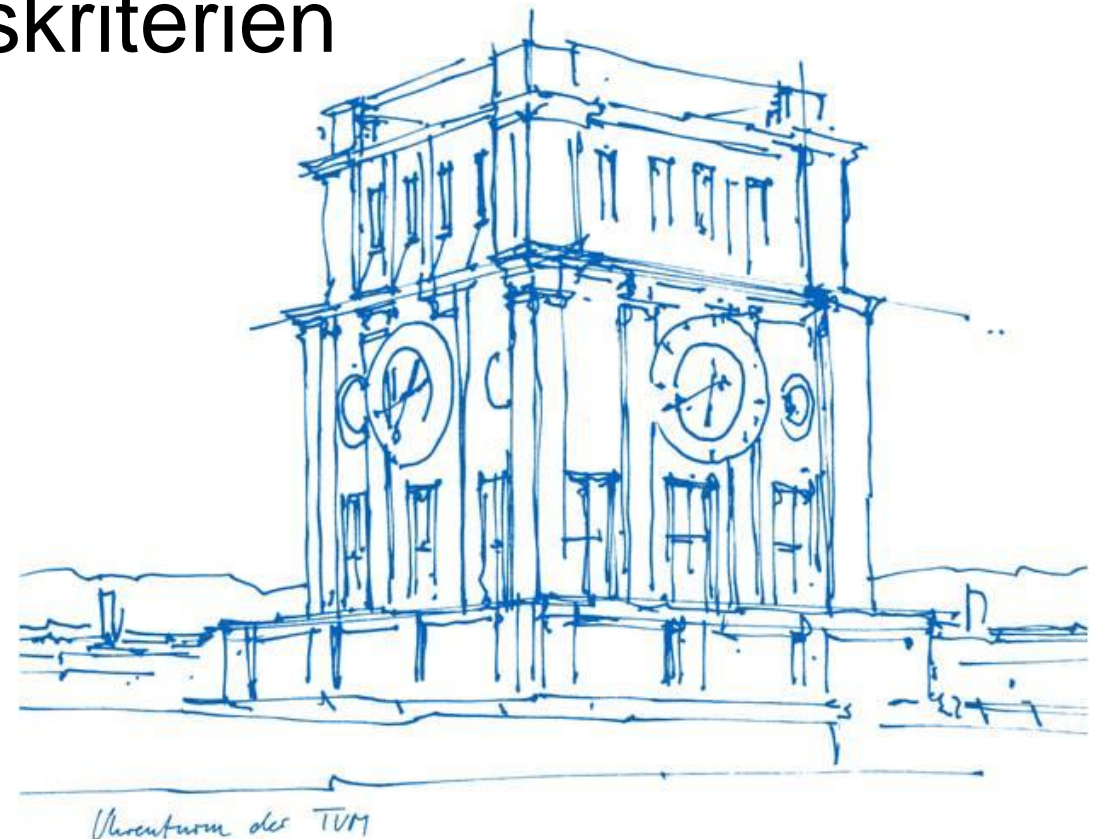


Auswirkungen asymmetrisch angeschlossener dezentraler Erzeugungsanlagen auf die Effektivität gängiger Netzplanungskriterien

Christian Aigner, Christoph Simon, Rolf Witzmann
Technische Universität München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur für Elektrische Energieversorgungsnetze
Graz, 12. Februar 2020



Agenda

1. Motivation
2. Methodik
3. Netzplanung
4. Ergebnisse
5. Zusammenfassung

Motivation

- Großer Anteil an Klein- und Kleinstanlagen im Niederspannungsnetz, ca. 40% der installierten PV-Kleinanlagen unter 7 kW_p
- Ein- und Zweiphasiger Anschluss laut VDE AR-N 4105 bis zu einer Schiefastgrenze von aktuell 4,6 kVA ausdrücklich erlaubt
- Netzplanung seitens VNB i.d.R. nur symmetrisch (mangelnde Kenntnis der Situation in der Kundenanlage)
- Annahme: „Durchmischung“ der Außenleiter im Ortsnetz
- ABER: Untersuchung [2] zeigt: Großteil der Anlagen an Phase 1 angeschlossen

Fragestellung:

Wie ist die Auswirkung starker asymmetrischer Einspeisung auf:

- Spannungsqualität
- Betriebsmittelauslastung

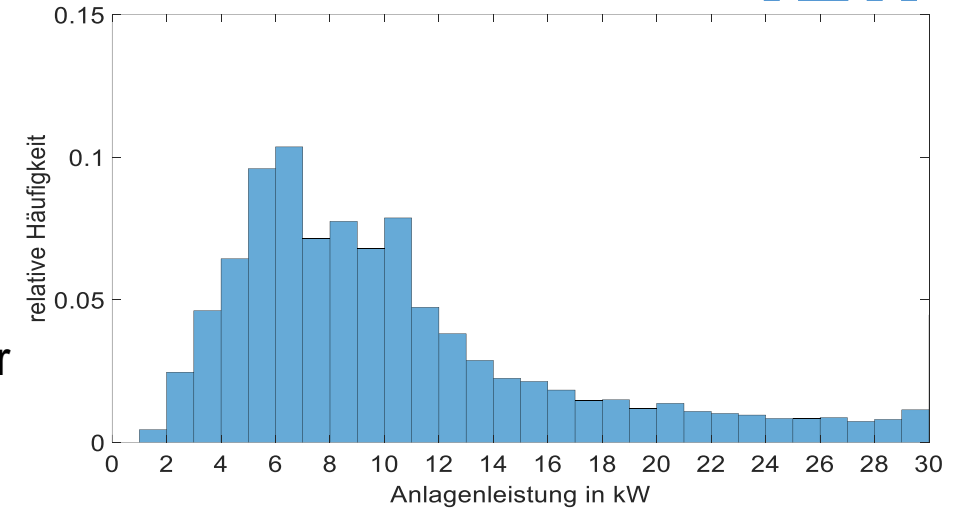


Abbildung: Leistungsverteilung PV-Kleinanlagen bis 30kWp in D [1]

