



Andreas Becker (Autor)

Tobias Lühn (Autor)

Michael Mohrmann (Autor)

Gerrit Schlömer (Autor)

Genoveva Schmidtman (Autor)

Diana Schneider (Autor)

Raimund Schnieder (Autor)

## **Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilstnetzen**

Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu  
konventionellen Netzausbaumaßnahmen

Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen

**efzn**

Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen

### **Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilstnetzen**

Regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz  
zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen

A. Becker, T. Lühn, M. Mohrmann, G. Schlömer,  
G. Schmidtman, D. Schneider, R. Schnieder

L. Hofmann, H.-P. Beck, J. Geldermann, H. Weyer

Band 20



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6725>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

## Einführung

Das Verbundprojekt „e-home Energieprojekt 2020“ der Avacon AG (ehemals E.ON Avacon AG) in Kooperation mit dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) begann im Jahr 2011 und verfolgt die Zielsetzung, die zukünftigen Anforderungen an die Niederspannungsverteilnetze praktisch und wissenschaftlich zu untersuchen. Hierzu unterstützte die Avacon AG 32 Haushalte in zwei Niederspannungsverteilnetzen (0,4 kV/0,23 kV) in den Gemeinden Weyhe und Stuhr, südlich von Bremen, bei der Anschaffung und Integration neuartiger Technologien, wie beispielsweise Photovoltaikanlagen, Klimageräten und Elektrofahrzeugen. Zusätzlich wurden die betroffenen Niederspannungsnetze mit entsprechender Mess- und Kommunikationstechnik (netzdienliche Smart Meter, Power Line Communication: PLC) ausgestattet.

