

Ergebnisse der FNN-Studie zu neuen Verfahren der statischen Spannungshaltung

M.Sc. Marco Lindner, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann, TU München, München

M.Sc. Ole Marggraf, M.Sc. Stefan Laudahn, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel, TU Braunschweig, Braunschweig

Dipl.-Wirt.-Ing. Sören Patzack, Dr.-Ing. Hendrik Vennegeerts, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Albert Moser, FGH e.V., Aachen

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Markus Gödde, Dipl.-Wirt.-Ing. Fabian Potratz, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler, RWTH Aachen University, Aachen

1. Einleitung

Die statische Spannungshaltung berührt grundsätzliche Qualitätsmerkmale der Elektrizitätsversorgung und wird deshalb mit der DIN-EN 50160 sowie der VDE-AR-N 4105 reglementiert. Die vermehrte Integration dezentraler Erzeugungsanlagen (DEA) stellt für die Einhaltung dieser Qualitätsvorgaben in Verteilnetzen immer häufiger eine Problemstellung dar, welcher oftmals durch konventionellen Netzausbau begegnet wird. Alternative Maßnahmen zur Sicherung der statischen Spannungshaltung sind, unter anderem, die Bereitstellung von blindleistungsbezogenen Systemdienstleistungen durch die DEA oder der Einsatz zusätzlicher Primärtechnik, wie zum Beispiel regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONT), Längsregler oder STATCOMs. Zur Weiterentwicklung der technischen Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 wurden im Rahmen einer vom Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) geförderten Studie in einem wissenschaftlichen Konsortium die Wirksamkeit, Robustheit und Wirtschaftlichkeit von zeitnah verfügbaren Technologien zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in der Niederspannung ($\cos\phi(P)$, $Q(U)$, rONT) untersucht. Wesentliche Erkenntnisse sind in diesem Beitrag zusammengefasst. Die detaillierten Ergebnisse können dem Abschlussbericht des FNN entnommen werden.

2. Musternetze der Niederspannung

In der Literatur [1, 2] wurden systematische Analysen bestehender Niederspannungsnetze durchgeführt und diese durch stochastische Modellierungen in definierte Netzklassen eingeteilt. Ein repräsentativer Auszug der Netzklassen (vgl. Tabelle 1) wurde in dieser Studie verwendet. Vergleiche mit synthetisch erzeugten Netzen eines Netzgenerators der FGH zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Musternetze

Musternetztyp	Land		Dorf		Vorstadt	
	typisch	extrem	typisch	extrem	typisch	extrem
S_{ONT} [kVA]	400	400	630	630	630	630
Hausanschlüsse	14	27	57	117	146	191
Strahlen	2	2	6	9	10	9

3. Effektivität der Spannungshaltungskonzepte

Die Parameter der untersuchten $\cos(\varphi)$ -Steuerung und $Q(U)$ -Regelung sind in Abbildung 1 (links) dargestellt. Beide Blindleistungskonzepte wurden mit einem minimalen Verschiebungsfaktor von 0,9 und 0,95 berücksichtigt, der regelbare Ortsnetztransformator wurde mit einer Regelung auf die unterspannungsseitige Sammelschienenspannung untersucht. Als Maß für die Effektivität der Spannungshaltungskonzepte dient das erreichbare Integrationspotenzial, also die maximale, auf die Netzanschlusspunkte verteilte Erzeugungsleistung, bei der kein Grenzwert verletzt wird. Diese Leistung wurde in dem dargestellten Szenario homogen auf die Netzanschlusspunkte verteilt. Grenzwerte sind dabei eine Betriebsmittelbelastung von 100 % (Leitungen) bzw. 120 % (Transformatoren) der Bemessungsscheinleistung bzw. eine um 3 % erhöhte Knotenspannung nach VDE-AR-N 4105. Da bei einem rONT-Einsatz die Anwendung des 3 %-Kriteriums nicht mehr sinnvoll ist, wurde in diesem Fall das volle Spannungsband $U_N \pm 10\%$ nach DIN EN 50160 abzüglich 1 % Sicherheitsmarge als Spannungs-Grenzwert berücksichtigt.

