

Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung

*Marco Lindner¹, *Christian Aigner¹, Rolf Witzmann¹, Frank Wirtz², Ibrahim Berber³, Markus Gödde⁴, Robert Frings⁴

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird ein detailliertes Verfahren zur Erstellung repräsentativer, synthetischer Netze für die Niederspannungsebene vorgestellt. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die korrekte Nachbildung auslegungsrelevanter Spannungen gelegt. Abschließend werden die aus einer breiten Datenbasis entstandenen Musternetze präsentiert.

Keywords: Niederspannung, Musternetz, Spannungshaltung, U-Control

1 Einleitung

Als Herzstück der deutschen Energiewende stellt die Integration von Erzeugungsanlagen fluktuierender, erneuerbarer Energien Verteilnetzbetreiber vor zunehmend größere Herausforderungen. Um den klassischen, brandherdorientierten Netzausbau zu vermeiden wird aktuell eine Vielzahl an Untersuchungen zu innovativen Methoden der statischen Spannungshaltung sowie Verteilnetzflexibilisierung vorangetrieben. Verschiedenste Studien stützen Ihre Aussagen auf zum Teil stark generalisierte und vereinfachte Verteilnetzmodelle oder Ausschnitte vereinzelter, realer Verteilnetze. Beide Lösungsansätze führen zu Ergebnissen, die nicht ohne Weiteres auf andere Netze und schon gar nicht auf ein ganzes Land übertragen werden können. Dies führt neben der Lösungssuche für regionale Fragestellungen vor allem bei Normen- oder Richtlinienempfehlungen zu Problemen. Die Modellbildung sollte daher gezielt dem Untersuchungszweck angepasst werden und alle gewünschten Effekte beinhalten.

Im Projekt „U-Control“ liegt der Untersuchungsschwerpunkt auf dem Verhalten verschiedener Verfahren der statischen Spannungshaltung, welche in Verteilnetzen unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten beleuchtet werden. Daher trägt die korrekte Nachbildung der Spannungsverhältnisse im Netz maßgeblich zur Modellbildung der Mittel- und Niederspannungsnetze bei. In dieser Arbeit werden sowohl Methodik als auch Ergebnisse der Musternetzbildung für die Niederspannungsebene präsentiert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

¹ Professur für elektrische Energieversorgungsnetze, TU München, Arcisstr. 21, 80333 München, marco.lindner@tum.de, www.een.ei.tum.de

² Bayernwerk AG, Lilienthalstraße 7, 93049 Regensburg, www.bayernwerk.de

³ Netze BW GmbH, Schelmenwasenstraße 15, 70567 Stuttgart, www.netze-bw.de

⁴ INFRAWEST GmbH, Lombardenstraße 12-22, 52070 Aachen, www.infrawest.de

2 Datengrundlage

Die Datengrundlage der Musternetzbildung besteht aus 358 digitalisierten Niederspannungsnetzen mit insgesamt 1550 Niederspannungssträngen aus unterschiedlichen Regionen Deutschlands. Neben einem Großteil an stark verkabelten, ländlichen Netzen kommen auch Netze mit hohem Freileitungsanteil oder (vor-)städtischem Charakter vor. Ziel der Musternetzerzeugung war es, für jede Netzklasse und regionalen Netztyp (kabeldominiert, freileitungsdominiert) ein Musternetz zu definieren. Dazu wurden folgende Schritte durchlaufen:

- I. Automatisierte Plausibilisierung der digitalen Netzpläne und Umwandlung der Ring- oder Maschennetze in einfach gespeiste, radiale Netze durch Trennen von Leitungen mit geringer Auslastung. Stark vermaschte Stadtnetze, bei denen dieses Vorgehen unmöglich war, wurden aus Gründen nicht vorhandener Spannungsprobleme nicht berücksichtigt. Diese strukturelle Veränderung ist nahezu unschädlich im Sinne des auftretenden Spannungsprofils.
- II. Automatisierte Auswertung der elektrischen und geografischen Netzparameter, wie zum Beispiel des mittleren geografischen Hausabstands der vier nächsten Hausanschlüsse, den Leitungsparametern, den Last- und Einspeisedaten, den Transformatorparametern sowie des von Kerber eingeführten Verbrauchersummenwiderstands (VSW) [1]. Alle Leitungen wurden bis zum Hausanschluss detailliert betrachtet und anhand der Querschnitte, Längen und Leitungstypen in die Modellbildung integriert. Die Ergebnisstruktur besteht aus einem Datensatz pro Niederspannungsstrang.
- III. Transformatorscharfe Klassifizierung der ermittelten Datensätze
- IV. Statistische Auswertung der erstellten Netzklassen sowie Erstellung von empirischen Verteilungsfunktionen zur späteren Musternetzbildung.

Insgesamt wurden 29 elektrische und 2 geografische Netzparameter stranggenau ausgewertet und in einer Datenbank erfasst. Zur Auswertung stehen folglich 1550 Datensätze bereit.

3 Klassifizierung

Wiederholend kontrovers diskutiert wird das Thema der Klassifizierung von elektrischen Energieversorgungsnetzen. Hierbei werden die Eingangsdaten kategorisiert und in Klassen eingeteilt. Kerber verfolgt einen Ansatz der subjektiven Einteilung der Netze durch Luftbildaufnahmen und Bevölkerungszahlen [1], welcher dem in der DENA-Studie angesetzten „Stadt-, Land-, Übergangsprinzip“ sehr nahe kommt. Den so ermittelten Klassen sind im Nachhinein die Klassifizierungsparameter in Tabelle 1, Zeile 1 entnommen worden. Walker distanziert sich vom „Stadt-, Land-, Übergangsprinzip“ und begegnet der Problematik ergebnisoffen mit Hilfe einer mathematischen Faktoranalyse mit nachgelagerter Plausibilitätsprüfung sowie einer darauf aufbauenden Clusteranalyse nach der Ward Methode [2]. Ein Auszug der ermittelten Klassifizierungsparameter ist in Tabelle 1, Zeile 2 dargestellt. Dieser komplexe Ansatz ist fähig, eine mathematisch genauere Klasseneinteilung zu erzeugen, jedoch besitzen subjektive Parameter (wie etwa die optische Prägung der Netze durch demografische Faktoren) hier keine Bedeutung. Es ist zu

erwähnen, dass jede Art von Klasseneinteilung Fehleinschätzungen liefert, da auch in der Realität ein fließender Übergang zwischen den Klassen besteht. Daher ist eine individuelle Klassifizierungsmethode mit Blick auf den Untersuchungszweck zu empfehlen. Zudem ist von einer übermäßigen Anzahl an Klassen sowie dem damit einhergehenden mehrdimensionalen Lösungsempfehlungsraum abzuraten.

Wie oben erwähnt, ist der Untersuchungszweck der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierung die statische Spannungshaltung. Um den maximalen Spannungsfall in einem Niederspannungsnetz nachzubilden kann man sich dem von Kerber eingeführten Verbrauchersummenwiderstand bedienen. Der „Spearman“-Korrelationskoeffizient (SKK) gibt den rangspezifischen Grad der Korrelation zweier Eingangsparameter an und gleicht bis auf die vorangehende Umwandlung konkreter Werte in Ränge dem linearen „Pearson“-Korrelationskoeffizient. Bei stranggenauer Betrachtung ergibt sich zwischen Verbrauchersummenwiderstand und dem Produkt aus mittlerem, geografischen Hausabstand und Anzahl der Hausanschlüsse ein SKK von 86,8 % und bestätigt somit die Vermutung eines hohen Spannungsfalls bei hoher geografischer Distanz der Hausanschlüsse untereinander. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der mittlere, geografische Hausabstand als primärer Klassifizierungsparameter von Kerber übernommen. Bei einem mittleren Hausabstand von bis zu 25 m wird das Netz der „Vorstadt“-Klasse zugeordnet, zwischen 25 und 50 m der „Dorf“-Klasse und ab 50 m der Klasse „Land“ [3].

