

## **NEUE ENERGIE AUS WUPPERTAL**

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Elektrische Energieversorgungstechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

### **Impressum**

Baumeister, Dirk:  
Betrieb und Planung von Oberleitungsbussystemen  
Neue Energie aus Wuppertal, Band 50, 1. Auflage 2023

© 2022 Dirk Baumeister, alle Rechte vorbehalten  
Druck: epubli – ein Service der neopubli GmbH, Berlin, [www.epubli.de](http://www.epubli.de)  
Bildquelle: [iStock.com/jamesteohart](https://www.istock.com/jamesteohart) (Cover)



# **Betrieb und Planung von Oberleitungsbussystemen**

Von der Fakultät für  
Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

**(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

**Dirk Baumeister, M.Eng.**

aus Mülheim an der Ruhr

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Dezember 2022



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik der Bergischen Universität Wuppertal. Ich bedanke mich bei allen Personen, die mich bei der Erstellung der Arbeit fachlich und mental unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt:

- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek für das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftlich konstruktiven Diskussionen und Anregungen sowie die Gewährung von Freiräumen zum selbstständigen Arbeiten.
- Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling für die Übernahme des Korreferats.
- allen beteiligten Kollegen am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, die mit ihrer Diskussionsbereitschaft sowie einer angenehmen Arbeitsatmosphäre zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.
- Mahjar Wazifehdust, Mohammed Abohat und Dr.-Ing. Philippe Steinbusch, ohne deren Zusammenarbeit, fachliche Diskussionen und kritische Betrachtungen diese Arbeit nicht entstanden wäre.
- allen beteiligten Kollegen, die im Rahmen unseres gemeinsamen Forschungsprojektes stets eine produktive und intensive Zusammenarbeit gewährleistet haben.
- meiner gesamten Familie, die mir stets einen großen Rückhalt geboten haben.
- meiner Frau Hannah Theresa Baumeister, die nicht nur viel Geduld aufgebracht hat, sondern mir zusätzlich in stressigen Zeiten die notwendige Kraft für das Promotionsvorhaben gegeben hat.

Wuppertal im Dezember 2022

Dirk Baumeister



# Inhaltsverzeichnis

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ausgangstellung und Herausforderung.....                            | 2         |
| 1.2      | Stand der Wissenschaft und Technik.....                             | 4         |
| 1.3      | Einordnung, Zielsetzung und Struktur der Arbeit.....                | 7         |
| <b>2</b> | <b>Oberleitungsbussysteme</b> .....                                 | <b>11</b> |
| 2.1      | Historische Einordnung.....   | 11        |
| 2.2      | Elektrische Buskonzepte .....                                       | 13        |
| 2.2.1    | Oberleitungsbus.....  | 15        |
| 2.2.2    | Batterie-Oberleitungsbus.....                                       | 15        |
| 2.2.3    | Brennstoffzellenbus.....  | 15        |
| 2.2.4    | Batteriebus .....   | 16        |
| 2.3      | Elektrische Energieversorgung .....                                 | 17        |
| 2.3.1    | Speiseart.....  | 18        |
| 2.3.2    | Spannungssystem .....   | 21        |
| 2.3.3    | Speisefaktor.....   | 22        |
| 2.3.4    | Gleichrichter-Unterwerke .....                                      | 22        |
| 2.3.5    | Speiseleitung .....   | 23        |
| 2.3.6    | Fahrleitung .....   | 23        |
| 2.4      | Einfluss neuartiger Systemkomponenten.....                          | 23        |
| 2.4.1    | Bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke.....                        | 25        |
| 2.4.2    | Photovoltaikanlagen.....  | 26        |
| 2.4.3    | Elektromobilität.....   | 26        |
| 2.4.4    | Batterie-Oberleitungsbusse .....                                    | 27        |
| 2.5      | Potential der Optimierungsebenen eines Oberleitungsbussystems ..... | 28        |
| <b>3</b> | <b>Intelligentes Netzleitsystem für Oberleitungsbusse</b> .....     | <b>29</b> |
| 3.1      | Gesamtkonzept.....  | 29        |
| 3.2      | Grafische Benutzeroberfläche.....                                   | 30        |
| 3.3      | Oberleitungsbussystem-Simulation.....                               | 31        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.3.1    | Verwendete Simulation .....                                 | 31        |
| 3.3.2    | Adaption zur Generierung von Pseudo-Messwerten .....        | 33        |
| 3.4      | Netzzustandsidentifikation .....                            | 37        |
| 3.4.1    | Funktionsweise .....  | 37        |
| 3.4.2    | Priorisierung Messwerte .....                               | 38        |
| 3.4.3    | Validitätsprüfung der Messwerte .....                       | 39        |
| 3.4.4    | Messwert-Schätzung .....                                    | 44        |
| 3.4.5    | Determinierung des aktuellen Netzzustandes .....            | 47        |
| 3.5      | Netzzustandsprognose .....                                  | 49        |
| 3.5.1    | Funktionsweise .....  | 49        |
| 3.5.2    | Prognoseerstellung .....                                    | 52        |
| 3.5.3    | Determinierung des zukünftigen Netzzustandes .....          | 58        |
| 3.6      | Prädiktive Netzzustandsregelung .....                       | 58        |
| <b>4</b> | <b>Evaluation und Validierung des Netzleitsystems .....</b> | <b>61</b> |
| 4.1      | Labortestaufbau und Integration von Messdaten .....         | 61        |
| 4.2      | Simulatorische Analyse von Einflussfaktoren .....           | 64        |
| 4.3      | Gütebestimmung .....  | 67        |
| 4.4      | Bewertung und Grenzen des Verfahrens .....                  | 68        |
| <b>5</b> | <b>Planung von Oberleitungsbussystemen .....</b>            | <b>71</b> |
| 5.1      | Herausforderung .....                                       | 71        |
| 5.2      | Szenariendefinition .....                                   | 72        |
| 5.3      | Datengrundlage .....  | 76        |
| 5.3.1    | Verkehrsbetriebsinformationen .....                         | 76        |
| 5.3.2    | Straßendatenbank .....                                      | 78        |
| 5.3.3    | Nutzbare Bestandsinfrastruktur .....                        | 80        |
| 5.3.4    | Bauliche Restriktionen .....                                | 82        |
| 5.4      | Technologische Rahmenbedingungen .....                      | 82        |
| 5.5      | Planungsmethode .....                                       | 83        |
| 5.5.1    | Initialisierungsprozess .....                               | 85        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.5.2     | Segmentierung und Bereichsdefinition des Verkehrsnetzes .....  | 87         |
| 5.5.3     | Determinierung des Energiebedarfs .....  | 88         |
| 5.5.4     | Determinierung der potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr .....  | 92         |
| 5.5.5     | Determinierung weiterer optimierungsrelevanter Einflussfaktoren .....                                  | 93         |
| 5.5.6     | Konzept der Optimierungsaufgabe.....   | 94         |
| 5.5.7     | Teil-Optimierungsaufgabe 1: Minimierung Fahrleitungsinvestitionskosten.....                            | 96         |
| 5.5.8     | Teil-Optimierungsaufgabe 2: Minimierung Gleichrichter-<br>Unterwerksinvestitionskosten.....            | 102        |
| 5.6       | Fallstudien.....   | 115        |
| 5.6.1     | Auswahl beispielhafter Städte.....   | 116        |
| 5.6.2     | Fallstudie 1: Green-Field-Szenario Innsbruck .....   | 117        |
| 5.6.3     | Fallstudie 2: Brown-Field-Szenario Solingen.....   | 127        |
| 5.6.4     | Determinierung von Einflussfaktoren auf die Infrastrukturinvestitionskosten .                          | 131        |
| <b>6</b>  | <b>Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf.....</b>  | <b>135</b> |
| <b>7</b>  | <b>Summary and Outlook .....</b>   | <b>139</b> |
| <b>8</b>  | <b>Literaturverzeichnis.....</b>   | <b>143</b> |
| <b>9</b>  | <b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>  | <b>159</b> |
| 9.1       | Formelzeichen.....   | 159        |
| 9.2       | Abkürzungen und Akronyme.....  | 173        |
| <b>10</b> | <b>Anhang .....</b>  | <b>175</b> |
| 10.1      | Datengrundlage: Weitere nutzbare Bestandsinfrastruktur .....   | 175        |
| 10.2      | Weitere planungsrelevante Eingabeparameter .....   | 177        |
| 10.3      | Energiebedarfsrelevante Einflussgrößen von Batterie-/Oberleitungsbusse .....                           | 180        |
| 10.4      | Simulativer Energieertrag und –bedarf neuartiger Systemkomponenten sowie<br>Infrastrukturverluste..... | 182        |
| 10.5      | Fallstudie 1: Green-Field-Szenario Innsbruck .....   | 183        |
| 10.5.1    | Datengrundlage .....   | 183        |
| 10.6      | Fallstudie 2: Brown-Field-Szenario Solingen.....   | 189        |
| 10.6.1    | Datengrundlage .....   | 189        |



# 1 Einleitung

Die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, gilt als die globale Herausforderung unserer Zeit. Seit Beginn der Industrialisierung erfolgt eine mit Treibhausgasen anthropogene Anreicherung der Erdatmosphäre. Mit dem Pariser Klimaabkommen verpflichteten sich seinerzeit 197 Vertragsparteien die anthropogene globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen [1].

Deutschland hat als eine der führenden Industrienationen mit der sogenannten „Energiewende“ eine Vorreiterrolle inne. Der im Jahr 2011 für Deutschland beschlossene Ausstieg aus der kommerziellen Nutzung der Kernenergie bis zum Jahr 2022 sowie die vorgegebenen Ziele aus dem Klima- und Energiepaket 2020 [2] resultierten in einem signifikanten Anstieg der Erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland [3]. Darüber hinaus umfasst der Klimaschutzplan 2050 Maßnahmenempfehlungen für die gesetzten Ziele der Bundesregierung für ein weitestgehend treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 [4]. Die Industrie, der Verkehr sowie der Energiesektor müssen für die Einhaltung des europäischen Zielkorridors die höchsten Minderungsbeiträge der Treibhausgasemissionen bewerkstelligen. Durch das steigende Verkehrsaufkommen wurden die Errungenschaften zur Steigerung der fahrzeugspezifischen Energieeffizienz vollständig kompensiert, sodass die vom Verkehr verursachten Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 stagnierten [4]. Während sich die nachfolgende Arbeit auf den ÖPNV und besonders den Linienbus-Nahverkehr fokussiert, erzielt diese Verkehrsart durchschnittlich 83 g Treibhausgase<sup>1</sup> je Personenkilometer<sup>2</sup> [5]. Bei einer Beförderungsleistung in dieser Verkehrsart von 29.300 Mio. Personenkilometer ergibt sich ein (theoretisches) Treibhausgas-Einsparpotential von 2,43 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent [6]. Die Substitution von fossilen Energieträgern zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes durch die anwachsende Nutzbarmachung von Strom im Verkehr stößt angesichts von Diskussionen über Dieselfahrverboten in Innenstädten auf steigende positive Resonanz und resultiert in einer Kopplung des Verkehrs- mit dem Stromsektor [7]. Die Elektromobilität ermöglicht es in Kombination mit Erneuerbaren Energien einen Strukturwandel im energieintensiven Sektor des Verkehrs zu erreichen und gilt als wichtiger Baustein der Energiewende und wesentlicher Schlüssel zum Aufbau einer umweltgerechten Mobilität [8]. Trotz überwiegend auf batteriebetriebene Fahrzeuge ausgelegten politischen Zukunftsausrichtungen der Bundesregierung, wird das vorgegebene Ziel von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 nach aktuellen Prognosen erst voraussichtlich im Jahr 2022 erreicht [9, 10]. Neben der Elektromobilität stellen weitere Technologieoptionen – insbesondere die Wasserstofftechnologie – Alternativen

---

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O summiert in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben

<sup>2</sup> Transportkennzahl für die Beförderungsleistung, welche aus dem Produkt zwischen beförderten Personen und Wegstrecke (in Kilometern) resultiert

dar, um das Treibhausgas-Einsparpotential maximal auszuschöpfen, sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

## 1.1 Ausgangstellung und Herausforderung

Städte, Kommunen und insbesondere Verkehrsbetriebe haben eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland, da eine Umstellung der Verkehrsflotte auf Elektrofahrzeuge eine kontinuierliche Reduktion von Treibhausgasen und somit einen klimafreundlichen und nachhaltigen öffentlichen Verkehr ermöglicht. Während rund 72 % der Betriebsleistung auf dem deutschen Eisenbahnnetz mittels elektrischer Traktion erbracht werden, bietet der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV), trotz ausgereifter U-, S- und Straßenbahnen sowie Oberleitungsbussen, ein großes Potential zur Reduktion verkehrsbedingter Treibhausgasemissionen, da der straßenseitige ÖPNV heutzutage fast ausschließlich durch Dieselbusse abgewickelt wird [11, 12].

Elektrisch betriebene Fahrzeuge weisen neben der lokalen Treibhausgasemissionsfreiheit ebenfalls energieeffizientere Antriebssysteme gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren auf. Konventionelle elektrisch betriebene ÖPNV-Verkehrssysteme besitzen diese Vorteile bereits, liefern dennoch Nachteile. Die notwendige durchgehende Stromzuführung über Fahrleitungen, sorgt neben einem veränderten Stadtbild für hohe Investitionskosten und limitiert gleichzeitig die Flexibilität in der Streckengestaltung [13]. Die Kombination ausgereifter Oberleitungsbus- mit modernster Batterietechnologie zu Batterie-Oberleitungsbussen<sup>3</sup> bietet den Vorteil fahrleitungsfreie Abschnitte außerhalb des Oberleitungsbussystems zu befahren. Dadurch lassen sich durch gezielten Teilausbau der zu befahrenden Strecken nicht nur die Investitionskosten erheblich reduzieren, sondern auch die Flexibilität der Streckengestaltung im Vergleich zu klassischen Oberleitungsbussystemen ohne Batterie-Oberleitungsbusse steigern.

Abbildung 1-1 zeigt, dass beim Betrieb und bei der Planung eines Oberleitungsbussystems mit Batterie-Oberleitungsbussen verschiedene Optimierungsebenen zu betrachten sind. Die Integration von Batterie-Oberleitungsbussen bedarf der Dimensionierung eines Fahrzeugenergiespeichersystems, welche neben der Fahr- und Umlaufplanoptimierung maßgeblich die Dimensionierung der Energieversorgungsinfrastruktur (EVI) beeinflusst. Umlaufpläne enthalten sämtliche Fahrten aller Busse zu bestimmten (Typ-)Tagen und fungieren als Basis für die Fahrplanung, wobei ein Fahrplan Abfahrzeiten von Bussen an einer Haltestelle zusammenfasst. Diese drei Ebenen bilden die Planungsebene und sind vor der Fahrt durchzuführen. Die Dimensionierung der EVI optimiert die Anzahl und Standorte der Gleichrichter-Unterwerke und Nachladestationen sowie die Fahrleitungslängen und -positionen. Ausgehend von optimierten Fahr- und Umlaufplänen sowie ausgewählten Batterie-Energieinhalten der Batterie-Oberleitungsbusse, werden die Investitions- und Betriebskosten für

---

<sup>3</sup> In der nachfolgenden Arbeit wird ausschließlich der Begriff Batterie statt Akkumulator verwendet.

den Neu- und Ausbau eines Oberleitungsbussystems minimiert. Die Auswahl der Technologieart und die Optimierung der Batterie-Energieinhalte der Batterie-Oberleitungsbusse bestimmen die Dimensionierung des Fahrzeugenergiespeichersystems und erfordert Kenntnisse über Fahr- und Umlaufpläne. Die dritte Optimierungsebene, bestehend aus Fahr- und Umlaufplanoptimierung, minimiert Fahrtstopps, durch beispielsweise Lichtsignalanlagen-Bevorrechtigungen.

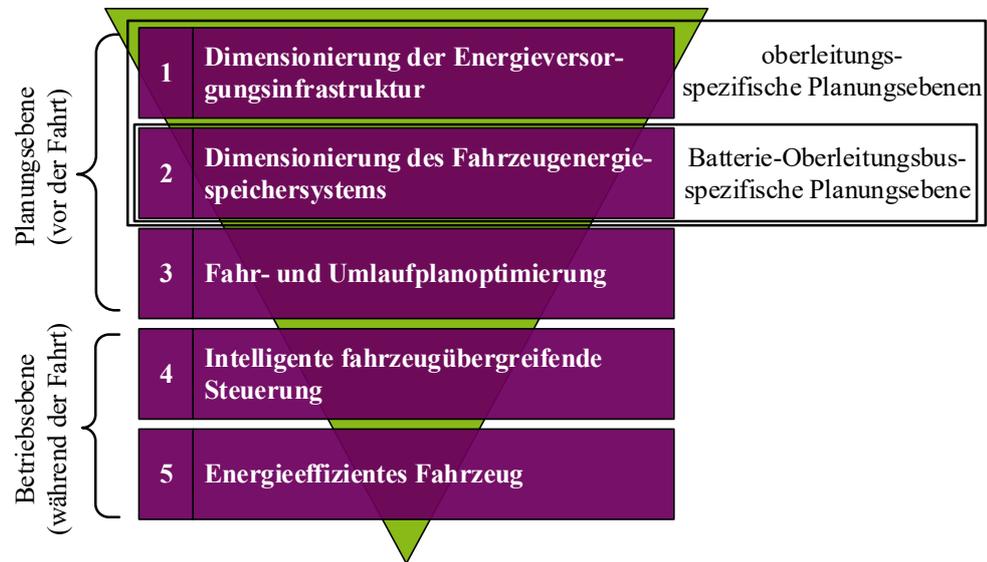


Abbildung 1-1: Optimierungsebenen beim Betrieb und bei der Planung eines Oberleitungsbussystems mit Batterie-Oberleitungsbussen (in Anlehnung an [13])

Die Betriebsebene unterteilt sich in die intelligente fahrzeugübergreifende Steuerung sowie die individuelle energieeffiziente Fahrzeugsteuerung. Die intelligente fahrzeugübergreifende Steuerung steuert anhand von Sensor-Messwerten sämtliche Aktoren im Oberleitungsbussystem, um Netzengpässe vorzubeugen. Dabei werden u. a. aktuelle Batterie-Ladezustände der Batterie-Oberleitungsbusse ausgewertet, um Flexibilität zu prognostizieren. Optimierungsebene fünf steuert gezielt Nebenaggregate (z. B. Klimakompressor oder Lenkhilfe) im Fahrzeug mittels eines intelligenten Fahrzeugenergie-managements.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit bezeichnet die *Planungsebene* die in Abbildung 1-1 gezeigte Optimierungsebene 1 sowie die *Betriebsebene* Optimierungsebene 4. Die weiteren Optimierungsebenen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, wobei Optimierungsebene 5 nachgelagert optimiert werden kann und somit keinen Einfluss auf die verbleibenden Optimierungsebenen besitzt. Optimierungsebenen 2 und 3 wirken jedoch auf Optimierungsebene 1 ein, sodass zuvor optimierte Fahr- und Umlaufpläne als auch festdefinierte Fahrzeugenergiespeichersysteme als Eingangsparameter in die Dimensionierung der EVI einfließen.

Der Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase kann durch die Verdrängung von konventionellen verbrennungskraftmotorisch-dominanten ÖPNV-Verkehrssystemen signifikant reduziert werden. Die Einführung von intelligenten Oberleitungsbussystemen mit Batterie-Oberleitungsbussen kann zukünftig durch die Optimierung der einzelnen Ebenen die Vorteile eines konventionellen

verbrennungskraftmotorisch-dominanten ÖPNV-Verkehrssysteme egalieren und gleichzeitig Klimaneutralität herstellen sowie lokale Treibhausgasemissionen in Innenstädten vollständig vermeiden.

Die Herausforderung zur Einführung intelligenter Batterie-Oberleitungsbussysteme mit Batterie-Oberleitungsbussen besteht in der individuellen Betrachtung aller Optimierungsebenen. Die unterschiedlichen Optimierungsziele im Betrieb und bei der Planung von intelligenten Oberleitungsbussystemen mit Batterie-Oberleitungsbussen lassen sich durch das identische methodische Instrumentarium der Erfassung des Energiebedarfes der Batterie-/Oberleitungsbusse<sup>4</sup> lösen.

## 1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Klimawandel stellt ein internationales Problem dar, sodass Deutschland bis 2050 ein Höchstmaß an Nachhaltigkeit erreichen will [4], wobei die nachfolgende Arbeit den Wandel des Verkehrssektors und besonders den ÖPNV fokussiert. Dabei hat sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehrsbereich zwischen 1990 und 2014 nicht signifikant verändert, sodass dieser Sektor mit einer Reduzierung um bis zu 42 Prozent (gegenüber 1990) zum 2030er Klimaziel beitragen soll [14, 15]. Durch EU-Richtlinien müssen zusätzlich Verkehrsbetriebe fest definierte Anteile an klimafreundlichen Fahrzeugen beschaffen, wodurch sich Verkehrsbetriebe mit den aktuell zur Verfügung stehenden Antriebstechnologien sowie deren Zukunftsprognosen auseinandersetzen müssen [16–18].

Heutige klimaneutrale Antriebstechnologien besitzen jedoch Restriktionen (z. B. geringe Reichweite oder erhöhte Produktionskosten), die den Flottenaustausch erschweren, sodass beispielsweise eine erweiterte EVI notwendig ist. Diese EVI bietet zusätzliche Lademöglichkeiten für die Busse, um die derzeitigen Restriktionen zu bewältigen. Dabei stellt die Reichweite derzeitiger Antriebstechnologien einen entscheidenden Faktor wieder, sodass mittels intelligenter geplanter EVI (*Planungsebene*), die Tagesfahrleistung – unter der Prämisse die Investitionskosten zu minimieren und den störungsfreien Betrieb zu gewährleisten – erbracht werden kann.

Bei vorhandener EVI liegt die Herausforderung darin die Nutzung der bestehenden EVI zu maximieren (*Betriebsebene*), ohne eine Überlastung der EVI zu erzeugen, welche wiederum den störungsfreien Betrieb gefährdet.

