

Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen der lokalen Spannungsregelung des Umspannwerks-Transformators und der lokalen Blindleistungsregelung dezentraler Erzeugungsanlagen im Verteilungsnetz

Markus Kraiczy^{a,*}, Martin Braun^{a,c}, Thomas Stetz^a, Johannes Brantl^b, Sebastian Schmidt^b

- a) Fraunhofer IWES, Kassel
- b) E.ON Bayern AG, Regensburg
- c) Universität Kassel, Kassel

*) Königstor 59, 34119 Kassel, Deutschland
Tel./Fax: +49-561-7294-268 / -200
E-Mail: markus.kraiczy@iwes.fraunhofer.de
Internet: www.iwes.fraunhofer.de

Abstract

In diesem Beitrag wird untersucht, wie sich die lokale Spannungsregelung des Umspannwerks-Transformators und die Blindleistungsregelung der Photovoltaikanlagen gegenseitig beeinflussen können. Es werden mögliche ungewollte Wechselwirkungen für den Netzbetrieb dargestellt. Für die Untersuchung wird ein spannungsebenen-übergreifendes Simulationsmodell erstellt und der Einfluss der Blindleistungsregelung im Mittel- und Niederspannungsnetz auf die Regelgröße des Umspannwerks-Transformators analysiert. Für verschiedene Blindleistungsregelungsverfahren werden der Nutzen bei der Spannungshaltung und das Risiko, eine ungewollte Wechselwirkung mit der Spannungsregelung des Umspannwerks-Transformators auszulösen, bewertet.

Einleitung

Mit einer aktuell installierten Erzeugungsleistung in Deutschland von über 30 GW [1] hat die Photovoltaik (PV) eine systemrelevante Größenordnung für die Energieversorgung in Deutschland erreicht. Die Aufgabenstellung der PV-Anlagen wird zunehmend auch darin bestehen, Systemdienstleistungen für einen sicheren und stabilen Netzbetrieb bereitzustellen. Vor allem in ländlich geprägten PV-Ballungsgebieten stellt die Spannungshaltung nach DIN EN 50160 für den verantwortlichen Verteilnetzbetreiber eine große technische Herausforderung dar. Nach der technischen Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz [2] und der Anwendungsregel VDE-AR-N 4105 [3] können die verantwortlichen Netzbetreiber die PV-Anlagen in der Mittelspannung (MS) und der Niederspannung (NS) zur aktiven Spannungshaltung (z. B. durch Blindleistungsregelung) auffordern. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit bei einer lokalen Spannungsregelung des Transformators im Umspannwerk (UW-Transformator) und bei einer gleichzeitigen lokalen Blindleistungsregelung

der PV-Anlagen ungewollte Wechselwirkungen im Netzbetrieb auftreten können. Die Untersuchung wird im Rahmen des Projektes „PV-Integrated“ am Beispiel des Verteilungsnetzes im Projektgebiet „Netz der Zukunft“ [4] der E.ON Bayern AG durchgeführt.

Spannungshaltung im Verteilungsnetz

Als gängige Praxis wird bei der Spannungshaltung im Verteilungsnetz der UW-Transformator durch Umschaltung des Übersetzungsverhältnisses (dTap) auf eine nahezu konstante Spannung an der MS-Sammelschiene geregelt (Abbildung 1, oben). Weitere Betriebsmittel zur Spannungshaltung werden i.d.R. nicht eingesetzt. In Netzen mit hoher dezentraler Einspeisung reicht diese Methode meist nicht mehr aus, um die Spannungshaltung gemäß DIN EN 50160 zu gewährleisten. Als zusätzliche Maßnahme können PV-Anlagen durch Blindleistungsregelung aktiv an der Spannungshaltung beteiligt werden. Die möglichen Wechselwirkungen, die im Rahmen des Beitrags beschrieben und untersucht werden, sind in Abbildung 1 (unten) dargestellt. Das Hauptaugenmerk der Untersuchung liegt in der Auswirkung der Blindleistungsregelung (Q-Regelung) der PV-Anlagen auf die Spannungsregelung des UW-Transformators. Die Blindleistungsregelung kann den Blindleistungsfluss über den Transformator im Umspannwerk und folglich auch die Spannung an der MS-Sammelschiene (i.d.R. die Regelgröße des Transformators) beeinflussen (siehe auch Abbildung 2). Die UW-Transformatorregelung wiederum kann sich durch Auslösen einer Stufenschaltung auf eine spannungsabhängige Blindleistungsregelung der PV-Anlagen auswirken. Des Weiteren können sich bei spannungsabhängigen Blindleistungsregelungsverfahren die PV-Anlagen am MS- und NS-Netz wechselseitig beeinflussen.

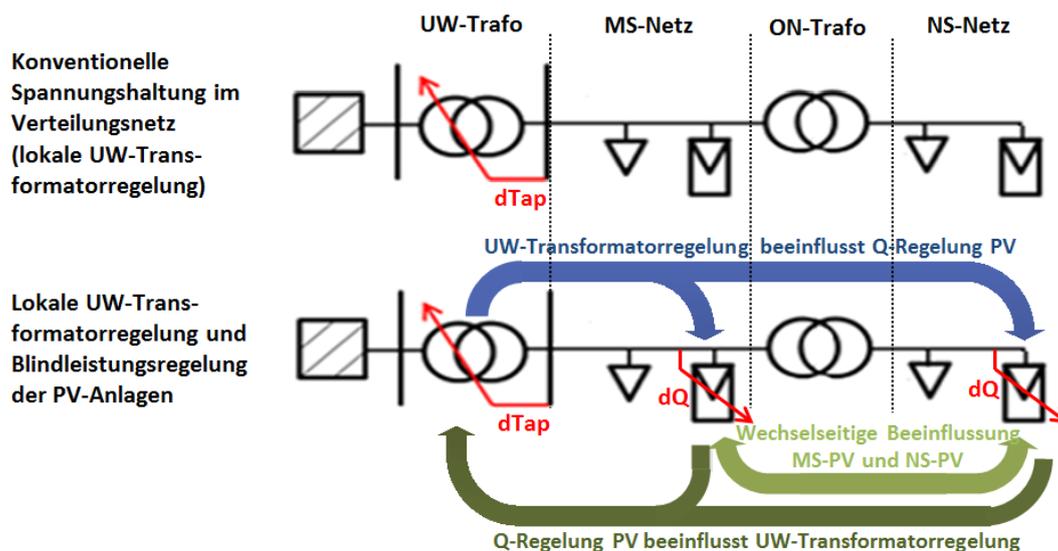


Abbildung 1: Konventionelle Spannungshaltung im Verteilungsnetz (oben) und mögliche Wechselwirkungen bei lokaler Spannungshaltung des UW-Transformators und lokaler Blindleistungsregelung (spannungsabhängige Regelung) der PV-Anlagen (unten)

Welchen Einfluss der Blindleistungsfluss auf den Spannungsabfall über dem UW-Transformator im Untersuchungsgebiet (3-Wicklungsstransformator, $S_N=40$ MVA) aufweist, zeigt Abbildung 2. Bei der Untersuchung wurde die Spannung der MS-Sammelschiene in Abhängigkeit des Wirk- und Blindleistungsflusses über dem UW-Transformator ermittelt, dabei wurde eine konstante Spannung am HS-Verknüpfungspunkt von 1,0 pu (110 kV) angenommen und die Transformatorregelung deaktiviert. Es ist ersichtlich, dass der Wirkleistungsfluss (im Bereich von +/-20 MW) nur einen sehr geringen Einfluss auf den Spannungsabfall am UW-Transformator aufweist, wogegen der Blindleistungsfluss (im Bereich von +/-3 Mvar), aufgrund der großen Längsinduktivität des Transformators, einen deutlichen Einfluss auf die Spannung der MS-Sammelschiene besitzt. Ein zusätzlicher induktiver Blindleistungsbezug des Verteilungsnetzes führt zu einer Spannungsabsenkung der MS-Sammelschiene. Bei einer Änderung des Blindleistungsflusses von etwa 2,7 Mvar wird eine Spannungsänderung an der MS-Sammelschiene von 1% der Nennspannung hervorgerufen.