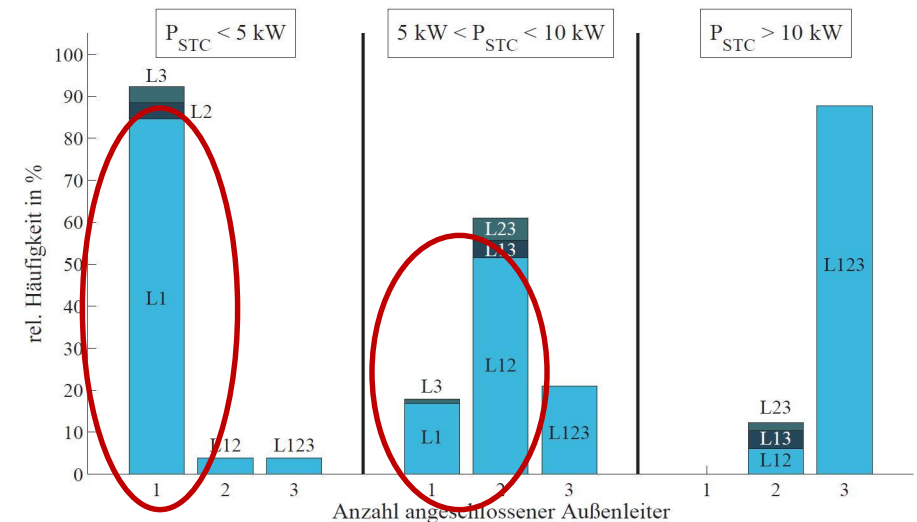


Abbildung: Außenleiterteilung bei PV-Anlagen [2]

Methodik

Netzmodell

- Spannungsebenen-übergreifendes Netzmodell [3]
- Ländlich geprägter Mittelspannungsstrang: 33 individuelle NS-Ortsnetze, insgesamt 1208 Netzverknüpfungspunkte (NVP) in der NS, 3 NVP in der MS
- Stranglänge: 20 km (Kabel u. Freileitung)
- Ortsnetze Typ Land und Dorf [4]
- Ortsnetztransformatoren (160kVA...630 kVA, Dyn5)

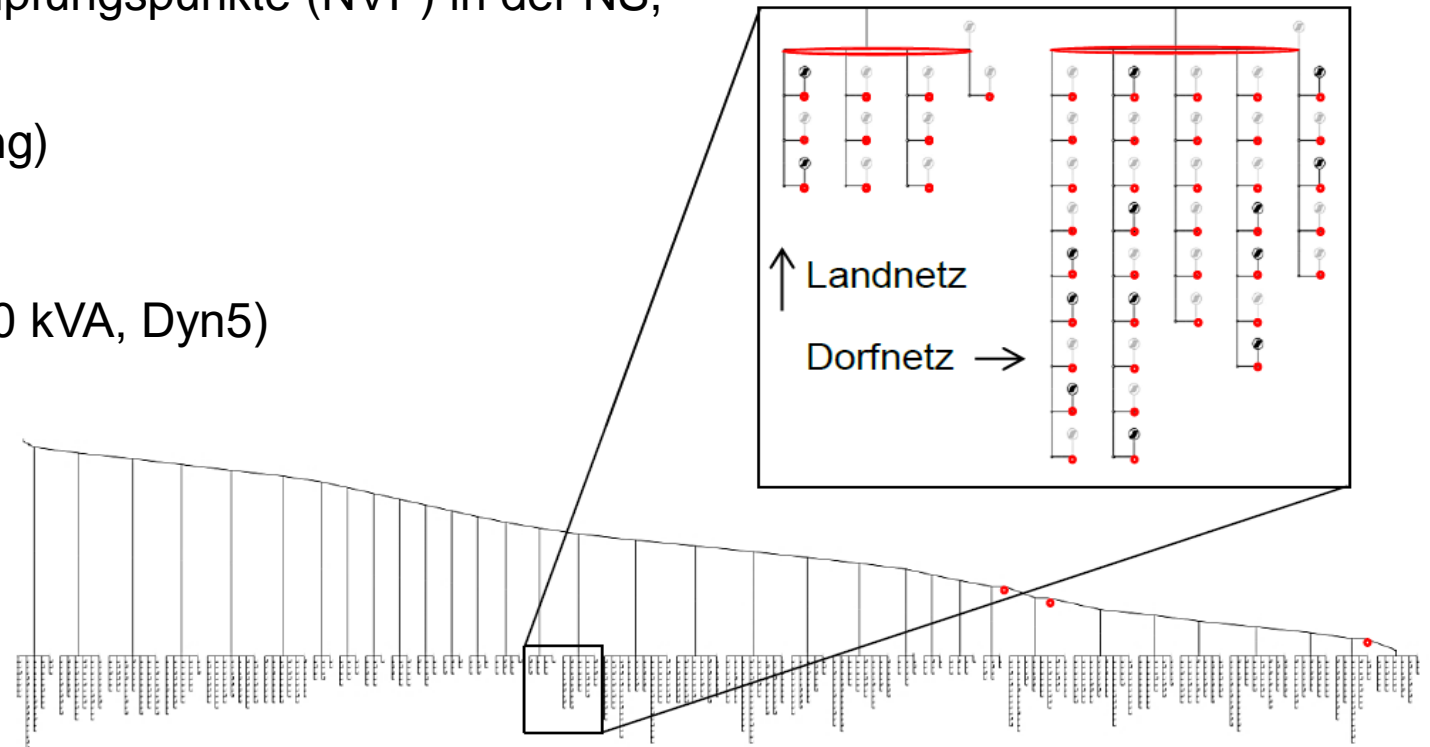
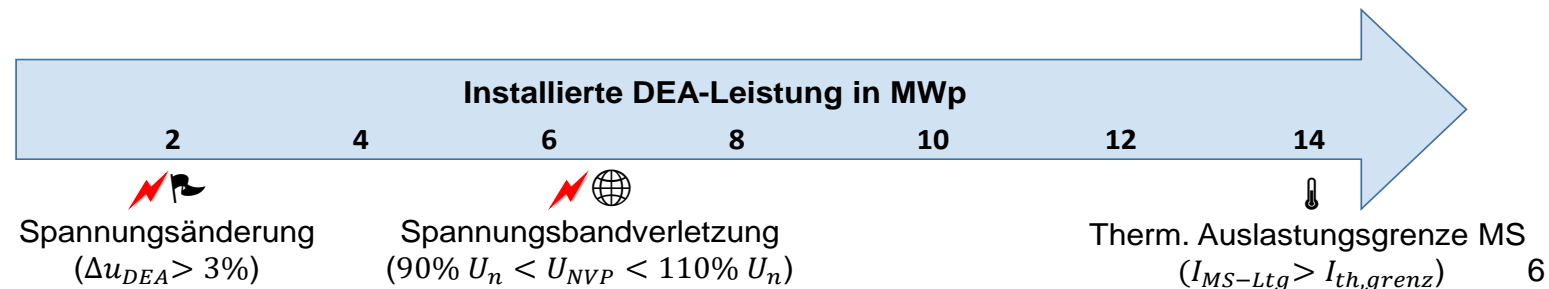
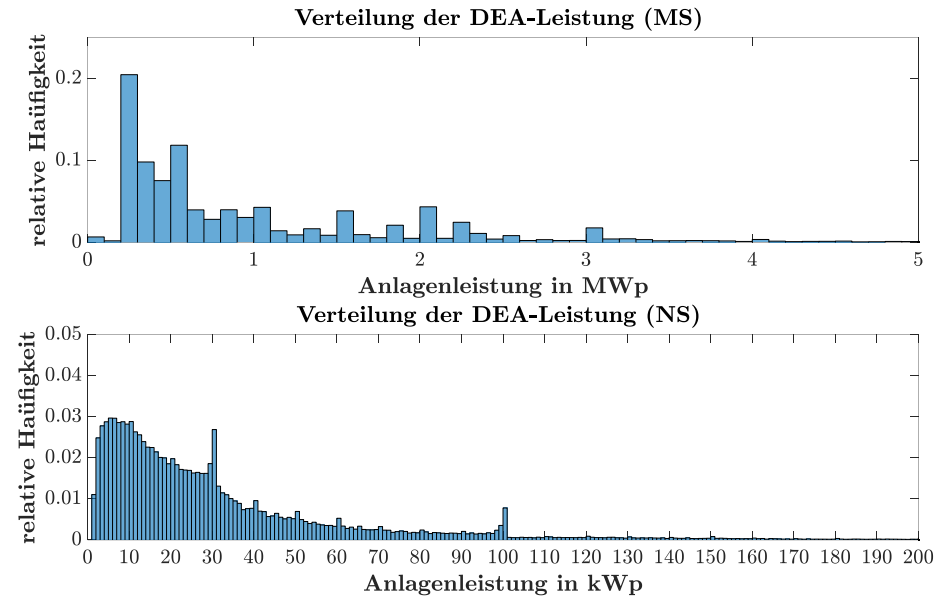


