

Bachelorarbeit

Kevin Kröger

Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Topologie von
LKW-Ladeparks

Kevin Kröger

Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Topologie von LKW-Ladeparks

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Röther
Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Axel Mohr

Eingereicht am: 07.03.2024

Kevin Kröger

Thema der Arbeit

Entwicklung eines Tools zur Optimierung der Topologie von LKW-Ladeparks

Stichworte

Graphentheorie, Python, Topologie, Lkw-Ladeparks

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung eines softwarebasierten Tools zur Optimierung der Topologien von Lkw-Ladeparks. Dabei werden die Lkw-Ladeparks als Graphen dargestellt und mit bekannten Algorithmen optimiert. In einem Konzept wird erarbeitet, welche Kriterien zur Optimierung dienlich sind und somit als Gewicht der Kanten genutzt werden können. Es wird die Umsetzung des Konzepts in Form der Programmierung des Tools erläutert.

Kevin Kröger

Title of Thesis

Development of a tool to optimize the topology of truck charging parks

Keywords

graph theory, python, topology, truck charging parks

Abstract

This bachelor thesis develops a software-based tool to optimize the the topology of truck charging parks. The truck charging parks are considered as graphs and are optimized by known algorithms. A concept is developed to determine which criterion is useful for optimisation and should be used as the weight of the edges. The implementation of the concept is explained by programming the tool.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | vi |
| Tabellenverzeichnis | vii |
| Abkürzungen | viii |
| Symbolverzeichnis | ix |
| Listings | xiv |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Zielsetzung | 1 |
| 1.2 Motivation | 1 |
| 1.3 Siemens AG und Business Unit Electrification and Automation | 3 |
| 2 Theoretischer Hintergrund | 4 |
| 2.1 Elektrische Betriebsmittel | 4 |
| 2.1.1 Schaltanlagen | 4 |
| 2.1.2 Transformatoren | 6 |
| 2.1.3 Umspannstationen | 8 |
| 2.1.4 Kabel | 8 |
| 2.2 Netztopologien | 10 |
| 2.3 Graphentheorie | 11 |
| 2.4 Algorithmen | 13 |
| 2.4.1 Algorithmus von Prim | 13 |
| 2.4.2 Algorithmus von Dijkstra | 14 |
| 2.4.3 Das Problem des Handlungsreisenden | 15 |
| 3 Konzept zur Optimierung | 16 |
| 3.1 Anforderungen | 16 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | Konzepterstellung | 17 |
| 3.2.1 | Bestimmung der Gewichtung | 20 |
| 3.2.2 | Betrachtung der Kabelverluste | 23 |
| 3.2.3 | Betrachtung eines Beispiels | 27 |
| 3.2.4 | Bewertung der Ergebnisse | 32 |
| 4 | Tool | 35 |
| 4.1 | Aufbau | 35 |
| 4.2 | Python-Programm | 37 |
| 4.2.1 | Erstellung der Graphen | 37 |
| 4.2.2 | Erstellung der Netze | 44 |
| 4.2.3 | Berechnungen anhand der Netztopologien | 51 |
| 4.2.4 | Ausgabe in Excel | 54 |
| 4.3 | Datenbank | 57 |
| 5 | Fazit | 58 |
| 5.1 | Empfehlungen | 58 |
| 5.2 | Lessons Learned | 59 |
| | Literaturverzeichnis | 60 |
| A | Digitaler Anhang | 63 |
| | Selbstständigkeitserklärung | 64 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Anteil der CO ₂ -Emissionen von Lkw an den globalen CO ₂ -Emissionen [11] | 2 |
| 2.1 | ESB eines Transformators im stationären Betrieb [16, S.43] | 6 |
| 2.2 | Vereinfachtes π -Ersatzschaltbild [22, S.469] | 10 |
| 2.3 | Beispiel eines Graphen [6, S.2] | 11 |
| 3.1 | Entwicklung des Industriestrompreises in Deutschland [1] | 20 |
| 3.2 | Rastplatz Rohnetal mit direkten Verbindungen [7] | 29 |
| 3.3 | Rastplatz Rohnetal mit möglichst kurzen Verbindungen [7] | 30 |
| 4.1 | Eingabe der Daten in Excel | 36 |
| 4.2 | Eingabe der Hindernisse in Excel | 36 |
| 4.3 | Graph G_{all} mit allen möglichen Kanten e_{all} | 38 |
| 4.4 | Beispiel von zwei sich schneidenden Geraden | 40 |
| 4.5 | Graph G_{avoid} ohne die Hindernisse zu kreuzen | 43 |
| 4.6 | Graph G_{cal} zur Berechnung | 44 |
| 4.7 | Beispiel als verzweigtes Strahlennetz | 45 |
| 4.8 | Beispiel für die Veränderung des Netzes durch den Algorithmus von Prim | 47 |
| 4.9 | Beispiel als Ringnetz | 48 |
| 4.10 | Beispiel als unverzweigtes Strahlennetz mit Verbindungen zwischen den Trafostationen | 49 |
| 4.11 | Beispiel als unverzweigtes Strahlennetz mit direkten Verbindungen zu den Trafostationen | 50 |
| 4.12 | Entwicklung der Kosten der verschiedenen Netztopologien in Bezug auf die Verluste | 55 |
| 4.13 | Tabellen für das Beispiel - Teil 1 | 56 |
| 4.14 | Tabellen für das Beispiel - Teil 2 | 56 |
| 4.15 | Tabellen für das Beispiel - Teil 3 | 56 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Preise und Eigenschaften eines NYCWY-Kabels [14, S.2] | 21 |
| 3.2 | Preise und Eigenschaften eines N2XSY-Kabels [13, S.2] | 21 |
| 3.3 | Preise für die Verlegung der Kabel | 22 |
| 3.4 | Preise für die Schaltanlage 8DJH | 22 |
| 3.5 | Verlust- und Kostenaufstellung für beide Option in der Mittelspannung . . | 33 |

Abkürzungen

CCS Combined Charging System.

CharIN Charging Interface Initiative e. V..

EA Electrification and Automation.

ESB Ersatzschaltbild.

Lkw Lastkraftwagen.

MCS Megawatt Charging System.

MST Minimaler aufspannender Baum.

Pkw Personenkraftwagen.

PVC Polyvinylchlorid.

TAB Technische Anschlussbedingungen.

TSP Problem des Handelsreisenden.

Symbolverzeichnis

A Querschnitt eines Kabels.

B Graph als Baum.

CO_2 Summenformel von Kohlenstoffdioxid.

Cu Elementsymbol von Kupfer.

\bar{C} Kapazitätsbelag eines Kabels.

D Mittlerer geometrischer Abstand zwischen den einzelnen Leitern.

ΔP Elektrische Kabelverluste.

ΔU Spannungsfall.

$\cdot \setminus \cdot$ Differenzmenge.

D_{L1L2} Mittlerer geometrischer Abstand zwischen L1 und L2.

D_{L1L3} Mittlerer geometrischer Abstand zwischen L1 und L3.

D_{L2L3} Mittlerer geometrischer Abstand zwischen L2 und L3.

E Menge der Kanten.

E_{all} Menge der Kanten des Graphen G_{all} .

e_{all} Kante in E_{all} .

E_{avoid} Menge der Kanten des Graphen G_{avoid} .

e_{avoid} Kante in E_{avoid} .

E_B Menge der Kanten des Graphen B .

E_{cal} Menge der Kanten des Graphen G_{cal} .

e_{cal} Kante in E_{cal} .

v Ecke in V .

E_{ob} Menge der Kanten der Hindernisse.

e_{ob} Kante in E_{ob} .

ϵ Permittivität.

ϵ_0 Elektrische Feldkonstante.

ϵ_r Relative Permittivität.

E_{short} Menge der Kanten des Graphen G_{short} .

e_{short} Kante in E_{short} .

E_T Menge der Kanten des Graphen T .

\rightarrow Funktion.

G Graph.

G_{all} Graph des Lkw-Ladeparks.

G_{avoid} Graph ohne Schnitt von Kanten mit Hindernissen.

G_{cal} Graph des Lkw-Ladeparks.

g Gewichtsfunktion.

$d_G(\cdot)$ Grad einer Ecke.

G_{short} Graph zur Bestimmung des kürzesten Wegs.

\overline{G} Ableitungsbelag eines Kabels.

I_{8DJH} Bemessungs-Dauerstrom der Sammelschiene 8DJH.

\underline{I}_G Ableitstrom eines Kabels.

k_0 Investitionskosten.

$I_{NXPLUSC}$ Bemessungs-Dauerstrom der Sammelschiene NXPLUS C.

e Kanten in E .

$k_{Kabel,i}$ Kosten pro Kabel.

$k_{\Delta P_{ges}}$ Kosten für die Kabelverluste pro Jahr.

k_{8DJH} Kosten für die Schaltanlage.

k_{Strom} Industrietrompreis pro kWh in 2023.

C Graph als Kreis.

l Länge des Kabels.

L1 Außenleiter im Drehstromsystem.

L2 Außenleiter im Drehstromsystem.

L3 Außenleiter im Drehstromsystem.

$l(\cdot)$ Länge eines Wegs.

\emptyset Leere Menge.

P_{MCS} Leistung eines MCS.

ϑ_L Leitertemperatur.

\bar{L} Induktivitätsbelag eines Kabels.

M Matrix.

$P_{MCS,max}$ Maximale Leistung eines MCS.

$U_{MCS,max}$ Maximale Spannung eines MCS.

$I_{MCS,max}$ Maximaler Strom eines MCS.

$V(\cdot)$ Menge der Kanten eines Graphen.

$|\cdot|$ Ordnung eines Graphen.

T Minimal aufspannender Baum.

μ Magnetische Permeabilität.

μ_0 Magnetische Feldkonstante.

μ_r Permeabilitätszahl.

$N_G(\cdot)$ Menge der Nachbarn.

$U_{N,Mittel}$ Netzspannung im Mittelspannungsnetz.

$U_{N,Nieder}$ Netzspannung im Niederspannungsnetz.

p_{Graben} Preis für das Graben ausheben und verlegen des Kabels.

$p_{Kabeltyp}$ Preis in Abhängigkeit des Kabeltyps.

p_L Preis für einen Leistungsschalterabzweig.

p_M Preis für ein Verrechnungsmessfeld.

$p_{Montage}$ Preis für die Montage des Kabels.

p_{N2XSY} Preis für N2XSY-Kabel.

p_{NYCWY} Preis für NYCWY-Kabel.

p_R Preis für einen Ringkabelabzweig.

r Radius.

$\mathbb{R}_{>0}$ Menge der reellen Zahlen größer Null.

ρ Spezifischer Widerstand.

\bar{R} Widerstandsbelag eines Kabels.

SF_6 Summenformel von Schwefelhexafluorid.

I_{be} Strombelastbarkeit.

I_i Strom pro Kabel.

\subseteq Teilmenge.

$[\cdot]^2$ Menge aller zweielementigen Teilmengen.

V Menge der Ecken.

V_{all} Menge der Ecken des Graphen G_{all} .

v_{all} Ecke in V_{all} .

V_{avoid} Menge der Ecken des Graphen G_{avoid} .

v_{avoid} Ecke in V_{avoid} .

V_B Menge der Ecken des Graphen B .

V_{cal} Menge der Ecken des Graphen G_{cal} .

v_{cal} Ecke in V_{cal} .

$\cdot \cup \cdot$ Vereinigungsmenge.

V_{ob} Menge der Ecken der Hindernisse.

v_{ob} Ecke in V_{ob} .

T_d Volllaststunden pro Tag.

V_{short} Menge der Ecken des Graphen G_{short} .

v_{short} Ecke in V_{short} .

V_T Menge der Ecken des Graphen T .

P Graph als Weg.

Listings

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | Berechnung des MST | 38 |
| 4.2 | Kontrolle der Schnittpunkte | 41 |
| 4.3 | Berechnung des Pfads mit der kürzesten Länge $l(P)$ | 42 |
| 4.4 | Berechnung des MST | 45 |
| 4.5 | Berechnung des Rings und des Pfads | 47 |
| 4.6 | Berechnung des Stroms | 51 |
| 4.7 | Bestimmung des Kabelquerschnitts | 52 |
| 4.8 | Beispiel für die Berechnung der Kosten durch die Verlustleistung pro Jahr | 54 |

1 Einleitung

Wegen des voranschreitenden Klimawandels sollen Möglichkeiten gefunden werden, die CO₂-Emissionen zu senken. Daraus resultiert eine immer größer werdende Nachfrage nach Ladeinfrastruktur sowohl für Personenkraftwagen (Pkw) als auch für Lastkraftwagen (Lkw).

Daraus resultiert zukünftig eine Nachfrage nach dem Aufbau von Lkw-Ladeparks. In diesem Zusammenhang soll untersucht werden wie die Topologie dieser Lkw-Ladeparks optimiert werden kann. Die Optimierung soll in einem softwarebasierten Tool implementiert werden, um die Untersuchung unterschiedlicher Lkw-Ladeparks möglich zu machen.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der Bachelorarbeit ist die Optimierung der Topologie anhand geeigneter Kriterien. Dabei soll das resultierende Tool die Optimierung für verschiedene Lkw-Ladeparks ermöglichen und sich nicht nur auf Einzelfälle beziehen. Hierfür soll ein Konzept erarbeitet werden, auf dessen Grundlage die Umsetzung des Tools erfolgt. Die späteren Ergebnisse sollen die Arbeit an Projekten in Bezug auf Lkw-Ladeparks erleichtern.

1.2 Motivation

Der Klimawandel stellt die Menschheit vor die Herausforderung die CO₂-Emissionen so weit zu reduzieren, dass der globale Temperaturanstieg auf unter 2°C im Vergleich zu der vorindustriellen Zeit begrenzt wird, um mögliche stärkere Auswirkungen auf das Klima zu verhindern. Die Staaten der Vereinten Nationen haben dieses Ziel in Form des Pariser Klimaabkommens 2015 in einem völkerrechtlich bindenden Vertrag festgelegt

[3].

Wie Abbildung 1.1 zu entnehmen ist, haben Lkw einen großen Anteil an den globalen CO₂-Emissionen. Um den CO₂-Emissionen in Deutschland entgegenzuwirken, hat die Bundesregierung eigene Ziele für das Einsparen von CO₂-Emissionen in Form des Klimaschutzgesetzes abgeleitet. Im Bereich des Verkehrssektors müssen hierfür die CO₂-Emissionen bis 2030 im Gegensatz zum Jahr 1990 um 49% sinken, was einer Menge von 87 Millionen t CO₂-Äquivalent entspricht. Um diese großen Mengen CO₂ einzusparen, müssen diverse Maßnahmen umgesetzt werden. Für den Bereich des Güterverkehrs sollen Kapazitäten von der Straße auf die Schiene verlegt und die Lkw elektrifiziert werden [28].

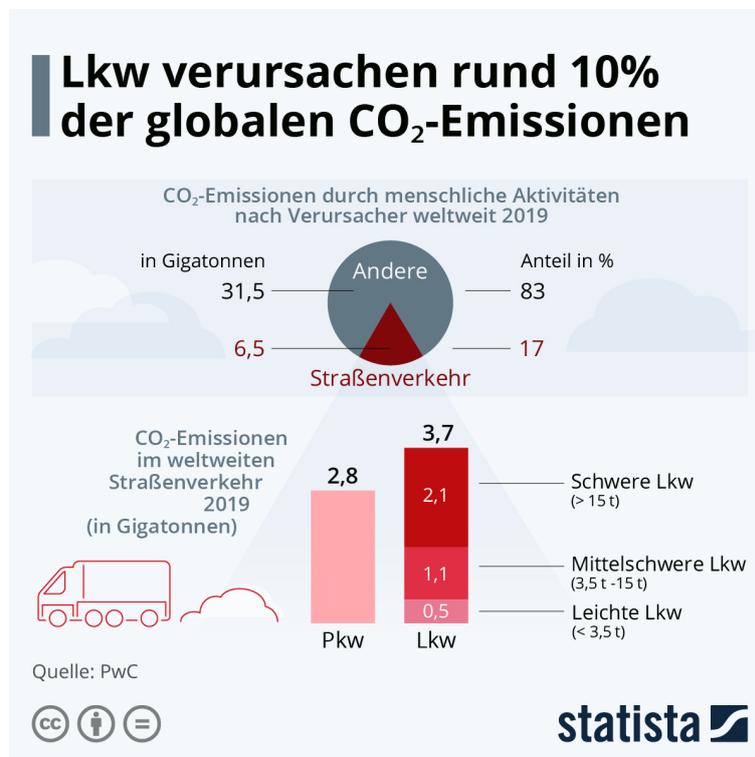


Abbildung 1.1: Anteil der CO₂-Emissionen von Lkw an den globalen CO₂-Emissionen [11]

Um die Elektrifizierung von Lkw attraktiv für die Unternehmen zu gestalten, dürfen die Kosten für die Elektrifizierung nicht größer sein als die Kosten für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben. Der Straßengüterverkehr ist ein gewinnorientiertes Geschäft mit geringen Margen und die Unternehmer werden somit auf die preiswerteste Fahrzeugtechnologie zurückgreifen [27, S.69]. Außerdem sorgt eine vorhandene Ladeinfra-

struktur für Planungssicherheit bei den Unternehmen der Automobil- und der Güterverkehrsbranche. Dieses soll zusätzlich die Akzeptanz erhöhen [20, S.24].

1.3 Siemens AG und Business Unit Electrification and Automation

Die Siemens AG ist ein deutsches Technologieunternehmen, welches in unterschiedliche Geschäftsfelder untergliedert ist. Diese sind im industriellen Bereich Smart Infrastructure, Digital Industries, Mobility und Siemens Healthineers. Des Weiteren gibt es noch Siemens Advanta, Portfolio Companies, Siemens Financial Services, Global Business Services und Siemens Real Estate Services. Zusammen kommen alle Geschäftsfelder auf eine Anzahl von 311.000 Mitarbeitenden und einen Umsatz von 72 Milliarden Euro im Jahr 2022 [25].

Die Bachelorarbeit wird im Geschäftsfeld Smart Infrastructure im Bereich Electrification and Automation (EA) durchgeführt. Im Bereich EA werden Primär- und Sekundärschaltanlagen im Bereich der Mittelspannung sowie Niederspannungs-Energieverteiler und dazugehörige Schutz- und Automatisierungslösungen angeboten [24].

2 Theoretischer Hintergrund

Das folgende Kapitel dient zur Darstellung des theoretischen wissenschaftlichen Hintergrunds. Zunächst werden die Systeme, welche in dem Lkw-Ladepark verbaut werden, erläutert. Hierfür wird abgegrenzt, welche Teile des Lkw-Ladeparks relevant sind. Anschließend werden die unterschiedlichen Netztopologien erläutert und auf die nötigen Grundlagen der Graphentheorie eingegangen. Dieses sind die Grundlagen, um die im Programm enthaltenen Algorithmen und Methoden zu verstehen.

2.1 Elektrische Betriebsmittel

Es werden zunächst die Betriebsmittel betrachtet, die zwischen der Übergabestation und der Ladesäule liegen. Diese beinhalten die verbauten Schaltanlagen, Transformatoren, Kabel und Trafostationen. Der Netzanschluss sowie ein möglicherweise nötiges Umspannwerk werden nicht betrachtet. Damit wird die Thematik abgegrenzt, auch weil hier Absprachen mit den Netzbetreibern erforderlich sind.

2.1.1 Schaltanlagen

Ein wichtiger Bestandteil der Übergabestation und der einzelnen Trafostationen sind die Schaltanlagen. Schaltanlagen bilden über ihre Sammelschienen die Netzknoten der Stromnetze. Dabei werden die ankommenden und abgehenden Leitungen beziehungsweise Kabel als Abzweig bezeichnet. Diese werden in Abzweige für Einspeisungen, Abgänge und Kupplungen zu anderen Netzknoten unterschieden. Wenn die Abzweige über Schaltgeräte verbunden sind, wird dieses als Schaltanlage bezeichnet [21, S.573]. Die Schaltanlage ist dabei die Gesamtheit der genutzten Betriebsmittel [10, S.285-287]. Zu den Betriebsmitteln gehören energietechnische Komponenten, die Primärtechnik

und Hilfseinrichtungen für die Steuerung der Anlage, die Sekundärtechnik [21, S.575]. Schaltanlagen können durch ihre Funktion die Netztopologie ändern und ermöglichen es Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten am Stromnetz vorzunehmen [21, S.573].