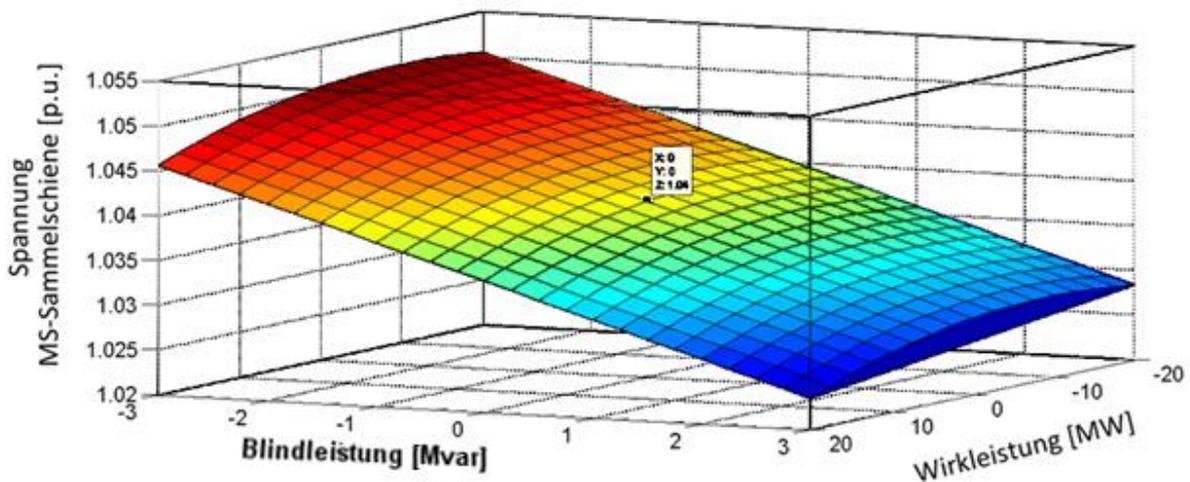


Abbildung 2: Spannung an der MS-Sammelschiene in Abhängigkeit des Leistungsflusses über den UW-Transformator (Verbraucherzählpeilsystem) [6]

Mögliche Wechselwirkung UW-Transformatorregelung und Blindleistungsregelung der PV-Anlagen

Der UW-Transformator regelt auf einen konstanten Spannungswert an der MS-Sammelschiene (z.B. 1,04 pu). Wird die zulässige Regelabweichung des Stufenstellers (z.B. +/- 1% des Sollwerts) überschritten, erfolgt eine Stufung des Transformators. Die Spannung an der MS-Sammelschiene kann folglich innerhalb eines definierten Totbandes schwanken ohne dass eine Transformatorstufung ausgelöst wird. Die Abbildung 3 zeigt mögliche ungewollte Wechselwirkung zwischen UW-Transformatorregelung und Blindleistungsregelung der PV-Anlagen.

Auslösung einer kontraproduktiven Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung (Abbildung 3a)

Die Blindleistungsregelung (induktiver Bezug der PV-Anlagen) wird zur Spannungsabsenkung am Verknüpfungspunkt der Anlage eingesetzt, durch die zusätzliche Spannungsabsenkung an der MS-Sammelschiene wird jedoch eine Stufenschaltung des UW-Transformators ausgelöst (Abbildung 3a, rote Kennlinie). In der Folge der Stufenschaltung tritt eine Erhöhung der Spannung der MS-Sammelschiene auf und es können folglich höhere Netzspannungen im Vergleich zu dem Szenario ohne Blindleistungsregelung auftreten. Die Blindleistungsregelung ist in dem Fall kontraproduktiv.

Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung (Abbildung 3b)

In der Abbildung 2 ist ersichtlich, dass Wirkleistungsschwankungen (z.B. durch PV-Anlagen) nur einen geringen Einfluss auf den Spannungsabfall über dem UW-Transformator aufweisen. Bei zusätzlicher Blindleistungsregelung der PV-Anlagen sind jedoch zunehmend auch deutliche Blindleistungsschwankungen über dem UW-Transformator zu erwarten, welche wiederum zusätzliche Spannungsschwankungen an der MS-Sammelschiene hervorrufen können. In der Folge kann eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltung des UW-Transformators auftreten (siehe Abbildung 3b).

Dämpfung der Wirksamkeit einer UW-Transformatorstufung durch Blindleistungsregelung (Abbildung 3c)

Diese Wechselwirkung kann bei spannungsabhängigen Blindleistungsregelungsverfahren auftreten (z.B. Q(U)-Kennlinie). Die Spannung ist im Netzgebiet in einem unkritischen Bereich und es erfolgt keine Blindleistungsregelung der PV-Anlagen. Durch Auslösen einer Stufenschaltung wird jedoch die Spannung im Netzgebiet erhöht und die spannungsabhängige Blindleistungsregelung wird aktiv. In Folge des zusätzlichen induktiven Blindleistungsbezugs der PV-Anlagen wird die MS-Sammelschienenspannung unmittelbar nach Stufung des Transformators wieder ab-

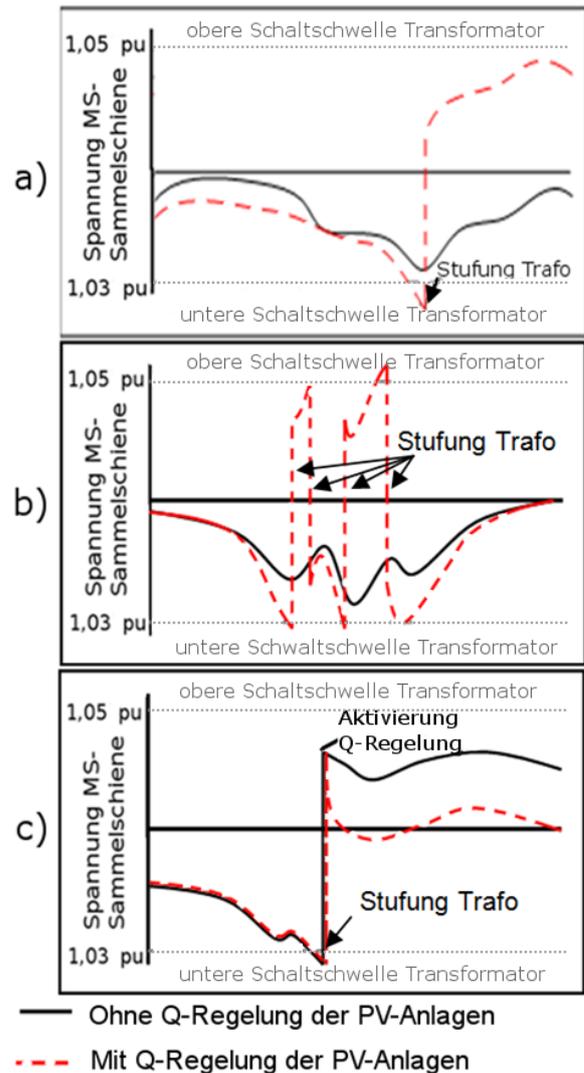


Abbildung 3: a) Auslösung einer kontraproduktiven Stufenschaltung; b) Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltungen; c) Dämpfung der Wirksamkeit einer UW-Transformatorstufung

gesenkt. Die spannungsabhängige Blindleistungsregelung kann somit die Auswirkung einer Stufenschaltung des UW-Transformators auf die MS-Sammelschienenspannung und somit auf die Netzspannung reduzieren.