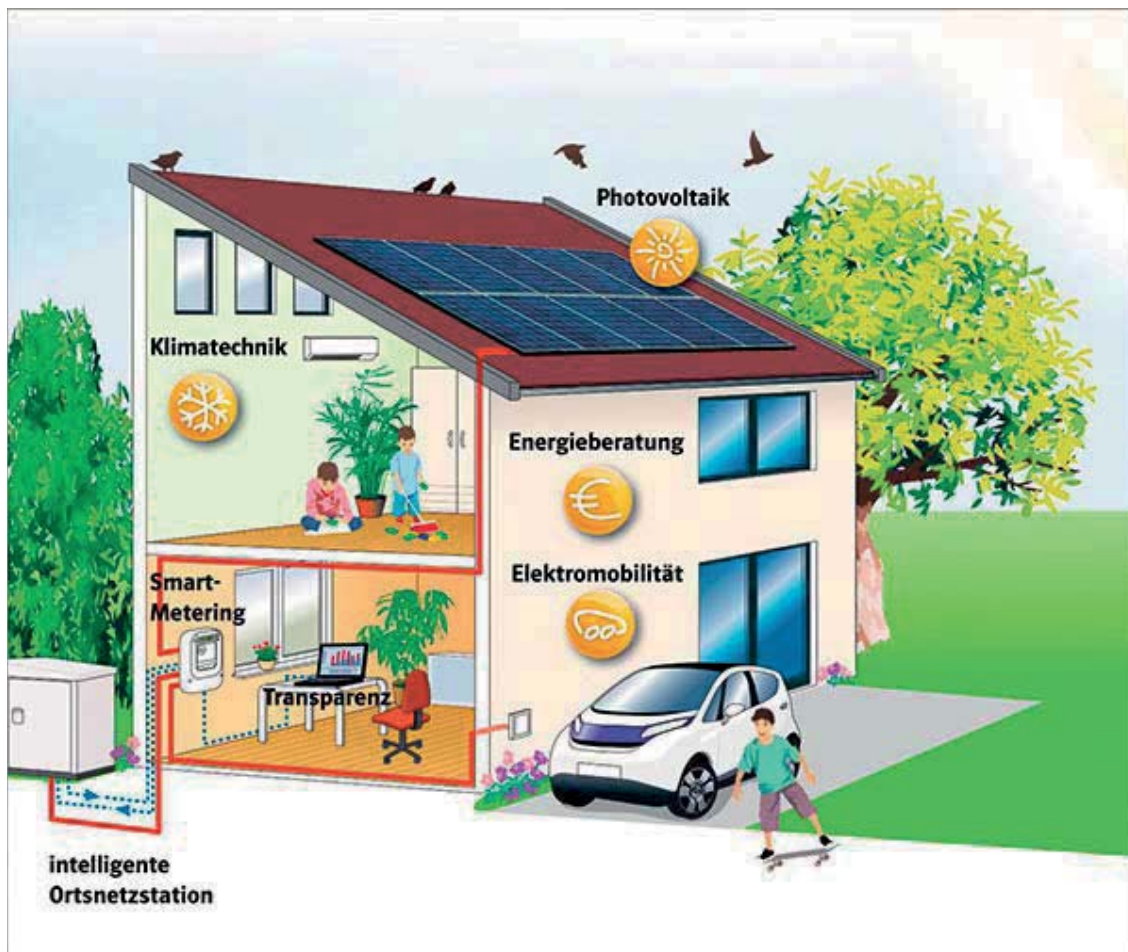


Abbildung 0-1: Der zukünftige Haushalt – Komponenten des e-home Energieprojektes (Avacon AG)

Im technischen Bereich werden unter anderem Themen wie der regelbare Ortsnetztransformator, die Last- bzw. Erzeugungsprofile der e-home Komponenten und die sich daraus ergebende neue Netzaufgabe betrachtet. Außerdem werden unterschiedliche Szenarien für den weiteren Ausbau der PV-Nutzung an synthetisch



und unter Anwendung real vorhandener Netzstrukturparameter generierten Netzstrukturen untersucht, um einen Vergleich zwischen konventionellen Netzausbaustrategien und dem Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren zu ermöglichen. Durch einen Transfer der Ergebnisse auf die realen Netzstrukturen kann schließlich das Einsatzpotential regelbarer Ortsnetztransformatoren im Netzgebiet des Projektpartners ermittelt werden. Dabei wird auch eine wirtschaftswissenschaftliche Untersuchung durchgeführt, um die technisch und wirtschaftlich günstigste Variante zum Netzausbau unter der Berücksichtigung der Nachhaltigkeit zu wählen. Zusätzlich werden im Rahmen des Projektes die juristischen Randbedingungen beim Einsatz der neuen Komponenten, sowie die Akzeptanz der e-home Technologien bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern mit untersucht.

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, in Kooperation mit dem Projektpartner Avacon AG zukünftige Planungsrichtlinien zu erarbeiten, in denen die Ergebnisse dieser breit aufgestellten transdisziplinären Untersuchungen in den Bereichen Recht, Technik, Wirtschaftswissenschaften und Akzeptanz eingehen. Ein Grund für diesen breit angelegten und disziplinübergreifenden Projektansatz kann in den sich in den letzten Jahrzehnten grundlegend geänderten Anforderungen an geeignete Netzausbaukonzepte gesehen werden:

Die heute anzutreffenden Versorgungsstrukturen in den Verteilnetzen sind zu einem großen Teil in der Zeit des deutschen Wirtschaftswunders entstanden. Noch bis zur Jahrtausendwende sahen sich Verteilnetzbetreiber mit einer klaren und vergleichsweise einfach zu prognostizierenden, da stetig wachsenden Versorgungsaufgabe konfrontiert. Entsprechend des Zeitpunkts der Installation und der angenommenen Lebensdauer der eingesetzten Betriebselemente ergibt sich auf der einen Seite derzeit ein verstärkter Ersatzinvestitionsbedarf. Auf der anderen Seiten ist die Prognose der Versorgungsaufgabe deutlich erschwert, da diese vielschichtiger und vielfach von politischen Randbedingungen abhängig ist. So könnte exemplarisch in ländlichen Regionen aufgrund des demografischen Wandels und der Tendenz zur weiteren Urbanisierung von einem Rückgang der Versorgungsaufgabe ausgegangen werden, gleichzeitig bedingen die vermehrte Integration von PV-Anlagen in den Niederspannungsnetzen einen erhöhten Ausbaubedarf (Deutsche Energie-Agentur 2012). Mit dieser Entwicklung einher geht ein grundlegender Wandel dieser Netzebene von einem Versorgungs- hin zu einem Abnahmenetz von dezentral erzeugter elektrischer Energie. Als weiterer beeinflussender Faktor kann die verstärkte Elektrifizierung, als auch das mögliche Aufkommen der Elektromobilität, genannt werden. Beide Effekte sind hochgradig von politischen Weichenstellungen abhängig und würde eine Erhöhung der Transportaufgabe bedeuten. All diesen Entwicklungen trägt das Projekt im Sinne



einer Neudefinition der Netzaufgabe, wie auch mit der Forderung nach „robusten“ und damit fehlertoleranten Lösungen Rechnung.