Abbildung: Spannungsebenenübergreifendes Netzmodell [3]

Versorgungsaufgabe

- Verbraucher:
lastfreier Fall (Worst Case für die Netzplanung)
- Erzeuger:
DEA-Leistungsverteilung: deutsches DEA-Register [1]
Gleichzeitigkeitsfaktor: 1
→ NS: Vornehmlich Typ 2 PV-Anlagen
Anlagenstandorte:
→ Zufällige Verteilung der Anlagen auf die NVP (Berechnung 1000 zufälliger Kombinationen)
- Durchdringungsgrade:
Von minimalem Integrationspotenzial bis zu theoretisch maximal möglicher DEA-Leistung im Strang, nach gängigen Netzplanungskriterien



Anschlusszenarien

- Auswertung aus Lastgängen in div. NS-Ortsnetzen:
→Starke Bevorzugung des Außenleiters L1 [2]
- Bildung folgender 4 Anschlusszenarien:
- Szenario 0: symmetrischer Anschluss aller DEA/zufällige Verteilung auf die 3 Phasen
- Szenario 1: S_4,6kVA: alle DEA mit $S \leq 4,6$ kVA (20A @ 230V) werden gemäß der Schiefastgrenze nach VDE-AR-N 4105 an den Außenleiter L1 angeschlossen
- Szenario 2: S_7,4kVA: alle DEA mit $S \leq 7,4$ kVA (32A @ 230V) werden an den Außenleiter L1 angeschlossen
- Szenario 3: reale Verteilung nach Diagramm

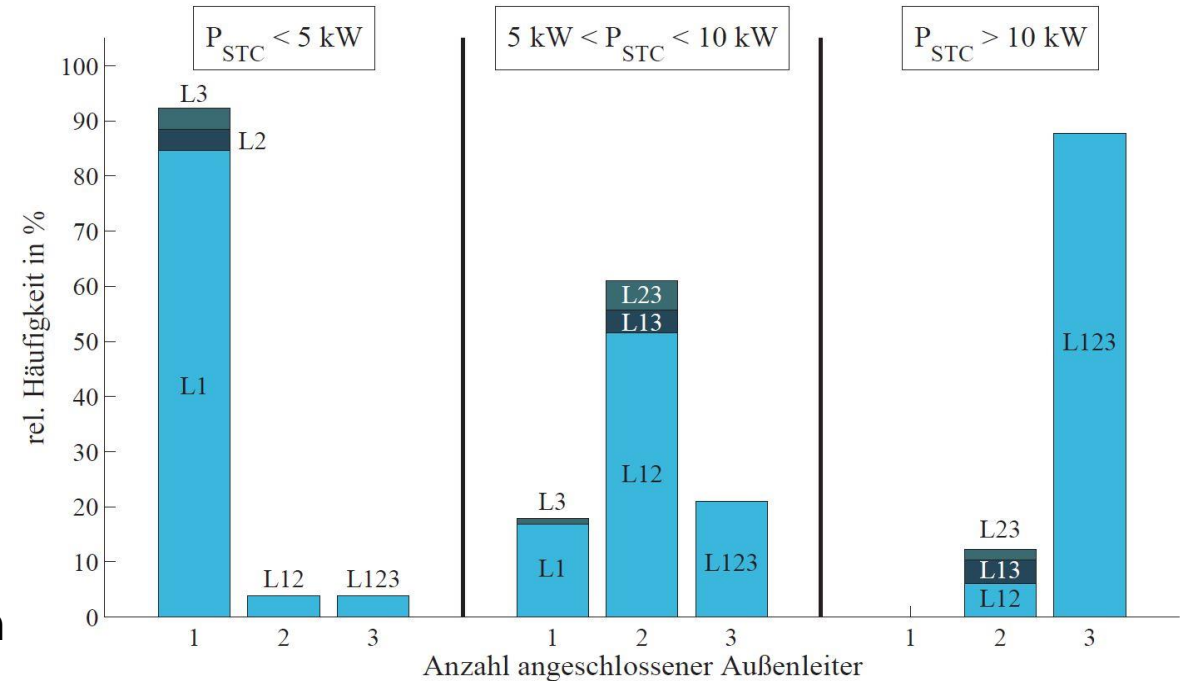


Abbildung: Außenleiteraufteilung bei PV-Anlagen [2]

Szenario	S_4,6 kVA	S_7,4 kVA	S_zufDis
Verteilung auf Außenleiter	$\leq 4,6$ kVA: 100% L1 $> 4,6$ kVA: 100% L123	$\leq 7,4$ kVA: 100% L1 $> 7,4$ kVA: 100% L123	s. Abb.