Wie kritisch die beschriebenen Wechselwirkungen für einen sicheren Netzbetrieb sind, wird in diesem Beitrag diskutiert und in weiterführenden Untersuchungen eingehender analysiert. In der nachfolgend beschriebenen Simulation wird der Einfluss der Blindleistungsregelung der PV-Anlagen am MS- und NS-Netz auf die Spannung der MS-Sammelschiene im Netzgebiet analysiert. Um ungewollte Wechselwirkung mit der UW-Transformatorregelung zu vermeiden, wird für verschiedene Blindleistungsregelungsverfahren untersucht, wie der Einfluss der Blindleistungsregelung auf die MS-Sammelschienenspannung, bei dennoch hoher Wirksamkeit zur Spannungshaltung, möglichst gering gehalten werden kann.

Simulationsmodell und simulationspezifische Annahmen

Die Untersuchung wird an einem realen Verteilungsnetzmodell der E.ON Bayern AG durchgeführt. Das Verteilungsnetz weist mit einem Verhältnis von über 200% der installierten Erzeugungsleistung zum Starklastfall des Netzes eine sehr hohe Durchdringung mit dezentralen Erzeugungsanlagen auf, wobei mit etwa 96% der Erzeugungsleistung die PV-Anlagen den größten Anteil bereitstellen. Im Netzgebiet der E.ON Bayern AG wird eine Blindleistungsstatik (Q(U)-Kennlinie) [5] für die dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) am MS-Netz vorgegeben. Eine Blindleistungsregelung der dezentralen Erzeugungsanlagen am NS-Netz wird derzeit diskutiert. In dem Netzgebiet sind etwa 73% der Erzeugungsleistung im NS-Netz installiert (Stand 1. Quartal 2011).

Für die Untersuchungen wurde ein spannungsebenen-übergreifendes Simulationsmodell erstellt, bei dem sowohl das MS-Netz als auch ausgewählte NS-Netze im Detail und somit als vollständige Netznachbildung modelliert sind. NS-Netze, welche nicht im Detail modelliert sind, werden vereinfacht durch Ortsnetztransformator, aggregierte Lasten und Erzeuger nachgebildet. Die Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau des MS-Netzes, die Position der detailliert modellierten NS-Netze (Ortschaften: Ländlich T, Dorf L, Vorstadt O) und wichtige Kenndaten zum Netzgebiet. Insgesamt werden 49 der 157 Ortsnetze (ON) und etwa 50% der installierten Erzeugungsleistung im Netzgebiet in einem detaillierten Netzmodell simuliert. Auf Grund des großen Simulations- und Bearbeitungsaufwands (das erstellte Netzmodell umfasst über 5000 Netzknoten und etwa 3000 Lasten) erfolgt bei der Netzberechnung i.d.R. eine Spannungsbandaufteilung auf MS- und NS-Netz und eine separate Betrachtung der einzelnen Netzebenen. Gerade in Netzen mit hoher dezentraler Einspeisung und mit aktiver Spannungsregelung der dezentralen Erzeugungsanlagen treten zunehmend wechselseitige Beeinflussungen zwischen den einzelnen Spannungsebenen auf, so dass eine separate Betrachtung der Spannungsebenen nicht ausreicht, um die Spannungshaltung im Netzgebiet zu beurteilen. Diese wechselsei-

tigen Beeinflussungen sollen mit dem erstellten Simulationsmodell berücksichtigt und untersucht werden.

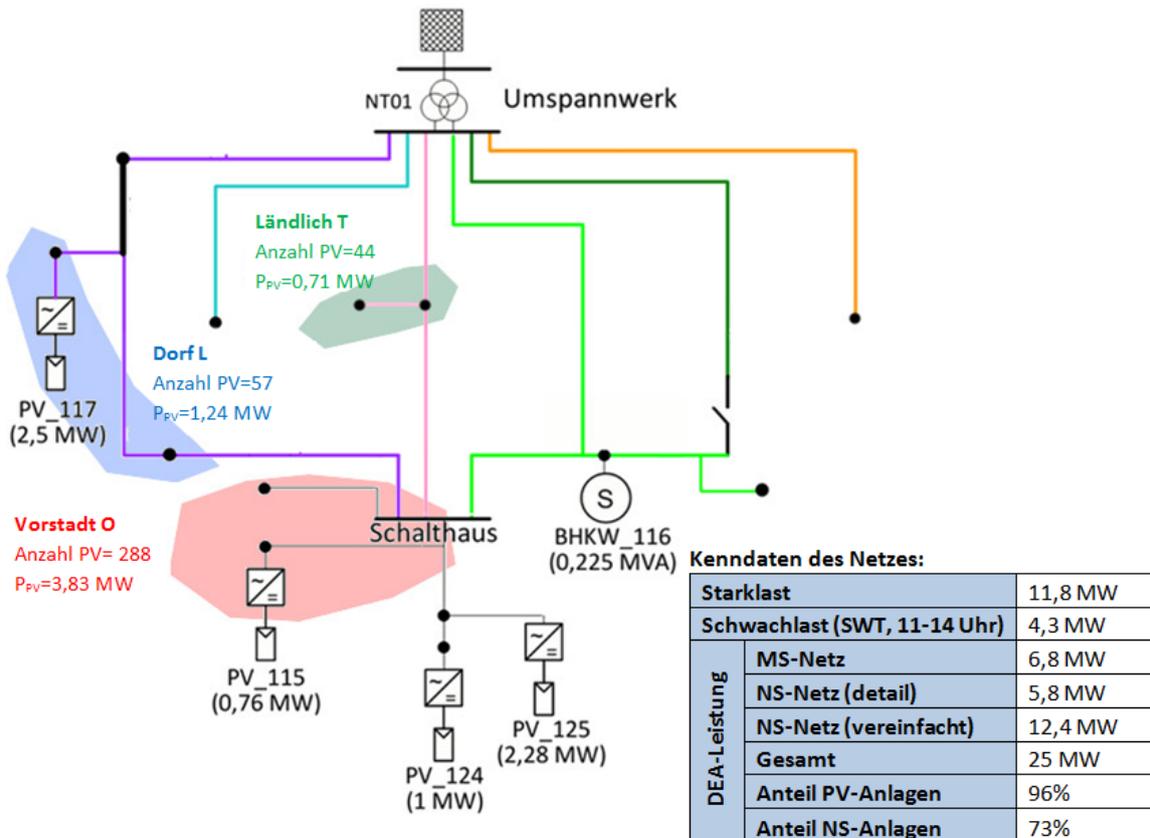


Abbildung 4: Schematische Darstellung des MS-Netzes mit dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) am MS-Netz und charakteristischen Kenndaten zum Untersuchungsgebiet (Stand 1. Quartal 2011)

Im dem Projekt „Netz der Zukunft“ [4] wurde in dem Untersuchungsgebiet eine umfassende Messwerterfassung aufgebaut. Auf Grundlage dieser Messdaten wurde in den Projekten „Netz der Zukunft“ und „PV-Integrated“ die Auswirkung der PV-Einspeisung auf das Verteilungsnetz untersucht und verbesserte Simulationsannahmen entwickelt. Die wichtigsten Simulationsannahmen für die Untersuchung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Untersuchung wird für den Worst-Case (Schwachlastfall / maximale PV-Einspeisung) durchgeführt. Für diesen Worst-Case ist der höchste Einfluss der Blindleistungsregelung der PV-Anlagen auf die Netzspannung zu erwarten. Um die Komplexität der Untersuchung nicht unnötig zu erhöhen, werden weitere netzbetriebliche Belange bei der Spannungsbandanalyse, wie z.B. (n-1)-Fall-Betrachtung oder notwendige Sicherheitsabstände im Spannungsband aufgrund von Asymmetrie oder Messtoleranzen, im Rahmen dieser einführenden Untersuchung nicht betrachtet.