Der stark steigende Einsatz von Bussen mit elektrischen Antriebstechnologien resultiert in einer Vielzahl von Veröffentlichungen von Bussimulationsmodellen, jedoch wird eine Oberleitungsbussystem-Simulation benötigt, die für die Planungs- als auch für die Betriebsebene

---

<sup>4</sup> Batterie-/Oberleitungsbusse kennzeichnet im weiteren Verlauf dieser Arbeit die kombinierte Betrachtung von Oberleitungsbussen und Batterie-Oberleitungsbussen.

die notwendigen Voraussetzungen mitbringt. Die nachfolgende Arbeit adaptiert die in [19] erarbeitete Oberleitungsbussystem-Simulation, welche im Abschnitt 3.3 detailliert vorgestellt wird. Die Oberleitungsbussystem-Simulation, welche erstmalig in [20] veröffentlicht wurde, weist eine adaptierte Newton-Raphson Leistungsflussberechnung auf, die die Fähigkeit besitzt Netzzustände uni- und bidirektionaler DC<sup>5</sup>-Oberleitungssysteme sowie deren vorgelagerte AC<sup>6</sup>-Mittelspannungssysteme zu determinieren [21]. Als Folge konsequenter Entwicklungen bietet es die Möglichkeit Szenarienanalysen zu erstellen und Einflussfaktoren zu ermitteln sowie optimale Standorte (u. a. für stat. Energiespeichersysteme) innerhalb des Oberleitungsbussystems zu determinieren [22–26].

In [27] wird ein Bussimulationsmodell vorgestellt, wobei der Stromverbrauch durch externe Einflüsse wie z. B. Wetter und Typtage beeinflusst wird, um ein Stromverbrauchs-Vorhersagemodell mit optimalen Lademodellen für Batteriebusse zu etablieren. [28] hingegen ermittelt den Energiebedarf von Elektrobussen, indem ein stochastisches Busbewegungsprofil auf der Basis einer Markov-Kette erstellt wird, um das erforderliche Bus-Drehmoment in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen zu determinieren. [29–31] und [32] führen eine auf Messdaten basierte Modellierung ein. Während der Energiebedarf der untersuchten Strecken folglich akkurat wiedergegeben werden kann, fehlt eine Übertragungsanalyse, um weitere Unwägbarkeiten des Verkehrsaufkommens, Heizungs- und Klimatisierungsbedarfe sowie weitere lokale Bedingungen abzubilden. In [33, 34] findet eine Energiebedarfsbetrachtung von Elektrobussen statt, welche auf probabilistischen Geschwindigkeitsprofilen basiert und den Heizungs- und Klimatisierungsbedarf detailliert modelliert. Die aufgeführten Simulationsmodelle betrachten jedoch keine weiteren Antriebstechnologien (u. a. Batterie-Oberleitungsbusse). Außerdem findet keine mit dem Simulationsmodell verknüpfte Leistungsflussberechnung der EVI statt.

Die Optimierung der *Betriebsebene* zeichnet sich im ersten Schritt durch eine Erfassung des aktuellen Netzzustandes des Oberleitungsbussystems aus. Im zweiten Schritt wird eine Netzzustandsprognose benötigt, die zuverlässig und mit einer ausreichenden Güte den sich einstellenden Netzzustand vorhersagen kann. Zu diesem Zweck wird in [35] aufbauend auf der gewählten Oberleitungsbussystem-Simulation das Netzleitsystem erstmalig eingeführt.

In [36] wird ein Echtzeit-ÖPNV-Überwachungssystem vorgestellt, welches in der Lage ist, die Ankunftszeit des Busses an der nächsten Haltestelle abzuschätzen. Um kritischen Netzsituationen vorzubeugen ist zusätzlich eine Prognose aller Oberleitungsbussystem-Komponenten obligatorisch, damit eine Netzzustandsprognose erstellt werden kann. Während beispielsweise in [37–39] und [40] Prognosen für Ladestationen für Elektrofahrzeuge erstellt werden, liegt der Schwerpunkt des Netzleitsystems auf die Prognose der Batterie-/Oberleitungsbusse. Prognosen

---

<sup>5</sup> DC (*direct current*): Gleichstrom

<sup>6</sup> AC (*alternating current*): Wechselstrom

von Bahnsystemen werden in [41–46] und [47] mittels unterschiedlichster Methoden (u. a. künstliche neuronale Netze oder Deep Learning) behandelt, welche zwar ähnlich erfolgen, jedoch im direkten Vergleich eine vereinfachte Version eines Busprognosemodells darstellen, da u. a. keine oder lediglich in einem geringeren Maße außergewöhnliche Verkehrssituationen (z. B. Verkehrsstaus) abgebildet werden können.

Für die auf der Netzzustandsprognose aufbauende und dem Netzleitsystem zugehörige prädiktive Regelung in [48], findet eine Flexibilitätsbewertung aller im Oberleitungssystem befindlichen Aktoren sowie eine Netzzustandsbewertung der erstellten Netzzustandsprognose statt [49, 50]. Die für die prädiktive Regelung notwendige Leistungsanpassung der Aktoren beschreibt [51].

Die *Planungsebene* ermöglicht es vor dem (Aus-)Bau des/eines Oberleitungsbussystems die Infrastrukturinvestitionskosten zu minimieren [52]. [53] beschreibt ein Optimierungsmodell zur Determinierung der städtischen Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Dieses Optimierungsmodell berücksichtigte jedoch nicht die Höhenunterschiede der Straße, welche einen signifikanten Einfluss auf die Energiebedarfe und somit auf das resultierende Planungsergebnis besitzen. Es wird von einer Kompensation des Energiebedarfs durch steigende Straßen und Gefällestrrecken ausgegangen. In [54] wird eine segmentbasierte Modellierung vorgestellt. Eine große Anzahl unterschiedlicher Fahrzyklen und Fahrgastzahlen werden für ausgewählte Buslinie erzeugt, welche ebenfalls für die in dieser Arbeit vorgestellte Planungsmethode obligatorisch sind. Jedoch wird das Simulationsmodell nur für eine bestimmte Umgebungstemperatur validiert und zusätzliche Haltepunkte (u. a. an Lichtsignalanlagen und Kreuzungen) werden vernachlässigt, um die Anzahl der Segmente zu verringern. Dadurch entstehen längere Segmente<sup>7</sup>, welche in einer höheren Planungsunsicherheit resultieren.

In [55] werden unterschiedliche Lademöglichkeiten von Elektrobussen verglichen, sodass detailliert auf Depot- und Gelegenheitslader eingegangen wird, jedoch Oberleitungen nicht betrachtet werden. Neben zahlreichen weiteren Veröffentlichungen führen [56–59] und [60] unterschiedliche Optimierungsverfahren (gemischt-ganzzahliges nicht-lineares Optimierungsverfahren und evolutionären Algorithmus) ein, um optimale Platzierungen und Dimensionierungen von Schnellladestationen zu determinieren. Diese betrachten öffentliche Ladestationen, jedoch lassen sich die Minimierungsfunktionen adaptieren, sodass kostenoptimale Ergebnisse erzielt werden. [60] verwendet – ähnlich zu der Planungsmethode in Kapitel 5 dieser Arbeit – einen Fahrzeugdurchsatz, welcher bei der Planung berücksichtigt wird.

Die Autoren in [61] übertragen diese Optimierungsmodelle, um kosteneffiziente Ladeinfrastruktur-Platzierungen für Buslinien durchzuführen. Dabei werden Oberleitungsbusse

---

<sup>7</sup> Teilbereich einer Busspur, welcher in der *Planungsebene* entweder mit oder ohne Oberleitung ausgestattet wird (vgl. Abschnitt 5.5.2)

aufgrund höher Investitionskosten ausgeschlossen, Oberleitungsbussysteme mit Batterie-Oberleitungsbussen werden ebenfalls nicht weiter betrachtet.

In [62] und [63] wird explizit der Einsatz von Batterie-Oberleitungsbussen mit dem Ziel eines minimalen Oberleitungsnetzes untersucht, wobei ebenfalls die nutzbare Bestandsinfrastruktur als auch bauliche Restriktionen in die Optimierung mit einbezogen werden können. Jedoch findet keine Überprüfung der technologischen Rahmenbedingungen (Spannungshaltung, Kurzschlussstromerkennbarkeit und Betriebsmittelbelastungen, vgl. Abschnitt 5.4 dieser Arbeit) statt, sodass der Fokus ausschließlich auf Ladezustandsbetrachtungen gelegt wird.

Während nachfolgend ausschließlich Oberleitungsbussysteme berücksichtigt werden, zeigt [64] eine vom Korea Advanced Institute of Technology (KAIST) entwickelte innovative Technologie zur drahtlosen Energieübertragung auf, die auf einem kombinierten System aus Straße und Fahrzeug basiert und somit eine weitere Möglichkeit einer Energieübertragung während der Fahrt darstellt. Unbestimmtheiten des Energiebedarfes werden bei der verwendeten Simulation nicht berücksichtigt. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Planungsmethode lässt sich auf dieses kombinierte System jedoch übertragen.

Mit Blick auf den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik existieren in diesem Forschungsgebiet zahlreiche Veröffentlichungen, aber im Bereich Planung und Betrieb von Oberleitungsbussystemen fehlt neben einem intelligenten Netzleitsystem (Betrieb) ein Optimierungsmodell zur Infrastrukturplanung von Oberleitungsbussystemen. Daher werden diese im Rahmen der nachfolgenden Arbeit entwickelt.

### **1.3 Einordnung, Zielsetzung und Struktur der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem *Betrieb* und der *Planung* eines intelligenten Oberleitungsbussystems mit Batterie-Oberleitungsbussen.

Die Arbeit konzentriert sich in der *Betriebsebene* auf die Netzzustandsidentifikation sowie die Netzzustandsprognose von Oberleitungsbussystemen. Die Netzzustandsprognose wiederum fokussiert sich auf die Prognose der fahrenden Batterie-/Oberleitungsbusse, welche die energieintensivste Komponente darstellen. Ziel ist es möglichst präzise die Leistungen der Batterie-/Oberleitungsbusse und somit den zukünftigen Netzzustand eines Oberleitungsbussystems zu prognostizieren, um resultierend einen normkonformen Betrieb gewährleisten zu können.

Die *Planungsebene* bildet den zweiten Forschungsaspekt dieser Arbeit ab. Die Abgrenzung zu thematisch-verwandten wissenschaftlichen Arbeiten liegt in dem Aspekt der Minimierung der Infrastrukturinvestitionskosten eines Oberleitungsbussystems mit Batterie-Oberleitungsbussen unter der Einhaltung von technologischen Rahmenbedingungen (Spannungshaltung, Kurzschlussstromerkennbarkeit und Betriebsmittelbelastungen) und baulichen Restriktionen.

Zunächst werden im Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen von Oberleitungsbussystemen erarbeitet, welche sich auf die existierenden Buskonzepte sowie die elektrische Energieversorgung von Oberleitungsbussystemen fokussieren. Der Ausbau der Elektromobilität (Integration von Ladesäulen in das Oberleitungsbussystem) sowie die Integration von Photovoltaikanlagen und bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerken (werden nachfolgend als neuartige Systemkomponenten bezeichnet) bedeuten eine Veränderung der Nutzungsszenarien existierender Oberleitungsbussysteme, resultierend in einem Anstieg von Netzengpässen. Intelligente Oberleitungssysteme mit Batterie-Oberleitungsbussen bieten das Potential Netzausbau zu vermeiden, indem die Energieflüsse im Oberleitungssystem aufgrund der prognostizierten Netzzustände gesteuert werden.

Anschließend wird die Betriebsebene analysiert, indem im dritten Kapitel ein intelligentes Netzleitsystem entwickelt wird. Das Netzleitsystem identifiziert ohne Prozessunterbrechung basierend auf Sensor-Messwerte den aktuellen Netzzustand eines Oberleitungsbussystems. Ferner determiniert das intelligente Netzleitsystem eine gesamteinheitliche Netzzustandsprognose des Oberleitungsbussystems, berücksichtigend alle im Oberleitungsbussystem befindlichen Komponenten (Batterie-/Oberleitungsbusse sowie neuartige Systemkomponenten). Die gesamteinheitliche Netzzustandsprognose fungiert als Basis für ein prädiktives Regelungssystem, welches die Erstellung von Aktorbefehlen als Ziel verfolgt. Das intelligente Netzleitsystem in Kombination mit dem prädiktiven Regelungssystem entspricht der vierten Optimierungsebene aus Abbildung 1-1, dabei ist das prädiktive Regelungssystem nicht Bestand dieser Arbeit und wird in [48] separat behandelt.

Kapitel 4 beschreibt die Validierung und Evaluation des intelligenten Netzleitsystems, indem mittels eines Labortestes Einflussfaktoren auf das Netzleitsystem ermittelt werden. Anschließend findet eine Gütebestimmung der Netzzustandsprognose unter der Voraussetzung unterschiedlicher Prognosezeiten statt, während abschließend eine Bewertung erfolgt, die die Grenzen des Verfahrens aufzeigt.

Die Planung von Oberleitungsbussystemen teilt sich wie bereits in Abbildung 1-1 gezeigt in drei Unterpunkte auf. Fokus dieser Arbeit ist die Generierung einer optimierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur, wofür eine umfangreiche Datengrundlage benötigt wird. Unter Einhaltung aller technologischer Rahmenbedingungen wird eine Optimierungsmethode eingeführt, welche aufbauend auf simulierten Energieverbräuchen und potentiellen Busbatterie-Energiezufuhren eine optimierte Oberleitungsbussystem-Infrastruktur ermittelt. Auf zwei Fallstudien wird die eingeführte Optimierungsmethode angewendet, um für die ausgewählten Städte eine szenarienbasierte und optimierte Oberleitungsbussystem-Infrastruktur zu determinieren. Folglich werden Einflussfaktoren auf die Infrastrukturinvestitionskosten untersucht.

Das letzte Kapitel enthält ein zusammenfassendes Fazit und gestattet abschließend einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.



## 2 Oberleitungsbussysteme

Oberleitungsbussysteme gelten heutzutage als antiquiert, besitzen jedoch dank lokaler Treibhausgasemissionsfreiheit im Zuge der Energiewende einen entscheidenden Vorteil gegenüber herkömmlichen ÖPNV-Verkehrssystemen. Innovative elektrische Antriebskonzepte wie der Batterie-Oberleitungsbus oder der Batteriebus können existierende Nachteile des Oberleitungsbusses kompensieren.

### 2.1 Historische Einordnung

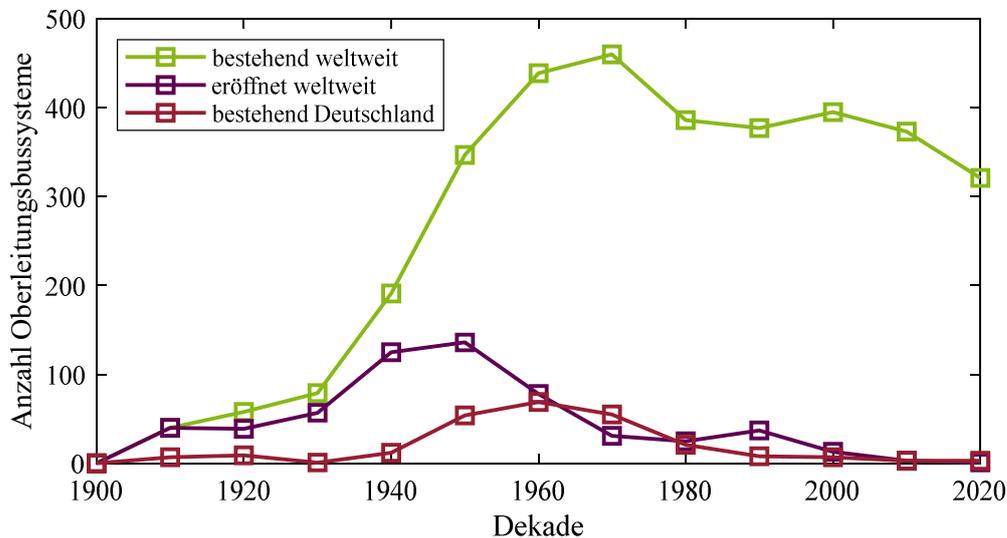
Werner von Siemens präsentierte im Jahr 1882 in Halensee bei Berlin mit dem sogenannten Elektromote<sup>8</sup> den weltweit ersten elektrischen Oberleitungsbus der Welt. Siemens' Idee von einer elektromagnetischen Droschke aus dem Jahr 1847 benötigte zur Fortbewegung weder ein Pferdegespann noch befahrbare Gleise, sondern wies mit einem elektrischen Antrieb – zwei Elektromotoren mit jeweils 2,2 kW – sowie mit einer aus Oberleitung bestehenden Energieversorgung – die Hauptmerkmale heutiger Oberleitungsbussysteme auf und gilt deshalb als erster Vorläufer entsprechender Verkehrssysteme. Der unregelmäßige Lauf der Stromabnehmer, begründet anhand schlechter Straßenverhältnisse in Kombination mit damaligen eisenbereiften Holzspeichenrädern, führte zu einer Einstellung des mit einer Gleichspannung von 550 V betriebenen Elektromotes im selben Jahr [65, 66].

Das elektrisch betriebene ÖPNV-Verkehrssystem galt Anfang des 20. Jahrhundert als hoch innovativ und erhielt nach Eröffnung der deutschen ersten Oberleitungsbuslinie in Dresden im Jahr 1903, als der Oberleitungsbus eine fünf Kilometer lange Strecke in 25 Minuten befuhr, eine entsprechend große Akzeptanz [67, 68]. Nichtsdestotrotz erreichte das Oberleitungsbussystem vor dem Ersten Weltkrieg erst das Prototypenstadium und hätte höchstens den städtischen Verkehr kleiner Straßenbahnen übernehmen können, ehe der Erste Weltkrieg zusätzlich eine Stagnation in der Entwicklung bedeutete [69]. Erschwerend wurde das wertvolle und für die Oberleitung notwendige Kupfer kriegsbedingt für die Rüstungsindustrie im Ersten Weltkrieg konfisziert [68]. Abbildung 2-1 zeigt, dass der Oberleitungsbus ab den 1930er-Jahren eine große Renaissance erlebte, indem er in vielen Städten Europas die Straßenbahn, begründet durch eine höhere Flexibilität und Rentabilität, ablöste [67, 70]. Ebenso stieg in Deutschland ab 1930 die Anzahl von in Betrieb genommenen, modernen Oberleitungsbussystemen an, begünstigt durch abgewirtschaftete Straßenbahn-Systeme und kriegsbedingter Nichtverfügbarkeit von Treibstoff für Dieselbusse. Nach dem Zweiten Weltkrieg setzte sich der Trend zu Oberleitungsbussystemen, aufgrund von zerstörten Straßenbahnen und einer Hochphase des Wohnungsbaus zur Zeit des

---

<sup>8</sup> Abgeleitet aus dem englischen Begriff *electric motion*

Wirtschaftswunders<sup>9</sup>, fort. Damit begann die Blütezeit von Oberleitungsbussystemen in Deutschland und der Welt [70]. Technische Weiterentwicklungen wie die Personenbeförderung in Anhängern oder Gelenkoberleitungsbusse zur Bewältigung des gestiegenen Fahrgastaufkommens fanden statt [71].



**Abbildung 2-1:** Anzahl der Oberleitungsbussysteme in Deutschland und der Welt (einschließlich Versuchs-, Test- und Demonstrationsnetze) sowie eröffnete Oberleitungsbussysteme weltweit zwischen 1900 und heute, Daten aus [71–74]

Der große Anstieg des Individualverkehrs, gesteuert durch einen verkehrspolitischen Paradigmenwechsel zugunsten des privaten Pkws ab den 1960er Jahren, leitete die weltweite Resignation ein [75]. Für Deutschland bedeutete dies die Einstellung fast aller 60 betriebenen Oberleitungsbussysteme [70]. Kontinuierliche Innovationen der Dieselmotortechnik sowie preisgünstiges Rohöl und steigende Steinkohle- und demzufolge steigende Stromkosten beschleunigten den Umstieg auf Dieselmotorenbusse [76]. In Deutschland erfolgte zusätzlich ein Verbot von Personenanhängern<sup>10</sup> im Jahr 1960 [77]. Die Ölpreiskrisen<sup>11</sup> 1973 und 1979/1980 und die beginnenden Forderungen nach mehr Umweltfreundlichkeit resultierten in einer verhältnismäßig kleinen Wiederbelebung des Oberleitungsbusse durch die Errichtung von Oberleitungsbussystemen in größtenteils nicht-westlichen Ländern. In den westlichen Ländern hingegen führten die Ölpreiskrisen zumindest zum Erhalt einiger bestehender Oberleitungsbussysteme, sodass heute noch drei deutsche Verkehrsbetriebe (Esslingen am Neckar, Eberswalde und Solingen) weiterhin Oberleitungsbussysteme betreiben [67, 78]. Dabei stellt Solingen mit über 100 km Fahrleitungslänge das größte Oberleitungsnetz dar, während die Stadt gleichzeitig die größte Oberleitungsbusflotte (ca. 50 Oberleitungsbusse) betreibt [79].

<sup>9</sup> Unerwarteter, rasant wachsender wirtschaftlicher Anstieg in Westdeutschland nach dem Zweiten Weltkrieg

<sup>10</sup> Anhänger, die ausschließlich zur Personenbeförderung dienen

<sup>11</sup> Stark wachsender Anstieg des Rohölpreises, entstehend durch Rohölverknappung

Die heutige Anzahl betriebener Oberleitungsbussysteme scheint stabil, besitzt aber, dank steigendem Bewusstsein von begrenzter Energieträgerverfügbarkeit, großes Potential [76]. Ebenfalls findet eine Rückbesinnung auf die seit 100 Jahren bestehenden Vorteile statt. Dazu zählen neben einer leisen Betriebsweise von Oberleitungsbussen und lokaler Treibhausgasemissionsfreiheit auch die Energierückgewinnung (Rekuperation) während des Bremsvorganges, welche aufgrund des aus Beschleunigungs- und Bremsphasen bestehenden Fahrzyklus enorm wichtig ist [67].

## 2.2 Elektrische Buskonzepte

Ziel der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) ist die Diversifizierung der Energiebasis im Verkehrssektor, welche eine Wechselwirkung des Verkehrsbereichs mit dem Stromsektor mit sich bringt [80, 81]. Weltweite Förderprogramme sowie Pilotprojekte beschleunigen die Entwicklung und Einführung innovativer elektrischer Antriebskonzepte. Darunter zählen ebenfalls straßengebundene Elektrofahrzeuge des ÖPNV, die über einen elektrischen Hauptantrieb verfügen [82].

