

# **SNOOPI – Intelligente Netzregelung durch koordinierte PV-Batterie-Einspeisung**

**Eckehard Tröster, Sabrina Hempel, Jan-David Schmidt**

Energyonautics GmbH

Robert-Bosch-Straße 7, 64293 Darmstadt

Tel.: +49 (0) 6151 - 785 81 03, Fax: +49 (0) 6151 - 785 81 13

E-Mail: e.troester@energyonautics.com

Internet: www.energyonautics.com

## **Kurzfassung**

Die zunehmende Menge an Photovoltaikanlagen in Privathaushalten führt zu einem Spannungsanstieg im Verteilnetz. Durch die Bereitstellung von Blindleistung können PV- und Batteriewechselrichter die Spannung reduzieren. Dafür haben die meisten Wechselrichter eine spannungsabhängige Blindleistungskurve implementiert. Oft wird diese einmal bei der Inbetriebnahme des Systems parametrisiert und berücksichtigt nicht den Standort des Systems im Verteilnetz. Dies führt dazu, dass Wechselrichter, die sich näher zum Verteilnetztransformator befinden, weniger oder sogar gar keine Blindleistung bereitstellen, da die Spannung am Beginn des Strangs niedriger ist. Im Rahmen des Projektes SNOOPI wurde ein Spannungsregler entwickelt, welcher die Blindleistungskennlinie in Abhängigkeit des Systemstandorts bestimmt. Dies führt zu einem koordinierten Verhalten aller Wechselrichter in einem Strang und gewährleistet, dass alle Wechselrichter eine ähnliche Menge an Blindleistung bereitstellen. Außerdem bemerkt der Regler, ob sich die Netztopologie verändert hat und passt die Blindleistungssteuerung dementsprechend an.

## **Einleitung**

Im Jahr 2017 wurden in Deutschland 1,75 GW neue PV-Anlagen installiert. Obwohl dies fast 2 % des weltweiten Zuwachses entspricht, wurde das Ziel der deutschen Regierung nicht erreicht. Im Erneuerbaren Energien Gesetz ist ein jährlicher Zuwachs von 2,5 GW installierter Leistung vorgeschrieben [1]. Es ist also mit einem weiteren Anstieg zu rechnen.

98 % aller PV-Anlagen sind in Deutschland an das Verteilnetz angeschlossen [1]. Schon heute führt die Leistungseinspeisung von PV-Anlagen zu einem deutlichen Spannungsanstieg. Gemäß der Norm „DIN EN 50160“, muss sich die Spannung im Niederspannungsnetz innerhalb von  $\pm 10\%$  der Nennspannung befinden [2]. Um weitere PV-Anlagen ins Verteilnetz integrieren zu können, ist es demnach notwendig, die Spannung zu reduzieren.

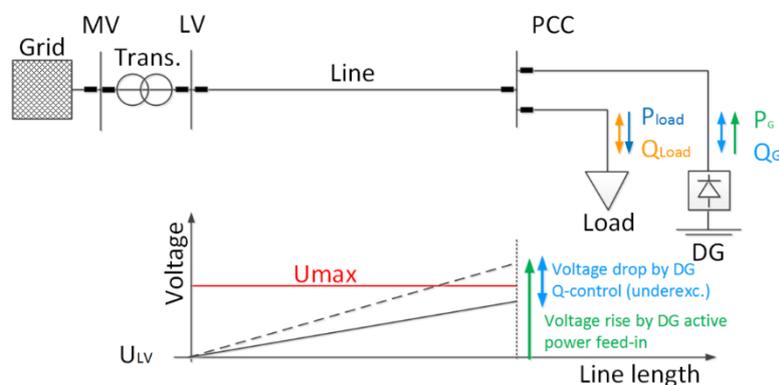
Im Rahmen des Projektes SNOOPI (Smart Network Control with Coordinated PV Infeed) werden neue Regelungsalgorithmen entwickelt, um vorgegebene Spannungsgrenzen einzuhalten. Der Spannungsregler ist so konzipiert, dass er skalierbar, übertragbar und bei allen Verteilnetzen mit hoher PV-Einspeisung anwendbar ist, um eine noch höhere Aufnahmefähigkeit für PV-Anlagen zu ermöglichen. Das Projekt wird von einem Konsortium bestehend aus dem Ingenieurbüro Energyonautics, dem Verteilnetzbetreiber EWR und der schwedischen KTH Universität durchgeführt.

Der vorliegende Beitrag ist wie folgt strukturiert: Im folgenden Abschnitt werden der Hintergrund und das Hauptziel des Projektes beschrieben und es wird ein Überblick über den Ablauf des Projektes gegeben. Anschließend wird der Spannungsregler

beschrieben. Der Algorithmus basiert auf standortabhängigen Parametern. Im fünften Abschnitt wird erklärt, wie der Regler diese Parameter autonom erlernt. Ergebnisse werden im sechsten Abschnitt präsentiert. Abgeschlossen wird der Beitrag mit einem Fazit und einem Ausblick.

## Projekthintergrund

Durch den ansteigenden Anteil an PV-Anlagen im Verteilnetz kommt es zu einem umgekehrten Lastfluss und einem Spannungsanstieg entlang des Strangs zu Zeiten großer PV-Einspeisung. Diese Situation ist in Abbildung 1 dargestellt, wobei  $P_G$  die Wirkleistungseinspeisung der dezentralen Erzeugung (Distributed Generation – DG) ist. Durch die Bereitstellung von Blindleistung  $Q_G$  können PV- und Batteriewechselrichter die Spannung reduzieren und dadurch zu einem erhöhten Anteil an PV-Anlagen beitragen, ohne das Netz ausbauen zu müssen.