In den letzten Jahren besteht zudem ein besonderer Trend in der Energieforschung, aber auch in der Politik und Wirtschaft, soziale Auswirkungen von Projekten zu berücksichtigen. Besonders beim Stromnetzausbau werden Partizipationsmöglichkeiten benötigt, um gegensätzliche Interessen der beteiligten Akteure zu vereinen und Projekte für eine nachhaltige Energieversorgung zu verwirklichen. Durch eine aktive Einbindung der Bürger über Informationsveranstaltungen vor Ort und die Medien kann eine Akzeptanz für nachhaltige Energieprojekte in der Gesellschaft geschaffen werden. Im Rahmen des e-home Energieprojektes 2020 werden in diesem Zusammenhang die beteiligten Haushalte aktiv in die Untersuchungen eingebunden. Hierfür wird das Meinungsbild zu den Projektinhalten im Allgemeinen, sowie zu konkreten Themenstellungen wie z. B. der Elektromobilität in regelmäßigen Abständen in schriftlicher und mündlicher Form abgefragt und dessen Entwicklung beobachtet.

Während noch bis in die 70er Jahre ausschließlich die Versorgungssicherheit und die Wirtschaftlichkeit der Stromverteilung im Mittelpunkt standen, werden seitdem vermehrt Ansätze mit einem verstärkten Fokus auf eine nachhaltige Entwicklung verfolgt (Oberschmidt 2010). Eine nachhaltige Entwicklung ist nach dem Brundtland-Bericht (UN 1987) dadurch gekennzeichnet, dass Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt werden können, ohne die Möglichkeiten zur Befriedigung der Bedürfnisse zukünftiger Generationen zu beschränken. Seit Anfang der 80er Jahre werden daher ökologische Aspekte zur Bewertung von Projektvorhaben im Energiesektor (z. B. Rauchgasentschwefelung) herangezogen.

Das sogenannte Zieldreieck der Energiepolitik – Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit – wird in Deutschland aus dem § 1 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) abgeleitet und muss demnach um die soziale Dimension erweitert werden.

Bei der Bewertung von Netzausbaukonzepten sollten folglich vier Dimensionen berücksichtigt werden – die Ökologie, Ökonomie, Technik und soziale Aspekte (Strebel 2009; Gallego Carrera und Mack 2010). Um die verschiedenen Dimensionen einer nachhaltigen Energieversorgung bei der Bewertung von Netzausbauvarianten zu berücksichtigen, bieten sich die Verfahren der Mehrzielentscheidungsunterstützung an und werden im Projekt eingesetzt.

Aufgrund der vielschichtigen Untersuchungsgegenstände werden im Rahmen dieser Veröffentlichung nur ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, die den Einsatz von regelbaren Ortsnetztransformatoren betreffen. Bis zum Projektabschluss im Jahr



2016 sind Veröffentlichungen zu weiteren Projektschwerpunkten (z. B. Batterie-Speicher-Systeme) in dieser Schriftenreihe vorgesehen.

# 1 Regelbare Ortsnetztransformatoren zur Spannungshaltung in Niederspannungsverteilnetzen

(Dipl.-Ing. Raimund Schnieder, Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, Technische Universität Clausthal)

## 1.1 Einführung zum regelbaren Ortsnetztransformator

Der in den Niederspannungsnetzen durch dezentrale Erzeugungsanlagen bedingte Netzausbau erfolgt überwiegend aufgrund der Verletzung des zulässigen Spannungstoleranzbandes nach DIN EN 50160. Die Stromtragfähigkeit der Betriebsmittel ist in den meisten Fällen noch gewährleistet.

