

## Automatische Spannungsregelung in Mittelspannungsnetzen mit hoher Einspeiseleistung

Die Eon Bayern AG betreibt auf einem Versorgungsgebiet von rd. 41.500 km<sup>2</sup> neben einem Gasnetz ein Stromnetz mit einer Länge von rd. 178.768 km, davon sind 44.373 km Mittelspannungsleitungen und 134.395 km Niederspannungsleitungen einschließlich Straßenbeleuchtung. Das elektrische Versorgungsnetz umfasst weiterhin 44.606 Transformatorstationen und 280 Umspannwerke von 110 kV auf Mittelspannung mit einer Jahreshöchstlast HS/MS von 5.978 MW (Stand 2010). Das Unternehmen beschäftigt rd. 3.000 Mitarbeiter an unterschiedlichen Standorten (Bild 1).



Bild 1: Standorte und Versorgungsgebiet der Eon Bayern (inkl. einer Vielzahl von Netzgebieten, z. B. Stadtwerken, die nicht zum Versorgungsgebiet zählen)

Im Netz der Eon Bayern fand in den letzten Jahren ein massiver Zubau von Erzeugungsanlagen statt, vor allem durch Photovoltaik (PV). Die installierte Gesamtleistung in Kilowatt (kW) ist in Bild 2 dargestellt.

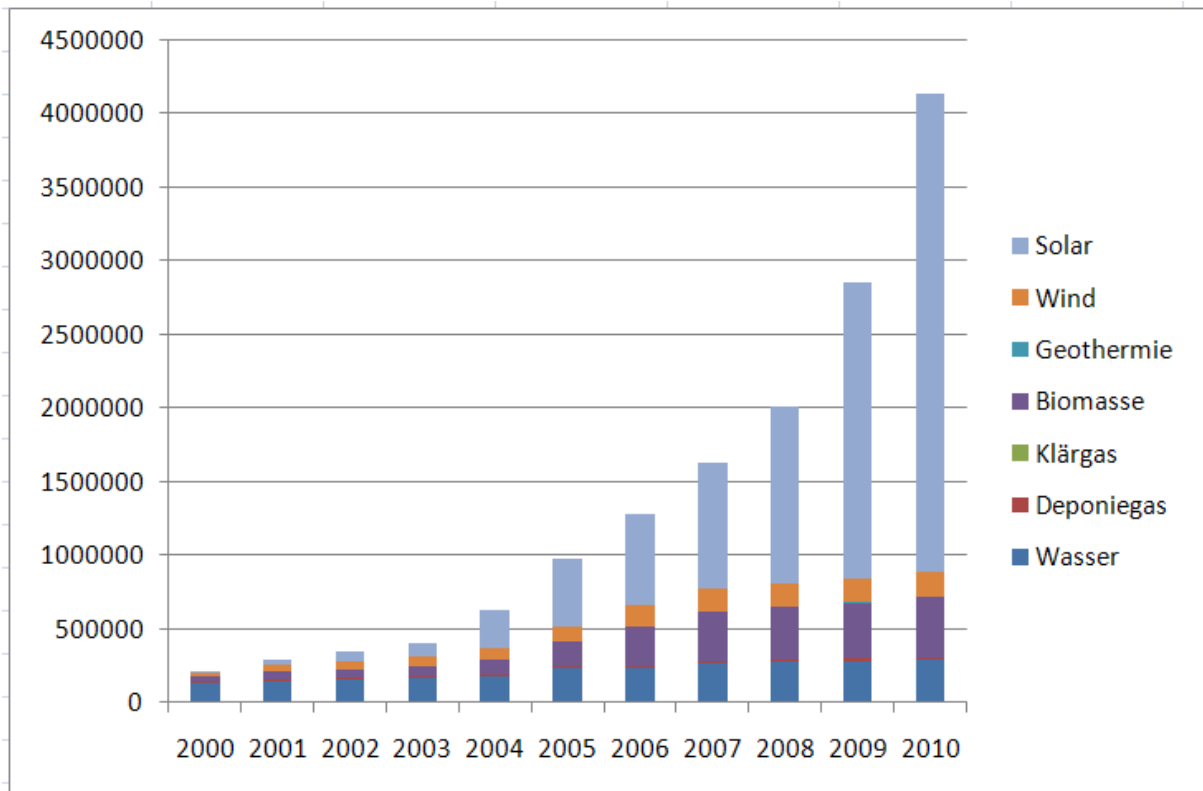


Bild 2: Installierte Leistung in kW aus Erzeugungsanlagen im Netzgebiet der E.ON Bayern