Tabelle 1: Simulationsannahmen für die Netzberechnung

Starklastfall	nach Berechnung der E.ON Bayern AG
Schwachlastfall in detaillierten Ortsnetzen	nach Smart-Meter-Auswertung, siehe [9] für Sommerwerktag, Zeitraum 11 bis 14 Uhr
Schwachlastfall aggregierte Ortsnetze	33% des Starklastfalls des Ortsnetzes
Verschiebungsfaktor der aggregierten Ortsnetze	nach $\cos\varphi=f(P)$ -Kennlinie, siehe [8]
Gleichzeitigkeitsfaktor PV-Einspeisung	$P_{PV}=0,9 * P_{N_STC}$ (bei MS-Anlagen) nach [7] $P_{PV}=0,85 * P_{N_STC}$ (bei NS-Anlagen) nach [7]

Es werden folgende lokale Blindleistungsregelungsverfahren der PV-Anlagen am MS- und NS-Netz simuliert und analysiert:

- **Feste $\cos\phi$ -Vorgabe**

MS-Anlagen: $\cos\phi=0,95_{ind}$

NS-Anlagen: $\cos\phi=0,95_{ind}$ für $S_N \leq 13,8$ kVA
 $\cos\phi=0,9_{ind}$ für $S_N > 13,8$ kVA

- **Q(U)-Kennlinie (siehe Abbildung 5)**

MS-Anlagen: MS_KL₁: $u_1=1,06$ pu, $u_2=1,0725$ pu;

MS_KL₂: $u_1=1,07$ pu, $u_2=1,0825$ pu

NS-Anlagen: NS_KL₁: $u_1=1,06$ pu, $u_2=1,0725$ pu;

NS_KL₂: $u_1=1,04$ pu, $u_2=1,0525$ pu

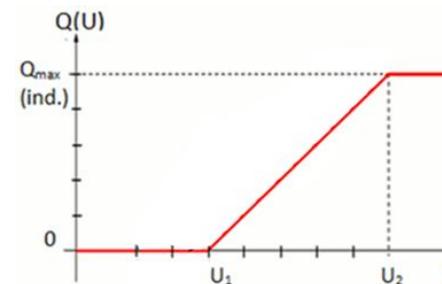


Abbildung 5: Q(U)-Kennlinie nach [5]

Die Q(U)-Kennlinie kann für MS-Anlagen nach [5] mit der Kennlinie MS_KL₁ oder MS_KL₂ eingestellt werden. Es werden mit NS_KL₁ und NS_KL₂ zwei verschiedene Kennlinieneinstellungen für die Q(U)-Regelung im NS-Netz untersucht. Mit der NS_KL₂ wurde eine Einstellung gewählt, die bereits frühzeitig und bei nur geringen Spannungserhöhungen am Anschlusspunkt der PV-Anlage aktiv wird. Diese Einstellung wurde gewählt, um die Auswirkung der Q(U)-Regelung im NS-Netz auf die Spannungsregelung im MS-Netz besser analysieren und veranschaulichen zu können. Bei Kennlinieneinstellungen im NS-Netz, die erst bei hohen Spannungswerten (z.B. $u_1=1,07$ pu, $u_2=1,09$ pu) regeln, sind die Auswirkung der Q(U)-Regelung im NS-Netz auf die Netzspannung gering. Da bei den getroffenen Simulationsannahmen und dem untersuchten Normalbetrieb des Netzes nur an wenigen PV-Anlagen im NS-Netz entsprechend hohe Spannungswerte auftreten.

Bei den Simulationen werden die Auswirkungen der Blindleistungsregelung im MS- und NS-Netz auf die MS-Sammelschienenspannung und auf die Netzspannung untersucht, dazu wird ausgehend vom Szenario keine Blindleistungsregelung der PV-Anlagen, der Anteil der geregelten Anlagen schrittweise erhöht. Die Auswahl der geregelten Anlagen in den detaillierten NS-Netzen erfolgt über eine Zufallsfunktion. Um einen Einfluss der Anlagenauswahl auf das Simulationsergebnis zu vermeiden, werden als je Szenario und Einstellung 100 Wiederholungen durchgeführt und die

Durchschnittswerte für die Auswertung verwendet. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die realisierten Szenarien.

Tabelle 2: Übersicht über realisierte Szenarien

Szenario 0	Keine Blindleistungsregelung der dezentralen Erzeugungsanlagen
Szenario 1	Blindleistungsregelung aller MS-Anlagen (~27% der gesamten Einspeiseleistung)
Szenario 2	Blindleistungsregelung aller MS-Anlagen und 25% der PV-Leistung in detailliert modellierten NS-Netzen (~33% der gesamten Einspeiseleistung)
Szenario 3	Blindleistungsregelung aller MS-Anlagen und 50% der PV-Leistung in detailliert modellierten NS-Netzen (~39% der gesamten Einspeiseleistung)
Szenario 4	Blindleistungsregelung aller MS-Anlagen und 75% der PV-Leistung in detailliert modellierten NS-Netzen (~45% der gesamten Einspeiseleistung)
Szenario 5	Blindleistungsregelung aller MS-Anlagen und 100% der PV-Leistung in detailliert modellierten NS-Netzen (~51% der gesamten Einspeiseleistung)

Simulationsergebnisse der Untersuchung

Auswirkung der Blindleistungsregelung der PV-Anlagen auf den Verlauf der Netzspannung im Verteilungsnetz

Bei der Untersuchung wurde unter anderem der Spannungsverlauf von der MS-Sammelschiene (MS-SS) bis zu dem kritischen Netzknoten im MS-Netz (PV-MS) und zu dem kritischen Netzknoten im NS-Netz (PV-NS) erfasst. Die Position der kritischen Knoten im Netzgebiet ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Spannungsverläufe sind in Abbildung 6 für die feste $\cos\phi$ -Vorgabe und in Abbildung 7 für die Q(U)-Regelung (MS_KL₁, NS_KL₂) dargestellt. Die feste $\cos\phi$ -Vorgabe kann die Spannung an dem kritischen MS-Knoten ($dU_{Ges_MS} = -1,33\%$ bis $-2,71\%U_n$, siehe auch Tabelle 4) und an dem kritischen NS-Knoten ($dU_{Ges_NS} = -1,08\%$ bis $-4,18\%U_n$, siehe auch Tabelle 5) sehr deutlich absenken und zeigt somit eine hohe Wirkung bei der Spannungshaltung im Netzgebiet. Ermöglicht wird dies durch eine deutliche Erhöhung des induktiven Blindleistungsbezugs der PV-Anlagen im Netzgebiet ($Q_{DG_GES} = 2,0$ bis $4,1$ Mvar, siehe auch Abbildung 8). Es tritt folglich ebenso eine hohe Absenkung der MS-Sammelschienenspannung ($dU_{Trafo} = -0,68\%$ bis $-1,41\%U_n$) gegenüber dem Szenario 0 ohne Blindleistungsregelung auf. Aufgrund der hohen Auswirkung der Blindleistungsregelung auf die Regelgröße des UW-Transformators besteht ein hohes Risiko, eine ungewollte Wechselwirkung mit der UW-Transformatorregelung auszulösen. Des Weiteren zeigt sich, dass die Blindleistungsregelung der NS-Anlagen eine deutliche Auswirkung auf den Spannungsverlauf im MS-Netz aufweist. Die UW-Transformatorregelung ist bei den Simulationen nicht aktiviert.

