



1 Einleitung – Projektmotivation und Fragestellungen

(Jan Ahmels, M.A., Forschungsbereich Energiewirtschaft, Energie-Forschungszentrum Niedersachsen)

Durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) und der daraus resultierenden Vergütung für Strom aus Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) gab es in Deutschland einen starken PV-Zubau in den Jahren 2010 bis 2012. Die Mehrheit der Anlagen speist in die Verteilnetze (Mittelspannungs- und Niederspannungsebene) im ländlichen Bereich ein. Die Netzaufgabe verändert sich und es kommt die Frage nach zukünftigen Netzkomponenten auf, um den aus dem Zubau resultierenden Problemen aus Netzbetreibersicht zu begegnen. Verteilnetzbetreiber haben die Möglichkeit, das Netz auf konventionelle Art durch die Reduktion der Netzimpedanz auszubauen oder aber (neue) Technologien zur Spannungshaltung einzusetzen. Daher wurde der „regelbare Ortsnetztransformator“ (rONT) im Projekt näher betrachtet.

Aufgrund des atmenden Deckels im EEG sanken die Einspeisetarife für Solarstrom durch den starken Zubau ab. Mit Erreichen der Netzparität im Jahr 2012 wurde der Verbrauch von eigenerzeugtem Solarstrom, sogenannter Eigenverbrauch, für den Anlagenbetreiber zunehmend finanziell attraktiv, da die Differenz zwischen Strombezugspreis und PV-Einspeisevergütung als „Einnahmen“ verbucht werden können. Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs kann durch Batteriespeicher erzielt werden, indem eigenerzeugter PV-Strom aus den Mittagsstunden zwischengespeichert und in den Abendstunden zur Lastdeckung ausgespeichert wird. Vor dem Hintergrund eines zunehmenden Einsatzes von Batteriespeichern in Verbindung mit der Stromerzeugung aus PV-Anlagen wurde diese Technologie unter technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten im e-home Projekt bewertet. Neben dem Einsatz von Speichern kann der Eigenverbrauch von PV-Strom durch die Elektromobilität erhöht werden. Durch die Möglichkeit, den eigenen PV-Strom direkt zur „Betankung“ des eigenen Kraftfahrzeugs zu nutzen, kann sich die Elektromobilität auch in ländlichen Gebieten weiter ausbreiten.

Für das e-home Projekt hat die Avacon AG zwei reale Ortsnetze in den Gemeinden Weyhe und Stuhr südlich von Bremen mit entsprechender Messtechnik (u.a. Smart Meter, Powerline Communication) ausgestattet. Darüber hinaus wurden in 30 Haushalten neue Technologien (Elektroauto, PV-Anlage, Klimaanlage, Batteriespeicher) installiert. Das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) stellte gemäß seines trans- und interdisziplinären Forschungsansatzes ein entsprechendes Projektteam aus verschiedenen Fachbereichen zusammen, um die Herausforderungen an die zukünftigen Verteilnetze zu erforschen (vgl. Abbildung 1-1). Die fünfjährige Projektlaufzeit gliederte sich in zwei Abschnitte:

- Phase I (2011 - 2014): Schwerpunkt Technische Forschung
- Phase II (2014 - 2016): Schwerpunkt Querschnittsforschung

Zu Beginn des Projektes lag die wissenschaftliche Projektleitung bei Herrn Prof. Lutz Hofmann, Universität Hannover. Mit der Fokusverschiebung zur Querschnittsforschung wechselte auch die Projektleitung an Frau Prof. Jutta Geldermann, Universität Göttingen. Die Projektkoordination lag während des gesamten Projektes beim EFZN.