In den hier betrachteten Mittelspannungsnetzen werden entsprechende Mittelspannungsschaltanlagen eingesetzt. Diese Schaltanlagen werden aufgrund der Baugröße ihrer Primär- und Sekundärtechnik, sowie des benötigten Platzes für den Kabelanschluss, in voneinander abgeschotteten Feldern aufgebaut. Diese Felder werden dann über die Sammelschienen miteinander verbunden [21, S.603-604]. Dabei werden die Felder von den Herstellern entsprechend ihrer Funktion beziehungsweise den verbauten Betriebsmitteln benannt. Die für den Aufbau des Stromnetzes in einem Lkw-Ladepark nötigen unterschiedlichen Felder werden im Folgenden beschrieben. Dabei wird sich auf die Produkte der Siemens AG als Auftragnehmer beschränkt.

Ringkabelabzweig R Der Ringkabelabzweig zeichnet sich durch den Dreistellungs-Lasttrennschalter im Abzweig aus. Mit dem Lasttrennschalter kann zwischen den Optionen „Ein-Aus-Geerdet“ geschaltet werden. Zusätzlich ist ein kapazitives Spannungsprüfsystem verbaut [23, S.10].

Leistungsschalterabzweig L Bei einem Leistungsschalterabzweig ist ein Leistungsschalter neben dem Dreistellungs-Lasttrennschalter in die Verbindung zwischen Sammelschiene und Lasttrennschalter verbaut. Der Lasttrennschalter kann Schutzaufgaben für die dahinter geschalteten Betriebsmittel übernehmen. Ebenso ist hier ein kapazitives Spannungsprüfssystem verbaut [23, S.11].

Verrechnungsmessfeld M In einem Verrechnungsmessfeld werden die Ströme und Spannungen über entsprechende Strom- und Spannungswandler festgestellt [23, S.12].

Ebenfalls gibt es für die Primär- und Sekundärverteilung unterschiedliche Mittelspannungsschaltanlagen. Die Mittelspannungsschaltanlagen der Primärverteilung werden auf der Unterspannungsseite von Transformatoren eingesetzt, welche Hoch- zu Mittelspannung transformieren [21, S.607]. Die Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung hingegen werden auf der Oberspannungsseite von Transformatoren eingesetzt, welche Mittel- zu Niederspannung transformieren [21, S.611].

Die 8DJH ist eine metallgekapselte Einfachsammschienenanlage für die Innenraum-aufstellung. Dabei hat die Sammelschiene einen zulässigen Bemessungs-Dauerstrom

von $I_{8DJH} = 630 \text{ A}$. Die 8DJH wird dabei in der sekundären Verteilungsebene von öffentlichen und industriellen Energienetzen eingesetzt. Als Isoliermedium für die Schalter wird Schwefelhexfluorid (SF_6) eingesetzt [23, S.5-6].

Die NXPLUS C ist eine metallgekapselte Leistungsschalter-Festeinbauanlage für Einfach- und Doppelsammelschienenanwendung bei Innenraumaufstellung. Hier beträgt der zulässige Bemessungs-Dauerstrom der Sammelschiene $I_{NXPLUSC} = 2500 \text{ A}$. Diese wird auf der primären Verteilungsebene von Umspann- und Schaltstation eingesetzt. Auch hier wird SF_6 als Isoliermedium genutzt [26, S.5-6].

Die abschließende Konfiguration der Schaltanlagen obliegt nicht nur dem Kunden. Gemäß § 20 Satz 1 Niederspannungsanschlussverordnung - NAV sind Netzbetreiber dazu berechtigt, weitere Anforderungen an den Netzanschluss zu stellen, wodurch auch die Schaltanlagen beeinflusst werden können. Diese Anforderungen werden in den technischen Anschlussbedingungen (TAB) beschrieben.

2.1.2 Transformatoren

Ein einfacher Zweiwicklungstransformator besteht aus zwei Spulen, welche durch einen Eisenkern magnetisch gekoppelt werden. Durch den anliegenden Wechselstrom entsteht ein sich änderndes Magnetfeld, welches zur Induktion von Spannung führt [16, S.41]. Bei den für den Aufbau des Lkw-Ladeparks genutzten Leistungstransformatoren ist dieses Prinzip gleich.

Für die weiteren Betrachtungen sind vor allem die entstehenden elektrischen Verluste von Bedeutung. Hierfür soll das Ersatzschaltbild (ESB) eines Transformators in Abbildung 2.1 analysiert werden.

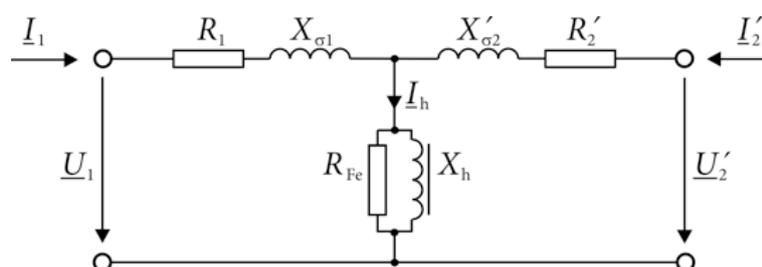


Abbildung 2.1: ESB eines Transformators im stationären Betrieb [16, S.43]

Sollte für eine gewisse Zeit kein Lkw an die Ladestation angeschlossen sein, fallen in dem Transformator weiterhin die Leerlaufverluste P_0 an. Diese entstehen durch die

Hystere- und Wirbelstromverluste im Eisenkern und die Kupfer- und Streuverluste der Wicklungen.

Die Kupferverluste werden über die Widerstände R'_1 und R'_2 dargestellt. Der Spannungsfall über die Widerstände R'_1 und R'_2 ist relativ klein, wie der durch die Streuverluste der Streuinduktivitäten $X_{\sigma 1}$ und $X'_{\sigma 2}$ [16, S.42]. Sie tragen somit nicht wesentlich zu den Leerlaufverlusten P_0 bei.

Die Hystere- und Wirbelstromverluste machen den Großteil der Leerlaufverluste P_0 aus. Dabei erwärmt sich der Eisenkern und es wird Wirkleistung umgesetzt, weshalb diese Verluste im ESB als Widerstand R_{Fe} zusammengefasst sind. Die Hystereseverluste sind dabei proportional zur Fläche der Hystereseurve und der Frequenz. Die Wirbelstromverluste nehmen quadratisch zur Frequenz zu. Um die Wirbelstromverluste möglichst klein zu halten, werden die Eisenkerne aus dünnen, gegeneinander isolierten Blechen aufgebaut [16, S.43].

Die aufgeführte Hauptreaktanz X_h steht für die magnetische Reaktanz des Transformators. Über diese wird die Magnetisierung des Eisenkerns dargestellt [21, S.376-381]. Deshalb hat die Hauptreaktanz X_h keinen großen Einfluss auf die Leerlaufverluste P_0 .

Die für den Lkw-Ladepark relevanten Arten von Transformatoren sind:

- **Netzkupplungstransformatoren**, welche unterschiedliche Spannungsebenen des Netzes verbinden. Diese werden in den Umspannwerken für das Transformieren der 110kV aus dem überregionalen Transportnetz auf die vom Kunden gewünschte Mittelspannung von 10 kV beziehungsweise 20 kV genutzt [21, S.371].
- **Verteiltransformatoren**, die in den Trafostationen stehen und die gewünschte Mittelspannung für die Ladestationen von 10 kV/20 kV auf 1 kV heruntertransformieren [21, S.371].

Ein Transformator erwärmt sich aufgrund der vorher beschriebenen Verluste. Die entstehende Wärme muss nach außen abgeführt werden. Dabei werden Transformatoren in Trockentransformatoren und Transformatoren mit einem flüssigen oder gasförmigen Wärmeüberträger eingeteilt [17, S.794].

Der Wärmetransport wird bei Trockentransformatoren durch die Umgebungsluft durchgeführt. Dabei wird zwischen Selbstkühlung mittels Konvektion und Strahlung sowie Zwangskühlung durch künstlichen Zug mittels Lüfter unterschieden. Bei Transformatoren mit flüssigem Wärmeüberträger, vorwiegend Öl, nimmt dieser die Wärme auf. Diese

Transformatoren haben gegenüber Trockentransformatoren diverse Vorteile. Sie können aufgrund der größeren spezifischen Wärme, des größeren spezifischen Gewichts und der höheren spezifischen Wärmeleitfähigkeit die Wärmemenge besser abführen und in der Kühlflüssigkeit kann eine größere Wärmemenge gespeichert werden, was bei Überlastungen von Vorteil ist [17, S.794].

2.1.3 Umspannstationen

Umspannstationen bestehen grundlegend aus einer überspannungsseitigen Schaltanlage, einer unterspannungsseitigen Schaltanlage und mindestens einem Transformator, welcher dazwischen liegt [21, S.624].

Die Stationen, in welchen die Mittelspannung über einen Verteiltransformator auf Niederspannung transformiert werden, nennen sich Ortsnetzstationen oder auch Trafostationen. Diese werden in begehbaren und nicht begehbaren Varianten gebaut. Nicht begehbare Trafostationen werden auch Kompaktstationen genannt. Übergabestationen sind besondere Umspannstationen, welche als Schnittstelle zwischen dem öffentlichen Netz und dem Netz des Kunden eingesetzt werden. Diese besitzen zur Abrechnung ein nieder- oder mittelspannungsseitiges Messfeld, welches mit einem Stromzähler ausgestattet ist [21, S.624-626].

2.1.4 Kabel

Kabel dienen zum Transport von elektrischer Energie. Sie werden im Erdreich oder in Kabelschächten verlegt. Dabei unterscheiden sie sich zu Freileitungen durch das Isoliermedium. Bei Freileitungen wird die Luft zwischen ihnen genutzt im Gegensatz zu den bei Kabeln, bei welchen Kunststoffe oder getränktes Papier genutzt werden. Dadurch kann der Abstand zwischen den Leitern erheblich verringert werden [16, S.185]. Eine Leitung oder ein Kabel wird über vier primäre längenbezogene Leitungskonstanten beschrieben. Diese vier Leitungskonstanten sind der Widerstandsbelag \bar{R} , der Ableitungsbelag \bar{G} , der Induktivitätsbelag \bar{L} und der Kapazitätsbelag \bar{C} [22, S.262]. Der Widerstandsbelag \bar{R} entsteht primär durch den Querschnitt und den spezifischen Widerstand des Leitermaterials. Dieser Wert erhöht sich weiter durch die Verdrängung des Stroms zur Außenseite des Leiters durch Skin- und Proximityeffekt [22, S.263].

Dabei gilt für den Widerstandsbelag

$$\bar{R} = \frac{\rho}{A} \quad (2.1)$$

mit dem spezifischen Widerstand ρ und dem Querschnitt A [17, 232].

Der Ableitungsbelag \bar{G} bildet die durch das Dielektrium entstehenden Verluste und die Koronaverluste ab [22, S.261-263].

Der Induktivitätsbelag \bar{L} und der Kapazitätsbelag \bar{C} sind von der geometrischen Anordnung der einzelnen Leiter L_1, L_2 und L_3 untereinander abhängig. Für den mittleren geometrischen Abstand D zwischen den einzelnen Leitern gilt

$$D = \sqrt[3]{D_{L_1L_2} \cdot D_{L_2L_3} \cdot D_{L_1L_3}} \quad (2.2)$$

Hierüber ergibt sich der Induktivitätsbelag

$$\bar{L} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right) \quad (2.3)$$

und der Kapazitätsbelag

$$\bar{C} = \frac{2\pi \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2.4)$$

Dabei ist der Radius r jener von einem Kabel, die Permittivität

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2.5)$$

und die Permeabilität

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.6)$$

Der Induktivitätsbelag \bar{L} stellt die Koppel- und Schleifeninduktivitäten dar und der Kapazitätsbelag \bar{C} modelliert die Erd- und Koppelkapazitäten [22, 261-262].

Kabel können über das π -Ersatzschaltbild in Abbildung 2.2 beschrieben werden. Sind die Kabel kürzer als 100 km, kann mit einem relativen Fehler von $< 1\%$ das vereinfachte π -Ersatzschaltbild (Abbildung 2.2) genutzt werden. Dabei wird der Ableitungsbelag \bar{G} vernachlässigt, da bei Netzspannungen < 380 kV nur ein kleiner Ableitstrom \underline{I}_G fließt [22, 265-268].

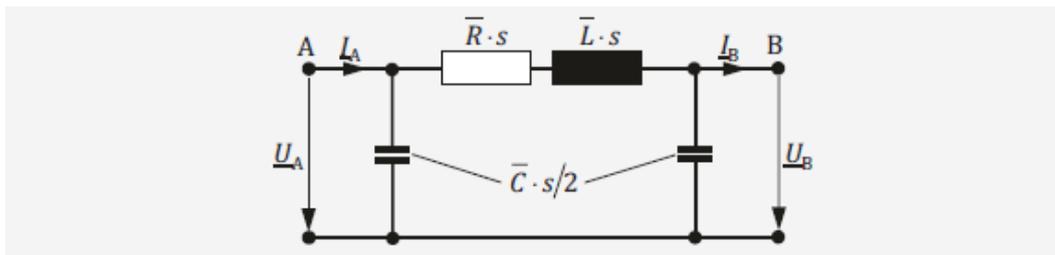


Abbildung 2.2: Vereinfachtes π -Ersatzschaltbild [22, S.469]

Die Kabelverluste ΔP können über

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot \bar{R} \cdot l \quad (2.7)$$

berechnet werden [17, S.867].

2.2 Netztopologien

Als nächstes wird auf die unterschiedlichen Netztopologien eingegangen welche es gibt und dementsprechend durch das Tool vorgeschlagen werden können.

Unter einem Netz versteht man die Summe der elektrischen Betriebsmittel, welche zur Übertragung oder Verteilung der elektrischen Energie genutzt werden [22, S. 96].

Die Netztopologien werden in Strahlennetze, Ringnetze und Maschennetze unterteilt. Generell unterscheidet man den topologischen Aufbau von Netzen zwischen unvermaschten, oder auch radialen, und vermaschten Netzen. Dabei zählen zu den unvermaschten Netzen die unverzweigten sowie die verzweigten Strahlennetze und die offen betriebenen Ringnetze. Die vermaschten Netze umfassen geschlossene Ringnetze mit einer Masche sowie die allgemeinen Maschennetze [22, S. 96-97].

Beim unverzweigten Strahlennetz werden die Verbraucher über eine einzelne strahlenförmigen Leitung, auch Stichleitung genannt, miteinander verbunden. Ist das Strahlennetz verzweigt, gehen von den einzelnen Stichleitungen weitere ab. Von Vorteil bei Strahlennetzen ist, dass sie mit geringem Materialaufwand realisiert werden können, Fehler einfacher auffindbar sind und keine großen Anforderungen an die Schutzrichtungen gestellt werden. Nachteile sind die geringe Versorgungssicherheit, der mit zunehmender Entfernung von der Einspeisung größer werdende Spannungsabfall und die relativ hohen Leistungsverluste [22, S.97-98].

Ringnetze sind Netze, bei welchen die Leitungen ringförmig angeordnet sind. Dabei kann der Ring offen oder geschlossen betrieben werden. Beim offenen Ring handelt es sich um zwei Strahlennetze, welche über eine Trennstelle verbunden werden können. Zu den Vorteilen zählen der geringe Materialaufwand, die im Vergleich zu Strahlennetzen höhere Versorgungssicherheit und die einfachen Schutzeinrichtungen. Der relativ hohe Spannungsabfall und die Versorgungsunterbrechung bei einer notwendigen Umschaltung sind dagegen von Nachteil. Der geschlossene Ring hat gegenüber dem offenen Ring den Vorteil eines geringeren Spannungsabfalls sowie geringerer Verluste [22, S.99-100].

Das Maschennetz entsteht, wenn in einem geschlossenen Ringnetz weitere Verbindungen gezogen werden. Vorteile dieser Netzform sind die hohe Versorgungssicherheit durch zusätzliche Verbindungen, ein geringer Spannungsabfall sowie geringere Netzverluste. Nachteilig sind jedoch der hohe Materialaufwand und das komplexe Schutzkonzept, das sich aus der Vielzahl der Verbindungen ergibt [22, S.101].

2.3 Graphentheorie

Für das Verständnis des Konzepts zur Optimierung und der Algorithmen sind auch Grundlagen der Graphentheorie nötig.

Ein Graph besteht aus einem Paar $G = (V, E)$ disjunkter Mengen, wobei $E \subseteq [V]^2$ gilt. Hierbei bezeichnet $[V]^2$ die Menge aller zweielementigen Teilmengen von V . Dabei werden die Elemente aus E als Kanten und die Elemente aus V als Ecken bezeichnet [6, S.2]. In Abbildung 2.3 ist ein Beispiel für einen Graphen abgebildet. Der Graph beinhaltet sieben Ecken $V = \{1, \dots, 7\}$ und die Menge $E = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{5, 7\}\}$ beschreibt die Kanten zwischen den einzelnen Ecken.

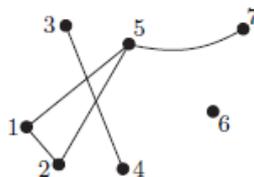


Abbildung 2.3: Beispiel eines Graphen [6, S.2]

Eine Ecke v und eine Kante e heißen inzident, wenn $v \in e$. Sie sind also miteinander verbunden. Die beiden Ecken einer Kante werden als ihre Endecken bezeichnet [6,

S.2].

Ein Graph G heißt endlich, falls $V(G)$ endlich ist und unendlich, wenn $V(G)$ unendlich ist. Dabei bezeichnet $V(G)$ die Kanten des Graphen G . $|V(G)| = |G|$ wird als Ordnung des Graphen bezeichnet. Die Ordnung des Graphens ist somit die Anzahl der Ecken [6, S.2].

Ein Graph $G' = (V', E')$ ist Teilgraph von G , wenn $E' \subseteq E$ und $V' \subseteq V$ gilt. Der Teilgraph G' wird durch V' induziert oder aufgespannt genannt, wenn er jede Kanten $\{i, j\} \in E$ mit $\{i, j\} \in V'$ enthält [6, S.3].

Der Grad einer Ecke ist abhängig von der Menge seiner Nachbarn. Zwei Ecken $\{i, j\}$ sind benachbart, wenn $\{i, j\} \subseteq E(G)$ gilt. Zwei Kanten $a \neq b$ sind benachbart, wenn sie eine gemeinsame Ecke haben. Die Menge aller Nachbarn einer Ecke v wird $N_G(v)$ genannt. Generell wird mit $N_G(A)$ für $A \subseteq V$ die Menge aller Nachbarn in $V \setminus A$ von Ecken aus A bezeichnet. $N_G(A)$ ist somit die Menge aller Ecken, welche benachbart sind mit denen aus Menge A . Der Grad einer Ecke $d_G(v)$ ist die Anzahl $|E(v)|$ der Kanten, die v enthalten, d.h. die Anzahl der Nachbarn von v [6, 3-5].

Als Weg wird ein Graph $P = (V, E)$ bezeichnet mit

$$V = \{x_0, x_1, \dots, x_k\} \quad (2.8)$$

und

$$E = \{\{x_0, x_1\}, \dots, \{x_{k-1}, x_k\}\} \quad (2.9)$$

Die x_i sind dabei paarweise unterschiedlich. Ist $P \subseteq G$, so ist P ein Weg in G [6, S.7]. Wenn P ein Weg ist und $k \geq 3$, dann ist der Graph $C = P + \{x_{k-1}, x_0\}$ ein Kreis. Es wird also eine Kante zwischen den beiden Ecken des Wegs P hinzugefügt [6, S.8]. Wenn G einen geschlossenen Kantenzug mit allen Elementen der Eckenmenge V enthält und $|G| \geq 3$ gilt, wird der entstehende Kreis als Hamiltonkreis bezeichnet. Ein Weg in G , welcher alle Knoten enthält, wird Hamiltonweg genannt. Allgemein wird ein Graph, der einen Hamiltonkreis enthält, hamiltonsch genannt [6, S.245].

