netzanschlüsse und eine dauerhaft stabile Spannungsqualität, was zusätzliche Belastungen für die Betriebsprozesse bedeutet. Diese Herausforderungen werden durch die Auswirkungen durch Investitionslücken (vor 2005) weiter verschärft: EP Yug gleicht noch immer jahrzehntelange Unterinvestitionen aus, während die Nachfrage nach neuen Anschlüssen weiter zunimmt.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ist eine ausgewogene Kombination aus konventionellen und intelligenten Netzlösungen erforderlich. Die klassische Netzausbau-Strategie bleibt wichtig, reicht jedoch allein nicht mehr aus. Innovative Technologien wie regelbare Ortsnetztransformatoren (rONTs) bieten flexible und kosteneffiziente Alternativen zur Verbesserung der Netzstabilität und der verfügbaren Anschlusskapazität. Eine strategische Antwort besteht darin, die optimale Kombination dieser Ansätze zu identifizieren, um ein widerstandsfähiges, zukunftsfähiges Verteilnetz zu schaffen, das regulatorische Anforderungen, steigende Kundenerwartungen und Nachhaltigkeitsziele erfüllt.

Key Takeaway: rONTs adressieren beide dominanten Effekte (Sommer-Überspannung, Winter-Unterspannung) in einem Gerät und erhöhen die Aufnahmekapazität für PV ohne kostspielige und langwierige Netzausbauten.

2 Ziel und Vorgehensweise des Projekts

Das Hauptziel des Projekts war die Identifikation von Netzstandorten, an denen regelbare Ortsnetztransformatoren (rONTs) den größten Beitrag zur Spannungsqualität und zur Integration erneuerbarer Energien leisten können. Zur Erreichung dieses Ziels wurde auf eine schnelle Implementierung mit einer industriell etablierten, wartungsarmen Technologie zurückgegriffen, ergänzt durch die systematische Nutzung von Erkenntnissen aus früheren Pilotprojekten [1].

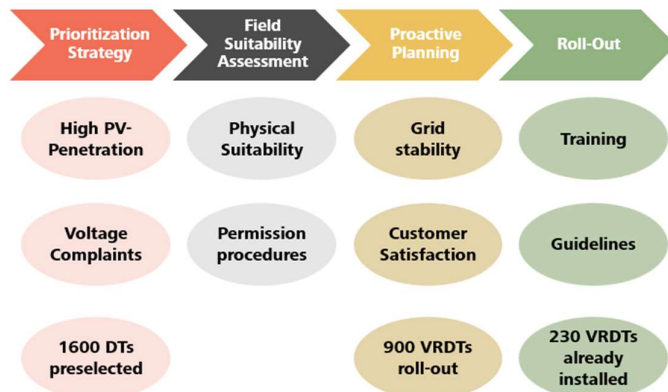


Abbildung 2: Identifizierungs-, Auswahl- und Roll-Out-Prozess

Der strukturierte Ansatz umfasste mehrere Schritte: Zunächst wurden Gebiete mit hoher PV-Durchdringung kartiert und mit Betriebsdaten sowie häufigen Spannungsbeschwerden abgeglichen, was rund 1.600 (von ca. 15.000 ONT) potenzielle Standorte identifiziert wurden. Anschließend erfolgte eine technische Machbarkeitsprüfung, wobei Genehmigungsverfahren mit hoher Komplexität bewusst ausgeschlossen wurden, um die Zeitpläne einzuhalten. In der proaktiven Planung wurden zusätzlich Regionen mit erwartetem PV-Wachstum und steigender Nachfrage berücksichtigt, sodass über 950 Standorte priorisiert wurden. Nach der Auswahl organisierte das Team gezielte Schulungen und erstellte klare Inbetriebnahme-Richtlinien (Abbildung 3).



Abbildung 3: Inbetriebnahme-Training in der EP Yug Transformatoren-Werkstatt

Die Installation der regelbaren Ortsnetztransformatoren verlief nahezu identisch zur Montage eines Standardtransformators. Lediglich zwei zusätzliche Schritte waren erforderlich: das Hinzufügen der Steuereinheit und die Durchführung des Inbetriebnahme-Prozesses. Aufgrund der zuvor durchgeführten Schulungen ergaben sich hierbei keine wesentlichen Herausforderungen. Auch die Inbetriebnahme-Zeit entsprach der eines konventionellen Transformators – ohne zusätzliche Komplexität oder Verzögerungen. Innerhalb von nur vier Monaten konnten bereits 230 der geplanten 950 rONTs erfolgreich installiert werden.



Abbildung 4: Installierter Verteilnetztransformator mit MR Stufenschalter und Steuereinheit

3 Simulationsgestützte Standortauswahl von rONTs

Im weiteren Verlauf wurde erkannt, dass der Auswahlprozess für rONT-Standorte künftig stärker datengestützt und standardisiert erfolgen muss. Aus diesem Grund wurden gezielte Simulationen durchgeführt und diese mit realen Feldmessungen validiert, um eine fundierte und objektive Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der Standorte zu schaffen.

3.1 Finden von Hot-Spots im Mittelspannungsnetzwerk mit ADMS

Das in ADMS (Advanced Distribution Management System) abgebildete Mittelspannungsnetz der EP Yug ermöglicht eine präzise und systematische Identifikation von Spannungsbandverletzungen. Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass über den Jahresverlauf ein relevanter Anteil des Mittelspannungsnetzes von kritischen Spannungen betroffen ist.