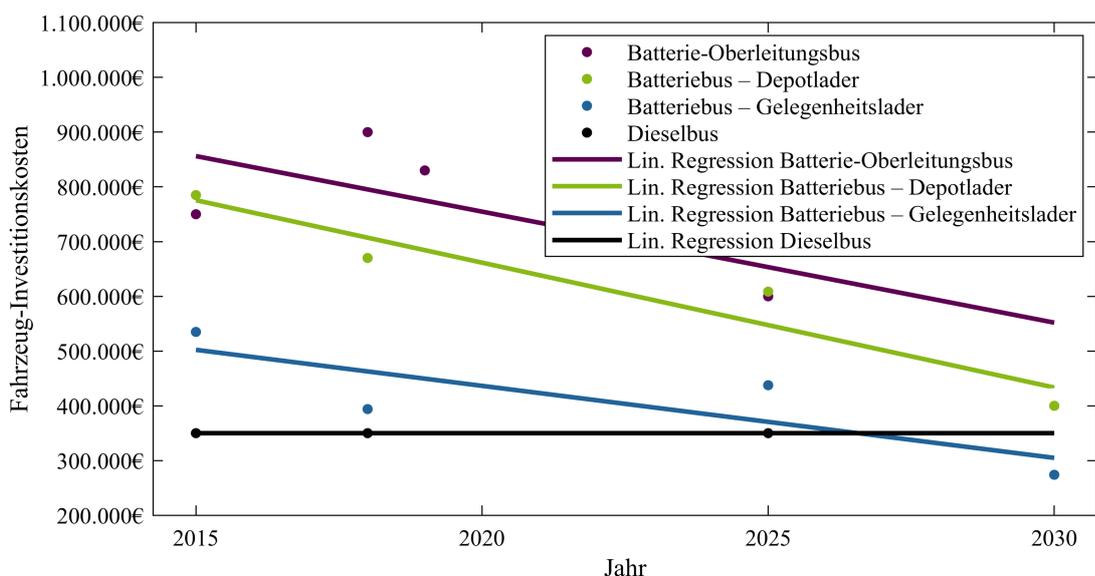
| elektrische Antriebsart:        | Energiezu- und mitführung:   |                          |
|---------------------------------|--|--------------------------|
| <b>Oberleitungsbus</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permanente Energiezuführung (Fahrstrom) über eine Oberleitung</li> <li>• Keine Energiemitführung</li> </ul>   | vollständige Oberleitung |
| <b>Batterie-Oberleitungsbus</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Streckenladung: Streckenweise Energiezuführung (Fahrstrom) über eine Oberleitung</li> <li>• Energiemitführung sowie Befahren oberleitungsfreier Abschnitte mithilfe einer elektrochemischen Batterie</li> </ul>   | partielle Oberleitung    |
| <b>Brennstoffzellenbus</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuführung von Wasserstoff an einer Wasserstofftankstelle</li> <li>• Mitführen des Wasserstoffes in einem Tank</li> </ul>  | keine Oberleitung        |
| <b>Batteriebus</b>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energiezuführungsvarianten:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Depotladung (Plug-In)</li> <li>- Gelegenheitsladung (Pantograph und Induktion)</li> <li>- Batteriewechsel (Batteriewechselstation)</li> </ul> </li> <li>• Energiemitführung mithilfe einer elektrochemischen Batterie</li> </ul> |                          |

Abbildung 2-2: Übersicht elektrischer Buskonzepte

Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht bewährter und innovativer elektrischer Busantriebe, welche abhängig von den vorliegenden topografischen und verkehrlichen Gegebenheiten betrieben werden und sich hauptsächlich durch die Art der Energiezu- und mitführung unterscheiden. Während der bewährte Oberleitungsbus auf einem vollständigen Oberleitungsausbau angewiesen ist, benötigen Brennstoffzellenbusse sowie Batteriebusse keine Oberleitung. Der mit einer elektrochemischen Batterie und einem Stromabnehmer ausgerüstete Batterie-Oberleitungsbus

benötigt nur eine partielle Oberleitung, um oberleitungsfreie Abschnitte mithilfe der integrierten Batterie zu befahren.

Hybrid<sup>12</sup>- und Elektrobusse machen derzeit nur rund 1,4 % der gesamten ÖPNV-Busflotte in Deutschland aus – durch ca. 2.000 Verkehrsbetriebe werden rund 50.000 Omnibusse auf 24.400 Buslinien betrieben [6, 83]. Die Clean Vehicles Directive (CVD) der Europäischen Union (EU) sieht für Neubeschaffungen bis 2025 eine Mindestquote von 45 % für saubere Antriebsarten<sup>13</sup> vor – bis 2030 wird eine Quote von 65 % verlangt [16, 18]. Dabei ist vor allem die Entwicklung der Fahrzeug-Investitionskosten interessant, welche in Abbildung 2-3 beispielhaft für Dieselbusse, Batteriebusse und Batterie-Oberleitungsbusse dargestellt sind. Brennstoffzellenbusse rücken im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht in den Fokus, weshalb diese in der Abbildung nicht abgebildet werden. Die Abbildung zeigt, dass Dieselbusse zukünftig konstante Fahrzeug-Investitionskosten von ca. 350.000 € aufweisen werden, während Batteriebusse zunächst deutlich höhere Fahrzeug-Investitionskosten besitzen, welche durch eine Projektion der Kostenentwicklung zukünftig aber im Investitionskostenbereich von Dieselbussen auskommen werden. Begründet durch Fortschritte in der Batterietechnologie verbessern sich die Kostenstrukturen der Batteriebusse in den nächsten Jahren deutlich [75, 84]. Die gegenwärtigen Oberleitungsbusinvestitionskosten (ohne Batterie) besitzen einen Kostenfaktor von 1,5 bis 2 gegenüber Dieselbussen. Unter Bezugnahme der deutlich längeren Betriebsdauern der Oberleitungsbusse können Gesamtkosten entstehen, die lediglich 40 % höher sind als beim Dieselbus [85]. Die im Vergleich zum Gelegenheitslader höhere Batteriekapazität des Depotladers oder die zusätzlichen Komponenten (u. a. die Stromabnehmerstangen) beim Batterie-Oberleitungsbus resultieren in einem Investitionsunterschied zum Gelegenheitslader.



**Abbildung 2-3: Fahrzeug-Investitionskosten für Batterie-, Diesel und Batterie-Oberleitungsbusse** [75, 78, 84, 86, 87]

<sup>12</sup> Hybridbusse stellen Omnibusse dar, die mit mehreren Antriebssystemen ausgestattet sind

<sup>13</sup> Fahrzeuge, die elektrisch, mit Bio-Kraftstoffen oder mit Erd- oder Autogas angetrieben werden

### 2.2.1 Oberleitungsbus

Der Elektromotor von Oberleitungsbussen wird permanent mittels Stromabnehmer durch eine über der Fahrspur gespannte Oberleitung versorgt. Folglich ist der Oberleitungsbus spurgebunden und erfordert eine vollumfängliche, komplexe und investitionsintensive Infrastruktur, welche eine geringe Flexibilität in der Liniengestaltung zur Folge hat [88]. Gelegentlich besitzen Oberleitungsbusse einen Hilfsantrieb oder Notaggregate (Dieselmotoren), um baustellen- oder unfallbedingte Umleitungen zu bewältigen. Die Dieselmotoren, welche im Vergleich zu den Elektromotoren geringe Motorleistungen aufweisen, erlauben es den Oberleitungsbussen Fahrten von kurzer Reichweite mit niedriger Geschwindigkeit ohne Oberleitung zu überbrücken, indem sie Strom für den Elektromotor erzeugen oder direkt auf eine sonst nicht angetriebene Achse wirken. Neben energetisch-ökologischen Vorteilen gegenüber herkömmlichen Dieselnissen, bietet der Oberleitungsbus auch Vorteile in Bereichen der Beschleunigung, Steigfähigkeit, Lebensdauer, Geräuschentwicklung und der Rekuperation von (Brems-)Strom in das Oberleitungsnetz [68, 89].

### 2.2.2 Batterie-Oberleitungsbus

Der Batterie-Oberleitungsbus ist ein mit einer Batterie ausgestatteter Oberleitungsbus und verfügt zusätzlich zu den Vorteilen eines Oberleitungsbusses zwei weitere entscheidende Vorteile. Zum einen benötigt der Batterie-Oberleitungsbus keine Hilfsmotoren, um oberleitungsfreie Fahrten zu realisieren, da im Gegensatz zum Hilfsmotor ein relevanter Busumlaufanteil mittels Energieentnahme aus der Batterie gefahren werden kann. Dieser Vorteil mündet, abhängig von der Batteriekapazität, in einer Flexibilitätssteigerung in der Linienführung [75]. Zum anderen wird der benötigte Oberleitungsanteil einer Buslinie signifikant reduziert, wodurch sich die Infrastrukturkosten gegenüber einem reinen Oberleitungsbusbetrieb erheblich reduzieren lassen.

### 2.2.3 Brennstoffzellenbus

Brennstoffzellenbusse sind elektrisch angetriebene Busse, wobei als Kraftstoff und Hauptenergiequelle in der Regel flüssiger oder gasförmiger Wasserstoff dient, welcher über eine Wasserstofftankstelle dem im Bus integrierten Tank zugeführt wird. Eine leistungsstarke Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie in elektrische Energie um, die anschließend dem Elektromotor zur Verfügung gestellt wird. Weitverbreitet sind Brennstoffzellenbusse, die zugleich über eine kleine Batterie (< 30 kWh) verfügen, die Strom aus Rekuperation zwischenspeichert und bedarfsweise dem Antriebsstrang zusätzliche Energie bereitstellt [90]. Das mit der Batterie als Hybridsystem ausgelegtes Brennstoffzellensystem steigert dabei die Effizienz [80]. Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotor werden aufgrund der nicht vorhandenen elektrischen Antriebsart in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

## 2.2.4 Batteriebus

Die Energiemitführung des Batteriebusses erfolgt in einem fahrzeugseitigen elektrochemischen Speicher, wobei zwischen drei Energiezuführungskonzepten (Depotlader, Gelegenheitslader und Batteriewechler) unterschieden wird. Gemessen an der Energieeffizienz bringt der Batteriebus aufgrund des höheren Fahrzeuggewichtes einen Nachteil gegenüber dem Oberleitungsbus mit sich [88]. Der Batteriebus ist aber nicht auf eine Oberleitungsinfrastruktur angewiesen, jedoch ist – abhängig vom Energiezuführungskonzept – eine streckenseitige Infrastruktur (z. B. Schnellladepunkte an Haltestellen) unvermeidlich. Die Basis für die Auswahl einer geeigneten Energiezuführungsvariante wird durch viele Faktoren wie z. B. den durchschnittlichen Tagesfahrleistungen und der Topografie direkt beeinflusst.

### Depotlader

Das Depotladungskonzept (oder Nachtladungskonzept) beschreibt eine Nachladung des fahrzeugseitigen Energiespeichers üblicherweise nachts in der betriebsfreien Zeit im Betriebshof. Dieses erfordert keine streckenseitige Infrastruktur, bedingt jedoch großdimensionierte und folglich kostenintensive Batterien, um Einschränkungen in der Tagesreichweite zu vermeiden. Lediglich muss eine Ladeinfrastruktur am Betriebshof errichtet werden, wo ein weitestgehend kontrollierter Ladevorgang realisiert werden kann. Energiedichten moderner Batterien limitieren heutzutage noch den Einsatz von Batteriebussen mit Depotladung auf energieintensiven Buslinien. Folglich resultiert eine geringe Tagesfahrleistung heutiger Depotlader von ca. 200 km [75, 91, 92]. Als Folge der geringen Tagesfahrleistung resultiert oftmals ein Fahrzeugmehrbedarf.

### Gelegenheitslader

Der Gelegenheitslader lädt zusätzlich zur Nachtladung, tagsüber entlang der Streckenführung. Über Schnellladepunkte an ausgewählten Bushaltestellen und/oder Endhaltestellen werden die Batteriebusse gezielt nachgeladen, um die gewünschte Tagesfahrleistung zu erreichen. Der Betriebsablauf von Dieselbussen ist in vielen Fällen durch Gelegenheitslader uneingeschränkt ersetzbar und somit ohne zusätzlichen Fahrzeug- und Personalaufwand abbildbar. Vorteilhaft ist die geringere Batteriekapazität, die sich in niedrigeren Investitionskosten der Batteriebusse niederschlägt, jedoch müssen strategisch-geplante Schnellladepunkte errichtet und betrieben werden, resultierend in einer Flexibilitätsverringering in der Liniengestaltung gegenüber Depotladern [92].

### Batteriewechler

Batteriewechselstationen, welche sich überwiegend an den Endhaltestellen befinden, ermöglichen in wenigen Minuten den Austausch einer entladenen Batterie mit einer schonend aufgeladenen. Neben den erforderlichen Batteriewechselstationen, die einen entsprechenden Platzbedarf

erfordern, werden Roboter eingesetzt, um den Batterieaustausch vorzunehmen, wofür das Personal zur Bedienung dieser Roboter speziell ausgebildet werden muss [91, 93].

### 2.3 Elektrische Energieversorgung

Die elektrische Energieversorgung der mit Gleichstrom betriebenen Oberleitungsbussystemen erfolgt aus dem Mittelspannungsnetz. Die Umwandlung der zugeführten elektrischen Energie in Gleichrichter-Unterwerken sowie die Verteilung der umgewandelten elektrischen Energie im Oberleitungsnetz stellen die zwei Hauptaufgaben der elektrischen Energieversorgung von Oberleitungsbussystemen dar.

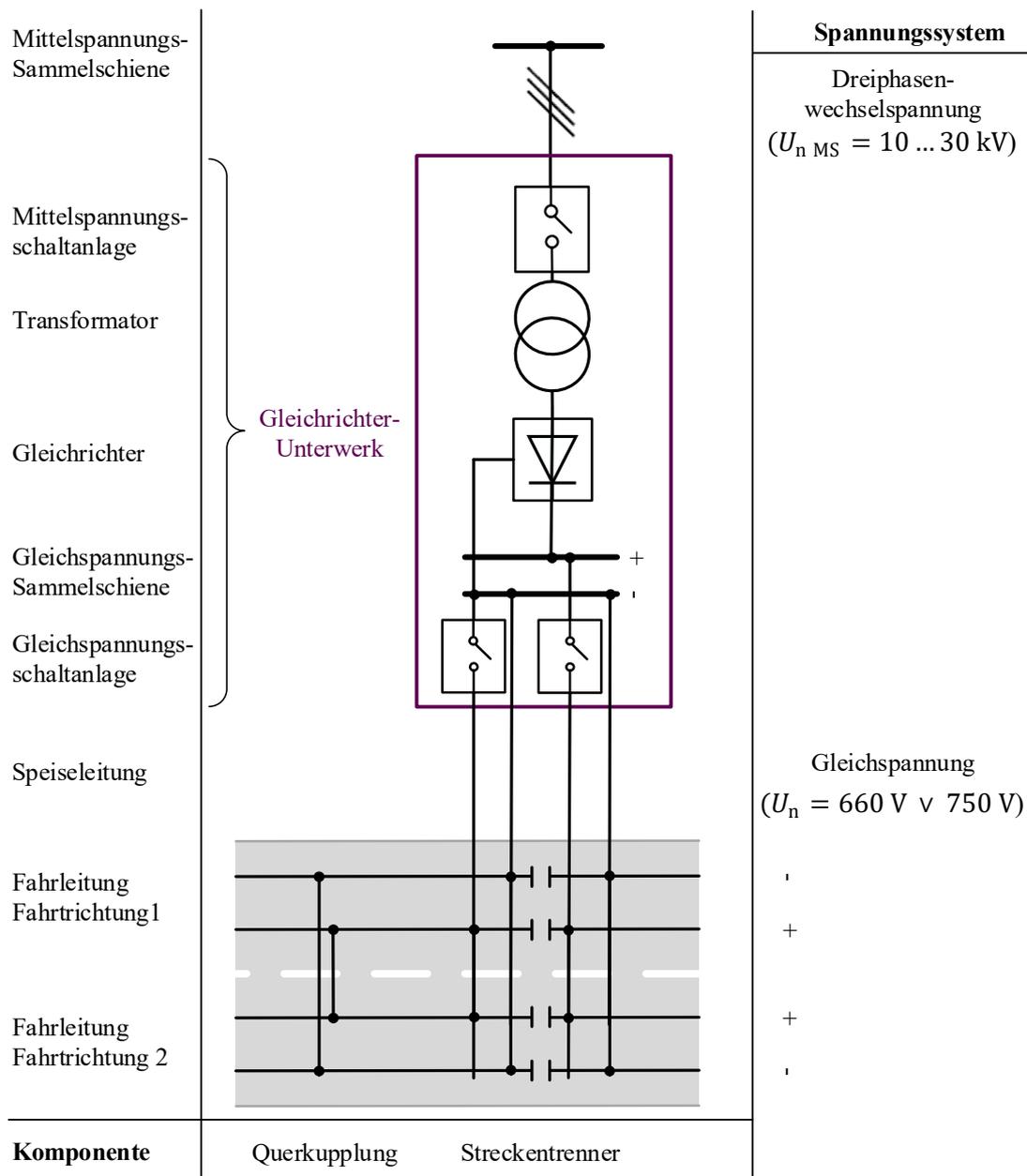


Abbildung 2-4: Systemkomponenten der elektrischen Energieversorgung eines Oberleitungsbussystems (in Anlehnung an [78] und [94])

Zur Bewältigung dieser Aufgaben bilden Gleichrichter-Unterwerke sowie Speise- und Fahrleitungen die drei elektrischen Hauptkomponenten einer Oberleitungsbussystem-Infrastruktur (siehe Abbildung 2-4). Dabei beinhaltet ein Gleichrichter-Unterwerk neben den zwei Hauptkomponenten Transformator und Gleichrichter (siehe Abschnitt 2.3.4) noch eine Gleichspannungs-Sammelschiene und eine Gleichspannungsschaltanlage. Darüber hinaus ist die Wahl des Spannungssystems, welches im öffentlichen Straßenraum nur mit einer begrenzten Spannungshöhe betrieben werden kann, von zentraler Bedeutung.

Weitere elektrische und nichtelektrische Komponenten wie beispielsweise Vorrichtungen zum An- und Abdrachten, die gesonderte – aus Fahrleitung, Ladeinfrastruktur und Werkstatt bestehende – Infrastruktur am Betriebshof, Wendeanlagen (Drehscheiben, Schleifen und Wendedreiecke), Schaltanlagen, Fahrleitungssignale und Masten sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.

### 2.3.1 Speiseart

Batterie-/Oberleitungsbusse können einseitig oder zweiseitig, jeweils mit und ohne Querkupplungen, gespeist werden. Die Speiseart hat einen Einfluss auf die Verschaltung der Fahrleitung, den Netzenergiebedarf und die Investitionskosten [95]. Theoretisch sind ebenfalls Speisungen mit mehr als zwei Seiten möglich, werden aber im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter betrachtet und stellen in der späteren Planungsmethode zusätzliche Netzreserven dar.

Abbildung 2-5 zeigt eine einseitige Speisung eines Batterie-/Oberleitungsbussystems mit einem bzw. zwei Batterie-/Oberleitungsbus(sen). Die maximale Speiseweite  $l_{\text{Speise max}}$  ist abhängig von der maximal auftretenden Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_b$ , der Gleichrichter-Unterwerkspannung  $U_{\text{GUW}}$ , der betrachteten Minimal-Spannung  $U_{\text{min}}$  (siehe Abschnitt 2.3.2), des spezifischen Fahrdrabt-Widerstandes  $\rho$ , der Fahrdrabtfläche  $A_F$  und der maximalen Batterie-/Oberleitungsbus-Stromaufnahme  $I_{\text{Bus max}}$ . Mit  $R'_F = \rho / A_F = R_F / l_{\text{Speise max}}$  ergibt sich die maximale einseitige Speiseweite mit einem Batterie-/Oberleitungsbus  $l_{\text{Speise max 1,1}}$  zu:

$$l_{\text{Speise max 1,1}} = \frac{U_{\text{GUW}} - U_{\text{min}}}{2 \cdot R'_F \cdot I_{\text{Bus max}}} \quad (2.1)$$

Dabei stellen die Indizes die Anzahl der Gleichrichter-Unterwerke sowie die Anzahl der Batterie-/Oberleitungsbusse dar.

