

# STATISTISCHE ANALYSE VON MITTELSPANNUNGSNETZEN NACH VERSORGUNGSAUFGABE

Tariq Almomani, Rolf Witzmann

Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungsnetze  
Arcisstraße 21, 80333 München, +49 89 289 22

**Kurzfassung:** Dieser Beitrag befasst sich mit der Entwicklung repräsentativer Modelle von Mittelspannungsnetzen durch statistische Analysen vorhandener Netzdaten. Diese Modelle können als Grundlage für die Untersuchung der Herausforderungen bei der Integration dezentraler Erzeugungsanlagen und neuer steuerbarer Verbraucher in Verteilnetze dienen. Vier Mittelspannungsnetze in verschiedenen Versorgungsgebieten in Süddeutschland wurden untersucht. Eigenschaften wie Transformatorleistungen, Kabeltypen, Leitungslängen und Last-/Erzeugerdichte werden analysiert. Die Methodik umfasst Daten aus realen Netzen und regionale Analysen verdeutlichen die Auswirkungen unterschiedlicher Versorgungsaufgaben. Ziel der Arbeit ist es, Netzmodelle zu erstellen, mit denen die Auswirkungen der Sektorkopplung durch Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen untersucht werden können. Dies soll die Planung des optimalen Netzausbaus und -betriebs unterstützen.

**Keywords:** Synthetische Netze, Referenznetze, Mittelspannung, Sektorkopplung

## 1 Motivation

Im Zuge der aktuellen Umwandlungsprozesse des Energiesystems und seiner Infrastruktur ergeben sich signifikante Herausforderungen. Insbesondere die Integration dezentraler Erzeugungsanlagen sowie neuer, steuerbarer Verbraucher wie Wärmepumpen und Elektrofahrzeuge stellen die Verteilnetze auf allen Ebenen vor neue Aufgaben. Von den Haushaltsnetzen auf Niederspannungsebene bis hin zu den aggregierten Mittelspannungsnetzen müssen sich die Verteilnetzbetreiber (VNB) mit der Frage auseinandersetzen, wie die Netze zukünftig optimal ausgebaut und betrieben werden können. Um ein adäquater Ausbau der Netze zu planen, bedarf es einer Reihe von digitalen Netzmodellen, die auf simulationsbasierten Potenzialabschätzungen basieren. Die Komplexität und der Berechnungsaufwand dieser Modelle hängen maßgeblich von der Anzahl und dem Detailgrad der Modelle ab. Aus diesem Grund erscheint ein Ansatz, der auf repräsentativen Netzmodellen basiert, als eine realistischere und effizientere Lösung. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich darauf, repräsentative Mittelspannungsnetzmodelle zu entwickeln, die auf statistischen Analysen existierender Netzdaten basieren. Diese Modelle sollen dann genutzt werden, um die Auswirkungen der Elektrifizierung in den Bereichen Mobilität und Wärme detailliert zu untersuchen.

## 2 Methodik

Der Musternetzgenerator (G. Kerber, 2008.) (M. Lindner, 2016) befasst sich mit Niederspannungsnetzen. Anhand einer großen Anzahl von NS-Netzen wurden Kenndaten und probabilistische Verteilungen für Leitungstypen, Anzahl der Anschlusspunkte, Mittlerer Abstand und Gesamtlänge abgeleitet. Ähnlich zu dem erwähnten Ansatz in (G. Kerber, 2008.) (M. Lindner, 2016) werden für die Mittelspannungsnetz neue Eigenschaften definiert. Im Gegensatz zu NS-Netzen decken MS-Netze eine größere Versorgungsfläche ab, die die Lasten und Erzeuger in untergelagerten Netzebenen aggregiert. Dies betrifft nicht nur einzelne Ortsteile, sondern auch größere Gebiete oder Städte. Zudem werden neue Kategorien wie Industrie-, Gewerbegebiete und Erzeugergebiete definiert, an welche große Energieerzeugungsanlagen wie Windkraftwerke, Biogasanlagen und Photovoltaikanlagen auf Freiflächen angeschlossen werden.. Die Ortsnetztransformatoren sind mit aggregierten Haushaltslasten und aggregierten Erzeugungsanlagen mit konstanten Leistungswerten und Leistungsfaktoren modelliert. Die verfügbaren MS-Netze wurden sowohl mit Freileitungen als auch Kabel ausgebaut. Freileitungen kommen überwiegend im ländlichen Raum zum Einsatz sowie an Orten, an denen räumliche Beschränkungen eine unterirdische Verlegung nicht zulassen.