Die Q(U)-Regelung zeigt eine geringere Absenkung der Maximalspannung im MS-Netz ($dU_{Ges_MS} = -0,44\%$ bis $-0,99\%U_n$, siehe auch Tabelle 4) und NS-Netz ($dU_{Ges_NS} = -0,28\%$ bis $-2,21\%U_n$, siehe auch Tabelle 5). Bei dieser Regelung werden

nur Anlagen an kritischen Netzsträngen geregelt, wodurch der insgesamt auftretende induktive Blindleistungsbezug der PV-Anlagen im Netzgebiet deutlich geringer ausfällt ($Q_{DG_GES} = 1,2$ bis $1,3$ Mvar für MS_KL_1 , NS_KL_2 , siehe Abbildung 8). Da der Ortsnetztransformator (Übersetzungsverhältnis=52) die Spannung von MS-Anschluss zu NS-Anschluss (ONT-NS) um etwa 4% U_n deutlich absenkt, treten nur an wenigen NS-Anlagen entsprechend hohe Spannungswerte auf. Sehr hohe Blindleistungsflüsse werden durch die Charakteristik der $Q(U)$ -Regelung verhindert, so bewirkt eine Erhöhung der geregelten Leistung im NS-Netz eine Reduzierung des induktiven Blindleistungsbezugs der PV-Anlagen am MS-Netz. Es tritt bei dieser Regelung eine wechselseitige Beeinflussung der Spannungsregelung im MS-Netz mit der Spannungsregelung im NS-Netz auf (siehe Abbildung 8). Die $Q(U)$ -Regelung hat insgesamt eine deutlich geringere Auswirkung auf die MS-Sammelschienenspannung ($dU_{Trafo} = -0,18\%$ bis $-0,45\%U_n$). Es wird somit auch ein geringes Risiko erwartet, eine ungewollte Stufenschaltung des UW-Transformators auszulösen.

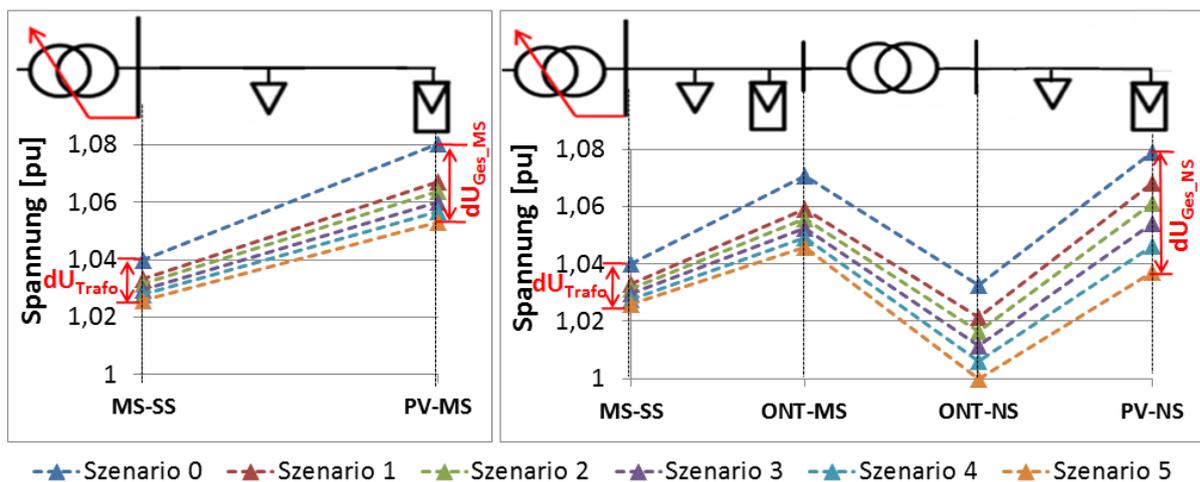


Abbildung 6: Spannungsverlauf MS-Sammelschiene bis kritischen Netzknotten im MS-Netz (links) und kritischen Netzknotten im NS-Netz (rechts) für die feste $\cos\phi$ -Vorgabe

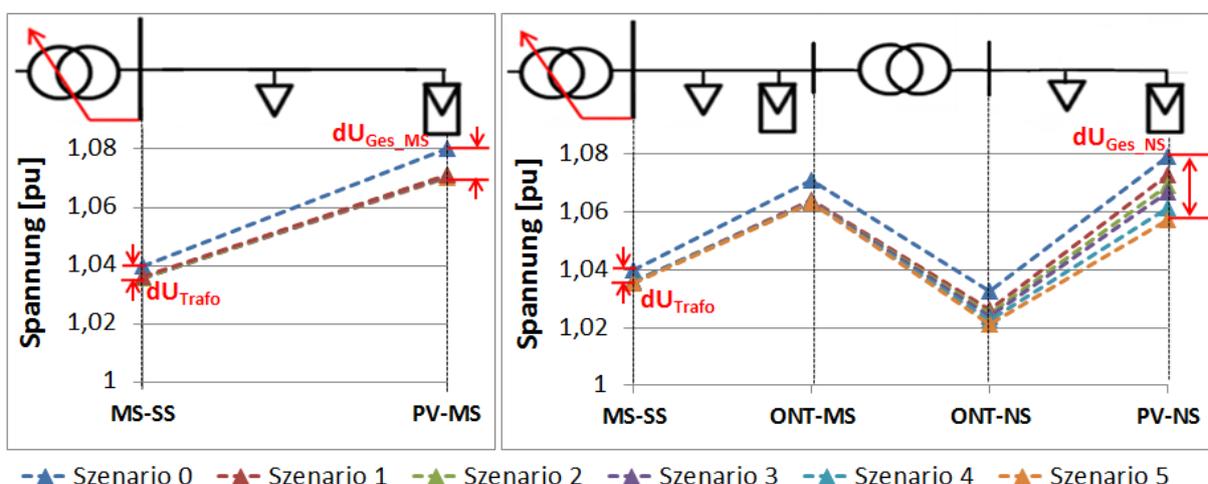


Abbildung 7: Spannungsverlauf MS-Sammelschiene bis kritischen Netzknotten im MS-Netz (links) und kritischen Netzknotten im NS-Netz (rechts) für die $Q(U)$ -Kennlinie (MS_KL_1 , NS_KL_2)

Wie bereits beschrieben, wurde für die einzelnen Szenarien und Einstellungen je 100 Wiederholungen durchgeführt, bei denen eine zufällige Auswahl der geregelten Anlagen in den detailliert modellierten NS-Netzen erfolgt. Für die Szenarien 0 und 1 (keine NS-Anlagen regeln) und Szenario 5 (alle NS-Anlagen in den detailliert modellierten NS-Netzen regeln) wurden keine Wiederholungen durchgeführt, da bei diesen Einstellungen die Anlagenauswahl im NS-Netz keine Relevanz für das Simulationsergebnis hat. Aufgrund der Übersichtlichkeit werden in den Abbildungen 6, 7 und 8 nur die Durchschnittswerte als Ergebnisse dargestellt. Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die maximale positive und negative Abweichung vom angegebenen Durchschnittswert für die Blindleistungseinspeisung der PV-Anlagen im Netzgebiet für die Szenarien 2, 3 und 4.