- Winter-Lastsituation: Etwa 22% der Verteiltransformatoren weisen Spannungswerte zwischen 18 kV und 20,2 kV auf;
- Sommer-Solarspitze: Rund 4 % der Verteiltransformatoren überschreiten 21,4 kV, während lokale Spitzen von unter 0,6% 22 kV übersteigen;

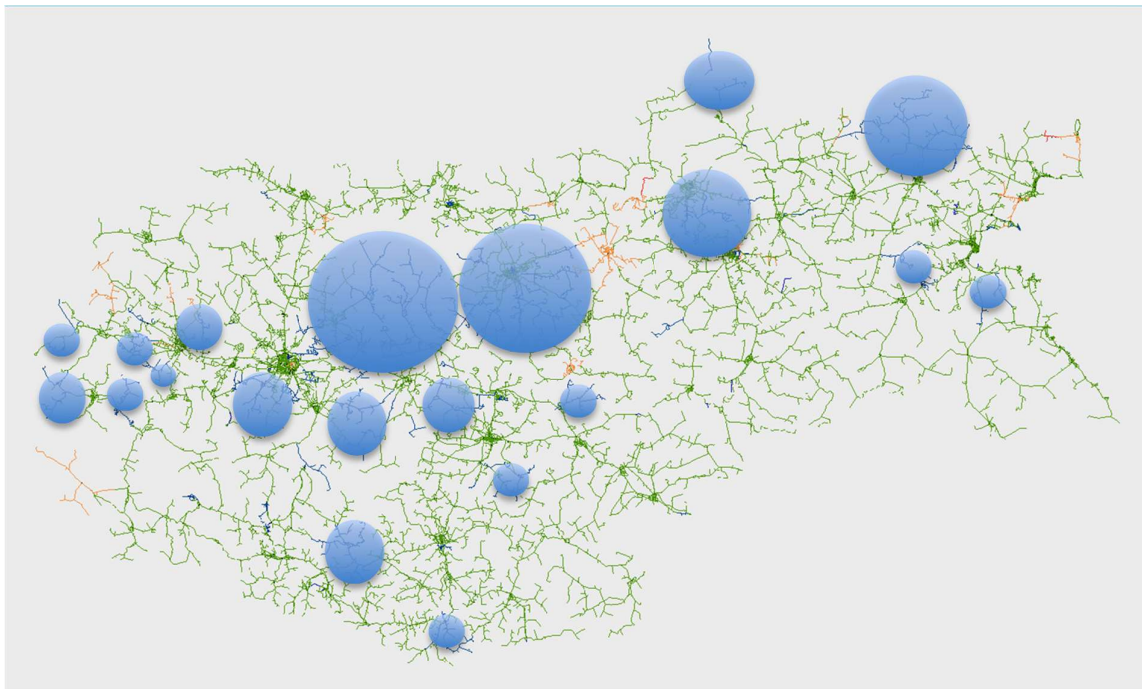


Abbildung 5: Unterspannungs-Hot-Spots in der Mittelspannung – Lastspitze ca. 21:00h Winter.

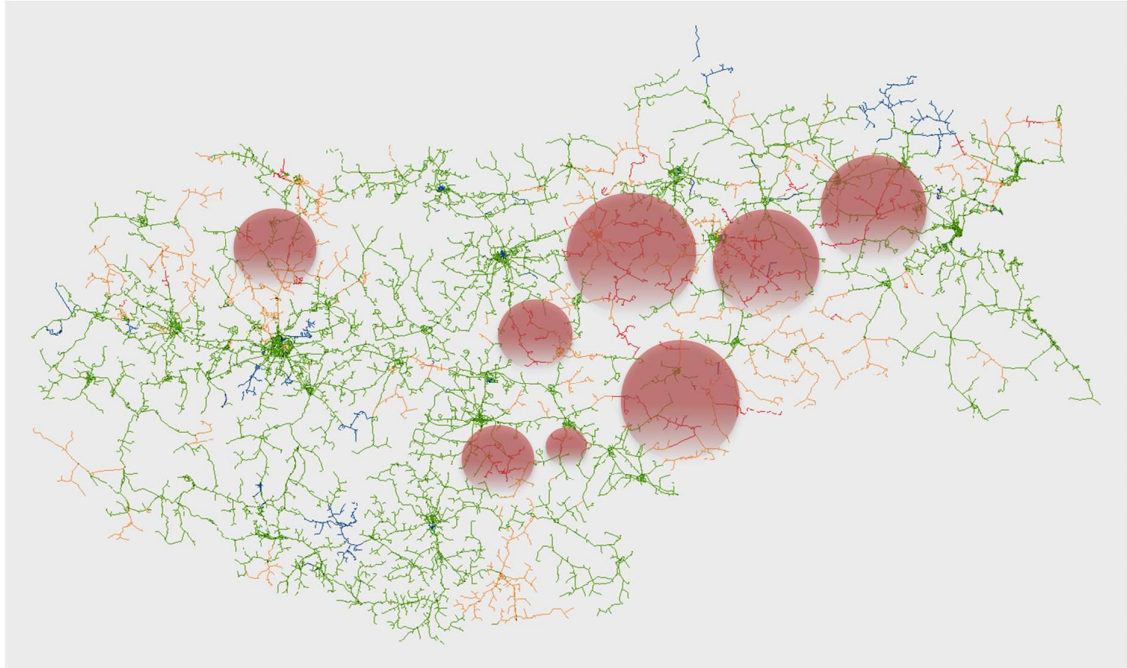


Abbildung 6: Überspannungs-Hot-Spots in der Mittelspannung – Solarspitze ca. 13:00h Sommer

Die Analyse der Simulation bestätigt zwei dominante Einflussfaktoren:

1. Relativ hohe Last im Winter

→ erhöhte Spannungsabfälle entlang langer Leitungen und an Netzrändern.

2. Hohe dezentrale PV-Einspeisung im Sommer

→ Spannungserhöhungen in Einspeiseregionen, insbesondere in Gebieten mit geringer lokaler Last.