Als Baum wird ein Graph B bezeichnet, welcher zwischen je zwei Kanten exakt einen Weg enthält. Äquivalent hierzu sind die Bedingungen, dass B minimal zusammenhängend beziehungsweise maximal kreislos ist. Als minimal zusammenhängend gilt B , wenn B zusammenhängend ist, aber für jede Kante $e \in B(E)$ ist B nicht zusammenhängend, sobald alle mit e verbundenen Ecken und e selbst entfernt werden. Es entsteht somit eine Lücke in dem Baum. Maximal kreislos bedeutet, dass B kreislos ist, wenn

jedoch zwischen zwei nicht benachbarten Ecken i, j eine Kante hinzugefügt wird, beinhaltet $B + \{i, j\}$ einen Kreis [6, S.14-15].

Ein Graph G mit einer Abbildung $g : E \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ wird gewichteter Graph genannt. Dabei heißt die Abbildung g Gewichtsfunktion. Das Gewicht einer Kante $e \in E$ ist $g(e)$. Die Summe der Gewichte aller Kanten wird als Gewicht von G bezeichnet. Hierbei gilt für endliche Graphen $g(G) = \sum_{e \in E} g(e)$ [15, S.253].

Ein Baum, der G aufspannt und ein minimales Gewicht hat, wird als minimaler aufspannender Baum (engl.: minimal spanning tree, MST) für G bezeichnet [15, S.275].

2.4 Algorithmen

Nachfolgend werden die für das Tool genutzten Algorithmen und das Optimierungsproblem erklärt.

2.4.1 Algorithmus von Prim

Der Algorithmus von Prim wird genutzt, um einen MST zu konstruieren. Für den Algorithmus muss ein zusammenhängender gewichteter Graph $G = (V, E)$ gegeben sein. Der Algorithmus von Prim berechnet den MST $T = (V_T, E_T)$ von G wie folgt:

1. **Start:** Es wird eine Ecke $v \in V$ gewählt und $T := (\{v\}, \emptyset)$
2. **Konstruktion:** $T = (V_T, E_T)$ sei konstruiert.
Die Kante $e = \{v, w\}$ mit $g(e)$ minimal für $v \in V_T$ und $w \notin V_T$ wird ausgewählt.
Anschließend wird $T := (V_T \cup \{w\}, E_T \cup \{e\})$ gesetzt.
3. Schritt 2 wiederholen bis $V_T = V$ erfüllt ist.

Es wird also solange eine Kante e zu dem entstehenden Graphen T hinzugefügt, bis alle Ecken aus V auch in V_T enthalten sind. Die Kanten e , welche hinzugefügt werden, liegen immer zwischen einer Ecke v aus dem schon gebildeten MST T und dem ursprünglichen Graphen G [15, S.273-276].

2.4.2 Algorithmus von Dijkstra

Zur Berechnung des kürzesten Wegs in einem zusammenhängendem gewichtetem Graphen wird der Algorithmus von Dijkstra genutzt [15, S.273].

Für diesen Algorithmus muss ebenfalls ein zusammenhängender gewichteter Graph $G = (V, E)$ vorhanden sein. Der minimale Weg P zwischen zwei Knoten $v, w \in V$ mit $v = v_1, \dots, v_{n+1} = w$ wird über seine Länge $l(P)$ bestimmt. Dabei ist die Länge $l(P)$ des Pfades P die Summe der Gewichte der einzelnen Kanten $g(v)$. Daraus folgt

$$l(P) := \sum_{i=1}^n g(v_i, v_{i+1}) \quad (2.10)$$

Der Abstand zwischen v und w wird über

$$d(v, w) := \min\{l(P) \mid P \text{ von } w \text{ nach } v\} \quad (2.11)$$

festgelegt. Der Algorithmus von Dijkstra bestimmt nun einen minimal aufspannenden Baum $B = (V_B, E_B)$ für G , wobei v die Wurzel dieses Baums ist. Dieser kürzeste Wege-Baum enthält für alle $w \in V$ einen minimalen Pfad. Dabei gilt für die Abstände $d_B(v, w) = d(v, w)$, das heißt die Abstände im Baum B mit d_B und in dem Graphen G sind gleich. Dabei erfolgt die Berechnung wie folgt:

1. **Start:** Es wird eine Ecke $v \in V$ gewählt und $B := (\{v\}, \emptyset)$
2. **Konstruktion:** $B = (V_B, E_B)$ sei konstruiert.
Es wird die Ecke $w \in V \setminus V_B$ mit $d(v, w)$ minimal für alle $w \in V \setminus V_B$ gewählt. Außerdem ein Weg P minimaler Länge $v = v_1, \dots, v_{k-1}, v_k = w$ von v nach w in G gewählt. Abschließend wird $B := (V_B \cup \{w\}, E_B \cup \{v_{k-1}, v_k\})$ gesetzt.
3. Schritt 2 wiederholen bis $V_B = V$ erfüllt ist.

Ausgehend von der Wurzel v wird in jedem Konstruktionsschritt der Pfad P gewählt, welcher die in diesem Schritt geringste Länge $l(P)$ hat bis alle Ecken aus G in B sind [15, S.273-274].

2.4.3 Das Problem des Handlungsreisenden

Bei dem Problem des Handlungsreisenden (engl.: travelling salesman problem, TSP) handelt es sich um ein Optimierungsproblem. Der Handlungsreisende soll bei einer Rundreise n Städte besuchen und dabei eine minimale Distanz zurücklegen. Die Lösung dieses Optimierungsproblem ist nicht trivial. Es existieren keine effizienten Algorithmen für dessen Lösung. Mit steigender Anzahl an Städten nimmt die Rechenzeit exponentiell zu. Um die Laufzeit zu verkürzen und das Problem zu lösen, werden Heuristiken genutzt [29, S. 413-418]. Eine Heuristik ist eine Methode zur Lösung eines Problems. Dabei liefert die Heuristik eine gute Lösung, welche jedoch nicht optimal sein muss [19].

Die Städte werden als Ecken eines gewichteten Graphen $G = (V, E)$ betrachtet. Die kürzeste Rundreise beschreibt einen Teilgraphen $T \subseteq G$, welcher alle Ecken aus G enthält und sie über die jeweils am geringsten gewichtete Kante miteinander verbindet. Dabei ist der Grad $d_T(v)$ jeder Ecke $v \in V$ $d_T(v) = 2$, es gehen also zwei Kanten $a, b \in E$ mit $a \neq b$ von jeder Ecke v ab. Dabei entsteht ein Hamiltonkreis. Wenn man eine beliebige Kante aus dem Hamiltonkreis entfernt, erhält man einen Hamiltonpfad, welcher die Eigenschaften eines minimalen aufspannenden Baums erfüllt. Daraus folgt, dass das Gewicht eines minimalen aufspannenden Baums kleiner oder gleich dem Gewicht eines optimalen Hamiltonpfads und damit auch einer optimalen Rundreise ist. Es kann abschließend eine Kante hinzugefügt werden, um den entstandenen Hamiltonpfad zu einem Hamiltonkreis zu machen und die Rundreise abzuschließen [29, S. 418-419]. Das Ergebnis ist zufriedenstellend, aber nicht unbedingt das optimale Ergebnis. Dafür kann das Ergebnis für den Nutzer in annehmbarer Zeit zur Verfügung gestellt werden.

3 Konzept zur Optimierung

Im Folgenden wird ein Konzept zur Optimierung des Netzes entwickelt werden. Das Netz beschränkt sich dabei auf den Bereich zwischen der Übergabestation und den einzelnen Trafostationen beziehungsweise den einzelnen Megawatt Charging Systems (MCS). Dabei werden sowohl ökonomische als auch elektrotechnische Aspekte beachtet. Das Ergebnis soll für den Kunden Möglichkeiten für die Verkabelung seines Lkw-Ladeparks darstellen.

3.1 Anforderungen

Im ersten Schritt werden die Anforderungen, welche an das Konzept und das daraus resultierende Tool gestellt werden, analysiert werden.

Die Stakeholder des Konzepts beziehungsweise des daraus resultierenden Tools sind die Kunden, die Siemens AG und der Benutzer des Programms. Weiter gefasst sind auch die späteren Nutzer der Lkw-Ladeparks, die Baufirmen und Hersteller der elektrischen Lkw Stakeholder des Konzepts. Auf die späteren Nutzer der Lkw-Ladeparks, die Baufirmen und Hersteller der elektrischen Lkw wird hier jedoch nicht weiter eingegangen werden. Der Hintergrund hierfür ist, dass Ihre Interessen und ihre Einflussmöglichkeiten mit dem Beginn der Projektplanung eines solchen Lkw-Ladeparks erst signifikant werden und nicht Bestandteil dieser Konzepterstellung sind.

Der Nutzer des daraus resultierenden Tools ist daran interessiert, dass er eine einfache Möglichkeit hat, für eine entsprechende Anfrage durch den Kunden eine erste Abschätzung der Kosten zu bekommen. Des Weiteren kann er mit den Daten des optimierten Netzes bei Beginn der Projektplanung eine tiefergreifendere Analyse zunächst unterlassen. Es kann früher mit der Projektplanung begonnen werden, da die verschiedenen

Möglichkeiten dargestellt werden. Die Gegenüberstellung der anderen gängigen Netztopologien kann als Basis für die ersten Gespräche mit dem Kunden genutzt werden bis eine final optimierte Lösung vorliegt.

Die Siemens AG als Auftragnehmer profitiert von dem daraus resultierenden Tool in mehreren Aspekten. Es können dem Kunden zeitnah erste Informationen zu seiner Anfrage gegeben werden. Außerdem schafft die Umsetzung mehr Kapazitäten, weil Anfragen schneller bearbeitet werden können.

Durch diese Abwicklung können im gesamten Supply Chain Verlauf Forecast-Analysen und dadurch Kabel geplant und eventuell bestellt werden.

Der Kunde ist daran interessiert eine schnelle Rückmeldung zu möglichen Kosten eines Lkw-Parks zu erhalten und eine Gegenüberstellung verschiedener Optionen kann den Entscheidungsprozess unterstützen. Dabei müssen die Werte zunächst nicht eine exakte vertragsgebundene Datenlage aufzeigen, aber dennoch dem Kunden einige Werte für seine interne (Budget)-Planung mitgeben.

Zusammenfassend soll das Konzept eine optimierte Netztopologie hervorbringen und diese im Vergleich mit anderen gängigen Topologien darstellen. Hinzukommen Abschätzungen der Kosten und elektrischen Verluste, auf dessen Grundlage die weitere Planung durchgeführt werden kann.

3.2 Konzepterstellung

Die Lkw-Ladeparks sind räumlich begrenzt durch die Orte, an welchen sie aufgebaut werden. Dazu gehören zum Beispiel Rasthöfe und Betriebshöfe von Logistikzentren. Aufgrund der Größe der Akkus von Lkws sowie den gesetzlichen Pausenzeiten der Fahrer ergeben sich verschiedene Ansprüche an Lkw-Ladeparks.

Nach 4,5 Stunden Lenkzeit ist eine Pause von mindestens 45 Minuten zu machen, welche in zwei Pausen mit jeweils mindestens 15 und 30 Minuten aufgeteilt werden kann. Des Weiteren ist eine tägliche Ruhezeit von mindestens 11 Stunden bzw. zwei Pausen mit jeweils mindestens drei Stunden und neun Stunden vorgeschrieben [2].

Diese Zeiten können genutzt werden, um den Lkw zu laden und geben somit ein Zeitfenster vor, in welchem der Akku wieder vollständig geladen sein soll. In der 45-minütigen Pause muss der Akku mit einer großen Leistung geladen werden, damit dieser schnell aufgeladen ist. Hierfür sollen MCS genutzt werden, welche eine Leistung

3 Konzept zur Optimierung

von > 1 MW übertragen können. Die Standards hierfür befinden sich momentan in der Entwicklung. Ein globaler Verband aus diversen Unternehmen, welcher entsprechende Empfehlungen für diesen Standard herausgibt, ist der Verein Charging Interface Initiative e. V. (CharIN) [4]. Nach CharIN sollen Spannungen von bis zu

$$U_{MCS,max} = 1.250 \text{ V} \quad (3.1)$$

und Ströme von bis zu

$$I_{MCS,max} = 3.000 \text{ A} \quad (3.2)$$

möglich sein. Dies würde zu einer maximalen Leistung von bis zu

$$\begin{aligned} P_{MCS,max} &= U_{MCS,max} \cdot I_{MCS,max} = 1.250 \text{ V} \cdot 3.000 \text{ A} \\ &= 3,75 \text{ MW} \end{aligned} \quad (3.3)$$

führen, welche durch ein MCS nutzbar wäre [5, S.10].

In der längeren Ruhezeit sollen die Lkws mit einer geringeren Leistung geladen werden. Bei diesem sogenannten „Overnight Charging“ soll das von dem Pkw bekannte Combined Charging System (CCS) genutzt werden, welches mit einer geringeren Leistung von bis zu 500kW lädt [8, S.402].

Die betrachteten Lkw-Ladeparks bestehen dabei nur aus solchen MCS. Aufgrund ihrer hohen Leistung werden für sie eigene Trafostationen vorgesehen. Die betrachteten MCS arbeiten dabei im Bereich von 1 MW.

Aufgrund des geringen Platzangebots an den Orten, an denen die Lkw-Ladeparks aufgestellt werden, werden die Positionen der einzelnen Stationen sowie der Einspeisung vom Netzbetreiber schon als vorher definiert angenommen.

Aus den einzelnen Positionen der Übergabestation und der Trafostationen kann ein gewichteter ungerichteter Graph $G = (V, E)$ modelliert werden. Dabei stellen die Ecken $v \in V$ die Übergabestation und die Trafostationen dar. Die Kanten $e \in E$ sind alle möglichen Verbindungen, welche eingegangen werden können. Der entstandene Graph G kann nun mittels der beschriebenen Algorithmen optimiert werden. Über den Algorithmus von Prim wird sich ein MST ergeben, welcher in den meisten Fällen ein verzweigtes Strahlennetz darstellt. Theoretisch gesehen könnte der MST eines Graphen auch ein Hamiltonpfad sein und somit ein unverzweigtes Strahlennetz. Über das TSP kann so-

wohl ein (offenes) Ringnetz als auch ein unverzweigtes Strahlennetz berechnet werden. Dabei bietet sich der Algorithmus von Prim an, da eine Ecke v ausgewählt werden kann, an dem der Algorithmus beginnt. Hierfür kann die Übergabestation beziehungsweise Einspeisung genutzt werden. Andere Algorithmen wie der Algorithmus von Krukskal oder der Algorithmus von Borůvka verfolgen beide den Ansatz, dass sie mit der Kante mit dem geringsten Gewicht beginnen, was bei diesem Problem nicht zielführend ist. Der restliche Ablauf der Algorithmen ähnelt sich [15, S.281-283]. Die Gewichtung $g(e)$ der Kanten ist somit das entscheidende Kriterium für die Optimierung der Netztopologie des Lkw-Ladeparks, da die Algorithmen über diesen Wert arbeiten.

3.2.1 Bestimmung der Gewichtung

Die Bestimmung des ausschlaggebenden Arguments wird über die Kosten der unterschiedlichen elektrischen Betriebsmittel ermittelt. Dabei sollen sowohl deren Anschaffung als auch die Kosten, welche durch die Verluste entstehen, betrachtet werden. Dazu wird ein fester Wert für den Strompreis $k_{Strom} = 26,5 \text{ Ct/kWh}$ definiert. Hierbei handelt es sich um den Industriestrompreis des Jahres 2023 in Deutschland inklusive der Stromsteuer, wie in Abbildung 3.1 zu sehen.

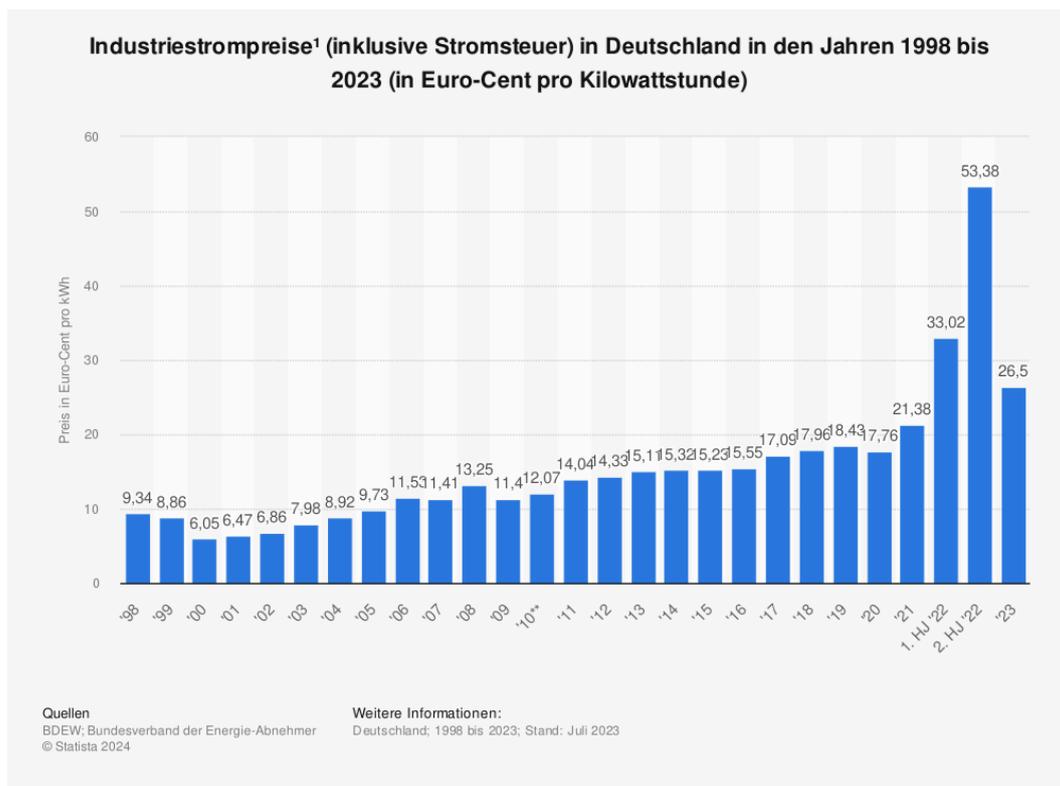


Abbildung 3.1: Entwicklung des Industriestrompreises in Deutschland [1]

Es ist zu erkennen, dass die Preisentwicklung nicht stabil ist. Der Industriestrompreis ist bis zum Jahr 2021 relativ kontinuierlich angestiegen. Durch die Ereignissen der letzten beiden Jahre, ist die Veränderung deutlich stärker und unkontinuierlich. Allgemein ist die Preisentwicklung abhängig von diversen Faktoren wie der Volkswirtschaft, der Politik und dem allgemeinen Weltgeschehen. Gleiches gilt auch für alle weiteren Kosten beziehungsweise Preise, die der folgenden Argumentation zugrunde gelegt werden. Auch

3 Konzept zur Optimierung

diese werden sich mit der Zeit weiter ändern. Hierdurch kann es in der aufgeführten Schlussfolgerung zu einer Änderung der Aussage, durch eine geänderte Kostenstruktur, kommen. Dies erfordert eine Neubewertung des Sachverhalts.

Folgend werden die zur Berechnung genutzten Preise in einzelnen Tabelle aufgestellt. Die Preise wurden mir durch Mitarbeitende der Siemens AG zur Verfügung gestellt. Die Kabel sowohl für Nieder- als auch für Mittelspannung werden von der Klaus Faber AG bezogen. Die Preise für unterschiedliche Querschnitte und die Eigenschaften eines gängigen NYCWY-Kabels in der Niederspannung sind in Tabelle 3.1 aufgestellt. Für ein gängiges N2XSY-Kabel in der Mittelspannung sind die Preise und Eigenschaften in Tabelle 3.2 dargestellt. Dabei wird sich auf eine Nennspannung bei Niederspannung von $U_{N,Nieder} = 1 \text{ kV}$ und bei Mittelspannung $U_{N,Mittel} = 20 \text{ kV}$ bezogen. Die Niederspannungskabel enthalten drei Leiter, wohingegen die Mittelspannungskabel nur einen Leiter enthalten. Die Strombelastbarkeit I_{be} bezieht sich auf die Verlegung in Erde und eine Leitertemperatur $\vartheta_L = 20^\circ\text{C}$.