Die installierte Gesamtleistung aus PV betrug im Juni 2011 rd. 3.600 MW, davon waren rd. 79 % im Niederspannungsnetz angeschlossen.

Der Zubau von Erzeugungsanlagen hat in vielen Bereichen des Verteilungsnetzes zur Folge, dass sich besonders in lastschwachen Zeiten, z. B. an Wochenenden und Feiertagen, der Leistungsfluss umkehrt und die überschüssige Leistung von der Niederspannung über die Mittelspannung in das übergeordnete 110-kV-Netz fließt. Dies führt vor allem in ländlichen Verteilungsnetzen mit hoher Einspeiseleistung dazu, dass die Spannungen im Mittel- und Niederspannungsnetz ansteigen und z. T. kritische Werte erreichen.

Bild 3 zeigt beispielhaft die Berechnungsergebnisse der Spannungsverteilung für mehrere 20-kV Teilnetze, die aus insgesamt drei 110/20-kV-Umspannwerken versorgt werden. Dargestellt sind die Spannungen eines Planungsszenarios bei geringer Last und zeitgleich hoher Einspeiseleistung, vor allem aus Photovoltaik. Es wird deutlich, dass die Spannungen im Mittelspannungsnetz bis zu +9 %  $U_N$  erreichen würden. Unter Berücksichtigung des Spannungshubes in der Niederspannung könnte – ohne Einleitung von Gegenmaßnahmen – der nach DIN EN 50160 zulässige Spannungsgrenzwert von +10 %  $U_N$  im Niederspannungsnetz überschritten werden.