**Abbildung 1:** Einfluss von Wirk- und Blindleistung auf die Spannung. [3]

Das Hauptziel des Projekts ist die Entwicklung einer autonomen und übertragbaren SNOOPI-Box zur Steuerung von PV- und Batteriewechselrichtern. Autonom, weil die Box unabhängig, ohne Kommunikation mit anderen Boxen oder Geräte, arbeitet. Nur Verletzungen von Spannungsgrenzen werden dem Verteilnetzbetreiber gemeldet. Ohne jegliche Kommunikation oder Konfiguration erlernt die SNOOPI-Box ihren Standort im Netz und passt die Blindleistungssteuerung dementsprechend an. Dadurch tragen Wechselrichter am Anfang des Strangs genauso zur Spannungsreduktion bei, wie Wechselrichter am Ende des Strangs, obwohl sie niedrigere Spannungen messen. Selbst wenn die Netztopologie verändert wird, passt sich der Algorithmus autonom an diese Änderung an.

Die SNOOPI-Box ist übertragbar, weil sie bei fast jedem beliebigen PV- oder Batteriewechselrichter angewendet werden kann. Dies wird durch die Verwendung des SunSpec-Protokolls erreicht, welches eine Interaktion mit allen kompatiblen Geräten von Mitgliedern und Partnern der SunSpec Alliance ermöglicht. Darunter sind führende Wechselrichterhersteller, wie z.B. SMA, Huawei, SolarEdge, Sungrow, ABB, Fronius und viele andere.

Um die SNOOPI-Box in einem echten Verteilnetz testen zu können, wurde ein Feldtestgebiet im Netzgebiet von EWR ausgewählt. Das Feldtestgebiet ist ein ländliches Gebiet mit hoher PV-Durchdringung. Im überlagerten Mittelspannungsnetz ist eine große Windkraftanlage angeschlossen, die zu potentiell hohen Spannungen am Verteilnetztransformator führt. Dadurch wird der verbleibende zulässige Spannungsanstieg im Niederspannungsnetz zu Zeiten großer Winderzeugung

signifikant kleiner. Sieben Batteriesysteme sind mit einer SNOOPI-Box ausgestattet im Verteilnetz des Testgebietes installiert worden. Obwohl der Algorithmus auch bei PV-Wechselrichtern anwendbar ist, wird der Fokus vorerst auf Batteriewechselrichter gesetzt. Das Batteriesystem besteht aus einer Lithium-Ion Batterie, einem Batteriewechselrichter und einem Smart Meter von Fronius.

In der ersten Phase des Projektes wurde ein Simulationsmodell des Netzes im Feldtestgebiet in DigSILENT PowerFactory aufgebaut. Dieses Modell enthält realistische Lasten, Batteriesysteme, PV-Einspeisungen und Spannungsdaten der Mittelspannungsebene, und wurde mit PMU-Messdaten (Phasor Measurement Unit) verifiziert. Neben den Tests des Steuerungsalgorithmus wurden verschiedene Schaltzustände und Standorte der Batteriesysteme in Simulationen untersucht.

Nach den erfolgreichen Tests des Steuerungsalgorithmus im Simulationsmodell, wurde der Regler in einem Laboraufbau bestehend aus einer Batterie und einem Wechselrichter getestet. Dabei wurden die Blindleistungssteuerung und die Kommunikation zwischen der SNOOPI-Box und dem Wechselrichter intensiv erprobt. Außerdem wurde eine Benutzerschnittstelle basierend auf einer Web-Browser Anwendung entwickelt, die die Veränderung von Variablen und die Visualisierung von Messdaten ermöglicht.

In der finalen Phase des Projektes wird der Feldtest durchgeführt. Um den Einfluss der SNOOPI-Box in einem Verteilnetz mit hohen Spannungen analysieren zu können, wurde der Schaltzustand so gewählt, dass die meisten Batteriesysteme an einen langen Strang mit Spannungen von bis zu 1.06 p.u. angeschlossen werden konnten. Dadurch kann auch das koordinierte Verhalten der SNOOPI-Boxen an verschiedenen Standorten untersucht werden.

## Der Regelungsalgorithmus

Der in der SNOOPI-Box implementierte Regelalgorithmus basiert auf einer spannungsabhängigen Blindleistungsregelung: Die Blindleistungswerte werden über eine autonom parametrisierte  $Q(U)$ -Kennlinie ermittelt. Die Parametrierung sorgt für ein koordiniertes Verhalten von allen Wechselrichtern im selben Strang.

