

Statische Spannungshaltung

# Stabilität der Q(U)-Regelung in Verteilnetzen

Die spannungsabhängige Blindleistungsregelung  $Q(U)$  wird in der überarbeiteten VDE AR-N-4105 als Vorzugslösung der Blindleistungsbereitstellung zur statischen Spannungshaltung genannt. Über die Stabilität und das transiente Verhalten der  $Q(U)$ -Regelung gab es in der Vergangenheit kontroverse Diskussionen. Erst der zunehmende Detailgrad der Simulationsmodelle und deren Validierung ermöglichen eine belastbare und aussagefähige Analyse. In diesem Artikel wird das transiente Übergangsverhalten multipler  $Q(U)$ -Regelungen sowie deren Abstand zur Stabilitätsgrenze analysiert. Entgegen jeder Kritik verhält sich die  $Q(U)$ -Regelung nicht nur stabil, sondern auch wie erwünscht.

Das Integrationspotenzial bezeichnet die Summe an dezentraler Erzeugungleistung, die ein definiertes Netzgebiet aufnehmen kann, bis es an seine Auslastungsgrenzen stößt. In mehr als 75 % der Fälle beschränken Spannungsbandverletzungen das Integrationspotenzial der Verteilnetze [1 – 3]. Der Einsatz geeigneter spannungshaltender Maßnahmen in Verbindung mit partiellem Netzausbau erweist sich in mehreren Studien als zielführende und wirtschaftliche Lösung für diese Spannungs-

bandprobleme [1 – 5]. Die höchste Effizienz wird dabei der  $Q(U)$ -Regelung attestiert. Für die Empfehlung stabiler Parameter der  $Q(U)$ -Regelung müssen detaillierte und validierte Modelle der Erzeugungseinheiten (EZE) untersucht werden, da ungenaue Schätzungen und Annahmen in der Modellbildung schnell zu Über- oder Unterschätzung der Problematik führen. Die vorgestellten, validierten Modelle werden in verschiedenen Verteilnetzmodellen integriert und eingehend untersucht.

### Definition von Stabilität und geeigneten Evaluierungskriterien

Der Begriff Stabilität wird heute umgangssprachlich und ohne eindeutige Definition verwendet. Beispielsweise wird oft von einem stabilen Netzbetrieb gesprochen, obwohl eigentlich ein erwünschtes transientes Übergangsverhalten gemeint ist. Ein stabiler Netzbetrieb ist in erster Linie lediglich ein Zustand, bei dem das Netz nicht kollabiert. Klingt eine Übergangsfunktion ab, so ist das System asymptotisch stabil. An der Stabilitätsgrenze zeigt sich eine ungedämpfte, stehende Schwingung, das System ist grenzstabil (Bild 1).

In der überarbeiteten Version der VDE AR-N-4105 wird ein erwünschtes Übergangsverhalten der  $Q(U)$ -Regelung auf sprunghafte Anregungen für einzelne EZE gefordert. Dies beinhaltet die Rückkopplung über die Netzimpedanz und soll dem Verhalten eines Filters erster Ordnung ( $PT_1$ -Glied) mit einer Zeitkonstante von  $\tau_{PT1}$  entsprechen. Die  $PT_1$ -Einstellzeit  $T_{QU}$ , die dem Dreifachen der Zeitkonstante  $T_{QU} = 3 \cdot \tau_{PT1}$  entspricht, kann nach der VDE AR-N-4105 im Bereich von 6 bis 60 s gewählt werden. Dieses erwünschte Übergangsverhalten einer einzelnen EZE beinhaltet dabei bereits einen Sicherheitsfaktor für mehrere, parallel angeschlossene EZE. Ausgehend von einem idealen  $PT_1$ -Verhalten wird sich für kritischere Systeme zuerst ein Überschwingen ausbilden (vgl.  $PT_2$ -Verhalten), bevor ein eventuelles Schwingen oder gar eine Instabilität auftritt. So kann durch die Bestimmung der Überschwingweite  $\ddot{u}$  das Übergangsverhalten eines Systems differenziert

bewertet werden. Die eigens entwickelte und nicht triviale Auswertemethode ist in [7] beschrieben.

### Modellierung

Die Modellierung aller EZE sowie des Gesamtsystems »Netz« geschieht in synchron rotierenden dq0-Referenzsystemen [8]. Die RMS-Modelle zweier  $Q(U)$ -Regelungen aus [9] wurden in EMT-Modelle zweier Wechselrichter integriert und die einzelnen Module (Stromregler, Leistungsregler, PLL,  $Q(U)$ -Regelung, etc.) durch Labormessungen validiert. Die daraus entstandenen EZE-Modelle werden nachfolgend als Typ-A- und Typ-B-EZE bezeichnet und decken das sich am Markt befindende Spektrum an Wechselrichtern gut ab. Alle notwendigen Details zur Modellierung des vollständigen nichtlinearen Modells sowie die Transformation in ein valides Kleinsignalmodell sind in [8] veröffentlicht. Das analytische Kleinsignalmodell einer jeden EZE ist vollständig parametrierbar und kann als Eingangsimpedanz  $Y_i$  vergleichbar einfach in komplexe Verteilnetze integriert werden. Im Gesamtsystem liegen sowohl die Stromausgänge aller EZE als auch der Stromfluss über den Transformator als beobachtbare Systemausgänge vor. Aufgrund des linearen Charakters eines Kleinsignalmodells wird das nichtlineare Totband der  $Q(U)$ -Kennlinie nicht berücksichtigt und es nehmen alle EZE an der Spannungshaltung teil. Die Ergebnisse repräsentieren daher einen Worst Case im Sinne der verfügbaren Blindleistung.