Übersicht der Klassifizierungsparameter

Kerber [1]	Mittlerer, geografischer Hausabstand	Bemessungsscheinleistung des Transformators	Verbraucherspezifische Transformatorleistung
Walker [2]	Leitungssummenlänge	Bemessungsscheinleistung des Transformators	Verbraucherspezifischer Widerstand
U-Control	Mittlerer, geografischer Hausabstand	Nur bei Unsicherheit: Bemessungsscheinleistung des Transformators	Mittlerer, geografischer Hausabstand
<i>Korrelation (Spearman)</i>	88,38 %	-	73,54 %

Tabelle 1: Übersicht der Klassifizierungsparameter

Tabelle 1 listet die im Projekt „U-Control“ gewählten Klassifizierungsparameter und zeigt die zugehörigen, numerisch ausgewerteten „Spearman“-Korrelationskoeffizienten zu den Parametern der vorhergegangenen Arbeiten an. Die Berechnungen wurden ohne Klasseneinteilung vorgenommen. Der SKK der beiden Parameter „Verbraucherspezifische Transformatorleistung“ und „Mittlerer, geografischer Hausabstand“ liegt bei 73,35%. Es gibt allerdings auch Klassifizierungsparameter, die eine hohe Sensibilität auf marginale, strukturelle Veränderungen aufweisen und sich daher zwar nicht als falsch, jedoch als ungeeignet herausstellen. Beispielhaft hat sich die Bemessungsscheinleistung der Transformatoren durch den Ausbau der erneuerbaren Energien vor allem in ländlichen Gebieten stark erhöht und ist somit nicht mehr klassentypisch im Sinne des „Stadt-, Land-, Übergangsprinzips“. Abbildung 1 vergleicht die Auswertung der Bemessungsscheinleistung des Transformators durch Kerber [1] mit der Datenbasis dieser Arbeit nach Klassifizierung durch den mittleren, geografischen Hausabstand. Als zusätzlicher Klassifizierungsparameter

kann die Bemessungsscheinleistung der Transformatoren daher lediglich bei Unsicherheit der anderen Parameter herangezogen werden.

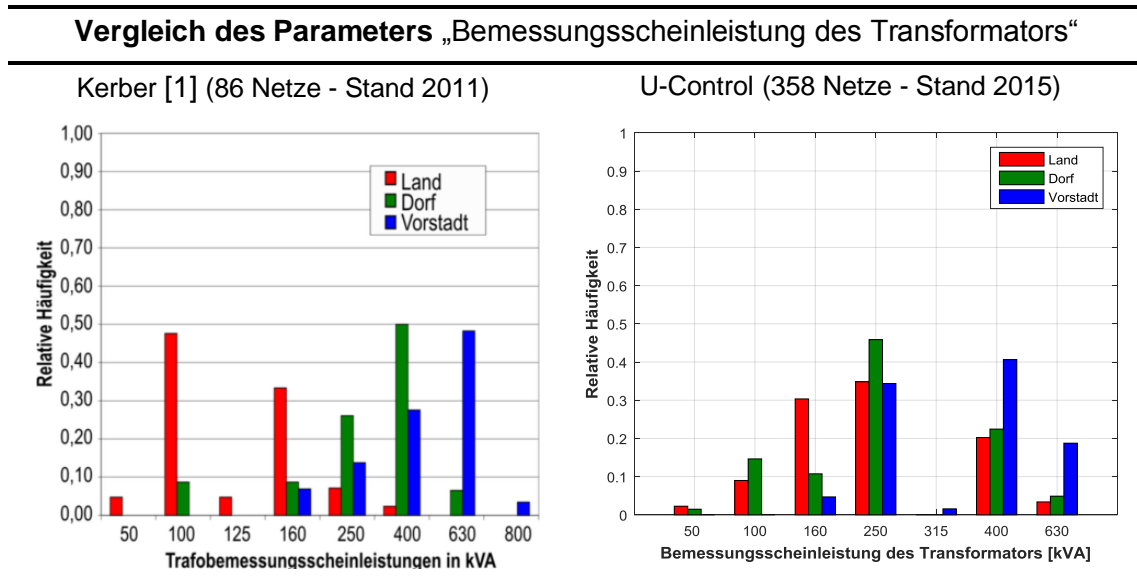


Abbildung 1: Vergleich des Parameters "Bemessungsscheinleistung des Transformators"