### 2.1 Datengrundlage

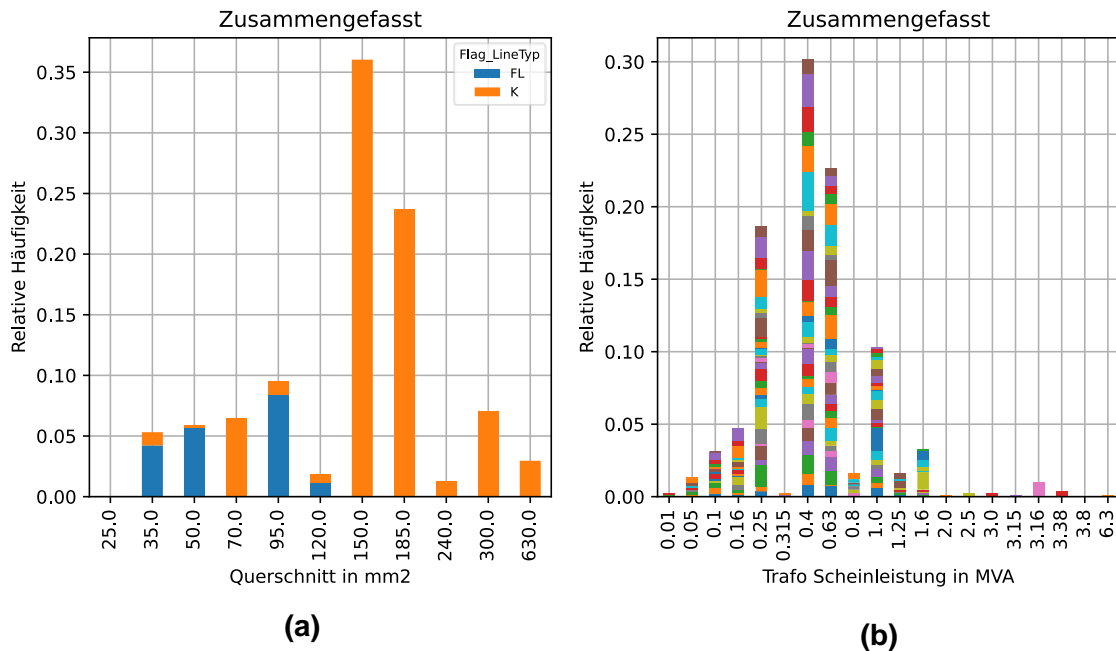
Um repräsentative Netzmodelle erstellen zu können, wird eine Vielzahl existierender realer Netze benötigt. Es wurden vier Mittelspannungsnetze von vier unterschiedlichen Versorgungsgebieten in Deutschland untersucht. Die bereitgestellten Netzdaten sind im Simulationstool PSS Sincal modelliert, indem Netzelemente in einer SQLite Datenbank gespeichert sind. Hierzu wurde eine Schnittstelle zwischen Python und den Datenbanken der Netze aufgebaut, die den Zugang zu detaillierten Daten der Netzelemente (Leitungstypen, Querschnitte, Erzeugerdaten, Lasten, Trafos und etc.) ermöglicht. Insgesamt haben die vier Netze 36 Abgänge mit unterschiedlichen Versorgungsaufgaben wie Vorstädtische (V), Ländliche (L) und Industrie/Gewerbe (I). Die Gesamtlängen der Netze liegen zwischen 70 und 190 km und insgesamt bei 469 km. Die Anzahl der MS/NS Trafo beträgt insgesamt 826. Eine Zusammenfassung der Netzregionen ist in **Tabelle 1** zu sehen.

*Tabelle 1: Charakteristik der Regionen für die Mittelspannungsnetze.*

	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
<b>Anzahl ONS</b>	93	258	198	277
<b>Anzahl Abgänge</b>	4	14	8	10
<b>Gesamtlänge in km</b>	70,9	113	96	189,2
<b>Umspannwerk in MVA</b>	40	71,5	84	80
<b>Versorgungsaufgabe</b>	L	L/V/I	V/I	L/I

**Abbildung 1a** zeigt die statistische Auswertung der gesamten Leitungen in den gesamten Regionen. Insgesamt kommt der Anteil der Freileitung auf knapp 20%. Die unterirdische Verkabelung hat den größeren Anteil von 80%. Der Anteil der Freileitungen verteilt sich fast

gleichmäßig über allen Querschnitten von 95, 50 und 35 mm<sup>2</sup> mit einem geringen Anteil bei 120 mm<sup>2</sup>. Über 60% der gesamten Leitungen vom Typ Kabel liegen zwischen 150 und 185 mm<sup>2</sup>. Die restlichen Anteile verteilen sich auf die übrigen Querschnitte. Zu beachten ist, dass kleine Querschnitte in den Abschnitten ausgebaut werden, die weit entfernt vom Umspannwerk sind.



**Abbildung 1:** Statistische Verteilungen der Trafo-Leistungen und die Leitungstypen und Querschnitte zusammengefasst für allen Regionen.