Eine einseitige Speisung mit zwei existenten Batterie-/Oberleitungsbussen resultiert in eine Speiseweite  $l_{\text{Speise max 1,2}}$ :

$$l_{\text{Speise max 1,2}} = \frac{U_{\text{GUW}} - U_B}{2 \cdot R'_F \cdot 2 \cdot I_{\text{Bus max}}} + \Delta s \quad (2.2)$$

Dabei ist  $\Delta s$  der minimale Batterie-/Oberleitungsbusabstand und  $U_B$  die Batterie-/Oberleitungsbusspannung des zweiten Batterie-/Oberleitungsbusses.

$$U_B = 2 \cdot R'_F \cdot \Delta s \cdot I_{\text{Bus max}} + U_{\text{min}} \quad (2.3)$$

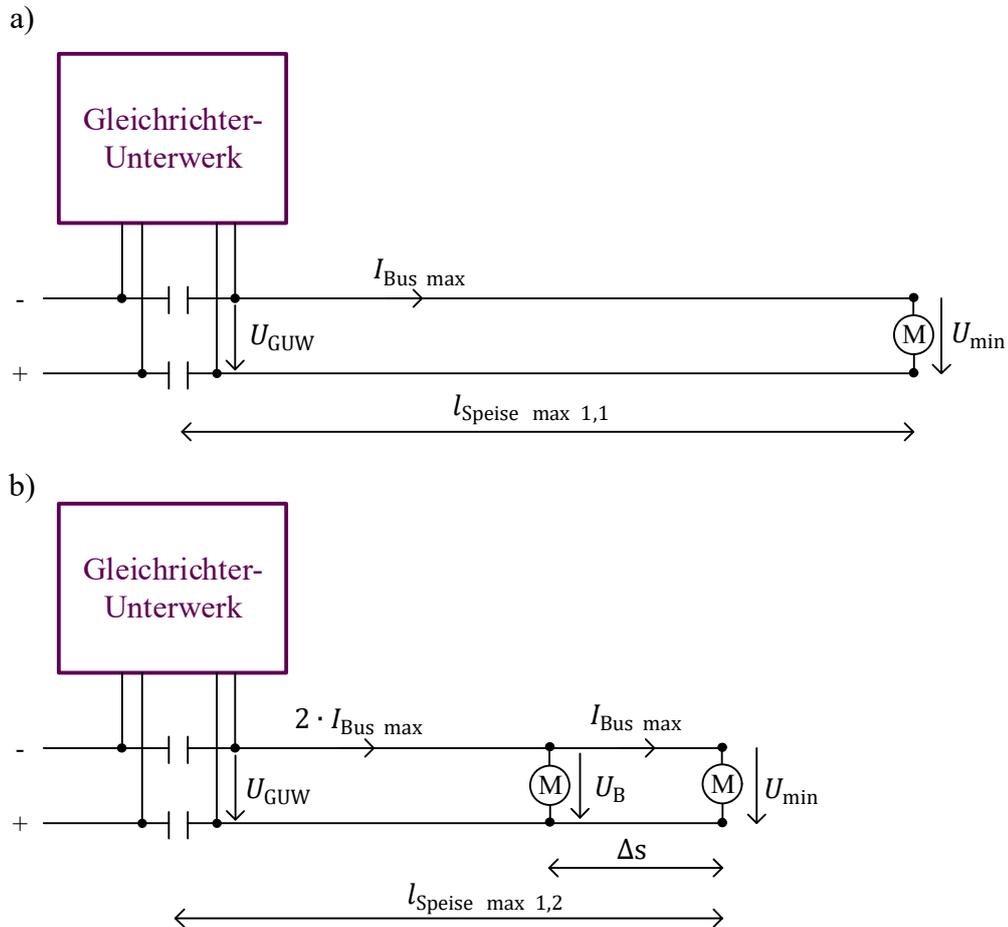


Abbildung 2-5: a) einseitige Speisung mit einem Batterie-/Oberleitungsbus  
 b) einseitige Speisung mit zwei Batterie-/Oberleitungsbussen

Eine zweiseitige Speisung mit einem Batterie-/Oberleitungsbus kann wie in Abbildung 2-6 gezeigt durch eine einseitige Speisung repräsentiert werden (Ersatzschaltbild). Die beiden Gleichrichter-Unterwerke speisen bei einem Batterie-/Oberleitungsbus, unter der Voraussetzung, dass sich dieser mittig befindet (Worstcase-Betrachtung), jeweils  $I_{\text{Bus max}}/2$  ein, sodass Gleichung 2.1 dementsprechend angepasst wird:

$$l_{\text{Speise max 2,1}} = \frac{U_{\text{GUW}} - U_{\text{min}}}{2 \cdot R'_F \cdot \frac{I_{\text{Bus max}}}{2}} \quad (2.4)$$

Bei einer zweiseitigen Speisung mit zwei Batterie-/Oberleitungsbussen versorgt jedes Gleichrichter-Unterwerk exakt einen Batterie-/Oberleitungsbus, welcher sich  $l_{\text{Speise max 2,2}} - \Delta s/2$  entfernt vom Gleichrichter-Unterwerk befindet. Es folgt:

$$l_{\text{Speise max 2,2}} = 2 \cdot \left[ \frac{U_{\text{GUW}} - U_{\text{min}}}{2 \cdot R'_F \cdot I_{\text{Bus max}}} + \frac{\Delta s}{2} \right] \quad (2.5)$$

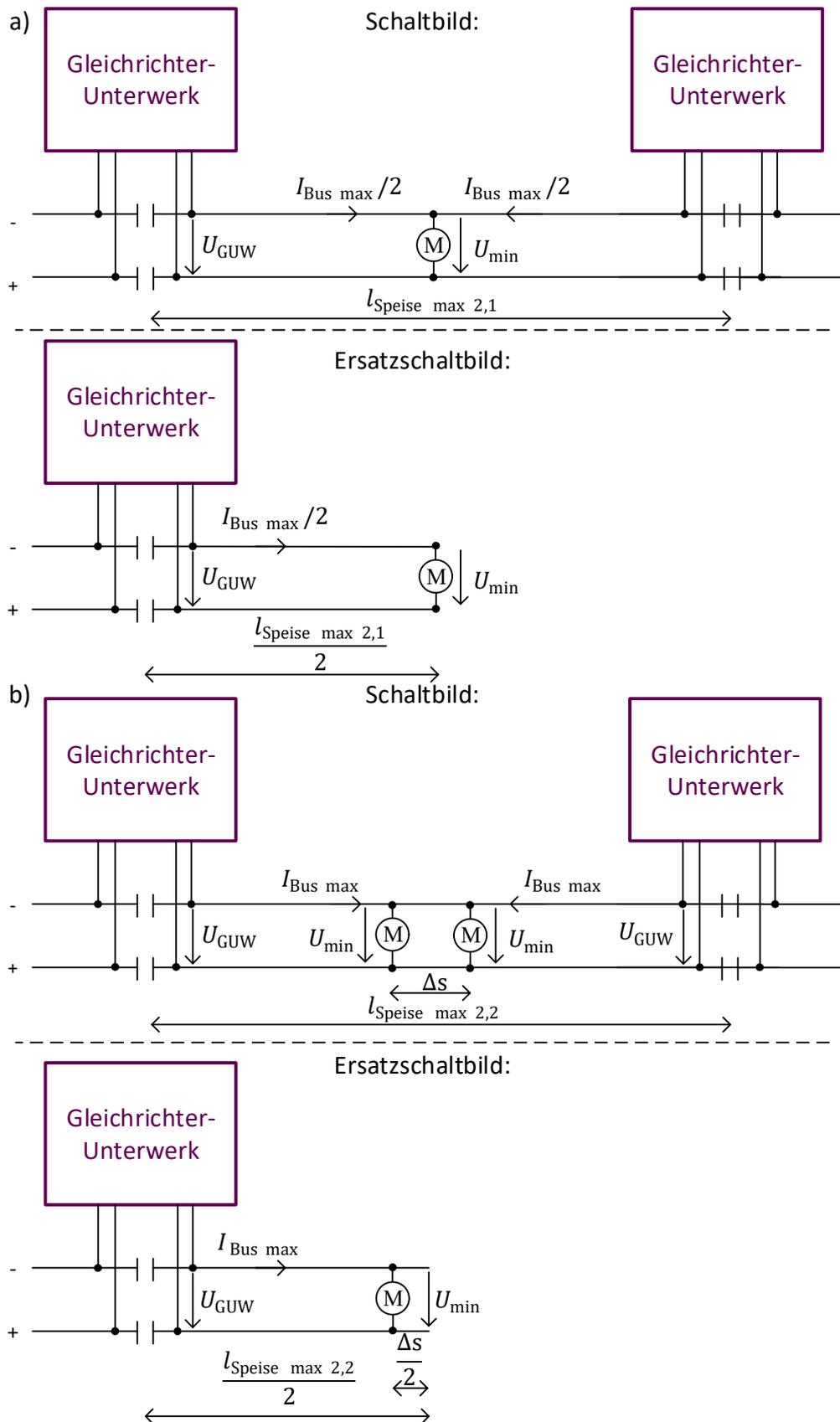


Abbildung 2-6: a) zweiseitige Speisung mit einem Batterie-/Oberleitungsbus  
b) zweiseitige Speisung mit zwei Batterie-/Oberleitungsbussen

Bei mehr als zwei Batterie-/Oberleitungsbussen findet, äquivalent zur einseitigen Speisung, eine iterative Berechnung der Batterie-/Oberleitungsbussspannungen statt, die für die Determinierung der Speiseweite obligatorisch ist. Für die Planung von Oberleitungsbussystemen findet eine simulative Determinierung der maximal auftretenden Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_b$  und des minimalen Batterie-/Oberleitungsbusabstandes  $\Delta s$  statt, sodass eine individuelle, maximale Speiseweite determiniert werden kann.

### 2.3.2 Spannungssystem

Oberleitungsbussysteme werden im Allgemeinen nicht mit Wechselspannung, sondern mit Gleichspannung betrieben, wodurch der induktive Spannungsabfall vermieden wird, aber aufwendige Gleichrichter-Unterwerke benötigt werden. Eine begrenzte Spannungshöhe (Nennspannung  $U_n < 1000 V$ ) senkt das Überschlagsrisiko sowie die potentielle Gefährdung, resultiert aber in steigenden Strömen und Fahrleitungsquerschnitten [78, 89, 96]. Nachfolgend in dieser Arbeit auftretende Spannungen werden ausschließlich – sofern nicht gesondert deklariert – als Gleichspannungen betrachtet.

Zwei Nennspannungen  $U_n = 600 V$  und  $U_n = 750 V$  werden für Oberleitungsbussysteme nach DIN EN 50163 [97] und DIN EN 50502 [98] definiert. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 2-1 erläuterten zulässigen Grenzspannungen, welche im Vergleich zu Energieversorgungsnetzen hohe Toleranzen aufweisen. Die untere Toleranz  $U_{\min}$  des Nennspannungsbereiches, bei der nicht zwischen Dauerspannung und nichtpermanenter Spannung unterschieden wird, beträgt  $U_{\min} = U_{\min 1} = U_{\min 2} = 0,67 \cdot U_n$  und soll längere Speiseweiten ermöglichen, ist aber notwendig, da Oberleitungsbusse anhand hoher Leistungsaufnahmen große Spannungsabfälle verursachen. Bedingt durch die relativ geringe Nennspannung entsteht, trotz hoher Spannungstoleranz, eine geringe Entfernung zwischen den Gleichrichter-Unterwerken. Die höchste Dauerspannung  $U_{\max 1}$  beträgt  $U_{\max 1} = 1,2 \cdot U_n$  und beschreibt den höchsten Wert der Spannung, der mit unbestimmter Dauer auftreten kann. Die höchste nichtpermanente Spannung  $U_{\max 2}$  beträgt  $U_{\max 2} = 1,33 \cdot U_n$  und ist als höchster Spannungswert definiert, der für eine begrenzte Zeit auftreten kann. Die Spannung zwischen  $U_{\max 1}$  und  $U_{\max 2}$  darf eine Dauer von fünf Minuten nicht überschreiten [98]. Sie wird benötigt, um Rekuperationsenergie eines bremsenden Oberleitungsbusses anderen Oberleitungsbussen im Oberleitungsbussystem bereitzustellen [78, 96].

**Tabelle 2-1: Nennspannungen und ihre zulässigen Grenzen von Oberleitungsbussystemen nach DIN EN 50163 und DIN EN 50124 (Auszug)**

| Niedrigste nicht-permanente Spannung<br>$U_{\min 2}$ | Niedrigste Dauerspannung<br>$U_{\min 1}$ | Nennspannung<br>$U_n$ | Höchste Dauerspannung<br>$U_{\max 1}$ | Höchste nicht-permanente Spannung<br>$U_{\max 2}$ |
|--|--|-----------------------|---------------------------------------|---|
| 400 V  | 400 V                                    | 600 V                 | 720 V                                 | 800 V   |
| 500 V  | 500 V                                    | 750 V                 | 900 V                                 | 1000 V  |

Historisch bedingt werden viele Oberleitungsbussysteme mit einer Nennspannung von  $U_n = 600 \text{ V}$  betrieben, jedoch bietet eine Nennspannung von  $U_n = 750 \text{ V}$  Vorteile hinsichtlich Speiseweiten, Kurzschlusserkennbarkeit und Verringerung thermischer Verluste. Dies spiegelt sich auch in der Umstellung der Nennspannung vieler Verkehrsbetriebe von  $U_n = 600 \text{ V}$  auf  $U_n = 750 \text{ V}$  wieder [78].

### 2.3.3 Speisefaktor

Um die im Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Speiseweiten zu maximieren und im selben Zuge die Traktions- und Verlustströme zu senken, wird die Gleichrichter-Unterwerksspannung erhöht. Der Speisefaktor  $f_{\text{Speise}}$  beschreibt diesen Sachverhalt und gibt die Spannung am Gleichrichter-Unterwerk  $U_{\text{GUW}}$  in Abhängigkeit der Nennspannung an.

$$U_{\text{GUW}} = U_n + f_{\text{Speise}} \cdot (U_{\max 1} - U_n) \quad (2.6)$$

Da die Gleichrichter-Unterwerksspannung nicht die in Tabelle 2-1 beschriebene höchste Dauerspannung überschreiten darf, folgen für den Speisefaktor nachfolgende Grenzen [97]:

$$0 \leq f_{\text{Speise}} \leq 1 \quad (2.7)$$

### 2.3.4 Gleichrichter-Unterwerke

Gleichrichter-Unterwerke stellen dem Oberleitungsbussystem über Speiseleitungen elektrische Energie zur Verfügung, indem sie Dreiphasenwechselspannung aus dem Mittelspannungsnetz (10 kV bis 30 kV) in Gleichspannung (600 V oder 750 V) umwandeln. Dafür sind zwei Hauptkomponenten essenziell, wie in Abbildung 2-4 dargestellt. Der Transformator, welcher zunächst die Dreiphasenwechselspannung herabsetzt sowie der Gleichrichter, welcher anschließend die Spannung gleichrichtet. Der 12-pulsige Gleichrichter besteht aus einer Gleichrichterschaltung, die zwei parallele B6 Dioden-Brücken aufweist [78, 97, 99].

Die zulässigen Toleranzen (siehe Tabelle 2-1) ausnutzend, erfolgt eine Einspeisung in das Oberleitungsnetz 10 % bis 20 % oberhalb der Nennspannung. Anhand erhöhter Gleichrichter-Unterwerksspannung werden die entstehenden Ströme und folglich auch Verluste verringert [78]. Rekuperierende Oberleitungsbusse speisen, durch Rückgewinnung der Bremsenergie mittels

einer elektromotorischen Bremse, elektrische Energie zurück in das Oberleitungsnetz. Bei ausreichend vielen gleichzeitig fahrenden Oberleitungsbussen findet der rekuperierende Oberleitungsbus einen Abnehmer seiner rückgewonnenen Bremsenergie. Ebenfalls werden Widerstandsbremsen eingesetzt, welche Abwärme erzeugen, die zur Beheizung des Oberleitungsbusinnenraums eingesetzt wird. Findet sich situationsbedingt kein Abnehmer der rückgewonnenen Bremsenergie, kann die überschüssige elektrische Energie nicht in das vorlagerte Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden, da die Gleichrichter-Unterwerke in der Regel nur unidirektionale Stromflüsse in das Oberleitungsnetz ermöglichen. In diesem Fall wechseln die Oberleitungsbusse von der Rekuperationsbremse (bspw. elektromotorische Bremse) in eine Widerstandsbremse, sodass der anhand des Bremsvorganges erzeugte Strom nicht genutzt wird, sondern über Bremswiderstände in Wärme umgewandelt wird.

### **2.3.5 Speiseleitung**

Die Speisung der Fahrleitung erfolgt über die am Gleichrichter-Unterwerk angeschlossene Speiseleitung (siehe Abbildung 2-4) und ist definiert als eine Verbindungsleitung zwischen Schaltanlage und Fahrleitung, die an eigenen Masten, Oberleitungsmasten oder sonstigen Stützpunkten als Freileitung oder Kabel verlegt wird [98].

### **2.3.6 Fahrleitung**

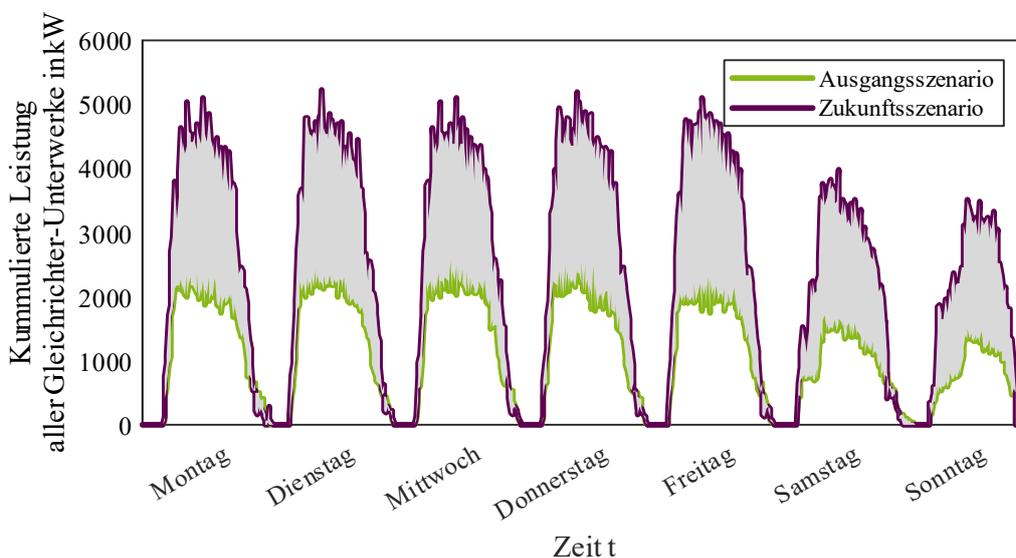
Die Fahrleitung ist ein Leitersystem zur elektrischen Energieversorgung von Triebfahrzeugen über Stromabnehmereinrichtungen [97]. Das Fahrleitungsnetz eines Oberleitungsbussystems besteht aus zwei parallelen Fahrdrähten, die gegeneinander und gegen Erde isoliert sind. Neben der Selektivität im Fehlerfall, welche möglichst geringe Netzabschaltungen zur Folge hat, soll das Fahrleitungsnetz minimale Übertragungsverluste aufweisen. Die minimalen Übertragungsverluste werden durch das Parallelschalten von Leitern gleicher Polarität – sogenannte Querkupplungen (siehe Abbildung 2-4) – erreicht und bilden mit der Selektivität konkurrierende Ziele [78].

## **2.4 Einfluss neuartiger Systemkomponenten**

Oberleitungsbussysteme bedienen sich der Gleichstromtechnik zur Energie-Verteilung. DC-Ladesäulen sowie Photovoltaikanlagen können folglich effizient mittels Gleichspannungswandler in das Oberleitungsbussystem integriert werden. Die Integration von Batterie-Oberleitungsbussen bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich, resultierend in einer reduzierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur (vgl. Kapitel 5). Zusätzlich können bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke den Systemwirkungsgrad steigern, indem überschüssige elektrische Energie (durch integrierte Photovoltaikanlagen oder bremsende Batterie-/Oberleitungsbusse) in das vorlagerte Mittelspannungsnetz zurückgespeist werden kann. Der Einfluss der Integration dieser

aufgeführten Komponenten (bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke, Photovoltaikanlagen, DC-Ladesäulen (Elektromobilität) sowie Batterie-Oberleitungsbusse) wird folglich untersucht.

Für die nachfolgenden Abbildungen wird die im Abschnitt 3.3 vorgestellte Oberleitungsbussystem-Simulation verwendet. Die experimentelle Integration neuartiger Systemkomponenten in Oberleitungsbussystemen führt zu einer Veränderung der Nutzungsszenarien bestehender Oberleitungsbussysteme. Dabei ist das Nutzungsszenario abhängig von den integrierten Systemkomponenten sowie vom Oberleitungsbussystem selbst. Das Ziel der Dekarbonisierung forciert einen signifikanten Lastanstieg in bestehenden Oberleitungsbussystemen, bedingt durch die Integration von beispielsweise Batterie-Oberleitungsbussen oder Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Abbildung 2-7 visualisiert einen simulierten Szenarienvergleich mit einem einwöchigen Simulationshorizont des Solinger Oberleitungsbussystems, in dem die Leistungen aller Gleichrichter-Unterwerke aufsummiert wurden. Die Ausgangssituation beinhaltet 50 Oberleitungsbusse sowie 50 weitere Dieselse, um den ÖPNV zu bedienen, während im Zukunftsszenario Oberleitungs- und Dieselse durch Batterie-Oberleitungsbusse substituiert werden. Zusätzlich werden im Zukunftsszenario an das Oberleitungssystem 10 angeschlossene DC-Ladesäulen für Elektrofahrzeuge mit einer Ladeleistung von 50 kW sowie 17 Photovoltaikanlagen (summierte Peakleistung  $P = 880$  kW) und die Integration von bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerke berücksichtigt.



**Abbildung 2-7: Kombiniertes Einfluss neuartiger Systemkomponenten in einem Oberleitungsbussystem**

Die Verdopplung der fahrenden Batterie-/Oberleitungsbusse im Oberleitungsbussystem resultiert in einer Verdopplung der kumulierten Leistung aller Gleichrichter-Unterwerke. Durch den auftretenden Lastanstieg ist eine Betrachtung der *Planungs-* oder *Steuerungsebene* obligatorisch, um individuelle Lösungen zu entwickeln und Kosten zu minimieren.

### 2.4.1 Bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke

Neuartige bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke ermöglichen einen Stromfluss vom Oberleitungsnetz zurück in das Mittelspannungsnetz, wodurch die theoretische Energierückgewinnungsquote eines Oberleitungsbussystems auf 100 % gesteigert werden kann. Somit kann rekuperierende Bremsenergie, die im Oberleitungsabschnitt keinen Abnehmer findet, in das vorgelagerte Stromnetz zurückgespeist werden [99].