Zur korrekten Nachbildung von Aussiedlern und Industrielasten wird jede Netzklasse zusätzlich in zwei Subklassen unterteilt. Die Subklasse „Direktanschlüsse“ beinhaltet alle Netzstränge, die nur einen Netzverknüpfungspunkt (NVP) aufweisen. Ab einer festgelegten Entfernung dieses einzelnen NVPs zu den restlichen, im gesamten Transformatorgebiet vorkommenden, NVP wird der Netzstrang zusätzlich als Aussiedler markiert. Abbildung 2 zeigt die Auftrittswahrscheinlichkeit von Direktanschlüssen in den untersuchten Netzklassen.

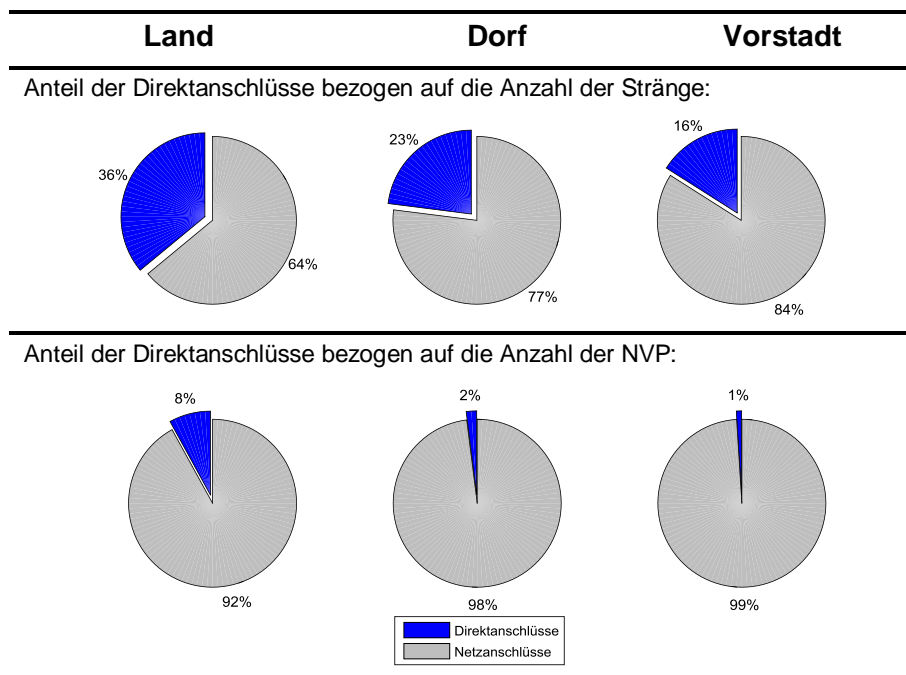


Abbildung 2: Auftrittswahrscheinlichkeit von Direktanschlüssen

Je nach Auftrittswahrscheinlichkeit in der jeweiligen Klasse werden Direktanschlüsse (Aussiedler, Industrielasten) in der Netzerzeugung berücksichtigt. Diese zusätzliche Einteilung ist für eine repräsentative Erzeugung von synthetischen Netzen sehr wichtig, da sich Stränge mit Direktanschlüssen aufgrund des viel geringeren VSW am unteren Ende der gemeinsamen Verteilungsfunktion „ansammeln“ und diese für ein stochastisches Ziehen verzerren würden. Das Resultat wären Netze mit einer übermäßigen Anzahl an kurzen Strängen und Direktanschlüssen.