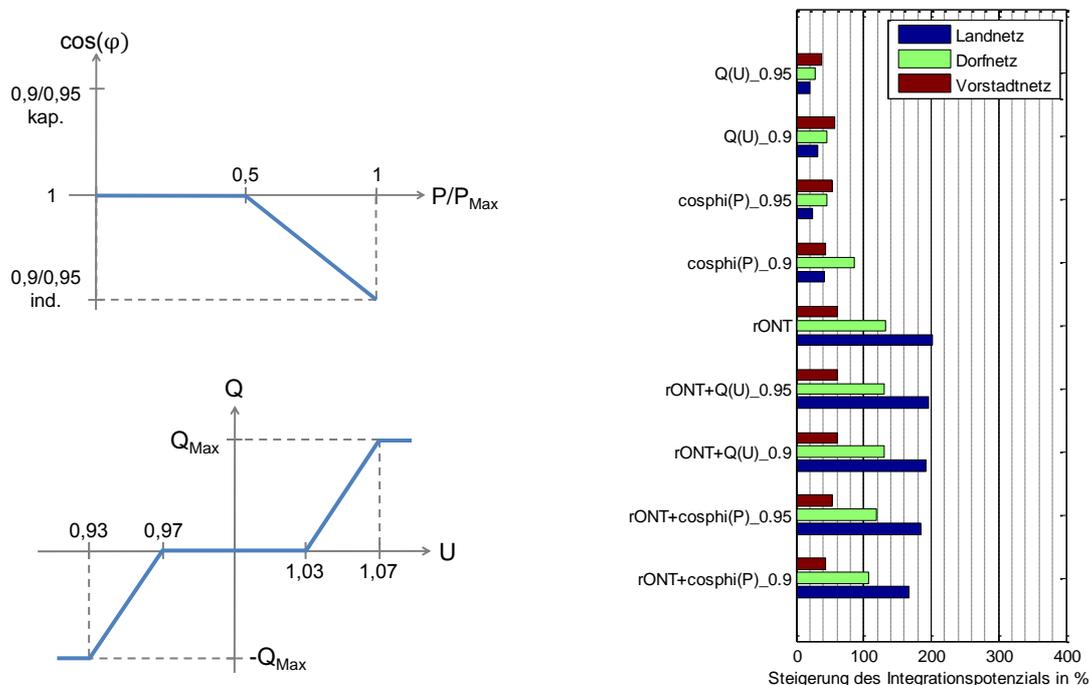


Abbildung 1: Betrachtete Kennlinien für $\cos(\varphi)$ -Regelung (l.o.) und $Q(U)$ -Regelung (l.u.) sowie Ergebnisse des homogenen Integrationspotenzials in den typischen Netzen (r.)

Das Integrationspotenzial kann durch die rONT-Regelung im Landnetz verdreifacht und im Dorfnetz mehr als verdoppelt werden (Abbildung 1 rechts). In Vorstadtnetzen ermöglichen sowohl rONT- als auch Blindleistungskonzepte Steigerungen des Integrationspotenzials zwischen 40- und 60%, da die Leitungskapazität das begrenzende Kriterium ist. Der gleichzeitige Einsatz von rONT und $\cos(\varphi)$ -Regelung verringert das Integrationspotenzial bei den typischen Netzen und dem extremen Vorstadtnetz durch zusätzlichen Blindleistungsbezug. Die Kombination von rONT und $Q(U)$ -Regelung jedoch kann das

Integrationspotenzial im extremen Land- und Dorfnetz noch weiter steigern. In den restlichen Szenarien erzeugt sie kaum zusätzliche Blindarbeit. Unter Berücksichtigung von Last- und Einspeisezeitreihen wurden die jährliche Verlust- und Blindenergie im Netz in 15-minütiger Auflösung ermittelt und zur besseren Vergleichbarkeit auf die integrierte PV-Leistung bezogen. Wie in Tabelle 2 dargestellt, spart ein Wechsel des Blindleistungskonzepts von $\cos\phi(P)$ auf $Q(U)$ zwischen 50 und 75 % der Gesamtblindarbeit in den betrachteten Netzen ein. Die zusätzlichen Netzverluste sind dagegen, im Besonderen mit der $Q(U)$ -Regelung, vernachlässigbar gering.