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|--------|
| Querschnitt A [mm ²] | 25 | 35 | 70 | 150 |
| Strombelastbarkeit I_{be} [A] | 133 | 160 | 234 | 357 |
| Preis p_{NYCWY} [EUR/km] | 2.265 | 2.600 | 3.435 | 10.370 |
| Widerstandsbelag \bar{R} [Ω /km] | 0,727 | 0,524 | 0,268 | 0,124 |

Tabelle 3.1: Preise und Eigenschaften eines NYCWY-Kabels [14, S.2]

| | | | |
|--|-------|-------|-------|
| Querschnitt A [mm ²] | 50 | 95 | 120 |
| Strombelastbarkeit I_{be} [A] | 220 | 320 | 413 |
| Preis p_{N2XSY} [EUR/km] | 3.020 | 3.710 | 4.100 |
| Widerstandsbelag \bar{R} [Ω /km] | 0,387 | 0,193 | 0,153 |

Tabelle 3.2: Preise und Eigenschaften eines N2XSY-Kabels [13, S.2]

Die Preise für die Bauarbeiten werden in Tabelle 3.3 aufgestellt. Inbegriffen sind die Verlegung der Kabel in einem ausgehobenen Graben sowie die Kabelverlegung bei geschlossener Bauweise, also bei der unterirdischen Verlegung, und die anschließenden Kosten für die Montage der Kabel.

| | |
|--|-----|
| Preis für Graben ausheben und Kabel verlegen p_{Graben} [EUR/m] | 34 |
| Preis für Kabelverlegung bei geschlossener Bauweise $p_{Pressung}$ [EUR/m] | 48 |
| Preis für Kabelmontage $p_{Montage}$ [EUR/Stk] | 930 |

Tabelle 3.3: Preise für die Verlegung der Kabel

Als letztes folgen die Preise für die unterschiedlichen Felder der Schaltanlage 8DJH in Tabelle 3.4. Hier werden die in Kapitel 2.1.1 beschriebenen unterschiedlichen Arten von Feldern berücksichtigt.

| | |
|--|--------|
| Ringkabelabzweig p_R [EUR/Stk] | 5.000 |
| Leistungsschalterabzweig p_L [EUR/Stk] | 10.000 |
| Verrechnungsmessfeld p_M [EUR/Stk] | 5.000 |

Tabelle 3.4: Preise für die Schaltanlage 8DJH

Es soll auch die Auslastung miteinbezogen werden. Ähnlich wie bei Anlagen zur Energieerzeugung soll die Idee der Volllaststunden genutzt werden. Hier beziehen sich die Volllaststunden T_d auf die Stundenanzahl des Tages, an welcher perspektivisch alle Stationen zum Laden genutzt werden. Als realistisch wird angenommen, dass bis zu 16h pro Tag eine vollständige Ausnutzung herrscht, da in der restlichen Zeit, im Zeitraum zwischen 22 und 6 Uhr, ein großer Teil der Fahrer schläft und andere Lademöglichkeiten nutzt.

Unabhängig von der Netztopologie sind die Kosten für die Transformatoren der Trafostationen und deren Verluste. Diese dienen primär zur Versorgung der angeschlossenen MCS und verändern sich demnach nicht durch die Netztopologie. Aus diesem Grund werden die Kosten für diese nicht weiter betrachtet.

Es soll trotzdem kurz auf die Bedeutung der Transformatoren für die elektrischen Verluste eingegangen werden, da ein großer Teil der Betriebskosten der Lkw-Ladeparks durch die Summe der Verluste der elektrischen Betriebsmittel entstehen wird. Das die elektrischen Verluste einen großen Teil der Kosten ausmachen, lässt sich auf die Tatsache zurückführen, dass Schaltanlagen wartungsfrei sind und auch die anderen elektrischen Betriebsmittel wie Transformatoren, Trafostationen und Kabel nicht viel servicebedingte Wartungen benötigen.

Aufgrund der Leistung der Transformatoren im Bereich von > 1 MVA, welche durch die Leistung der MCS bestimmt wird, gilt es auch hier die Verluste zu minimieren. Da Öl sich gemäß Kapitel 2.1.2 als besserer Wärmeüberträger als Feststoffe darstellt, ist dessen Verwendung in diesem Anwendungsfall sinnvoll. Außerdem sind auch die Leerlaufverluste P_0 aufgrund der höheren Leistung der Transformatoren relevant.

Einen weiteren Einfluss auf die Kosten der Topologie haben die Längen und Anzahl der Kabel und die Anzahl an Feldern der Schaltanlagen. Daraus folgt, dass ein Netz mit möglichst kurzen Kabelwegen und einer geringen Anzahl an Feldern ein optimiertes Netz darstellen muss.

3.2.2 Betrachtung der Kabelverluste

Die zu betrachteten elektrischen Verluste fallen in den Kabeln an. Da Übergangsverluste generell gering sind, werden alle anfallenden Übergangsverluste nach Rücksprache mit den Verantwortlichen bei der Siemens AG vernachlässigt.

Um zu kontrollieren, ob Vereinfachungen bei der Berechnung der Kabelverluste möglich sind, wird ein Beispiel betrachtet werden.

Es wird ein Kabel vom Typ N2XS2Y mit einer Länge $l_{Beispiel} = 1000$ m und einem Querschnitt $A_{Beispiel} = 70$ mm² betrachtet. Es handelt sich hierbei um ein Kupferkabel. Zur Berechnung der Verluste wird das π -Ersatzschaltbild betrachtet. Als erstes werden die Komponenten aus dem ESB berechnet.

Aus dem spezifischen Widerstand $\rho_{CU} = 0,017241$ $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ bei 20°C und dem Querschnitt $A = 70$ mm² ergibt sich

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \frac{\rho_{CU}}{A} = \frac{0,017241 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}}{70 \text{ mm}^2} \\ &= 246,3 \frac{\mu\Omega}{\text{m}}\end{aligned}\tag{3.4}$$

Hieraus ergibt sich ein Widerstand von

$$\begin{aligned}R_{Beispiel} &= \bar{R} \cdot l_{Beispiel} = 246,3 \frac{\mu\Omega}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ m} \\ &= 246,3 \text{ m}\Omega\end{aligned}\tag{3.5}$$

3 Konzept zur Optimierung

Es wird angenommen, dass die Kabel der einzelnen Phasen alle denselben Abstand $D_L = 0,1 \text{ m}$ zueinander haben. Daraus folgt für den mittleren geometrischen Abstand

$$D_{\text{Beispiel}} = \sqrt[3]{D_{L1L2} \cdot D_{L2L3} \cdot D_{L1L3}} = \sqrt[3]{D_L^3} = \sqrt[3]{(0,1 \text{ m})^3} \quad (3.6)$$
$$= 0,1 \text{ m}$$

Mit der elektrischen Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$, der Permittivitätszahl für Polyvinylchlorid (PVC) $\epsilon_{r,PVC} = 3,1$ [9, S.69], der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$, der Permeabilitätszahl für Kupfer $\mu_{r,Cu} = 1 - 10 \cdot 10^{-6}$ [9, S.80] und dem Radius

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{70 \text{ mm}^2}{\pi}} \quad (3.7)$$
$$= 4,72 \text{ mm}$$

ergeben sich der Induktivitätsbelag

$$\bar{L} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{D}{r}\right) \right) \quad (3.8)$$
$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 3,1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{0,1 \text{ m}}{4,72 \text{ mm}}\right) \right)$$
$$= 2,05 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}}$$

und der Kapazitätsbelag

$$\bar{C} = \frac{2\pi \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (3.9)$$
$$= \frac{2\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot (1 - 10 \cdot 10^{-6})}{\ln\left(\frac{0,1 \text{ m}}{4,72 \text{ mm}}\right)}$$
$$= 18,19 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$$

Hieraus folgt die Induktivität

$$L_{\text{Beispiel}} = \bar{L} \cdot l_{\text{Beispiel}} = 2,05 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ m} \quad (3.10)$$
$$= 2,05 \text{ mH}$$

3 Konzept zur Optimierung

und die Kapazität

$$\begin{aligned} C_{\text{Beispiel}} &= \bar{C} \cdot l_{\text{Beispiel}} = 18,19 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \cdot 1000 \text{ m} \\ &= 18,19 \text{ nF} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Aus dem π -Ersatzschaltbild (in Abbildung 2.2) können nun die fehlenden Spannungen und Ströme über die Admittanzmatrix berechnet werden.

Für die Admittanzmatrix folgt:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ -\underline{I}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{RL} + \underline{Y}_{C1} & -\underline{Y}_{RL} \\ -\underline{Y}_{RL} & \underline{Y}_{RL} + \underline{Y}_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Für die Admittanzen gilt

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{RL} &= \underline{Y}_R + \underline{Y}_L \\ &= \frac{1}{R_{\text{Beispiel}}} + \frac{1}{j\omega \cdot L_{\text{Beispiel}}} \\ &= \frac{1}{246,3 \text{ m}\Omega} + \frac{1}{j\omega \cdot 2,05 \text{ mH}} \\ &= 4,06 \text{ S} - j \cdot 1,55 \text{ S} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{C1} &= \underline{Y}_{C2} \\ &= \frac{1}{2}(j\omega \cdot C) \\ &= 0 + j \cdot 2,86 \mu\text{S} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass \underline{U}_A und \underline{I}_A bekannt sind vom Netz kommen. Dabei gilt

$$\underline{U}_A = 20 \text{ kV} \angle 0^\circ \quad (3.15)$$

und

$$\underline{I}_A = 10 \text{ A} \angle 0^\circ \quad (3.16)$$

Hierüber können nun \underline{U}_B und \underline{I}_B bestimmt werden. Zuerst wird die erwähnte Gleichung aus der Matrix

$$\underline{I}_A = (\underline{Y}_{RL} + \underline{Y}_{C1}) \cdot \underline{U}_A - \underline{Y}_{RL} \cdot \underline{U}_B \quad (3.17)$$

3 Konzept zur Optimierung

nach

$$\underline{U}_B = \frac{\underline{I}_A - (\underline{Y}_{RL} + \underline{Y}_{C1}) \cdot \underline{U}_A}{-\underline{Y}_{RL}} \quad (3.18)$$

umgestellt. Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= \frac{10 \text{ A} \angle 0^\circ - (4,06 \text{ S} - j \cdot 1,55 \text{ S} + j \cdot 2,86 \mu\text{S}) \cdot 20 \text{ kV} \angle 0^\circ}{4,06 \text{ S} - j \cdot 1,55 \text{ S}} & (3.19) \\ &= 19.997,85 \text{ V} \angle -0,0023^\circ \\ &= 19.997,85 \text{ V} \angle 0^\circ \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} -\underline{I}_B &= -\underline{Y}_{RL} \cdot \underline{U}_A + (\underline{Y}_{RL} + \underline{Y}_{C2}) \cdot \underline{U}_B & (3.20) \\ &= (-4,06 \text{ S} + j \cdot 1,55 \text{ S}) \cdot 20 \text{ kV} \angle 0^\circ + (4,06 \text{ S} - j \cdot 1,55 \text{ S} + j \cdot 2,86 \mu\text{S}) \cdot \\ &19.997,85 \text{ V} \angle -0,0023^\circ \\ &= 10,0007 \text{ A} \angle 179,35^\circ \end{aligned}$$

$$\underline{I}_B = 10 \text{ A} \quad (3.21)$$

Der Einfluss der Kapazitäten ist sehr gering. Es fließt nahezu kein Strom über die Kapazitäten, da für die Ströme \underline{I}_A und \underline{I}_B leicht gerundet $\underline{I}_A = \underline{I}_B$ gilt. Auch bei höheren Strömen ist absehbar, dass deren Einfluss gering ist und somit für diesen Anwendungsfall vernachlässigt werden kann. Die genauere Berechnung wird später in den Verlusten und Kosten keine signifikanten Änderungen aufzeigen und soll deshalb nicht weiter verfolgt werden.

Der Spannungsfall ΔU , welcher über die Induktivität und den Widerstand abfällt, beträgt

$$\begin{aligned} \Delta U_{genau} &= |\underline{U}_A| - |\underline{U}_B| = 20 \text{ kV} - 19997,85 \text{ V} & (3.22) \\ &= 2,15 \text{ V} \end{aligned}$$

Mit dem Spannungsfall ΔU und dem Strom \underline{I}_A ergibt sich die Verlustleistung des Kabels

$$\begin{aligned} \Delta P_{genau} &= \Delta U \cdot |\underline{I}_A| = 2,15 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} & (3.23) \\ &= 21,5 \text{ W} \end{aligned}$$

Werden nun die Verlustleistung ΔP mittels der Gleichungen 2.7 ermittelt, folgt für eine einzelne Leitung

$$\begin{aligned}\Delta P &= I^2 \cdot \bar{R} \cdot l & (3.24) \\ &= (10 \text{ A})^2 \cdot 246,3 \text{ m}\Omega \\ &= 24,63 \text{ W}\end{aligned}$$

Daraus ergibt sich zwischen dem genauen Wert aus dem ESB und dem Wert aus der Formel ein relativer Fehler

$$\begin{aligned}e &= \frac{\Delta P - \Delta P_{\text{genau}}}{\Delta P_{\text{genau}}} & (3.25) \\ &= \frac{24,63 \text{ W} - 21,5 \text{ W}}{21,5 \text{ W}} \\ &= 14,56 \%\end{aligned}$$

Der relative Fehler e ist signifikant, jedoch im akzeptablen Bereich, um mit den Ergebnissen der späteren Berechnungen aussagefähig zu sein. Somit reicht in diesem Anwendungsfall die Näherung durch die Formel aus, da es hier nicht um eine genaue Berechnung der Werte geht, sondern um eine Beispielbetrachtung zur Verdeutlichung der Rechnung. Die vorausgesetzten Bedingungen müssen in der Realität nicht so auftreten wie angenommen, wodurch auch diese eine gewisse Abschätzung darstellen. Der daraus resultierende Fehler ist weiterhin für alle Kabel gleich und wird die Vergleichbarkeit später nicht beeinflussen. Außerdem sind mögliche geringere elektrische Verlustleistungen positiv zu bewerten, da diese mit geringeren Kosten verbunden sind. Auch der Spannungsfall ΔU wird betrachtet. Dieser ist unter den angenommen Bedingungen sehr gering. Aufgrund der geringen Ausbreitung der betrachteten Lkw-Ladeparks und der dadurch begrenzten Länge der Kabel wird dieser nicht auf unvorhersehbar hohe Werte ansteigen. Des Weiteren sollen keine tiefgreifenden Betrachtungen des Netzes durchgeführt werden, weshalb dieser Aspekt im Folgenden vernachlässigt wird.

3.2.3 Betrachtung eines Beispiels

Es soll an einem beispielhaften Lkw-Ladepark herausgefunden werden, welche Optionen es zur Optimierung der Netztopologie gibt. Um die Anzahl der MCS zu bestimmen wird Bezug auf eine Studie der nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur genommen.

Zwei andere betrachtete Studien des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung legen ähnliche Zahlen in Bezug auf den Anteil der elektrischen Lkw an der gesamten Lkw-Flotte und Ansätze zur Berechnung einer möglichen Anzahl von MCS dar [18, 20]. Es wird jedoch von der Studie der nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur ausgegangen, da diese nah am Regierungsapparat durchgeführt wurde und davon auszugehen ist, dass sich die Politik auf so eine Studie beziehen kann.

In der Studie wird der Aufbau der Ladeinfrastruktur für Pkw und Lkw an Rastanlagen beschrieben. Dabei werden Wirtschaftlichkeit, die Netzanbindung, die logistischen Prozesse und der gegenseitigen Einflüsse vom Laden der Pkw und der Lkw aufeinander mit berücksichtigt [12, S.11].

Es wird die Anzahl an MCS aus der Studie von einem Prototyp II Ladepark genommen. Dieser Ladepark hat ein durchschnittliches Verkehrsaufkommen und ein Netzanschluss ist vorhanden [12, S.13]. Die MCS werden in ihrer Leistung unterschieden. Während im Jahr 2027 vier MCS mit einer Leistung von $P_{MCS} = 700 \text{ kW}$ benötigt werden, steigt dieser Wert zum Jahr 2035 bereits auf 14 MCS mit einer Leistung von $P_{MCS} = 900 \text{ kW}$ an [12, S.25].

Es werden beispielhaft die Werte für das Jahr 2030 verwendet. Diese wurden in der Studie beispielhaft für die Raststätte Rohnetal an der A38 bestimmt [12, S.24]. Diese Raststätte soll nun auch genutzt werden um herauszufinden, welches Layout am sinnvollsten ist. Jedoch werden zur Auslegung keine potenziellen MCS mit einer Leistung $P_{MCS} = 900 \text{ kW}$ betrachtet, sondern mit einer Leistung $P_{MCS} = 1000 \text{ kW}$, da dies als Vorgabe seitens der Siemens AG kam. Diese Vorgabe resultiert aus der Kenntnis darüber, dass sich solche Systeme bei den Herstellern in Entwicklung befinden.

Laut Studie sind drei von diesen MCS nötig. Die vier anderen MCS mit geringerer Leistung werden nicht mit einbezogen [12, S.24]. Wenn diese miteinbezogen würden, würde das Ergebnis entsprechend skalieren. Das heißt, die berechneten Werte würden entsprechend der Leistung der MCS und der Positionen dieser untereinander steigen. Die Möglichkeiten die bestehen sind die Verteilung der Energie auf Nieder- oder Mittelspannungsebene. Dabei können die MCS von einer einzelnen zentralen Umspann- oder Übergabestation oder durch aufbauen unterschiedlicher Netze versorgt werden. Hierfür werden über eine online verfügbare Karte die Abstände zu möglichen Aufstellorten der Trafostationen gemessen. Als Einspeisung wird der Platz östlich der Raststätte angesehen, da hier ein potentieller Anschluss für die Mittelspannung in unmittelbarer Nähe sein kann.

In den folgenden Abbildungen 3.2 und 3.3 werden die Trafostationen beziehungsweise die MCS durch gelbe Kreise und die Einspeisung durch einen grünen Kreis markiert.

3 Konzept zur Optimierung

Rosa Ziffern markieren die einzelnen Kabelverbindungen. Es wird vereinfacht davon ausgegangen, dass kleinere mögliche Hindernisse wie Bäume oder ähnliches nicht umgangen werden müssen. Würde dieses in die Betrachtung mit eingehen, müsste auch die unterschiedlichen Kosten für die Verlegung der Kabel gemäß Tabelle 3.3 mit einbezogen werden. Trotzdem sollte beachtet werden, dass sich diese Kosten bei genauerer Betrachtung erhöhen würden. Die Entfernungen sind an den einzelnen Objekten angegeben. Die ausgewählten Orte stellen potenzielle Aufstellorte dar.

Es werden zwei unterschiedliche Optionen betrachtet. Bei Option 1 in Abbildung 3.2 werden die Trafostationen beziehungsweise die MCS durch eine direkte Verbindung mit der Einspeisung verbunden. Entgegen der Darstellung, handelt es sich am Anfang nicht um ein einzelnes Kabel. Bei Option 2 in Abbildung 3.3 werden die kürzesten Verbindungen zwischen den einzelnen Trafostationen beziehungsweise MCS und der Einspeisung hergestellt.



Abbildung 3.2: Rastplatz Rohndetal mit direkten Verbindungen [7]

Um einen Vergleich zwischen den Möglichkeiten herzustellen sollen verschiedene Aspekte berechnet und anschließend bewertet werden. Dabei werden die Leitungsverluste ΔP_i über Gleichung 2.7 berechnet. Die Querschnitte A_i werden über den fließenden Strom I_i bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass es keine Phasenverschiebung gibt, wodurch Schein- gleich Wirkleistung entspricht. Es wird der Querschnitt A genutzt, welcher eine ausreichende Strombelastbarkeit bietet. Die geringsten zu ver-



Abbildung 3.3: Rastplatz Rohndetal mit möglichst kurzen Verbindungen [7]

wendenden Querschnitte sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 als erstes angegeben. Die Kabelkosten $k_{Kabel,i}$ beinhalten sowohl die Kosten für die Verlegung, die Montage sowie die Anschaffung. Sie ergeben sich somit zu

$$k_{Kabel,i} = p_{Kabeltyp} \cdot l + p_{Graben} \cdot l + p_{Montage} \quad (3.26)$$

Die Investitionskosten k_0 ergeben sich aus der Summe der Kabelkosten, sowie die Kosten für die Schaltanlagen. Es folgt für die Investitionskosten

$$k_0 = k_{8DJH} + \sum_{i=1}^3 k_{Kabel,i} \quad (3.27)$$

Die Kosten für die Schaltanlagen k_{8DJH} ergeben sich über die angeschlossenen Kabel.