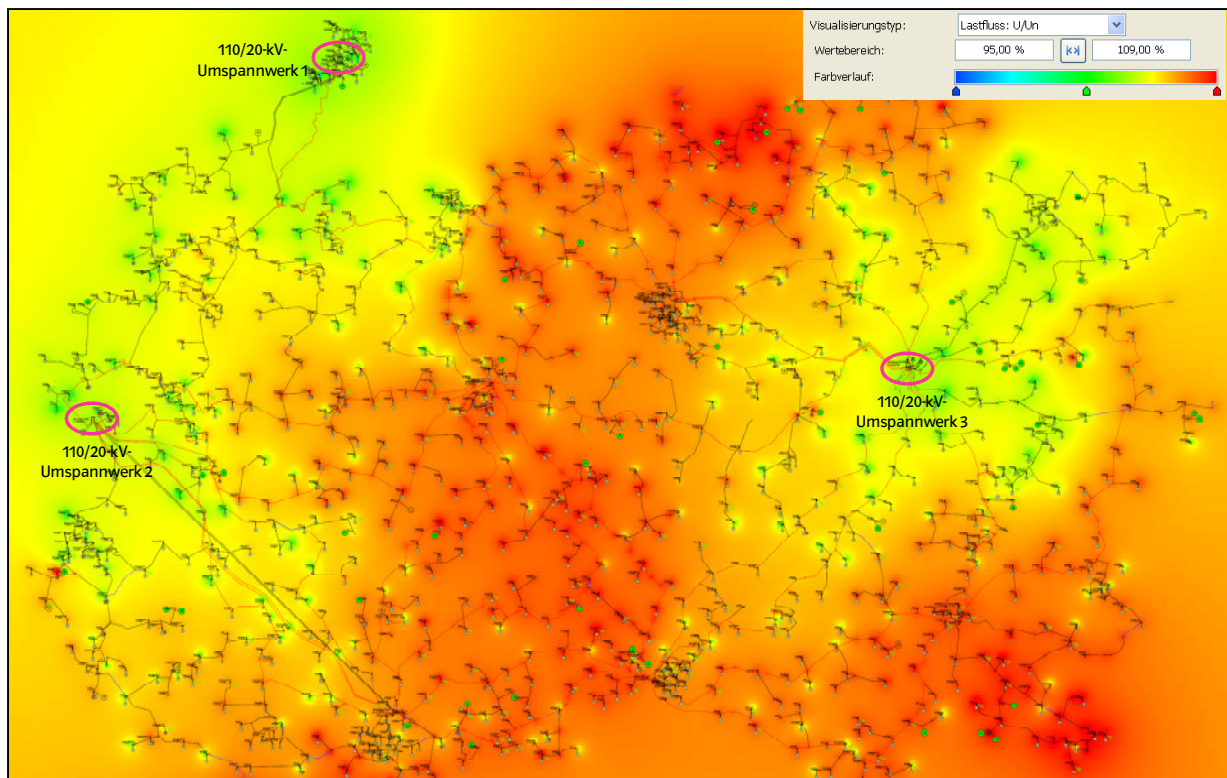


Bild 3: Spannungen in mehreren Mittelspannungsnetzen bei Schwachlast und hoher Einspeiseleistung

Die Sollspannung in den in Bild 3 dargestellten Umspannwerken beträgt 20,8 kV. Grund hierfür ist die sehr ländliche und weitläufige Netzstruktur (Entfernung zwischen UW2 und UW3 über 27 km) und ein Übersetzungsverhältnis der Ortsnetztransformatoren von  $\bar{u} = 52$ . Die hohe UW-Ausgangsspannung gewährleistet in Starklastfällen mit minimaler Einspeiseleistung auch in den entfernten Ausläufern des Mittelspannungsnetzes eine adäquate Spannung. Unter diesen Voraussetzungen können jedoch vor allem im Sommer bei hoher Einspeisung, besonders aus Photovoltaikanlagen, Systemzustände mit unzulässig hohen Spannungen im Netz entstehen.

Ergänzend zum notwendigen konventionellen Netzausbau verfolgt die Eon Bayern deshalb zwei verschiedene Strategien, um die zulässigen Spannungsgrenzwerte einhalten zu können.

**Strategie 1: Regelung der Spannung im 110-kV/MS-Umspannwerk abhängig von der Höhe der Erzeugungsleistung im Verteilungsnetz**

Hierfür sind wiederum zwei verschiedene Varianten möglich:

- a) Regelung der Spannung im Umspannwerk auf Basis von Spannungsmesswerten aus dem Mittelspannungsnetz, z. B. einer Schwerpunktstation bzw. Selektivstation,
- b) Messung des Leistungsflusses über den 110-kV/MS-Transformator und Regelung der UW-Spannung abhängig von Höhe und Richtung des Stromflusses über den Tranformator (Stromkompoundierung).

Die Variante a) setzt neben dem Aufbau entsprechender Messpunkte im Netz gesicherte Übertragungswege zur exakten Übermittlung der Messwerte voraus. Da diese häufig nicht vorhanden und nur mit sehr hohen Kosten zu realisieren sind, hat sich die Eon Bayern zunächst für die Variante b) entschieden.

Für eines der Mittelspannungsnetze, das aus dem Umspannwerk 3 versorgt wird (Bild 3), ist in Bild 4 die Kennlinie zu sehen, nach der künftig die UW-Spannung geregelt wird (schwarze Linie).