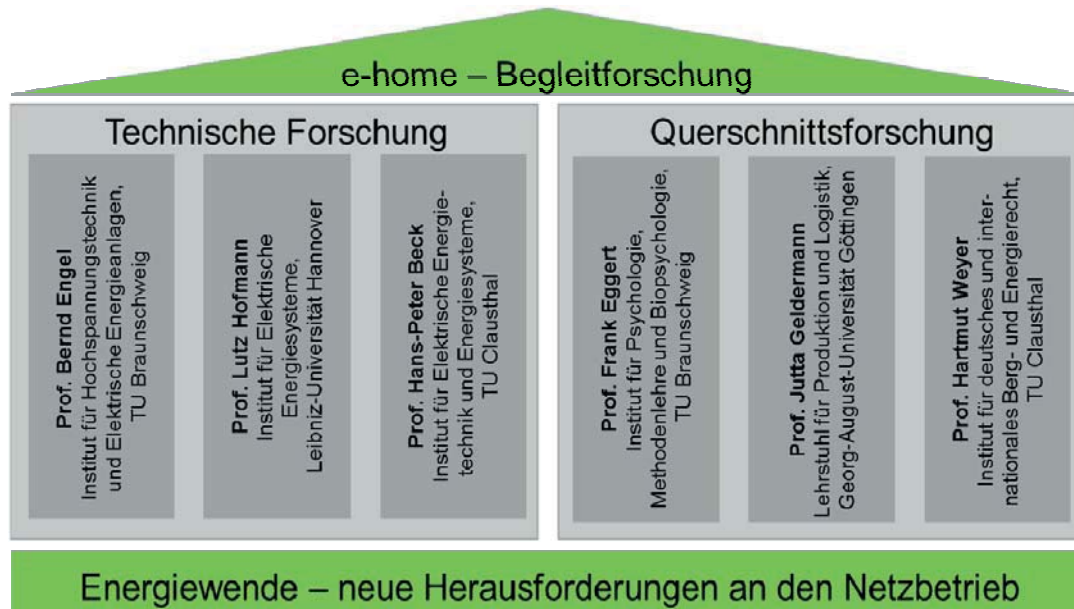


Abbildung 1-1: Zusammensetzung des EFZN-Projektteams im Rahmen des e-home Energieprojektes (Stand: Juni 2016)

Entlang der gesamten Projektlaufzeit standen die folgenden Forschungsfragen im Mittelpunkt:

- Forschungsfeld rONT: Wie sieht das System rONT aus?
- Forschungsfeld Kunde: Welches Nutzerverhalten liegt vor und wie akzeptieren die Endkunden die neuen Komponenten?
- Forschungsfeld Batteriespeicher: Welche Auswirkungen hat diese Technologie auf die Netzaufgabe und den PV-Eigenverbrauch?

2 Regelbare Ortsnetztransformatoren

Das e-home Projekt diente als eines der Pilotprojekte für die Entwicklung und Analyse der Wirkung des rONT, die unterbrechungsfrei das Übersetzungsverhältnis zur Regelung der Unterspannungsseite einstellen können (Werther et al. 2012, Becker et al. 2014). Während die Avacon AG und die Maschinenfabrik Reinhausen (MR) erste praktische Erfahrungen mit der neuen Technologie sammeln und die MR entsprechende Weiterentwicklungen hinsichtlich der Baugröße oder auch der Schaltertechnologie durchführen konnte, beschäftigte sich das EFZN unter anderem mit der Komponente rONT und deren Wirkung im Netz, aber auch mit dem Einsatzpotential in den Netzstrukturen der Avacon AG. Die folgenden Abschnitte stellen die wissenschaftlichen Kernergebnisse aus dem e-home Projekt zum Thema rONT in Kurzform dar.

Durch die Norm DIN EN 50160, ergänzt durch die Anwendungsrichtlinie VDE-AR-N 4105, ergibt sich für die Niederspannungsnetzebene (Niederspannungsebene) ein durch dezentrale Energiewandlungsanlagen zulässiger Spannungshub von maximal 3 % der Nennspannung (U_N). Eine mögliche Aufteilung des Spannungsbandes ist in Abbildung 2-1 skizziert.