In diesen Netzsituationen bieten regelbare Ortsnetztransformatoren eine wirksame technologische Option zur Spannungsregelung.

„rONTs wirken sowohl gegen Unterspannung im Winter als auch gegen Überspannung im Sommer und erhöhen damit deutlich die Anschlusskapazität im ländlichen Verteilnetz.“

3.2 Simulation des Niederspannungsnetzes mit Powerfactory

Ergänzend zur Mittelspannungssimulation wurde eine detaillierte Niederspannungsanalyse mit PowerFactory durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es, typische Niederspannungstopologien, realistische Last- und Einspeiseprofile sowie zukünftige Anschlussentwicklungen zu bewerten, um belastbare Kriterien für den zielgerichteten Einsatz von rONTs abzuleiten.

3.2.1 Auswahl des Niederspannungsnetzes und Motivation

Das betrachtete Netz (siehe Abbildung 7) stellt ein typisches ländliches Niederspannungsnetz in Bulgarien dar, das durch folgende Merkmale charakterisiert ist:

- Sehr hohe PV-Durchdringung mit einer mittleren installierten PV-Leistung pro Netz von über 150 kW;
- Geringe Lastspitzen: ca. 50 kW Last im betrachteten Zeitraum;
- Freileitungsnetz mit weit verzweigter Topologie mit langen Stichleitungen;
- 2.500 von 15.000 Verteilnetztransformatoren fallen unter diese Kategorie;

Diese Konfiguration ist besonders anfällig für Spannungsanhebungen durch PV-Einspeisung sowie für Spannungsinstabilitäten, insbesondere in den entlegensten Abgängen. Genau diese Herausforderungen sollen künftig durch den Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren adressiert werden.

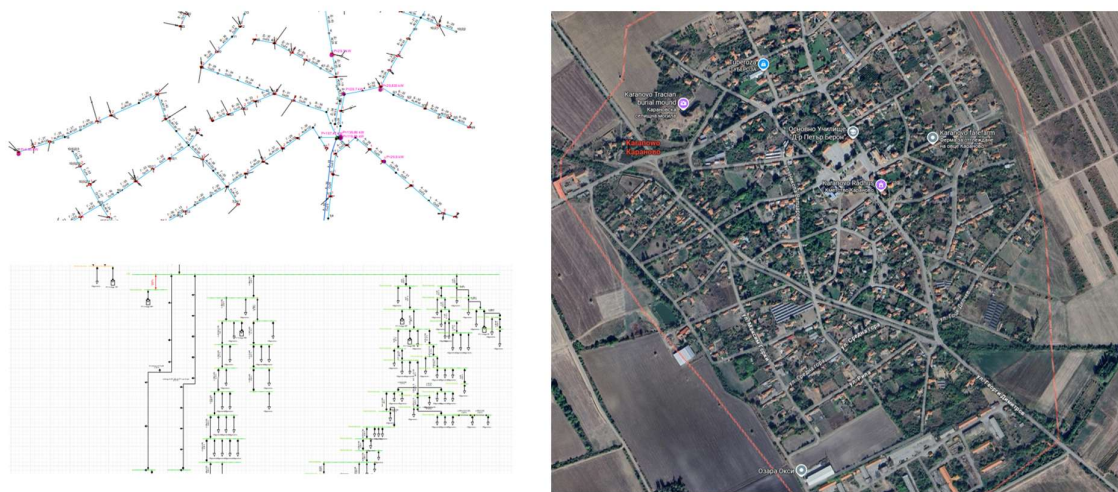


Abbildung 7: Simulation 1 - Ländliches Niederspannungsnetz simuliert mit Powerfactory

3.2.2 Beschreibung der Simulationsszenarien

Um die Wirkung der rONT-Regelung und die Sensitivität gegenüber veränderten Betriebspunkten zu analysieren, wurden vier Szenarien simuliert (siehe Tabelle 1). Diese Szenarien bilden typische heutige, kritische und zukünftig erwartbare Netzsituationen ab.

	Scenario 0, w/o OLTC	Scenario 1 w/ OLTC	Scenario 2 w/ OLTC	Scenario 3 w/ OLTC
Power Transformer Voltage	20,7kV	20,7kV	20,15 kV	20,7 kV
Load	40 kW peak	40 kW peak	40 kW peak	40 kW peak
PV connected to low voltage	500 kW peak	500 kW peak	500 kW peak	644 kW peak
Setpoint Tap Changer	-	235	235	235
PV connect to medium voltage	4900 kW peak	4900 kW peak	4900 kW peak	5160 kW peak

Tabelle 1: Verschiedene Simulations-Szenarien für das ländliche Gebiet

Scenario 0 bildet eine Referenz ohne Stufenschalter ab. Bei einer Trafospannung von 20,7 kV (oberer Grenzwert des zulässigen Spannungsbands für das betrachtete Umspannwerk) und einer installierten PV-Leistung von 500 kW im Niederspannungsnetz dient dieses Basisszenario dazu, die unkontrollierten Spannungsschwankungen eines nicht geregelten Betriebs darzustellen und als Vergleichsmaßstab für die weiteren Betrachtungen zu nutzen.

Szenario 1 untersucht anschließend den Einsatz eines rONT's unter identischen Netzbedingungen. Mit einer eingestellten Spannung von 20,7 kV und einer PV-Leistung von 500 kW wird ein Stufenschaltersollwert auf der Niederspannung von 235 V vorgegeben. Dieses Szenario repräsentiert einen typischen heutigen Betriebszustand in Gebieten mit hoher PV-Durchdringung und verdeutlicht, wie der rONT die Spannung im Niederspannungsnetz stabilisieren kann.