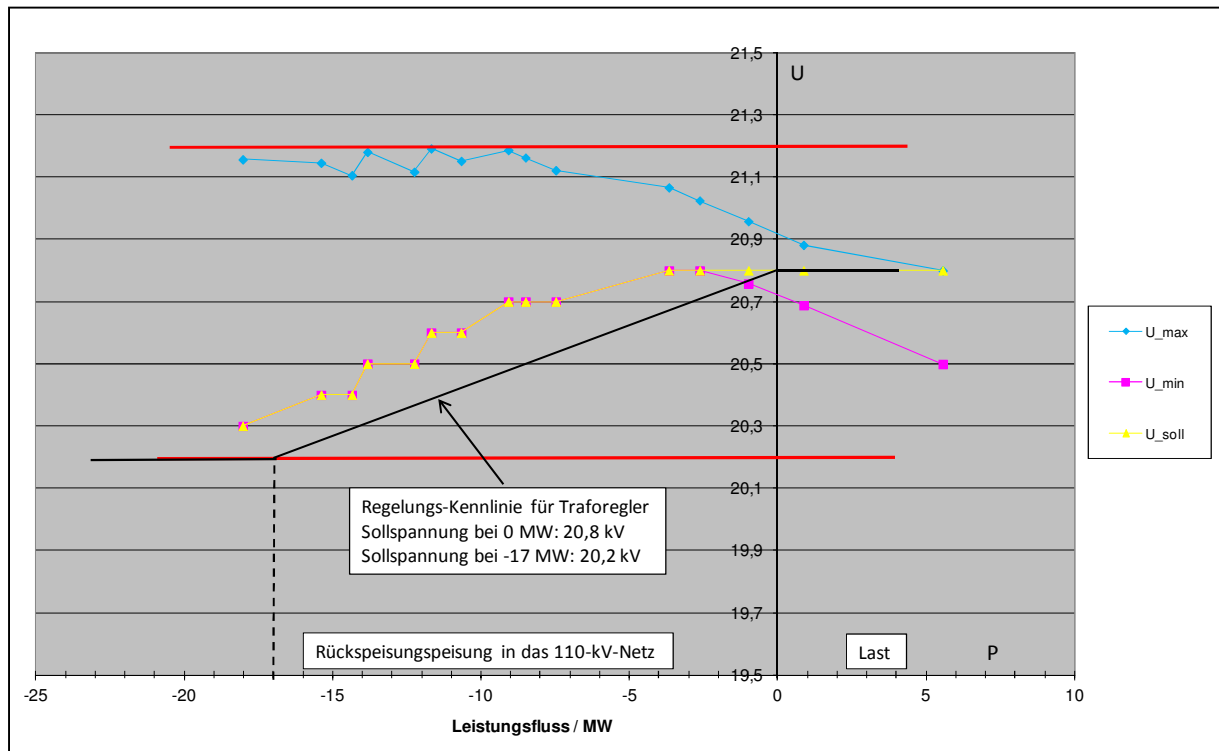


Bild 4: Regelungs-Kennlinie (schwarz) zur Einstellung der UW-Sollspannung in Abhängigkeit vom Leistungsfluss über den 110/20-kV-Transformator

Im Lastbereich (rechts der Nulllinie) beträgt die UW-Sollspannung 20,8 kV, hierbei treten auch die minimalen Spannungen im MS-Netz auf (pinkfarbene Linie). Die blaue Linie zeigt die höchste Spannung im 20-kV-Verteilungsnetz. Die Linien entstehen durch zahlreiche Lastflussberechnungen, in denen bei unterschiedlichen Lastzuständen die Einspeiseleistung der Erzeugungsanlagen von Null bis zur maximalen zeitgleichen Einspeisung gesteigert wird. Die senkrecht übereinander liegenden Punkte kennzeichnen die jeweiligen Spannungen innerhalb eines Lastflussszenarios.

Bei zunehmender Rückspeisung in das 110-kV-Netz (links der Nulllinie) steigt diese Spannung deutlich an. Ein Anstieg über einen Wert von 21,2 kV würde unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses der Ortsnetztransformatoren und des Spannungshubes im Niederspannungsnetz gegebenenfalls Verletzungen von Spannungsgrenzwerten nach DIN EN 50160 zur Folge haben. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Spannung im

Umspannwerk zu reduzieren. Die sich ergebende UW-Sollspannung ist in Bild 4 als gelbe Linie dargestellt.