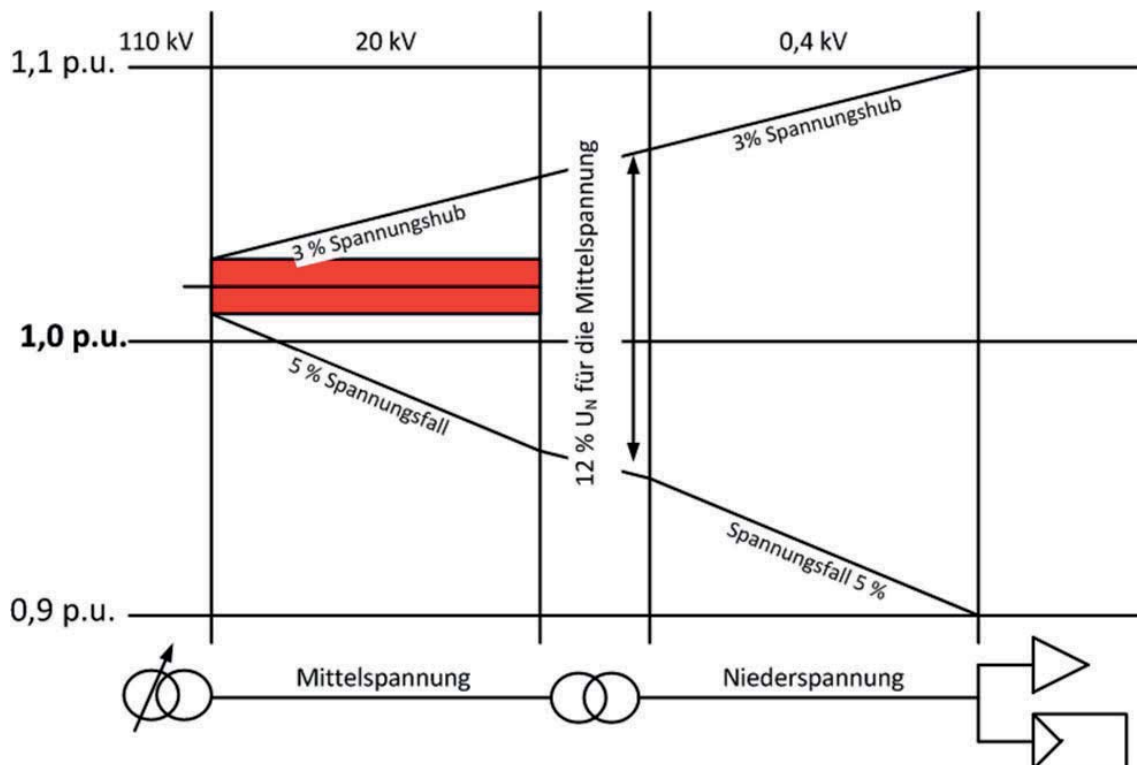


Abbildung 2-1: Beispielhafte ursprüngliche Aufteilung der Spannungstoleranzen nach DIN EN 50160

2.1 Technologie regelbarer Ortsnetztransformator

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

Bereits im Rahmen einer Orientierungsstudie (Werther et al. 2012) wurden erste theoretische Untersuchungen zu rONT durchgeführt. Aus diesen vorangegangenen Betrachtungen resultierte die Notwendigkeit, weitere detaillierte Untersuchungen gerade hinsichtlich der Auslegung und Parametrierung rONT durchzuführen. In der ersten Phase (2011-2014) im e-home Projekt wurden diese Betrachtungen bereits integriert.

2.2 Stufenbreite

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

Zur vollständigen Entkopplung der genannten zulässigen Spannungsgrenzen des Niederspannungsnetzes vom vorgelagerten Mittelspannungsnetz ist ein Regelbereich von $\pm 10\% U_N$ erforderlich. Dieser Wert hat sich auch bei der Auswertung von Mittelspannungs- und Niederspannungsmessdaten im e-home Projekt bestätigt. Stufenanzahl und Stufenbreite des rONT haben direkten Einfluss auf die sich ergebenden Spannungsfreiheiten, da hieraus das aus Stabilitätsgründen notwendige Regler totband resultiert. Die wichtigsten mathematischen Zusammenhänge werden kurz vorgestellt, wobei die Spannungen jeweils auf Nennspannung (U_N) normiert sind und somit in p.u. (per unit) angegeben werden.