In Szenario 2 wird die Mittelspannung auf 20,15 kV (unterer Grenzwert vom Spannungsband) abgesenkt, während PV-Leistung und Stufensollwert unverändert bleiben. Die Simulation bildet damit kritische Unterspannungssituationen ab, wie sie durch fehlerhafte oder extern beeinflusste Regelungen der Umspanntransformatoren entstehen können. Das Szenario zeigt, wie der rONT auch unter ungünstigen Ausgangsbedingungen zur Spannungsanhebung beiträgt und Netzprobleme mitigiert.

Szenario 3 schließlich berücksichtigt den erwarteten zukünftigen Anstieg der dezentralen Erzeugung. Die PV-Leistung im Niederspannungsnetz wird auf 644 kW erhöht, während insgesamt 5.160 kW im Mittelspannungsnetz einspeisen. Bei einer Trafospannung von 20,7

kV wird damit ein zukünftiger Ausbaupfad simuliert, wie er insbesondere in Regionen mit weiter zunehmender PV-Integration zu erwarten ist. Dieses Szenario erlaubt die Bewertung der rONT-Wirksamkeit unter maximalen Einspeisebedingungen.

Insgesamt decken die vier Szenarien sowohl heutige typische Betriebspunkte als auch kritische und zukünftige Netzsituationen ab. Dadurch ermöglichen sie eine robuste und umfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit regelbarer Ortsnetztransformatoren im Niederspannungsnetz.

3.2.3 Ergebnisse der Simulationen

Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass rONTs einen erkennbaren Beitrag zur Stabilisierung der Niederspannung leisten.

Ergebnis 1: Vergleich Szenario 1 und 2 mit und ohne Stufenschalter (Abbildung 8)

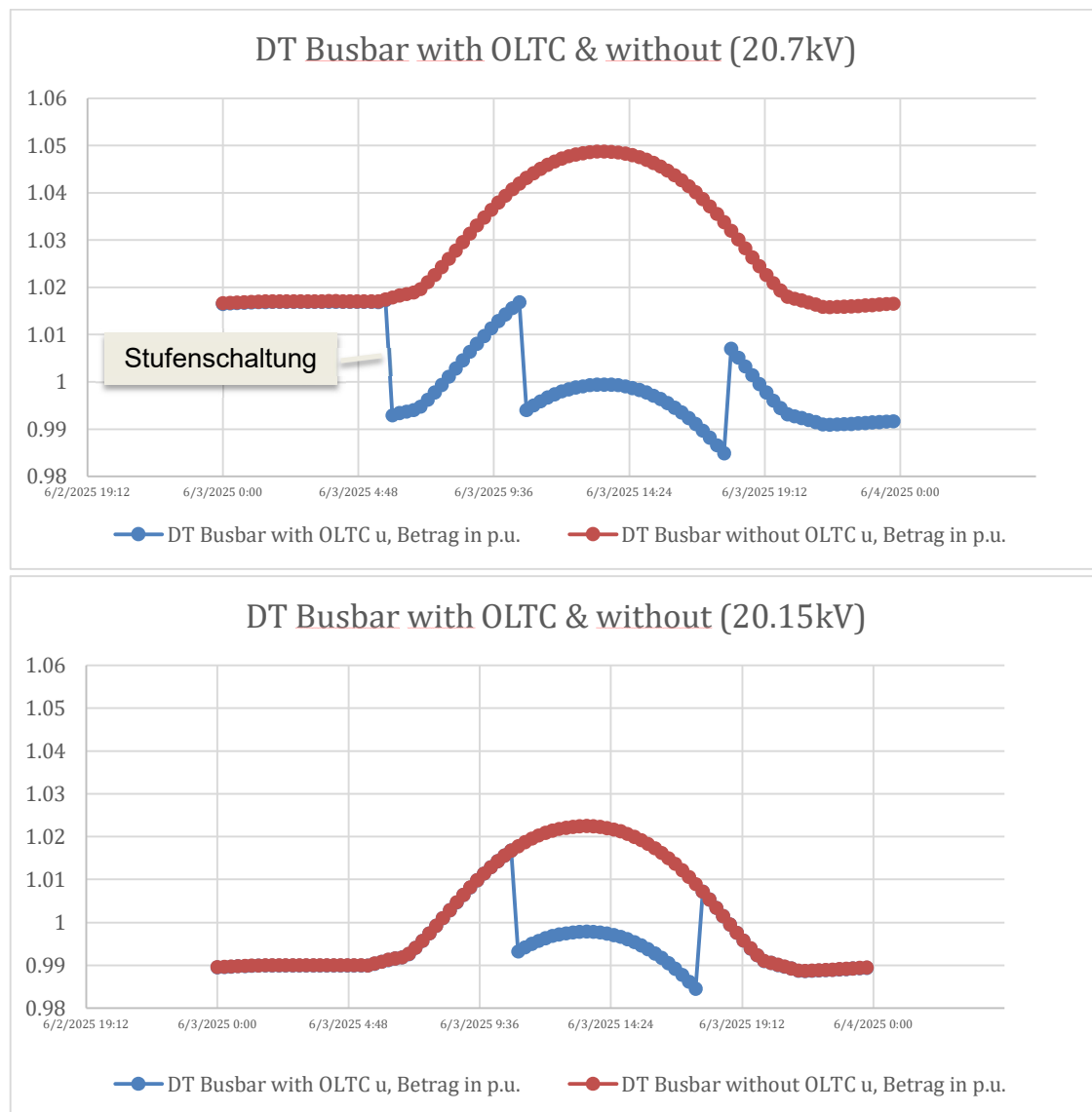


Abbildung 8: Szenario 1 und 2 mit und ohne Stufenschalter (Spannung an der Trafo-Sammelschiene)

- Ohne Stufenschalter: Spannungskennlinie ist deutlich erhöht (+5 %)
- Mit Stufenschalter: Spannung wird stabilisiert, Anhebung wird signifikant reduziert und um den Sollwert geregelt (1 p.u.)

