

Eignung und Auswirkung verschiedener Blindleistungsregelverfahren für Erzeugungsanlagen in generischen Mittelspannungsnetzen

Anna Pfendler^{1*}, Christian Bott², Christian Lakenbrink²,
Thomas Hunger³, Jutta Hanson¹

¹ Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektrische Energiesysteme, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz Erneuerbarer Energien (E5), Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt, +49 6151 16-24663, anna.pfendler@e5.tu-darmstadt.de, www.e5.tu-darmstadt.de

² Netze BW, Schelmenwasenstraße 15, 70567 Stuttgart, www.netze-bw.de

³ Hochschule Mannheim, Institut für Energietechnik und erneuerbare Energien, Fachgebiet Elektrische Anlagen und Netze, Paul-Wittsack-Straße 10, 68163 Mannheim, www.et.hs-mannheim.de

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird der Einfluss der Blindleistungsregelung von Erzeugungsanlagen für ein generisches Strahlennetz in der Mittelspannungsebene (MS) untersucht. Dem in Digsilent PowerFactory modellierten Netz liegen typische Kennwerte aus den Netzen des Verteilnetzbetreibers Netze BW zugrunde. Mithilfe der deterministischen Netzplanung wird die maximal mögliche Einspeisung aus EE-Anlagen als Zukunftsszenario für das Netz bestimmt. Basierend auf einer einzelnen aggregierten Erzeugungsanlage werden die folgenden Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung im MS-Netz vorgestellt und miteinander verglichen:

- Blindleistungs-Spannungskennlinie $Q(U)$,
- Blindleistungs-Wirkleistungskennlinie $Q(P)$,
- Blindleistung mit Spannungsbegrenzerfunktion und
- Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)$. [1]

Die Verfahren werden hinsichtlich der Spannungshaltung, der Netzverluste und des Blindleistungsaustausches mit dem überlagerten Netz verglichen. Außerdem werden verschiedene Leitungstypen miteinander verglichen, die den aktuellen und den zukünftig ausgebauten Netzen entsprechen.

In den in dieser Arbeit untersuchten offen betriebenen generischen Ringnetzen ist eine Blindleistungsregelung für die statische Spannungshaltung nicht notwendig, da die Spannungsgrenzen auch ohne zusätzliche Regelung nicht verletzt werden. Dies liegt insbesondere an den begrenzten Leitungslängen im Mittelspannungsnetz und der Annahme reiner Kabelnetze. Die Blindleistungsregelung kann jedoch einen positiven Effekt auf die Netzverluste und auf den notwendigen Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Hochspannungsnetz haben.

Keywords: Blindleistungsregelung, Technische Anschlussregel (TAR), Anwendungsregel, statische Spannungshaltung, dezentrale Erzeugungsanlagen, Blindleistungsbereitstellung

1 Motivation

Der verstärkte Einsatz dezentraler Erzeugungsanlagen (EZA) bedeutet für die elektrische Energieversorgung einen nachhaltigen Wandel. Besonders regenerative Energiequellen wie Solar- und Windkraft spielen aufgrund des weitreichenden Zuspruchs in der Gesellschaft und Politik als umweltfreundliche Energiebereitstellung eine wichtige Rolle. Das altbewährte Prinzip, dass Systemdienstleistungen zentral durch konventionelle Kraftwerke bereitgestellt werden, weicht zunehmend der Bereitstellung aus dezentralen und volatilen EZA. Hinsichtlich der Spannungshaltung im Verteilnetz kommt dezentralen EZA daher eine steigende Bedeutung zu [2].

Netzanschlussregeln [1] koordinieren den Anschluss und den Betrieb von EZA, u.a. durch verschiedene Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung im stationären Betrieb. Die Verfahren stellen sicher, dass die Netzspannung durch den Parallelbetrieb von EZA keine unzulässigen Werte annimmt. Dahingegen ist jedoch ein optimaler Blindleistungshaushalt sowie eine störungsfreie Interaktion zwischen den EZA untereinander und mit dem Stufensteller von Transformatoren nicht automatisch gewährleistet [2].

Diese Arbeit untersucht den Einfluss von Blindleistungsregelverfahren und deren Parametrierung auf die statische Spannungshaltung, die Wirkleistungsverluste und den Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz. Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: Kapitel 2 beschreibt die Methodik und Grundlagen zu Blindleistungsregelverfahren, die Anforderungen an den Zubau von dezentralen EZA und die ausgewerteten Kenngrößen. In Kapitel 3 werden in einem generischen Strang Worst-Case-Szenarien hinsichtlich der statischen Spannungshaltung definiert und anschließend die vorgestellten Verfahren zur Blindleistungsregelung verglichen. Kapitel 4 zeigt schließlich die Ergebnisse im generischen Netz. Kapitel 5 diskutiert die Ergebnisse und zieht ein Fazit.

2 Methodik

Dieses Kapitel stellt zunächst die Methodik und Grundlagen der Untersuchungen vor. Ausgehend von einem stark reduzierten generischen Mittelspannungsstrang – im ersten Schritt eine EZA am Ende einer Leitung – wird zunächst betrachtet, welche Auswirkungen verschiedene Blindleistungsregelverfahren auf die Spannungshaltung und die Wirkleistungsverluste im Netz haben. Mithilfe der deterministischen Netzplanung, d.h. der Definition von Worst-Case-Szenarien, werden die theoretisch kritischsten Netzzustände untersucht. Dabei erfolgt ausschließlich eine stationäre Betrachtung und Auswertung der statischen Spannungshaltung. Die dynamische Netzstützung von EZA, z.B. in Folge eines Kurzschlusses, wird nicht betrachtet.