### Ergebnisse

#### Szenario 1:

##### Einzelne EZE an einem Strang

Das einfachste Szenario ist eine einzelne, am Strangende positionierte EZE (Bild 2). Um den grundlegenden Einfluss der wählbaren Parameter der  $Q(U)$ -Regelung auf die Stabilität und das Übergangsverhalten zu quantifizieren, wird das folgende Setup gewählt.

**Netz:** Für die Vergleichbarkeit mit anderen Studien wird die Niederspannungsleitung durch die Mitsystem-Impedanz  $Z_L = 0,9749 + j0,4 \Omega$  nachgebildet und entspricht einem 5 km langen NAYY 4 x 150 mm<sup>2</sup> Kabel. Durch Variation der Nennscheinleistung der EZE werden die üblichen Netzplanungskriterien deutlich verletzt und daher in diesem einführenden Szenario nicht berücksichtigt.

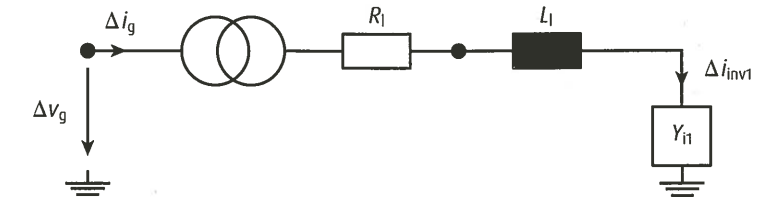


Bild 2. Netzersatzschaltbild für Szenario 1

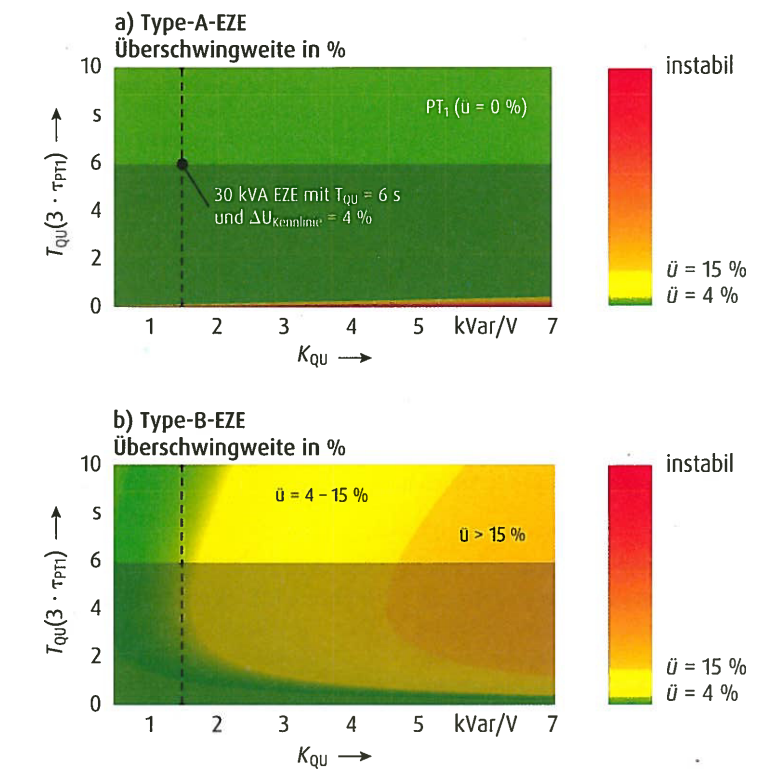


Bild 3. Überschwingweite als Funktion der Parametervariation von  $T_{QU}$  und  $K_{QU}$

**$Q(U)$ -Regelung:** Für beide Typen der  $Q(U)$ -Regelung werden die folgenden Parameter variiert:

- Einstellzeit der  $Q(U)$ -Regelung im Bereich  $T_{QU} = [0 \dots 60]$  s
- Verstärkung der  $Q(U)$ -Regelung  $K_{QU} = Q_{max}/\Delta U_{Kennlinie} = [S_N \cdot \sin(\varphi_{max})]/[4\% \cdot U_{N,Y}]$  durch Variationen der Nennscheinleistung im Bereich  $S_N = [1 \dots 150]$  kVA (mit  $\cos(\varphi_{max}) = 0,9$ ) und der »Breite« des linearen Steigungsbereichs der  $Q(U)$ -Kennlinie im Bereich  $\Delta U_{Kennlinie} = [0,5 \dots 5]\%$ .