**Abbildung 1b** zeigt die statistische Auswertung der gesamten Trafos in den gesamten Regionen. Ausgewertet wird die Scheinleistung einzelner Trafos der aggregierten Lasten von Ortsteilen und große Lasten bzw. Erzeugungsanlagen. Jede Farbe im Diagramm repräsentiert ein Strang. Über 70% der gesamten Trafos beschränken sich auf die Scheinleistungen 630, 400 und 250 KVA. Jede Trafogröße weist indirekt auf die Leistungsdichte innerhalb eines Ortsteiles und auch auf den Typ der Lasten (Mehrfamilienhaus, Einfamilienhaus, Gewerbe und etc.) hin. Trafos mit einer Scheinleistung von 1000 kVA haben einen Anteil von 10%. Trafos mit einer Scheinleistung über 1000 kVA befinden sich in großen Gewerbe-/Industriegebieten oder sind Anschlusspunkte von großen Erzeugungsanlagen.

## 2.2 Regionale Betrachtung

Da diese Auswertungen und die daraus abgeleiteten probabilistischen Verteilungen alle Regionen zusammenfassen, sind die Effekte unterschiedlicher Versorgungsaufgaben kaum zu erkennen. Deswegen wird eine Analyse einzelner Regionen notwendig. In **Abbildung 2** werden statistische Auswertungen für jede Regionen einzeln betrachtet. Wiederum repräsentiert jede Farbe im Diagramm einen Strang. In allen Regionen kommen 400 kVA Trafos am häufigsten vor. In den Regionen 1, 2 und 4, die größtenteils eine ländliche Versorgungsaufgabe haben, beträgt der Anteil der Trafogröße 250 kVA ca. 20%. Auf der

anderen Seite beträgt in Region 3, welche eine vorstädtische Versorgungsaufgabe, die Trafogröße 630 kVA knapp 28%.

Der relativ große Anteil mit Trafogrößen über 1000 kVA weisen in Regionen 1, 2 und 3 auf die Erzeugungsanlagen wie PV-/ Windkraftparks hin. In Region 3 gehören diese Trafos zu den Industrie-/Gewerbegebieten