Mit Kenntnis der notwendigen Sollspannung ist es nun möglich, die für die praktische Umsetzung erforderliche Kennlinie festzulegen (schwarze Linie), mit der die Programmierung des Transformatorreglers vorgenommen wird. Gemäß dieser Kennlinie beträgt die Spannung im Umspannwerk bei einer Rückspeisung von 17 MW in das 110-kV-Netz nur noch 20,2 kV. Um Unterspannungen in der Nähe des Umspannwerks zu vermeiden findet keine weitere Reduzierung der UW-Sollspannung statt. Dieser untere Grenzwert muss individuell messtechnisch verifiziert werden. Im Rahmen des Smart-Grid-Projektes „Netz der Zukunft“ findet ein begleitendes Messprogramm statt, das die Wirksamkeit der Kennlinie belegen und die Verifizierung der berechneten Grenzwerte ermöglichen soll.

Die Berechnung der Kennlinie für ein Mittelspannungsnetz (Erdschlussgebiet) geschieht mit einem Netzberechnungsprogramm und berücksichtigt dabei alle Erzeugungsanlagen, die an diesem Mittelspannungsnetz und den unterlagerten Niederspannungsnetzen angeschlossen sind. Dies setzt eine gute und aktuelle Erfassung aller Erzeugungsanlagen über alle Spannungsebenen voraus, beginnend von der Einspeisezusage bis zur Inbetriebnahme.

Die Lastflussberechnungen setzen weiterhin verschiedene Randbedingungen voraus: Da nicht alle Erzeugungsanlagen gleichzeitig mit 100 % ihrer installierten Leistung einspeisen, ist der Ansatz von Gleichzeitigkeitsfaktoren sinnvoll. Für PV-Anlagen mit Anschluss im Mittelspannungsnetz kann als guter Näherungswert eine durchschnittliche Leistung von 85% der installierten Modulleistung angenommen werden. In der Niederspannung hingegen sind die auf den Hausdächern installierten PV-Anlagen nicht alle optimal nach Süden ausgerichtet, wodurch der Gleichzeitigkeitsfaktor für diese Anlagen geringer ist. Nach der Berechnung von über 45 Kennlinien für unterschiedliche Netzgebiete wurde ein Durchschnittswert von 60 bis 65 % der installierten Modulleistung für die gleichzeitige Einspeisung aller Niederspannungs-PV-Anlagen innerhalb eines 20-kV-Mittelspannungsnetzes ermittelt. Erfahrungsgemäß sind der Spannungshub und die Rückspeisung in die übergeordnete Spannungsebene dann am Größten, wenn die Netzlast sehr gering ist, z. B. an Sonntagen oder Feiertagen, so dass als Randbedingung eine minimale Netzlast unterstellt ist. Weiterhin sind die Erzeugungsanlagen in den Netzen der Weiterverteiler zu berücksichtigen, die galvanisch mit dem Mittelspannungsnetz der Eon Bayern verbunden sind.

Die obere und untere Grenze des in Bild 4 dargestellten Regelbereichs ist im Versorgungsgebiet der Eon Bayern regional unterschiedlich und z. B. vom Übersetzungsverhältnis der Ortsnetztransformatoren abhängig. Da sich die Last- und Einspeiseverhältnisse in jedem Mittelspannungsnetz anders darstellen, ist die Ermittlung der dargestellten Kennlinie für jedes einzelne Mittelspannungsnetz individuell erforderlich. Änderungen im Netz, z. B. Netzausbaumaßnahmen, der weitere Anschluss von Erzeugungsanlagen und Verlegungen von Trennstellen, machen eine erneute Berechnung der Kennlinie notwendig.