Zum Anschluss eines Kabels wird ein Ringkabelabzweig verwendet. Der Leistungsschalterabzweig dient zum Anschluss der Transformatoren. Daraus folgt, dass die Anzahl der Schaltfelder von der Anzahl der ausgehenden Kabel pro Trafostation und der Einspeisung abhängig ist. Gemäß den Netzbetreibern wird in der Einspeisung in den meisten Fällen nach dem Transformator eine Schaltanlage aus einer Kombination aus zwei Ringkabelfeldern, einem Leistungsschalterfeld und einem Verrechnungsmessfeld benutzt. Das Verrechnungsmessfeld dient zur Messung der verbrauchten Leistung. Auf

3 Konzept zur Optimierung

diese Schaltanlage folgt in der Einspeisung eine weitere für den Anschluss der Kabel zu den Trafostationen. Es sind dementsprechend nur Ringkabelfelder nötig. Somit ergeben sich die Kosten für die Schaltanlagen zu

$$k_{8DJH} = k_R \cdot n_{Kabel,i} + k_T \cdot n_{Station} + 2 \cdot k_R + k_T + k_M \quad (3.28)$$

Die Kosten für die Leitungsverluste pro Jahr $k_{\Delta P_{ges}}$ berechnen sich über

$$k_{\Delta P_{ges}} = T_d \cdot 280 \text{ d} \cdot k_{Strom} \cdot \Delta P_{ges} \quad (3.29)$$

Die Leitungsverluste werden nur für die Volllaststunden $T_d = 16 \text{ h}$ betrachtet, da im restlichen Zeitraum unterschiedliche Ströme fließen und sich dies dynamisch ändert. Da für eine Annahme keine Daten vorhanden sind, werden diese Leitungsverluste vernachlässigt. Die Vergleichbarkeit der Leitungsverluste ändert sich dadurch nicht, weil alle Kabel zu den Volllaststunden maximal belastet werden. Außerdem werden nur die Werkzeuge genutzt, da Sonntag gemäß § 30 Straßenverkehrsordnung in der Zeit zwischen 0-22 Uhr keine Lkw mit einem Gesamtgewicht von über 7,5 t bewegt werden dürfen.

Der Strom I_i wird über

$$I_i = \frac{P_{MCS}}{\sqrt{3} \cdot U_{Netz}} \quad (3.30)$$

berechnet, wodurch sich der Strom für ein potentielles Niederspannungsnetz

$$\begin{aligned} I_{NS} &= \frac{P_{MCS}}{\sqrt{3} \cdot U_{Netz}} = \frac{1 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 1 \text{ kV}} \\ &= 577,35 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.31)$$

und der Strom für ein potentielles Mittelspannungsnetz

$$\begin{aligned} I_{MS} &= \frac{P_{MCS}}{\sqrt{3} \cdot U_{Netz}} = \frac{1 \text{ MW}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} \\ &= 28,87 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.32)$$

ergeben. Anschließend werden die Ströme gegebenenfalls gemäß des ersten Kirchhoffschen Gesetzes addiert.

Die Höhe des Stroms I_{NS} lässt auf einen unwirtschaftlichen und technisch schwierigen Betrieb hindeuten, sofern die MCS direkt angeschlossen werden würden. Die Werte aus Tabelle 3.1 bestätigen dies. Die Kabelpreise steigen sehr stark mit wachsendem

Querschnitt A an. Auch die Strombelastbarkeit I_{be} wird gemäß des Datenblatts mit maximal $I_{be,max} = 535$ A bei einem Querschnitt von $A_{max} = 300$ mm² nach wie vor überschritten. Die Wahl einer anderen Kabelart und eines höheren Querschnitts kann Abhilfe schaffen. Jedoch werden sich die Preise weiter stark erhöhen, vor allem, durch die großen benötigten Mengen an Kupfer. Eine weitere Betrachtung des Betriebs als Niederspannungsnetz ist vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll.

Aus dem Strom I_{MS} in Gleichung 3.32 folgt auch die Schlussfolgerung, dass eine 8DJH als Schaltanlage eine sinnvolle Wahl darstellt und eine Differenzierung zur NXPLUS C nicht nötig ist. Die 8DJH ist mit einem Bemessungs-Dauerstrom von $I_{8DJH} = 630$ A ausreichend für bis zu

$$n = \frac{I_{8DJH}}{I_{MS}} = \frac{630 \text{ A}}{28,87 \text{ A}} \quad (3.33)$$

$$= 21,82 \quad (3.34)$$

$$n_{MCS} = \lfloor n \rfloor \\ = 21$$

Wodurch für die nähere Zukunft die Betrachtung einer Schaltanlage für die sekundäre Verteilungsebene ausreichend ist. Diese Aussage wird dadurch gestützt, dass sich die Anzahl der MCS bis 2035 bis auf 14 MCS erhöhen soll [12, S.25].

In Tabelle 3.5 werden nun alle Kosten und Verluste über die Kabel im Mittelspannungsnetz für die angegebenen Optionen dargestellt. Dabei sind die Ströme gemäß den Kabelverbindungen in den Abbildungen 3.2 und 3.3 indiziert.

3.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Optimierung des Netzes anhand der Länge als Gewicht der Kanten $g(e)$ nicht die beste Lösung aufzeigt. Wie in dem vorherigen Beispiel in Tabelle 3.5 berechnet wurde, schmälern sich dadurch die Investitionskosten, jedoch ist die Verlustleistung höher, da über ein Kabel ein doppelt so hoher Strom fließt wie über die anderen Kabel. Der Strom in Gleichung 2.7 wird quadriert, weshalb ein umso größerer Strom in Bezug auf die Kosten durch die Verluste negativ zu bewerten.

| Eigenschaften | Option 1 | Option 2 |
|---|------------|-----------|
| Strom I_1 [A] | 28,87 | 57,74 |
| Strom I_2 [A] | 28,87 | 28,87 |
| Strom I_3 [A] | 28,87 | 28,87 |
| Querschnitt A_1 [mm ²] | 50 | 50 |
| Querschnitt A_2 [mm ²] | 50 | 50 |
| Querschnitt A_3 [mm ²] | 50 | 50 |
| Leitungsverluste ΔP_1 [W] | 178,60 | 599,39 |
| Leitungsverluste ΔP_2 [W] | 149,85 | 37,46 |
| Leitungsverluste ΔP_3 [W] | 179,47 | 29,62 |
| Kumulierte Leitungsverluste ΔP_{ges} [W] | 507,92 | 666,47 |
| Kabelkosten $k_{Kabel,1}$ [EUR] | 8.519,10 | 7.297,44 |
| Kabelkosten $k_{Kabel,2}$ [EUR] | 7.297,44 | 2.521,88 |
| Kabelkosten $k_{Kabel,3}$ [EUR] | 8.556,12 | 2.188,68 |
| Investitionskosten k_0 [EUR] | 104.372,66 | 92.008,00 |
| Kosten Leitungsverluste pro Jahr $k_{\Delta P_{ges}}$ [EUR] | 603,00 | 719,23 |

Tabelle 3.5: Verlust- und Kostenaufstellung für beide Option in der Mittelspannung

Die Option 2 ist erst nach 106,23 Jahren teurer als Option 1. Dies wird über den Schnittpunkt ermittelt, welcher sich zwischen zwei Geraden bildet, wenn aus den Investitionskosten k_0 und den Kosten für die Leistungsverluste pro Jahr $k_{\Delta P_{ges}}$, zwei Geradengleichungen der Form $y = k_{\Delta P_{ges}} \cdot x + k_0$ erstellt werden. Hier bei steht x für die Jahre und y für die Kosten, welche sich ergeben. Damit hat Option 2 nach wie vor einen Kostenvorteil.

Es sollten zusätzlich Aspekte wie die Versorgungssicherheit erwähnt werden, da die MCS bei Option 1 einzeln angeschlossen sind, ist hier eine höhere Versorgungssicherheit des gesamten Lkw-Ladeparks realisiert als bei Option 2. Trotzdem sind die Investitionskosten für Option 2 deutlich geringer. Ob eine hohe Versorgungssicherheit wichtig ist, hängt von den Anforderungen des Kunden ab. Investiert er mehr, ist die Versorgungssicherheit besser, aber der Lkw-Ladepark amortisiert sich später. Weil davon ausgegangen werden kann, dass sich Lkw-Ladeparks im Allgemeinen in der Zukunft stark in ihrem Aufbau ändern, da mehr MCS nötig werden und dadurch auch potentiell über ein richtiges Umspannwerk mehrere Einspeisungen in den Lkw-Ladepark über Übergabestationen realisiert werden, ist eine erneute Betrachtung des Sachverhalts in der Zukunft wichtig.

Aus heutiger Sicht scheinen die direkte Verbindung oder die Verbindung als MST am sinnvollsten. Eine pauschale Aussage, welche Option die bessere ist, ist nicht möglich.

Hierbei müssen die Aufstellung der Trafostationen und die gestellten Anforderungen des Kunden für den jeweiligen Lkw-Ladepark betrachtet werden. Der MST wird hierbei über die Länge optimiert. Dieses Vorgehen ermöglicht es die Investitionskosten für das MST zu reduzieren. Die damit einhergehenden leicht erhöhten Kosten für die Kabelverluste, sind jedoch nicht so ausschlaggebend wie die Investitionskosten. Mit einer erhöhten Anzahl an MCS werden die Kosten für die Kabelverluste und die Investitionskosten von Option 2 sich weiter denen aus Option 1 angleichen oder diese überschreiten.

Im Tool werden nun die beiden Optionen ausgerechnet und gegenübergestellt. Des Weiteren werden ein Ringnetz und eine einzelne Verbindung über alle Trafostationen dargestellt. Aufgrund der entstehenden Werte kann der Benutzer selbst mit dem Kunden bewerten, welche Option passend ist.

4 Tool

Im folgenden Kapitel werden wichtige Aspekte im Programm erläutert. Es wird hierbei vor allem der Code, welcher in Python geschrieben ist, genau erläutert, da der Code in VBA primär zum Aufrufen des Python-Codes genutzt wird. Der Fokus soll jedoch auf der Umsetzung des Konzepts liegen.

Es wird hier auf kleine Ausschnitte im Programm eingegangen. Das vollständige Programm und die Excel-Dateien liegen, wie in Kapitel A beschrieben, in digitaler Form auf der CD ab.

Es wird Python als Programmiersprache genutzt, da diese eine einfache und übersichtliche Syntax besitzt und über eine große Anzahl an hilfreichen Bibliotheken verfügt. Auch die einfache Möglichkeit der Darstellung und des Einbinden der Daten in Abbildungen und Excel ist von Vorteil. Die Umsetzung direkt mit VBA oder anderen Programmiersprachen wie Java, wäre deutlich aufwendiger und komplizierter aufgrund der nicht Verfügbarkeit der Bibliotheken aus Python.

4.1 Aufbau

Die Eingabe erfolgt durch den Benutzer über eine Excel-Datei. Dabei wird Excel genutzt, da die Nutzer des Tools hiermit vertraut sind und die Bedienung somit einfacher ist.

Im Reiter „Startseite“ kann der Benutzer in einem vorgegebenen Zellenbereich, im Folgenden als Karte bezeichnet, die relativen Positionen der einzelnen Stationen und der Einspeisung zueinander angeben. Hier kann ein gewünschter Maßstab angegeben werden, welcher die Skalierung der Karte ändert. Des Weiteren kann ein Projektname und die Spannungsebene angegeben werden, welcher später bei der Ausgabe einer neuen Datei eingefügt wird. Über eine Schaltfläche kann ein Makro gestartet werden,

welches die Berechnung in einem Python-Skript startet. Ein weitere Schaltfläche bietet die Möglichkeit den Inhalt der Karte zu löschen. Der beschriebene Aufbau ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Hier sind auch teilweise die Positionen des bei der weiteren Erläuterung genutzten Beispiels zu sehen. Die Einspeisung erhält immer den Wert Null. Die anderen Trafostationen können nach Bedarf nummeriert werden.

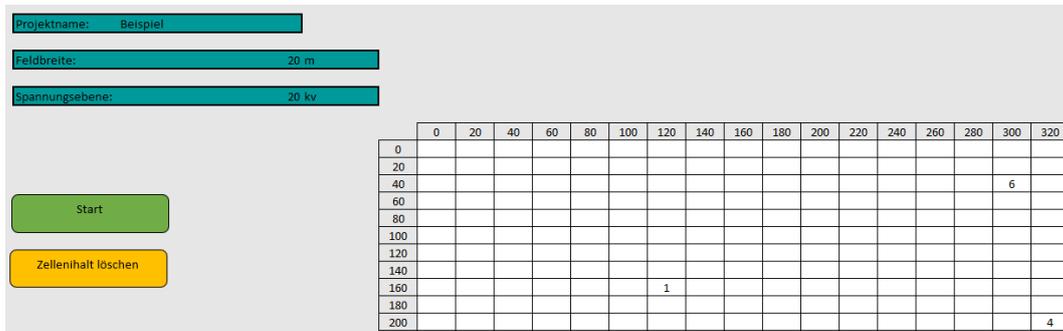


Abbildung 4.1: Eingabe der Daten in Excel

Im zweiten Reiter „Hindernisse“ kann der Benutzer Hindernisse angeben, um welche die Kabel herumgeführt werden müssen. Die Hindernisse werden über ihre Ecken definiert. Dabei muss ein Hindernis aus mindestens zwei Ecken bestehen. Die Eingabe erfolgt durch ein Makro, welches über eine Schaltfläche starten lässt. Anschließend können die Hindernisse über aufkommende Fenster definiert werden. In Abbildung 4.2 sind die Hindernisse des Beispiels dargestellt.

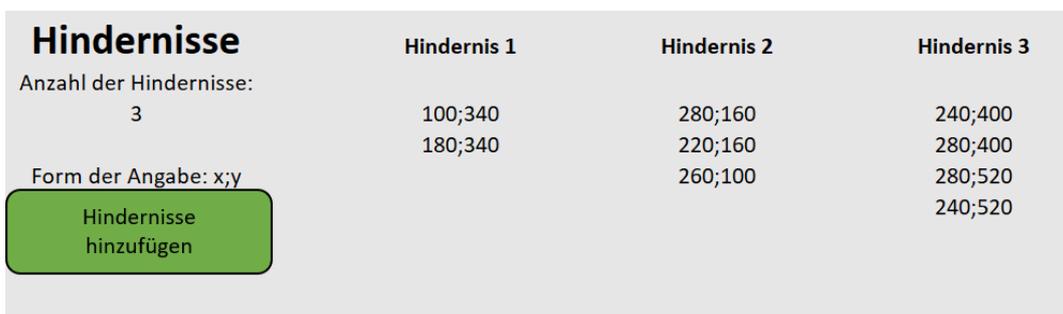


Abbildung 4.2: Eingabe der Hindernisse in Excel

Über das Python-Programm werden die Eingaben des Benutzers verarbeitet. Dieses wird über das Makro RunPythonScript gestartet. Hierbei wird ein Kommandofenster aufgerufen, an welches die nötigen Angaben zum Starten des Python-Programms als Strings übergeben werden.

Dabei werden zuerst über mehrere Algorithmen vier unterschiedliche Netztopologien

erstellt. Anschließend werden Berechnungen zu den Verlusten und Kosten durchgeführt. Dabei nimmt das Python-Programm Bezug auf eine Excel-Datei, welche als Datenbank für die zur Berechnung notwendigen Daten genutzt wird. Das Python-Programm erstellt am Ende eine Ausgabe in einer neuen Excel-Datei, in dem Verzeichnis aus dem der Benutzer die Eingabe getätigt hat.

Die als Ausgabe dienende Excel-Datei erhält einen Namen, in welchem der Projektname inkludiert ist. In dieser Datei werden die unterschiedlichen Topologien wiedergegeben und die Kosten für diese Aufbauten aufgezeigt. Dabei kann der Benutzer die Ausgabe als Grundlage für die Angebotserstellung nutzen. Die Bedienung erfolgt dabei durch eine Person, welche mit der Planung vertraut ist.

Die Excel-Datei für die Eingabe durch den Benutzer wird für jedes Projekt kopiert. Das für die Berechnung notwendige Python-Programm und die Datenbank als Excel-Datei sind zentral auf einem Laufwerk abgespeichert. Die Datenbank soll nicht durch jeden Benutzer angepasst werden, sondern nur durch Personen, welche genaues Wissen zu den Preisen oder technischen Eigenschaften der Anlagen haben.

4.2 Python-Programm

In Python findet die vollständige Berechnung statt, um die Trafostationen und Hindernisse als Graphen zu modellieren. Es wird die Bibliothek „networkx“ genutzt. Mit dieser Bibliothek ist es möglich mit Graphen zu rechnen und diese zu visualisieren.

Die Erläuterung findet an einem zufällig gewählten Beispiel statt, welches gleichzeitig als Kontrolle der Funktion des Tools gesehen werden kann. Es dient zusätzlich dazu den Programmablauf zu verdeutlichen.

4.2.1 Erstellung der Graphen

Am Anfang werden drei unterschiedliche Graphen erstellt.

Der erste Graph $G_{all} = (V_{all}, E_{all})$ mit $v_{all} \in V_{all}$ und $e_{all} \in E_{all}$ enthält alle Trafostationen als Ecken v_{all} und jede mögliche Verbindung zwischen allen Ecken als Kanten e_{all} gezogen. Dies kann Abbildung 4.3 entnommen werden. An den einzelnen Ecken

v_{all} sind die Koordinaten notiert und an den Kanten e_{all} ist deren Gewicht $g(e_{all})$ dargestellt. Die hierfür nötigen Daten werden der aufrufenden Excel-Datei entnommen. Dieser Graph bildet den Lkw-Ladepark ab und bildet die Grundlagen für das Bilden der anderen Graphen.

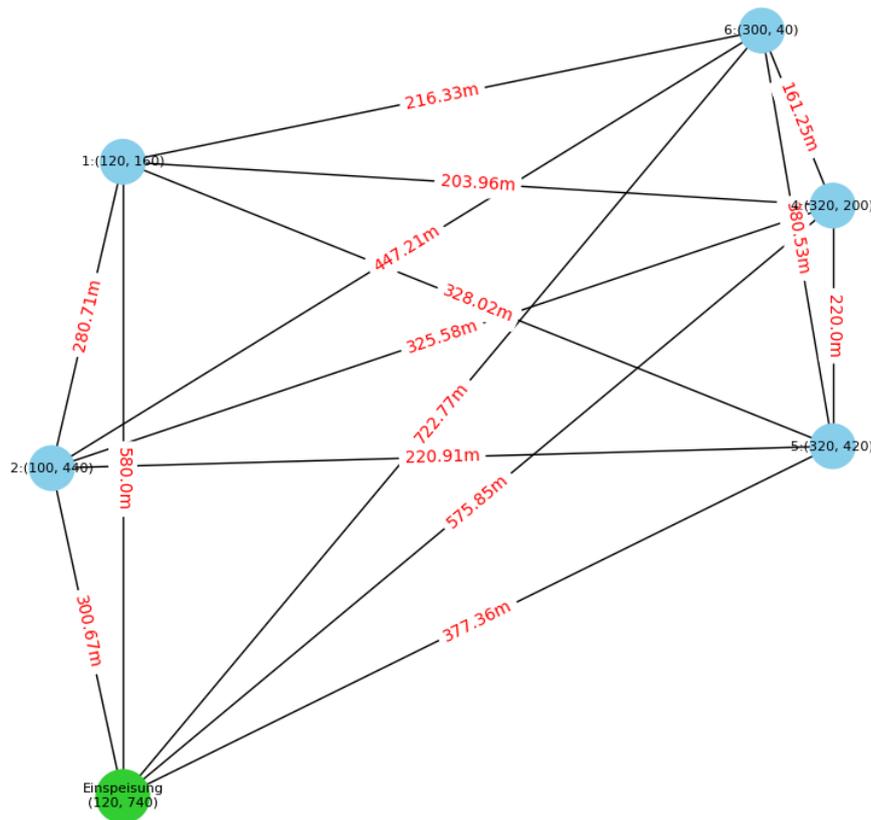


Abbildung 4.3: Graph G_{all} mit allen möglichen Kanten e_{all}

Der Graph G_{all} wird dabei über die Funktion `map_to_graph` in Listing 4.1 erstellt. Dafür werden die Funktionen `add_node` in Zeile 9 und `add_edge` in Zeile 20 genutzt. Um die richtige Position zu erhalten, muss hier mit der Skalierung der Karte gearbeitet werden. Des Weiteren wird über die verschachtelten Schleifen ab Zeile 13 sichergestellt, dass nur Kanten e zu E_{all} hinzugefügt werden, welche noch nicht in anderer Form, also mit einer vertauschten Positionen der Ecken, hinzugefügt wurden.

```
1 def map_to_graph():
2     # Create a graph
```

```

3     graph = network.Graph()
4
5     # Add nodes to the graph
6     for i in range(len(map_stations)):
7         for j in range(len(map_stations[i])):
8             if map_stations[i][j] != None:
9                 graph.add_node((j * map_scaling, i * map_scaling))
10
11
12    # Add edges to the graph
13    for i in range(len(map_stations)):
14        for j in range(len(map_stations[i])):
15            if map_stations[i][j] != None:
16                for k in range(len(map_stations)):
17                    for l in range(len(map_stations[k])):
18                        if map_stations[k][l] != None and (i, j) != (
19                            k, l):
20                            distance = calculate_hypotenuse_scaling(i
21                                , j, k, l)
22                            graph.add_edge((j * map_scaling, i *
23                                map_scaling), (l * map_scaling, k * map_scaling), weight=distance)
24
25    return graph

```

Listing 4.1: Berechnung des MST

Aufbauend auf den ersten Graphen wird der Graph $G_{avoid} = (V_{avoid}, E_{avoid})$ mit $v_{avoid} \in V_{avoid}$ und $e_{avoid} \in E_{avoid}$ erstellt. In diesem soll kontrolliert werden, ob eine Kante e_{all} eine Kante $e_{ob} \in E_{ob}$ eines Hindernisses schneidet. Es entsteht somit ein Graph G_{avoid} , in welchem die Hindernisse vermieden werden.