Tabelle 2: Zusätzliche Blindarbeit und Netzverluste

	Zusätzliche Blindarbeit [kVarh/kW]	Zusätzliche Netzverluste [kWh/kW]
cosφ(P)	57 - 100	0,2 - 0,8
Q(U)	2 - 26	0,1 - 0,2
rONT	0	0,1 - 0,2

4. Wirtschaftlichkeit

Eine wirtschaftliche Bewertung der drei Spannungshaltungskonzepte $\cos\phi(P)$, $Q(U)$ und $rONT$ wurde im Kontext des vermiedenen Netzausbaus, nach dem Verfahren der „unendlichen identischen Investitionskette“ [3] durchgeführt. Untersucht wurden die Investitionen für die sechs Musternetze bei Ausnutzung des vollen Integrationspotentials. Diese setzen sich aus den Ausgaben für Betriebsmittel und der Überdimensionierung der Wechselrichter für eine Blindleistungsregelung zusammen. Die Wirtschaftlichkeit der Spannungshaltungskonzepte lässt sich in Abhängigkeit der maximal integrierbaren DEA angeben (siehe Abbildung 2).

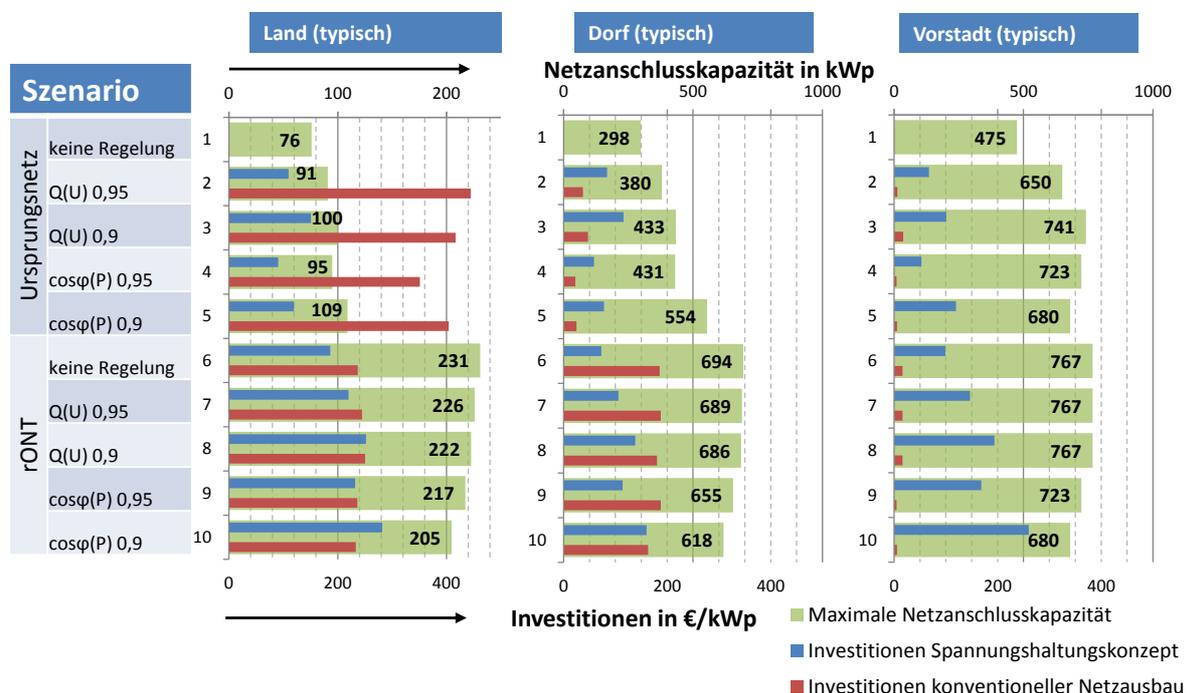


Abbildung 2: Kosten-Nutzen-Analyse der Investitionen

Zur Erstellung eines Kosten-Nutzen-Vergleiches wurden die spezifischen Kosten ermittelt, indem die berechneten Investitionsbarwerte für Spannungshaltungskonzepte und Netzausbau mit der jeweils maximalen Netzanschlusskapazität der einzelnen Szenarien ins Verhältnis

gesetzt wurden. Die Ergebnisse zeigen besonders in ländlichen und dörflichen Netzen einen Kostenvorteil der Spannungshaltungskonzepte gegenüber dem konventionellen Netzausbau. Im Vorstadtnetz hingegen ist konventioneller Netzausbau kostengünstiger