Traditionell wurden die Mittel- und Niederspannungsnetze passiv - ohne Regeleinrichtungen zur dynamischen Spannungseinstellung - ausgelegt und betrieben. Die letzte Möglichkeit zur Spannungsregelung war der Hochspannungs-Mittelspannungstransformator, der die Unterspannung im Betrieb durch die Änderung des Transformatorenübersetzungsverhältnisses durch einen auf der Oberspannungsseite integrierten Laststufenschalter kontinuierlich einstellen kann. Folglich bedeutet dies, dass das nach Norm zulässige Spannungstoleranzband von  $\pm 10\%$  der Nennspannung ( $U_N$ ) auf die Mittel- und Niederspannungsebene aufgeteilt werden muss. Hierbei nimmt die Mittelspannungsebene für die netzplanerischen Freiheiten für Spannungsfall und Spannungshub, sowie für das Totband des Reglers und Messungenauigkeiten der Messeinrichtungen etwa  $12\% U_N$  ein. Die verbleibenden  $8\% U_N$  werden für den Spannungsfall ( $5\% U_N$ ) und Spannungshub ( $3\% U_N$ ) auf die Niederspannungsebene aufgeteilt.

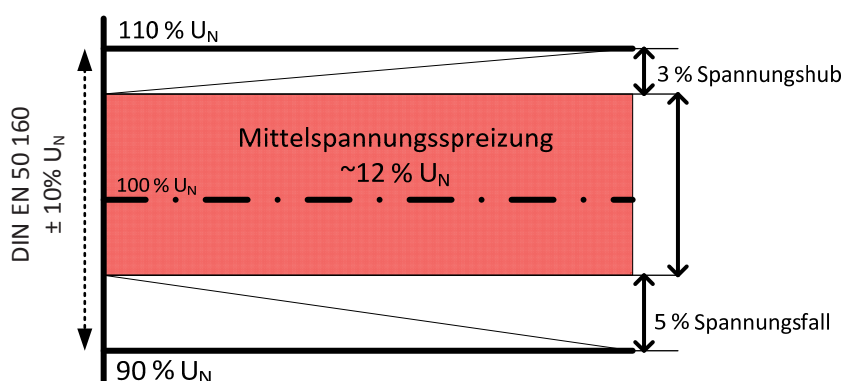


Abbildung 1-1: Netzplanerische Spannungsfreiheiten ohne rONT-Einsatz

Der regelbare Ortsnetztransformator im Monosensorbetrieb bekommt daher die Aufgabe die Spannungsfluktuationen der Mittelspannung auszuregulieren und entkoppelt somit die Niederspannungsebene hinsichtlich der Spannungsfreiheiten von der Mittelspannungsebene. Bei einem notwendigen Regelbereich von  $20\% U_N$  kann folglich das gesamte nach Norm zulässige

Spannungstoleranzband für die Niederspannungsebene verwendet werden. Hierbei ist jedoch noch das Reglertotband des rONT zu berücksichtigen, wie die nachfolgende Abbildung zeigt:

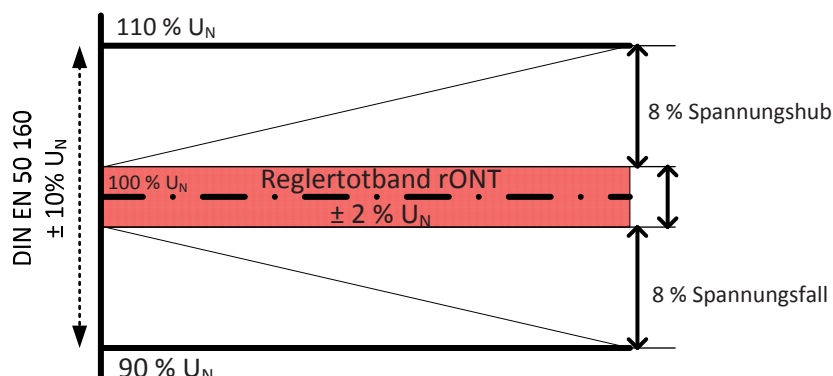


Abbildung 1-2: Netzplanerische Spannungsfreiheiten bei rONT-Einsatz mit einem Reglertotband von  $\pm 2 \% U_N$

Bei einem Reglertotband von  $\pm 2 \% U_N$  und einem Sollwert bei  $100 \% U_N$  (1,0 p.u.) kann das verbleibende Spannungstoleranzband mit  $8 \% U_N$  für den Spannungshub (vorher  $5 \% U_N$ ) und  $8 \% U_N$  für den Spannungsfall (vorher  $3 \% U_N$ ) aufgeteilt werden.