Am Anfang der Funktion `graph_avoid_obstacles` gilt $V_{all} \subseteq V_{avoid}$ und $E_{all} \subseteq E_{avoid}$. Es werden jedoch im Verlauf dieses Verarbeitungsschritts einzelne Kanten e_{avoid} aus dem Graphen G_{avoid} entfernt.

Ob sich zwei Kanten e_{avoid} und e_{ob} schneiden, wird über deren Anordnung bestimmt. Dafür werden die beiden betrachteten Kanten als Geraden und die vier Ecken der betrachteten Kanten als Punkte eines kartesischen Koordinatensystems betrachtet. Die Positionen der einzelnen Trafostationen, also die Werte der vier Ecken, definieren diese Geraden und Punkte. Wie die Anordnung kontrolliert wird, soll an dem Beispiel in Abbildung 4.4 erläutert werden. Im Allgemeinen wird die Determinante $\det(M)$ einer

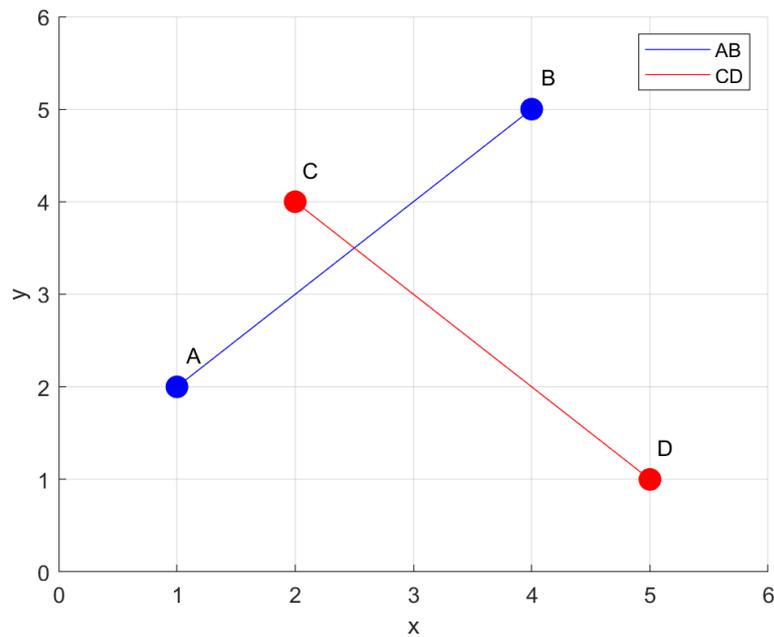


Abbildung 4.4: Beispiel von zwei sich schneidenden Geraden

2×2 -Matrix

$$M = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

berechnet. Dabei ist die Determinante

$$\det(M) = a \cdot d - c \cdot b \quad (4.2)$$

Zusätzlich wird kontrolliert, ob der Schnittpunkt der beiden Geraden zwischen den vier Punkten liegt. Über die 2×2 -Matrix wird die Anordnung der Punkte bestimmt. Werden die beiden Vektoren der 2×2 -Matrix betrachtet, ergibt sich die Anordnung darüber, in welche Richtung der Vektor in der ersten Spalte gedreht werden muss, um sich mit dem Vektor aus der zweiten Spalte zu überlagern. Ist die Determinante positiv, ist die Anordnung gegen den Uhrzeigersinn, da der Vektor in diese Richtung gedreht werden muss. Ist die Determinante negativ, ist die Anordnung im Uhrzeigersinn und der Vektor wird in diese Richtung gedreht. Dabei wird der kürzeste Weg genommen. Sind die beiden Orientierungen, welche sich durch die Betrachtung einer Geraden mit jeweils einem Punkt der anderen Geraden ergeben, unterschiedlich, kreuzen sich die beiden Geraden.

Diese Idee soll beispielhaft an den Punkten A(1,2), B(4,5), C(2,4) und D(5,1) in Abbildung 4.4 gezeigt werden. Wird der Schnittpunkt ausgehend von der Geraden AB kontrolliert, wird diese zusammen mit jeweils einem Punkt der Geraden CD an die Funktion ccw in Listing Listing 4.2 gegeben. Es ergeben sich zwei unterschiedliche Matrizen. Die Vektoren werden dann vom Punkt A aus aufgespannt. In der ersten Spalte ist der Vektor \vec{AB} und in der zweiten Spalte der Vektor \vec{AC} oder \vec{AD} . Die sich ergebenden Matrizen sind

$$M_{ABC} = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

für die Punkte A, B und C und

$$M_{ABD} = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 2 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

für die Punkte A, B und D. Darüber ergeben sich die Determinanten

$$\det(M_{ABC}) = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 2 = 2 \quad (4.5)$$

und

$$\det(M_{ABD}) = 3 \cdot (-1) - 2 \cdot 4 = -11 \quad (4.6)$$

Daraus folgt gemäß der Aussage am Anfang, dass sich die Geraden schneiden, was anhand der Abbildung 4.4 bestätigt wird. Hier wird nicht genau die berechnete Determinante betrachtet, sondern bestimmt wann der Wert der Determinante positiv ist, was in der Aussage gleich ist. Auch wird die Betrachtung aus Sicht beider Geraden durchgeführt.

```

1 def ccw(A, B, C):
2     # Check if the orientation of the points is counterclockwise
3     return (C[1] - A[1]) * (B[0] - A[0]) > (B[1] - A[1]) * (C[0] - A
4         [0]) or \
5         (C[1] - A[1]) * (B[0] - A[0]) == (B[1] - A[1]) * (C[0] - A
6         [0]) and \
7         ((A[0] <= C[0] <= B[0] or B[0] <= C[0] <= A[0]) and (A[1] <=
8         C[1] <= B[1] or B[1] <= C[1] <= A[1]))
9
10 def line_intersection(A,B,C,D):

```

```

8 # Check if the lines intersect
9 return ccw(A, C, D) != ccw(B, C, D) and ccw(A, B, C) != ccw(A, B, D)

```

Listing 4.2: Kontrolle der Schnittpunkte

Wenn der Schnitt zweier Kanten e_{avoid} und e_{ob} festgestellt ist, wird ein neuer Weg P zwischen den beiden Ecken v_{avoid} von der Kante e_{avoid} gesucht. Dieser enthält neben den beiden Ecken aus E_{avoid} , als Beginn und Ende, Ecken der Hindernisse v_{ob} mit $v_{ob} \in V_{ob}$ oder andere Ecken v_{avoid} . Diese Ecken v_{ob} sind somit auch Teil des Graphen G_{avoid} . Die ursprüngliche Kante e_{avoid} wird aus dem Graphen G_{avoid} entfernt. Um später diesen Weg P richtig zu visualisieren, werden alle Ecken von diesem Weg in einer Liste `nodes_to_reconnect` zwischengespeichert. Des Weiteren wird über diese Liste im nächsten Verarbeitungsschritt die Länge der Wege $l(P)$ als Gewicht der Kanten v_{cal} des Graphen G_{cal} genutzt.

Um nun den kürzesten Weg P zwischen zwei Ecken v_{avoid} zu bestimmen, werden die gesammelten Informationen in einem neuen Graphen $G_{short} = (V_{short}, E_{short})$ mit $v_{short} \in V_{short}$ und $e_{short} \in E_{short}$ und in einer Liste `list_multiple_intersections` gespeichert. Dabei sind $v_{ob}, v_{all} \subseteq V_{short}$. Der Graph G_{short} enthält alle möglichen Kanten, die sich nicht mit einer Kante e_{ob} kreuzen. Das heißt, dass alle Ecken v_{short} , unter der vorherigen Prämisse, miteinander verbunden sind.

In Listing 4.3 ist der Aufruf der Funktion `all_shortest_paths_generator` aus der Bibliothek `networkx` zu sehen. Diese bestimmt über den Algorithmus von Dijkstra einen kürzesten Wege-Baum B . Dabei werden alle Wege P übergeben. Aus diesen wird schließlich der Weg P , mit der geringsten Länge $l(P)$ berechnet.

```

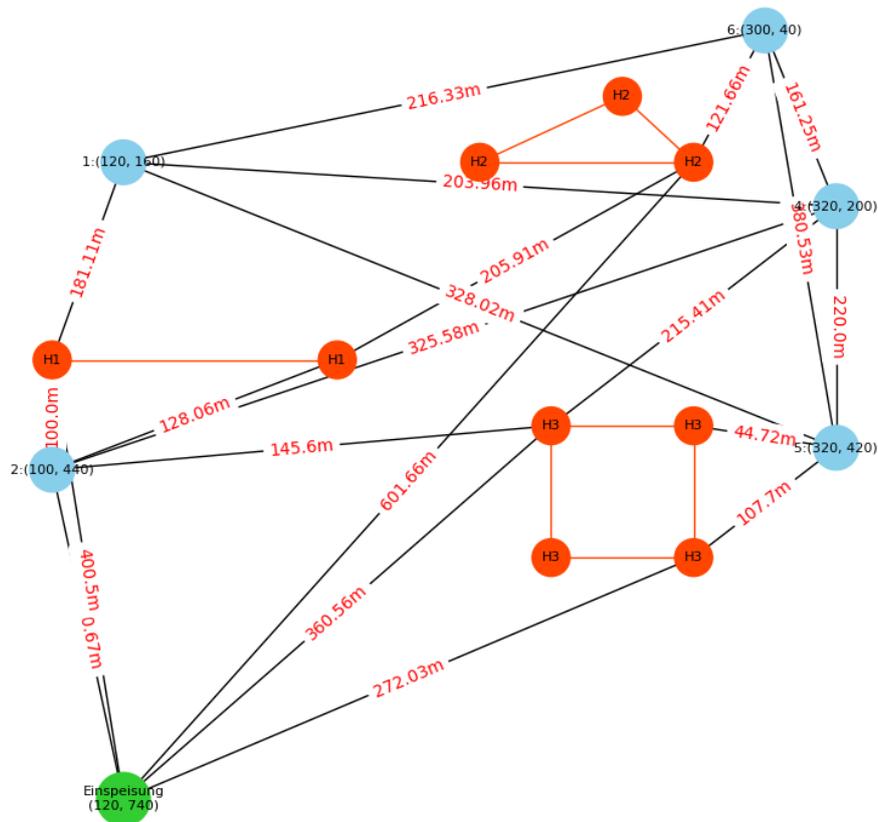
1 all_shortest_paths_generator = network.all_shortest_paths(
    graph_find_shortest_way, source=edge[0][0], target=edge[0][1],
    weight='weight', method='dijkstra')

```

Listing 4.3: Berechnung des Pfads mit der kürzesten Länge $l(P)$

Der hierüber entstehende Graph G_{avoid} ist in Abbildung 4.5 erkennbar. Zu erkennen ist, dass keine Kante e_{avoid} die eines Hindernis e_{ob} kreuzt und manche ursprünglichen Kanten e_{all} entfernt worden. Dieses ist beispielsweise an dem Weg P zwischen der Einspeisung und der Station 6 zu erkennen.

Im nächsten Verarbeitungsschritt wird darauf aufbauend ein Graph $G_{cal} = (V_{cal}, E_{cal})$ mit $v_{cal} \in V_{cal}$ und $e_{cal} \in E_{cal}$ für die Berechnungen erstellt. Dies ist nötig, weil sonst die Ecken v_{ob} der Hindernisse wie die Ecken der Trafostationen v_{all} behandelt werden.

Abbildung 4.5: Graph G_{avoid} ohne die Hindernisse zu kreuzen

Das heißt, dass sie möglicherweise bei der Nutzung der Algorithmen Kanten erzeugen, welche nicht existieren sollten. Dazu müssen Sie aus V_{avoid} entfernt werden. Also alle Kanten der erstellten Wege P . Das heißt

$$\begin{aligned} V_{cal} &= V_{avoid} \setminus V_{ob} \\ &= V_{all} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Gleiches gilt für die Kanten

$$\begin{aligned} E_{cal} &= E_{avoid} \setminus E_{ob} \\ &= E_{all} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Es wird die vorher erstellte Liste `nodes_to_reconnect` genutzt. In dem Graphen G_{cal} sind dementsprechend auch alle Ecken der Trafostationen miteinander verbunden, wo-

durch $E_{cal} = E_{all}$ folgt. Es wird jedoch, wenn nötig, das Gewicht dieser Kanten angepasst. Das neue Gewicht $g(e_{cal})$ ergibt sich über die Länge $l(P)$ des jeweiligen Wegs P , welche gemäß der Liste zwischen zwei Ecken der Trafostationen v_{cal} liegen.

Der daraus entstehende Graph G_{cal} ist in der Abbildung 4.6 zu sehen. Vergleicht man diese Abbildung 4.3 mit der von Graph G_{all} , ist zu erkennen, dass das Gewicht der Kanten $g(e_{cal})$ gegebenenfalls angepasst wurde und sich aus der Summe der Kanten e_{avoid} in Abbildung 4.5 ergeben.

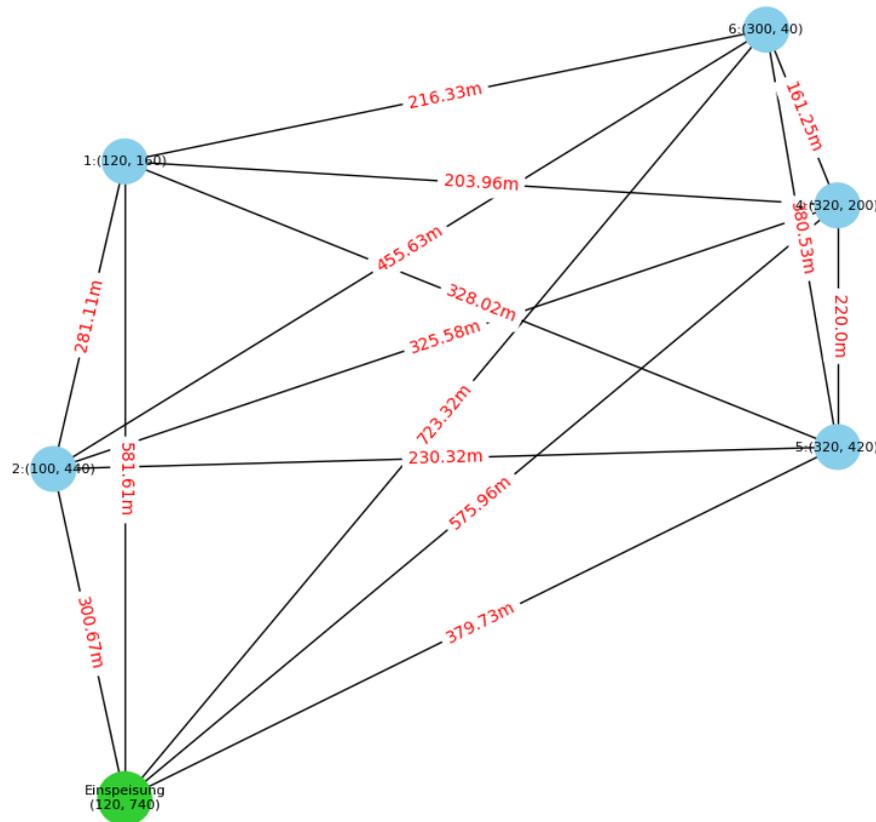


Abbildung 4.6: Graph G_{cal} zur Berechnung

4.2.2 Erstellung der Netze

Hierauf aufbauend können nun die Berechnungen der verschiedenen Netztopologien stattfinden. Diese werden über den Aufruf der Funktion `calculate_topologies` durchgeführt.

Für die Berechnung des MST wird eine Funktion der networkx-Bibliothek genutzt. Wie in Listing 4.4 zu sehen, sind zum Aufruf der Funktion zwei Argumente nötig. Einmal der Graph, für welchen der MST berechnet werden soll und der zu nutzende Algorithmus. Als Graph wird der zur Berechnung erstellte Graph G_{cal} und als Algorithmus der Algorithmus von Prim genutzt. Das Ergebnis ist ein MST für den Graphen G_{cal} .

```
1 minimum_spanning_tree = network.minimum_spanning_tree(  
    graph_to_calculate, algorithm='prim')
```

Listing 4.4: Berechnung des MST

Auf das Beispiel bezogen entsteht der Graph in Abbildung 4.7, welcher ein verzweigtes Strahlennetz darstellt. Es ist klar zu erkennen, dass die Hindernisse auf dem kürzesten Weg umgangen werden und sie somit einen Einfluss auf die Erstellung des Graphen beziehungsweise der Topologie haben.

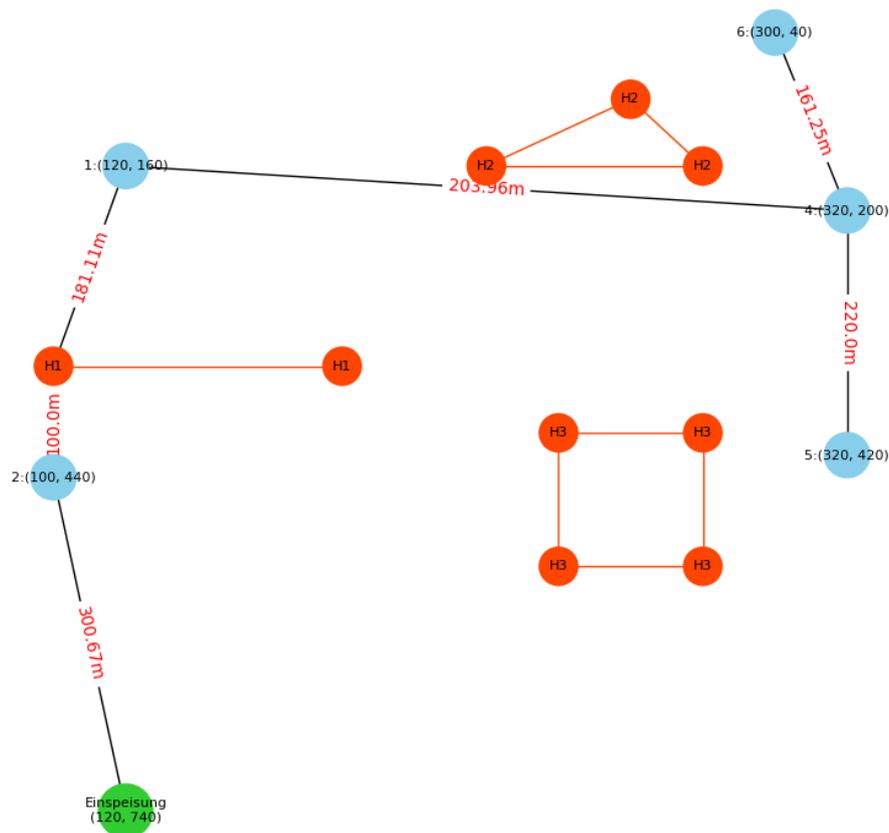


Abbildung 4.7: Beispiel als verzweigtes Strahlennetz

Um die Auswirkungen zu veranschaulichen wird die Trafostation 5 nun auf die andere Seite des Hindernisses 3 verschoben. In Abbildung 4.8 ist zu sehen, dass der Algorithmus von Prim in diesem Fall einen anderen MST erstellt. Werden die beiden Gewichte der entstehenden Graphen $g(G_1)$ und $g(G_2)$ miteinander verglichen, wobei $G_1 = (V_1, E_1)$ den Graphen in Abbildung 4.7 und $G_2 = (V_2, E_2)$ den Graphen in Abbildung 4.8 beschreibt, ergibt sich gemäß Kapitel 2.3

$$g(G_1) = \sum_{e_1 \in E_1} g(e_1) = 1.166,99 \text{ m} \quad (4.9)$$

und

$$g(G_2) = \sum_{e_2 \in E_2} g(e_2) = 1.029,2 \text{ m} \quad (4.10)$$

Dabei gilt $e_1 \in E_1$ und $e_2 \in E_2$. Die Ergebnisse lassen eine Optimierung des Gewichts der Graphen erkennen.