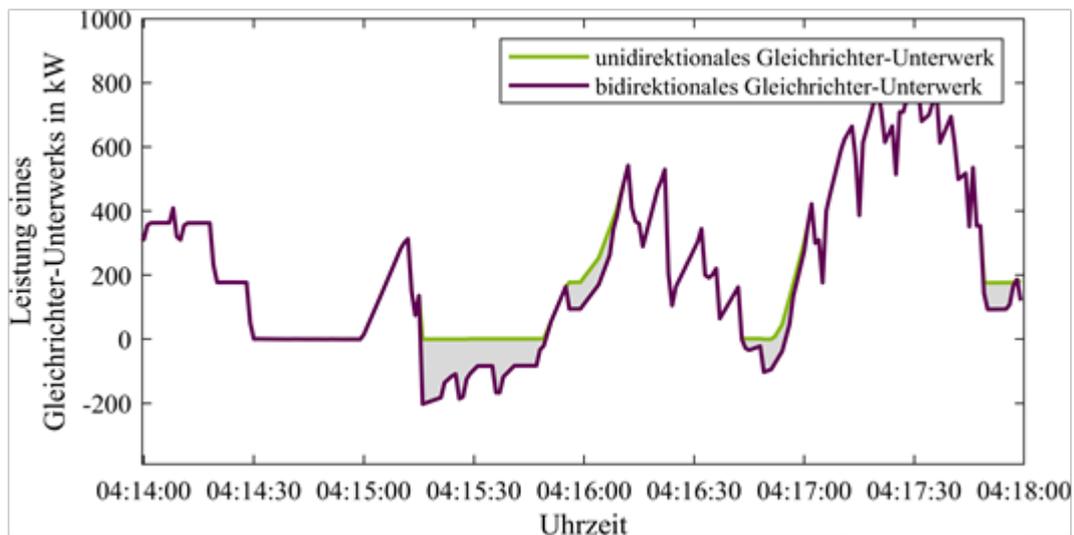


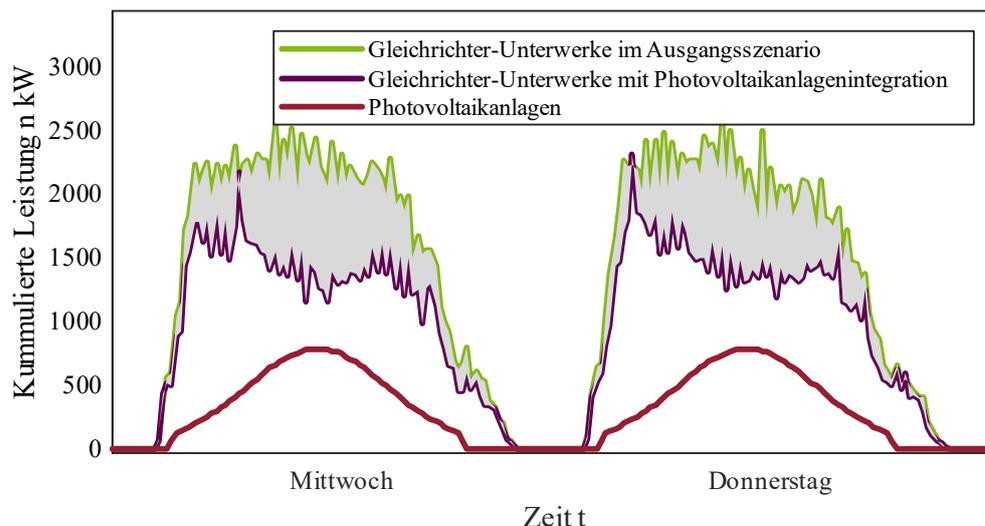
Abbildung 2-8: Auswirkungen einer Integration von bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerken in einem Oberleitungsbussystem

Abbildung 2-8 zeigt einen simulativen Vergleich eines Oberleitungsbussystems mit unidirektionalen und bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerken, unmittelbar nach Betriebsstart um 04:11 Uhr. Nach Betriebsstart sowie vor Betriebsende eines Tages treten vermehrt Stromflüsse in das vorgelagerte Stromnetz auf, da sich nur eine geringe Anzahl von Oberleitungsbussen im Oberleitungsbussystem befindet und die Wahrscheinlichkeit eines Abnehmers der erzeugten elektrischen Energie sinkt.

Für das simulierte Szenario (Solinger Oberleitungsbussystem), reduzieren sich die Systemverluste des Oberleitungsbussystems, welche sich aus den Übertragungsverlusten sowie aus den Oberleitungsbusverlusten zusammensetzen, im Vergleich zur identischen Simulation ohne bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke um 3,63 %. Während die Oberleitungsbusverluste angesichts der bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerke auf 0 % sinken, steigen die Übertragungsverluste, begründet durch einen Stromfluss in das vorgelagerte Stromnetz bei Nichtbedarf der erzeugten Energie im Oberleitungsbussystem, um 2,89 % an. Die Oberleitungsbusverluste fallen aufgrund hoher Anzahl fahrender Oberleitungsbusse im Oberleitungsbussystem anteilmäßig mit 6,33 % im Vergleich zur identischen Simulation ohne bidirektionale Gleichrichter-Unterwerke gering aus.

### 2.4.2 Photovoltaikanlagen

Die Integration von Photovoltaikanlagen in ein Oberleitungsbussystem wird über Gleichspannungswandler realisiert und reduziert die beanspruchte Leistung der Gleichrichter-Unterwerke (siehe Abbildung 2-9). Die Photovoltaikanlagenintegration besitzt den Vorteil, dass die erzeugte elektrische Energie der Photovoltaikanlagen gut mit den Oberleitungsbusfahrzeiten korreliert. Demzufolge resultiert eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass fahrende Oberleitungsbusse als direkte Abnehmer erzeugter elektrischer Photovoltaikanlagenenergie agieren.

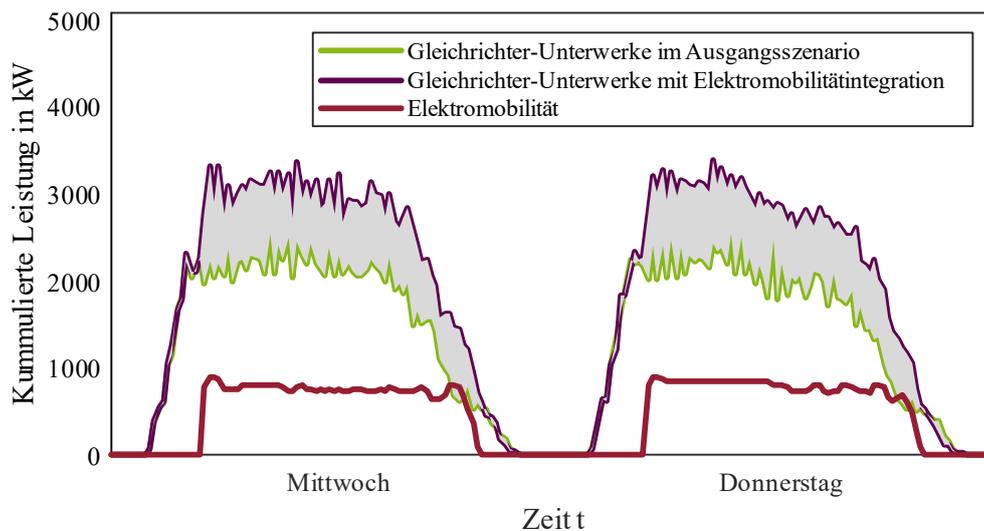


**Abbildung 2-9:** Auswirkungen einer Integration von 17 Photovoltaikanlagen (summierte Peakleistung  $P = 880 \text{ kW}$ ) im Solinger Oberleitungsbussystem

Jedoch ist eine Oberleitungsbussnetzanalyse der beanspruchten Energien aller Lasten im Oberleitungsbussystem sowie der erzeugten Energien der zu integrierenden Photovoltaikanlagen vor Integration jener durchzuführen, sollten keine bidirektionalen Gleichrichter-Unterwerke in den betroffenen Netzabschnitten vorhanden sein, die die erzeugte elektrische Energie bei Nichtbedarf in das vorgelagerte Mittelspannungsnetz zurückspeisen können.

### 2.4.3 Elektromobilität

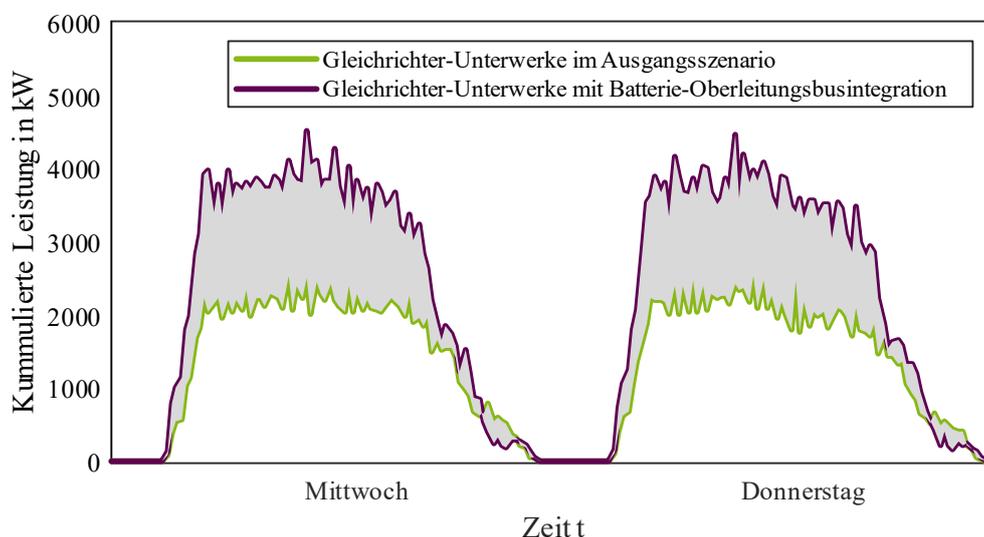
Eine Elektromobilitätintegration in ein Oberleitungsbussystem bedeutet eine direkte Integration von Ladestationen für Elektrofahrzeuge über Gleichspannungswandler oder Wechselrichter und resultiert in einer Lastzunahme (Abbildung 2-10). Zugrundeliegend sind öffentliche Ladestationen für Elektrofahrzeuge, die hauptsächlich tagsüber in Anspruch genommen werden. Somit korreliert diese zusätzliche Leistungsentnahme aus dem Oberleitungsbussystem mit den Oberleitungsbusfahrzeiten, wodurch das Oberleitungsnetz stärker belastet wird.



**Abbildung 2-10:** Auswirkungen einer Elektromobilitätsintegration (20 Ladesäulen für Elektrofahrzeuge à  $P = 50 \text{ kW}$ ) im Solinger Oberleitungsbussystem

Um eine erfolgreiche Netzintegration von Ladestationen für Elektrofahrzeuge zu ermöglichen, ist im Voraus eine Oberleitungsbusnetzanalyse durchzuführen, ob und wie umfassend die Integration der Elektromobilität im Oberleitungsbussystem ausfallen darf. Dabei sind zukünftige Entwicklungen, primär die Integration von Batterie-Oberleitungsbussen, zu respizieren.

#### 2.4.4 Batterie-Oberleitungsbusse



**Abbildung 2-11:** Auswirkungen einer Integration von Batterie-Oberleitungsbussen im Solinger Oberleitungsbussystem  
Ausgangsszenario: ca. 50 Oberleitungsbusse und ca. 50 Dieselbusse  
Batterie-Oberleitungsbusintegration: ca. 100 Batterie-Oberleitungsbusse

Eine Substitution von Dieselbussen durch Batterie-Oberleitungsbusse führt zwangsläufig zu einem Lastanstieg im Oberleitungsbussystem. Abbildung 2-11 zeigt eine Verdopplung der simulierten kumulierten Leistung aller Gleichrichter-Unterwerke in einem

Oberleitungsbussystem, begründet durch eine Verdopplung der Busse mit elektrischem Hauptantrieb. Konkret beinhaltet das Ausgangsszenario ca. 50 Oberleitungsbusse sowie 50. Dieselsebusse, welche jedoch keine Auswirkungen auf das Oberleitungsbussystem besitzen. Nach erfolgreicher Substitution aller Oberleitungs- und Dieselsebusse durch Batterie-Oberleitungsbusse enthält das Szenario nach Batterie-Oberleitungsbusintegration ca. 100 Batterie-Oberleitungsbusse. Eine Batterie-Oberleitungsbusintegration geht ebenfalls mit einer Oberleitungsbusnetzanalyse einher, um die Systemsicherheit und Systemstabilität zu gewährleisten.

## 2.5 Potential der Optimierungsebenen eines Oberleitungsbussystems

Die beiden vorgestellten divergenten Optimierungsebenen (*Betriebs-* und *Planungsebene*) agieren von unterschiedlichen Ausgangspunkten aus und betrachten unterschiedliche Zeithorizonte. Während die *Planungsebene* bereits vor der Fahrt betrachtet werden muss und einen langfristigen Zeithorizont (i. d. R. mehrere Jahre) betrachtet, wird mittels der *Betriebsebene* das maximale Potential der bestehenden Oberleitungsbussystem-Infrastruktur ermittelt. Die *Betriebsebene* umfasst im Gegensatz zur *Planungsebene* einen kurzfristigen Horizont (i. d. R. einige Stunden bis Monate). Daraus ergeben sich unterschiedliche Anwendungsszenarien. Während die *Planungsebene* sowohl bei Green-Field<sup>14</sup>- als auch bei Brown-Field-Szenarien<sup>15</sup> zur Anwendung kommt, wird mittels der *Betriebsebene* versucht kostenintensive Infrastrukturerweiterungen zu vermeiden. Die zunehmende Elektrifizierung des ÖPNV sorgt für einen stetigen Zuwachs des elektrischen Energiebedarfes. Als Folge dessen entstehen bei Nichtberücksichtigung der *Planungsebene* – wie in [48] detailliert dargestellt – kritische Netzsituationen. Ein intelligentes Netzleitsystem kann bis zu einem bestimmten Umfang diesen Situationen vorbeugen. Dafür ist neben einer Netzzustandsprognose ebenfalls eine Netzzustandsregelung erforderlich. Bei einem ausgeschöpften Potential eines intelligenten Netzleitsystems bedarf es wiederum der *Planungsebene*, um die notwendigen Infrastrukturerweiterungsinvestitionskosten zu minimieren.

---

<sup>14</sup> Green-Field-Szenario: Neuinstallation eines Oberleitungsbussystems, durch (Teil-)Umstellung der bisherigen Busflotte auf Batterie-/Oberleitungsbusse (siehe Abschnitt 5.2)

<sup>15</sup> Brown-Field-Szenario: Erweiterung eines Oberleitungsbussystems (Oberleitungsbusse und/oder Batterie-Oberleitungsbusse sind bereits Teil der Busflotte), durch Elektrifizierung weiterer Buslinien (siehe Abschnitt 5.2)

### 3 Intelligentes Netzleitsystem für Oberleitungsbusse

Die Einführung eines intelligenten Netzleitsystems bedient die im Abschnitt 1.1 erläuterte Optimierungsebene der intelligenten fahrzeugübergreifenden Steuerung und lässt sich in drei Funktionsbausteine unterteilen. Neben der Netzzustandsidentifikation (Abschnitt 3.4) und der Netzzustandsprognose (Abschnitt 3.5), welche im weiteren Verlauf dieser Arbeit ausführlich thematisiert werden, wird auf den nachgelagerten Funktionsbaustein der prädiktiven Netzzustandsregelung nur rudimentär im Abschnitt 3.6 eingegangen, da dieser umfassend in [48] diskutiert wird. Demzufolge fungieren die in dieser Arbeit vorgestellten Funktionsbausteine (Netzzustandsidentifikation und –prognose) als Grundlage der prädiktiven Netzzustandsregelung. Als Basis dafür fungiert die im Abschnitt 3.3 vorgestellte Oberleitungsbussystem-Simulation, nachdem Abschnitt 3.1 das übergeordnete Gesamtkonzept des Netzleitsystems einführt. Abschnitt 3.2 zeigt zusätzlich die grafische Benutzeroberfläche des Netzleitsystems.

#### 3.1 Gesamtkonzept

Abbildung 3-2 stellt das übergeordnete Gesamtkonzept des intelligenten Netzleitsystems vor. Für die Funktionsweise des intelligenten Netzleitsystems ist eine einmalige Initialisierung sowie das Empfangen von Messwerten (i. d. R. Leistung, Spannung und Strom aller Oberleitungsbussystemkomponenten sowie die Positionen von Batterie-/Oberleitungsbussen, siehe Abschnitt 3.4.2) notwendig, welche initial und anschließend repetitiv eingelesen werden.

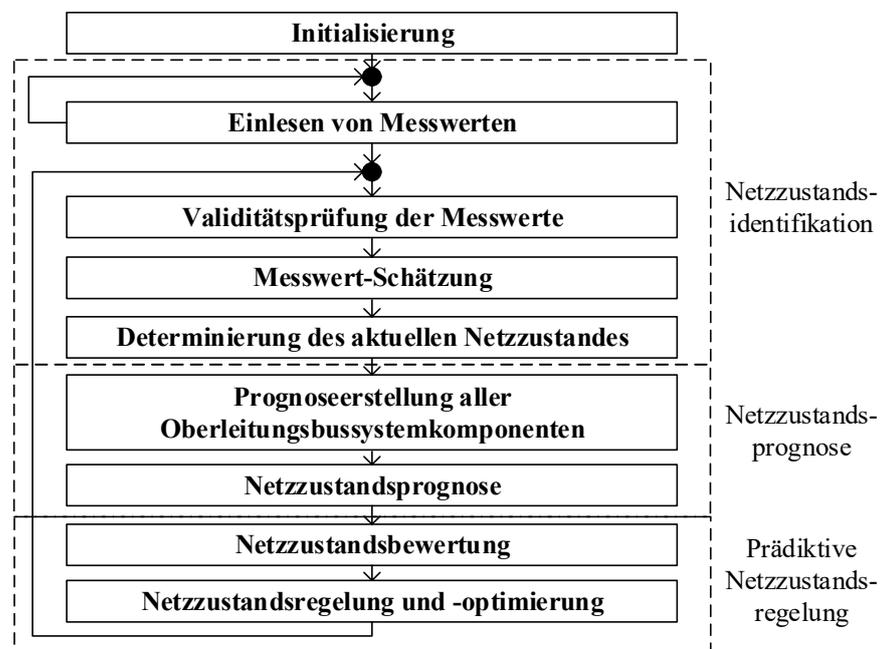


Abbildung 3-1: Gesamtkonzept des intelligenten Netzleitsystems

Konsekutiv findet eine Validitätsprüfung dieser Messwerte statt, sodass valide Messwerte akkumuliert und nicht valide Messwerte geschätzt werden. Anhand der validen und ebenfalls

geschätzten Werte wird der aktuelle Netzzustand des Oberleitungsbussystems mittels einer Leistungsflussberechnung determiniert. Für die in [48] behandelte aufbauende prädiktive Regelung ist zudem eine Netzzustandsprognose erforderlich, da das Oberleitungsbussystem von einer großen Dynamik geprägt ist. Batterie-/Oberleitungsbusse stellen im Oberleitungsbussystem bewegliche Lasten dar, welche innerhalb kürzester Zeit zwischen maximaler Leistungsaufnahme und Rückspeisung durch rekuperatives Bremsen in das Oberleitungsbussystem wechseln können. Neben den batterie-/Oberleitungsbussen komplettieren Photovoltaikanlagen sowie Ladesäulen für Elektrofahrzeuge die Oberleitungsbussystem-Komponenten. Demgemäß findet eine Prognoseerstellung aller Oberleitungsbussystem-Komponenten statt, sodass ausgehend aus diesen Prognosedaten eine Netzzustandsprognose des gesamten Oberleitungsbussystems erstellt wird. Weiterführend wird der ermittelte Netzzustand in [48] bewertet und prädiktiv auf diesen bewerteten Netzzustand geregelt, um Netzengpässe zu vermeiden und einen optimierten Netzzustand anzustreben. Es dienen verschiedene Ziele (kostenoptimiert, netzdienlich oder energieeffizient) zur Beschreibung und Determinierung eines optimierten Netzzustandes. Anschließend übermittelt die prädiktive Netzzustandsregelung die generierten Aktorbefehle an die entsprechenden Aktoren im Oberleitungsbussystem. Aktoren stellen dabei das Gegenteil von Sensoren (Bauteil zur Erfassung qualitativer Messgrößen) dar, indem diese bei Regelungsvorgängen Signale in Aktorbefehle umsetzen. Damit handeln Aktoren als Stellglieder in einem Regelkreis.

Während anhaltend weitere Messwerte aufgenommen werden, finden – nach Fertigstellung der Netzzustandsprognose und -regelung – fortlaufend die zuvor erwähnten Schritte erneut, mit dem Ziel einer aktualisierten Netzzustandsprognose und -regelung, statt, um erneute Aktorbefehle auszusenden.

### 3.2 Grafische Benutzeroberfläche

Als Beobachtungsinstrument wird im Folgenden eine grafische Benutzeroberfläche für das Netzleitsystem für Oberleitungsbusse eingeführt (siehe Abbildung 3-2). Neben einem Netzabbild (*hier*: DC-Oberleitungsbussnetz Solingen) werden ebenfalls die fahrenden batterie-/Oberleitungsbusse als schwarze Punkte dargestellt. Zusätzlich stellen die blauen Punkte die Gleichrichter-Unterwerke dar. Durch die Auswahl einer Oberleitungsbussystem-Komponente (roter Punkt) werden empfangene Messwerte und Prognosewerte (Leistung oder Spannung) im Diagramm angezeigt. Somit kann das Netzleitsystem Messwerte in Echtzeit abbilden. Außerdem wird der aktuelle Status im rechten Fenster angezeigt. Dieser dient als Indikator, um den momentanen Arbeitsauftrag gemäß dem beschriebenen Gesamtkonzept (z. B. Prognoseerstellung aller Oberleitungsbussystemkomponenten) zu identifizieren.

Während die prädiktive Netzzustandsregelung die generierten Aktorbefehle an die entsprechenden Aktoren sendet, ist jedoch kein direkter Eingriff durch das Schaltpersonal möglich.

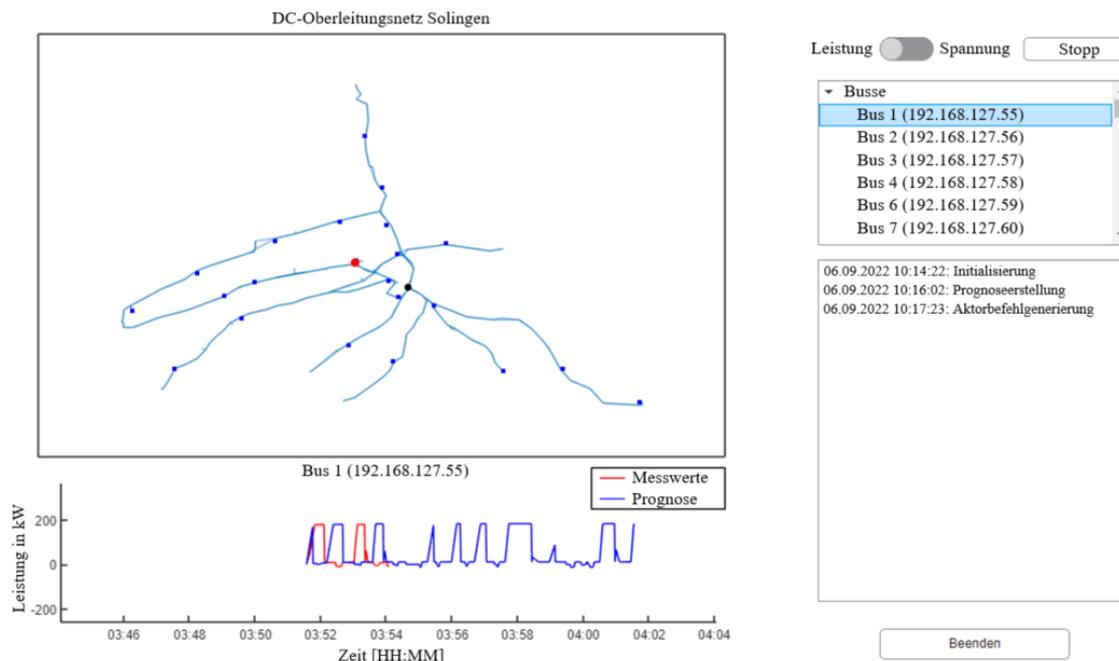


Abbildung 3-2: Grafische Benutzeroberfläche des intelligenten Netzleitsystems für Oberleitungsbusse

### 3.3 Oberleitungsbussystem-Simulation

Für die Erstellung einer Netzzustandsprognose eines Oberleitungsbussystems (Abschnitt 3.5) ist eine Oberleitungsbussystem-Simulation obligatorisch. Abschnitt 3.3.1 führt die für die Prognoseerstellung verwendete Simulation, welche in [19] thematisiert wird, auf und erläutert die grundlegende Funktionsweise. Anschließend (Abschnitt 3.3.2) können mittels dieser Simulation Pseudo-Messwerte für das nachfolgende intelligente Netzleitsystem generiert werden.