**Bild 3** stellt die Überschwingweite  $\ddot{u}$  des Blindstroms der EZE bei sprunghafter Anhebung der Spannung am Ortsnetztransformator für verschiedene

Parametrierungen dar. EZE vom Typ A (Bild 3a) weisen generell eine höhere Robustheit gegenüber Variationen der verfügbaren Parameter auf. Bemerkenswert ist die Einhaltung des idealen  $PT_1$ -Verhaltens im Bereich der Parametrierung nach der AR-N-4105 (nicht ausgegrauter Bereich oberhalb  $T_{QU} = 6$  s). Dies wird maßgeblich durch den schneller ausgelegten Leistungsregler der Typ-A-EZE erreicht. EZE vom Typ B (Bild 3b) erzeugen bei fast allen Parametern höhere Überschwingen. Zudem zeigen sie eine hohe Sensitivität gegenüber Erhöhungen der Verstärkung  $K_{QU}$  (Anlagengröße beziehungsweise steilere Kennlinie), die nicht durch eine Erhöhung der  $Q(U)$ -Einstellzeit  $T_{QU}$  kompensiert werden kann.

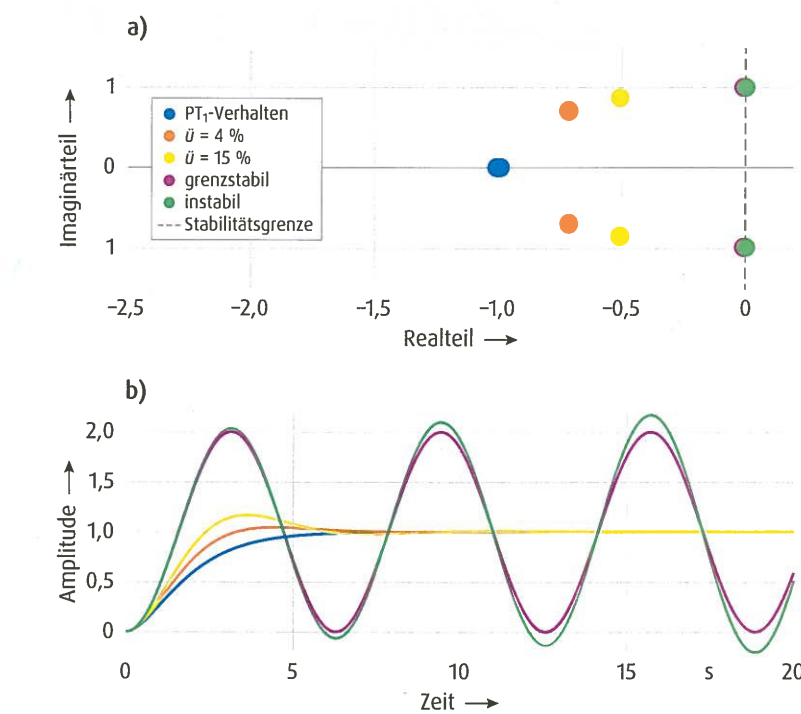


Bild 1. Eigenwerte (a) und Sprungantworten (b) exemplarischer Systeme

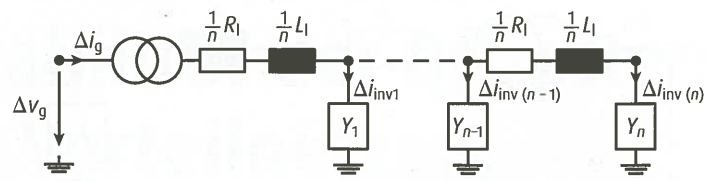


Bild 4. Netzersatzschaltbild für Szenario 2

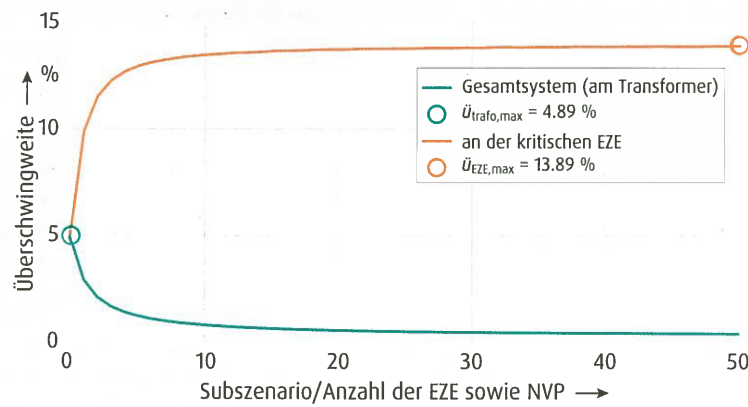


Bild 5. Überschwingweiten aller 50 Subsznarien

**Zusammenfassung Szenario 1:** Im Bereich der gültigen Parametrierung nach der VDE AR-N-4105 zeigt eine einzelne EZE am Strangende sehr gute bis akzeptable Resultate, sogar im unrealistischen Szenario eines 5 km langen Niederspannungsstrangs.