2.1 Blindleistungsregelverfahren nach VDE-AR-N 4110 und TAB Netze BW

Die technischen Anschlussregeln (TAR) des VDE [1, 3, 4] definieren Netzanschlussbedingungen für EZA, die auf den verschiedenen Spannungsebenen des deutschen Energiesystems angeschlossen werden. Vergleichbare Anforderungen sind auch in anderen Ländern zu finden [5]. Die in der TAR Mittelspannung (VDE-AR-N 4110, nachfolgend TAR 4110 genannt) [1] beschriebenen Verfahren zur statischen Spannungshaltung definieren die Bereitstellung von Blindleistung durch EZA im Mittelspannungsnetz. Die eingespeiste

Blindleistung wirkt langsamen Spannungsänderungen lokal entgegen. Die durch den Netzbetreiber vorgegebenen Sollwerte müssen innerhalb von 4 Minuten erreicht werden. In dieser Arbeit werden nur solche Szenarien untersucht, in denen die EZA die Blindleistung $Q=0,33$ p.u. einspeisen können. Das entspricht einem Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)=0,95$. Falls durch den Netzbetreiber keine Vorgabe zur statischen Spannungshaltung erfolgt, sind die EZA mit einem konstanten Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)=1$ zu betreiben [1]. Dieses Szenario gilt nachfolgend als Vergleich.

2.1.1 Blindleistungs-Spannungs-Kennlinie $Q(U)$

Die Blindleistungs-Spannungs-Kennlinie $Q(U)$ -Kennlinie stellt die Blindleistung in Abhängigkeit der am Netzanschlusspunkt anliegenden Betriebsspannung ein. Die Kennlinie ist in Abbildung 1a angegeben. Die folgenden Größen zur Definition der Kennlinie können durch den Netzbetreiber vorgegeben werden: Die Steigung der Kennlinie, die Vorgabespannung (Schnittpunkt mit der Abszisse) sowie optional ein Totband. Die Kennlinie kann durch Fernleittechnik durch den Netzbetreiber im Betrieb horizontal verschoben werden. [1]

2.1.2 Blindleistungs-Wirkleistungs-Kennlinie $Q(P)$

Die Blindleistungs-Wirkleistungs-Kennlinie $Q(P)$ -Kennlinie definiert die Blindleistungseinspeisung von EZA in Abhängigkeit der aktuellen Wirkleistungsabgabe bezogen auf die Bemessungswirkleistung der Anlage. Auch hier können durch den Netzbetreiber verschiedene Stützpunkte der Kennlinie definiert werden, darunter ein Bereich im Teillastbetrieb, in dem keine zusätzliche Blindleistung eingespeist werden muss. Ein Beispiel für die Kennlinie ist in Abbildung 1c gezeigt. [1]

2.1.3 Blindleistung mit Spannungsbegrenzerfunktion

Die Blindleistungsbereitstellung mit Spannungsbegrenzerfunktion erinnert zunächst an die $Q(U)$ -Kennlinie mit Totband (vgl. Abbildung 1d). Zusätzlich bietet dieses Verfahren jedoch eine vertikale Verschiebung der Kennlinie, sodass der Blindleistungssollwert unabhängig von der aktuellen Wirkleistungsabgabe der EZA eingestellt wird. Außerhalb des horizontalen Bereichs der Kennlinie ist eine spannungsabhängige Blindleistungseinspeisung vorgegeben [1]

2.1.4 Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)$

Bei der Regelung des Verschiebungsfaktors $\cos(\varphi)$ wird das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung bzw. indirekt Blind- zu Scheinleistung definiert:

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \quad Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (1)$$

Durch den Netzbetreiber kann ein konstanter Verschiebungsfaktor im Bereich zwischen 0,95 und 1 vorgegeben werden. Der Sollwert kann fernwirktechnisch eingestellt werden. [1] Im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Blindleistungsregelverfahren wird hier die Scheinleistung im Betrieb S zugrunde gelegt, wohingegen die Kennlinien nach Abbildung 1 die Blindleistungseinspeisung auf die installierte Wirkleistung P_{inst} beziehen.

2.1.5 TAB Netze BW

In den technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers Netze BW nach Abbildung 1b ist eine Blindleistungs-Spannungs-Kennlinie ohne Totband vorgegeben, deren Vorgabespannung mit 1,02 p.u. gegeben ist. [6]

