|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Modellierung und Plausibilisierung von synthetischen MS-Netzmodellen für städtische Gewerbegebiete**

**Modelling and plausibility check of synthetic MS-network models for urban commercial areas**

**Masterarbeit**

von

**Magnus Gutacker**

**3322646**

vorgelegt an der Universität Stuttgart

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Beginn der Arbeit: | 19.04.2024 |  |
|  | Ende der Arbeit: | 18.10.2024 |  |
|  | Betreuer\*in: | Charlotte Wagner, M. Sc. |  |
|  | Prüfer\*in: | Prof. Professor |  |

# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig durchgeführt und verfasst habe, abgesehen von den Anregungen, die mir von Seiten meines\*r Betreuer\*in, Betreuer\*in M.Sc. gegeben worden sind, und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

|  |  |
| --- | --- |
| Stuttgart, 8. August 2024 | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |
|  | Unterschrift |

# Kurzfassung

In der Kurzfassung soll zunächst die Problemstellung des Themas präzise und kurz formuliert werden und wie der Fragestellung begegnet wurde bzw. was die Methodik umfasst. Abschließend soll auch kurz beschrieben werden, was die Ergebnisse der Arbeit zeigen und was sich daraus, bezogen auf die Fragestellung, ableiten lässt. Insgesamt soll dieser Abschnitt etwa 100 Wörter umfassen.

# Abstract

In the abstract, the problem of the topic should first be formulated precisely and briefly and how the question was addressed or what the methodology includes. Finally, it should also briefly describe what the results of the work show and what can be deduced from them in relation to the research question. In total, this section should contain about 100 words.

# Inhaltsverzeichnis

[Eidesstattliche Erklärung i](#_Toc173500682)

[Kurzfassung ii](#_Toc173500683)

[Abstract ii](#_Toc173500684)

[Inhaltsverzeichnis iii](#_Toc173500685)

[Abbildungsverzeichnis v](#_Toc173500686)

[Tabellenverzeichnis vi](#_Toc173500687)

[Formelzeichen und Darstellungskonventionen vii](#_Toc173500688)

[Abkürzungen vii](#_Toc173500689)

[Formelzeichen viii](#_Toc173500690)

[1 Einleitung 1](#_Toc173500691)

[1.1 Motivation und Hintergrund 1](#_Toc173500692)

[1.2 Thema und Zielsetzung 2](#_Toc173500693)

[1.3 Struktur der Arbeit 2](#_Toc173500694)

[1.4 Verwendete Hilfsmittel 2](#_Toc173500695)

[2 Grundlagen 3](#_Toc173500696)

[2.1 Stromnetze 3](#_Toc173500697)

[2.2 Synthetische Netzmodellierung 3](#_Toc173500698)

[2.3 Lastapproximation 3](#_Toc173500699)

[3 Methodik 4](#_Toc173500700)

[3.1 Datengrundlage 4](#_Toc173500701)

[3.2 Modellierung 4](#_Toc173500702)

[4 Auswertung und Analyse 5](#_Toc173500703)

[4.1 Analyse der Netzparameter 5](#_Toc173500704)

[4.1.1 Spannungsprofil 5](#_Toc173500705)

[4.1.2 Leistungsfluss 5](#_Toc173500706)

[4.1.3 Netzverluste 5](#_Toc173500707)

[4.2 Szenarioanalyse 6](#_Toc173500708)

[4.2.1 Sommer 6](#_Toc173500709)

[4.2.2 Winter 6](#_Toc173500710)

[4.2.3 Frühling 6](#_Toc173500711)

[4.3 Anwendung auf andere Gewerbegebiete 6](#_Toc173500712)

[5 Ergebnisse 7](#_Toc173500713)

[5.1 Vergleich zu realem Netz in Weilimdorf 7](#_Toc173500714)

[5.2 Anwendungsmöglichkeiten für andere Gewerbegebiete 7](#_Toc173500715)

[6 Zusammenfassung und Ausblick 8](#_Toc173500716)

[Literaturverzeichnis 9](#_Toc173500717)

[Anhang 10](#_Toc173500718)

# Abbildungsverzeichnis

[2.1 Neuzulassungen der letzten zehn Jahre 4](https://iehunistuttgartde-my.sharepoint.com/personal/kevin_kratz_ieh_uni-stuttgart_de/Documents/UNI/7_InterneProjekte/VorlageStudentischeArbeiten/Vorlage_WORD_Studentische_Arbeiten.docx#_Toc157263987)