Als problematisch erweist sich die lastflussabhängige Spannungsregelung, wenn große Erzeugungsanlagen direkt im Umspannwerk oder in unmittelbarer Nähe dazu angeschlossen

sind. Diese Anlagen erhöhen den Leistungsrückfluss über den 110-kV/MS-Transformator in die übergeordnete Spannungsebene, tragen jedoch keinen nennenswerten Anteil an der Erhöhung der Spannung im Mittelspannungsnetz bei. Zeigen diese Anlagen ein deutlich anderes Verhalten bzgl. der eingespeisten Leistung als die Summe der übrigen Erzeugungsanlagen, so kann für diese Mittelspannungsnetze keine eindeutige Kennlinie für die Regelung definiert werden. Dies kann z. B. dann der Fall sein, wenn die im UW angeschlossenen Anlagen vorübergehend außer Betrieb sind. Deshalb ist es sinnvoll, große Erzeugungsanlagen mit Anschluss im Umspannwerk schaltungstechnisch auf einen eigenen 110-kV/MS-Transformator zu separieren. Alternativ ist eine Summendifferenzmessung für die Eingangsgrößen der lastflussabhängigen Spannungsregelung aufzubauen.

Als weiteres Problem ist die Regelung von 110-kV-Dreiwicklungstransformatoren zu nennen, die über einen Schenkel ein Mittelspannungsnetz versorgen, für das eine lastflussabhängige Spannungsregelung aufzubauen ist, und über den anderen Schenkel einen Kunden mit einem hohen Leistungsbezug beliefern. Da sich der Spannungsregler auf der 110-kV-Wicklung befindet, wird die Spannung in diesem Fall nicht nur für das rückspeisende Mittelspannungsnetz sondern auch für den am anderen Schenkel angebotenen Kunden geregelt. In diesen Fällen ist, unter Berücksichtigung der vertraglichen Rahmenbedingungen, die Einhaltung des zulässigen Spannungsbands nach DIN EN 50160 für beide Transformatorschenkel differenziert zu untersuchen.

## **Strategie 2: Regelung der Spannung durch den Blindleistungsbezug von Erzeugungsanlagen im Mittelspannungs- und gegebenenfalls auch im Niederspannungsnetz**

Gemäß der technischen Richtlinie „Erzeugungsanlagen im Mittelspannungsnetz“ (BDEW, Juli 2008) müssen Erzeugungsanlagen mit einer Leistung  $> 100$  kW in der Lage sein, eine von der Höhe der Spannung abhängige Blindleistung in das Netz einzuspeisen bzw. zu beziehen (Blindleistungs-Spannungs-Kennlinie  $Q(U)$ ).

Bei der Eon Bayern wird diese Forderung u. a. durch die Vorgabe einer  $Q(U)$ -Regelung in Form eines untererregten Verhaltens des Generators bzw. des Umrichters bei Überspannungen näher beschrieben. Dieses Verhalten hat den entscheidenden Vorteil, dass die durch die Erzeugungsanlage selbst hervorgerufene Spannungserhöhung mit dem Blindleistungsbezug wieder reduziert wird. Dies schützt zum einen Lastkunden vor Überspannungen, zum anderen schützt es die Erzeugungsanlage selbst davor, durch den Überspannungsschutz abgeschaltet zu werden.

Zunächst ist nur das untererregte Verhalten von Erzeugungsanlagen bei Überspannungen gefordert. Allerdings ist auf Anforderung der Eon Bayern auch die Vorgabe einer konstanten Blindleistungseinspeisung bzw. einer über Fernwirktechnik variabel anzupassenden Blindleistung und somit generell auch ein übererregtes Verhalten zu ermöglichen.

Für Erzeugungsanlagen mit variabel einstellbarer Blindleistung, z. B. Umrichter, die unabhängig vom jeweiligen Arbeitspunkt ( $> 10\% P_N$ ) mit einer konstanten, maximalen Blindleistung betrieben werden können, ist die in Bild 5 dargestellte  $Q(U)$ -Regelung einzuhalten.