→ Der rONT erhöht dadurch die Anschlusskapazität des Niederspannungsnetzes für u.a. PV-Anlagen.

Ergebnis 2: Wirkung am entferntesten Netzausläufer (Abbildung 9)

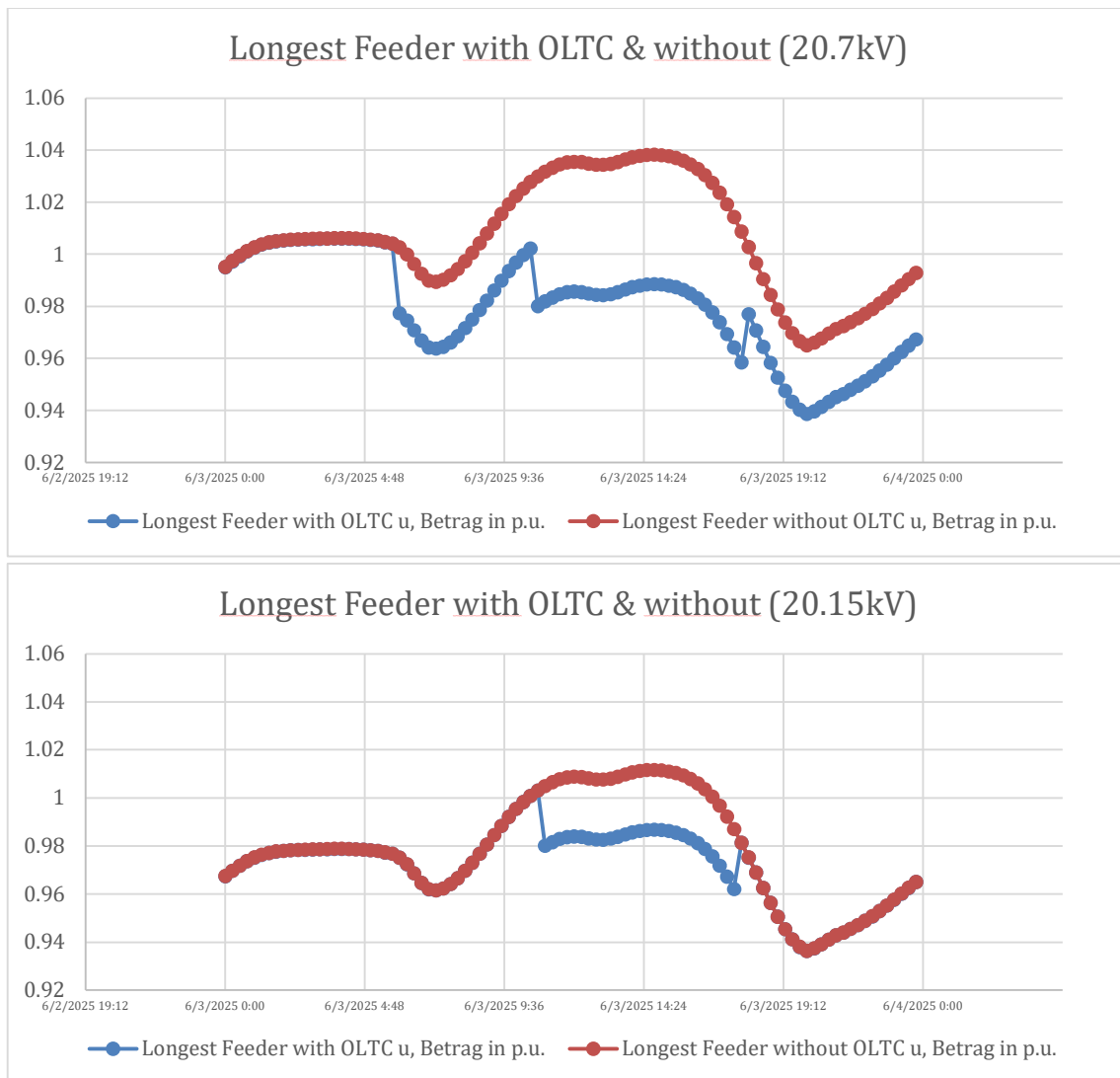


Abbildung 9: Szenario 1 und 2 mit und ohne Stufenschalter (Längste Sticheitung)

Auch am längsten Abgang wird ersichtlich, dass die Anschlusskapazität mit dem rONT erhöht wird. Nichtsdestotrotz ist erkennbar, dass bei Wegfall der PV-Leistung eine niedrigere Spannung (0.94 p.u.) mit Stufenschalter vorliegt.

→ Gerade in ländlichen Netzen mit langen Leitungen wird beim Einsatz eines rONT's die Funktion des dynamischen Spannungssollwerts immer wichtiger. Diese wird weiter unten nochmal genauer mithilfe einer Simulation dargestellt.