#### 3.3.1 Verwendete Simulation

Die verwendete Oberleitungsbussystem-Simulation aus [19] wird in Abbildung 3-3 als Blockdiagramm dargestellt. Sie besteht aus vier Hauptblöcken, welche in der Abbildung unterschiedlich eingefärbt sind.

Die elektrische Komponente der Oberleitungsbussystem-Simulation (violetter Hauptblock) beinhaltet das elektrische Netz mitsamt den zugehörigen Leistungsflussberechnungen. Das elektrische Netz umspannt das erforderliche Oberleitungsbussystem (DC) und kann optional das vorgelagerte Mittelspannungsnetz (AC) in den Berechnungen – mittels einer kombinierten AC-DC-Leistungsflussberechnung – berücksichtigen. Dafür sind die entsprechenden Knoten- und Zweig-Informationen sowohl des AC- als auch des DC-Netzes notwendig. Zusätzlich werden Informationen über stationär angebundene Lasten und Einspeiser (nicht Batterie-/Oberleitungsbusse) benötigt, welche im Oberleitungsbussystem explizit als PV-Anlagen sowie die Elektromobilität erwähnt werden. Die Bindeglieder der elektrischen Netze stellen die Gleichrichter-Unterwerke dar.

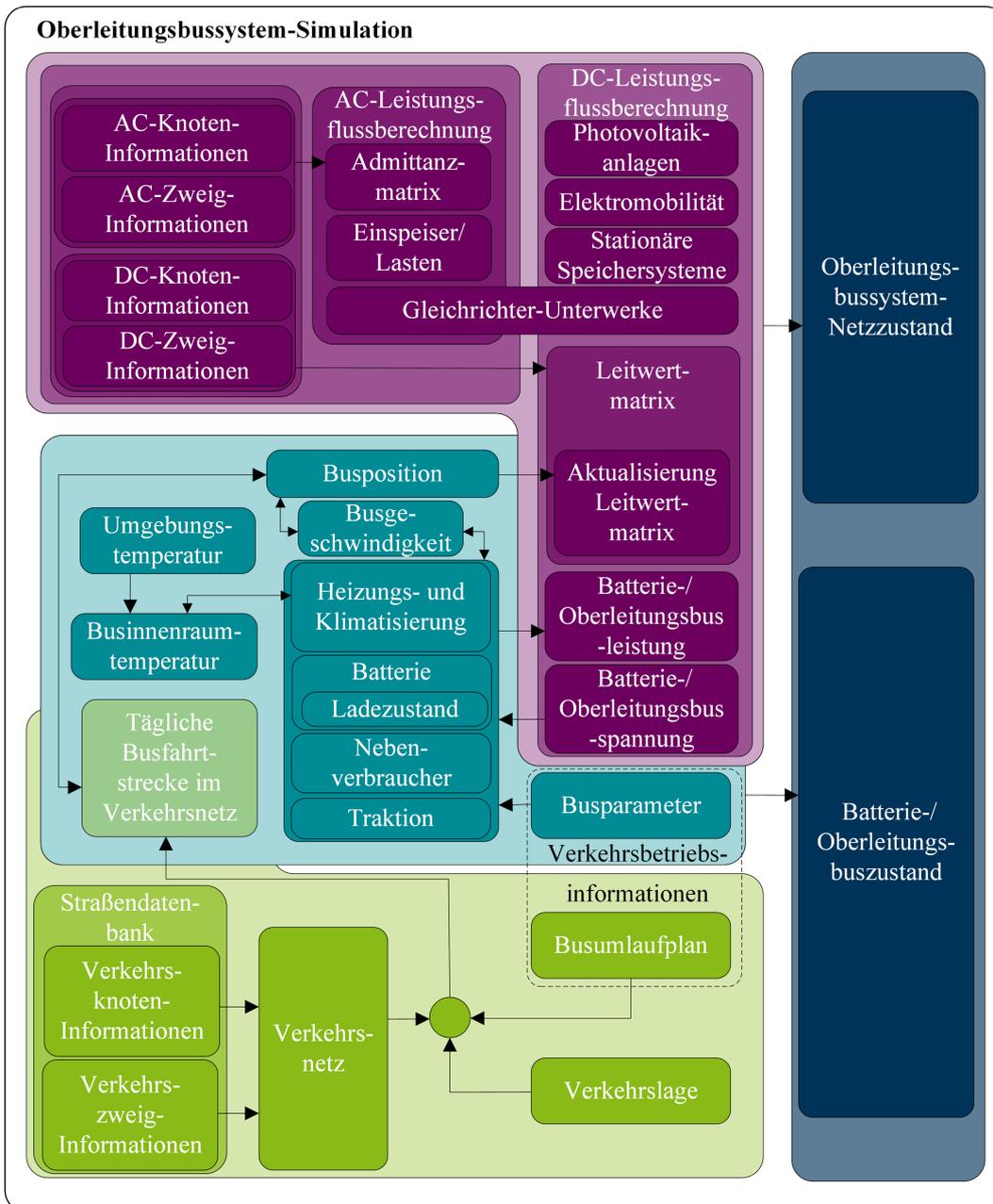


Abbildung 3-3: Blockdiagramm der verwendeten Oberleitungsbussystem-Simulation aus [19]

Verkehrsdaten (grüner Hauptblock) beinhalten eine detaillierte Straßendatenbank, welche sich wiederum aus Informationen über Verkehrsknoten und -zweige zusammensetzt, resultierend in einem Verkehrsnetz. Das Verkehrsnetz stellt einen digitalen Zwilling des Straßennetzes dar und beinhaltet Informationen über die topografischen Gegebenheiten. Der Busumlaufplan (Teil der Verkehrsbetriebsinformationen) sowie die aktuelle Verkehrslage komplettieren die Verkehrsdaten.

Der busspezifische Bestandteil der Oberleitungsbussystem-Simulation (hellblauer Hauptblock) ist über die tägliche Busfahrtstrecke mit der Verkehrsnetz-Simulation verknüpft, welche primär eine Kombination aus Verkehrsnetz, Busumlaufplan und Verkehrslage darstellt. Über den zweiten Teil der Verkehrsbetriebsinformationen – die Busparameter – wird eine Busbewegung

gemäß der täglichen Busfahrtstrecke im Verkehrsnetz unter Einhaltung aller physikalischen Gesetze (u. a. Haftreibung und Strömungswiderstand) und spezifischen Eigenschaften der Busse berechnet. Die Berechnung der mechanischen Traktionsleistung erfolgt über drei unterschiedliche Fahrmodi (Beschleunigung ( $a_{\text{BUS}} > 0$ ), konstante Geschwindigkeit ( $a_{\text{BUS}} = 0$ ) und Bremsen ( $a_{\text{BUS}} < 0$ )). Abhängig von der regionalen Umgebungstemperatur wird zudem mittels des Energieerhaltungssatzes die benötigte Wärmemenge und die resultierende Businnenraumtemperatur zeitdiskret berechnet. Darauf aufbauend lässt sich die entsprechende elektrische Traktionsleistung bestimmen. Zusätzlich wird eine Leistung für etwaige Nebenverbraucher bestimmt. Bei der Berechnung der Traktionsleistung wird im selben Zuge die zugehörige Busgeschwindigkeit berechnet und die aktualisierte Position im Verkehrsnetz erfasst. Die Position im Verkehrsnetz gibt Auskunft darüber, ob sich der Bus unterhalb einer Oberleitung befindet, sodass entsprechend der Batteriebetrieb ein- bzw. ausgeschaltet ist. Bei eingeschalteten Batteriebetrieb wird ein aktueller Batterieladezustand determiniert, resultierend in einem umfassenden Batterie-/Oberleitungsbusszustand (dunkelblau). Dieser beinhaltet neben den Busparametern Informationen über die beanspruchten Leistungen der unterschiedlichen Buskomponenten sowie die Buspositionen, -geschwindigkeiten und -innenraumtemperaturen.

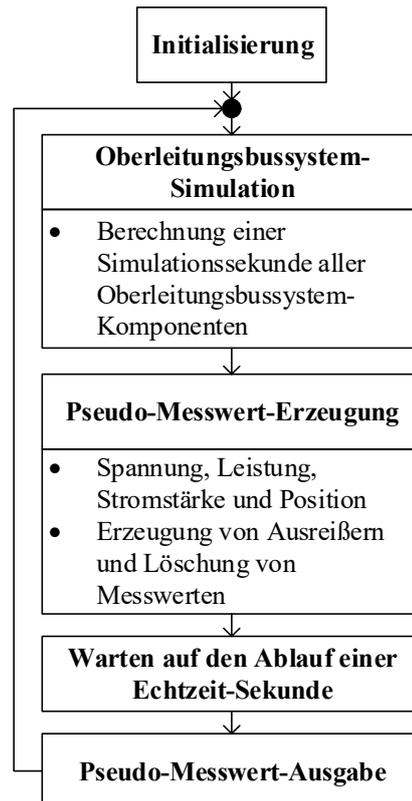
Durch eine Verknüpfung des elektrischen Netzes mit dem Verkehrsnetz werden die Buspositionen und -leistungen, vorausgesetzt sie befinden sich unterhalb einer Oberleitung, vom Verkehrsnetz in das elektrische Netz übertragen. Elektrische Zweige werden beim Befahren eines Batterie-/Oberleitungsbusses in zwei separate elektrische Zweige aufgetrennt, wobei der Batterie-/Oberleitungsbuss einen zusätzlichen temporären *beweglichen* elektrischen Knoten darstellt. Wird ein elektrischer Zweig von mehreren Batterie-/Oberleitungsbussen simultan befahren, so resultiert eine mehrfache Aufspaltung des entsprechenden elektrischen Zweiges. Durch die Mobilität der Batterie-/Oberleitungsbusse wird für jeden simulierten Zeitschritt die Leitwertmatrix des Oberleitungsbussystems in Abhängigkeit der Buspositionen aktualisiert, resultierend mittels einer Leistungsflussberechnung in einem Oberleitungsbussystem-Netzstatus (dunkelblauer Hauptblock). Dieser umfasst alle Knotenspannungen und Zweigströme und die resultierenden Leistungen aller Gleichrichter-Unterwerke, Busse und weiteren Systemkomponenten.

Eine detaillierte Ausführung der Informationen, welche für die vorgestellte Planungsmethode obligatorisch sind, beschreibt die Datengrundlage im Abschnitt 5.3.

### 3.3.2 Adaption zur Generierung von Pseudo-Messwerten

Die in dieser Arbeit verwendete Oberleitungsbussystem-Simulation basiert auf sekundliche Simulationszeitschritten, wobei die vollständige Berechnung für einen Simulationszeitschritt deutlich unterhalb einer Sekunde liegt (Solinger Oberleitungsbussystem), demzufolge besteht grundsätzlich die Möglichkeit eine Netzstatusprognose zu generieren. Darunter zählen die Berechnungen aller Systemkomponenten (u. a. Bewegung der Batterie-/Oberleitungsbusse

anhand des Busumlaufplanes) sowie die abschließende Leistungsflussberechnung des Oberleitungsbussystems (inkl. evtl. vorgelagertem Mittelspannungsnetz). Echtzeitfähige Systeme antworten innerhalb einer im Vorfeld definierten Zeitspanne. Um gewährleisten zu können, dass die Oberleitungsbussystem-Simulation ebenfalls über längere Zeiträume echtzeitfähig reagiert, wurde sie adaptiert, dass berechnete Werte ihre Vorgänger lediglich überschreiben, um anwachsende Vektoren und Matrizen (z. B. Spannungs- und Leistungswerte aller Aktoren) zu vermeiden.



**Abbildung 3-4: Konzept zur Erzeugung von Pseudo-Messwerten mithilfe der vorgestellten Oberleitungsbussystem-Simulation**

Abbildung 3-4 zeigt das Konzept der adaptierten Oberleitungsbussystem-Simulation zur Generierung von Pseudo-Messwerten. Pseudo-Messwerte bilden dabei nachgeahmte Messwerte ab, die beispielsweise zur Funktionsvalidierung des Netzleitsystems dienen. Diese Funktionsvalidierung ist besonders hilfreich beim Aufbau eines Systems inklusive Integration des intelligenten Netzleitsystems. Nach Systemaufbau stehen jedoch alle Messwerte zur Verfügung, welche anschließend gegenüber den Pseudomesswerten priorisiert werden. Die Oberleitungsbussystem-Simulation berechnet einen Simulationszeitschritt, resultierend in einem vollständig beschriebenen Oberleitungsbussystem-Zustand, in dem alle Größen (u. a. Spannungen und Leistungen) bekannt sind. Damit aus den berechneten Größen Pseudo-Messwerte entstehen, werden aufbauend statistische Fehler hinzuaddiert. Diese statistischen Fehler erhöhen die Robustheit des Netzleitsystems. Nach Ablauf einer Echtzeit-Sekunde (Berechnung einer Simulations-Sekunde, der Erzeugung von Pseudo-Messwerten sowie der

letztmaligen Pseudo-Messwert-Ausgabe eingeschlossen) findet die Pseudo-Messwert-Ausgabe statt, welche das intelligente Netzleitsystem einliest.

### **Pseudo-Messwert-Erzeugung: Spannung, Leistung und Stromstärke**

Für die Generierung von Pseudo-Messwerten werden im ersten Schritt die Genauigkeitsklassen  $g_K$  der Messgeräte definiert. Die auf das Messgerät zurückführende Abweichung der zu messenden physikalischen Größe zwischen Messwert und wahren Wert definiert sich als Genauigkeitsklasse  $g_K$ <sup>16</sup> [100]. Der Erwartungswert  $\mu$  beschreibt in der Stochastik den Verteilungsschwerpunkt, der durch ein unendlich wiederholendes Experiment im Durchschnitt resultiert. Demzufolge werden die berechneten Größen der Oberleitungsbussystem-Simulation (Spannung, Leistung und Stromstärke aller Systemkomponenten) als Erwartungswert angenommen. Mit einer definierten Genauigkeitsklasse  $g_K$  ergibt sich die Eigenabweichung  $G$  zu:

$$G = g_K \cdot \mu \quad (3.1)$$

Für die Beschreibung einer zufälligen Streuung der Messwerte wird eine Gauß-Verteilung herangezogen.

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.2)$$

$$-\infty < x < \infty, \sigma^2 > 0, -\infty < \mu < \infty$$

Dabei stellt  $\sigma^2$  die Varianz dar, welche einen Indikator für die Streuung der Wahrscheinlichkeitsverteilung abbildet. Die Standardabweichung  $\sigma$  lässt sich dabei wie folgt berechnen:

$$z \cdot \sigma = x - \mu \Leftrightarrow \sigma = \frac{x - \mu}{z} \quad (3.3)$$

Der z-Wert beschreibt die Anzahl an Standardabweichungen einer Beobachtung über oder unter dem Erwartungswert. Mit Hilfe des z-Wertes lässt sich der Prozentsatz aller  $x$ -Werte steuern, die sich innerhalb des nachfolgenden Integrals befinden.

$$\mu - G \leq x \leq \mu + G \quad (3.4)$$

### **Pseudo-Messwert-Erzeugung: Bus-Position**

Für die Pseudo-Messwert-Erzeugung der Positionsmesswerte der Busse ist eine Genauigkeit der verwendeten Positionsbestimmungstechnik erforderlich. Die Positionsgenauigkeit  $a_P$  wird im Folgenden als maximale Distanz zwischen simuliertem Positionswert und generiertem Pseudo-

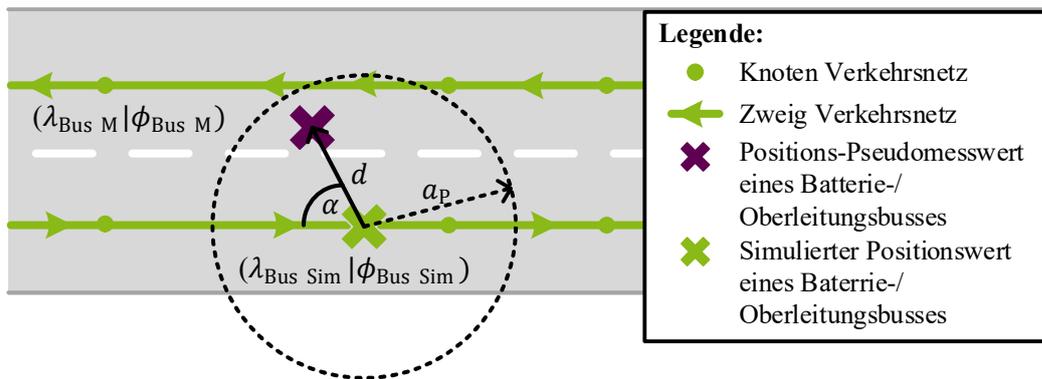
---

<sup>16</sup> Genauigkeitsklasse: Grenzwert der Eigenabweichung in Prozent

Positionsmesswert verstanden. Die Oberleitungsbussystem-Simulation berechnet für jeden Batterie-/Oberleitungsbuss ( $\lambda_{\text{Bus Sim}}|\phi_{\text{Bus Sim}}$ ) eine simulierte Position innerhalb des Verkehrsnetzes. Dabei steht  $\lambda$  für die geografische Länge und  $\phi$  für die geografische Breite in einem Kugelkoordinatensystem im dreidimensionalen euklidischen Raum. Ein simulierter Positionswert eines Batterie-/Oberleitungsbusses wird anschließend um einen zufälligen Winkel  $\alpha$  und um der zufälligen Distanz  $d$  bewegt, wie es Abbildung 3-5 visuell nachbildet.

$$0 \leq \alpha \leq 2\pi \quad (3.5)$$

$$0 \leq d \leq a_p \quad (3.6)$$



**Abbildung 3-5: Pseudo-Messwert-Erzeugung: Bus-Position**

Der resultierende Positions-Pseudomesswert ( $\lambda_{\text{Bus M}}|\phi_{\text{Bus M}}$ ) eines Batterie-/Oberleitungsbusses wird anhand einer Wegpunkt-Projektion berechnet.

$$\phi_{\text{Bus M}} = \arcsin(\sin(\phi_{\text{Bus Sim}}) \cdot \cos(d) + \cos(\phi_{\text{Bus Sim}}) \cdot \sin(d) \cdot \cos(\alpha)) \quad (3.7)$$

$$\lambda_{\text{Bus M}} = \lambda_{\text{Bus Sim}} + \arcsin\left(\frac{\sin(d)}{\cos(\phi_{\text{Bus M}})} \sin(\alpha)\right) \quad (3.8)$$

### Pseudo-Messwert-Erzeugung: Photovoltaikanlagen und Elektromobilität

Für die Erzeugung von Pseudo-Messwerten von Photovoltaikanlagen oder Ladesäulen für Elektrofahrzeuge wird auf die nachfolgenden Abschnitte (Validitätsprüfung der Messwerte und Messwert-Schätzung) verwiesen, da die Messwert-Schätzung der Pseudo-Messwert-Erzeugung entspricht.

### Erzeugung von Ausreißern

Darüber hinaus wird über eine festgelegte Wahrscheinlichkeit  $p_A$  die Erzeugung von Ausreißern jeder Systemkomponente bestimmt. Die berechneten Messwerte (Spannung, Stromstärke, Leistung oder Position) werden für den Fall des Eintritts der definierten Wahrscheinlichkeit so verändert, dass diese Messwerte in der Validitätsprüfung (Abschnitt 3.4.2) als nicht valide

deklariert werden. Diese Methode wird angewandt, um eine Wirklichkeitsannäherung zu erreichen und die Robustheit des Netzleitsystems zu erhöhen, da ebenfalls in der Realität Messwerte Ausreißer erzeugen können.

### **Löschung von Messwerten**

Abschließend werden mittels einer definierten Wahrscheinlichkeit  $p_L$  Messwerte gelöscht und somit nicht übertragen. Da ebenfalls in der Realität die Übertragung von Messwerten unterbrochen werden kann, findet hier erneut eine Wirklichkeitsannäherung statt sowie eine Steigerung der Robustheit des Netzleitsystems.

## **3.4 Netzzustandsidentifikation**

Die Netzzustandsidentifikation determiniert den aktuellen Netzzustand eines Oberleitungsbussystems. Dafür wird im Folgenden die übergeordnete Funktionsweise (Abschnitt 3.4.1) erläutert. Für eine präzise Netzzustandsidentifikation ist eine Validitätsprüfung aller empfangenen Messwerte (Abschnitt 3.4.2) obligatorisch, wobei eine komponentenweise Betrachtung stattfindet. Die Priorisierung der empfangenen Messwerte zeigt Abschnitt 3.4.2. Die nachgelagerte Messwert-Schätzung (Abschnitt 3.4.4) ermittelt – ebenfalls komponentenweise – nicht valide (inkl. fehlender) Messwerte. Abschließend findet die Netzzustandsdeterminierung (Abschnitt 3.4.5) mittels einer Leistungsflussberechnung statt.

### **3.4.1 Funktionsweise**

Die Funktionsweise der Netzzustandsidentifikation wird durch Abbildung 3-6 beschrieben. Die Netzzustandsidentifikation, welche zwischen Initialisierung und Netzzustandsprognose einzuordnen ist, verfolgt das Ziel, den aktuellen Netzzustand des Oberleitungsbussystems zu identifizieren und unterteilt sich wiederum in vier Teilschritte. Beginnend mit dem Einlesen der Messwerte (Abschnitt 3.4.2), werden alle generierten Pseudo-Messwerte oder übermittelten Messwerte (z. B. die der Batterie-/Oberleitungsbusse) repetitiv erfasst. Im weiteren Verlauf wird ausschließlich der Begriff Messwerte verwendet. Nachfolgend findet die Validitätsprüfung der erfassten Messwerte mittels einer komponentenweisen Betrachtung statt. Jede Komponente besitzt zugewiesene Validitätsgrenzen, die im Abschnitt 3.4.2 erläutert werden, resultierend in validen und nicht validen Messwerten. Fehlende Messwerte werden als nicht valide deklariert.