als die alternativen Spannungshaltungskonzepte. Bei niedrigem erwarteten Zubau haben meist die Blindleistungsverfahren eine günstigere Kosten-Nutzen-Bilanz (50 - 150 €/kWp). Eine große Steigerung des Netzintegrationspotential, von bis zu 300 % (variiert je nach Musternetz), ermöglicht dagegen nur der rONT (60 - 310 €/kWp).

5. Einschränkungen durch unsymmetrische Einspeisung

Zur Fragestellung der Einschränkungen des Integrationspotenzials durch einphasige DEA mit Blindleistungskonzepten wurden im Rahmen der Studie Simulationen mit unsymmetrischer Einspeisung durchgeführt. In der Niederspannungsebene existieren unsymmetrisch angeschlossene Verbraucher und Erzeuger, die je nach Leistungsklasse einphasig oder zweiphasig mit dem Netz verbunden sind [4]. Ein solcher Anschluss führt aufgrund von unsymmetrischen Leiterströmen zu einer Verzerrung des Spannungszeigerdiagramms; eine Verlagerungsspannung entsteht. In der Norm DIN EN 50160 ist definiert, dass die Gegensystemkomponente der Versorgungsspannung innerhalb des Bereichs von 0% bis 2% der entsprechenden Mitsystemkomponente liegen muss [5]. Im entwickelten Verfahren, das mithilfe von Labormessungen verifiziert wurde, wurde iterativ die installierte Leistung in den vorgestellten Typnetzen erhöht und neben den zwei Kriterien aus Kapitel 3 zusätzlich das Kriterium Unsymmetriegrad berücksichtigt. Die Ergebnisse der unsymmetrischen Simulationen sind in Abbildung 3 dargestellt.