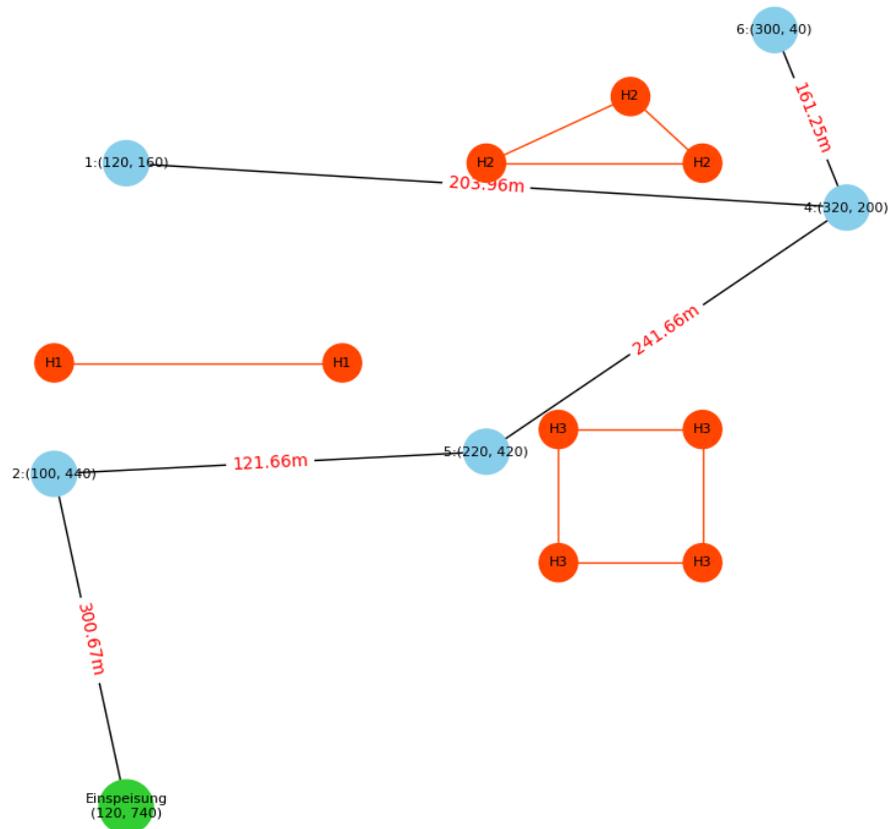


Abbildung 4.8: Beispiel für die Veränderung des Netzes durch den Algorithmus von Prim

Für die Berechnung des Ringnetzes und des unverzweigten Strahlennetzes, welches einen Weg P darstellt, also eine Verbindung der Trafostationen untereinander, wird das TSP genutzt. Hierfür wird eine Funktion von `networkx` genutzt. In Listing 4.5 ist der Aufruf dieser Funktion zu sehen. Dabei wird eine Liste mit den Ecken in der richtigen Reihenfolge zurückgegeben. Aus diesen werden anschließend die Graphen erstellt.

```
1 list_nodes_cycle = network.approximation.traveling_salesman_problem(
    graph_to_calculate, cycle=True)
```

Listing 4.5: Berechnung des Rings und des Pfads

Die Nutzung des TSP ist hier aufgrund seiner Eigenschaften sinnvoll. Das Ergebnis ist ein Hamiltonkreis $T \subseteq G_{cal}$ mit einem minimalen Gewicht $g(T)$. Dabei gilt $T = (V, E)$ mit $e \in E$ und $v \in V$. Aufgrund der Tatsache, dass für die Ecken ein Grad $d_T(v) = 2$ gilt

und immer die Kanten e mit einem minimalen Gewicht $g(e)$ ausgewählt werden, können sich die Kanten nicht schneiden. Die Kanten e könnten sich nur schneiden, wenn für $d_T(v) > 2$ oder nicht das minimale Gewicht einer Kante $g(e)$ ausgewählt wird.

Der Hamiltonpfad wird erstellt, indem aus dem Graphen T die Kante e mit dem größten Gewicht $g(e)$ inzident zur Ecke der Einspeisung, entfernt wird.

Für das Beispiel ergeben sich die beiden Graphen in den Abbildungen 4.9 und 4.10. Das Vorgehen der Funktion wird durch dieses Beispiel bestätigt.

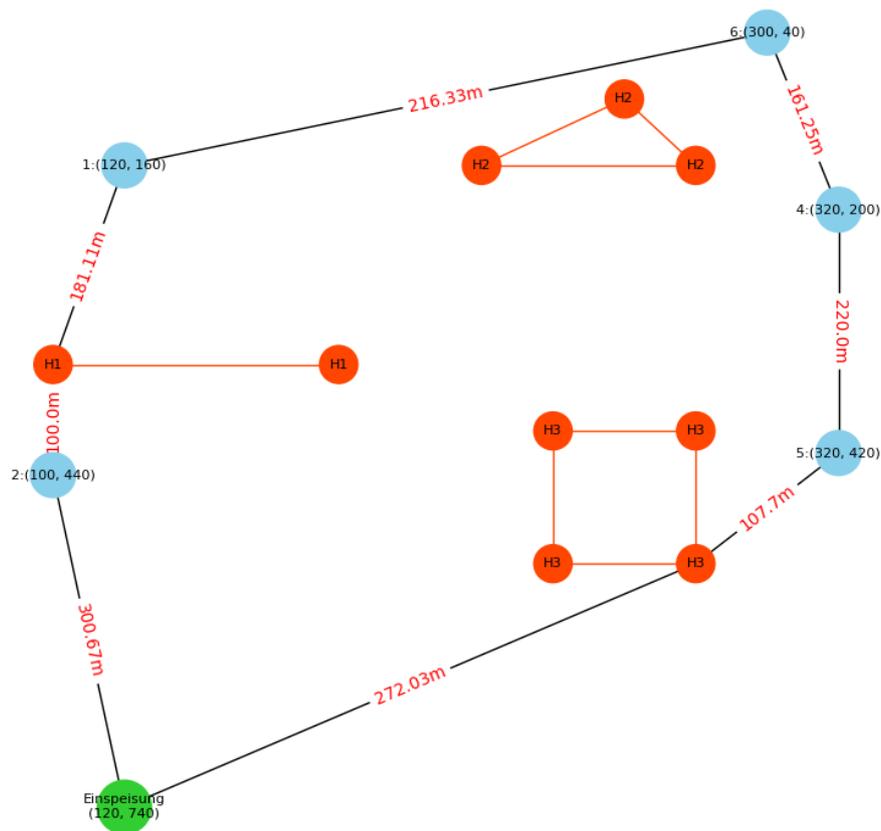


Abbildung 4.9: Beispiel als Ringnetz

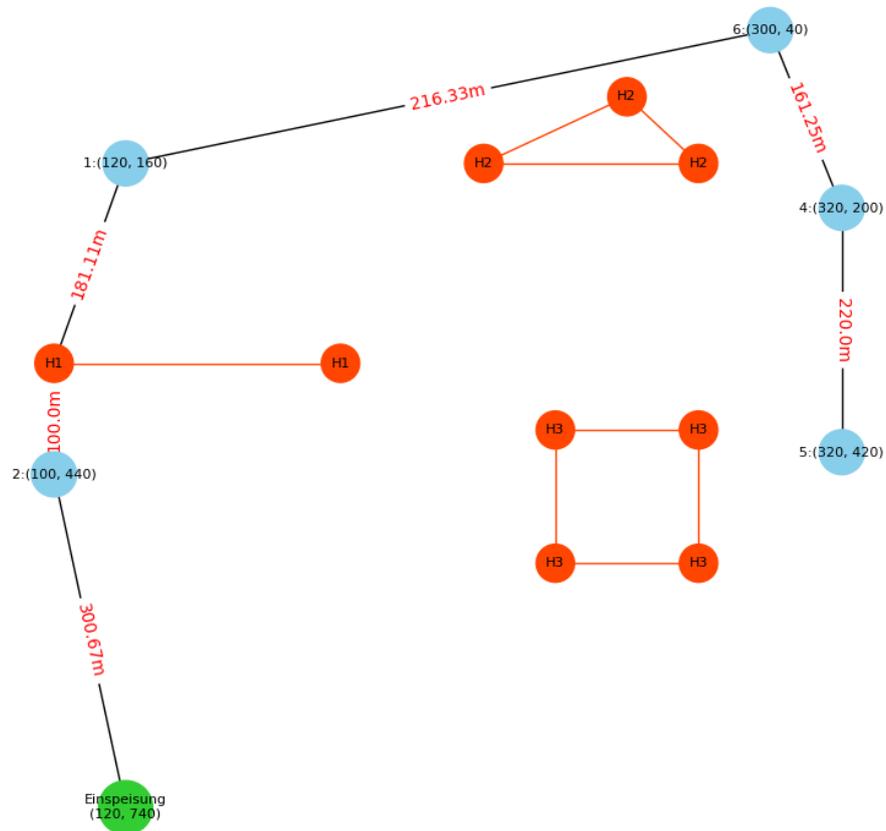


Abbildung 4.10: Beispiel als unverzweigtes Strahlennetz mit Verbindungen zwischen den Trafostationen

Als letztes wird das unverzweigtes Strahlennetz, welches eine direkte Verbindung zwischen den einzelnen Trafostationen und der Einspeisung hat, berechnet.

Die Erstellung dieses Graphen erfolgt über die Funktion `create_star`, in welcher zuerst die Einspeisung über ihre Bezeichnung bestimmt wird und anschließend zwischen allen anderen Ecken und der Ecke der Einspeisung Kanten hinzugefügt werden. Der Grad $d_G(v)$ der Ecke v , welche die Einspeisung repräsentiert, entspricht

$$d_G(v) = |G| - 1 \quad (4.11)$$

Dadurch sind in diesem Graph G immer eine Kante weniger als Ecken. Der daraus resultierende Graph ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

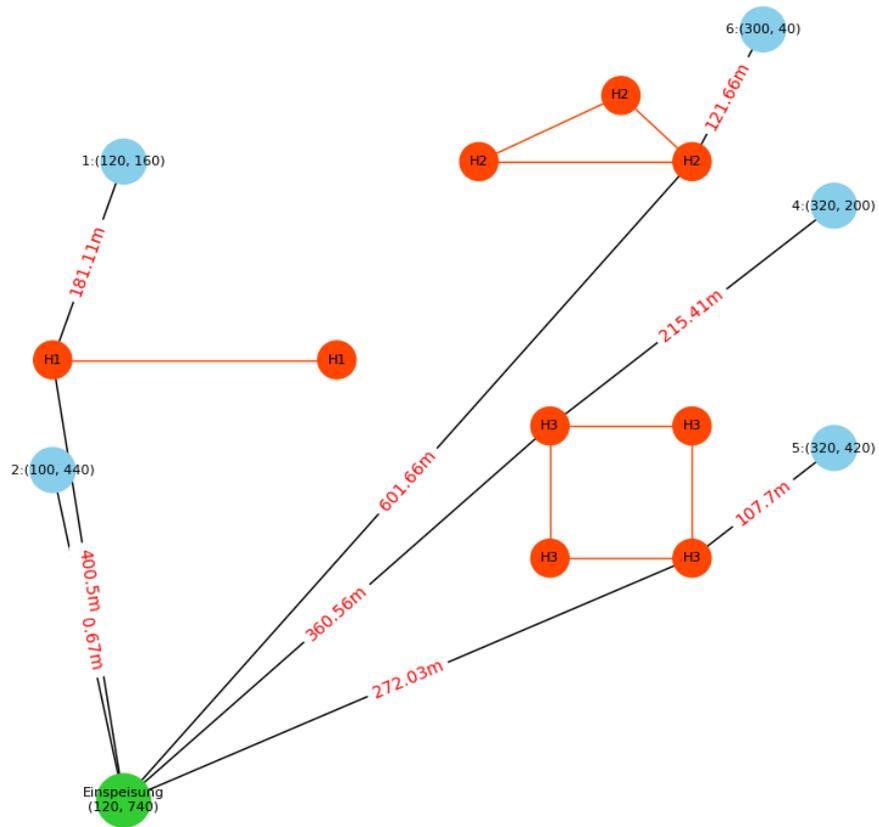


Abbildung 4.11: Beispiel als unverzweigtes Strahlennetz mit direkten Verbindungen zu den Trafostationen

4.2.3 Berechnungen anhand der Netztopologien

Als letztes werden die Berechnungen durchgeführt, welche anschließend der ausgegebenen Excel-Datei hinzugefügt werden. Auf die Darstellung in der Excel-Datei wird in Kapitel 4.2.4 eingegangen.

Aufgrund der unterschiedlichen Netztopologien, ist für jede Netzform eine eigene Funktion zur Berechnung der Werte nötig.

Bei diesen Werten handelt es sich um

- Kabelquerschnitt pro Kabel A_i [mm²]
- Strom pro Kabel I_i [A]
- Kosten pro Kabel $k_{Kabel,i}$ [EUR]
- Verlustleistung pro Kabel ΔP_i [W]
- Gesamtverlustleistung ΔP_{ges} [W]
- Kosten durch die Verlustleistung pro Jahr $k_{\Delta P_{ges}}$ [EUR]
- Kosten für die Schaltanlagen k_{8DJH} [EUR]
- Baukosten für die Kabel $k_{Bau,Kabel}$ [EUR]

Allgemein werden die Kosten für die Trafostation $k_{Station}$ [EUR], die Kosten für die Transformatoren k_{Trafo} [EUR] und das Aufstellen der Trafostationen $k_{Bau,Station}$ [EUR] berechnet, da diese nur abhängig von der Anzahl der verwendeten Trafostationen beziehungsweise MCS sind. Die genauen Berechnungen können in der Funktion `add_general_costs_and_graph_to_Excel` im Python-Programm nachvollzogen werden. Die Formeln, welche benutzt werden sind angelehnt an die aus Kapitel 3.2.3.

Die Berechnung des Stroms I wird wie in Gleichung 3.30 vorgenommen. Damit folgt die Gleichung in Listing 4.6 aufgezeigt.

```
1 # Calculate current on medium voltage
2 current = rated_power_mcs / (math.sqrt(3) * voltage_level * 10**(3)) #
   [A]
```

Listing 4.6: Berechnung des Stroms

Die Ströme I_i werden, wenn nötig, gemäß der Kirchhoffschen Knotenregel addiert. Aufgrund der unterschiedlichen Formen des verzweigten Strahlennetzes, soll auf die Berechnung kurz genauer eingegangen werden.

Die Berechnung ist etwas länger, weshalb aus Übersichtsgründen auf Programm-Ausschnitte verzichtet wird. Die Berechnung ist in der Funktion `cable_selection_and_price_calculation_mst` zu finden.

Es wird zuerst der Grad $d_G(v)$ jeder Ecke V bestimmt. Aufgrund dieser Zahlen, werden die Verbindungen gefiltert. Die Kanten an der Einspeisung und über diese Kanten weitere verbundene Ecken mit $d_G(v) > 1$ werden in einer separaten Liste gespeichert und später betrachtet, da hier die Ströme zusammenfließen. Anschließend werden ausgehend von den anderen Ecken v mit dem geringsten Grad $d_G(v)$ bis zum höchsten Grad $d_G(v)$ berechnet. Dabei werden die bereits berechneten Kanten separat abgespeichert, um sicherzustellen, dass der Strom für eine Kante nur berechnet wird, sofern die anderen Kanten der betrachteten Ecke schon berechnet wurden. Am Ende wird dieses Vorgehen für die vorher ausgeschlossenen Kanten auch durchgeführt.

Das Vorgehen für die Auslegung der Kabelquerschnitte A_i erfolgt über die Angaben der Strombelastbarkeit I_{be} in der Datenbank. Auch dieses Vorgehen ist für alle Netzformen gleich. Das Vorgehen ist in Listing 4.7 beispielhaft für das Ringnetz dargelegt.

```

1 # Check if the current is within the current carrying capacity
2     if voltage_level == 20:
3         for edge in current_per_cable_path:
4             number_of_cross_section = -1
5             for i in range(len(current_carrying_capacity_20) - 1):
6                 number_of_cross_section += 1
7                 if current_carrying_capacity_20[i] <= edge[1] *
current_buffer <= current_carrying_capacity_20[i+1]:
8                     cross_section_path.append((edge[0],
cross_sections[number_of_cross_section])) # [mm^2]
9                     break
10                    if i == 0:
11                        if edge[1] * current_buffer <=
current_carrying_capacity_20[i]:
12                            cross_section_path.append((edge[0],
cross_sections[0])) # [mm^2]
13                            break
14 else:

```

```

15     for edge in current_per_cable_path:
16         number_of_cross_section = -1
17         for i in range(len(current_carrying_capacity_10) - 1):
18             number_of_cross_section += 1
19             if current_carrying_capacity_10[i] <= edge[1] *
current_buffer <= current_carrying_capacity_10[i+1]:
20                 cross_section_path.append((edge[0],
cross_sections[number_of_cross_section])) # [mm^2]
21                 break
22             if i == 0:
23                 if edge[1] * current_buffer <=
current_carrying_capacity_10[i]:
24                     cross_section_path.append((edge[0],
cross_sections[0])) # [mm^2]
25                     break

```

Listing 4.7: Bestimmung des Kabelquerschnitts

Die fließenden Ströme werden zusätzlich noch mit einem Faktor als Puffer multipliziert, damit Kabel nicht zu 100% ausgelastet werden und somit eine Verringerung von Faktoren wie der Spannungsfall, die Temperatur und mögliche Laständerung mit zu berücksichtigen. Es wird dabei mit einem Wert von 1,1 beziehungsweise 10% gearbeitet.

Für die Berechnung der Kosten für die Kabel $k_{Kabel,i}$, wird das Gewicht $g(e)$, welches der Länge entspricht, mit den Kosten für diesen Kabelquerschnitt multipliziert.

Die Verlustleistung pro Kabel ΔP_i wird über Formel 2.7 berechnet. Hierfür wird der Widerstandsbelag \bar{R} aus dem spezifischen Widerstand $\rho_{CU} = 0,017241 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ bei 20°C und dem jeweiligen Kabelquerschnitt A_i berechnet. Anschließend wird der vorher berechnete Strom I_i und das Gewicht $g(e_{cal})$ eingesetzt. Die Gesamtverlustleistung ΔP_{ges} wird über

$$\Delta P_{ges} = \sum_{i=0}^n \Delta P_i \quad (4.12)$$

berechnet.

Die Kosten durch die Verlustleistung pro Jahr $k_{\Delta P_{ges}}$ werden wie in Gleichung 3.29 berechnet. Daraus ergibt sich der Code in Listing 4.8. Dabei soll an diesem Beispiel gezeigt werden, dass die Kosten generell auf zwei Nachkommastellen gerundet werden, was sich bei einer Angabe in Euro anbietet. Die anderen Werte erhalten für eine höhere Genauigkeit mit drei Nachkommastellen angegeben werden.

```
1 costs_for_power_losses_year_mst = round((  
    factor_annual_full_load_hours * 8760 * electricity_price *  
    total_power_losses_mst * (10**(-5))), 2) # [EUR]
```

Listing 4.8: Beispiel für die Berechnung der Kosten durch die Verlustleistung pro Jahr

Die Kosten für die Schaltanlagen k_{8DJH} können über den Grad der jeweiligen Ecke berechnet werden. Aus den Daten der Datenbank werden die Kosten für unterschiedliche Konfigurationen von Schaltanlagen berechnet. Da die Trafostationen eine Schaltanlage mit einem Leistungsschalterabzweig und von dem Grad der Ecke abhängigen Anzahl an Ringkabelabzweigen hat, wird daraus eine Liste erstellt. Für jede Ecke wird dann der entsprechende Preis aufsummiert. Da bei den unverzweigten Starhennetzen und dem Ringnetz der Grad der Ecken schon vorher bekannt ist, wird hier vereinfacht vorgegangen. Die Einspeisung wird jedoch separat betrachtet. Wie in Kapitel 3.2.3 wird hier eine Schaltanlage aus zwei Ringkabelfeldern, einem Leistungsschalterabzweig und einem Verrechnungsmessfeld plus die Anzahl der nötigen Ringkabelfelder zur Anbindung der verbundenen Trafostationen benötigt.