**Szenario 2: Mehrere EZE an einem Strang**  
Der Einfluss mehrerer verteilter  $Q(U)$ -Regelungen auf die Stabilität und eventuelle Interaktionen wird untersucht. Dafür wird folgendes Setup gewählt.

**Netz:** Im Szenario 2 werden mehrere äquidistant verteilte EZE an den Strang aus Szenario 1 angeschlossen. Dabei entstehen 50 Subsznarien mit  $n = [1 \dots 50]$  verteilten EZE. Die Gesamtlänge des Niederspannungsstrangs bleibt konstant. **Bild 4** skizziert den beschriebenen Aufbau. Alle gültigen Netzplanungskriterien werden eingehalten.

**$Q(U)$ -Regelung:** Beide Typen der  $Q(U)$ -Regelung werden getrennt analysiert. Die Nennscheinleistungen der EZE werden in jedem Subsznario einheitlich so gewählt, dass die Spannungen im Netz innerhalb von  $\pm 10\%$  um  $U_N$  bleiben. Dadurch ergeben sich beispielsweise  $P_1 = 18,23 \text{ kW}$  für das Subsznario mit  $n = 1$  und  $P_{50} = \sum P = 34,95 \text{ kW}$  für das Subsznario mit  $n = 50$ .

Bei Verwendung der Standard- $Q(U)$ -Parametrierung aus der VDE AR-N-4105 halten alle EZE in allen Subsznarien das ideale  $PT_1$ -Verhalten ein. Um einen Überschwinger und damit die Vergleichbarkeit der Subsznarien zu erzwingen, wird die »Breite« der  $Q(U)$ -Kennlinie mit  $\Delta U_{\text{Kennlinie}} = 2\% \cdot U_{N,Y}$  halbiert und somit faktisch die Leistung verdoppelt. **Bild 5** zeigt die Ergebnisse aller 50 Subsznarien für die kritischeren Typ-B-EZE. Die Überschwingweite am Transformator ist grün und die an der jeweils kritischen EZE orangefarben dargestellt.

Es wird deutlich, dass bei Bewertung des Gesamtsystemausgangs am Transformator eine EZE am Strangende den kritischen Fall darstellt. Werden die Stromausgänge aller EZE in die Bewertung mit einbezogen, so entsteht der größte Über-

schwinger im Subsznario  $n = 50$  mit der höchsten Zahl an verteilten  $Q(U)$ -Regelungen. EZE vom Typ A zeigen qualitativ den gleichen Zusammenhang [7].

**Zusammenfassung Szenario 2:** Unter Beachtung gängiger Netzplanungskriterien führt die Parametrierung der  $Q(U)$ -Regelungen nach der VDE AR-N-4105 in keinem Subsznario zu einem Überschwinger. Das ideale  $PT_1$ -Verhalten wird sowohl am Transformator als auch an allen EZE jederzeit eingehalten. Eine reine Bewertung des Stromflusses am Transformator kann unerwünschte Interaktionen und Verhaltensweisen innerhalb des Gesamtsystems »Netz« verschleiern. Daher sollten alle EZE in die Bewertung einbezogen werden.

**Szenario 3a: Mehrere EZE in vollständigen Netzen**

In Szenario 3a werden  $Q(U)$ -Regelungen in fünf realistische Musternetze der Niederspannung [10] und in ein reales Worst-Case-Netz implementiert und die entstehenden Gesamtsysteme auf Stabilität und Übergangverhalten untersucht. Das reale Worst-Case-Netz wurde durch die Auswahl eines maximalen Blindleistungsangriffsfaktors (BAF) [11] bestimmt. **Bild 6** zeigt das Musternetz »Dorf #1« (links) und das reale Worst-Case-Netz (rechts).

Es werden 200 probabilistische Variationen der Netze erzeugt, in denen EZE-Nennscheinleistungen zufallsbasiert aus einer Verteilung realer Anlagen gezogen und an einem zufälligen Netzverknüpfungspunkt (NVP) positioniert werden, bis das Integrationspotenzial des Netzes erreicht ist. Dies trifft zu, sobald die Spannung an einem beliebigen NVP den Bereich  $\pm 10\%$  um  $U_N$  verlässt, eine Leitung über 100% oder ein Transformator über 120% ausgelastet wird. Durch das Auslassen des 3%-Kriteriums der VDE AR-N-4105 stellen die berechneten Integrationspotenziale die obere Grenze des Möglichen dar. **Bild 7** zeigt die kumulativen Verteilungsfunktionen der Integrationspotenziale.

Die  $Q(U)$ -Regelungen aller EZE werden einheitlich nach der schnellstmöglichen Parametrierung der VDE AR-N-4105 eingestellt ( $\Delta U_{\text{Kennlinie}} = 4\% \cdot U_{N,Y}$  und  $T_{QU} = 6 \text{ s}$ ). Die am Transformator beobachtbare Überschwingweite ist mit  $\leq 3\%$  unkritisch [7]. Wird der Betrachtungsraum auf die Stromausgänge aller EZE erweitert, so erhöht sich die beobachtbare Überschwingweite (**Bild 8**).