[3.1 Auswertung der Bewegungsprofile für Elektrofahrzeuge 8](#_Toc157263988)

[4.1 Auswertung der Bewegungsprofile für Elektrofahrzeuge 12](#_Toc157263989)

# Tabellenverzeichnis

[2.1 Beispieltabelle 5](#_Toc157264180)

[3.1 Beispieltabelle 9](#_Toc157264181)

[4.1 Beispieltabelle 14](#_Toc157264182)

# Formelzeichen und Darstellungskonventionen

## Abkürzungen

|  |  |
| --- | --- |
| **BP** | Betriebspunkt |
| **BEV** | Battery electric vehicle |
| **EE** | Erneuerbare Energien |
| **HS** | Hochspannung |
| **KWK** | Kraft-Wärme-Kopplung |
| **MS** | Mittelspannung |
| **SOC** | State of Charge |
| **WEA** | Windenergieanlage |

## Formelzeichen

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Symbol** | **Beschreibung** | **Einheit** |
|  | **Phasenwinkel** |  |
|  | **Kreisfrequenz** |  |
|  | **Periodendauer** |  |
|  | **Frequenz** |  |
|  | **Spannung** |  |
|  | **Leistungsfaktor** |  |
|  | **Wirkleistung** |  |
|  | **Blindleistung** |  |
|  | Scheinleistung |  |

# Einleitung

Die Energiewende stellt aufgrund des Wandels in der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs neue Anforderungen an Planung, Betrieb und Modellierung von Stromnetzen. Eine entscheidende Rolle dabei spielen Mittelspannungsnetze, die, durch die Verbindung von Hochspannungs-Übertragungsnetzen zu Endverbrauchern und Niederspannungsnetzen, die Endverbraucher mit Energie versorgen. Besonders in industriellen und gewerblichen Gebieten spielen Mittelspannungsnetze aufgrund ihrer hohen Anforderungen durch große Verbraucher und die kommende Elektrifizierung der Logistikbranche eine entscheidende Rolle. Um dabei die Versorgung und Stabilität zu gewährleisten sind detaillierte Modellierungen und Analysen notwendig.

## Motivation und Hintergrund

Die Modellierung von Stromnetzen hat besonders durch die dezentrale Erzeugung und flexiblere Lasten erheblich an Bedeutung gewonnen. Dieser Übergang zu flexibleren Erzeugern und Lasten führt zu Schwierigkeiten in herkömmlichen Netzplanungsprozessen. Besonders in Gebieten mit einer hohen Lastdichte, wie unter anderem in Gewerbegebieten, ist es entscheidend eine ausreichende Energieversorgung bereitzustellen um den Weg für Expansionen und den Einsatz neuer Technologien zu ermöglichen. Eine entscheidende solche Technologie ist die Integration von E-LKWs in der Logistikbranche.

Um solch eine Integration zu ermöglichen ist es unerlässlich ausreichend Leistung für Ladeinfrastruktur verfügbar zu haben. Da unter anderem Transformatoren, die für die Bereitstellung von entscheidender Rolle sind, Lieferzeiten von mehreren Jahren haben müssen Engpässe frühzeitig identifiziert werden. Zur Identifizierung von Netzengpässen werden allerdings Netzmodelle benötigt, die allerdings nicht öffentlich verfügbar sind. Aus diesem Grund ist es nötig die Netzmodelle synthetisch aus öffentlich verfügbaren Daten zu erstellen. Solche synthetischen Netzmodelle ermöglichen es anschließend Netzberechnungen auf Grundlage verschiedener Szenarien durchzuführen. Auf dieser Basis ist es möglich den Netzausbau vorrausschauend zu planen.

## Thema und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methodik für die Erstellung von synthetischen Mittelspannungsnetzmodellen zu entwickeln und diese zu validieren. Dabei sollen verschiedene öffentlich verfügbare Daten mit einbezogen werden um ein möglichst realistisches Modell zu schaffen. Aus diesem Modell aus Lastkurven, Erzeugungskurven und Geoinformationsdaten soll anschließend ein Netzmodell erstellt werden, dass dem realen Netz in verschiedenen Aspekten möglichst ähnlich ist. Nach der Validierung anhand des realen Netzes des Gewerbegebietes Weilimdorf soll die Methodik auf weitere Gewerbegebiete angewandt werden.