4 Methodik

4.1 Allgemein

Mit Hilfe von empirischen Verteilungsfunktionen der klassifizierten Daten können synthetische Netze erstellt werden. Dabei werden vorab die Transformatorgröße und die Auslastung des zu erstellenden Netzes per Quantil vorgegeben. Über das Quantil werden die Anzahl der NVP und damit die Auslastung des Transformators errechnet. Anschließend werden iterativ Netzstränge aus der Verteilungsfunktion des VSW und den Verteilungsfunktionen der Leitungsparameter erzeugt und dem Transformator zugewiesen. Gemäß der Auftrittswahrscheinlichkeit von Direktanschlüssen wird zwischen den Subklassen gewechselt. Dies wird wiederholt, bis die gewünschte Anzahl an NVP erreicht ist.

4.2 Leitungsparameter

Das stochastische Ziehen aus den Verteilungsfunktionen der Leitungsparameter (Leitungstyp, Leitungsquerschnitt) erfolgt nach einem Verfahren, welches die Repräsentativität der synthetischen Netze gegenüber der Datenbasis aufrechterhält. Dabei werden Netzstränge erzeugt, die dem Mittel der jeweiligen Klasse so gut wie möglich entsprechen. Bei Vorkommen von Mischungen zwischen verschiedenen Leitungstypen und/oder Querschnitten in einem Strang wird dieses Mischverhältnis analysiert und vereinfacht per „Haupt- und Nebenleitung“ nachgebildet, wobei die Hauptleitung als Leitungsstück vom Transformator zum virtuellen Leitungs-Verknüpfungspunkt definiert ist und die Nebenleitung von eben diesem Verknüpfungspunkt zum letzten NVP. Somit können zwei unterschiedliche Leitungstypen und Leitungsquerschnitte ein Verhältnis nach den empirischen Verteilungsfunktionen nachbilden. Abbildung 3 gibt ein Beispiel für die Differenzierung zwischen fünf Mischformen des Leitungstyps und sieben Leitungsquerschnitten am Beispiel von freileitungsgeprägten sowie kabelgeprägten Niederspannungsnetzen des Typs „Dorf“. Eine solche Verteilung ist allen Netzklassen hinterlegt. Die Leitungsparameter der Direktanschlüsse sind in Abbildung 3, rechts anhand der einheitlich verlegten Leitungen deutlich erkennbar. Die horizontale Achse steht für den Querschnitt des größten vorkommenden Leitungsstücks im Strang. Hausanschlussleitungen sind hierbei nicht berücksichtigt und werden getrennt ausgewertet.