Abschnitt 3.4.4 behandelt die Messwert-Schätzung, welche eine komponentenweise Schätzung nicht valider Messwerte beinhaltet. Da für die abschließende Netzzustandsidentifikation (Abschnitt 3.4.5) eine Leistungsflussberechnung des Oberleitungsbussystems obligatorisch ist, ist das Ziel der Messwert-Schätzung den Leistungsbedarf aller Komponenten des Oberleitungsbussystems zu identifizieren.

Der resultierende determinierte Netzzustand rekonstruiert das Oberleitungsbussystem für den berechneten Zeitpunkt, welcher jedoch keine Aussage über den zukünftigen Netzzustand zulässt.

Ebenfalls ist es nicht zielführend basierend auf dem aktuellen Netzzustand eine systemübergreifende Regelung aufzubauen, da eine hohe Dynamik des Oberleitungsbussystems vorliegt und das Oberleitungsbussystem nicht ausreichend dynamisch geregelt werden kann. Deshalb bietet die in [48] beschriebene prädiktive Regelung, welche sich auf eine Netzzustandsprognose (Abschnitt 3.5) stützt, die größten Erfolgsaussichten Netzengpässe zu vermeiden und einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Außerdem besitzen beispielsweise Batterie-/Oberleitungsbusse integrierte Regler, welche den lokalen Betriebsstrom über die Oberleitung in den Bus anhand der anliegenden Netzspannung regeln (Abbildung 5-11). Die Netzzustandsidentifikation wird als Basis für die nachgelagerte Netzzustandsprognose verwendet und fungiert in den Abschnitten 4.2 und 4.3 als Bemessungsgrundlage zur Ermittlung der Prognosegüte und der Einflussfaktoren.

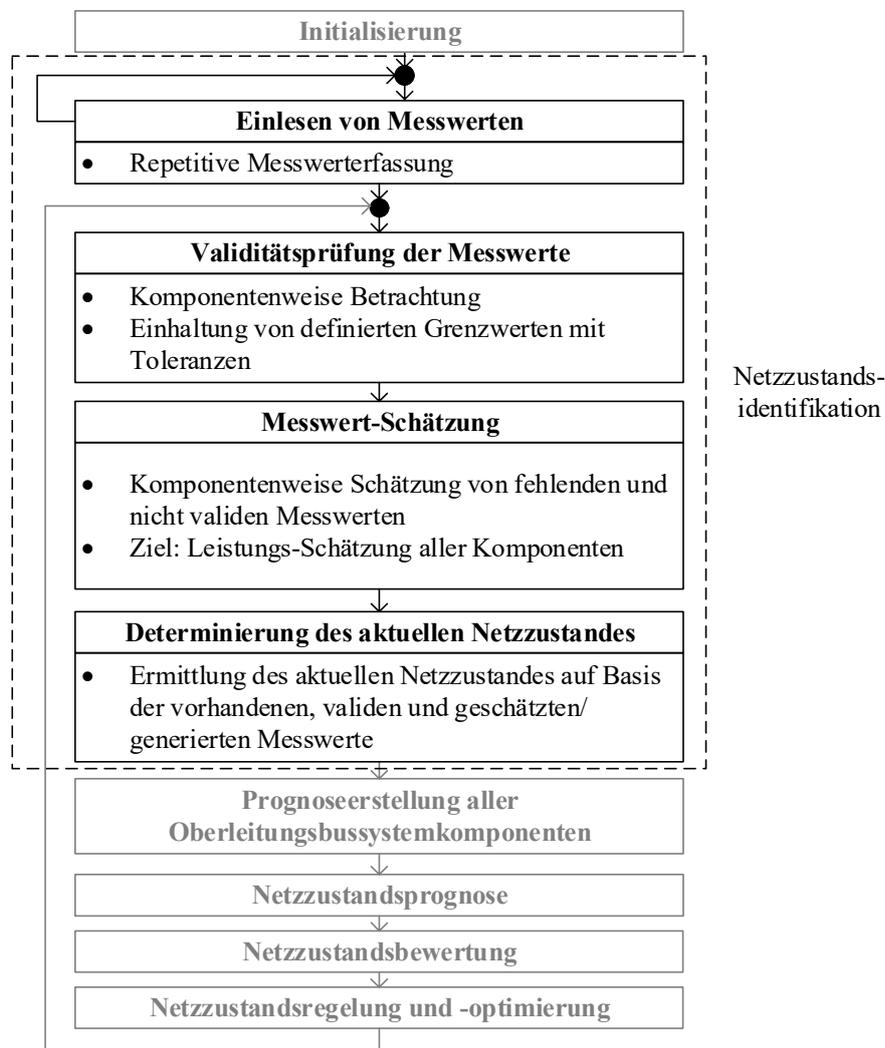


Abbildung 3-6: Detailliertes Konzept der Netzzustandsidentifikation

### 3.4.2 Priorisierung Messwerte

Für das eingeführte Netzleitsystem werden Messwerte benötigt, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten sowie einen möglichst geringen Fehler der Netzzustandsprognose zu erreichen. Die

nachfolgende Tabelle priorisiert die empfangbaren Messwerte des Netzleitsystems – unterteilt nach Oberleitungsbussystem-Komponenten. Priorität 1 entsprechen dabei essenzielle Messwerte, die für eine präzise Netzzustandsprognose zwingend erforderlich sind. Messwerte der Priorität 2 erhöhen die Güte des Netzleitsystems, während Messwerte der Priorität 3 lediglich bei der Güte-Erfassung einen zusätzlichen Beitrag leisten.

Essenzielle Messwerte bezüglich der Batterie-/Oberleitungsbusse sind die Buspositionen sowie bei Batterie-Oberleitungsbussen der Ladezustand. Durch einen zeitlichen Versatz zum Busumlaufplan stellt die Busposition den wichtigsten Messwert des Netzleitsystems dar. Für die Prognose der Batterie-Ladeleistung ist zudem der Messwert des Ladezustandes obligatorisch. Weitere Messwerte (Leistung, Spannung und Strom) bilden Messwerte mit Priorität 2 ab.

Für die Ladesäulen für Elektrofahrzeuge sind Messwerte von Leistung, Spannung und Strom obligatorisch, damit die prädiktive Netzzustandsregelung optimale Aktorbefehle generieren kann. Der Messwert Ladezustand verbessert zusätzlich die Prognosegüte (Priorität 2, siehe Abschnitt 3.5).

Für die prädiktive Netzzustandsregelung von Photovoltaikanlagen werden ebenfalls Messwerte (Leistung, Strom und Spannung) benötigt (Priorität 1).

Messwerte von Gleichrichter-Unterwerken fließen nicht direkt in die Prognoseerstellung ein, liefern jedoch wichtige Daten zur Erfassung der Prognose-Güte (Priorität 3).

Zusätzlich wird die Außentemperatur benötigt, um die Güte des Netzleitsystems zu erhöhen (Priorität 2)

**Tabelle 3-1: Priorisierung Messwerte**

| Oberleitungsbussystem-Komponente | Messwert   | Priorität |
|----------------------------------|--|-----------|
| Batterie-/Oberleitungsbusse      | Leistung   | 2         |
|                                  | Spannung   | 2         |
|                                  | Strom  | 2         |
|                                  | Position   | 1         |
|                                  | Ladezustand<br>(nur bei Batterie-Oberleitungsbussen) | 1         |
| Ladesäulen für Elektrofahrzeuge  | Leistung   | 1         |
|                                  | Spannung   | 1         |
|                                  | Strom  | 1         |
|                                  | Ladezustand  | 2         |
| Photovoltaikanlagen              | Leistung   | 1         |
|                                  | Spannung   | 1         |
|                                  | Strom  | 1         |
| Gleichrichter-Unterwerke         | Leistung   | 3         |
|                                  | Spannung   | 3         |
|                                  | Strom  | 3         |
| Weitere Messwerte                | Außentemperatur                                      | 2         |

### 3.4.3 Validitätsprüfung der Messwerte

Eine Validitätsprüfung aller Messwerte ist unerlässlich für die darauf aufbauende Determinierung des aktuellen Netzzustandes (Abschnitt 3.4) und der Netzzustandsprognose (Abschnitt 3.5).

Demgemäß findet nachfolgend eine komponentenweise Validitätsprüfung aller Messwerte statt, indem Validitätsgrenzen definiert werden, resultierend in einer Determinierung von nicht validen Messwerten.

### Batterie-/Oberleitungsbusse

Die Messwert-Validitätsprüfung und -Schätzung der Batterie-/Oberleitungsbusse läuft wie in Abbildung 3-7 gezeigt ab.

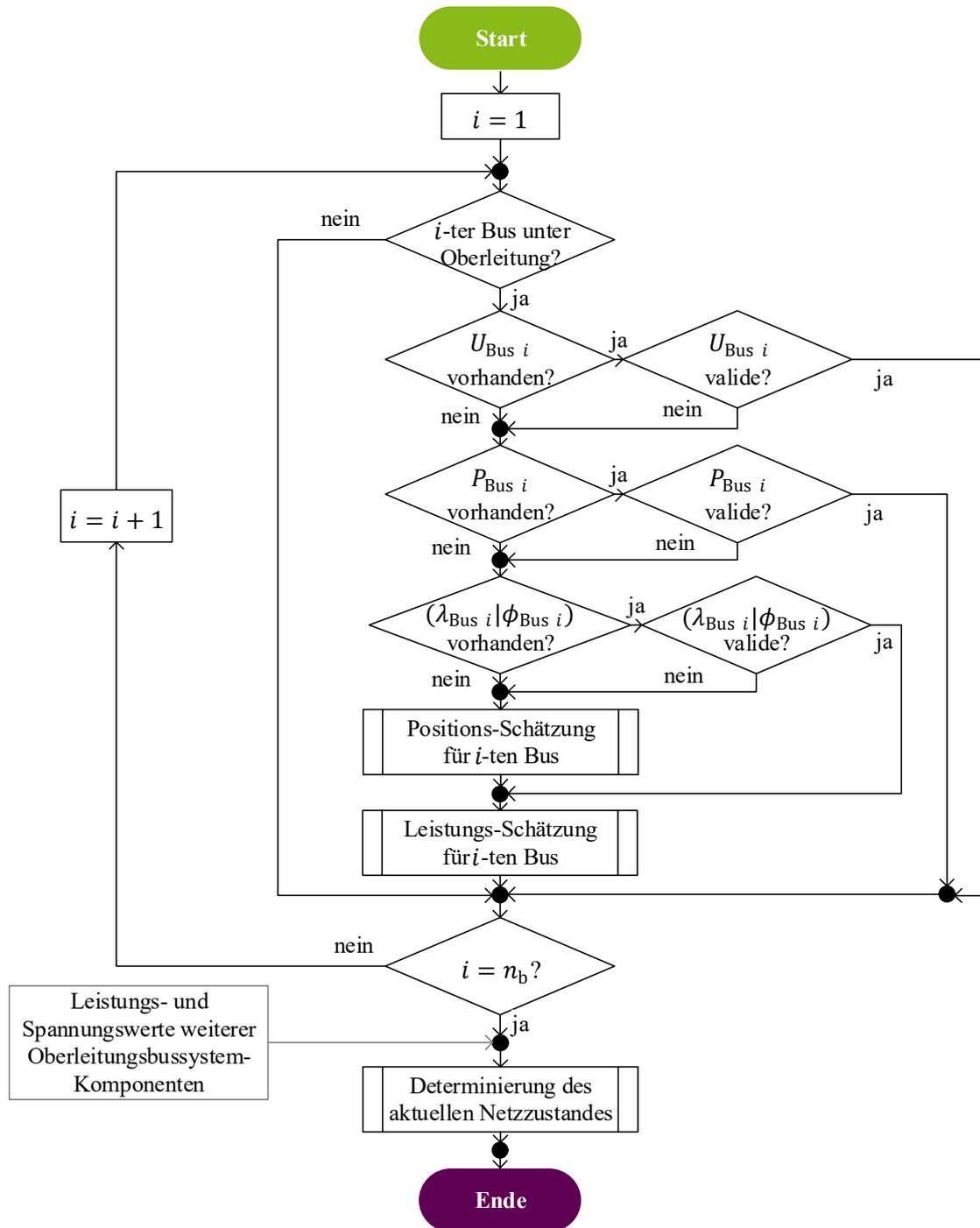


Abbildung 3-7: Ablaufschema der Messwert-Validitätsprüfung und -Schätzung der Batterie-/Oberleitungsbusse

Initial wird kontrolliert, ob der Batterie-/Oberleitungsbus direkt mit dem Fahrdrat verbunden ist, da Batterie-/Oberleitungsbusse, die sich im Batteriebetrieb befinden, keinen Einfluss auf die Netzzustandsidentifikation besitzen. Anschließend wird überprüft, ob der Spannungsmesswert des Batterie-/Oberleitungsbusse  $U_{\text{Bus } i}$  vorhanden und valide ist. Bei vorhandenen Spannungsmesswert erfolgt eine Validitätsprüfung:

$$f_U \cdot U_{\min} < U_{\text{Bus } i} < f_U \cdot U_{\max 2} \quad (3.9)$$

$U_{\min}$  beschreibt dabei die untere Toleranzgrenze des Spannungsbereiches und  $U_{\max 2}$  die höchste nichtpermanente Spannung (Abschnitt 2.3.2). Der Spannungs-Toleranzfaktor  $f_U$  vermindert bzw. erhöht die Validitätsgrenzen. Der Toleranzfaktor  $f_U$  sollte dabei größer als die Genauigkeitsklasse  $g_K$  gewählt werden. Für das Solinger Oberleitungsbusssystem wurden Toleranzfaktoren ( $f_U$  und nachfolgend  $f_P$ ) von 1,1 gewählt. Bei vorhandenen und validen Spannungsmesswert, findet keine Positions- oder Leistungs-Schätzung statt, sodass direkt der nächste Bus überprüft wird.

Bei nicht validen oder nicht vorhandenen Spannungsmesswert wird geprüft, ob der Leistungsmesswert  $P_{\text{Bus } i}$  eines Batterie-/Oberleitungsbusse vorhanden und valide ist. Bei vorhandenem Leistungsmesswert  $P_{\text{Bus } i}$  erfolgt die Validitätsprüfung anhand der maximalen konsumierenden Batterie-/Oberleitungsbusleistung (maximale Bezugsleistung)  $P_{\text{Bus max k}}$ , der maximalen Batterie-/Oberleitungsbusrückspeiseleistung  $P_{\text{Bus max r}}$  sowie eines Leistungs-Toleranzfaktors  $f_P$ :

$$f_P \cdot P_{\text{Bus max r}} < P_{\text{Bus } i} < f_P \cdot P_{\text{Bus max k}} \quad (3.10)$$

mit

$$P_{\text{Bus max k}} > 0 \wedge P_{\text{Bus max r}} < 0 \wedge f_P > 1, \quad (3.11)$$

$$\text{wobei } P_{\text{Bus max r}} = f(BT)^{17} \text{ und } P_{\text{Bus max k}} = f(I_{D \max})^{18}$$

Bei vorhandenem und validem Leistungsmesswert eines Batterie-/Oberleitungsbusse, wird dieser Leistungsmesswert an die folgende DC-Leistungsflussberechnung übergeben. Im Falle eines nicht vorhandenen oder nicht validen Leistungsmesswertes eines Batterie-/Oberleitungsbusse, wird folglich die Busposition ( $\lambda_{\text{Bus } i} | \phi_{\text{Bus } i}$ ) überprüft. Die Überprüfung umfasst ebenfalls eine Validitätsprüfung, welche im ersten Schritt zwei notwendige Bedingungen  $B_{\text{Bus } 1}$  und  $B_{\text{Bus } 2}$  prüft. Bei gleichzeitiger Erfüllung implizieren die Bedingungen  $B_{\text{Bus } 1}$ ,  $B_{\text{Bus } 2}$  und  $B_{\text{Bus } 3}$  eine valide Busposition, welche durch die Konsequenz  $K_{\text{Bus } v}$  gekennzeichnet wird. Die Toleranzen  $\Delta\lambda$  und  $\Delta\phi$  (hier 1,05) vergrößern dabei das betrachtete und valide Rechteck der Bedingungen  $B_{\text{Bus } 1}$  und  $B_{\text{Bus } 2}$ .

$$B_{\text{Bus } 1} \wedge B_{\text{Bus } 2} \wedge B_{\text{Bus } 3} \Rightarrow K_{\text{Bus } v} \quad (3.12)$$

<sup>17</sup>  $BT$  entspricht der Menge aller Bustypen (siehe Abschnitt 5.3.1)

<sup>18</sup>  $I_{D \max}$  entspricht dem maximalen während der Fahrt auftretenden Stromtransfer von der Fahrleitung in einem Batterie-/Oberleitungsbus (siehe Abschnitt 10.2)

Mit

$$B_{\text{Bus } 1}: \lambda_{\min} - \Delta\lambda < \lambda_{\text{Bus } i} < \lambda_{\max} + \Delta\lambda \quad (3.13)$$

$$B_{\text{Bus } 2}: \phi_{\min} - \Delta\phi < \phi_{\text{Bus } i} < \phi_{\max} + \Delta\phi \quad (3.14)$$

Die  $\lambda$ -Koordinate repräsentiert den Längengrad, während die  $\phi$ -Koordinate die geographische Breite darstellt.  $\lambda_{\min}$ ,  $\phi_{\min}$  und  $\lambda_{\max}$ ,  $\phi_{\max}$  stellen dabei die minimalen und maximalen Längen- und Breitengrade des betrachteten, validen Gebietes dar.

Zusätzlich werden zuvor erfasste Buspositions-Messwerte und -Schätzungen verwendet, um die Distanz zweier valider oder geschätzter Buspositions-Messwerte  $\Delta S_{\text{Bus } M}$  zu ermitteln. Diese Distanz kann anhand der Orthodromen ermittelt werden und mit der maximalen Strecke  $\Delta S_{\text{Bus } \max}$ , die der Batterie-/Oberleitungsbus zwischen diesen Zeitpunkten zurücklegen kann, verglichen werden ( $B_{\text{Bus } 3}$ ).

$$B_{\text{Bus } 3}: \Delta S_{\text{Bus } \max} > \Delta S_{\text{Bus } M} \quad (3.15)$$

Dabei ergibt sich die maximale Strecke eines Batterie-/Oberleitungsbusses  $\Delta S_{\text{Bus } \max}$  anhand der maximalen Batterie-/Oberleitungsbus-Geschwindigkeit  $v_{\text{Bus } \max}$  und der Zeitdifferenz der betrachteten Messwerte  $\Delta t$ .

$$\Delta S_{\text{Bus } \max} = v_{\text{Bus } \max} \cdot \Delta t = v_{\text{Bus } \max} \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.16)$$

$t_1$  und  $t_2$  beschreiben dabei die betrachteten Zeitpunkte. Äquivalent repräsentieren  $(\lambda_1|\phi_1)$  und  $(\lambda_2|\phi_2)$  die Buspositionen zu den beiden betrachteten Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ . Die zugehörige Orthodrome wird unter Verwendung des Erdradius  $r_{\text{Erde}}$  wie folgt berechnet:

$$\Delta S_{\text{Bus } M} = \arccos(\sin(\phi_1) \cdot \sin(\phi_2) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1)) \cdot r_{\text{Erde}} \quad (3.17)$$

Batterie-Messwerte (z. B. Batterie-Ladezustände) stellen keinen Einfluss auf die Netzzustandsidentifikation dar, beeinflussen aber die im Abschnitt 3.5 beschriebene Netzzustandsprognose. Entladene Batterien weisen einen erhöhten Energiefluss vom Fahrdrat in den Batterie-Oberleitungsbus in der Netzzustandsprognose auf.

Weitere Messwerte der Batterie-/Oberleitungsbusse werden ebenfalls auf Validität geprüft, besitzen aber keinen Einfluss auf die Netzzustandsidentifikation und werden deshalb im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht explizit aufgelistet. Die Messwert-Schätzung wird für alle  $n_b$  Batterie-/Oberleitungsbusse durchgeführt.

Die in Abbildung 3-7 erwähnten Positions- und Leistungs-Schätzungen werden im Abschnitt 3.4.4 detailliert erläutert.

### Elektromobilität

Ladesäulen für Elektrofahrzeuge werden analog zu den Batterie-/Oberleitungsbussen auf Validität überprüft, mit dem Unterschied, dass diese dauerhaft an der Oberleitung angeschlossen sind und dass keine Positions-Schätzung notwendig ist. Dadurch vereinfacht sich das Ablaufschema (Abbildung 3-8). Eine Ladesäulenleistungs-Schätzung (Abschnitt 3.4.4) ist dennoch notwendig, sollten keine validen Messwerte ( $U_{EV i}$  und  $P_{EV i}$ ) vorliegen, die in die Netzzustandsidentifikation einfließen können. Für die Validitätsprüfung werden erneut die zuvor eingeführten Toleranzfaktoren ( $f_U$  und  $f_P$ ) verwendet und bilden äquivalent zu den Gleichungen 3.9 und 3.10 die Grenzwerte ab. Anschließend wird die Vorgehensweise für alle  $n_{EV}$  Ladesäulen wiederholt. Spannungs- und Leistungsmesswerte können bei validen und vorhandenen Messwerten direkt als Spannungs- oder Leistungsknoten in der DC-Leistungsflussberechnung für die Determinierung des aktuellen Netzzustandes verwendet werden.