Tabelle 3: Maximale, minimale und durchschnittliche Blindleistungseinspeisung (Generatorzählpeilsystem) der PV-Anlagen für die Regelung mit fester $\cos\phi$ -Vorgabe (links) und Q(U)-Kennlinie (MS_KL₁, NS_KL₂) (rechts)

	feste $\cos\phi$ -Vorgabe			Q(U)-Kennlinie (MS_KL ₁ , NS_KL ₂)		
	$\varnothing Q$ [kvar]	Qmin [kvar]	Qmax [kvar]	$\varnothing Q$ [kvar]	Qmin [kvar]	Qmax [kvar]
Szenario 2	-2517,5	-2439,6	-2561,1	-1242,9	-1213,2	-1281,5
Szenario 3	-3046,8	-2990,4	-3112,6	-1273,6	-1234,5	-1297,9
Szenario 4	-3575,1	-3503,2	-3635,4	-1305,0	-1281,9	-1325,7

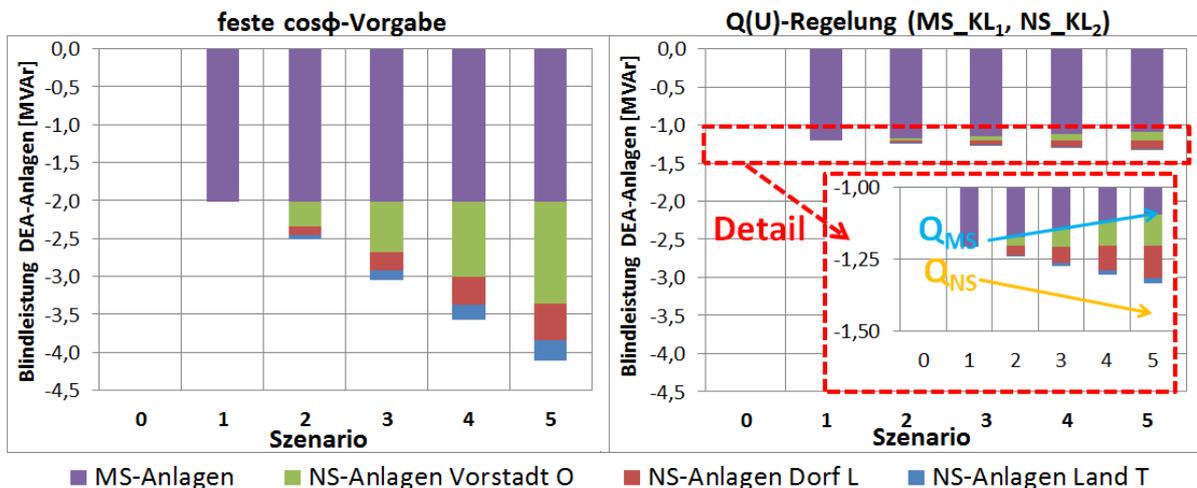


Abbildung 8: Blindleistungseinspeisung (Generatorzählpeilsystem) der PV-Anlagen für die Regelung mit fester $\cos\phi$ -Vorgabe (links) und Q(U)-Kennlinie (MS_KL₁, NS_KL₂) (rechts)

Risiko-Nutzen-Betrachtung der lokalen Blindleistungsregelungsverfahren

In der Tabelle 4 sind die Absenkung der MS-Sammelschienenspannung (dU_{Trafo}) und Maximalspannung im MS-Netz ($dU_{\text{Ges_MS}}$) und das Verhältnis dU_{Trafo} zu $dU_{\text{Ges_MS}}$ dargestellt. Je höher dU_{Trafo} ausfällt, desto stärker wird die Regelgröße des UW-Transformators durch die Blindleistungsregelung beeinflusst und so höher ist folglich auch das Risiko eine ungewollte Wechselwirkung auszulösen. Ziel bzw. Nutzen der Blindleistungsregelung ist eine Absenkung der Maximalspannung im Netzgebiet, dU_{Trafo} zu $dU_{\text{Ges_MS}}$ gibt somit das Verhältnis von Risiko zu Nutzen der Blindleistungs-

regelung an. Da bei allen Simulationen die PV-Wirkleistungseinspeisung und das Lastverhalten identisch sind, steht dU_{Trafo} in direktem Zusammenhang mit dem Blindleistungsfluss über dem UW-Transformator. Das Verhältnis dU_{Trafo} zu dU_{Ges} spiegelt somit ebenso die Effektivität der Blindleistungsregelung wieder. Bei der festen $\cos\phi$ -Vorgabe tritt über 50% der Gesamtspannungsabsenkung über dem UW-Transformator auf, da hier auch Anlagen an nicht kritischen Netzsträngen regeln, ist das Risiko-Nutzen-Verhältnis bei dieser Regelung eher schlecht.

Tabelle 4: Spannungsabsenkung MS-Sammelschiene (dU_{Trafo}), Spannungsabsenkung an kritischem MS-Knoten ($dU_{\text{Ges_MS}}$) und Verhältnis von dU_{Trafo} zu $dU_{\text{Ges_MS}}$

Szenario	$dU_{\text{Trafo}} [\%U_N]$					$dU_{\text{Ges_MS}} [\%U_N]$					$dU_{\text{Trafo}} / dU_{\text{Ges_MS}} [\%]$				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
cos ϕ fix	-0,68	-0,85	-1,04	-1,22	-1,41	-1,33	-1,66	-2,00	-2,35	-2,71	50,8	51,3	51,7	52,0	52,2
Q(U)- Kennlinie, MS KL1,NS KL1	-0,40	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41	-0,92	-0,92	-0,92	-0,93	-0,93	44,1	44,2	44,3	44,4	44,4
Q(U)- Kennlinie, MS KL1,NS KL2	-0,40	-0,42	-0,43	-0,44	-0,45	-0,92	-0,94	-0,95	-0,97	-0,99	44,1	44,6	44,9	45,2	45,5
Q(U)- Kennlinie, MS KL2,NS KL1	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,44	-0,44	-0,45	-0,45	-0,46	42,1	42,5	42,8	43,1	43,4
Q(U)- Kennlinie, MS KL2,NS KL2	-0,18	-0,21	-0,23	-0,24	-0,26	-0,44	-0,47	-0,50	-0,52	-0,55	42,1	43,9	45,1	46,0	46,9
Legende	-1,41	Hohes Risiko einer ungewollten Wechselwirkung				-0,44	Geringe Spannungsabsenkung Maximalspannung				52,2	Schlechtes Risiko-Nutzen-Verhältnis			
	-0,18	Geringes Risiko einer ungewollten Wechselwirkung				-2,71	Hohe Spannungsabsenkung Maximalspannung				42,1	Gutes Risiko-Nutzen-Verhältnis			

Tabelle 5: Spannungsabsenkung MS-Sammelschiene (dU_{Trafo}), Spannungsabsenkung an kritischem NS-Knoten ($dU_{\text{Ges_NS}}$) und Verhältnis von dU_{Trafo} zu $dU_{\text{Ges_NS}}$

Szenario	$dU_{\text{Trafo}} [\%U_N]$					$dU_{\text{Ges_NS}} [\%U_N]$					$dU_{\text{Trafo}} / dU_{\text{Ges_NS}} [\%]$				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
cos ϕ fix	-0,68	-0,85	-1,04	-1,22	-1,41	-1,08	-1,80	-2,50	-3,28	-4,18	62,9	47,3	41,4	37,3	33,8
Q(U)- Kennlinie, MS KL1,NS KL1	-0,40	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41	-0,62	-0,82	-1,03	-1,20	-1,33	65,2	49,4	39,5	34,2	31,1
Q(U)- Kennlinie, MS KL1,NS KL2	-0,40	-0,42	-0,43	-0,44	-0,45	-0,62	-0,99	-1,25	-1,76	-2,21	65,2	42,0	34,2	25,0	20,3
Q(U)- Kennlinie, MS KL2,NS KL1	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,28	-0,56	-0,77	-0,98	-1,17	66,5	33,7	25,0	20,0	16,8
Q(U)- Kennlinie, MS KL2,NS KL2	-0,18	-0,21	-0,23	-0,24	-0,26	-0,28	-0,74	-1,02	-1,37	-1,93	66,5	28,0	22,1	17,6	13,3
Legende	-1,41	Hohes Risiko einer ungewollten Wechselwirkung				-0,28	Geringe Spannungsabsenkung Maximalspannung				66,5	Schlechtes Risiko-Nutzen-Verhältnis			
	-0,18	Geringes Risiko einer ungewollten Wechselwirkung				-4,18	Hohe Spannungsabsenkung Maximalspannung				13,3	Gutes Risiko-Nutzen-Verhältnis			