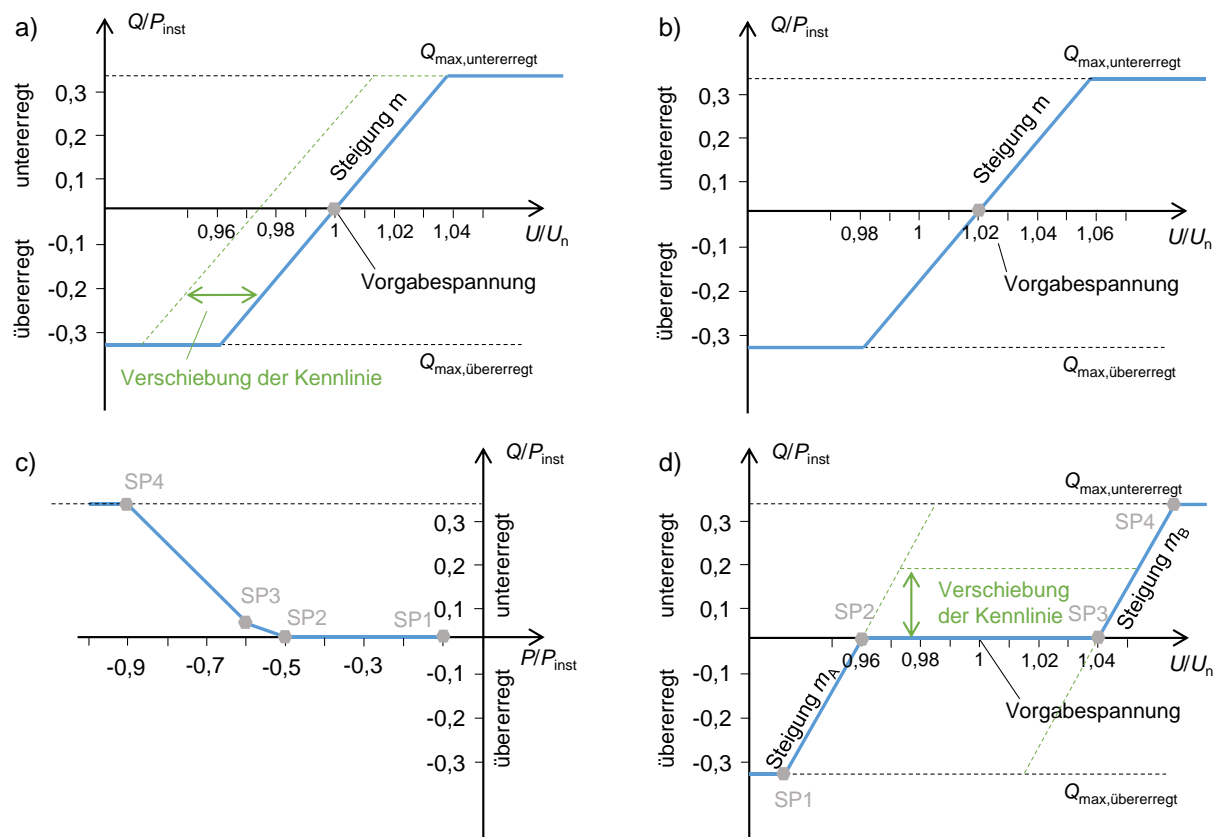


Abbildung 1: Verfahren zur Blindleistungsregelung a) $Q(U)$ -Kennlinie nach [1], b) $Q(U)$ -Kennlinie der Netze BW nach [6], c) $Q(P)$ -Kennlinie nach [1], d) variabler Verschiebungsfaktor nach [1]

2.2 Zubau dezentraler Erzeugungsanlagen

Die TAR 4110 regelt den Anschluss von EZA an das Mittelspannungsnetz. Für stationäre Betrachtungen muss zunächst die Bemessung der Betriebsmittel, insbesondere der Leitungen und der Transformatoren berücksichtigt werden. Aufgrund der zusätzlichen Einspeisung werden i.d.R. diese Betriebsmittel stärker thermisch belastet. Eine Überschreitung der Bemessungsgrößen ist im stationären Betrieb nicht zulässig, sondern bedingt Netzausbaumaßnahmen.

Das zweite Kriterium ist die Spannungsänderung, die durch den Anschluss von EZA im Mittelspannungsnetz im ungestörten Betrieb hervorgerufen wird. Die maximal zulässige langsame Spannungsänderung, die durch alle in einem Mittelspannungsnetz angeschlossenen EZA hervorgerufen wird, beträgt an jedem Netzanschlusspunkt 2%. Das bedeutet, dass die Spannung an keiner Sammelschiene (engl. busbar, BB) des öffentlichen Netzes um mehr als $\pm 2\%$ im Vergleich zu dem gleichen Lastfall ohne Einspeisung abweichen darf. Für die Prüfung dieses 2%-Spannungskriteriums sind die EZA mit entsprechendem Verschiebungsfaktor zu berücksichtigen. Zudem kann der Netzbetreiber einen anderen Wert für die maximale zulässige Spannungsänderung vorgeben.

Zusätzliche Kriterien für den Netzanschluss von EZA, etwa die Mindestkurzschlussleistung oder die zulässigen Netzurückwirkungen, werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

2.3 Kenngrößen zum Vergleich der Verfahren

Die Auswertung und der Vergleich der Verfahren erfolgt anhand der folgenden Kenngrößen:

1. maximal installierbare Leistung dezentraler EZA $S_{EZA,max}$,
2. statische Spannungshaltung $0,985 \text{ p.u.} < u_n < 1,05 \text{ p.u.}$ (abweichend von TAR 4110 mit $\pm 5 \%$),
3. Wirkleistungsverluste $P_{Verlust} = 3 \cdot R' \cdot \ell \cdot I^2$ und
4. Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz Q_{Bezug} gemessen an der Oberspannungsseite des Transformators

Die erste Kenngröße nimmt Bezug auf den Netzausbau und ist daher ein netzplanerisches Kriterium. Die maximale Erzeugungsleistung gibt an, bis zu welcher Leistung dezentrale EZA angeschlossen werden können, ohne dass das Netz ausgebaut werden muss. Dabei greift neben der Auslastung der Betriebsmittel auch das 2%-Spannungskriterium.

Die statische Spannungshaltung, die Wirkleistungsverluste und der Blindleistungsbezug sind Kenngrößen, die den Betrieb der Netze beschreiben. Dabei ist das oben genannte Spannungstoleranzband einzuhalten und die Wirkleistungsverluste und der Blindleistungsaustausch sollten zur Reduzierung der Betriebskosten möglichst minimal sein.

3 Vergleich der Regelverfahren im generischen Strang

In diesem Kapitel werden für ein generisches Netz grundsätzliche Untersuchungen ausgewertet, die für den Vergleich der Regelverfahren ein erstes Fazit erlauben. Zudem wird das Betriebsverhalten von Kabeln und Freileitungen verglichen. Die zwei betrachteten Kabeltypen repräsentieren sowohl einen typischen Kabelquerschnitt aktueller MS-Netze als auch ein Kabel mit größerem Querschnitt, wie es bei aktuellen Planungen Anwendung findet.

3.1 Untersuchungsszenario

Im Fokus dieser Untersuchung stehen Netze, die als offene Ringe betrieben werden. Aus diesem Grund bietet sich für den grundlegenden Vergleich der Blindleistungsregelverfahren ein generischer Strang an, der lediglich aus einer Leitung L und einer EZA besteht, die über einen Transformator T mit dem externen Hochspannungsnetz (HS-Netz) verbunden sind. Das Netz für diese Untersuchung ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angegeben. Es handelt sich um das Szenario Schwachlast (bzw. als Extremfall keine Last) mit Einspeisung, welches den Rückspeisefall in die überlagerte Spannungsebene betrachtet.

Die Betriebsmitteldaten sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angegeben. Für den im nächsten Abschnitt dieses Kapitels durchgeführten Vergleich verschiedener Leitungen werden die beiden Kabel K1 für den aktuellen Stand und K2 für ein zukünftiges Kabel mit größerem Querschnitt sowie eine Freileitung FL betrachtet. Die verwendeten Verfahren und Kennlinien basieren auf den in den TAR [1] definierten Stützpunkten.