Netzplanung

Spannungsqualität (stationär)

- Absolute Spannungshöhe:

EN 50160: $U_n \pm 10\%$

- Spannungsänderung durch DEA:

VDE-AR-N 4105: $\Delta u_{DEA,NS} \leq 3\%$

VDE-AR-N 4110: $\Delta u_{DEA,MS} \leq 2\%$

- Spannungsunsymmetrie:

EN 50160: $u_{unsym} = \frac{U_{gegensystem}}{U_{mitsystem}} \leq 2\%$

Pauschal berücksichtigt mit 1% U_n

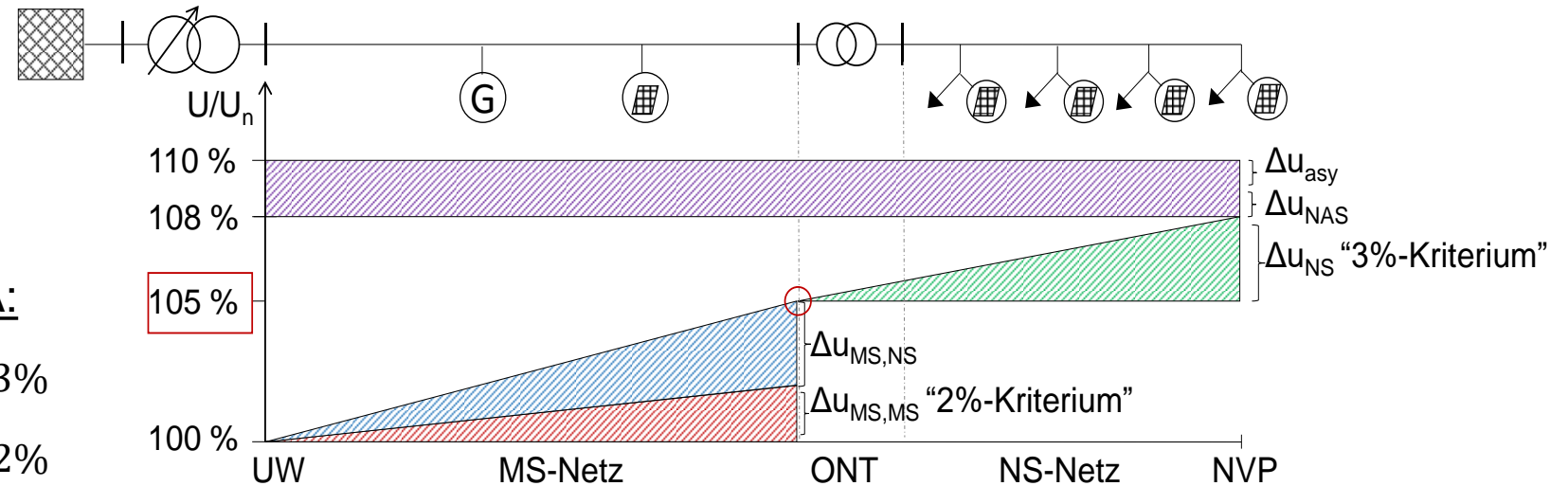


Abbildung: Spannungsbandaufteilung im Verteilnetz, in Anlehnung an [2]

- Spannungshaltung:

Leitungsverstärkung

Blindleistungsbereitstellung der DEA (VDE AR-N 4105)

regelbare Ortsnetztransformatoren

Netzverstärkungsmaßnahmen

- Leistungserhöhung Ortsnetztransformatoren:

Bei thermischer Überlastung:

symmetrischer Fall:

$$S_{max,ONT} = 120\% S_{N,ONT}$$

→ Bei Überschreitung Austausch der Ortsnetztransformatoren

unsymmetrischer Fall: Maximale Belastung einer Wicklung

$$S_{max,L} = \frac{1}{3} S_{max,ONT} = 40\% S_{N,ONT}$$

- Leitungsverstärkung:

Bei thermischer Überlastung (un)symmetrischer Fall:

$$I_{max,Leiter} = 100\% I_{therm,Leiter}$$

Bei Verletzung von Spannungsgrenzwerten (symmetrischer Fall)