In der Tabelle 5 sind die Absenkung der MS-Sammelschienenspannung (dU_{Trafo}), der Maximalspannung im NS-Netz ($dU_{\text{Ges_NS}}$) und das Verhältnis dU_{Trafo} zu $dU_{\text{Ges_NS}}$ dargestellt. Zur Absenkung der Maximalspannung im NS-Netz zeigt die Blindleistungsregelung der MS-Anlagen ein schlechtes Ergebnis bei der Risiko-Nutzen-Betrachtung. Die Regelung der NS-Anlagen bewirkt entgegen eine Spannungsabsenkung über der Leitungsimpedanz des NS-Netzes, den Ortsnetztransformator und der Leitungsimpedanz des MS-Netzes, wodurch das Verhältnis der eingesetzten Blindleistung zur Gesamtspannungsabsenkung deutlich besser ausfällt. Die Q(U)-Kennlinie zeigt besonders bei Einstellungen, bei der ein hoher Anteil der Blindleis-

tungseinspeisung durch NS-Anlagen erfolgt, ein deutlich besseres Risiko-Nutzen-Verhältnis als die feste $\cos\phi$ -Vorgabe.

Abhängigkeit der Blindleistungsregelung von der Spannung der MS-Sammelschiene

Ein weiterer Effekt der nachfolgend veranschaulicht werden sollen, ist die Auswirkung der MS-Sammelschienenspannung auf die Blindleistungsregelung der PV-Anlagen (siehe Abbildung 9). Bei dieser Simulation wird die Spannung am HS-Verknüpfungspunkt (HS-VP), ausgehend von $U_{HS_VP}=1,072$ pu, um $\pm 1\%$ U_n variiert, so dass sich bei dem Ausgangsszenario 0 an der MS-Sammelschiene eine Spannung von 1,04 pu (Sollwert des UW-Transformators), 1,03 pu (untere Schaltschwelle UW-Transformator) bzw. 1,05 pu (obere Schaltschwelle UW-Transformator) einstellt. Es werden die Spannungsverläufe vom HS-Verknüpfungspunkt bis zum kritischen MS-Knoten für das Szenario 0 (keine Blindleistungsregelung) und Szenario 1 (nur MS-Anlagen regeln) verglichen. Bei der festen $\cos\phi$ -Vorgabe erfolgt die Blindleistungsbereitstellung ($dU_{Trafo}=0,68\% U_n$) unabhängig von der auftretenden Spannung an der MS-Sammelschiene. Bei der Q(U)-Regelung zeigt sich nahe der oberen Schaltschwelle des UW-Transformators, aufgrund der höheren Netzspannung, eine deutlich höhere Spannungsabsenkung ($dU_{Trafo}=0,58\% U_n$) als bei einer MS-Sammelschienenspannung nahe der unteren Schaltschwelle des UW-Transformators ($dU_{Trafo}=0,19\% U_n$). Das Risiko eine kontraproduktive Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung auszulösen (siehe Wechselwirkung: Auslösung einer kontraproduktiven Stufenschaltung nach Abbildung 3a), ist folglich durch diesen Effekt bei der Q(U)-Regelung geringer als bei der festen $\cos\phi$ -Vorgabe.

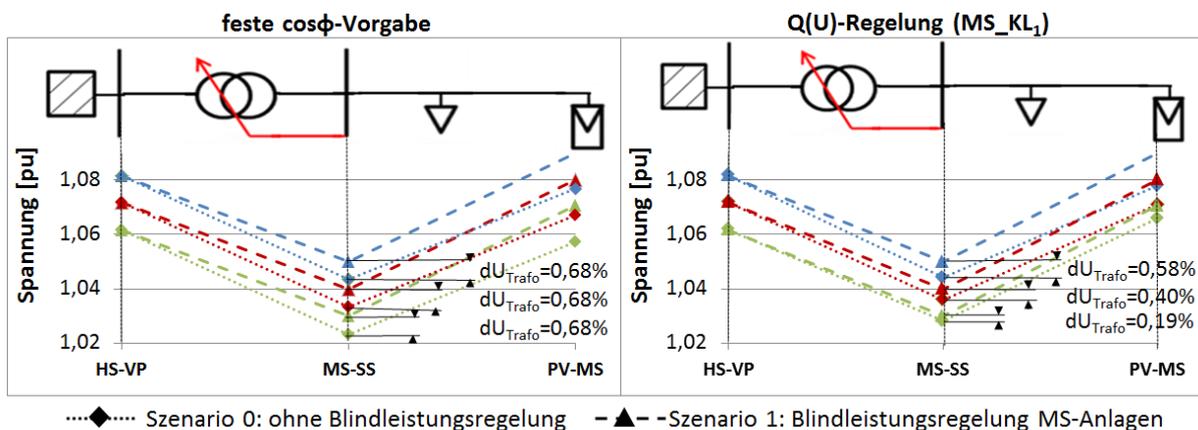


Abbildung 9: Spannungsverlauf vom HS-Verknüpfungspunkt, MS-Sammelschiene bis kritischen MS-Knoten bei Variation der Spannung am HS-Verknüpfungspunkt

Auswirkung einer ungewollten Stufenschaltung auf die Netzspannung

In der Abbildung 10 ist die Auswirkung einer Stufenschaltung auf die MS-Sammelschienenspannung und Maximalspannung im MS-Netz dargestellt. Dazu wurde die Spannung am HS-Verknüpfungspunkt gerade soweit herabgesetzt, dass bei dem Szenario 1 die untere Schaltschwelle des UW-Transformators unterschritten

und eine Stufenschaltung ausgelöst wird. Bei dem Szenario 0 befindet sich die MS-Sammelschienenspannung hingegen innerhalb des Totbandes des Stufenstellers und es wird keine Stufung ausgelöst. In Folge der Stufenschaltung tritt bei dem Szenario 1 eine höhere Maximalspannung im MS-Netz im Vergleich zu dem Szenario ohne Blindleistungsregelung auf. Die Blindleistungsregelung ist für diesen Fall kontraproduktiv. Des Weiteren zeigt sich in der Abbildung die Auswirkung einer Stufenschaltung auf die MS-Sammelschienenspannung. Bei der festen $\cos\phi$ -Vorgabe ändert sich die Spannung entsprechend der Änderung des Übersetzungsverhältnis des Transformators mit $u_{\text{Tap}}=1,76\% U_n$. Bei der Q(U)-Regelung wird durch einen höheren Blindleistungsbezug der PV-Anlagen nach Stufung, die Auswirkung einer Stufenschaltung auf die MS-Sammelschienenspannung gedämpft mit $u_{\text{Tap}}=1,40\% U_n$ (**siehe Wechselwirkung: Dämpfung der Wirksamkeit einer UW-Transformatorstufung nach Abbildung 3c**). Diese Wechselwirkung wird in der Größenordnung als eher unkritisch für den Netzbetrieb angesehen. Es besteht sogar der Vorteil, dass nach einer Stufenschaltung die MS-Sammelschienenspannung nicht in unmittelbarer Nähe der oberen Schaltschwelle des UW-Transformators verläuft, wodurch das Risiko eines wiederholten Schaltens des UW-Transformators, in Folge schwankender Blindleistungsflüsse (**siehe Wechselwirkung: Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltungen Abbildung 3b**), bei der Q(U)-Regelung geringer ausfällt.