Bei einem flächendeckenden Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren entlang eines Mittelspannungsringes kann das gesamte nach Norm zur Verfügung stehende Toleranzband von  $\pm 10 \% U_N$  auch für die netzplanerischen Spannungsfreiheiten der Mittelspannungsebene genutzt werden, um Netzausbaumaßnahmen in dieser Ebene zu vermeiden bzw. zu reduzieren. (s. (Schmiesing und Beck 2013))

## 1.2 Der regelbare Ortsnetztransformator im Monosensorbetrieb

Im folgenden Kapitel wird der regelbare Ortsnetztransformator (rONT) im Monosensorbetrieb erläutert, sowie verschiedene Untersuchungsergebnisse zu dieser Betriebsart vorgestellt.

### 1.2.1 Funktion der Spannungsregler und mögliche Regelalgorithmen

Beim Monosensorbetrieb des rONT werden die Spannungsistwerte ausschließlich an der Niederspannungsverteilung der Ortsnetzstation (Transformatorenssekundärseite) erfasst. Um den Regelkreis stabil zu halten, muss gewährleistet sein, dass jeder Stufvorgang die Spannung wieder in das Reglertotband bringt, um ein Aufschwingen durch entgegengesetzte Stufrichtungen zu vermeiden. Daher wird das Reglertotband gewöhnlich mit mehr als  $\pm 60$  Prozent der Stufenbreite angenommen (vgl. (Werther et al. 2012) (Schnieder et al. 2013)). Bei unsymmetrischer Spannung sollte dieses Totband - je nach Regelalgorithmus - noch größer ausgelegt werden, um ein Aufschwingen des Reglers zu vermeiden.



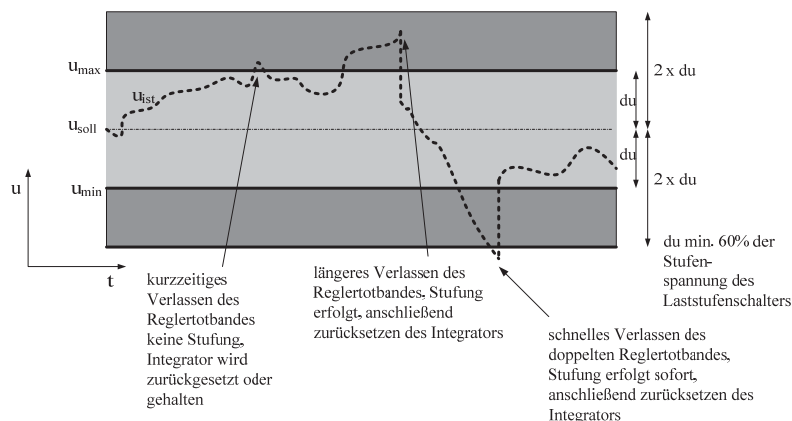


Abbildung 1-3: Funktion eines rONT-Reglers im Monosensorbetrieb

Die vorherige Abbildung zeigt exemplarisch die Funktion eines Spannungsreglers für regelbare Ortsnetztransformatoren. Dieses Beispiel basiert auf dem Spannungsregler REG-D der Firma A. Eberle (A. Eberle GmbH & Co. KG 2009). Das Reglertotband des Spannungsreglers ist, wie zuvor erwähnt, mit mindestens 60 Prozent der Stufenbreite angenommen, um eine Stufung in das Reglertotband zu gewährleisten. Dieser Regler funktioniert nach dem Prinzip „ $\Delta u \cdot t = \text{konstant}$ “, welcher den Spannungsgradienten über der Zeit berücksichtigt. Der Vorteil hierbei ist, dass kurzzeitige Spannungsänderungen (kurzzeitiges Verlassen des Totbandes) nicht zu einem Stufvorgang führen, wie die obige Abbildung zeigt. Erst bei einem längeren Austritt des Spannungswertes erfolgt der entsprechende Stufvorgang. Zusätzlich ist noch eine Schnellrück-schaltung (doppeltes Reglertotband) berücksichtigt. Verlässt der Spannungswert dieses Band, so wird direkt ein Stufvorgang, ohne Berücksichtigung des Zeitverhaltens, ausgelöst.