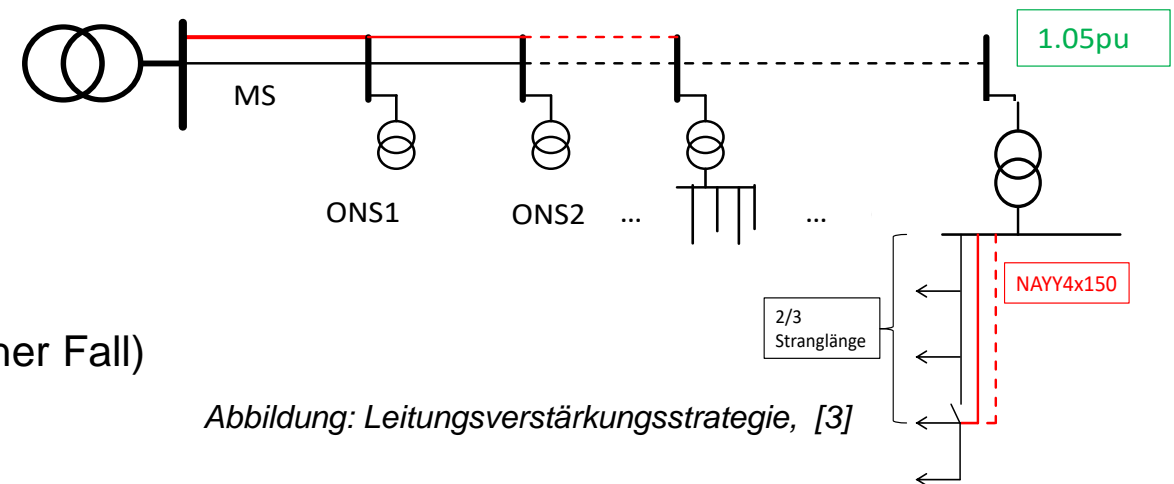
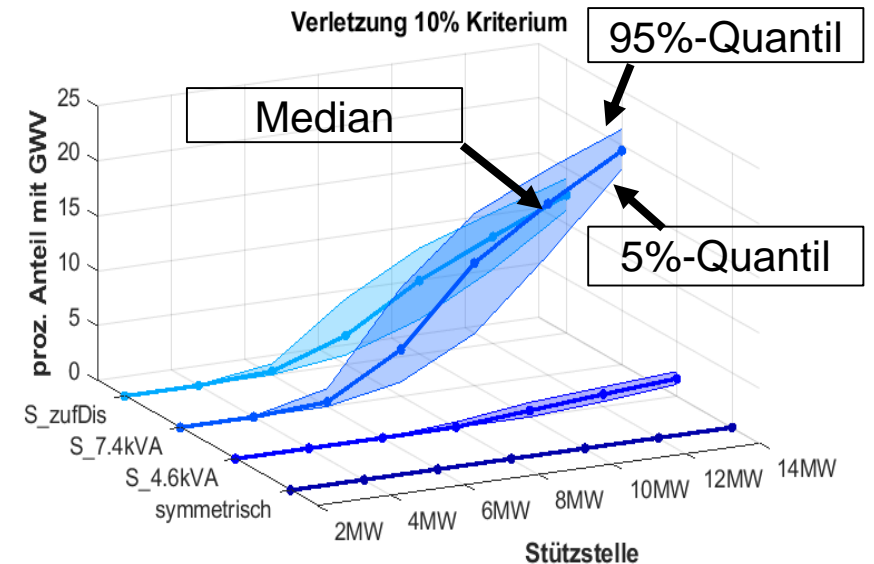
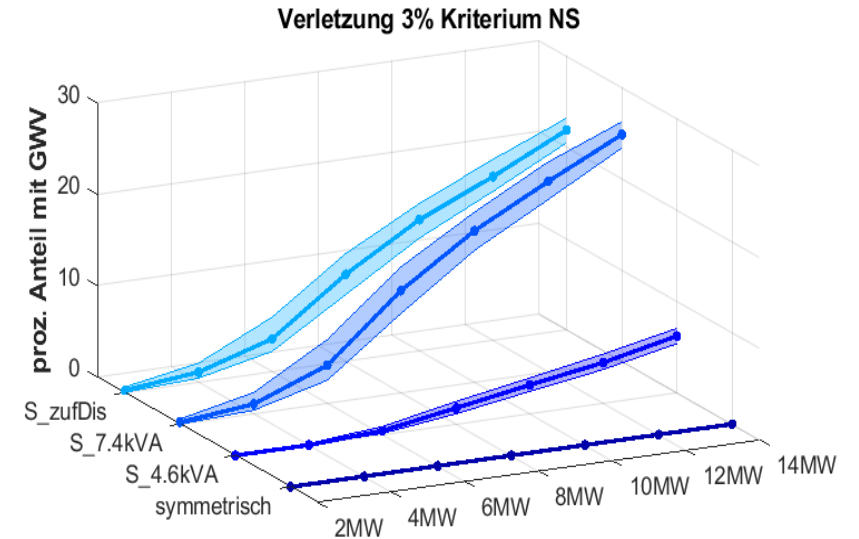
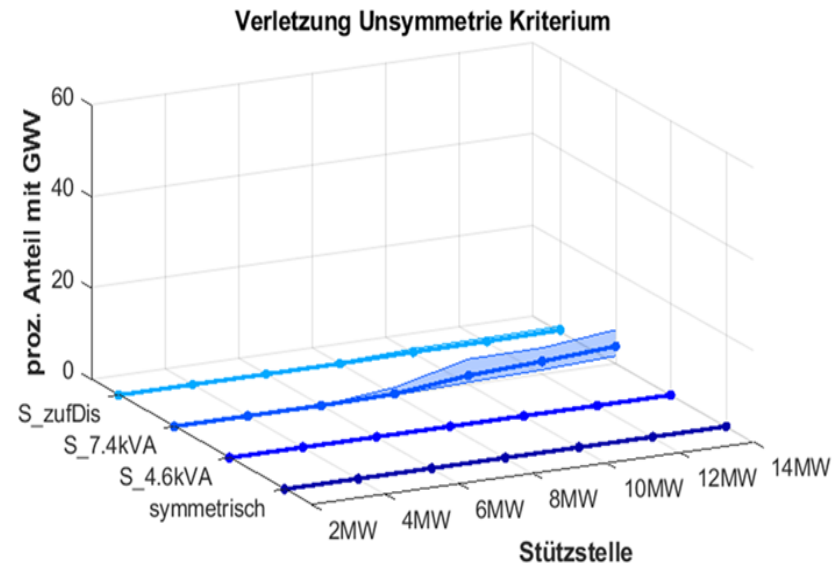


Abbildung: Leitungsverstärkungsstrategie, [3]