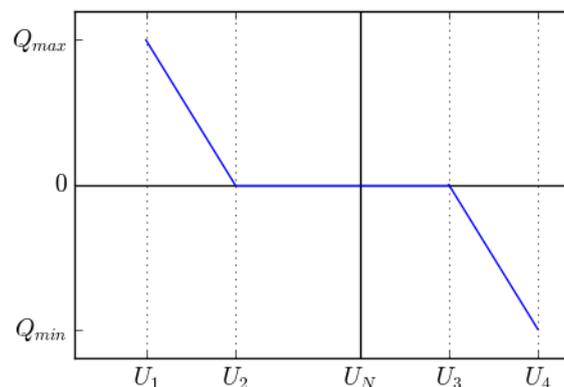
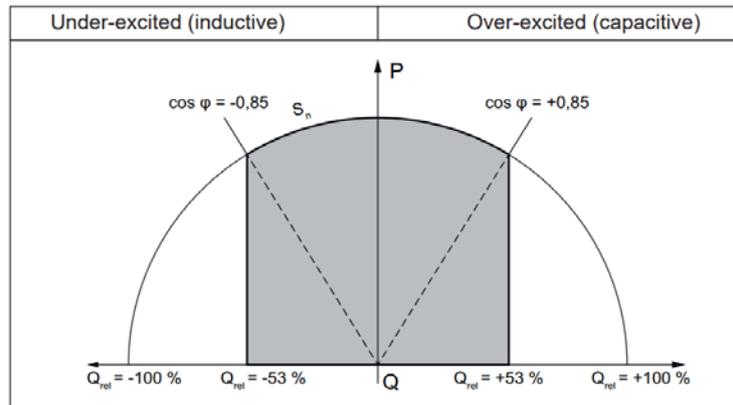


Abbildung 2: Parametrierung der  $Q(U)$ -Kennlinie.

In Abbildung 2 ist die Kennlinie abgebildet.  $Q_{min}$  und  $Q_{max}$  sind die minimale und die maximale Blindleistung, die vom Wechselrichter bereitgestellt werden kann. Diese Grenzen sind durch die Leistungskennlinie des Wechselrichters oder den Grenzwerten des Herstellers vorgegeben. Der Fronius-Wechselrichter, der im Feldtest dieses Projekts verwendet wird, kann bis zu  $\pm 53\%$  der Nennleistung des Wechselrichters als

Blindleistung bereitstellen. Der graue Bereich in Abbildung 3 definiert den Arbeitsbereich des Wechselrichters.



**Abbildung 3:** Arbeitsbereich des Fronius Wechselrichters. Alle gültigen Betriebspunkte der Wirkleistung  $P$  und Blindleistung  $Q$  befinden sich im grauen Bereich. [4]

Die Parameter  $U_3$  und  $U_4$  der  $Q(U)$ -Kennlinie hängen von der maximalen Spannung  $U_{max}$  ab, die am Anschlusspunkt gemessen wird:

$$U_3 = U_N + 0.5 \cdot (U_{max} - U_N), \quad (1)$$

$$U_4 = U_{max},$$

wobei  $U_N$  die Nennspannung ist. Wenn die Spannung 50 % der maximalen Spannung erreicht, fängt der Wechselrichter an, Blindleistung bereitzustellen. Bei einer Spannung gleich der maximalen Spannung  $U_{max}$  ist die Blindleistung maximal. Der Wert  $U_1$  ist durch die minimale Spannung, die gemessen wurde, gegeben. Um eine symmetrische Kennlinie zu erhalten, wird  $U_2$  mit der Steigung zwischen  $U_3$  und  $U_4$  bestimmt:

$$U_1 = U_{min}, \quad (2)$$

$$U_2 = U_{min} + 0.5 \cdot (U_{max} - U_N).$$

Durch den Spannungsanstieg entlang des Strangs ist die maximale Spannung an einem Wechselrichter am Anfang des Strangs kleiner. Die Abhängigkeit des Startwertes  $U_3$  von  $U_{max}$  gewährleistet, dass alle Wechselrichter in einem Strang zur gleichen Zeit anfangen, Blindleistung bereitzustellen.

Die Spannungsänderung durch die Blindleistung hängt von der Reaktanz der Leitung ab. Vereinfacht kann das wie folgt ausgedrückt werden [5]:

$$dU \approx \frac{RP + XQ}{U_N^2}. \quad (3)$$

Dabei ist  $dU$  die Spannungsänderung,  $R$  der Widerstand,  $X$  die Reaktanz,  $P$  und  $Q$  die Wirk- und Blindleistung und  $U_N$  die Nennspannung. Im Allgemeinen ist das Verhältnis  $R/X$  in einem Niederspannungsnetz größer als 1. Daraus folgt, dass die Wirkleistung einen größeren Einfluss auf die Spannung hat als die Blindleistung. Sowohl der Widerstand als auch die Reaktanz steigen proportional mit der Länge der Leitung. Dadurch haben Wechselrichter am Anfang des Strangs einen kleineren Einfluss auf die Spannung als Wechselrichter am Ende des Strangs.

Bei der gewählten Parametrierung ist auch die Steigung der Kennlinie vom Standort im Netz abhängig: Je kleiner die Spannung, desto kleiner ist der Einfluss des Wechselrichters und desto steiler ist die Steigung. Die maximal erlaubte Steigung in Bezug auf die Stabilität der  $Q(U)$ -Steuerung wurde unter anderem in [6] und [7] untersucht.