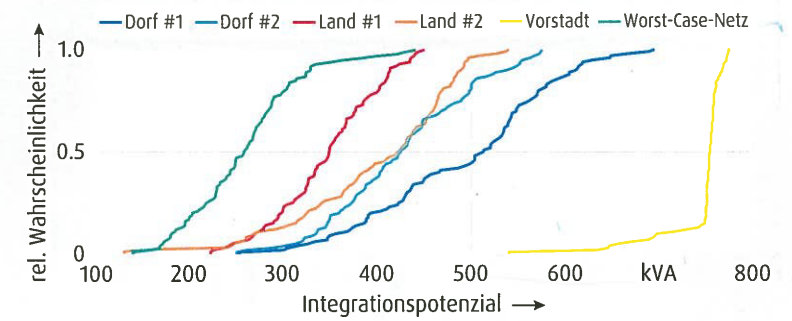


Bild 7. Integrationspotential der untersuchten Niederspannungsnetze

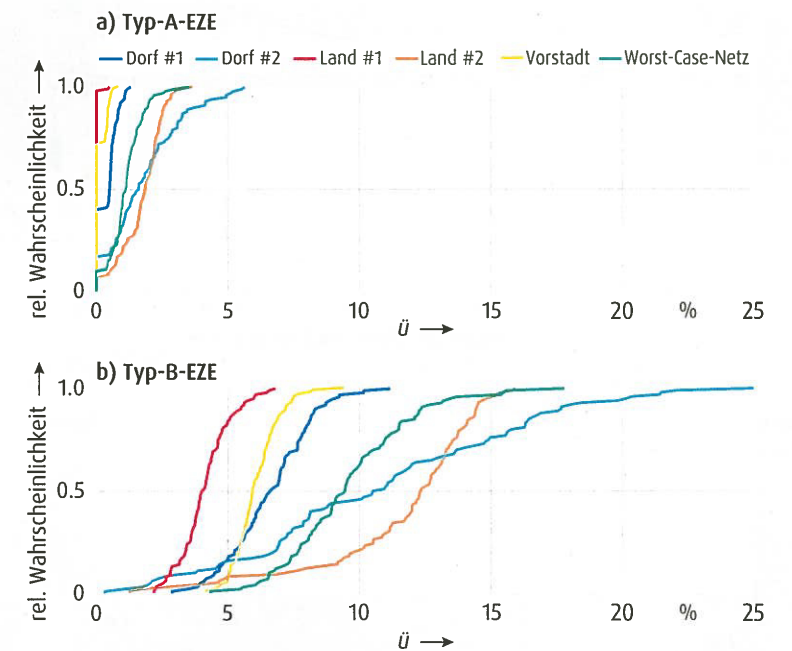


Bild 8. Überschwingweite an der kritischen EZE

Diese nimmt an der kritischen EZE einen Wert von  $\ddot{u} \leq 6\%$  (Typ-A-EZE) beziehungsweise  $\ddot{u} \leq 25\%$  (Typ-B-EZE) an. Der Unterschied zum idealen  $PT_1$ -Verhalten ist erkennbar, jedoch in allen Szenarien unkritisch im Sinne der Stabilität.

**Szenario 3b: Erwünschtes Übergangverhalten und Stabilitätsgrenzen**

Da die VDE AR-N-4105 nur  $PT_1$ -Verhalten für einzelne EZE fordert, existieren keine Grenzwerte für die Überschwingweiten in einem Netz mit mehreren EZE. Es stellt sich die Frage, wie sich das Integrationspotenzial ändern würde, wenn eine an allen EZE einzuhalten- de maximale Überschwingweite gefor-

dert wird. Dafür wird eine zusätzliche Verstärkung  $K_{ZUS}$  in die  $Q(U)$ -Regelkreise aller EZE eingefügt und so berechnet, dass sich die gewünschte maximale Überschwingweite einstellt. Die zusätzliche Verstärkung  $K_{ZUS}$  kann als Multiplikator auf die Nennscheinleistungen aller EZE oder als Teiler der »Breite« des Steigungsbereichs der  $Q(U)$ -Kennlinie interpretiert werden. Gleichermaßen wird durch  $K_{ZUS}$  der Abstand zur Stabilitätsgrenze quantifiziert. **Bild 9** visualisiert die berechneten  $K_{ZUS}$  für alle Netze und probabilistischen Szenarien für Typ-A-EZE (oben) und Typ-B-EZE (unten).