Die Kosten für das Verlegen und Montieren der Kabel $k_{Bau,Kabel}$ berechnet sich über den Preis für die Verlegung des Kabels, welche mit dem Gewicht $g(e)$ der jeweiligen Kante multipliziert wird. Dazu wird das Produkt aus der Anzahl der Kanten mit dem Preis für die Montage der Kabel addiert.

4.2.4 Ausgabe in Excel

Auf die Berechnungen folgend wird eine Excel-Datei als Ausgabe erstellt. Diese Excel-Datei liegt zusammen mit allen erstellten Abbildungen der Graphen, sowie einer jetzt noch folgenden Abbildung, ab.

Beim Aufrufen der Excel-Datei ist zuerst der Projektname sowie Abbildung 4.12 zu sehen. Unterhalb dieser befinden sich die anderen Abbildungen der Netztopologien. Abbildung 4.12 stellt den Verlauf der Kosten durch die Verlustleistung der Kabel in Zusammenhang mit der Summe der Investitionskosten dar. Dieses soll den Vergleich erleichtern und zeigt für das gewählte Beispiel auf, dass eine direkte Anbindung der einzelnen Trafostationen an die Einspeisung die kostengünstigste Möglichkeit bietet den Lkw-Ladepark aufzubauen. Die Investitionskosten sind zwar höher im Vergleich zu den anderen Netztopologien. Durch die hohen Verluste der anderen Möglichkeiten ist diese Lösung als optimiert, unter den getroffenen Annahmen, anzusehen. Wegen des Aufbaus der anderen Netzformen fließen über die Kabel höhere Ströme, wodurch auch der große Unterschied bei der Verlustleistung und den daraus resultierenden Kosten auftritt.

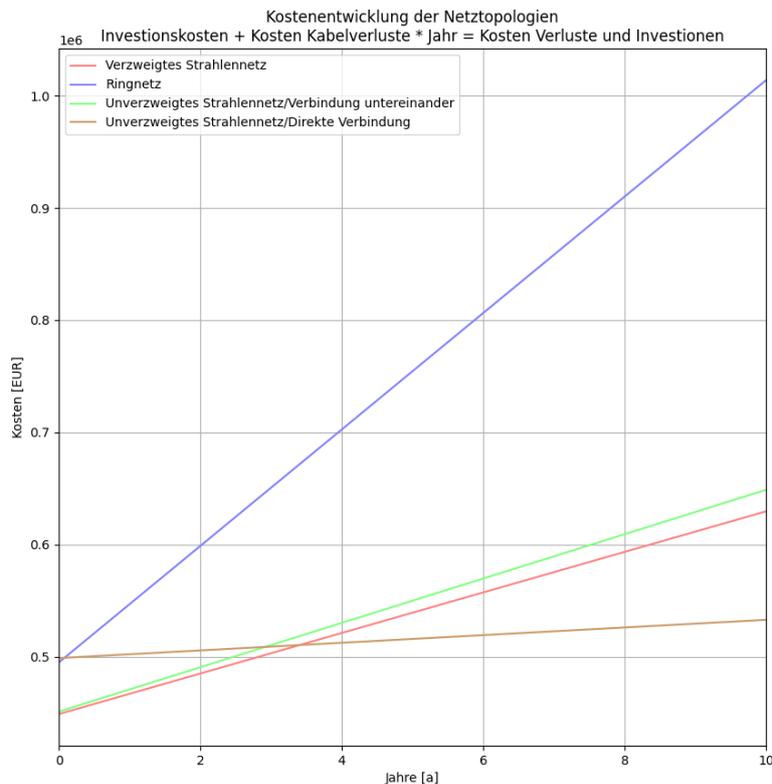


Abbildung 4.12: Entwicklung der Kosten der verschiedenen Netztopologien in Bezug auf die Verluste

4 Tool

Rechts neben der Darstellung der unterschiedlichen Netze und der Kostenentwicklung sind die berechneten Daten aus Kapitel 4.2.3 in Tabellen dargestellt. Die farbliche Hinterlegung der Netztopologie entspricht auch der Farbe der zugehörigen Funktion in dem Graphen, um eine eindeutige zu Ordnung zu schaffen. In Abbildung 4.13 bis 4.15 sind die Ergebnisse für die Berechnungen des behandelten Beispiels dargestellt. Diese unterlegen die vorher beschriebene Kostenentwicklung und bieten eine genauere Aufschlüsselung dieser.

| Allgemeine Kosten | |
|--|------------|
| Kosten Transformator [EUR] | 150.000,00 |
| Kosten Trafostation [EUR] | 110.000,00 |
| Baukosten Trafostation/Transformator [EUR] | 20.000,00 |

| Verzweigtes Strahlennetz | |
|--------------------------------|---|
| Verbindung | ((300, 40), (320, 200)) ((120, 160), (320, 200)) ((320, 200), (320, 420)) ((320, 420), (100, 440)) ((100, 440), (120, 740)) |
| Querschnitt [mm ²] | 50 50 50 50 50 |
| Verlustleistung [W] | 139,006 175,83 1706,917 3176,914 6479,945 |
| Strom [A] | 28,868 28,868 86,604 115,472 144,338 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Kosten 8DJH [EUR] | 125.000,00 |
| Baukosten Kabel [EUR] | 42.600,64 |
| Kosten Kabelverluste [EUR/a] | 18.073,82 |

Abbildung 4.13: Tabellen für das Beispiel - Teil 1

| Ringnetz | |
|--------------------------------|---|
| Verbindung | ((300, 40), (320, 200)) ((300, 40), (120, 160)) ((120, 160), (100, 440)) ((320, 200), (320, 420)) ((320, 420), (120, 740)) ((100, 440), (120, 740)) |
| Querschnitt [mm ²] | 50 50 50 50 50 50 |
| Verlustleistung [W] | 3475,035 4662,248 6049,724 4741,275 8132,563 6479,727 |
| Strom [A] | 144,338 144,338 144,338 144,338 144,338 144,338 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Kosten 8DJH [EUR] | 155.000,00 |
| Baukosten Kabel [EUR] | 58.494,77 |
| Kosten Kabelverluste [EUR/a] | 51.907,39 |

| Unverzweigtes Strahlennetz/Verbindung untereinander | |
|---|--|
| Verbindung | ((320, 200), (320, 420)) ((300, 40), (320, 200)) ((300, 40), (120, 160)) ((120, 160), (100, 440)) ((100, 440), (120, 740)) |
| Querschnitt [mm ²] | 50 50 50 50 50 |
| Verlustleistung [W] | 189,657 556,005 1678,427 3871,82 6479,765 |
| Strom [A] | 28,868 57,735 86,603 115,47 144,338 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Kosten 8DJH [EUR] | 125.000,00 |
| Baukosten Kabel [EUR] | 44.734,56 |
| Kosten Kabelverluste [EUR/a] | 19.771,63 |

Abbildung 4.14: Tabellen für das Beispiel - Teil 2

| Unverzweigtes Strahlennetz/Direkte Verbindung | |
|---|---|
| Verbindung | ((300, 40), (120, 740)) ((120, 160), (120, 740)) ((320, 200), (120, 740)) ((320, 420), (120, 740)) ((100, 440), (120, 740)) |
| Querschnitt [mm ²] | 50 50 50 50 50 |
| Verlustleistung [W] | 623,087 500,006 496,426 325,314 259,198 |
| Strom [A] | 28,868 28,868 28,868 28,868 28,868 |

| | |
|------------------------------|------------|
| Kosten 8DJH [EUR] | 125.000,00 |
| Baukosten Kabel [EUR] | 91.575,92 |
| Kosten Kabelverluste [EUR/a] | 3.410,96 |

Abbildung 4.15: Tabellen für das Beispiel - Teil 3

4.3 Datenbank

Die Datenbank dient zur Berechnung der Kosten für die unterschiedlichen elektrischen Betriebsmittel. In dieser Datenbank sind neben den Preisen auch zur Berechnung wichtige Daten angegeben, welche aus den Herstellerangaben entnommen werden können. Hierbei handelt es sich um die technischen Datenblätter. Bei der Erläuterung des Konzepts sind ebenfalls Preise genutzt worden, welche sich in dieser Datenbank befinden. Die Excel-Datei beinhaltet fünf Blätter, in welchen sich die Daten und Kosten der Schaltanlage, der Transformatoren, der Trafostationen, der Kabel und die allgemeinen Baukosten befinden.

Für jede aufgezählte Option gibt es einen eigenen Reiter. Die Eingabemöglichkeiten werden in der folgenden Aufzählung aufgezeigt. Dabei bezeichnet der Name zu Beginn auch den Namen des entsprechenden Reiters.

8DJH Die Bemessungsspannung [kV], der Bemessungs-Dauerstrom der Sammelschiene [A] und der Preis [EUR] für ein Ringkabelabzweig, ein Leistungsschalterabzweig und ein Verrechnungsmessfeld.

Transformator Der Hersteller, die Bemessungsleistung [MVA], die Oberspannung [kV], die Unterspannung [kV], die Leerlaufverluste [W], die Kurzschlussverluste [W] und der Preis [EUR] für einen einzelnen Transformator.

Trafostation Der Preis [EUR] für eine nicht begehbare Trafostation.

Kabel Der Hersteller, der Kabeltyp, der Querschnitt [mm^2], die Strombelastbarkeit für 10kV [A], die Strombelastbarkeit für 20kV [A] und der Preis pro Querschnitt [EUR/km].

Baukosten Die Kosten für die Aufstellung einer Trafostation [EUR/m], die Kosten für die Verlegung der Kabel [EUR] und die Kosten für die Montage der Kabel [EUR/Stk]

Es wird über die Datenbank für den Verwendungszweck des Tools eine große Menge an Daten zur Verfügung gestellt, welche auch die Implementierung weiterer Funktionen ermöglicht.

5 Fazit

Abschließend sollen die erzielten Erkenntnisse zur Bachelorarbeit reflektiert werden. Es sollen Möglichkeiten der weiteren Verbesserung des Tools und der Erweiterung von diesem dargelegt werden. Als letztes soll noch darauf eingegangen werden, was sich während der Bearbeitung als besonders lehrreich oder auch interessant herausgestellt hat.

Das in Kapitel 1.1 formulierte Ziel, ein Tool zu erarbeiten, welches über geeignete Kriterien die Topologie von verschiedenen Lkw-Ladeparks optimiert und bei der späteren Umsetzung realer Projekte unterstützt, kann als erfüllt angesehen werden. Aus den beiden besten Möglichkeiten zum Aufbau der Topologie in Bezug auf die Kosten lässt sich pauschal keine Variante als die Beste herausstellen. Bei der Berechnung des Beispiels in Kapitel 4.2.3 und der Erläuterung des Programms in Kapitel 4 stellten sich jeweils einmal das unverzweigte und einmal das verzweigte Strahlennetz als besser dar. Es soll erwähnt werden, dass die Optimierung andere Aspekte der Planung von elektrischen Netzen nicht mit einbezieht. Hierfür wäre eine Leistungsflussberechnung nötig, welche Aspekte wie die Netzstabilität und Lastverteilung mit einbezieht.

Die Möglichkeit das Tool an einem realen Beispiel anzuwenden, mit diesem zu vergleichen und dadurch Rückschlüsse auf die Funktionsweise zu schließen, war aufgrund mangelnder Daten nicht möglich.

5.1 Empfehlungen

Eine Erweiterung des Tools ist durchaus möglich und sinnvoll, um bessere Ergebnisse zu erhalten und die erhaltene Datenmenge zu erhöhen.

Das Einbetten von den für das Overnight Charging nötigen CCS, sowie unterschiedlicher Trafostationen und Transformatoren bietet die Möglichkeit nach mehr Variabilität und einer breiteren Einsetzbarkeit. In diesem Zusammenhang könnten auch leistungsfähigere Schaltanlagen nötig sein. Wodurch die Erweiterung der Datenbank um zusätzliche Daten nötig ist. Auch hier besteht die Möglichkeit größere Kontingente an unterschiedlichen Kabeln zu hinterlegen.

Außerdem könnten die MCS und deren Anschluss mit in die Auswertung einbezogen werden. Hierfür wäre eine Idee dieses mit einem gesonderten Graphen zu betrachten. Auch die aufkommenden Verluste in den Transformatoren sowie in den verwendeten Ladesystemen könnten in die Betrachtung mit eingebracht werden.

5.2 Lessons Learned

Die Einarbeitung in vom Studium noch nicht tangierten Themenfelder wie der Graphentheorie und der Programmierung mit Python, stellt eine gute Erweiterung des Wissens dar, was unterstützend bei der zukünftigen Arbeit als Ingenieur wirken wird. Trotzdem stellt das Erlernen einer neuen Programmiersprache eine Herausforderung dar, auf welche eine ausreichende Vorbereitung nötig ist. Dies kann sonst nur durch zeitlich aufwendige Recherche kompensiert werden.

Die Nutzung von Konzepten des Projektmanagements zum strukturierten Bearbeiten der Bachelorarbeit waren unterstützend. Das Aufstellen eines Projektstrukturplans mit Meilensteinen hat geholfen die Arbeit zielgerichtet zum Ende zu führen. Das hat aufgezeigt, dass konsequentes Projektmanagement wichtig und unterstützend ist.

Literaturverzeichnis

- [1] BDEW: *Industriestrompreise¹ (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2023 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)*. 2023. – URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/>. – Zugriff: 01. Februar 2024
- [2] BUNDESAMT FÜR LOGISTIK UND MOBILITÄT: *Fahrpersonalrecht*. https://www.balm.bund.de/DE/Themen/RechtsentwicklungRechtsvorschriften/Rechtsvorschriften/Fahrpersonalrecht/fahrpersonalrecht_node.html. – Zugriff: 02. Februar 2024
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG: *Klimaabkommen von Paris*. <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>. – Zugriff: 17. Februar 2024
- [4] CHARIN: *Empowering the next level of green mobility and energy*. <https://www.charin.global/>. – Zugriff: 02. Februar 2024
- [5] CHARIN: CharIn Whitepaper Megawatt Charging System (MCS) / Charging Interface Initiative e. V. November 2022. – Whitepaper
- [6] DIESTEL, Bernhard: *Graphentheorie*. Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, Mai 2017. – ISBN 978-3-662-53633-9
- [7] GOOGLE: *Ausschnitt von Google Maps vom Rastplatz Rohnetal*. 2024. – URL <https://www.google.com/maps/search/rastst%C3%A4tte+rohnetal@51.4328337,11.4234759,324m/data=!3m1!1e3?entry=ttu>. – Zugriff: 21. Februar 2024

- [8] HEIDMAIER, Fabian ; NEUDORFER, Harald: Steckersysteme für Elektrofahrzeuge. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 140 (2023), Jun, Nr. 3, S. 401–406. – URL <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01141-5>. – ISSN 1613-7620
- [9] HENNECKE, Manfred ; SKROTZKI, Birgit: *HÜTTE Band 3: Elektro- und informationstechnische Grundlagen für Ingenieure*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, Februar 2023. – ISBN 978-3-662-64375-4
- [10] HEUCK, Klaus ; DETTMANN, Klaus-Dieter ; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2013. – ISBN 978-3-8348-2174-4
- [11] JANSON, M.: *Lkw verursachen rund 10 Prozent der globalen CO-Emissionen*. Februar 2022. – URL <https://de.statista.com/infografik/26813/co2-emissionen-durch-menschliche-aktivitaeten-nach-verursacher-weltweit/>. – Zugriff: 17. Februar 2024
- [12] KIPPELT, Dr.-Ing. S. ; PROBST, Felix ; GREVE, Dr.-Ing. M. ; BURGESS, Dr.-Ing. K.: *Einfach Laden an Rastanlagen*. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur unter dem Dach der NOW GmbH, Fasanenstraße 5, 10623 Berlin, September 2022
- [13] KLAUS FABER AG: *Mittelspannungskabel N2XSY*, 2024. – Ausgabe 22.02.2024
- [14] KLAUS FABER AG: *Starkstromkabel NYCWY*, 2024. – Ausgabe 22.02.2024
- [15] KNEBL, Helmut: *Algorithmen und Datenstrukturen*. Springer Vieweg Wiesbaden, Januar 2021. – ISBN 978-3-658-32714-9
- [16] MARENBACH, Richard ; JÄGER, Johann ; NELLES, Dieter: *Elektrische Energietechnik*. Springer Vieweg Wiesbaden, Juli 2020. – ISBN 978-3-658-29492-2
- [17] PLASSMANN, Wilfried ; SCHULZ, Detlef: *Handbuch Elektrotechnik*. Springer Vieweg Wiesbaden, November 2013. – ISBN 978-3-8348-2071-6
- [18] PLÖTZ, Dr. P. ; SPETH, Daniel ; ROSE, Philipp: Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) / Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). 2020. – Forschungsbericht
- [19] PROF. DR. JEAN-PAUL THOMMEN, Dr. Markus S.: *Heuristik*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/heuristik-34474/version-257976>. Februar 2018. – Zugriff: 16. Februar 2024

- [20] SAUTER, Verena ; SPETH, Daniel ; PLÖTZ, Patrick ; SIGNER, Tim: A charging infrastructure network for battery electric trucks in Europe. Karlsruhe : Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2021 (S02/2021). – Working Paper Sustainability and Innovation. – URL <http://hdl.handle.net/10419/235603>
- [21] SCHWAB, Adolf J.: *Elektroenergiesysteme*. Springer Berlin, Heidelberg, Februar 2012. – ISBN 978-3-642-21958-0
- [22] SCHÄFER, Karl F.: *Netzberechnung*. Springer Vieweg Wiesbaden, Januar 2020. – ISBN 978-3-658-26733-9
- [23] SIEMENS AG: *Schaltanlagen Typ 8DJH für sekundäre Verteilungsnetze bis 24 kV, gasisoliert*. Siemens AG, Juli 2022
- [24] SIEMENS AG: *Smart Infrastructure Electrification & Automation Deutschland [Präsentation]*. Oktober 2023. – URL <https://siemens.sharepoint.com/teams/Smart-Infrastructure-Deutschland/SitePages/Electrification-Automation.aspx>. – Internes Dokument
- [25] SIEMENS AG: *Unternehmenspräsentation Siemens AG [Präsentation]*. August 2023. – URL <https://siemensworld.dc.siemens.com/2023/11/16/company-presentation/>. – Internes Dokument
- [26] SIEMENS AG: *Leistungsschalter-Festeinbauanlagen Typ NXPLUS C bis 36 kV, gasisoliert*. Siemens AG, Januar 2024
- [27] TRANSPORT & ENVIRONMENT: Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland. Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten. (2021)
- [28] UMWELTBUNDESAMT: *Klimaschutz im Verkehr*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#undefined>. März 2023. – Zugriff: 17. Februar 2024
- [29] VÖCKING, Berthold ; ALT, Helmut ; DIETZFELBINGER, Martin ; REISCHUK, Rüdiger ; SCHEIDELER, Christian ; VOLLMER, Heribert ; WAGNER, Dorothea: *Taschenbuch der Algorithmen*. Springer Berlin, Heidelberg, April 2008. – ISBN 978-3-540-76394-9

A Digitaler Anhang

Der Anhang dieser Bachelorarbeit befindet sich auf der abgegebenen CD. Auf dieser sind folgende Dateien abgespeichert:

- **Bachelorarbeit:** Bachelorarbeit_Kevin_Kroeger.pdf
- **Datenbank:** Datenbank_Kalkulation_Ladepark.xlsx
- **Eingabedatei:** Kalkulation_Ladepark.xlsm
- **Tool:** Kalkulation_Ladepark.py

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original