In [6] wird eine Steigung von  $11 \%Q_{max}/V$  empfohlen, was einem Blindleistungsanstieg von 0 bis  $Q_{max}$  innerhalb von 2,3 % der Nennspannung entspricht. Dieser Wert wurde für Wechselrichter in einem Niederspannungsnetz unter extremen Bedingungen erhalten. Durch einen Blindleistungsanstieg innerhalb von 1 % der Nennspannung ( $25 \%Q_{max}/V$ ) wurde in den meisten Fällen lediglich eines der untersuchten Stabilitätskriterien verletzt. In [7] haben sogar alle getesteten Parametrierungen ein stabiles Verhalten der Wechselrichter ergeben. Die steilste Parametrierung, die dort untersucht wurde, entspricht einem Blindleistungsanstieg von 0 bis  $Q_{max}$  innerhalb von 1 % der Nennspannung. Daher wurde die Parametrierung in (1) und (2) so gewählt, dass diese Grenze von  $25 \%Q_{max}/V$  nicht überschritten wird. Sollte die Steigung der Kennlinie aufgrund des Algorithmus eigentlich steiler ausfallen, werden  $U_1$  und  $U_4$  soweit erhöht, dass dieser Grenzwert der Steigung dennoch eingehalten wird.

## Der Lernmechanismus

Die SNOOPI-Box passt die Blindleistungssteuerung autonom an den Standort an. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird dies durch die Abhängigkeit der  $Q(U)$ -Kennlinie von  $U_{max}$  erreicht. Die maximale Spannung wird einfach durch die Messung der Spannung bestimmt. Abhängig vom Wetter und der Jahreszeit, wann die SNOOPI-Box installiert wurde, kann es mehrere Monate dauern bis die maximale Spannung ihren höchsten Wert erreicht.

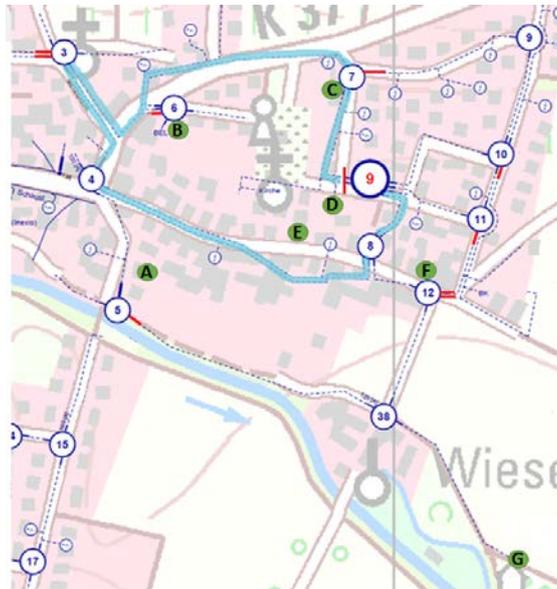
Eine Herausforderung ist es, eine Topologieänderung im Netz zu bemerken. Wenn sich der Standort der SNOOPI-Box durch eine Umschaltung im Verteilnetz vom Anfang des Strangs zum Ende des Strangs ändert, wird die Spannung am Wechselrichter größer. In diesem Fall wird die SNOOPI-Box die maximale Spannung anpassen, ohne die Notwendigkeit von weiteren Funktionen. Im umgekehrten Fall hingegen, wird die maximale Spannung auf ihrem hohen Level bleiben. Dieses Problem wird durch die Bestimmung des Blindleistungseinflusses auf die Spannung gelöst.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, steigt die Reaktanz  $X$  proportional mit der Leitungslänge. Daher hat die Blindleistung, die am Anfang des Strangs bereitgestellt wird, einen kleineren Einfluss auf die Spannung als Blindleistung, die am Ende des Strangs bereitgestellt wird. Die SNOOPI-Box nutzt diesen Effekt, um eine Änderung der Netztopologie zu erkennen.

Um den Einfluss der Blindleistung auf die Spannung zu bestimmen, führt die SNOOPI-Box regelmäßig eine Kalibrierung durch: Verschiedene Blindleistungswerte werden dem Wechselrichter übergeben und die Änderung der Spannung wird gemessen. Der Einfluss der Blindleistung auf die Spannung wird bestimmt, indem die Spannungsänderung  $dU$  durch die Blindleistungsänderung  $dQ$  geteilt wird. Um andere Einflüsse aus diesem Wert heraus zu filtern, wird der Blindleistungseinfluss mehrere Male bestimmt und die Ergebnisse werden statistisch ausgewertet.

## Simulationsergebnisse

Das Simulationsmodell in DlgSILENT PowerFactory basiert auf echten PV-Daten und Lastprofilen. Abbildung 4 zeigt eine Karte des Feldtestgebietes. Die grünen Buchstaben zeigen die Standorte der Batteriesysteme im Verteilnetz und im Simulationsmodell an. Die meisten Batteriesysteme befinden sich entlang eines langen Strangs (dargestellt in hellblau) mit Spannungen zwischen 0,93 p.u. und 1,06 p.u.



**Abbildung 4:** Karte des Feldtestgebietes. Die grünen Kreise geben die Standorte der Batteriesysteme an.

Alle Simulationsergebnisse, die in diesem Bericht präsentiert werden, basieren auf einer Schrittweite von einer Minute. Das heißt, dass der Wechselrichter jede Minute die Spannung misst und den Wert der SNOOPI-Box übergibt. Die SNOOPI-Box übergibt den von der Spannung abhängigen Blindleistungswert dem Wechselrichter.

In den folgenden beiden Unterabschnitten wurde ein Jahr simuliert und die Koordinierung der Batteriesysteme untersucht. Im darauffolgenden Unterabschnitt wurde das Verhalten des Reglers im Falle einer Netzumschaltung analysiert. Da dafür nur die Zeit vor und nach der Umschaltung relevant sind, wurden hierbei nur zwei Monate simuliert.