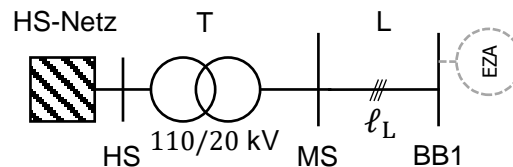


Abbildung 2: Generischer Untersuchungsstrang zum Vergleich der Blindleistungsregelverfahren

Tabelle 1: Betriebsmitteldaten generischer Untersuchungsstrang

HS-Netz / Slack	$U_n = 110 \text{ kV}$	$f = 50 \text{ Hz}$	$I_k'' = 10 \text{ kA}$	$R/X = 0,1$
Transformator T	Typ YNynd5 $u_{kr} = 10 \%$	$U_{rTOS} = 110 \text{ kV}$ $u_{rR} = 0,5 \%$	$U_{rTUS} = 20 \text{ kV}$ Stufenschalter $\pm 13 \%$ in 27 Stufen	$S_{rT} = 40 \text{ MVA}$
Leitung L	K1	NA2XS2Y $3 \times 1 \times 185 \text{ mm}^2$	$I_d = 361 \text{ A}$ $R' = 0,16 \Omega/\text{km}$	$S_d = 10,6 \text{ MVA}^*$ $X' = 0,12 \Omega/\text{km}$ $C' = 0,27 \mu\text{F}/\text{km}$
	K2	NA2XS2Y $3 \times 1 \times 300 \text{ mm}^2$	$I_d = 471 \text{ A}$ $R' = 0,1 \Omega/\text{km}$	$S_d = 13,9 \text{ MVA}^*$ $X' = 0,11 \Omega/\text{km}$ $C' = 0,33 \mu\text{F}/\text{km}$
	FL	122-AL1/20-ST1A	$I_d = 410 \text{ A}$ $R' = 0,24 \Omega/\text{km}$	$S_d = 14,2 \text{ MVA}$ $X' = 0,38 \Omega/\text{km}$ $C' = 10,08 \text{ nF}/\text{km}$
EZA	$S_{r,EZA} = 0,5 \dots 14,2 \text{ MVA}$		$\cos(\varphi) = 0,95 \dots 1$	

* Aufgrund von Verrohrung ist die maximal dauernd zulässige Leistung der Kabel auf 85 % reduziert.

3.2 Vergleich der Leitungstypen

Die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Kriterien beschränken die maximal mögliche Erzeugungsleistung am Ende der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten Leitung. Ziel dieser Untersuchung ist im Zuge des Netzausbaus die maximale Wirkleistungseinspeisung aus dezentralen EZA bei gleichzeitig minimaler Blindleistungseinspeisung zu bestimmen. Die maximale Erzeugungsleistung S_{EZA} wird durch die thermische Belastbarkeit der Leitung begrenzt und entspricht den Leistungen aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Die Ergebnisse sind für unterschiedliche Leitungslängen in Tabelle 2 angegeben. Zentrales Ergebnis ist, dass für fast alle betrachteten Stränge Erzeugungsleistung bis zur thermischen Belastbarkeit installiert werden kann. Hierfür muss aber in den meisten Fällen Blindleistung zur Verfügung gestellt werden, um das 2%-Spannungskriterium einzuhalten (außer für das 5 km lange Kabel K2). Für K1 und FL ist das 2%-Spannungskriterium relevant, sodass zusätzliche Blindleistung durch die EZA bereitgestellt werden muss. Für K1 muss zusätzlich die Erzeugungsleistung bei den Kabellängen von 10 km und 12 km reduziert werden, um einen Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)=0,95$ nicht zu unterschreiten. Kabel K2 kann bis zu einer Länge von 5 km mit einer reinen Wirkleistungseinspeisung belastet werden, ohne das Spannungskriterium zu verletzen. Für die längeren Kabellängen von K2 ist ebenfalls Blindleistung zur Spannungshaltung notwendig. Der geringere Blindleistungsbedarf von K2 im Vergleich zu K1 liegt in einem geringeren Impedanzbelag und somit einem geringeren Spannungsfall über der Leitung begründet. Ein Netzausbau mit K2 ermöglicht somit einen wesentlich stärkeren Zubau von dezentralen Erzeugungsanlagen. Die FL lässt mit 14,2 MVA thermisch die größte Scheinleistung zu, benötigt für die Einhaltung des 2%-Spannungskriteriums jedoch entsprechend Blindleistung.

Tabelle 2: Vergleich der Leitungstypen

	Kabel K1			Kabel K2			Freileitung FL		
	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km
ℓ_L	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km	5 km	10 km	12 km
S_{EZA} in MVA	10,6	9,6	7,5	13,9	13,9	13,9	14,2	14,2	14,2
P_{EZA} in MW	10,59	9,1	7,1	13,9	13,7	13,5	14	13,6	13,5
Q_{EZA} in Mvar	0,5	3	2,3	0	2,4	3,1	2,5	4	4,3
$\cos(\varphi)$	0,999	0,950	0,950	1	0,985	0,975	0,984	0,959	0,953
Δu_1 in %	2 %	2 %	2 %	1,7 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %

3.3 Vergleich der Regelverfahren

Für den Vergleich der Regelverfahren wird das Netz aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** mit der Leitung K2 mit einer Länge von 10 km herangezogen. Die Bemessungswirkleistung der EZA wird nun von 0 bis 14 MW schrittweise erhöht, wobei sich die Anlage immer im Volllastbetrieb befindet. Bewertet werden die Spannungshaltung am Netzanschlusspunkt der EZA (BB1) und die Netzverluste in Leitung L und Transformator T.

Der Vergleich der Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung in Abbildung 3 zeigt, dass mithilfe der $Q(P)$ -Kennlinie und der $Q(U)$ -Kennlinie die maximal mögliche installierbare Leistung an dezentralen EZA erhöht werden kann. Die zusätzliche Blindleistungseinspeisung reduziert die Netzspannung. Aufgrund des zusätzlichen reaktiven Anteils erhöhen sich der Strombetrag und somit auch die Netzverluste (vgl. Abbildung 3b). Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Verfahren mit der Parametrierung nach [1]. Die Spannungsbegrenzerfunktion mit den Parametern aus [1] wird nicht aktiv und führt ebenso wie ein Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi) = 1$ zu keiner zusätzlichen Blindleistungseinspeisung. Zudem entspricht die $Q(P)$ -Kennlinie aufgrund des Volllastbetriebs durchweg einem Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)=0,95$.