## Struktur der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel, die die theoretischen Grundlagen, die Entwicklung und die Resultate beleuchten. Nach dieser Einleitung folgt ein Kapitel in dem die theoretischen Grundlagen erklärt werden. Hier wird genauer auf Mittelspannungsnetze, synthetische Netzmodell und Lastapproximationen eingegangen.

Darauf folgt die Beschreibung der angewandten Methodik. Das schließt die Datengrundlage, deren Validierung und Aufbereitung mit ein. Außerdem werden die einzelnen Schritte der Implementierung des synthetischen Netzmodells erklärt.

## Verwendete Hilfsmittel

Diese Arbeit verwendet bereits vorhandenes Wissen aus …

# Grundlagen

Zum Verständnis dieser Arbeit ist es notwendig einige Grundlegende Themen zu erläutern. Dabei wird zunächst genauer auf die Stromnetze mit ihren verschiedenen Spannungsebenen und Aufgaben eingegangen. Anschließend wird die Theorie der synthetischen Netzmodellierung und der aktuelle Forschungsstand dieser erklärt. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit der Lastapproximation, die entscheidend für die synthetische Netzmodellierung ist.

## Stromnetze

Stromnetze sind der essenzielle Bestandteil der Energieversorgung, da durch sie eine Distanz zwischen Erzeugung und Verbrauch ermöglicht wird. Sie bestehen aus verschiedenen Komponenten, von denen Leitungen und Transformatoren besonders für diese Arbeit die Entscheidenden sind. Transformatoren sind der Koppelpunkt zwischen den verschiedenen Spannungsebenen, die unterschiedliche Aufgaben haben. Das Hoch- und Höchstspannungsnetz ist für die Übertragung von Energie über weite Distanzen zuständig und hat eine Spannung von über 110 kV. An es sind beispielsweise Kraftwerke angeschlossen. Durch eine hohe Spannung werden ohmsche Verluste minimiert. Da mit solch hoher Spannung jedoch keine Geräte betrieben werden können ist die Transformation unerlässlich. Mittelspannungsnetze sind über die Transformatoren mit den Hochspannungsnetzen verbunden und verteilen den Strom über geringere Distanzen und teilweise auch direkt zu großen Verbrauchern, wie etwa industriellen Anlagen und auch große PV-Anlagen. Der Spannungsbereich liegt hier typischerweise zwischen 10 und 36 kV. Für kleinere Verbraucher, wie zum Beispiel Haushalte und kleinere Betriebe, ist das Niederspannungsnetz mit Spannungen unter 1 kV zuständig.

### Mittelspannungsnetze in Gewerbegebieten

Ringnetz

ONS

Erdkabel unter Straße

Umspannwerk /Transformator

Inzwischen auch viel Einspeisung

Direktanschluss ans MS-Netz

Muss auf höhere Lasten vorbereitet sein

Räumliche Aufteilung von MS-Netzen/Ringen

Nennwerte von Trafos und ONS angeben

## Synthetische Netzmodellierung

Aktuell beschäftigen sich viele Institutionen mit der Generierung von synthetischen Netzmodellen um Lastflussberechnungen erstellen zu können ohne auf vertrauliche Daten zugreifen zu müssen oder solche zu veröffentlichen. Die Forschungen in diesem Bereich haben bereits Methodiken entwickelt, die die Erzeugungen von synthetischen Netzmodellen ermöglichen. Dabei lässt sich zusammenfassend eine grobe Struktur bei der Erstellung von synthetischen Netzen ableiten.

Zunächst werden öffentlich verfügbare Daten der Topologie des betrachteten Bereiches benötigt. Hierzu gehören Straßenverläufe und Gebäudeflächen. Anschließend werden die Lasten und Erzeugungsanlagen relevant. Diese Daten werden je nach verfügbarer Datengrundlage entweder direkt mit einbezogen oder müssen synthetisch aus statistischen Daten und Analysen abgeleitet werden. Um aus diesen Eingangsdaten ein dem realen Netz möglichst ähnliches Netz zu erstellen ist es außerdem wichtig typische Netzstrukturen zu berücksichtigen. Diese unterschieden sich stark zwischen den Spannungsebenen und verschiedenen Bebauungsarten. Da diese Arbeit sich auf MS-Stromnetze von Gewerbegebieten beschränkt wird eine Ringnetztopologie verwendet. Diese besteht typischerweise aus einem Umspannwerk, das die Verbindung zum HS-Netz darstellt, und mehreren Ringen, die direkt an die MS angeschlossene Verbraucher und ONS versorgt.