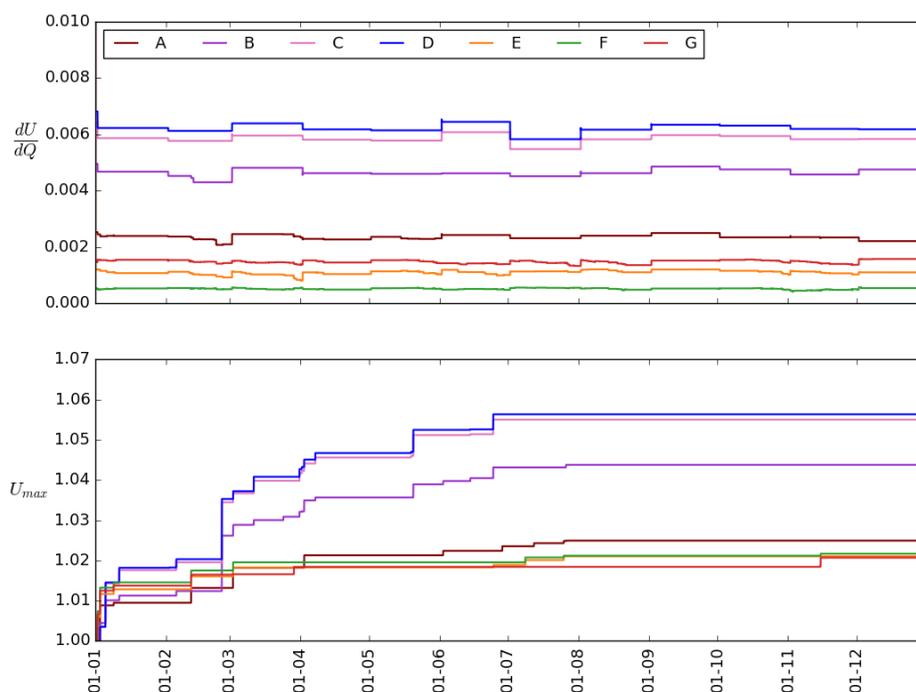
### Lernverhalten

In Abbildung 5 ist oben der Einfluss der Blindleistung auf die Spannung  $dU/dQ$  für alle sieben Batteriesysteme in verschiedenen Farben dargestellt. Unten ist die maximale Spannung  $U_{max}$  der Batteriesysteme abgebildet. In der ersten Nacht jeden Monats wird der Blindleistungseinfluss durch die Kalibrierung bestimmt. Durch andere Einflüsse, die nicht komplett herausgefiltert werden konnten, verändert sich  $dU/dQ$  nach jeder Kalibrierung leicht. Zwischen den Kalibrierungen kann sich der Blindleistungseinfluss ebenfalls durch die Bestimmung der Blindleistungs- und Spannungsänderungen während des normalen Blindleistungsbetriebs verändern. Im betrachteten Verteilnetz ist der Blindleistungseinfluss relativ gering. Wie erwartet, hat das Batteriesystem D, welches am Ende des Strangs positioniert ist, den größten

Einfluss. Stellt der Wechselrichter die minimale Blindleistung von -53 % bereit, reduziert sich die Spannung um 0,32 %-Punkten. Das System E befindet sich näher am Verteilnetztransformator und hat dadurch einen noch geringeren Einfluss.

Die Ergebnisse belegen den Vorteil einer Koordinierung der Batteriewechselrichter. Falls ein Wechselrichter nahe am Verteilnetztransformator nicht zur Spannungsreduzierung beitragen würde, wäre der Gesamteinfluss auf die Spannung insignifikant. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass der Wert  $dU/dQ$  ein guter Indikator für eine Umschaltung ist. Man kann klar zwischen den einzelnen Standorten unterscheiden.

Wie erwartet haben die maximalen Spannungen der Batteriesysteme die gleiche Reihenfolge wie die Blindleistungseinflüsse. Im Gegensatz zum Blindleistungseinfluss, der in der ersten Nacht kalibriert wird, erreicht die maximale Spannung ihren finalen Wert jedoch erst im Juni an einem sonnigen Tag mit hoher PV-Einspeisung. Bevor der maximale Wert erreicht wird, stellt der Wechselrichter mehr Blindleistung bereit als nötig. Aber sobald der finale Wert übernommen wurde, speist der Wechselrichter Blindleistung nur dann ein, falls nötig, also vor allem während der Sommermonate, wenn die PV-Einspeisung und daher die Spannungen größer sind.



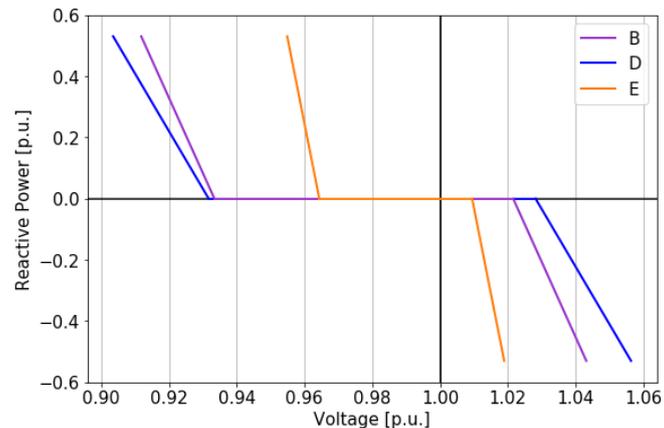
**Abbildung 5:** Lernverhalten der Batteriesysteme. Oben: Einfluss der Blindleistung auf die Spannung. Unten: Maximal gemessene Spannung.