Falls eine maximale Überschwingweite an der kritischen EZE von  $\ddot{u} = 15\%$  in al-

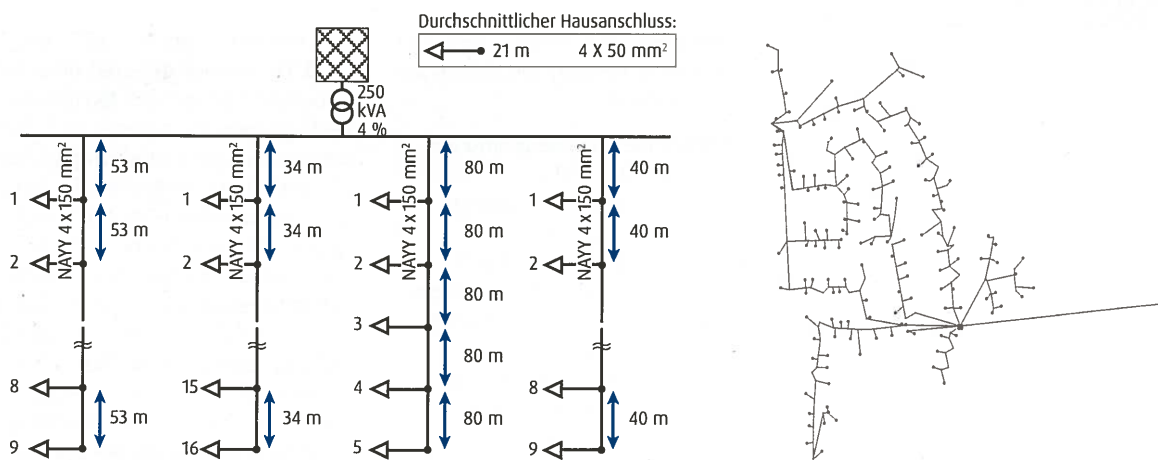


Bild 6. Dörfliches Musternetz der Niederspannung (links) und reales Worst-Case-Netz (rechts)



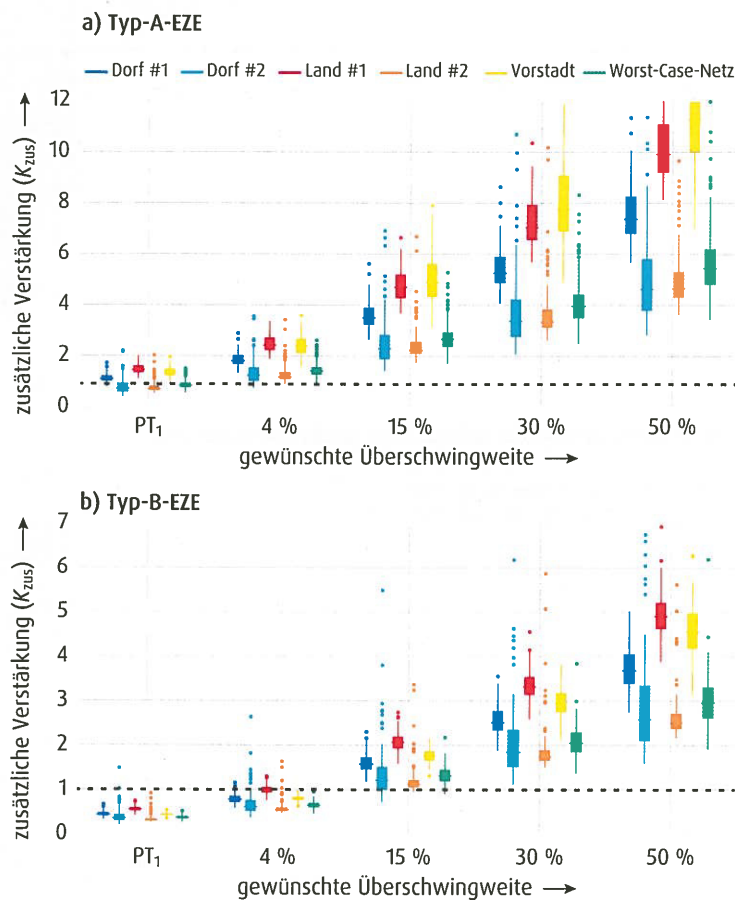


Bild 9. Zusätzlich notwendige Verstärkung  $K_{zus}$  zum Erreichen einer gewünschten Überschwingweite

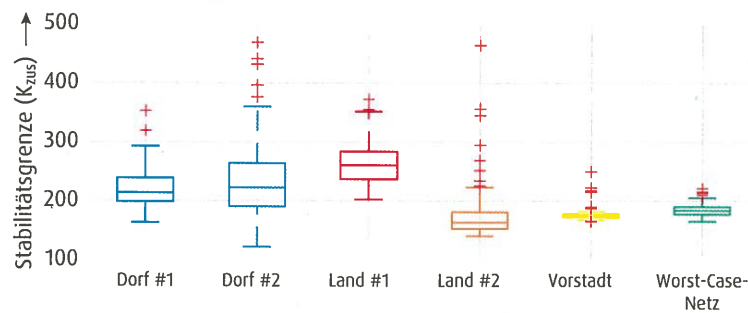


Bild 10. Zusätzlich notwendige Verstärkung  $K_{zus}$  zum Erreichen der Stabilitätsgrenze im Falle der kritischeren Typ-B-EZE

len Netzen und allen probabilistischen Szenarien für beide Typen an EZE gefordert wird, so kann das – unter Auslassen des 3 %-Kriteriums – berechnete Integrationspotenzial in 99,9 % der Fälle integriert werden. Ein beispielhafter Zeitverlauf für  $\ddot{u} = 15 \%$  ist in Bild 12 oben dargestellt. Durch die Linearisierung nehmen zudem alle EZE an der

Spannungshaltung durch  $Q(U)$  teil. Die dargestellten Überschwingweiten entsprechen somit einer Worst-Case-Abschätzung und werden in der Realität eher geringer ausfallen.