Um die Anzahl der Ringe und ONS festzulegen werden außerdem die Kenndaten typisch verwendeter Bauteile genutzt. Aus diesen kann anschließend mit Hilfe der Graphentheorie ein optimaler Netzverlauf ermittelt werden. Jedoch ist eine Schwierigkeit dabei die Tatsache, dass Stromnetze nicht optimal geplant werden können, sondern sich über die Zeit immer weiterentwickeln. Das synthetische Stromnetz ist somit die optimale Lösung eines Optimierungsproblems und nicht das Resultat einer kontinuierlichen Netzentwicklung.

Bisherige Forschung

## Lastapproximation

Die Lastapproximation dient dazu Gebäuden eine der Realität möglichst nahe Last zuzuordnen um die Dimensionierung des Netzes möglichst nah am realen Netz zu halten. Für eine Lastapproximation sind verschiedene Größen ausschlaggebend. Dazu gehören unter anderem die Gebäudefläche, die Anzahl der Personen die in dem Gebäude wohnen oder arbeiten, mögliche Erzeugung durch PV-Anlagen und der Gebäudetyp. Die Gebäudefläche lässt sich über die Gebäudegrundfläche und die Anzahl der Etagen ermitteln. Aus Open Street Maps kann die Gebäudegrundfläche über den Flächeninhalt des Polygons der Gebäude errechnet werden. Die Anzahl der Etagen ist hier teilweise auch gegeben und wird alternativ synthetisch über einen Mittelwert aus einer Stichprobe angenommen.

Die Datengrundlage

Gebäudetyp mit Lastprofilen

Erzeugungsleistungen durch PV

Zukünftige Erweiterungen durch Ladesäulen z.B.

## Lastflussberechnung

Wie funktioniert?

pandapower

Was für ausgangskennwerte

# Methodik

In Kapitel 3 soll erläutert werden, welche Anwendungen und Methodiken eigenständig entwickelt wurden. Dazu wird schematisch das Vorgehen erklärt und theoretisch bzw. mathematisch ausgeführt, wie der Problemstellung begegnet wurde. Außerdem können in diesem Kapitel die Untersuchungsgegenstände bzw. deren Modellierungen aufgezeigt werden sowie die Auswahl der Untersuchungsszenarien.

## Datengrundlage

Öffentliche Daten

### OSM

Gebäudetypen

Etagen

Straßen

Umspannwerke

### Gebäudeklassifizierung/Gebäudelasten

Gebäudetyp

Lastkurven

Maximallast

### Erzeugungsanlagen

Anschlusstyp

Installierte Leistung

Erzeugungskurven

MaStR

## Modellierung

k-Means

ONS Anzahl und Platzierung

Vehicle routing problem

Verwendete kabel/ONS usw.

# Auswertung und Analyse

Ziele der Analyse

Verwendete Methoden

## Analyse der Netzparameter

### Spannungsprofil

### Leistungsfluss

Auslastungen z.B.

### Netzverluste

## Szenarioanalyse

### Sommer

### Winter

### Frühling

## Anwendung auf andere Gewerbegebiete

# Ergebnisse

## Vergleich zu realem Netz in Weilimdorf

## Anwendungsmöglichkeiten für andere Gewerbegebiete

# Zusammenfassung und Ausblick

# Literaturverzeichnis

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), „Schaufenster-Programm Elektromobilität - Abschlussbericht der Begleit- und Wirkungsforschung 2017,“ April 2017. [Online]. Available: https://www.bridging‑it‑gruppe.de/wp‑content/uploads/2020/12/201704\_ep30\_abschlussbericht\_2017\_der\_begleit‑\_und\_wirkungsforschung.pdf. |
| [2] | A. Probst, „Impacts of electric mobility non distribution grids and possible solution through load management,“ in *CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, Germany, 2011. |
| [3] | B. Thomann und T. Kienberger, „Comparison of Electromobility Impacts on the Low Voltage Level in Different Grid Regions,“ in *Proceedings of the 2nd E-Mobility Integration Symposium*, Stockholm, Sweden, 2018. |
| [4] | G. Viganò, „Assessment of the Impact of Electromobility on Urban,“ in *CIRED Workshop on E-mobility and Power Distribution Systems*, Porto, Portugal, 2022. |

# Anhang

1. Anhang Teil 1

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: Dies ist ein Blindtext oder Huardest gefburn? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie Lorem ipsum dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

1. Anhang Teil 2

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: Dies ist ein Blindtext oder Huardest gefburn? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie Lorem ipsum dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.