### **$Q(U)$ -Steuerung**

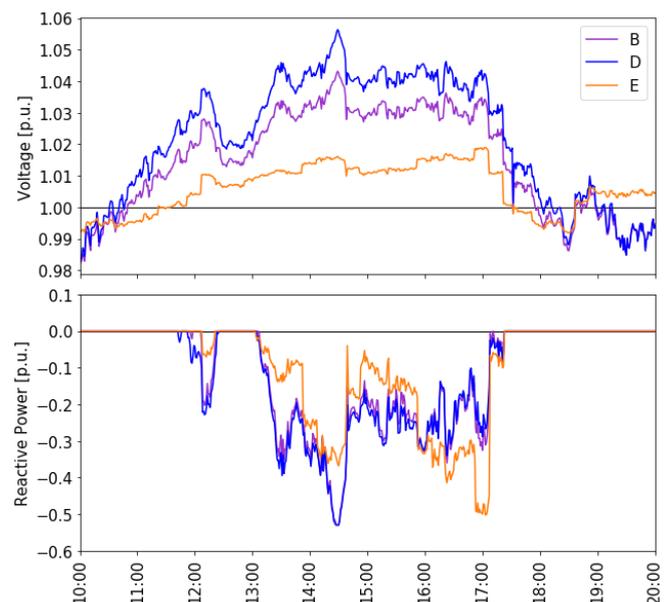
Die  $Q(U)$ -Kennlinie wird in Abhängigkeit der maximalen Spannung parametrisiert. In Abbildung 6 ist die parametrisierte  $Q(U)$ -Kennlinie von drei Wechselrichtern im selben Strang an unterschiedlichen Standorten dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, haben Wechselrichter, die sich näher am Verteilnetztransformator befinden, ein schmaleres Totband und eine steilere Steigung.

In Abbildung 7 ist ein Beispieltag der spannungsabhängigen Blindleistungsregelungen, welche auf den Kennlinien aus Abbildung 6 basieren, dargestellt. Der 24. Juni ist der Tag mit der größten Spannung, welche oben abgebildet ist. Das untere Diagramm zeigt die Blindleistungseinspeisung. Obwohl die Spannung am Wechselrichter B kleiner ist, speist der Wechselrichter fast genauso viel Blindleistung ein wie der

Wechselrichter D. Der Spannungsverlauf am System B weicht vom Spannungsverlauf der anderen beiden Systeme ab. So wird zum Beispiel die maximale Spannung nicht um 14:30 Uhr, sondern um 17:00 Uhr erreicht. Daher weicht auch die Blindleistungseinspeisung von den anderen Systemen ab. Jedoch ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund der gewählten Parametrierung alle drei Wechselrichter zur gleichen Zeit anfangen und aufhören Blindleistung einzuspeisen. Außerdem stellen sie ungefähr die gleiche Menge an Blindleistung bereit, obwohl die Spannungsniveaus unterschiedlich sind.



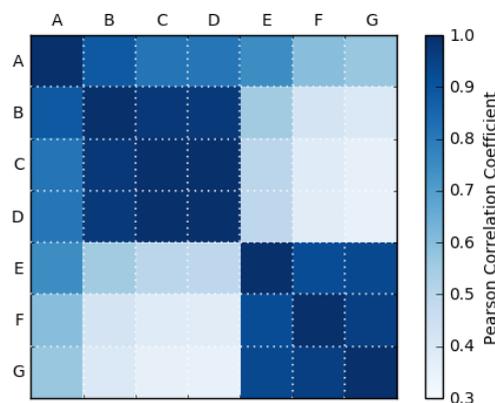
**Abbildung 6:** Parametrierte Q(U)-Kennlinie von drei Wechselrichtern im selben Strang an verschiedenen Standorten.



**Abbildung 7:** Blindleistungsregelung von drei Wechselrichtern an einem Beispieltag. Oben: Gemessene Spannung. Unten: Blindleistungseinspeisung.

Abbildung 8 zeigt den Pearson-Korrelationskoeffizienten der Blindleistungseinspeisung von allen sieben Batteriesystemen vom 01. August bis zum 31. Dezember (nachdem die maximale Spannung ihren höchsten Wert erreicht hat). Der Pearson-Korrelationskoeffizient ist ein Maß für die lineare Korrelation zweier Variablen. Ein Koeffizient zwischen 0,1 und 0,3 entspricht einer kleinen Korrelation, einer zwischen 0,3 und 0,5 einer moderaten Korrelation und ein Koeffizient größer als 0,5 entspricht einer starken Korrelation [8].