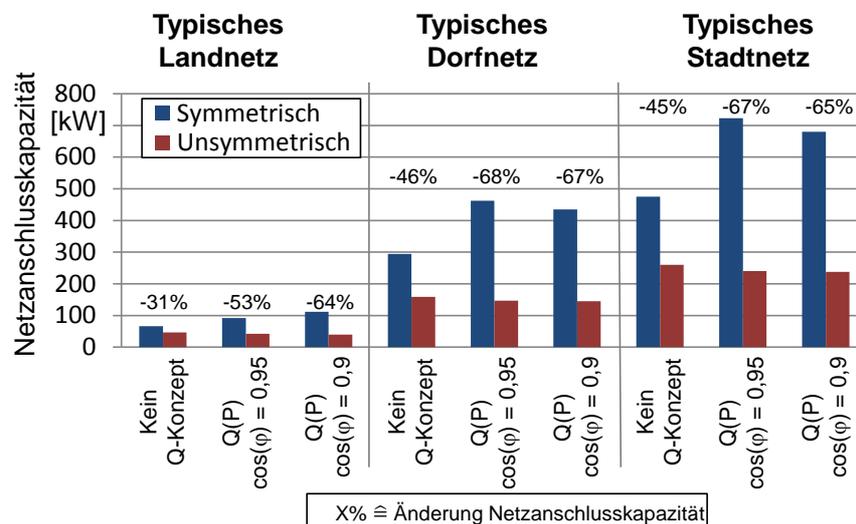


Abbildung 3: Ergebnisse der unsymmetrischen Simulationen

Es wird deutlich sichtbar, dass die Berücksichtigung des dritten Kriteriums Spannungsunsymmetriegrad zu einer stark verringerten Netzzanschlusskapazität in den untersuchten Netzen führen kann, von einer Reduktion von 31% im typischen Landnetz bis hin zu 46% im typischen Dorfnetz. Die Nutzung von Blindleistungskonzepten bewirkt eine weitere Verringerung der Netzzanschlusskapazität von bis zu 68% im Vergleich zum

symmetrischen Fall. Diese Einschränkung tritt ab einer einphasigen Einspeisung von 50% der integrierten Gesamtleistung auf. Aus diesem Grund sollte eine stark unsymmetrische Einspeisung der DEA vermieden werden.

6. Stabilität im Netzbetrieb

Zur Betrachtung der Stabilität und Robustheit der Q(U)-Regelung wurden die zu untersuchenden Wechselrichter einzeln an einem nachgebildeten, extremen Niederspannungsstrang ($\approx 5,5$ km NAYY 4x150mm² Erdkabel) bei verschiedenen Parametrierungen mit Spannungssprüngen beaufschlagt, welche eine Änderung des Blindleistungsbezugs von 70% kapazitiv auf 70% induktiv nach sich zogen (vgl. Abbildung 4). Spannungs- und Blindleistungsverläufe wurden zeitlich hochaufgelöst aufgezeichnet und anhand von in dieser Studie erarbeiteten Kriterien bewertet. Diese waren unter anderem die Spitzen von Netzspannung ($\Delta u_{\max} \leq 3\% U_N$) und Blindleistung, der Schwingungsgehalt ($< 20\%$) und Überschwinger ($< 15\%$) der Blindleistung sowie die Ausregelzeit (< 10 s). Zur Variation standen die Verstärkung und die Zeitkonstante des PT1-Gliedes als auch die Steigung der Q(U)-Kennlinie im Übergangsbereich ($\%Q_{\max}/V$) zur Verfügung. Maximale Blindleistung (± 4500 VAr), Wirkleistungseinspeisung (6 kW) und Spannungstotband der Kennlinie wurden fixiert. Abbildung 5 stellt die überlagerten Ergebnisse aller Wechselrichter in Form einer Matrix-Ampel dar. Grün hinterlegte Felder stehen für keine, gelb für eine und rot für mehr als zwei Verletzungen der Kriterien. Schwarz umrandet sind die nach dem Verfahren der zeitgewichteten Betragsregelfläche [6] ermittelten Optima.