Ergebnisse

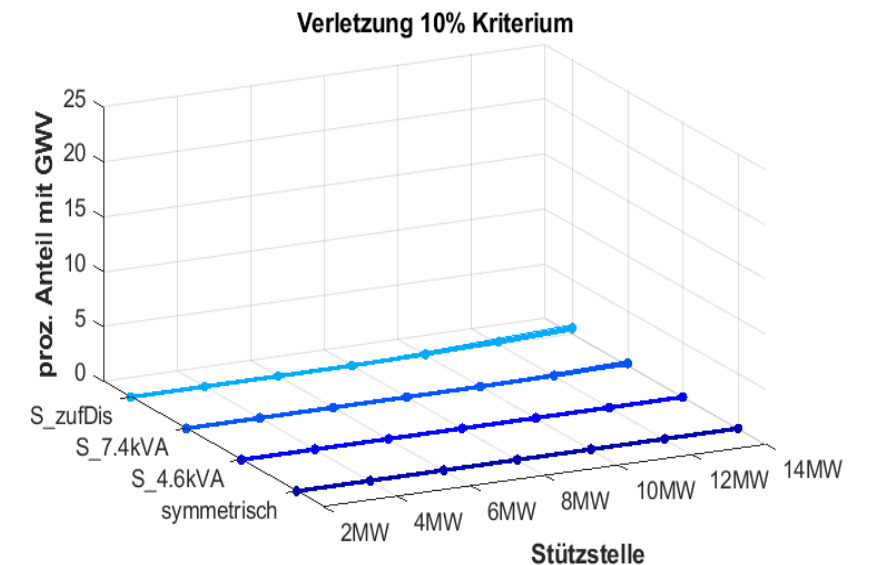
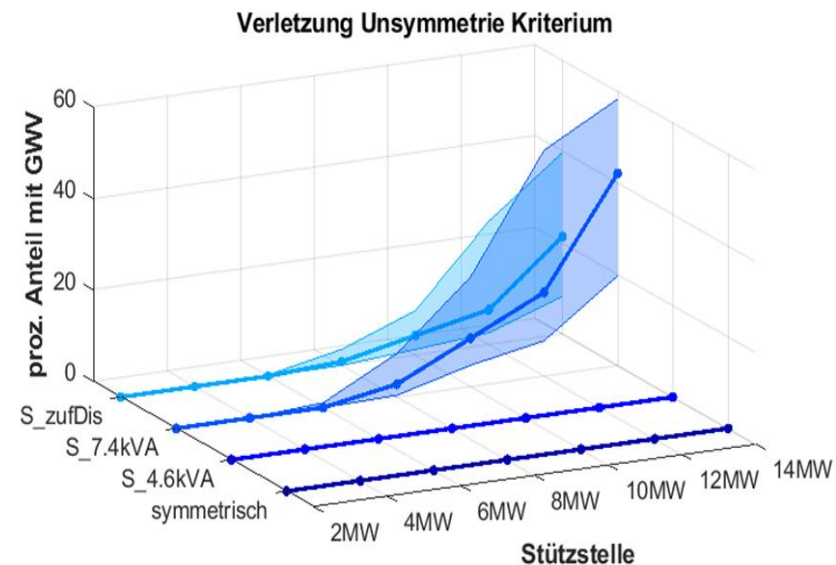
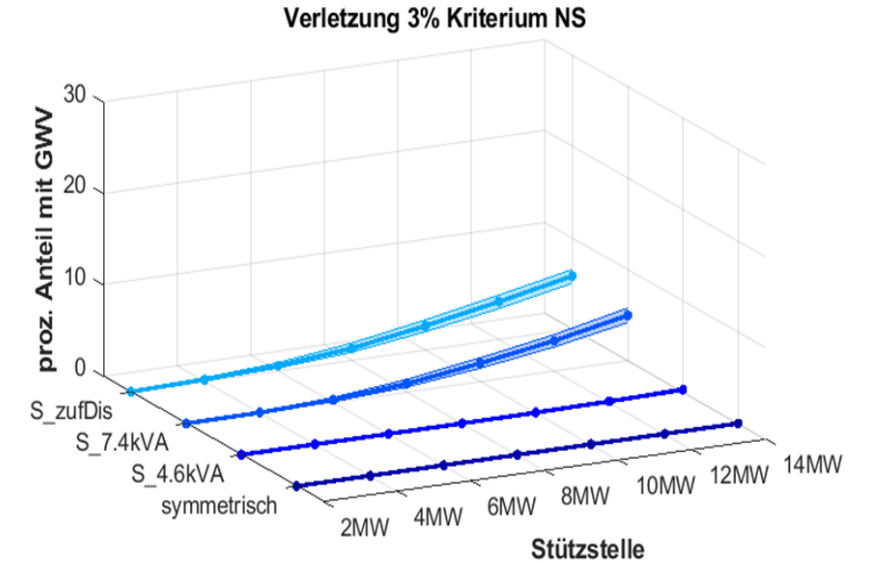
Spannungshaltung durch Leitungsverstärkung

- Asymmetrische Einspeisung:
Verletzung der zulässigen Spannungsanhebung von 3% auf L1
- Bei Überschreitung der Schiefastgrenze:
 - Spannungsbandverletzungen in bis zu 20% der Knoten
 - Nur seltene Verletzung der Spannungsunsymmetrie



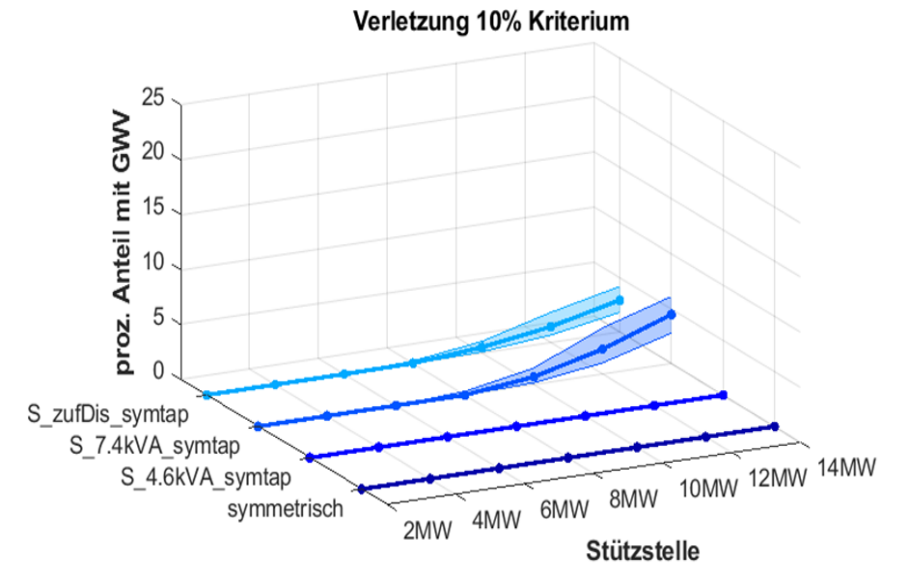
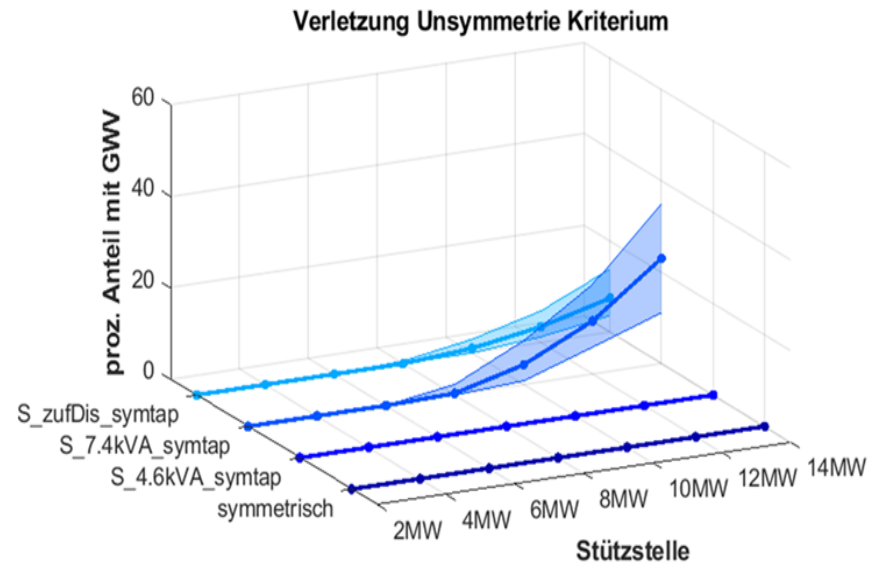
Blindleistungsbereitstellung zur Spannungshaltung