Die Blindleistungseinspeisung der Batteriesysteme A, B, C und D korrelieren stark. Die Korrelation zwischen B, C und D ist sogar sehr stark, da alle drei einen Korrelationskoeffizienten größer als 0,97 haben. Das konnte auch schon in Abbildung 7 beobachtet werden und liegt an der Position der Batteriesysteme am Ende desselben Strangs. Die Systeme F und G korrelieren nur wenig mit B, C und D, da sie nicht an dem gleichen Strang angeschlossen sind. Obwohl System E am gleichen Strang angeschlossen ist, korreliert es nur moderat mit den Systemen B, C und D. Dies liegt an Lasten zwischen den Punkten 8 und 4, welche die Spannung beeinflussen. Von morgens bis nachmittags haben diese Lasten oft große Spitzen, wohingegen die Lasten am Ende des Strangs zu diesen Zeiten deutlich kleiner sind. Das ist auch der Grund, warum die Spannungsspitze in Abbildung 7 um 14:30 beim System E nicht beobachtet werden kann. Zu dieser Zeit ist die Last an diesem Standort besonders hoch und senkt die Spannung.



**Abbildung 8:** Korrelation der Blindleistungseinspeisung der sieben Batteriesysteme vom 01. August bis zum 31. Dezember.

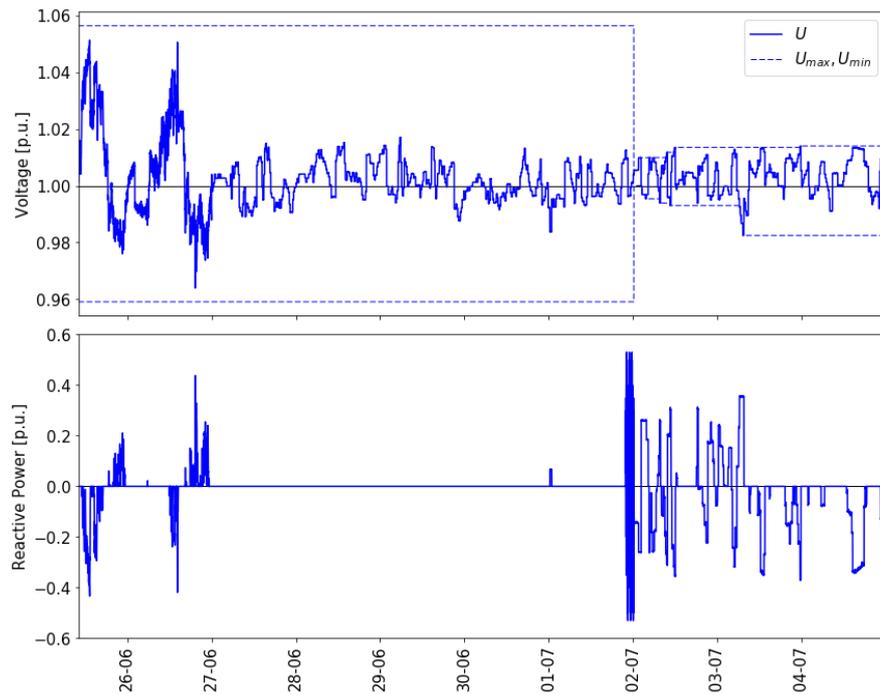
## Umschaltung

Der Einfluss  $dU/dQ$  wird bestimmt, um eine Topologieänderung des Netzes zu erkennen. In den folgenden Ergebnissen wurde das Netz während der Simulation umgeschaltet, so dass Stranganfang und Strangende getauscht sind. Es wurden die Monate Juni und Juli simuliert, wobei die Umschaltung am 27. Juni implementiert wurde. Nach der Umschaltung befindet sich das System D nicht mehr am Ende des Stranges sondern am Anfang.

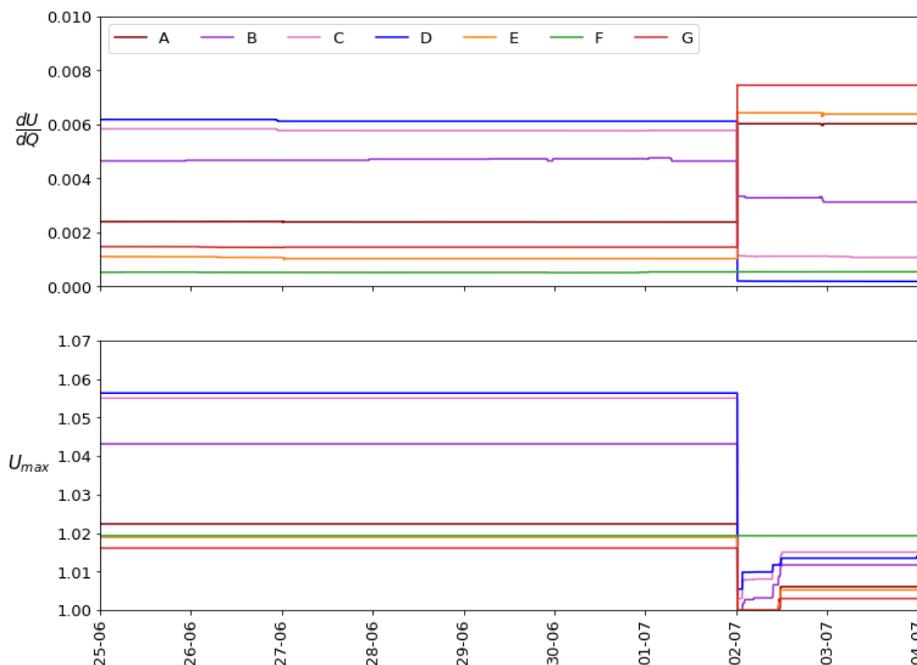
In Abbildung 9 ist oben der Spannungsverlauf und die maximale und minimale Spannung vom System D vom 25. Juni bis zum 5. Juli dargestellt. Unten ist die Blindleistungseinspeisung abgebildet. Ab dem 27. Juni ist die Spannung durch die Umschaltung deutlich kleiner. Da die maximalen und minimale Spannung für den Rest des Monats auf ihrem hohen Niveau bleiben, stellt der Wechselrichter fast keine Blindleistung bereit. In der ersten Nacht des neuen Monats (2. Juli) wird die Kalibrierung durchgeführt und der Einfluss auf die Spannung wird bestimmt. Wie in der oberen Abbildung zu sehen ist, sinkt der Einfluss  $dU/dQ$  vom System D deutlich. Aufgrund dessen wird die maximale und minimale Spannung zurückgesetzt und neu bestimmt. Die  $Q(U)$ -Steuerung wird an die neuen Werte angepasst.