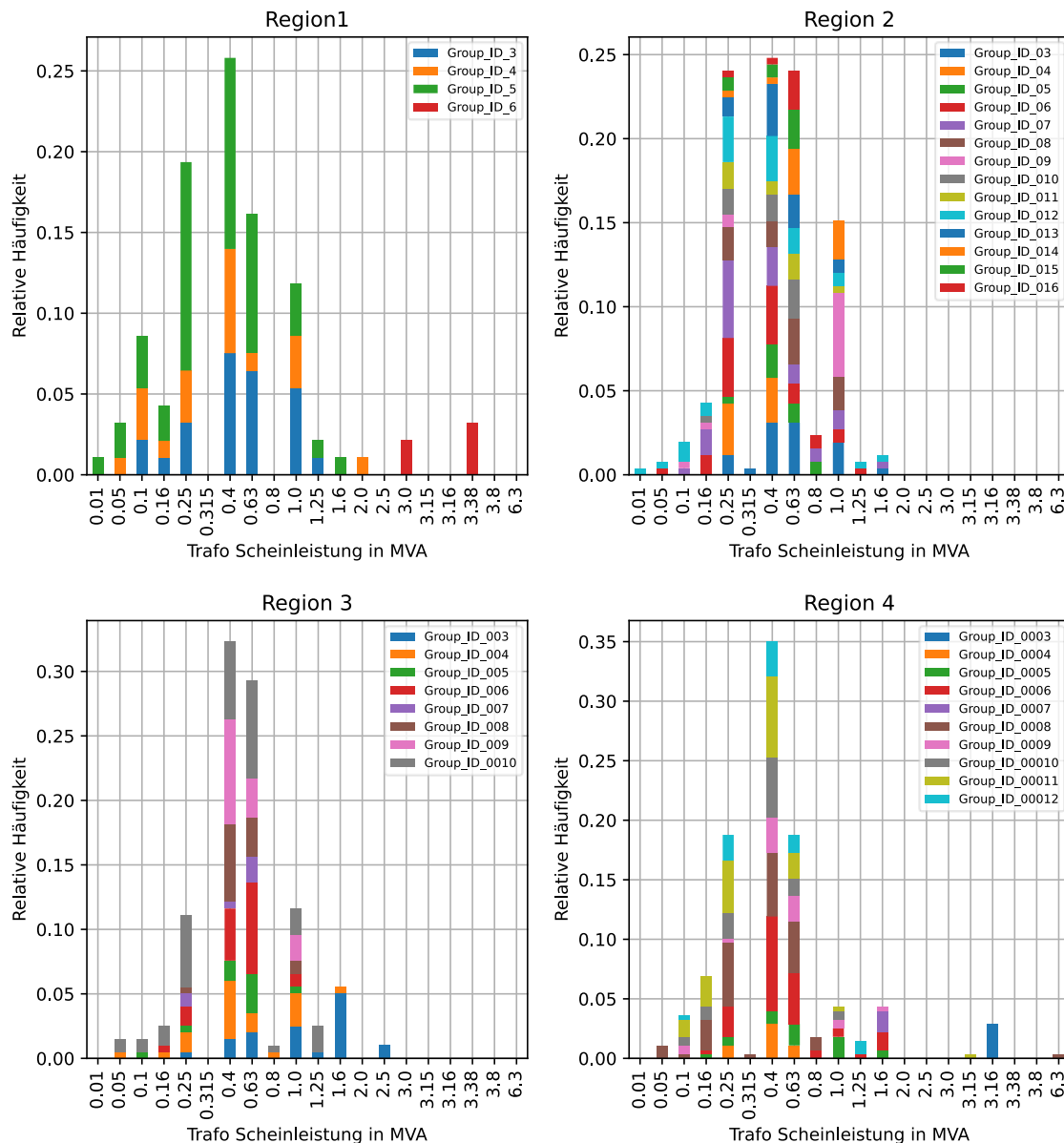


Abbildung 2: Statistische Verteilungen der Trafo-Leistungen in den vier Regionen.

### 3 Definition von Versorgungsaufgaben

Um die Versorgungsaufgabe für das Mittelspannungsnetz zu definieren, wurde auf öffentliche Daten von OpenStreetMap (OSM) zugegriffen. Hier wurden Flächennutzungspläne von OSM-Daten benutzt, um zwischen den Versorgungsaufgaben genauer zu unterscheiden. Die

Versorgungsaufgabe wurde für jeden einzelnen Abgang betrachtet und in vier Kategorien wie folgt geteilt:

- **Ländlich:** Hier befinden sich überwiegend Einfamilienhäuser mit größeren Abständen im Vergleich zu vorstädtischem Raum. Zusätzlich steigt der Anteil an PV-Dachanlagen. Mittelgroße Freiflächenanlagen befinden sich in der Nähe und sind am gleichen Abgang angeschlossen.
- **Vorstädtisch:** Hier befinden sich überwiegend Mehrfamilienhäuser mit kleineren Abständen im Vergleich zum ländlichen Raum.
- **Industrie/Gewerbe:** Industrie- und Gewerbegebiete befinden sich konzentriert in Ortsteilen der unterschiedlichen Regionen.
- **Erzeugung:** Hier handelt es sich um Abgänge, die reine Erzeugung beinhalten

### 3.1 Betrachtung der Trafoklassen nach Versorgungsaufgabe

In **Abbildung 3** werden die Verteilungen zur Trafoleistung für jede Kategorie betrachtet. Hier wird klar welchen Einfluss die Versorgungsaufgabe auf die Größe der Ortsnetzstationen hat. Im Ländlichen Raum werden überwiegend 400 und 250 kVA Trafos mit einem Anteil knapp über 56% eingesetzt. Im vorstädtischen Raum wird dagegen meistens die Kombination aus 400 und 630 kVA Trafos mit einem Anteil von knapp über 78% verwendet; in Industrie- und Gewerbegebieten jedoch mehr 630 und 1000 kVA Trafos mit einem Anteil knapp über 52%. Für die Erzeugung werden nur Trafos ab 1000 kVA gebaut. Hierzu werden mehr Daten benötigt um einen besseren Trend zu erkennen.

Es ist wichtig zu betonen, dass bei einem Industrie-/Gewerbegebiet auch vorstädtische/ländliche Ortsteile durch räumliche Nähe vorkommen können. Diese werden am gleichen Strang angeschlossen.