Als letzte Instanz für eine Bewertung der  $Q(U)$ -Regelung dient die Stabilitätsgrenze. Wird diese überschritten,

so ist das System instabil und die entstehende Schwingung klingt auf. Zwar sollte es immer ungewollt sein, auch nur in die Nähe eines solchen Verhaltens zu kommen, dennoch kann der Abstand zur Stabilitätsgrenze als Qualitätskriterium genutzt werden. Wird in allen Variationen und Netzen die zusätzliche Verstärkung  $K_{zus}$  bis zur Stabilitätsgrenze erhöht, so muss für Typ-A-EZE ein  $K_{zus} \geq 200$  erreicht werden (im Median  $K_{zus} = 320$ ). Dies bedeutet: Selbst im schlechtesten Fall kann mindestens das 200-Fache des berechneten Integrationspotenzials ( $\approx +20000 \%$ ) im Netz verbaut oder eine 200-fach steilere Kennlinie ( $\Delta U_{Kennlinie} = 0,02 \%$ ) verwendet werden, bevor die Stabilitätsgrenze erreicht wird. Bild 10 zeigt die analog dazu berechneten Ergebnisse für die kritischeren Typ-B-EZE.

Im Fall von Typ-B-EZE kann selbst im schlechtesten Szenario mindestens das 100-Fache des berechneten Integrationspotenzials ( $\approx +10000 \%$ ) verbaut oder eine 100-fach steilere Kennlinie ( $\Delta U_{Kennlinie} = 0,04 \%$ ) verwendet werden. Die Stabilitätsgrenze liegt »unerreichbar« weit entfernt.

Zur Visualisierung zeigen Bild 11 und Bild 12 die Sprungantworten der probabilistischen Variation mit der größten, maximalen Überschwingweite des Netzes »Dorf #2« für zwei verschiedene  $K_{zus}$  im Fall von Typ-A-EZE.

**Zusammenfassung**

Falls eine maximale Überschwingweite an der kritischen EZE von  $\ddot{u} \leq 15 \%$  in allen Netzen und allen probabilistischen Szenarien gefordert wird, so kann das berechnete Integrationspotenzial in 99,9 % der Fälle integriert werden. Das Integrationspotenzial wurde dabei unter erweiterten Netzplanungskriterien berechnet und stellt die obere Grenze des Möglichen dar.

Bezüglich der integrierbaren, dezentralen Erzeugungsleistung mit  $Q(U)$  gibt es keine reale Beschränkung. Weder beim Einzelbetrieb einer Anlage am Strangende noch in allen Muster-netzen und dem realen Worst-Case-Netz ergab sich eine wissenschaftliche Begründung für eine Begrenzung der zu installierenden Leistung. Zum Erreichen der Stabilitätsgrenze müsste mindestens 10000 % des Integrationspotenzials der Netze integriert werden. Die Stabilitätsgrenze liegt somit »unerreichbar« weit entfernt.

Die in der VDE AR-N-4105 vorgestellten Parameter der  $Q(U)$ -Regelung sind vernünftig gewählt und sollten beibehalten werden.

Aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen kann der Einsatz der  $Q(U)$ -Regelung ohne Einschränkungen empfohlen werden.