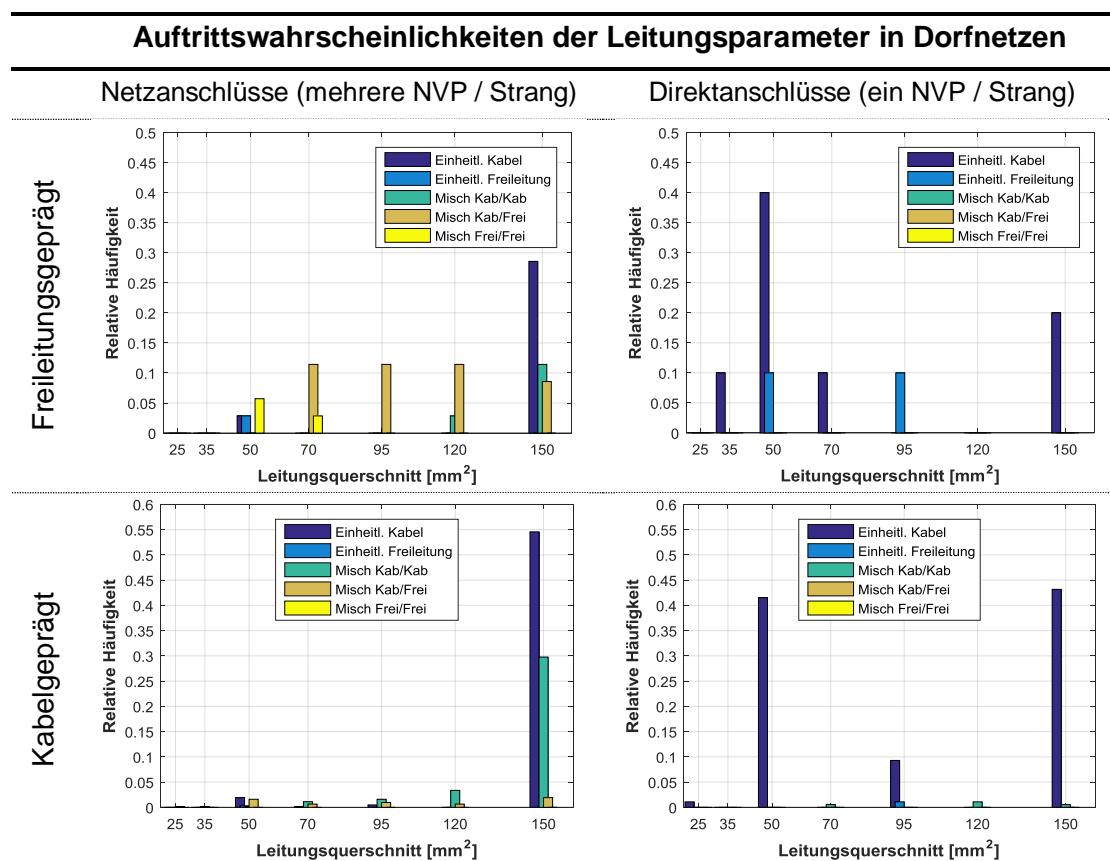


Abbildung 3: Auftrittswahrscheinlichkeiten der Leitungsparameter in Dorfnetzen

4.3 Versorgungsaufgabe

Die Versorgungsaufgabe der zu modellierenden Niederspannungsnetze besteht aus Haushalts- und Sonderverbrauchslasten sowie dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA), hauptsächlich auf Basis von Photovoltaik. Während normale Haushaltslasten rein stochastisch auf die vorhandenen NVP verteilt werden können, ist beim Anschluss von Sonderverbrauchskunden (wie zum Beispiel Industrielasten oder großen Bauernhöfen) auf die Wahl des NVP zu achten. Daher wird der elektrische Abstand aller Sonderverbrauchskunden als Verteilungsfunktion hinterlegt und die Wahl des NVP im synthetischen Netz dementsprechend angepasst. Der Leistungsanteil der Sonderverbraucher gegenüber der Gesamtverbraucherleistung im Netz wird entsprechend der jeweiligen Klasse gestaltet.

Beim Nachbilden des Durchdringungsgrades der DEA wird ähnlich vorgegangen. Die Installation von PV-Anlagen in realen Netzen ist abhängig von mehreren technischen und sozio-ökonomischen Faktoren und kann aus Sichtweise der Netzplanung nur stochastisch nachgebildet werden. Eine rein stochastische Positionierung würde aber auch unrealistische Netznutzungsfälle erzeugen, die mit einem Verlassen des zulässigen Spannungsbandes einhergehen. Um sowohl Positionierung als auch Leistung der DEA zu berücksichtigen wird eine transformatorgebietsscharfe Indexfunktion aus den Größen „DEA-Nennscheinleistung“ und „elektrischer Abstand zwischen DEA und Transformator“ erstellt und die entstehenden Verteilungsfunktionen den Klassen hinterlegt (siehe Abbildung 4). Die grundsätzliche Überlegung dahinter ist, dass die DEA nur einen gewissen Einfluss auf die Spannung haben

dürfen und dieser in der Netzplanung berücksichtigt wurde [4]. Der aus dieser Verteilungsfunktion gezogene Wert definiert den DEA-Zieldurchdringungsgrad des zu erstellenden Netzes. Diesem wird sich iterativ durch stochastische Positionierung der DEA, Berechnung des DEA-Durchdringungsgrades und der Abweichung zum DEA-Zieldurchdringungsgrad angenähert.