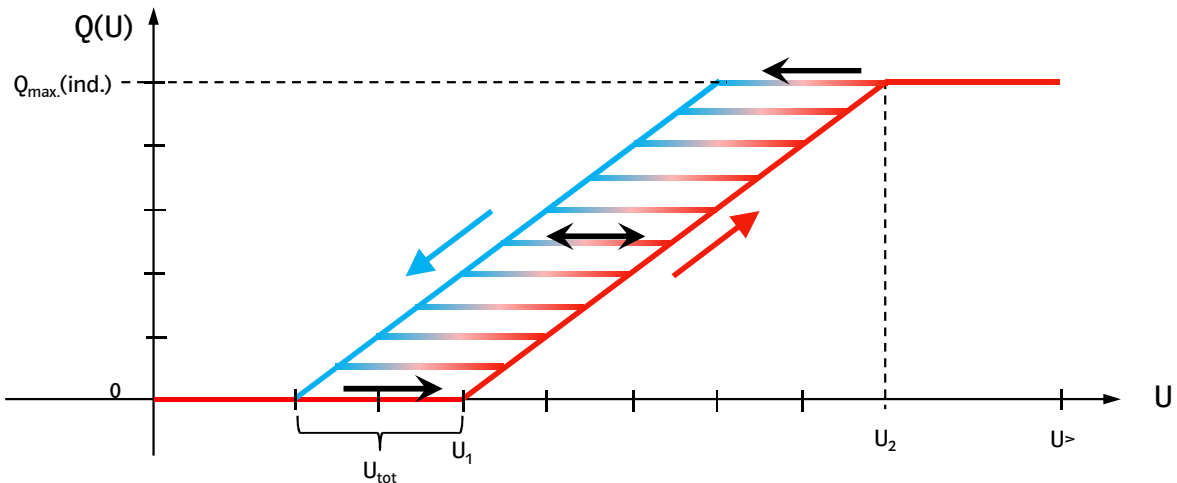


Bild 5: Qualitative Darstellung des spannungsabhängigen Blindleistungsverhaltens  $Q(U)$  von Erzeugungsanlagen mit variabel einstellbarer Blindleistung

Bei normaler Betriebsspannung speist die Erzeugungsanlage keine Blindleistung am Netzanschlusspunkt ein. Steigt die Spannung im Mittelspannungsnetz an, wird ab einer Spannung  $U_1$  (Messung am Netzanschlusspunkt) auf eine  $Q(U)$ -Regelung umgeschaltet. Die Erzeugungsanlage verhält sich untererregt (Arbeitspunkt im Quadranten 2 gemäß Verbraucherzählpfeilsystem). Ab einer Netzspannung von  $U_2$  wird am Netzanschlusspunkt eine maximale induktive Blindleistung von  $Q_{\max.}$  bezogen. Der Wert für  $Q_{\max.}$  ergibt sich aus der Anschlussscheinleistung bei einem Leistungsfaktor von  $\cos\varphi = 0,95$  induktiv. Ein Ansteigen der Netzspannung auf kritische Werte wird durch die Abschaltung der Erzeugungsanlage bei Erreichen des  $U>$  Werts aus Sicherheitsgründen verhindert.

Um Beeinflussungen von verschiedenen Erzeugungsanlagen im Netz untereinander zu vermeiden ist die Regelung in Form einer Hysterese erforderlich. Bei Rückgang der Spannung muss die aktuell erzeugte Blindleistung innerhalb des Spannungsbereichs  $U_{\text{tot}}$  konstant gehalten werden. Erst bei Erreichen der unteren Todbandgrenze (blaue Linie in Bild 5) ist eine Reduzierung der Blindleistung durchzuführen.

Für Erzeugungsanlagen mit variabel einstellbarem Leistungsfaktor  $\cos\varphi$ , deren maximale Blindleistungsabgabe abhängig vom jeweiligen Arbeitspunkt des Generators ist (z. B. Synchronmaschinen), gilt statt einer  $Q(U)$ -Regelung eine  $\cos\varphi(U)$ -Regelung<sup>1</sup>.