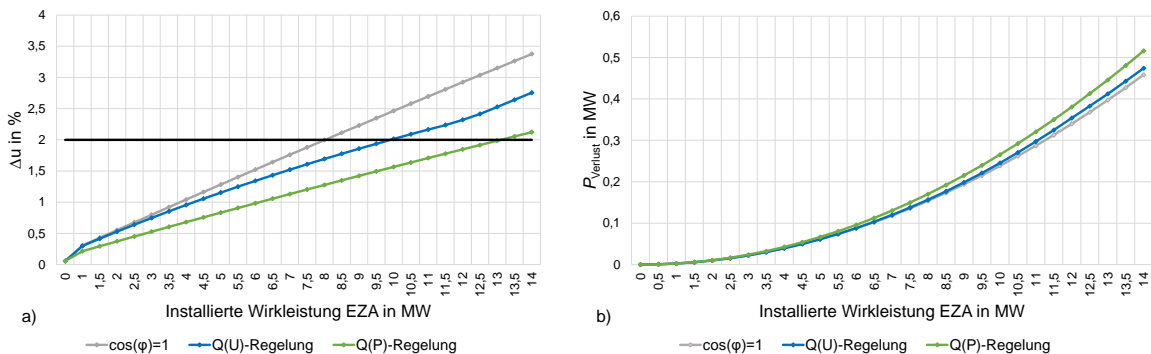


Abbildung 3: Einfluss der Anlagengröße auf a) die Spannungshaltung und b) die Netzverluste im Volllastbetrieb

3.4 Vergleich konzentrierter und verteilter Einspeisung

Dieser Abschnitt zeigt, dass die Betrachtung einer aggregierten EZA am Ende der Leitung eine konservative Abschätzung im Vergleich zur Betrachtung mehrerer, über den Strang verteilt angeschlossener EZA liefert. Dazu wird das Szenario aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verglichen mit Szenarien, in denen mehrere EZA gleichmäßig über den Strang verteilt angeschlossene sind (Abbildung 4). Die gesamte Leitungslänge ℓ wird in äquidistante Abschnitte ℓ_x geteilt, ebenso werden die Bemessungsleistungen der EZA gleichmäßig aufgeteilt, sodass gilt:

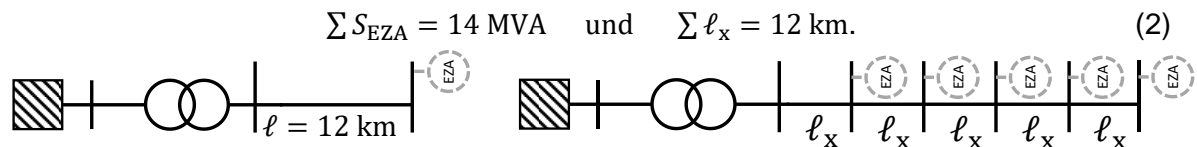


Abbildung 4: Beispiel für die Variation der Anzahl der EZA in einem Strang

Die Aufteilung der EZA über den Strang reduziert die Leitungsverluste, da mit steigender Anzahl angeschlossener EZA die durchschnittliche Entfernung zur Hauptsammelschiene MS sinkt. Dadurch reduziert sich der Spannungsfall und die durchschnittlich wirkende Impedanz der Leitungen. Dies führt zu geringeren Leitungsverlusten und einer geringeren Blindleistungseinspeisung bei Anlagen mit $Q(U)$ -Kennlinie (vgl. Abbildung 5).

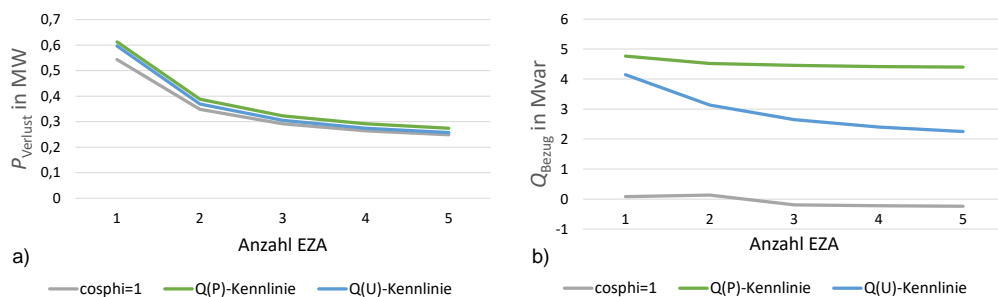


Abbildung 5: Untersuchung konzentrierter und verteilter EZA a) Verluste und b) Blindleistungseinspeisung $Q(U)$

4 Blindleistungsregelung mit $Q(U)$ -Kennlinie im generischen Netz

Wegen des Nachteils, dass die $Q(P)$ -Kennlinie im Volllastbetrieb der EZA die Blindleistungseinspeisung konstant auf 0,33 p.u. hält (vgl. Abbildung 1) und somit den Blindleistungsbedarf aus dem überlagerten Netz sowie die Verluste erhöht, liegt der Fokus in den folgenden Untersuchungen auf der $Q(U)$ -Kennlinie. Dazu wird zunächst der Einfluss von Lasten und deren Netzanschlusspunkten auf die Spannungshaltung untersucht. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 die statische Spannungshaltung in einem homogenen und einem inhomogenen generischen Netz, jeweils bestehend aus 5 Strängen, ausgewertet.

4.1 Zusammenspiel von Lasten und Erzeugungsanlagen

In dem generischen Netz nach Abbildung 6 wird der Einfluss von Lasten sowie der Netzanschlusspunkte der Lasten und EZA untersucht. Dies entspricht dem Szenario Starklast mit Einspeisung. Dazu werden drei Sammelschienen definiert, an welche insgesamt zwei EZA und zwei Lasten L1, L2 angeschlossen werden. Die 18 verschiedenen Szenarien werden in Tabelle 3 definiert und beschreiben alle möglichen Kombinationen aus EZA und Lasten an den drei Sammelschienen.