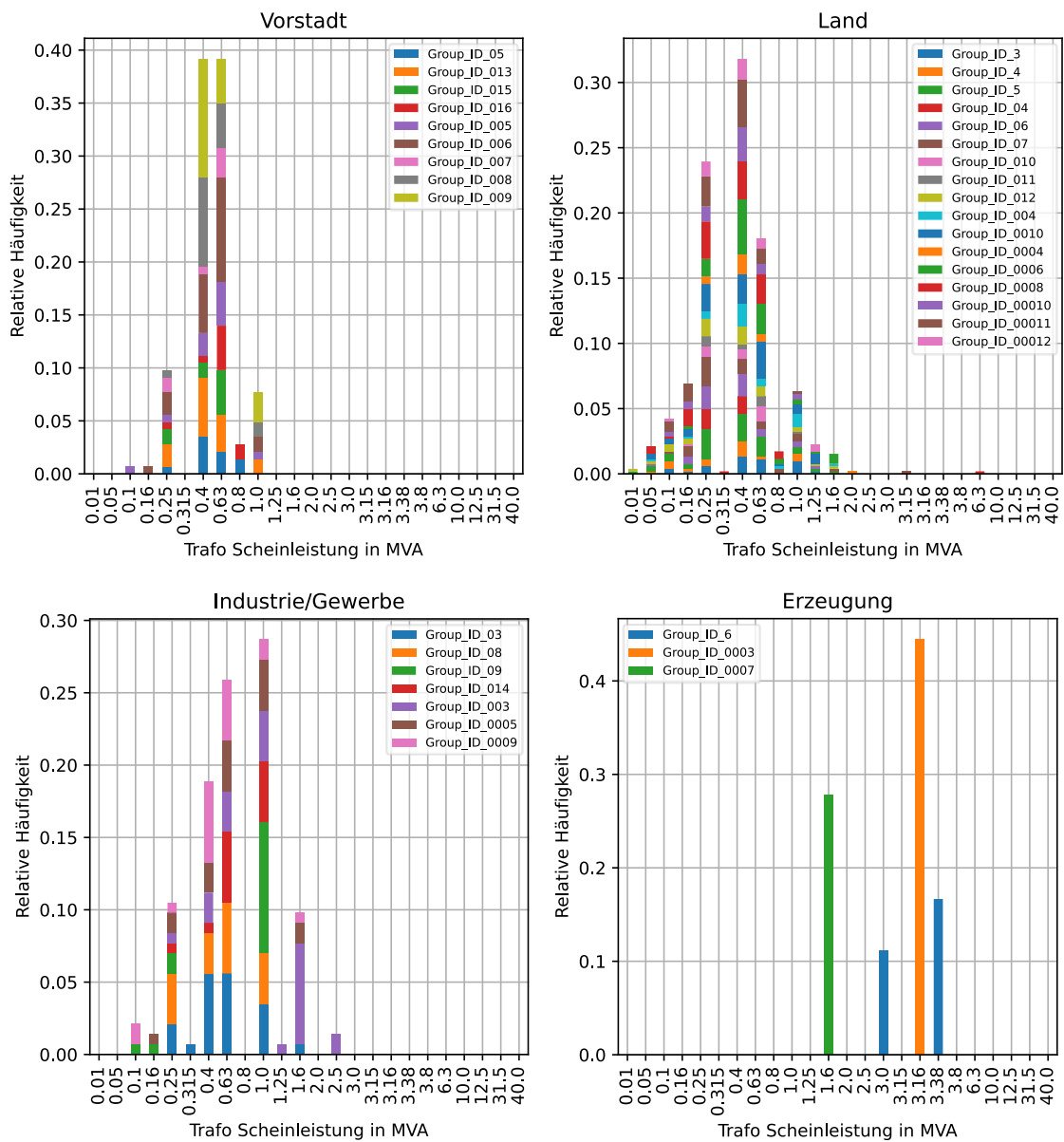
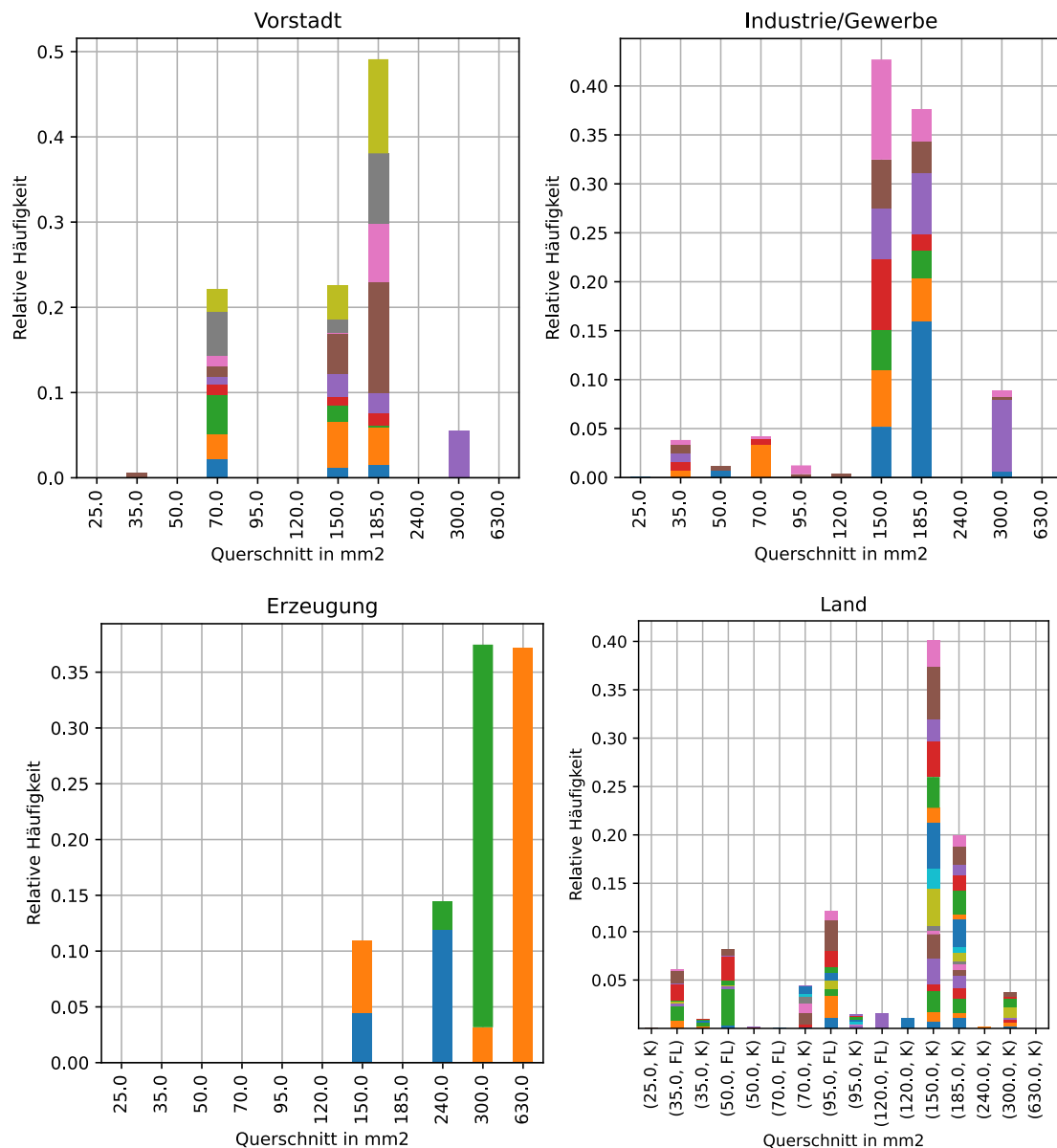