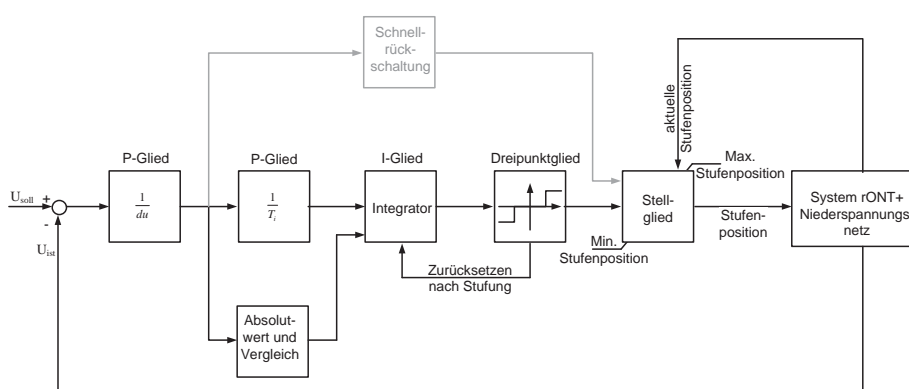


Abbildung 1-4: Blockschaltbild eines verwendeten Reglertyps (Prinzip vgl. (A. Eberle GmbH & Co. KG 2009))

Im Rahmen des e-home Energieprojektes 2020 wurden noch weitere Reglerkonzepte hinsichtlich der Spannungsextrema, der genutzten Stufenpositionen (sowie deren Häufigkeit), der Anzahl der Stufvorgänge, sowie der Flickerstärke simulativ untersucht. Die untersuchten Regler unterschieden sich hinsichtlich ihrer Funktion

und ihres Zeitverhaltens. Die Untersuchungen verfolgten das Ziel, einen Regelalgorithmus für den rONT zu entwickeln, welcher die Spannung mit einer geringen Anzahl an Stufvorgängen in das definierte Reglertotband ( $du$ ) regelt, um entsprechende netzplanerische Spannungsfreiheiten in der Niederspannungsnetzebene zu erhalten. Daher wurden auch die Parameter Reglertotband und Zeitkonstante variiert, um die Auswirkungen auf die Netzspannung und das Stufverhalten zu analysieren. Hierbei zeigte sich, dass eine Vergrößerung des Reglertotbandes von 60 Prozent auf 80 Prozent der Stufenbreite nahezu zu einer Halbierung der Stufvorgänge in den betrachteten Szenarien führte. Eine Erhöhung der Zeitkonstanten (auf ca. 90 - 120 s), beispielsweise bei dem zuvor vorgestellten Reglertyp, führte nur zu einer im Verhältnis geringen Reduzierung der Stufvorgänge bei nahezu gleichen Spannungsextrema. Außerdem wurden bei größeren Zeitkonstanten auch Schnellrückstellungen ausgelöst, sodass in diesem Fall das Totband der Schnellrückstellung zur Ermittlung der netzplanerischen Spannungsfreiheiten genutzt werden muss.

Da die Breite des Reglertotbandes einen großen Einfluss auf die Stufhäufigkeit hat, wurde unter anderem auch ein Regelalgorithmus untersucht, der direkt bei Verlassen des Reglertotbandes einen Stufvorgang auslöst (Direktschaltung). Zur Reduzierung der Stufhäufigkeit wurde hier das Reglertotband entsprechend groß ( $\geq 80$  Prozent der Stufenbreite) gewählt.