Der Bezug induktiver Blindleistung durch die Erzeugungsanlagen hat allerdings den Nachteil, dass die elektrischen Betriebsmittel zusätzlich mit Blindleistung belastet werden, wodurch weniger Kapazitäten für den Wirkleistungstransport zur Verfügung stehen. Darüber hinaus erhöhen sich die Netzverluste. Aus diesen Gründen ist bei normalen Betriebsspannungen ein Leistungsfaktor von  $\cos\varphi = 1$  am Netzanschlusspunkt einzuhalten.

Das hier vorgestellte Konzept stellt somit eine Schutzfunktion vor Überspannungen dar, die nicht nur im Normalschaltzustand sondern vor allem bei regelmäßig vorkommenden Schalthandlungen im Netz sinnvoll und notwendig ist. Würden Erzeugungsanlagen bereits im Normalbetrieb mit einer maximal möglichen induktiven Blindleistung bzw. mit  $\cos\varphi = 0,95$

induktiv betrieben, so stünde diese Schutzfunktion nicht mehr bei Überspannungen zur Verfügung.

Da bei der Eon Bayern ein Großteil der (PV-)Erzeugungsanlagen in der Niederspannung angeschlossen ist, wird auch eine Beteiligung dieser Anlagen an der Q(U)-Regelung gefordert. In der aktuellen Norm VDE-AR-N 4105 ist zurzeit noch die  $\cos\phi(P)$ -Regelung zur statischen Spannungsstützung vorgesehen. Jedoch wird auch von Seiten mehrerer Wechselrichterhersteller die Q(U)-Regelung favorisiert. Da das Konzept der spannungsabhängigen Blindleistungsregelung für alle Beteiligten - Lastkunden und Einspeiser - sinnvoll ist, plädiert die Eon Bayern deshalb für eine entsprechende Ergänzung der Niederspannungsrichtlinie.

#### Zusammenfassung:

Die gesamtheitliche Betrachtung aller Erzeugungsanlagen in der Mittel- und Niederspannung für eine integrierte Netzplanung ist derzeit noch in keiner gültigen Richtlinie beschrieben. Einziges Kriterium ist die DIN EN 50160, in der die maximal zulässigen Abweichungen für eine langsame Spannungsänderung aufgeführt sind. Da der massive Zubau von Erzeugungsanlagen vor allem in der Niederspannung, z. B. aus Photovoltaik, lokal z. T. sehr hohe Netzspannungen zur Folge hat, sind Maßnahmen zur Gewährleistung der Spannungsgrenzwerte erforderlich. Neben dem klassischen Netzausbau, z. B. durch Verlegung neuer Mittel- und Niederspannungsleitungen, verfolgt die Eon Bayern zusätzlich zwei weitere Konzepte: die lastflussabhängige Regelung der Spannung im Umspannwerk sowie die spannungsabhängige Bereitstellung von Blindleistung durch die Erzeugungsanlagen selbst. Erstere ist aktuell in rd. siebzehn 110/20-kV-Umspannwerken (Stand Ende 2011) erfolgreich im Einsatz. Beide Maßnahmen reduzieren i. d. R. kaum den notwendigen Netzausbau sondern dienen vor allem der Einhaltung der zulässigen Spannungsbänder vor dem Hintergrund der stark veränderlichen Einspeisung aus regenerativen Energien. Aufgrund der massiven Zunahme von Erzeugungsanlagen in der Niederspannung sollten künftig auch die Anlagen im Niederspannungsnetz stärker an der Stabilisierung der Netzspannung beteiligt werden.

- 1) Weitere Informationen zur dem Regelungskonzept finden sich im Internet unter [http://www.eon-bayern.com/pages/eby\\_de/Netz/Stromnetz/Netzanschluss/Technische\\_Mindestanforderungen/TAB\\_MSP/index.htm](http://www.eon-bayern.com/pages/eby_de/Netz/Stromnetz/Netzanschluss/Technische_Mindestanforderungen/TAB_MSP/index.htm).



Dipl.-Ing. Carsten Bock,  
Assetmanagement,  
Netzplanung,  
Eon Bayern AG,  
Regensburg