- Keine Spannungsbandverletzungen nach EN50160
- Bei Überschreitung der Schiefastgrenze:
Zul. Spannungsanhebung von 3% auf L1 überschritten
Massive Überschreitung der Spannungsunsymmetrie



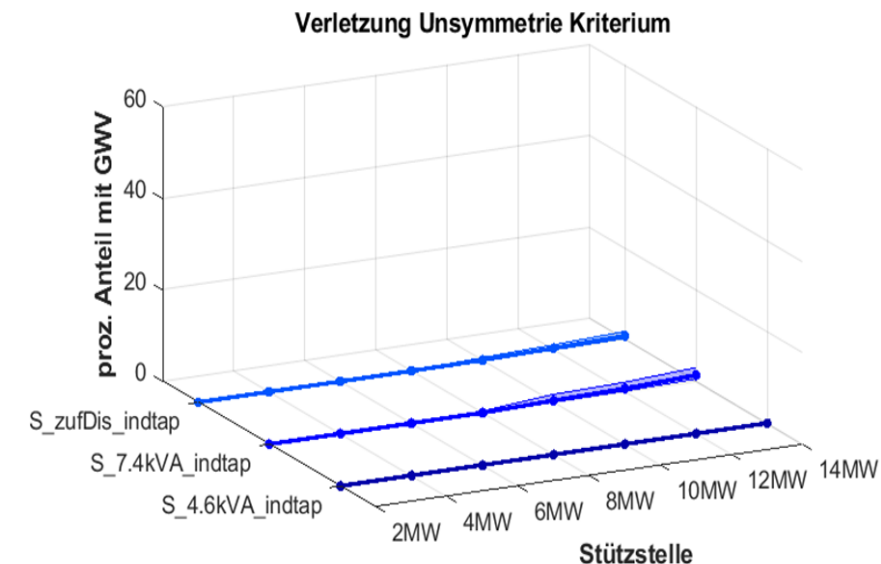
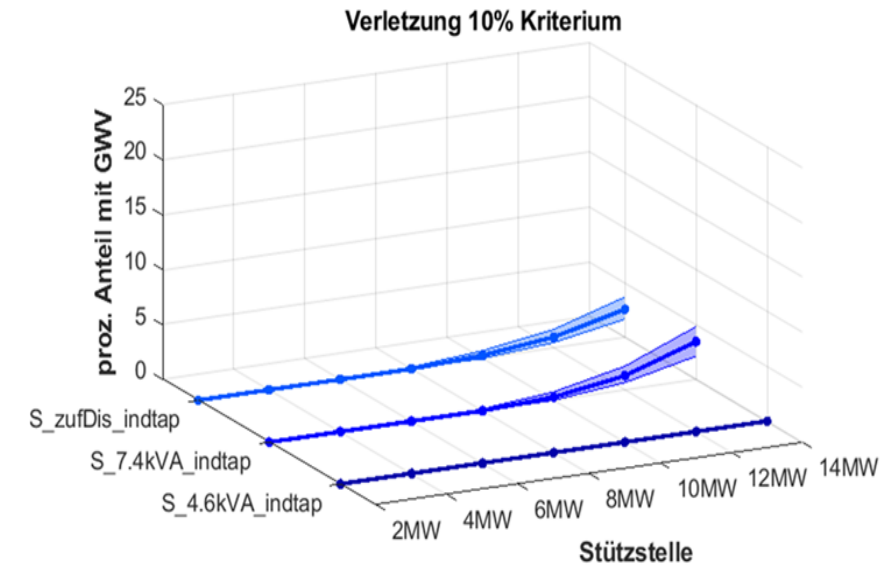
regelbare Ortsnetztransformatoren

- Stufenlose Regelung auf die Sammelschienenenspannung ($U_{NS}=100\%U_n$)
- Einhaltung der Schiefastgrenze: kein negativer Einfluss auf die Spannungsqualität
- Überschreitung der zulässigen Schiefastgrenze:
 - Verletzung des zulässigen Spannungsbandes bei wenigen NVP
 - Verletzung des 2%-Unsymmetriekriteriums in bis zu 20% der Fälle



rONTs mit phasenselektiver Stufenstellung

- Ursache hoher Spannungsunsymmetrie: wenig ausgebautes Mittelspannungsnetz [5]
- Behebung der Spannungsunsymmetrie durch phasenindividuelles Übersetzungsverhältnis möglich
- Hier: Messung der Spannung und Anpassen des (stufenlosen) Übersetzungsverhältnisses pro Phase
- Der Unsymmetrie kann sehr gut entgegengewirkt werden
- wenigen Spannungsbandüberschreitungen, die erst im Ortsnetz entstehen kann nicht entgegengewirkt werden