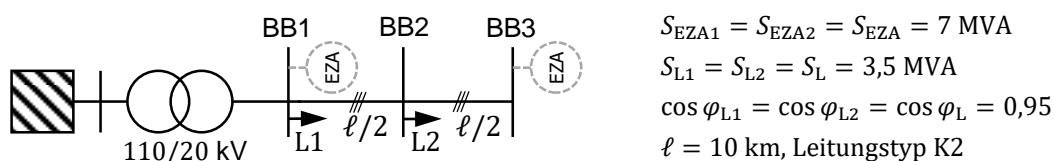


Abbildung 6: Generischer Untersuchungsstrang und zugehörige Kenndaten zum Vergleich der Netzanschlusspunkte

Für jedes Szenario werden die Spannungen an den drei Sammelschienen, die Wirkleistungsverluste und der Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz

ausgewertet. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen außerdem den Vergleich von unregulierten EZA (Szenario ohne $Q(U)$ -Kennlinie) und EZA, die mit $Q(U)$ -Kennlinie betrieben werden.

Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass in allen Szenarien die Spannungen zwischen 0,98 p.u. und 1,025 p.u. liegen – unabhängig davon ob die Blindleistungsregelung mit $Q(U)$ -Kennlinie aktiv ist oder nicht. Lediglich Szenario 12, in welchem beide Lasten an BB3 und die EZA an BB1 und BB2 angeschlossen sind, verletzt die definierte Vorgabe aus Abschnitt 2.3 ($u > 0,985$ p.u.). Dieses Szenario stellt einen Worst-Case dar, da die Lasten aggregiert am Ende der Leitung angeschlossen sind und stark spannungssenkend wirken. Bereits die Verteilung der Lasten auf BB2 und BB3 (Szenario 9) führt zu einer Einhaltung des geforderten Spannungsbandes.

Die zusätzlichen Lasten (im Vergleich zu den Szenarien ohne Last aus Abschnitt 3) wirken spannungssenkend und dies insbesondere, wenn die EZA nahe am und die Lasten weiter entfernt vom Transformator installiert sind. Im umgekehrten Fall, d.h. bei Anschluss der Lasten in der Nähe des Transformators (Szenarien 14 und 16), dominieren die EZA und sorgen für eine Spannungsanhebung an den Sammelschienen BB2 und BB3.

Der Einfluss der $Q(U)$ -Kennlinie auf die statische Spannungshaltung ist am größten in Szenario 16, in welchem die EZA an BB2 und BB3 angeschlossen sind und die Lasten an BB1. In Szenarien, in denen Lasten und EZA an denselben Sammelschienen angeschlossen sind ist der Einfluss der $Q(U)$ -Kennlinie gering (vgl. Szenarien 1, 8, 15). In diesen Fällen findet der Leistungsaustausch lokal statt und der über die Leitungen fließende Strom ist klein.

Tabelle 3: Szenariendefinition

Szenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
EZA 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
EZA 2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
L1	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3	1	1	2	1	2	3
L2	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3	3	2	3	1	2	3

Für die statische Spannungshaltung erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse in Abbildung 7 und nach Tabelle 2 keine Empfehlung für die $Q(U)$ -Kennlinie im generischen MS-Strang. Aufgrund des 2%-Spannungskriteriums aus den technischen Anschlussbedingungen und der Begrenzung der Stranglänge auf 10 km werden keine Erzeugungsleistungen erreicht, die eine Blindleistungsregelung im fehlerfreien Betrieb erfordern.

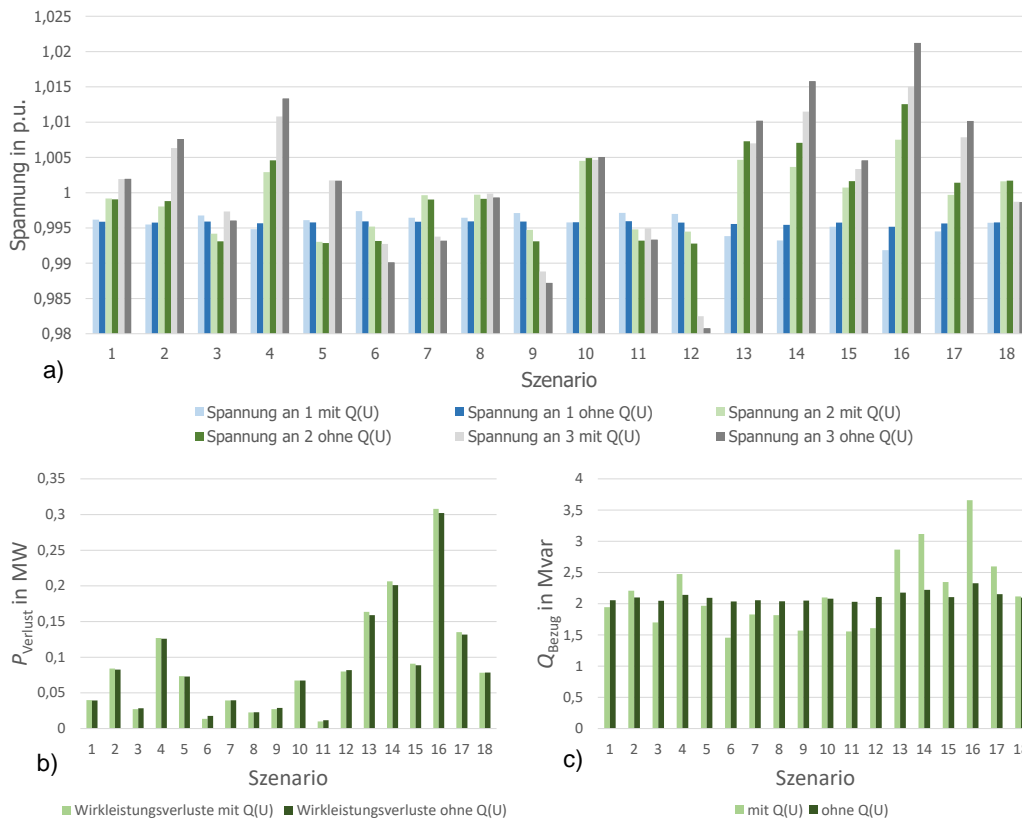


Abbildung 7: Ergebnisse für die definierten Szenarien a) Spannungen an den Sammelschienen BB1, BB2 und BB3, b) Verluste, c) Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz

Die Szenarien weisen große Unterschiede bezüglich der Wirkleistungsverluste auf. Diese sind auf die Verteilung der EZA und Lasten zurückzuführen und damit auf den Strom. Der Vergleich der Szenarien mit EZA mit und ohne $Q(U)$ -Kennlinie zeigt nur geringe Unterschiede der Wirkleistungsverluste. Für die Szenarien mit $Q(U)$ -Kennlinie treten sowohl Szenarien auf, in denen die zusätzliche Blindleistungsregelung die Wirkleistungsverluste geringfügig reduziert (Szenario 6,12) als auch solche, die einen negativen Einfluss auf die Wirkleistungsverluste haben (Szenario 13,14,16). Grund hierfür ist, dass die $Q(U)$ -Kennlinie bei EZA, die nahe am Transformator angeschlossen sind, i.d.R. spannungshabend wirken (vgl. Szenario 7-12). Dadurch wird der Strom im Strang reduziert. Wirkt die $Q(U)$ -Kennlinie jedoch spannungssenkend, i.d.R. am Ende der Leitung, erhöht dies die Verluste entsprechend.

EZA mit $Q(U)$ -Regelung in der Nähe des Transformators reduzieren den Blindleistungsaustausch (vgl. Szenarien 7-12), mit größerer Entfernung zum Transformator (vgl. Szenarien 13-18) erhöht sich der Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz. Findet der Austausch lokal statt (Szenario 6), so reduziert die $Q(U)$ -Kennlinie den Blindleistungsaustausch.

4.2 Generisches Netz

Dieser Abschnitt diskutiert die statische Spannungshaltung im generischen Netz, das aus fünf Strängen besteht. Das Mittelspannungsnetz wird mit offenen Ringen betrieben. Da in dieser Arbeit jedoch der fehlerfreie Zustand betrachtet wird, ist die Annahme als Strahlennetz zulässig. In Abschnitt 4.2.1 wird zunächst ein homogenes Netz untersucht, das aus fünf

gleichen Strängen besteht. Abschnitt 4.2.2 widmet sich inhomogenen Netzen, die aus Last- und Erzeugungssträngen mit $S_{EZA,max} = 14$ MVA und $S_{Last,max} = 7$ MVA je Strang bestehen.

4.2.1 Homogenes Netz

Das homogene Untersuchungsnetz besteht aus fünf gleichen und parallel an der Unterspannungsseite des Transformators angeschlossenen Strängen. Im homogenen Netz sind alle Stränge nach einem der oben definierten Szenarien aufgebaut. Untersucht werden die Szenarien mit minimaler Spannung (Szenario 12), mit höchster Spannung, Verlusten und Blindleistungsbedarf (Szenario 16) und eine durchschnittliche Topologie (Szenario 15). Da der Transformator nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die Spannung an der Hauptsammelschiene unterspannungs-seitig in 1%-Schritten regeln kann, kommt es hinsichtlich der Spannungshaltung zu keinen kritischen Auswirkungen durch den Parallelbetrieb der Stränge.

Die Wirkleistungsverluste und auch der Blindleistungsaustausch mit dem überlagerten Netz summieren sich und sind entsprechend etwa um den Faktor 5 größer als für den einzelnen Strang. Zusätzlich wird der Stufenschalter des Transformators aktiv, um die Spannung an der Hauptsammelschiene unterspannungs-seitig zu regeln. Aufgrund dieser Regelung kommt es zu leichten Änderungen der Spannung, wodurch wiederum sowohl die Verluste als auch der Blindleistungsbezug leicht beeinflusst werden. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 8 lässt sich jedoch erkennen, dass die $Q(U)$ -Kennlinie am Ende der Stränge (Szenario 16) einen negativen Einfluss auf die ausgewerteten Größen hat, wohingegen die Blindleistungsregelung in der Nähe des Transformators (Szenario 12) einen kleinen positiven Einfluss hat.

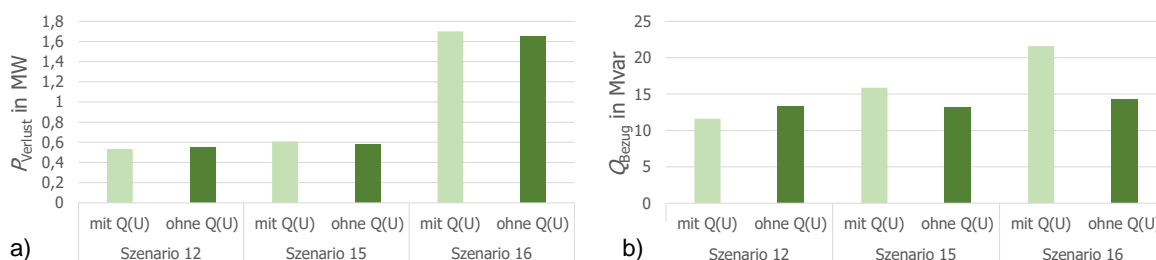


Abbildung 8: Ergebnisse des homogenen Netzes a) Wirkleistungsverluste und b) Blindleistungsbezug

4.2.2 Inhomogenes Netz

Für die Untersuchung von inhomogenen Netzen werden die drei Fälle nach Abbildung 9a-c verglichen. Hierbei handelt es sich um Szenarien, die aus jeweils zwei Einspeisesträngen und drei Laststrängen bestehen. Dabei repräsentieren die Laststränge den Starklastfall ohne Einspeisung und die Einspeisestränge den Schwachlastfall mit maximaler Einspeisung. Diese Inhomogenität führt zu dem theoretisch maximalen Spannungsband. Hierbei handelt es sich um eine konservative Abschätzung, welche im Betrieb i.d.R. nicht auftritt. Die einzelnen Stränge sind weiterhin mit $S_{EZA}=14$ MVA und $S_L=7$ MVA modelliert.