Ergebnis 3: Zukunftsszenario

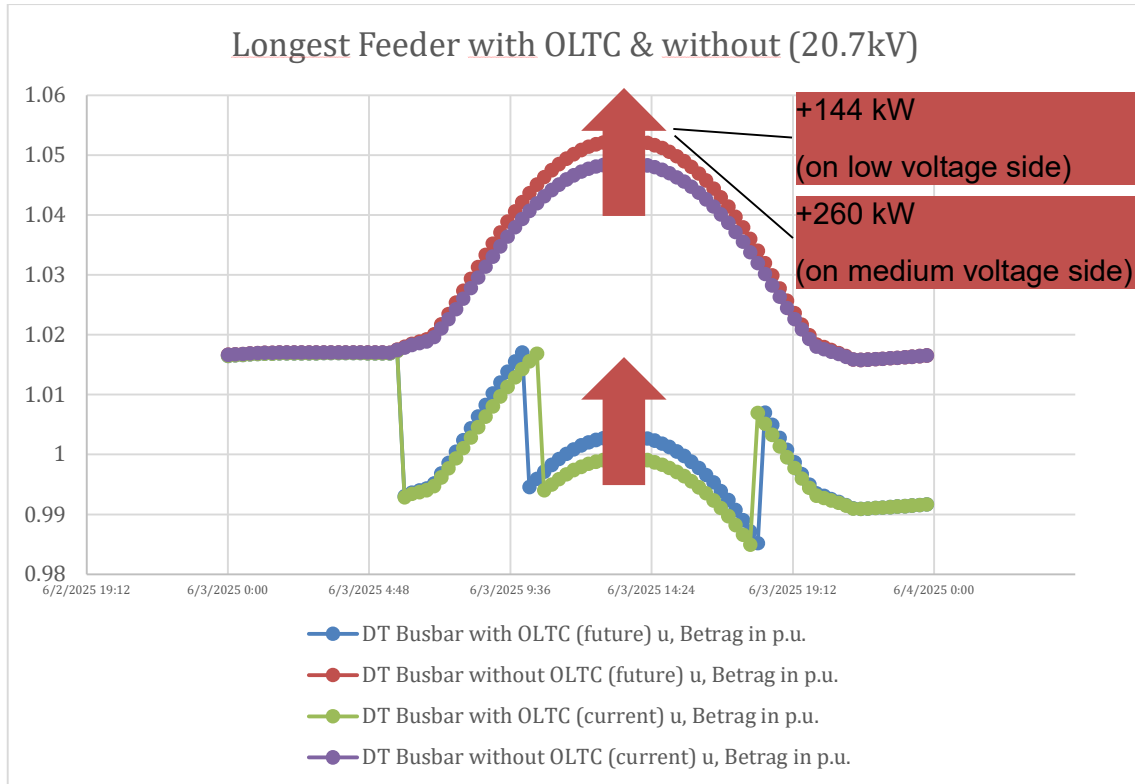


Abbildung 10: Szenario 3 mit und ohne rONT am längsten Ausläufer

Das Zukunftsszenario (Szenario 3), in dem zusätzlich 144 kW PV-Leistung auf der Niederspannungsseite und 260 kW auf der Mittelspannungsseite eingespeist werden, verdeutlicht die Wirksamkeit des rONT's im belasteten Netzbetrieb. Ohne Stufenschalter steigt die Spannung im Einspeisemaximum weiter und überschreitet die +5 %-Marke. Die zunehmende PV-Einspeisung führt entlang des längsten Abgangs zu einem ausgeprägten Spannungshub, der ohne Gegenmaßnahmen unmittelbar die Anschlusskapazität begrenzt und zusätzliche PV-Installationen verhindert.

Mit dem Einsatz des rONT's verbessert sich die Spannungshaltung hingegen signifikant. Der Stufenschalter regelt die Niederspannung im gesamten Tagesverlauf sauber um 1 p.u., sodass selbst bei der erhöhten PV-Durchdringung keine Grenzwertverletzungen auftreten.

→ Damit zeigt Szenario 3, dass rONTs auch unter zukünftigen, deutlich anspruchsvolleren Betriebsbedingungen eine substanzielle Erhöhung der Anschlusskapazität ermöglichen.

3.2.4 Dynamische Sollwertregelung

In Szenario 1 und 2 konnte man sehen, dass es vor allem bei den längeren Ausläufern zu niedrigeren Spannungen bei Lastspitzen kommt (< 0.94 p.u.). Hier bietet der rONT mit einer dynamischen Sollwertregelung eine wirksame Möglichkeit zur Abhilfe.

Dabei wird der Spannungssollwert anhand des aktuellen Lastflusses am Transformator dynamisch verändert (siehe Abbildung 11). Bei Rückspeisung wird der Spannungssollwert verringert (z. B. von 230V auf 225V). Bei Verbraucherlastspitzen entgegen, wird der Sollwert zurückerhöht auf 240V.