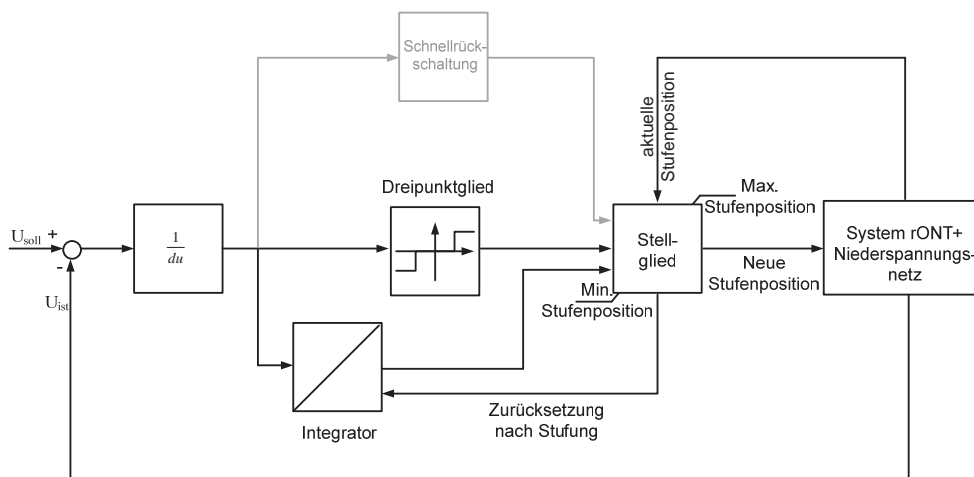


Abbildung 1-5: Reglerkonzept Direktschaltung mit Zeitverzug durch einen Timer (Integrator) (Prinzip wie (Maschinenfabrik Reinhausen 2013))

Obige Abbildung zeigt das Reglerkonzept, welches auf dem Grundprinzip der direkten Schaltung basiert. Um jedoch eine Reaktion auf kurzzeitige Spannungsänderungen (kurzzeitiges Verlassen des Reglertotbandes im Sekundenbereich), wie sie beispielsweise beim Anlauf elektrischer Maschinen auftreten können, zu vermeiden, wurde ein entsprechender Integrator für das Zeitverhalten berücksichtigt. Dieser Integrator beginnt bei einer Regelabweichung, die größer als das definierte Reglertotband ist, mit der Integration und löst beim



Erreichen des Endwertes eins über das Stellglied den Stufvorgang aus. Dieses Reglerprinzip wird bei den regelbaren Ortsnetztransformatoren der Maschinenfabrik Reinhausen im Rahmen des e-home Energieprojektes 2020 verwendet. (Maschinenfabrik Reinhausen 2013)

Die im e-home Energieprojekt 2020 verwendeten regelbaren Ortsnetztransformatoren besitzen neun Anzapfungen und eine Stufenbreite von 2,5 % der Nennspannung. Folglich wird ein gesamter Regelbereich von  $\pm 20\%$  der Nennspannung abgedeckt, welcher Voraussetzung dafür ist, dass die gesamte Mittelspannungsfluktuation ausgeregelt werden kann und dementsprechend das Niederspannungsnetz hinsichtlich des Spannungstoleranzbandes von der Mittelspannungsebene entkoppelt wird. Im Rahmen des Projektes wurde durch die Auswertung von Spannungsmessdaten aus Mittel- und Niederspannungsnetzen, sowie durch Netzberechnungen an Niederspannungsnetzstrukturen mit unterschiedlichen Belastungen ein gesamter notwendiger Regelbereich von etwa 21,5 %  $U_N$  ermittelt.

Tabelle 1-1: Mögliche Konfigurationen regelbarer Ortsnetztransformatoren

Nr.	Regelbereich	Stufenanzahl	Stufenbreite	Spannungsfall	Sollwert	Spannungshub	Reglertotband
1	21,50 %	11	2,15 %	7,42 %	100 %	7,42 %	$\pm 2,58\%$
2	21,50 %	11	2,15 %	8,71 %	100 %	8,71 %	$\pm 1,29\%$
3	20,00 %	9	2,50 %	8,50 %	100 %	8,50 %	$\pm 1,50\%$
4	20,00 %	9	2,50 %	8,00 %	100 %	8,00 %	$\pm 2,00\%$

Die vorherige Tabelle zeigt die möglichen Konfigurationen für die Auslegung des regelbaren Ortsnetztransformators. Bei den Konfigurationen 1 und 2 handelt es sich um die im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen im e-home Energieprojekt 2020 ermittelten Konfigurationen, bei 3 und 4 die Konfigurationen, welche durch die Maschinenfabrik Reinhausen (Maschinenfabrik Reinhausen 2013) hergestellt werden. Die Konfiguration 4 (*kursiv* dargestellt) wird bei der Avacon AG eingesetzt. (Ratsch) Beim dauerhaften Verlassen des Reglertotbandes wird beispielsweise erst nach 15 Sekunden der Stufvorgang ausgelöst (Zeitverhalten).