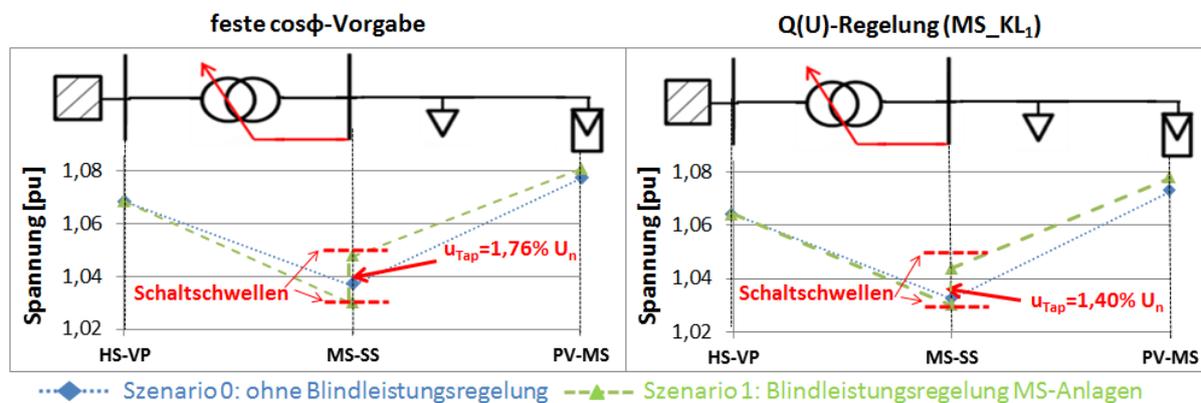


Abbildung 10: Spannungsverlauf vom HS-Verknüpfungspunkt, MS-Sammelschiene bis kritischen MS-Knoten bei Auslösung einer Stufenschaltung des UW-Transformators für feste $\cos\phi$ -Vorgabe (links) und Q(U)-Kennlinie (MS_KL1) (rechts)

Zusammenfassung und Ausblick

In dem Beitrag wurden die Auswirkung der Blindleistungsregelung der PV-Anlagen auf die Spannung der MS-Sammelschiene untersucht und folgende mögliche Wechselwirkungen zwischen der Blindleistungsregelung und der UW-Transformatorregelung beschrieben und analysiert:

- Auslösung einer kontraproduktiven Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung,
- Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung und
- Dämpfung der Wirksamkeit der UW-Transformatorstufung durch Blindleistungsregelung.

Es wurde ein integriertes Simulationsmodell des Mittelspannungsnetzes und ausgewählter Niederspannungsnetze des Verteilungsnetzes erstellt, um bei der Untersuchung auch spannungsebenen-übergreifende Wechselwirkungen bei der Spannungshaltung zu berücksichtigen. Für verschiedene Blindleistungsregelungsverfahren und Einstellungen wurden der Nutzen bei der Spannungshaltung und das Risiko, eine ungewollte Wechselwirkung mit der Spannungsregelung des UW-Transformators auszulösen, bewertet. Für die Regelung mit fester $\cos\phi$ -Vorgabe zeigt sich eine hohe Wirksamkeit bei der Spannungshaltung, jedoch auch ein hohes Risiko eine ungewollte Wechselwirkung mit der UW-Transformatorregelung auszulösen. Die Q(U)-Kennlinie zeigt zwar insgesamt einen geringeren Nutzen für die Spannungshaltung, kann allerdings bei fast allen gewählten Einstellungen und Szenarien ein deutlich besseres Risiko-Nutzen-Verhältnis im Vergleich zu festen $\cos\phi$ -Vorgabe aufweisen. Des Weiteren wurde die unterschiedliche Charakteristik der festen $\cos\phi$ -Vorgabe und der Q(U)-Kennlinie in Bezug auf die beschriebenen Wechselwirkungen mit der UW-Transformatorregelung herausgestellt. Die Q(U)-Regelung ist abhängig von der Spannung und folglich auch von der UW-Transformatorregelung, dieser Effekt erweist sich in Bezug auf die Wechselwirkungen: „Auslösung einer kontraproduktiven Stufenschaltung durch Blindleistungsregelung“ und „Erhöhung der Anzahl der Stufenschaltungen durch Blindleistungsregelung“ als tendenzieller Vorteil gegenüber der festen $\cos\phi$ -Vorgabe. Die Wechselwirkung: „Dämpfung der Wirksamkeit der UW-Transformatorstufung durch Blindleistungsregelung“ tritt jedoch nur bei der Q(U)-Regelung auf. In Netzen, in denen eine weitreichende Blindleistungsregelung realisiert wird, können die beschriebenen Wechselwirkungen den Netzbetrieb ggf. beeinträchtigen. Eine abschließende Bewertung, wie kritisch die beschriebenen Wechselwirkungen für einen sicheren Netzbetrieb sind, soll in weiterführenden Untersuchungen erfolgen.

In weiteren Untersuchungen soll anhand dynamischer Effektivwertsimulationen das zeitlich-dynamische Verhalten der Wechselwirkungen zwischen UW-Transformatorregelung und Blindleistungsregelung analysiert werden. Hierbei soll unter anderem festgestellt werden, wie häufig die beschriebenen Wechselwirkungen im Netzbetrieb auftreten können. Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen wird die Einbindung des Hochspannungsnetzes in die Simulationsumgebung sein.

Danksagung

Das Forschungsprojekt PV-Integrated wird gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Die Autoren danken dem Bundesministerium und dem Projektträger Jülich für diese Unterstützung (FKZ: 0325224A, 0325224B, 0325224C, 0325224D). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur (2012): „Monatliche Veröffentlichung der PV-Meldezahlen“, Online Verfügbar unter http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/ErneuerbareEnergienGesetz/VerguetungssaetzePVAnlagen/VerguetungssaetzePhotovoltaik_Basepage.html, zuletzt geprüft am 07.01.2013
- [2] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.(2008): „Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“, Berlin, 2008
- [3] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2011): „VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2011
- [4] E.ON Bayern (2011): „Netz der Zukunft - smart grid bei E.ON Bayern“, Regensburg, 2011
- [5] E.ON Bayern (2010): „Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz der E.ON Bayern AG“, Regensburg, 2010
- [6] M. Kraiczy (2012): „Technische Bewertung von Netzbetriebsführungsverfahren anhand eines realen Mittelspannungsnetzes mit hoher dezentraler Erzeugungsdichte“, Masterarbeit am Fraunhofer IWES, Kassel, 2012
- [7] G. Wirth, G. Becker, R. Pardatscher, R. Witzmann (2011): „Photovoltaik und Netzstabilität“, Sonnenenergie – Offizielle Fachorgan der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V., Heft 6/2011, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V., Berlin, S.26-27, 2011
- [8] T. Stetz, M. Kraiczy, M. Braun, S. Schmidt (2012): “Technical and Economical Assessment of Voltage Control Strategies in Distribution Grids”, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sonderausgabe: 27. EU PVSEC, 2012
- [9] T. Stetz, H. Wolf, A. Probst, S. Eilenberger, Y.-M. Saint Drenan, E. Kämpf, M. Braun, D. Schöllhorn, S. Schmidt (2012): „Stochastische Analyse von Smart-Meter Messdaten“, ETG Kongress 2012, Stuttgart, 2012

Notizen