**Literatur**

- [1] Büchner, J.; Katzfey, J.; Flörcken, O.; Moser, A.: Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie). 2014.
- [2] Deutsche Energie Agentur GmbH (dena): dena-Verteilernetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilernetze in Deutschland bis 2030. 2012.
- [3] Engel, B.; Witzmann, R.; Vennegeerts, H.; Schnettler, A.; Laudahn, S.; Marggraf, O.; Lindner, M.; Patzack, S.; Potratz, F.; Gödde, M.: Vergleich von technischer Wirksamkeit sowie Wirtschaftlichkeit zeitnah verfügbarer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen mit starker dezentraler Einspeisung. VDE/FNN, 2014.
- [4] Esslinger, P.: Statische Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen im Lichte vermehrter dezentraler Einspeisung. Dissertation, München, 2016.
- [5] Lindner, M.; Witzmann, R.: Ergebnisse der FNN-Studie zu neuen Verfahren der statischen Spannungshaltung. 2. Konferenz »Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien«, Berlin, 2015.
- [6] Stetz, T.: Autonomous Voltage Control Strategies in Distribution Grids with Photovoltaic Systems: Technical and Economic Assessment. Dissertation, 2014.
- [7] Lindner, M.; Witzmann, R.: On the stability of  $Q(V)$  in distribution grids. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Sarajevo, 2018.
- [8] Lindner, M.; Witzmann, R.: Modelling and validation of an inverter featuring local voltage control  $Q(V)$  for transient stability and interaction analyses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Band 101, Dezember 2017, S. 280 – 288, 2018.
- [9] Lindner, M.; Witzmann, R.: A Dynamic Rms-Model of the Local Voltage Control System  $Q(V)$  Applied in Photovoltaic Inverters. 23<sup>rd</sup> International Conference on Electricity Distribution (Cired), Lyon, 2015.
- [10] Lindner, M.; Aigner, C.; Witzmann, R.; Wirtz, F.; Gödde, M.; Frings, R.: Aktuelle Masternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung. 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 2016.
- [11] Schoeneberger, M.; Patzack, S.; Vennegeerts, H.; Lindner, M.; Witzmann, R.: Derivation of a  $Q(U)$ -control tolerance band for inverters in order to meet voltage quality criteria. 7<sup>th</sup> Solar Integration Workshop, Bonn, 2017.

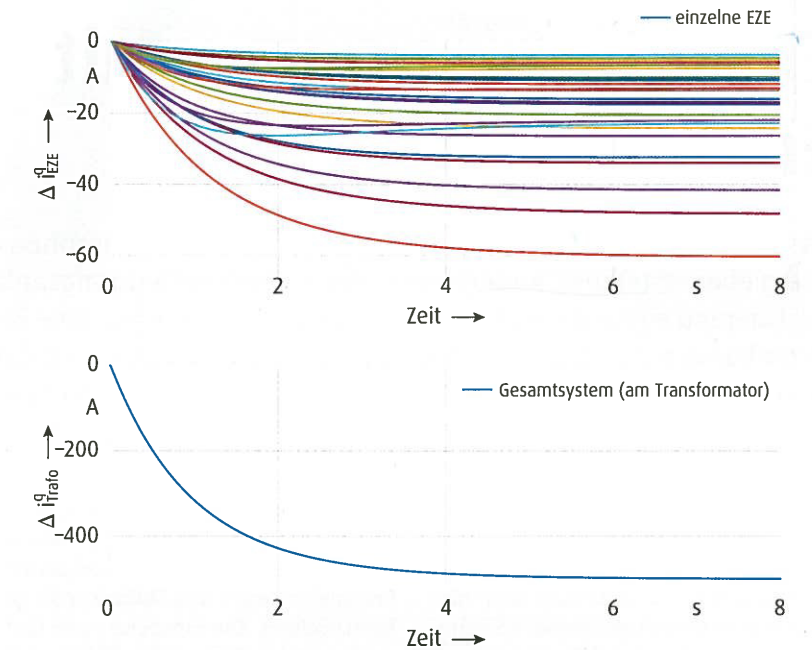


Bild 11. Überschwingweite  $\ddot{u} = 15 \%$  durch  $K_{zus} = 1,5$

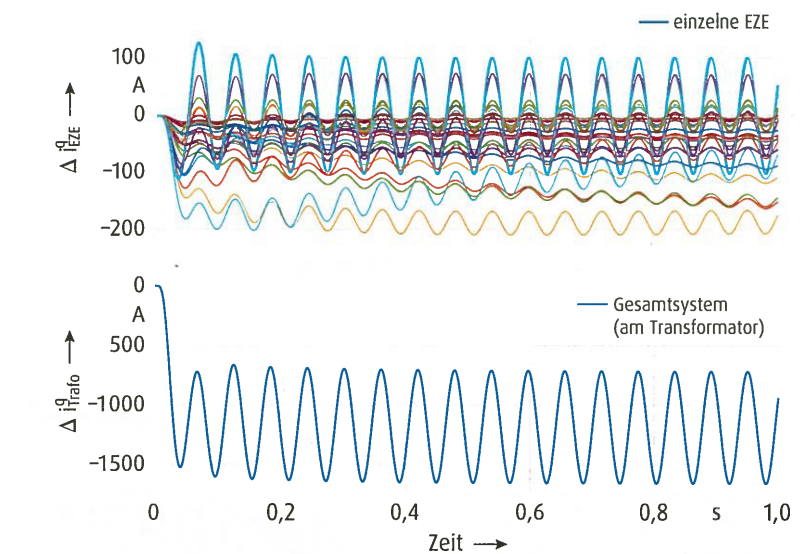


Bild 12. Erreichen der Stabilitätsgrenze durch  $K_{zus} = 262$



**Marco Lindner** M.Sc.,  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Professur für Elektrische  
Energieversorgungsnetze,  
Technische Universität  
München, München  
» marco.lindner@tum.de



**Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann**,  
Professur für Elektrische  
Energieversorgungsnetze,  
Technische Universität  
München, München  
» rolf.witzmann@tum.de  
» www.een.ei.tum.de