Durch die Umschaltung haben die Batteriesysteme B, C und D einen geringeren Einfluss als vorher, während der Einfluss der Systeme A, E und G steigt. Abbildung 10 zeigt, dass die maximale Spannung dieser Systeme neu bestimmt wird, da sich der

Einfluss verändert hat. Der Standort des Systems F hat sich nicht verändert, da es nicht am selben Strang angeschlossen ist.



**Abbildung 9:** Oben: Gemessene Spannung (durchgezogene Linie) und maximale und minimale Spannung (gestrichelte Linie) des Systems D vom 25. Juni bis zum 5. Juli. Unten: Blindleistungseinspeisung des Batteriesystems. Am 27. Juni wurde das Netz umgeschaltet.



**Abbildung 10:** Lernverhalten aller Batteriesysteme vom 25. Juni bis zum 5. Juli. Am 27. Juni wurde das Netz umgeschaltet. Oben: Einfluss der Blindleistung auf die Spannung. Unten: Maximal gemessene Spannung.

## Fazit und Ausblick

Durch die Parametrierung der  $Q(U)$ -Kennlinie in Abhängigkeit der gemessenen Spannung speisen alle Wechselrichter in einem Strang koordiniert Blindleistung ein, ohne miteinander zu kommunizieren. Der Vorteil eines koordinierten Verhaltens ist, dass Wechselrichter am Anfang des Strangs auch helfen die Spannung zu reduzieren, obwohl sie keine hohen Spannungen messen. Das ist wichtig, da der Einfluss der Blindleistung auf die Spannung oft sehr gering ist.

In den folgenden Monaten wird der Feldtest durchgeführt und die Blindleistungssteuerung der SNOOPI-Box wird in einem realen System getestet. Zusätzlich zur Blindleistungssteuerung wird eine Wirkleistungssteuerung in der SNOOPI-Box implementiert. Das Hauptziel der Wirkleistungssteuerung ist es, die Mittagsspitze der PV-Erzeugung zu reduzieren, indem die Batterie geladen wird, ohne einen erheblichen Einfluss auf die Eigenverbrauchsoptimierung zu haben [9].

Das Endergebnis des Projekts wird ein Gerät sein, welches durch die intelligente Steuerung von Blind- und Wirkleistung die Spannung in einem Verteilnetz reduziert, ohne den Betreiber zu beeinflussen. Da die SNOOPI-Box bei fast jedem Wechselrichter angewendet werden kann und kaum Voreinstellungen nötig sind, ist es einfach, sie an vielen Wechselrichtern in einem Verteilnetz mit Spannungsproblemen zu installieren. Selbst wenn sich der Zustand des Netzes verändert, zum Beispiel durch das Hinzukommen von PV-Anlagen oder eine Umschaltung, ist es nicht nötig die SNOOPI-Box neu zu konfigurieren, da die Steuerung sich autonom anpasst. Damit hat die SNOOPI-Box die besten Voraussetzungen eine wichtige Rolle bei der Netzintegration von hoher PV-Durchdringung zu spielen.

## Quellen

- [1] H. Wirth, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland,“ 2018.
- [2] T. Aundrup, H.-P. Beck, A. Becker, A. Berthold und A. Conreder, „Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene - Anwendungen,“ 2015.
- [3] M. Kraiczy, L. A. Fakhri, T. Stetz und M. Braun, „Do It Locally: Local Voltage Support by Distributed Generation - A Management Summary,“ 2017.
- [4] Fronius International GmbH, „Fronius Datamanager Modbus TCP & RTU - User Information,“ 2017.
- [5] L. Fickert, M. Sakulin und W. Hipp, „Netzaspekte von dezentralen Erzeugungseinheiten - Studie im Auftrag der E-Control GmbH,“ 2004.
- [6] M. Lindner, R. Witzman, O. Marggraf, S. Laudahn, B. Engel, S. Patzack, H. Vennegeerts, A. Moser, M. Gödde, F. Potratz und A. Schnettler, „Ergebnisse der FNN-Studie zu neuen Verfahren der statischen Spannungshaltung,“ 2014.
- [7] C. Elbs, R. Nenning, R. Pardatscher und R. Witzma, „Einsatz der  $Q(U)$ -Regelung bei der Vorarlberger Energienetze GmbH,“ 2014.
- [8] J. D. Chee, „Pearson's Product-Moment Correlation: Sample Analysis,“ 2015.
- [9] C. Schweinsberg, J.-D. Schmidt, E. Tröster und D. Mai, „Development of a Grid-Friendly Active Power Control of PV-Batteries using Rolling Forecast,“ 2017.