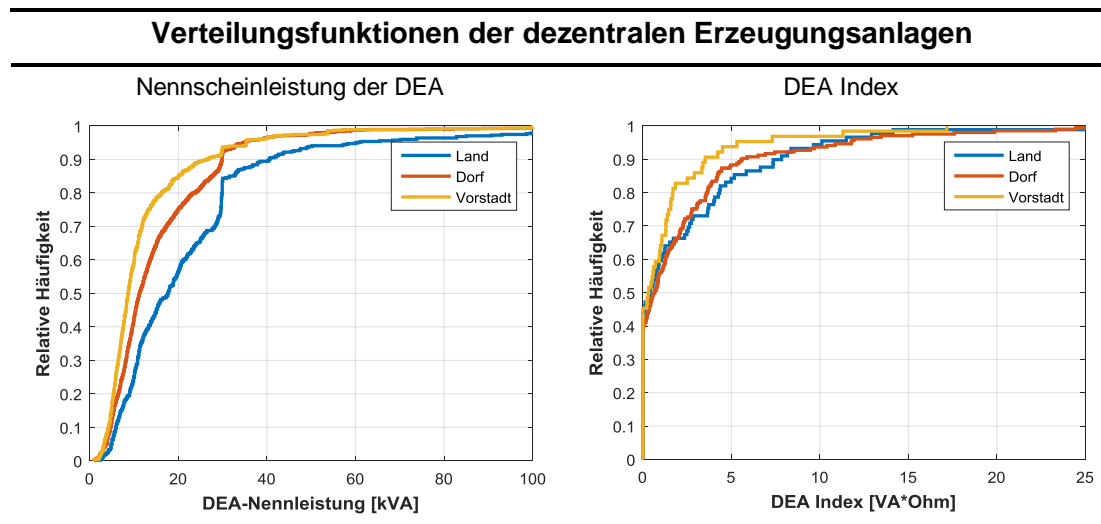


Abbildung 4: Verteilungsfunktionen der dezentralen Erzeugungsanlagen

4.4 Plausibilisierung

Die so entstehenden, synthetischen Netze werden automatisiert auf Einhalten des zulässigen Spannungsbandes [4],[5] sowie der Betriebsmittelbelastbarkeit überprüft. Zusätzlich werden qualitative Überprüfungen durchgeführt, die vor allem unrealistischen Kombinationen statistischer Parameter vorbeugen sollen. Als Beispiel hierfür seien die Berechnung einer zu großen Anzahl an erzeugenden NVP durch Wahl eines zu großen Transformators oder ein exorbitanter DEA-Durchdringungsgrad genannt.

5 Ergebnisse

Zur Erstellung der Musternetze wurde jeweils die am häufigsten auftretende Transformator-Bemessungscheinleistung sowie das 50 % Quantil der Netzauslastung herangezogen. Im Vergleich mit den Simulationsergebnissen der vollständigen Netzmodelle können die auslegungsrelevanten Spannungen erfolgreich durch die Musternetze nachgebildet werden. Die Ergebnisse der oben beschriebenen Methodik fließen zusammen mit der Modellierung der überlagerten Mittelspannungsnetze als kombinierte Simulationsgrundlage in das Projekt „U-Control“ ein. Darauf aufbauend werden vielfältige Untersuchungen zur technischen Wirksamkeit, Robustheit und Wirtschaftlichkeit neuer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Verteilnetzen mit starker dezentraler Einspeisung durchgeführt. Schematische Darstellungen der erstellten Niederspannungs-Musternetze inklusive zugehöriger Versorgungsaufgabe sind dem Anhang dieser Arbeit zu entnehmen.

6 Referenzen

- [1] G. Kerber, "Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen," 2011.
- [2] G. Walker, "Ein Standardisierter Ansatz zur Klassifizierung von Verteilnetzen," *VDE-Kongress*, 2014.
- [3] O. Biechteler, "Entwicklung von Referenznetzen zur Berechnung der Auswirkungen dezentraler Einspeiseanlagen."
- [4] FNN, "VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz," 2011.
- [5] DKE, "DIN EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen," 2010.

Anhang: Musternetze