Abbildung 3: Statistische Verteilungen der Trafo-Leistungen nach Versorgungsaufgabe im Mittelspannungsnetz.

### 3.2 Betrachtung der Leitungsquerschnitten nach Versorgungsaufgabe

In **Abbildung 4** werden statistische Auswertungen zur Leitungsquerschnitten für jede Kategorie betrachtet. Nur im ländlichen Raum befinden sich Freileitungen mit einem Anteil von knapp 28%. Überwiegend werden Kabel mit einem Querschnitt von 150 mm<sup>2</sup> (40%), gefolgt von 185 mm<sup>2</sup> mit einem Anteil von 20% verwendet. Im vorstädtischen Raum dominieren 185 mm<sup>2</sup> mit einem Anteil von knapp 50%. In Industrienetzen werden fast gleichmäßig Kabel Querschnitten von 150 und 185 mm<sup>2</sup> eingesetzt (79%).

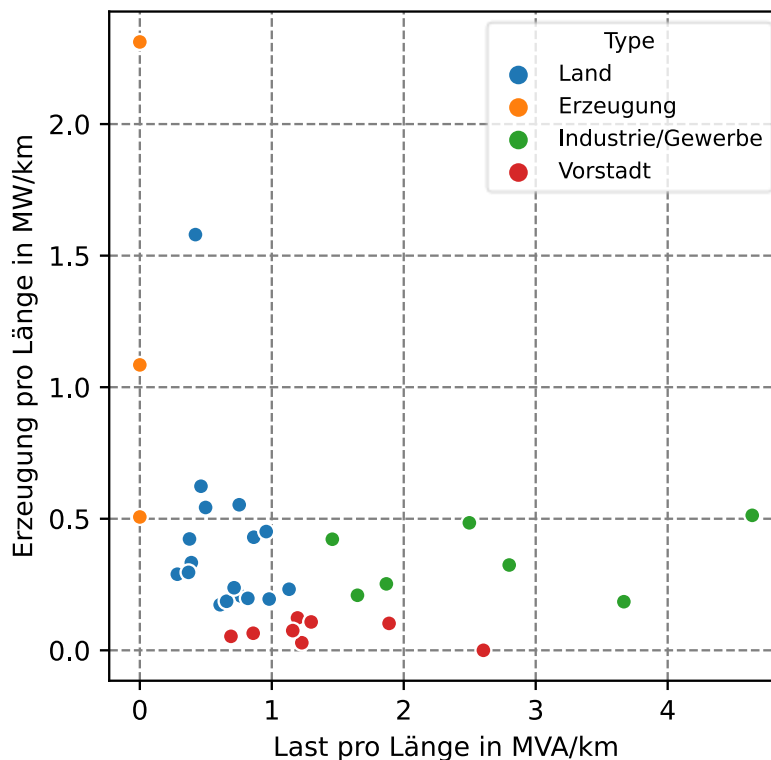


**Abbildung 4:** Statistische Verteilungen der Leitungsquerschnitten nach Versorgungsaufgabe in der Mittelspannungsnetz.

## 4 Gesamte Auswertung

Um das Mittelspannungsnetz nachbilden zu können, müssen zusätzlich zur Analyse der Netzelemente (Leitungen und Trafos) auch die Erzeugungs- und Laststrukturen betrachtet werden. Hierzu wurden zwei Parameter identifiziert. Die Lastdichte ist die Summe der installierten Lasten in einem Abgang geteilt durch die Länge des Abgangs. Die Erzeugungsdichte ist die Summe der installierten Erzeugungsanlagen in einem Abgang geteilt durch die Länge des Abgangs. **Abbildung 5** zeigt eine gesamte Auswertung der Abgänge in allen Regionen. Mit Hilfe des Diagramms werden Regionen identifiziert, die den aktuellen

Stand und auch mögliche Ausbautendenzen in Abhängigkeit der Versorgungsaufgabe beschreiben.