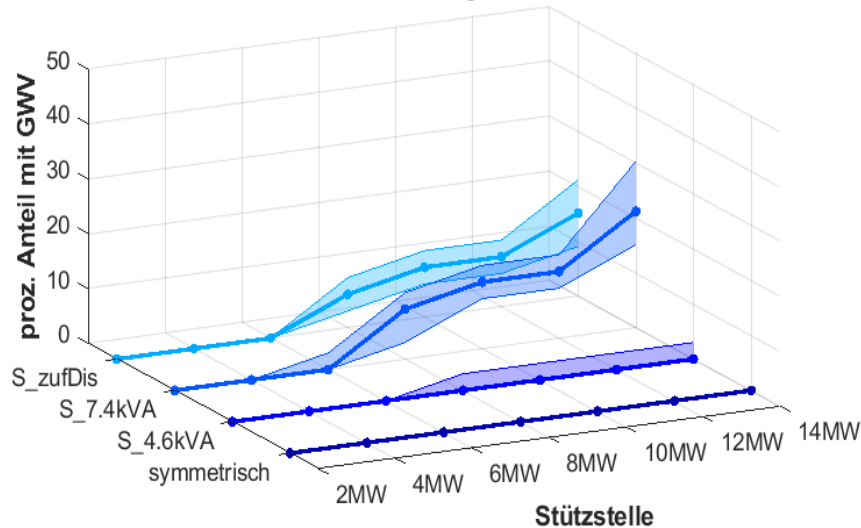


Betriebsmittelüberlastung

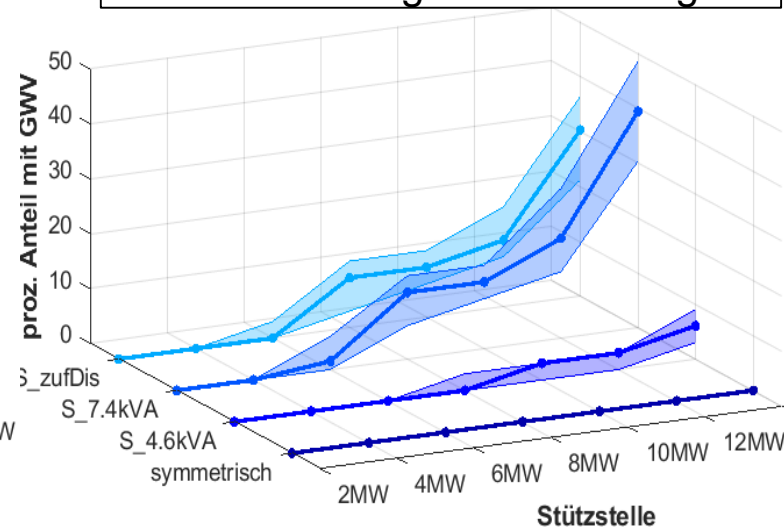
- starke Bevorzugung eines Außenleiters hat Überlastungen der Ortsnetztransformatoren zur Folge
- Überschreiten der Schiefastgrenze hat maßgeblichen Einfluss
- Eine Überlastung der einzelnen Leitungsstränge ist vernachlässigbar

Spannungshaltungskonzept

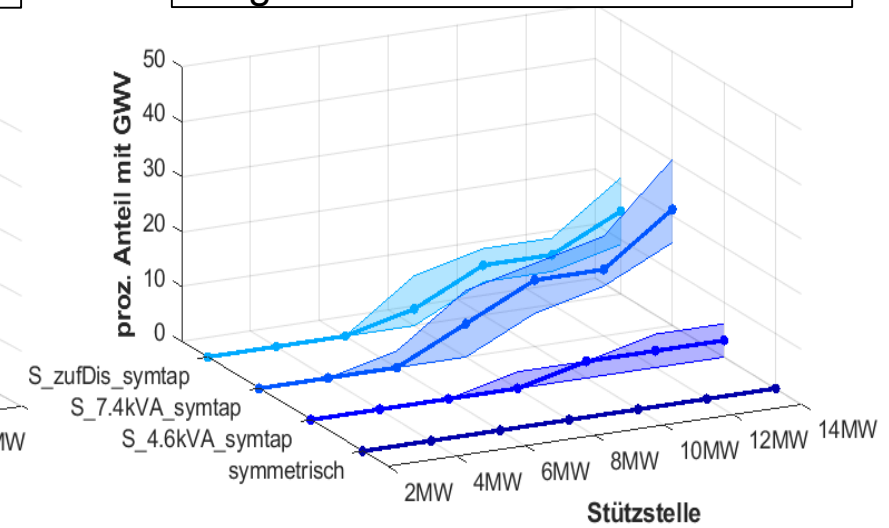
Leitungsverstärkung



Blindleistungsbereitstellung



Regelbarer Ortsnetztransformator



Zusammenfassung

Zusammenfassung

- In NS-Ortsnetzen besteht die Gefahr starker Schiefasten
- Schiefastgrenze von 4,6 kVA i.d.R. ausreichend für eine symmetrische Netzplanung
- Erkennbare Folgen der Überschreitung der Schiefastgrenze von 4,6 kVA:
 - Überlastung der Ortsnetztransformatoren
 - Spannungsbandverletzungen
 - Spannungsunsymmetrie
- Spannungsasymmetrie überträgt sich ins und vom Mittelspannungsnetz
→rONTs mit individueller Stufenschaltung für jede Phase können sinnvoll sein
- Zusätzliche Gefahr der Unterwanderung der 4,6-kVA-Schiefastgrenze durch einphasige Ladeeinrichtungen höherer Leistungen (7,4 kW) bei E-Mobilität

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Referenzen

- [1] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS): EEG-Anlagenregister von EnergyMap.info 2015, <http://www.energymap.info/>, letzter Aufruf: 09.01.2020
- [2] Pardatscher, R.: Planungskriterien und Spannungsqualität in Mittel- und Niederspannungsnetzen mit hoher Photovoltaik-Einspeisung, Dissertation, TU-München, 2015
- [3] Aigner, C., Witzmann, R.: Influence of power system planning criteria on hosting capacity of distribution grids with high DER-penetration, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy storage systems (NEIS), Hamburg, 20.-21. September 2018
- [4] Lindner, M. et al.: Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, 10.-12. Februar 2016
- [5] Aigner, C., Witzmann, R.: Effectivity of active voltage control concepts in distribution grids, CIRED, Madrid, 03.-06. Juni 2019