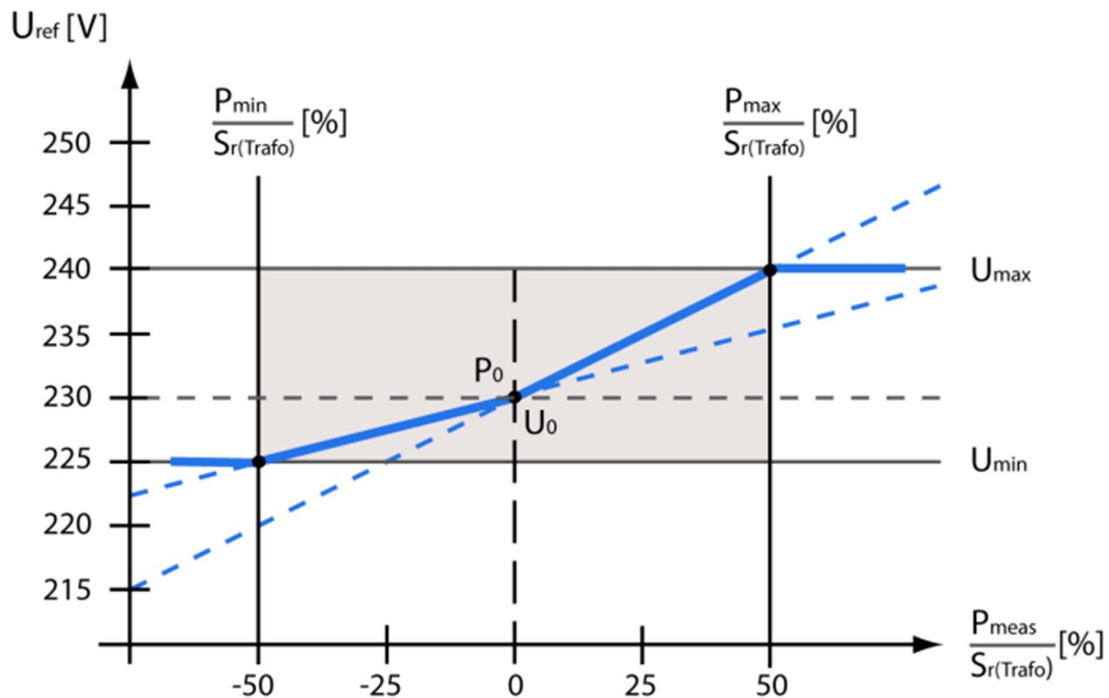


Abbildung 11: Dynamische Sollwertkurve

Um solche Unterspannung zu vermeiden, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Simulation mit dem dynamischen Sollwert und rONT durchgeführt.

Ergebnis 4: Dynamischer Sollwert (Abbildung 12)

Die Simulation eines dynamischen Spannungssollwerts mit der Control DS von MR:

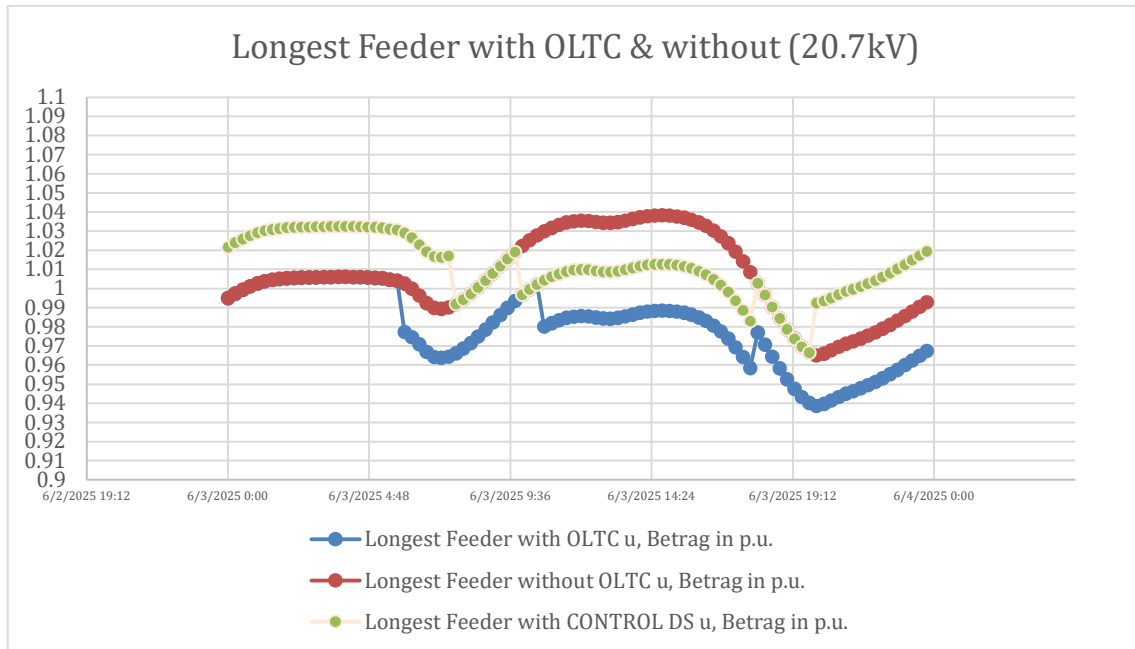


Abbildung 12: Szenario 1 mit dynamischen Spannungssollwert

- Reagiert adaptiv bei schnellen Einspeiseänderungen
- Vermeidet sowohl Unter- als auch Überspannung im Tagesverlauf
- Ermöglicht eine deutlich stabilere Spannung bei hoher PV-Volatilität

→ Ein dynamischer Sollwert steigert das Optimierungspotential der rONT-Regelung deutlich.

3.2.5 Validierung durch reale Messung

Um die Simulationsergebnisse zu validieren, wurden bei einer der ersten rONT-Inbetriebnahmen Messungen der Niederspannung durchgeführt.

Die gemessenen Daten vor und nach der rONT-Installation mit statischem Sollwert bestätigen die Funktionsweise des rONT's:

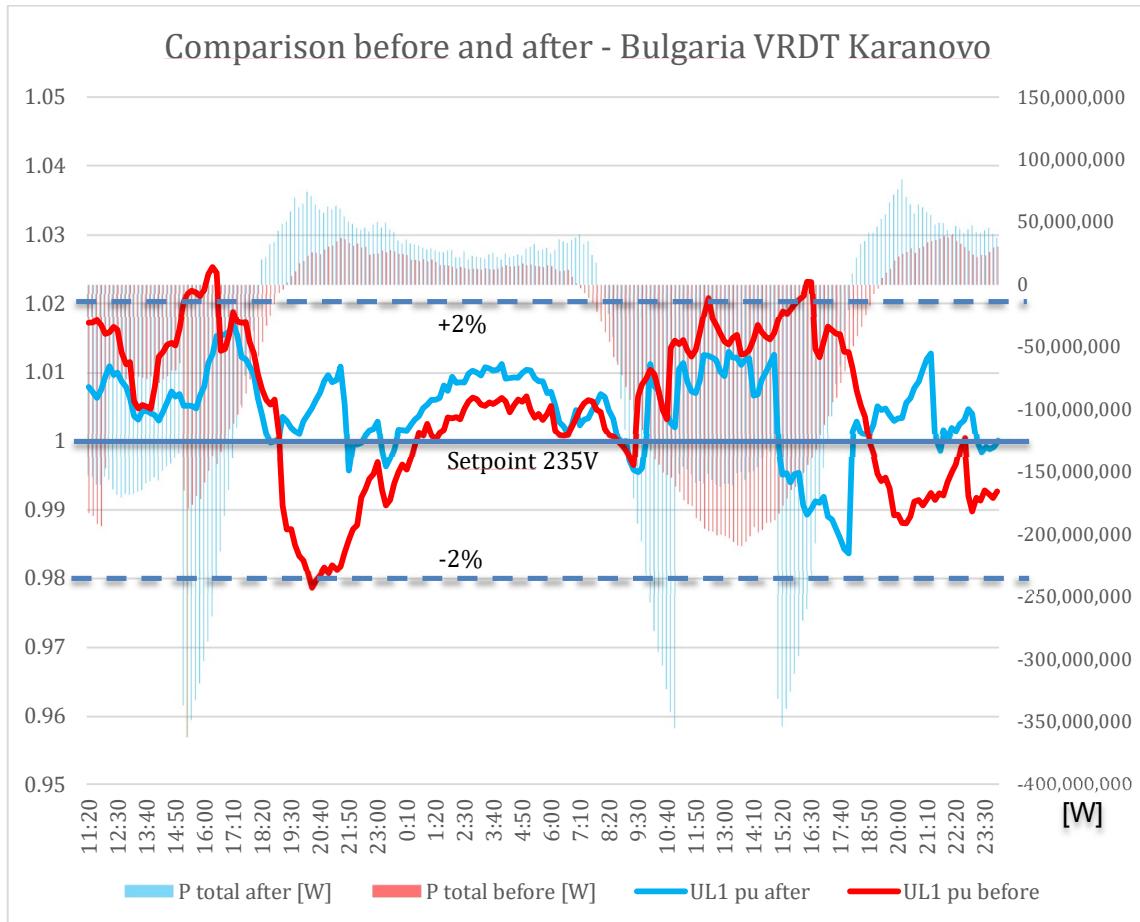


Abbildung 13: Reale Messung vor und nach dem rONT Einbau

- Spannungsband wird enger
- PV- Anschlusskapazität erhöht sich nach der Installation

Allerdings ist zu beachten, dass bei beiden Messungen – sowohl vor als auch nach der rONT-Installation – aufgrund betrieblicher bzw. strommarktbedingter Rahmenbedingungen nicht die maximal mögliche Einspeiseleistung der Anlagen erreicht wurde. Wie aus dem in Abbildung 13 dargestellten Leistungsfluss ersichtlich ist, lagen die gemessenen Werte jeweils deutlich unter der installierten Engpassleistung.

3.2.6 Fazit

Auf Basis der identifizierten Spannungsprobleme wurden Netzbereiche priorisiert, in denen technische Maßnahmen erforderlich oder besonders wirksam sind. Unter anderem wurden folgende Lösungsansätze abgeleitet:

- Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONTs) zur lokalen Stabilisierung der Niederspannungsebene.
- Entkopplung der Mittel- und Niederspannungsebene in kritischen Netzabschnitten, um MV-Schwankungen nicht direkt in die LV-Ebene zu übertragen.
- Optimierung der Transformator-Sollwerte in Umspannwerken in Abstimmung mit dem Eigentümer.

Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Maßnahmen sowie für die Priorisierung zukünftiger Netzverbesserungen.

4 Ausblick

Für die nächste Projektphase ist eine Standardisierung des Auswahlprozesses geplant, indem gezielt kritische Netzbereiche außerhalb definierter Umspannwerk-Radien priorisiert werden, aufbauend auf den Simulationsergebnissen. Der Fokus liegt dabei auf Regionen mit hohem Potenzial für PV-Anlagen, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen. Durch diese gezielte Priorisierung soll der optimale und effiziente Einsatz der rONTs im Netz sichergestellt werden.

Ferner ist das Potential der dynamischen Sollwertregelung des rONT's weiter zu untersuchen und vor Ort im Netzbetrieb zu validieren. Auch werden die Erkenntnisse eines niederländischen Netzbetreibers herangezogen, der das Potential der dynamischen Sollwertregelung herausgearbeitet und flächendeckend ausgerollt hat [2].

Parallel dazu ist die Digitalisierung des Netzes vorgesehen: Systeme zur automatisierten Erfassung und Analyse von Spannungsdaten werden eingeführt. Die Entwicklung digitaler Zwillinge – virtueller Modelle des Verteilungsnetzes – ermöglicht die Simulation von Betriebsszenarien, optimiert das Asset Management und unterstützt eine effizientere Netzplanung.

5 Literaturverzeichnis

- [1] R. H. Stanev, P. Dzhumaliyski, N. Stoychev, K. B. Viglov, N. N. Nikolov und N. Polihronov, „Voltage Control Strategies for Distribution Networks with Distributed Energy Resources,“ Conference: 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Bulgarien, 2022.
- [2] F. Pizzutto, J. Erbrink und B. Kooij, „TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SINGLE-PHASE VERSUS THREE-PHASE LOAD DEPENDANT, DYNAMIC SET-POINT CONTROL IN VOLTAGE REGULATING DISTRIBUTION TRANSFORMERS (VRDT) TO INCREASE HOSTING CAPACITY OF LOW VOLTAGE NETWORKS,“ CIRED 2024 Vienna Workshop, Vienna, 2024.