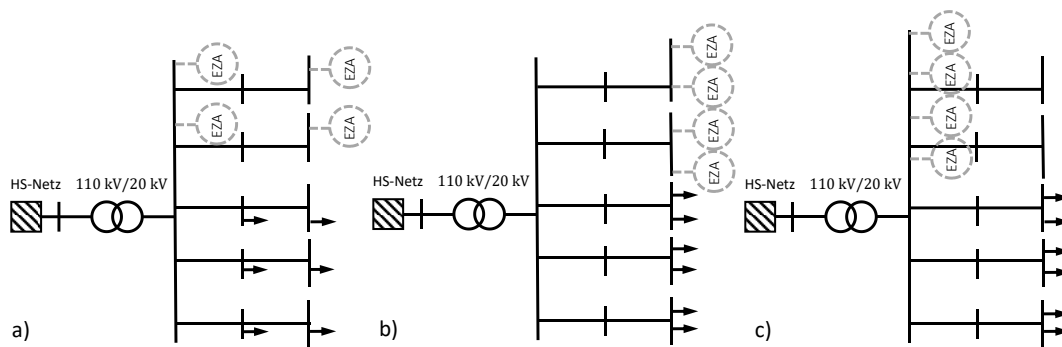


Abbildung 9: Generische Untersuchungsnetze a) – c) inhomogen

Die Ergebnisse die inhomogenen Netze können abgeleitet werden von den Ergebnissen der einzelnen Stränge aus Kapitel 4.1. Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass für EZA am Ende der Leitung (Fall b) die $Q(U)$ -Kennlinie spannungssenkend wirkt bei einem erhöhten Blindleistungsbezug aus dem überlagerten Netz. Das Spannungsband wird insgesamt stärker ausgenutzt. Durch Anpassen des Spannungswertes in der Traforegelung kann jedoch die Spannung so angehoben werden, dass das geforderte Toleranzband eingehalten wird. In diesem Fall ist eine Sollspannung von 1,02 p.u. zu wählen. Zudem wird die Vorgabe aus den TAR [1] von $\pm 10\%$ gut eingehalten. Im Vergleich der Szenarien mit und ohne $Q(U)$ -Kennlinie hat die Blindleistungsregelung nur einen geringen Einfluss auf die Wirkleistungsverluste. Hinsichtlich des Blindleistungsaustausches mit dem überlagerten Netz wirkt die $Q(U)$ -Kennlinie netzdienlich und reduziert den Blindleistungsbedarf in Fall c um 8 %.

Tabelle 4: Ergebnisse der inhomogenen generischen Netze

	Fall a		Fall b		Fall c	
	Mit $Q(U)$	Ohne $Q(U)$	Mit $Q(U)$	Ohne $Q(U)$	Mit $Q(U)$	Ohne $Q(U)$
P_{Verlust} in MW	0,510	0,506	1,41	1,36	0,431	0,433
Q_{Bezug} in Mvar	6,31	5,58	11,30	6,53	5,08	5,52
U_{max} in p.u.	1,011	1,015	1,020	1,028	0,998	0,997
U_{min} in p.u.	0,977	0,979	0,968	0,970	0,974	0,973

5 Diskussion und Ausblick

Dieser Beitrag liefert einen Überblick über die in den TAR [1] angegebenen Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung und vergleicht diese im generischen MS-Strang hinsichtlich der statischen Spannungshaltung, der Wirkleistungsverluste sowie des Blindleistungsaustausches mit dem überlagerten Hochspannungsnetz. Außerdem wird der Anschluss einer einzelnen aggregierten EZA am Ende des Stranges als Worst-Case für die Spannungshaltung erkannt.

Die Netzuntersuchungen zeigen, dass in den betrachteten generischen MS-Netzen eine Blindleistungsregelung zur statischen Spannungshaltung nicht notwendig ist. Dies ist auf die Begrenzung der maximalen Länge eines Abgangs auf $\ell = 12$ km sowie die Anschlussbedingungen für EZA im Rahmen der Netzplanung zurückzuführen [1]. In allen Untersuchungen bleibt die Betriebsspannung auch ohne Blindleistungsregelung in einem Toleranzbereich von $\pm 5\%$.

In einem generischen Strang sowie in generischen Strahlennetzen, die aus fünf generischen Strängen bestehen, werden die Netzanschlusspunkte (BB1 bis BB3) der Lasten und EZA variiert. Für die $Q(U)$ -Regelung lässt sich auch hier für den verwendeten Kabeltyp kein

pauschaler Vorteil gegenüber einer Einspeisung ohne Blindleistungsbereitstellung feststellen. Die Untersuchung zeigt jedoch, dass die $Q(U)$ -Regelung bei EZA, die in der Nähe des Transformators angeschlossen sind, zu geringeren Verlusten und Blindleistungsflüssen über den Transformator führt. Diese Erkenntnis wird sowohl im generischen Strang als auch in homogenen und inhomogenen generischen Netzen bestätigt. Am Ende des Stranges führt die $Q(U)$ -Regelung im Zusammenspiel mit Lasten zu höheren Verlusten und einem höheren Blindleistungsbedarf aus dem überlagerten Hochspannungsnetz.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird eine weiterführende Untersuchung in realen Netzen angestrebt, insbesondere da die Untersuchungen der generischen Stränge und Netze mit einem Kabel mit einem Querschnitt von 300 mm² für zukünftige MS-Netze durchgeführt wurden. Zudem muss die Interaktion von Regelungen der EZA untereinander und mit der Regelung des Transformators in einer dynamischen Simulation bewertet werden.

6 Literatur

- [1] *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)*, VDE-AR-N 4110, VDE, Nov. 2018.
- [2] FNN Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE, *Vergleich von technischer Wirksamkeit sowie Wirtschaftlichkeit zeitnah verfügbarer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen mit starker dezentraler Einspeisung*, 2014.
- [3] *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)*, VDE-AR-N 4120, VDE, Nov. 2018.
- [4] *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz: Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, VDE-AR-N 4105, VDE, Nov. 2018.
- [5] F. Kalverkamp et al., „Comparative analysis of European Grid Codes and compliance standards for distributed power generation plants with respect to future requirements of ENTSO-E and CENELEC“ in *Proceedings of International ETG Congress 2015: Die Energiewende - blueprints for the new energy age* : date: 17-18 Nov. 2015, Piscataway, NJ: IEEE, 2015.
- [6] Netze BW GmbH, *TAB Mittelspannung: Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz*, 2019.