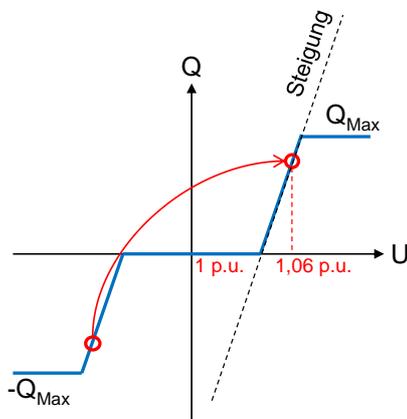


Abbildung 4: Schema der Spannungssprünge

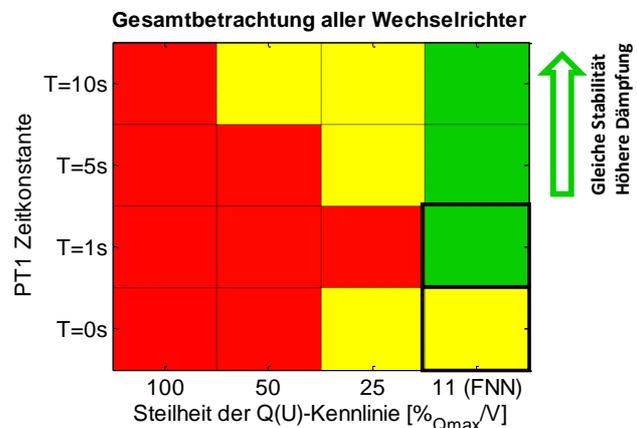


Abbildung 5: Gesamtbewertung der Wechselrichter

Bei ungünstiger, extremer Parametrierung konnte analog zu [7] potentiell instabiles Verhalten (Schwingen) der Wechselrichter im extremen Netz erzeugt werden. Bei einem Betrieb der extrem parametrisierten Wechselrichter im Verbund mit verschiedenen Netzstrukturen (Stranganzahl: 1/2, rONT: mit/ohne, symmetrisch/unsymmetrisch) kam es zu Schwingungen in Spannung und Blindleistung, gegenseitiger Beeinflussung der Regelungen und ungleichmäßiger Blindleistungseinspeisung.

Bei empfohlener Parametrierung (11% Q_{\max}/V Kennliniensteigung, $T \geq 1$ s) arbeiten jedoch alle betrachteten Wechselrichter auch im extremen Netz sicher und stabil. Auch in den Verbunduntersuchungen mit Berücksichtigung eines rONT konnten keine Anzeichen auf ein instabiles Verhalten oder eine gegenseitige Beeinflussung festgestellt werden. Zu beobachten war dennoch, dass die untersuchten Wechselrichtern trotz gleicher Parametrierung ein zum Teil stark voneinander abweichendes Verhalten zeigten.

7. Zusammenfassung

Die untersuchten Spannungshaltungskonzepte können die Netzanschlusskapazität stark erhöhen. Der rONT bietet im Allgemeinen ein höheres Integrationspotential als die Blindleistungskonzepte und stellt in Verbindung mit der Q(U)-Regelung ein zukunftsfähiges Konzept dar. Bis auf die Ergebnisse des Vorstadtnetzes weisen Spannungshaltungskonzepte eine höhere Wirtschaftlichkeit als konventioneller Netzausbau auf. Im Vorstadtnetz ist der Netzausbau meist wirtschaftlicher. In Laboruntersuchungen kann sowohl instabiles als auch stabiles Verhalten der Wechselrichter nachgewiesen werden. Eine stabile Parametrierung, gültig für alle Betriebszustände (auch im Verbund) kann eindeutig definiert und empfohlen werden. Eine Prüfvorschrift für die Q(U)-Regelung von Wechselrichtern, sowie eine durch ein unabhängiges Institut durchgeführte Zertifizierung ist sehr zu empfehlen.

8. Ausblick

Die zusätzliche Eingliederung neuartiger Primärtechnik, wie Längsregler oder NS-STATCOM, sowie die Betrachtung von differenzierteren, inhomogenen Netzzuständen bieten aufbauend auf den in dieser Studie erarbeiteten Ergebnissen ein breites Untersuchungsfeld für fortführende Arbeiten. So können aufbauend auf der Bestimmung von Wirksamkeit und Stabilität optimale Betriebsstrategien für ein dynamisches Gesamtsystem zur statischen Spannungshaltung entwickelt werden.

9. References

- [1] J. Scheffler, "Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten," Universität Chemnitz, 2002.
- [2] G. Kerber, "Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilsnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikanlagen," Technische Universität München, 2010.
- [3] T. Stetz, "Autonomous Voltage Control Strategies in Distribution Grids with Photovoltaic Systems – Technical and Economical Assessments," Kassel, 2013.
- [4] *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, VDE-AR-N 4105, 2011.
- [5] *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, DIN EN 50160, 2011.
- [6] H. Lutz and W. Wendt, *Taschenbuch der Regelungstechnik*, 6th ed. Frankfurt am Main: Deutsch, 2005.
- [7] Hauke Basse, Jürgen Backes, Thomas Leibfried, "Dynamische Auswirkungen einer spannungsabhängigen Blindleistungsregelung bei dezentralen Einspeisern," in *ETG Kongress 2009*