Die Stufenbreite u_{Stufe} berechnet sich in Abhängigkeit des erforderlichen Regelbereichs $u_{Regelbereich}$ und der geplanten Stufenanzahl n_{Stufe} zu:

$$u_{Stufe} = \frac{u_{Regelbereich}}{n_{Stufe} - 1} \quad (2-1)$$

Aus den Untersuchungen im e-home Projekt geht hervor, dass ein mit 80 % der Stufenbreite gewähltes Regler totband du Einfluss auf die Stufhäufigkeit des rONT hat. Durch eine Erhöhung des Totbandes von 60 % auf 80 % der Stufenbreite kommt es in den Untersuchungen zu einer Halbierung der Schaltzyklen (Schnieder et al. 2013).

$$du = 0,8 \cdot u_{Stufe} \quad (2-2)$$

Bei einem Spannungssollwert von 1,0 p.u (entspricht der Nennspannung $U_{LN} = 230\text{ V}$ bzw. $U_{LL} = 400\text{ V}$) ergeben sich für Spannungshub und -fall die folgenden netzplanerischen Freiheiten.

$$\Delta u_{\text{Hub}} = \Delta u_{\text{Fall}} = \frac{20 - (2 \cdot du)}{2} \quad (2-3)$$

Die vorgestellte Berechnungsweise bezieht sich auf einen rONT Einsatz im Monosensorbetrieb, wenn die Spannungswertenerfassung ausschließlich an der Unterspannungsseite des rONT (Niederspannungsverteilung – NSVT) erfolgt.

Für vier verschiedene Konfigurationen des rONTs sind in der Tabelle 2-1 die sich ergebenden netzplanerischen Spannungsfreiheiten dargestellt. Die vierte Konfiguration wird im Rahmen des e-home Projekts eingesetzt (Ratsch 2014).

Tabelle 2-1: Mögliche Konfigurationen rONT (Becker et al. 2014)

Nr.	Regelbereich	Stufenanzahl	Stufenbreite	Spannungsfall	Spannungshub	Sollwert	Regler-totband
	% U_N		% U_N	% U_N	% U_N	in p.u.	% U_N
01	21,50	11	2,15	8,71	8,71	1,0	± 1,29
02	21,50	11	2,15	8,28	8,28	1,0	± 1,72
03	20,00	9	2,5	8,50	8,50	1,0	± 1,50
04	20,00	9	2,5	8,00	8,00	1,0	± 2,00

Die Konfigurationen (1+3) beziehen sich auf ein Regler-totband von 60 % der Stufenbreite und die Konfigurationen (2+4) auf ein Totband von 80 % der Stufenbreite des rONT.

Um zu verhindern, dass bei kurzzeitigen Spannungsänderungen eine Stufung erfolgt, wird im Regelalgorithmus ein entsprechendes Zeitverhalten (Integrator) berücksichtigt. Der Integrator wird in den Betrachtungen mit $t_i = 5$ s oder $t_i = 15$ s angesetzt, sodass die Stufung um die Zeit t_i verzögert wird.

2.3 Regelalgorithmus

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

Die Funktion des implementierten Spannungsreglers ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Bei einem kurzzeitigen Verlassen des Regler-totbandes kommt es zu keiner Stufung. Verlässt die Spannung für längere Zeit (z.B. $t > 5$ s bzw. $t > t_i$) das Totband, so erfolgt die Stufung.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit eine Schnellrückschaltung zu berücksichtigen, sodass bei einem schnellen Verlassen des doppelten Regler-totbandes direkt eine Schaltung ohne Berücksichtigung des Zeitverhaltens erfolgt.