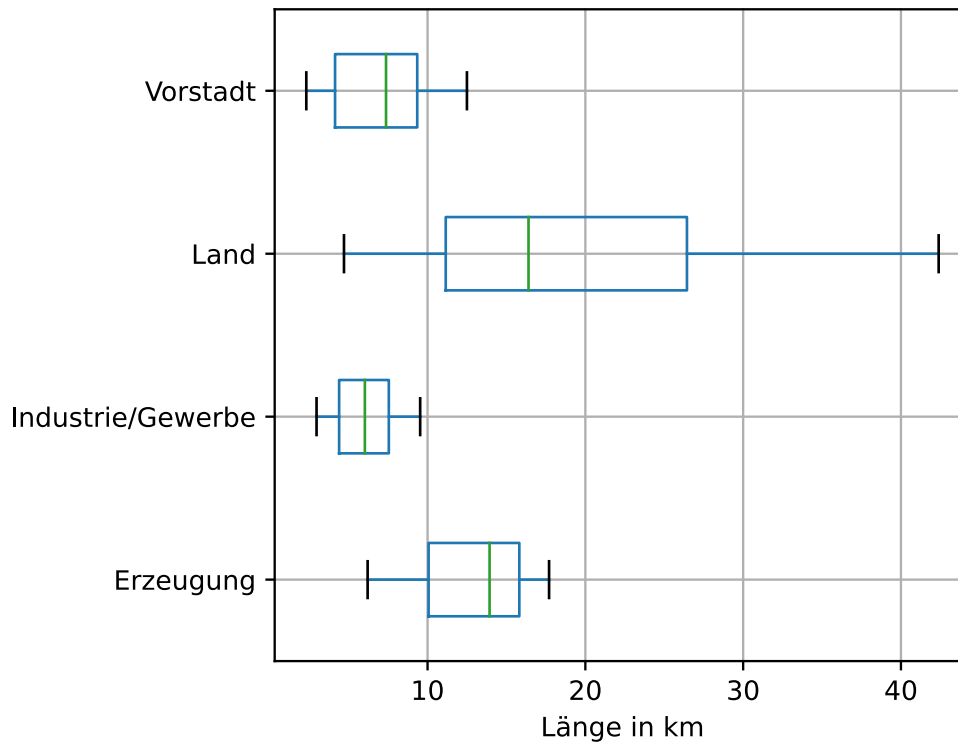


**Abbildung 5:** Erzeugungs- und Lastdichte in Zusammenhang mit den Kategorien der Versorgungsaufgabe.

Aus der Verteilung in **Abbildung 5** kann man ableiten, dass für die Kategorien Industrie/Gewerbe und Vorstadt die Lastdichte tendenziell höher ist als für Land und Erzeugung. Ebenso ist die Erzeugungsdichte bei der Kategorie Erzeugung am höchsten, was zu erwarten ist. Die meisten Datenpunkte scheinen sich in einem Bereich von geringer Lastdichte zu konzentrieren, während die Erzeugungsdichte ein breiteres Spektrum aufweist. Es gibt einige Ausreißer, insbesondere in der Kategorie Erzeugung, die eine relativ hohe Erzeugungsdichte bei niedriger Lastdichte zeigen.

Aus **Abbildung 6** geht hervor, dass das ländliche Netzwerk eine hohe Variabilität in der Kabellänge zeigt, mit der größten Spannweite. Der Medianwert dieser Kategorie beträgt etwa 16,4 km, im Vergleich zum Durchschnitt von 19,3 km. In der Kategorie Erzeugung liegen der Durchschnitt und der Median bei 12,6 km bzw. 13,9 km. Industrie/Gewerbe und Vorstädte zeigen eine geringere Spannweite, was auf eine gleichmäßigere Verteilung hinweist, mit Median- und Durchschnittswerten zwischen 6 und 7 km.