Die netzplanerischen Freiheiten für Spannungsfall und –hub sind abhängig vom Reglertotband, welches wiederum aufgrund der Systemstabilität von der Stufenbreite des rONT abhängt. Bei Festlegung des Spannungssollwertes an der Niederspannungsverteilung auf Nennspannung (1,0 p.u.) und symmetrischer Aufteilung der gewonnenen Freiheiten ergeben sich die zulässigen Grenzwerte wie folgt:

$$\Delta u = 0,2 - 2 \cdot du \text{ (p.u.)} \qquad 1-1$$

Bei symmetrischer Aufteilung der gesamten Freiheiten im Spannungsband ergeben sich für Spannungshub und Spannungsfall folgende Werte:

$$\Delta u_{\text{Hub}} = \frac{\Delta u}{2} = u_{\text{Fall}} (\text{p.u.})$$

1-2

Die Wirkung eines regelbaren Ortsnetztransformators im Monosensorbetrieb zeigen die folgenden Simulationsergebnisse mit dem Reglertyp nach dem Prinzip „ $\Delta u \cdot t = \text{konstant}$ “. Hierbei wurden die Parameter (2) der obigen Tabelle für das Modell des rONT verwendet, sowie eine Zeitkonstante  $T_i$  von 120 Sekunden gewählt.

Die Mittelspannungsfuktuation wurde über eine Spannungsquelle mit einem aus realen Messdaten generierten Profil in das System eingepreßt. Gleiches wurde mit Messdaten aus dem Niederspannungsnetz durchgeführt und ein aus Last- und Erzeugung überlagertes Leistungsprofil erzeugt.

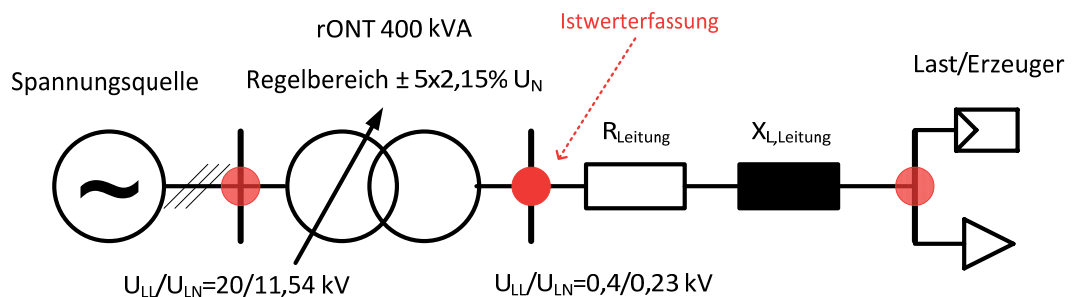


Abbildung 1-6: Einsträngiges Testnetz für die Untersuchung der Regelalgorithmen (einphasig)

Die in der vorherigen Abbildung rot markierten Punkte stellen die Knotenpunkte dar, von welchen die Verläufe der Spannungen in den beiden folgenden Abbildungen gezeigt werden. Die Spannungsistwerterfassung erfolgte auf der Transformatorsekundärseite (Niederspannungsverteilung, Prinzip des Monosensorbetriebs).

Wie in den beiden nachfolgenden Abbildungen ersichtlich ist, wird in der oberen Abbildung das Profil der Mittelspannung über die starre Kopplung (konstante Übersetzung des Transformators) des Mittel- und Niederspannungsnetzes direkt in das Niederspannungsnetz eingepreßt. Am Niederspannungsknotenpunkt wird der Verlauf der Spannung noch geringfügig durch das Profil der Erzeuger und Verbraucher beeinflusst. Beim Szenario mit dem aktivierten rONT-Regler zeigt sich, dass die Fluktuation aus der Mittelspannung durch den rONT ausgeregelt wird und das Spannungsprofil an der Niederspannungsverteilung (sekundärseite Ortsnetztransformator) innerhalb des definierten Reglertotbandes verläuft. Die Grenze für die Ermittlung der Spannungstoleranzen stellt, wie zuvor bereits beschrieben bei der Zeitkonstante von 120 Sekunden, die Bandgrenze des Totbandes der Schnellrück schaltung dar.