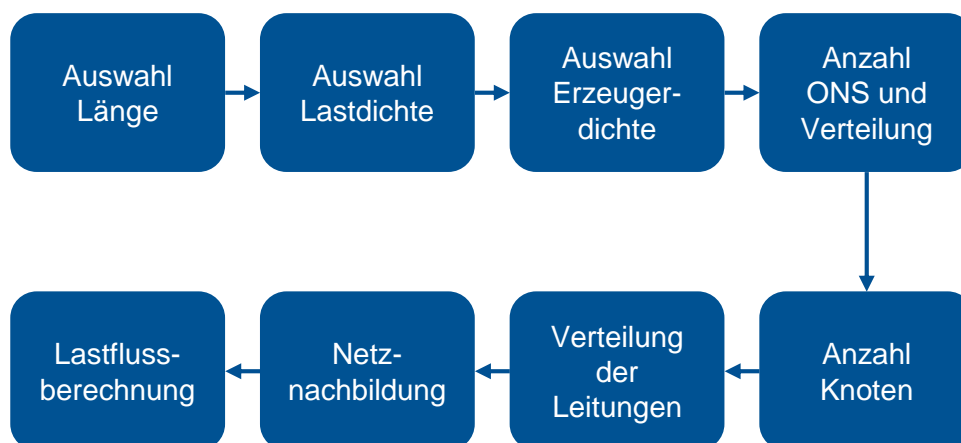




**Abbildung 6:** Verteilung der Leitungslängen nach Versorgungsaufgabe.

## 5 Netznachbildung

Zur Nachbildung von MS-Netzabgängen greifen wir auf erhobene Daten zurück. Dabei werden Verteilungen mittels Kerndichteschätzern mathematisch dargestellt. Wie in **Abbildung 7** gezeigt, erfolgt die sequentielle, zufällige Auswahl von Eigenschaften basierend auf verschiedenen Verteilungen. Zunächst wird eine Länge für jede Kategorie bestimmt, gefolgt von der Festlegung der Last- und Erzeugerdichte.

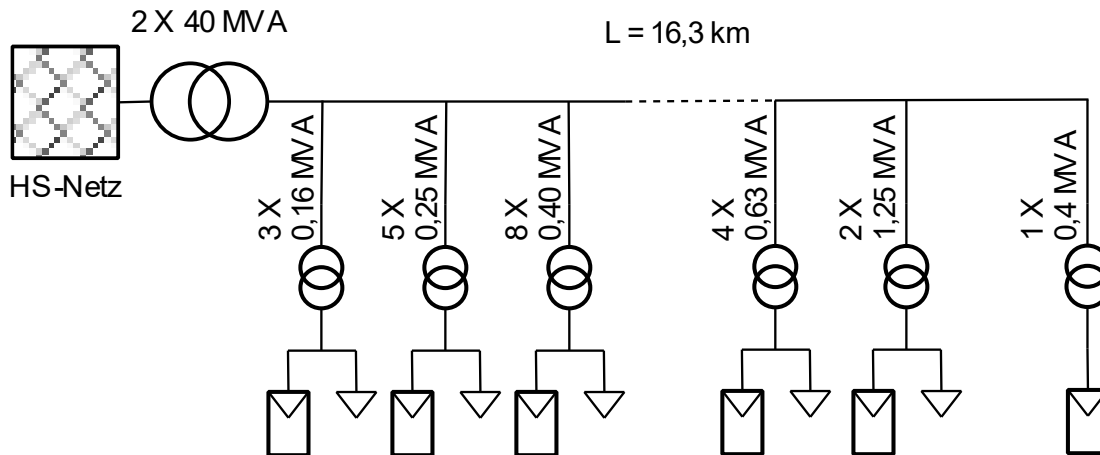


**Abbildung 7:** Prozess der Nachbildung von Mittelspannungsnetzen.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Merkmale werden die Gesamtlast und -erzeugung für das Versorgungsgebiet berechnet. Die normalisierte Verteilung jeder Kategorie wird mit der entsprechenden Verteilung multipliziert. Jeder Ortsnetzstation (ONS) wird ein Anteil an Erzeugung, z.B. Dach-PV, zugeordnet. Übrige Erzeuger werden zusätzlich als Großanlagen

ohne Last berücksichtigt. Anschließend erfolgt die Auswahl der Anzahl an Knoten, der Abstände zwischen diesen und der Verteilung der Leitungen. Abschließend ist eine Lastflussberechnung erforderlich, um die Funktionsfähigkeit des nachgebildeten Netzmodells zu überprüfen und zu gewährleisten, dass es den akzeptierten Auslastungswerten entspricht.

**Abbildung 8** zeigt ein Beispiel für einen MS-Ausgang im ländlichen Raum. Die Entfernungen zwischen den Ortsnetzstationen wurden mit Werten zwischen 350 und 500 m angenommen. Die Länge zwischen dem Umspannwerk und dem ersten Anschlusspunkt beträgt 8,6 km. Die Last- und Erzeugerdichte beträgt 0,3 bzw. 0,64 MVA/km. Jeder ONS hat einen Anteil von 40%, der aus den Daten für die Kategorie Land ermittelt wurde.



**Abbildung 8:** Ein Beispiel für einen synthetisch modellierten Abzweig eines Mittelspannungsnetzes im ländlichen Raum.

## 6 Literaturverzeichnis

- G. Kerber, R. (2008.). Statistische analyse von ns-verteilt netzen und modellierung. *EW - Magazin für die Energiewirtschaft*, pp. 22–26,.
- M. Lindner, C. A. (2016). Aktuelle musternetze zur untersuchung von spannungsproblemen in der niederspannung. 14. *Symposium Energieinnovation*. Graz, Österreich.



**STROM** SekToRkOpplung  
und Micro-grids

Gefördert durch



**Bayerische  
Forschungsförderung**