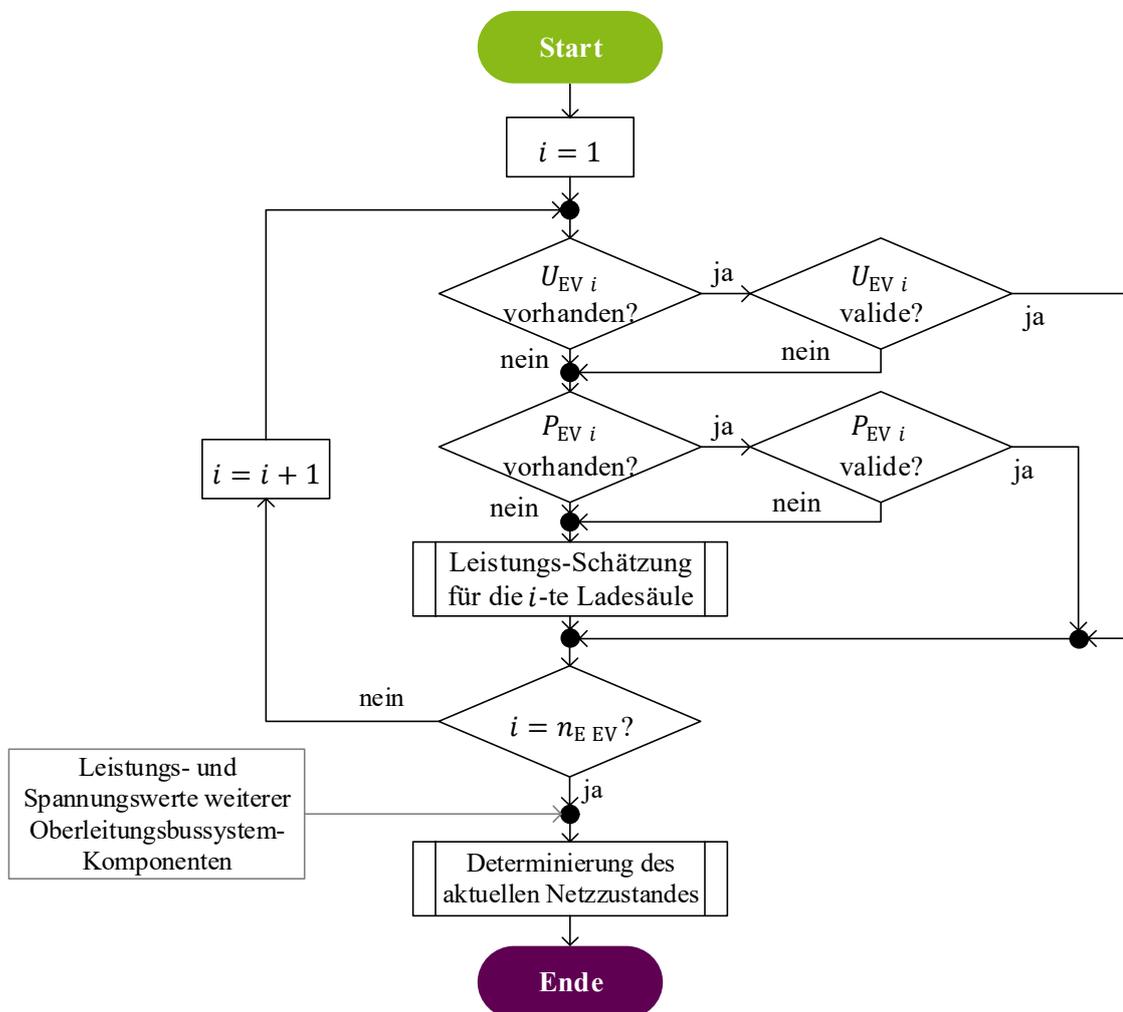


Abbildung 3-8: Ablaufschema der Messwert-Validitätsprüfung und -Schätzung der Ladesäulen für Elektrofahrzeuge

### Photovoltaikanlage

Photovoltaikanlagenmesswerte werden analog zu den Messwerten der Elektromobilität auf Validität geprüft und bei Bedarf findet eine Photovoltaikleistungs-Schätzung (siehe Abschnitt 3.4.4) statt.

### 3.4.4 Messwert-Schätzung

Im Folgenden findet eine komponentenweise Messwert-Schätzung mit der Prämisse, dass nicht valide Messwerte vorliegen, statt. Dabei wird der Fokus auf Batterie-/Oberleitungsbusse gelegt, sodass die Messwert-Schätzung der Photovoltaikanlagen sowie der Ladestationen für Elektrofahrzeuge nur rudimentär behandelt werden.

#### Batterie-/Oberleitungsbusse

Abhängig, ob eine valide Batterie-Oberleitungsbus-Leistungsmessung  $P_{\text{Bus}}$  und/oder eine valide Busposition  $(\lambda_{\text{Bus}}|\phi_{\text{Bus}})$  vorliegt, ist eine Busleistungs-Schätzung und/oder eine Buspositions-Schätzung notwendig. Batterie-/Oberleitungsbusse stellen sowohl Knoten im Verkehrsnetz als auch im elektrischen Netz dar. Dabei ist zu beachten, dass diese als dynamische Knoten anzusehen sind, da sich die Position eines Batterie-/Oberleitungsbusse innerhalb des Verkehrsnetzes sowie des elektrischen Netzes zu jedem Simulationsschritt ändern kann (siehe Abschnitt 3.3).

#### Buspositions-Schätzung

Valide Buspositions-Messwerte  $(\lambda_{\text{Bus}}|\phi_{\text{Bus}})$  werden für die Berechnung einer eventuellen Verzögerung zum Busumlaufplan verwendet. Der Busumlaufplan legt Kombinationen von Bushaltestellen und Uhrzeiten für jeden Batterie-/Oberleitungsbus fest. Eine Verzögerung kann somit in einer Buspositions- oder in einer Zeitdifferenz ausgedrückt werden. Nachfolgend wird der aktuell befahrende Zweig im Verkehrsnetz mittels der validen Busposition  $(\lambda_{\text{Bus}}|\phi_{\text{Bus}})$  im Busumlaufplan ermittelt und daraus die geplante Uhrzeit  $t_{\text{BUP}}$  berechnet. Da sich die Streckenverläufe und somit die befahrenden Zweige eines Batterie-/Oberleitungsbusse im Laufe eines Tages mehrfach wiederholen können, fließen die aktuelle Uhrzeit sowie die zuvor berechneten Verzögerung  $\Delta t_{V_{n-1}}$  mit in die Ermittlung ein. Anschließend erfolgt der Vergleich zwischen der aktuellen Uhrzeit  $t_{M_n}$  und der geplanten Uhrzeit  $t_{\text{BUP}}$ . Der Index  $n$  kennzeichnet den aktuellen Messwert und infolgedessen die aktuelle Verzögerung, während  $n - 1$  auf die zuvor betrachtete Verzögerung hindeutet. Existiert keine zuvor berechnete Verzögerung  $\Delta t_{V_{n-1}}$ , gilt  $\Delta t_{V_{n-1}} = 0$ .

$$\Delta t_{V_n} = t_{M_n} - t_{\text{BUP}} \quad (3.18)$$

$$t_{\text{BUP}} = f(\lambda_{\text{Bus}}, \phi_{\text{Bus}}, t_{M_n}, \Delta t_{V_{n-1}}) \quad (3.19)$$

Sind keine validen Buspositions-Messwerte  $(\lambda_{\text{Bus}}|\phi_{\text{Bus}})$  vorhanden, wird die Busposition anhand der aktuellen Uhrzeit  $t_{M_n}$  und der zuletzt berechneten Verzögerung  $\Delta t_{V_{n-1}}$  geschätzt.

Dazu wird die Verzögerung  $\Delta t_{V_{n-1}}$  zur aktuellen Uhrzeit  $t_{M_n}$  addiert, resultierend (mittels des Busumlaufplanes) in eine geschätzte Busposition  $(\lambda'_{\text{Bus}}|\phi'_{\text{Bus}})$ .

$$\lambda'_{\text{Bus}} = f(t_{M_n}, \Delta t_{V_{n-1}}) \quad (3.20)$$

$$\phi'_{\text{Bus}} = f(t_{M_n}, \Delta t_{V_{n-1}}) \quad (3.21)$$

### Busleistungs-Schätzung

Für die Durchführung einer Busleistungs-Schätzung ist eine valide oder geschätzte Busposition  $(\lambda_{\text{Bus}}|\phi_{\text{Bus}})$  oder  $(\lambda'_{\text{Bus}}|\phi'_{\text{Bus}})$  obligatorisch. Dafür findet eingangs eine Positionierung des Batterie-/Oberleitungsbusses unter Berücksichtigung der Busposition in das Verkehrsnetz statt. Anhand der aktuellen Uhrzeit  $t_{M_n}$  und der aktuellen zeitlichen Verzögerung  $\Delta t_{V_n}$  trifft die Positionierung eine Vorauswahl aller Verkehrszweige, sodass lediglich Verkehrszweige in Betracht gezogen werden, die der Batterie-/Oberleitungsbuss auf der aktuellen Buslinie befährt und ausschließlich Zweige berücksichtigt werden, die der Batterie-/Oberleitungsbuss zeitlich in einem definierbaren Abstand zu  $t_{M_n}$  befahren kann (Abbildung 3-9).



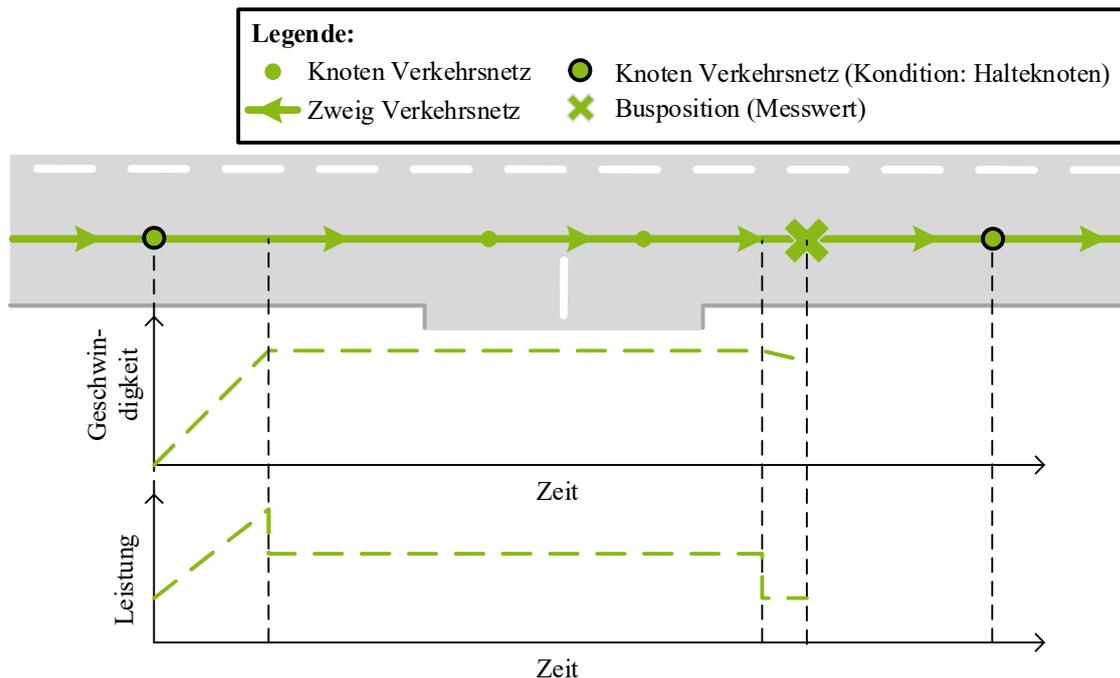
Abbildung 3-9: Positionierung der Batterie-/Oberleitungsbusse im Verkehrsnetz auf der Grundlage der gemessenen Busposition

Diese Vorgehensweise schließt fehlerhafte Positionierungen auf einem Zweig einer anderen Fahrtrichtung aus. Durch das Lotfußpunktverfahren wird nachfolgend die minimale Distanz zwischen der gemessenen Busposition und den betrachteten Verkehrszweigen berechnet,

resultierend in einem betrachteten Verkehrszweig, auf dem sich der Batterie-/Oberleitungsbus befindet.

Die Schätzung einer Leistung eines Batterie-/Oberleitungsbusses läuft in zwei Schritten ab. Zuerst wird der letzte Halteknoten im Busumlaufplan ermittelt, sodass der Batterie-/Oberleitungsbus auf diesen Punkt zurückgesetzt werden kann. Anschließend wird mittels der im Abschnitt 3.3 erläuterten Oberleitungsbusssystem-Simulation ein Geschwindigkeitsprofil erstellt, welches eine Leistung impliziert (Abbildung 3-10). Bei Erreichen der Messwert-Busposition im Verkehrsnetz wird die Simulation gestoppt, sodass eine aktuelle Batterie-/Oberleitungsbusleistung mittels der vorgestellten Oberleitungsbusssystem-Simulation vorhanden ist. Die Determinierung des Geschwindigkeitsprofils erfolgt systematisch nach Abbildung 3-3, sodass weitere Faktoren in die Bestimmung mit einfließen. Diese Faktoren (z. B. Kenndaten Bus-Nebenverbraucher) sind als statische Parameter hinterlegt und werden automatisch bei der Busbewegung berücksichtigt. Anschließend wird mittels des Wirkungsgrades des Elektromotors die mechanische Leistung in eine elektrische Leistung (in Abbildung 3-10 lediglich Leistung genannt) berechnet.

Zuvor erhaltene valide Daten fließen ebenfalls mit in die Betrachtung ein, da beispielsweise der Ladezustand eines Batterie-/Oberleitungsbusses einen wesentlichen Anteil an der geschätzten Leistung darstellt.



**Abbildung 3-10: Schätzung der Geschwindigkeit und Leistung eines Batterie-/Oberleitungsbusses**

Die geschätzten Leistungen der Batterie-/Oberleitungsbusse werden anschließend für die Ermittlung des aktuellen Netzzustandes des Oberleitungssystems verwendet, indem eine Gleichspannungs-Leistungsflussberechnung stattfindet. Diese liefert sämtliche Spannungen (ebenfalls an den Batterie-/Oberleitungsbussen) des Oberleitungsbusystems.

## Elektromobilität

Die als Netzlast zu betrachtenden Ladestationen für Elektrofahrzeuge definieren sich als stationäre Knoten im elektrischen Netz und Ladestationen, deren Leistungsbedarfe  $P_{EVCS\ i} > 0\ W$  betragen, werden bei einer Determinierung des Netzzustandes berücksichtigt. Eine Ladestation kann wiederum aus mehreren Ladepunkten bestehen, was im Folgenden Einfluss auf die Ladestationen-Leistungs-Schätzung hat, falls keine validen Messwerte vorliegen. Andernfalls erfolgt die Messwert-Schätzung der Elektromobilität anhand zuvor erhaltener valider Messwerte der Ladesäulen für Elektrofahrzeuge, indem die zuvor erhaltenen, validen Messwerte bis zum aktuellen Zeitpunkt fortgesetzt werden. Dafür findet eine lineare Einfachregression statt, die durch die maximale Ladeleistung des Ladepunktes sowie den minimalen Leistungsbedarf (0 W) begrenzt ist.

## Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen agieren netzeinspeisend und werden im elektrischen Netz ebenfalls als stationäre Knoten definiert. Die Photovoltaikanlagen-Leistungs-Schätzung basiert auf zuvor erhaltenen validen Leistungs-Messwerten. Dazu wird ein fest definierter Zeitraum vor Netzzustandsdeterminierung untersucht. Befinden sich in diesem Zeitraum valide Leistungs-Messwerte wird der aktuelle Leistungs-Entwicklungstrend (lineare Einfachregression) ermittelt und bis zum aktuellen Zeitpunkt fortgesetzt. Dabei wird die installierte Photovoltaikanlagenleistung als Grenzwert miteinbezogen.

Existieren keine Messwerte wird eine ideale Photovoltaikanlagenleistungskurve ermittelt, welche bereits u. a. von der installierten Photovoltaikanlagenleistung, der geographischen Breite, den Azimut-Winkel und der Jahreszeit limitiert wird. Darauf aufbauend wird die ideale Photovoltaikanlagenleistungskurve durch reale (historische) Bewölkungsfaktoren zu einer realen Photovoltaikanlagenleistungskurve, sodass ein realistischer Messwert generiert werden kann.

### 3.4.5 Determinierung des aktuellen Netzzustandes

Die Determinierung des aktuellen Netzzustandes erfolgt gemäß [19], sodass im Folgenden eine komprimierte Darstellung der Netzzustandsdeterminierung erfolgt. Nachdem alle Messwerte auf ihre Validität geprüft und unter Umständen geschätzt wurden, werden diese Messwerte beim Starten der Netzzustandsdeterminierung übermittelt. Abbildung 3-13 visualisiert die zugehörige Vorgehensweise der Netzzustandsdeterminierung.

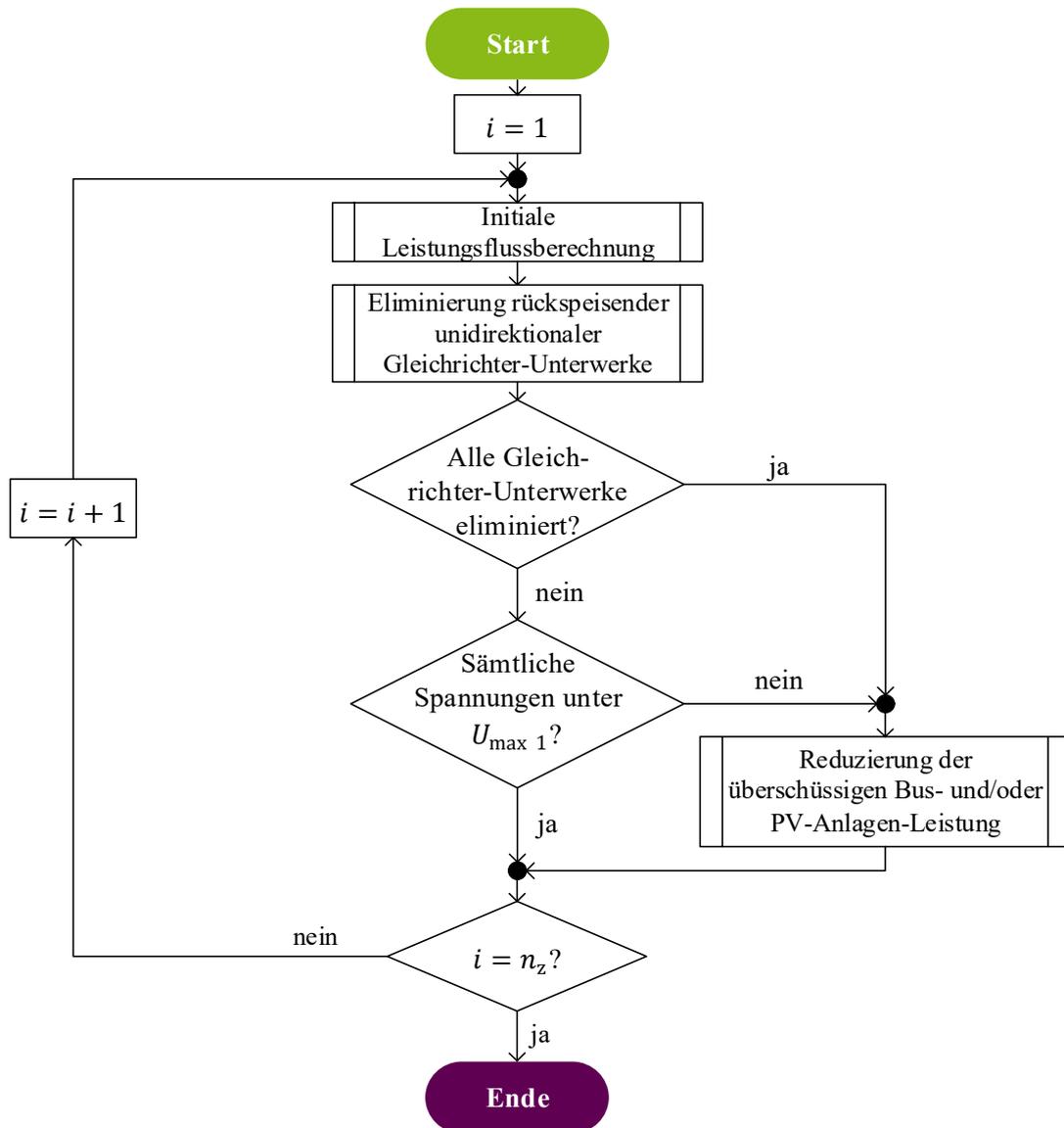


Abbildung 3-11: Konzept der Determinierung des aktuellen Netzzustandes

Es erfolgt eine sukzessive, zonenspezifische<sup>19</sup> Berechnung der Netzzustände. Dabei stellt  $n_z$  die maximale Anzahl aller elektrischen Zonen dar. Initial wird eine Leistungsflussberechnung durchgeführt. Abhängig von den Eingabeparametern wird eine kombinierte AC-DC-Leistungsflussberechnung für das Oberleitungsnetz sowie dem vorgelagerten Mittelspannungsnetz oder lediglich eine DC-Leistungsflussberechnung für das Oberleitungsnetz durchgeführt.

<sup>19</sup> Eine elektrische Zone eines Oberleitungsbusnetzes beschreibt ein System von Ober- und Speiseleitungen, welche einen geschlossenen Weg darstellen. Dieses System von Ober- und Speiseleitungen ist galvanisch entkoppelt mit anderen elektrischen Zonen und über Trennschalter realisiert, um beispielsweise die Kurzschlussstromerkennbarkeit zu gewährleisten.

Anschließend wird überprüft, ob unidirektionale Gleichrichter-Unterwerke eine Rückspeisung in das vorgelagerte Mittelspannungsnetz aufweisen. Falls ja, werden diese eliminiert, indem statt einer vorgegebenen Spannung, welche entweder  $U_{GUW}$  entspricht oder durch das vorgelagerte AC-Netz bestimmt wird, eine konstante Leistung der betroffenen Gleichrichter-Unterwerke ( $P_{GUW} = 0 \text{ W}$ ) angenommen wird. Dieser Prozess ist iterativ, sodass erneute Leistungsflussberechnungen stattfinden, da nach Eliminierung erneute Rückspeisungen von Gleichrichter-Unterwerken in das vorgelagerte Mittelspannungsnetz auftreten können. Diese Vorgehensweise (zur Eliminierung von rückspeisenden unidirektionalen Gleichrichter-Unterwerken) wird detailliert in [19] behandelt, sodass auf eine ausführliche Erläuterung an dieser Stelle verzichtet wird.

Für den Fall, dass nicht alle Gleichrichter-Unterwerke eliminiert worden sind und sich alle Spannungen unterhalb der höchsten, zulässigen Dauerspannung  $U_{\max 1}$  befinden, wird der Netzzustand der nächsten Zone berechnet. Andernfalls findet eine Reduzierung der überschüssigen Bus- und/oder PV-Anlagen-Leistung statt. Dabei werden iterativ Leistungsflussberechnungen mit dem Ziel, dass  $U_{\max 1}$  nicht mehr überschritten wird, durchgeführt. Bei Photovoltaikanlagen kann die Leistung entsprechend der Spannung adjustiert werden. Unter der Oberleitung befindliche Batterie-/Oberleitungsbusse hingegen verwenden bei überschüssiger Rekuperationsenergie beispielsweise eine Widerstandsbremse, sodass überschüssige Energie in (Ab-)Wärme umgewandelt wird.

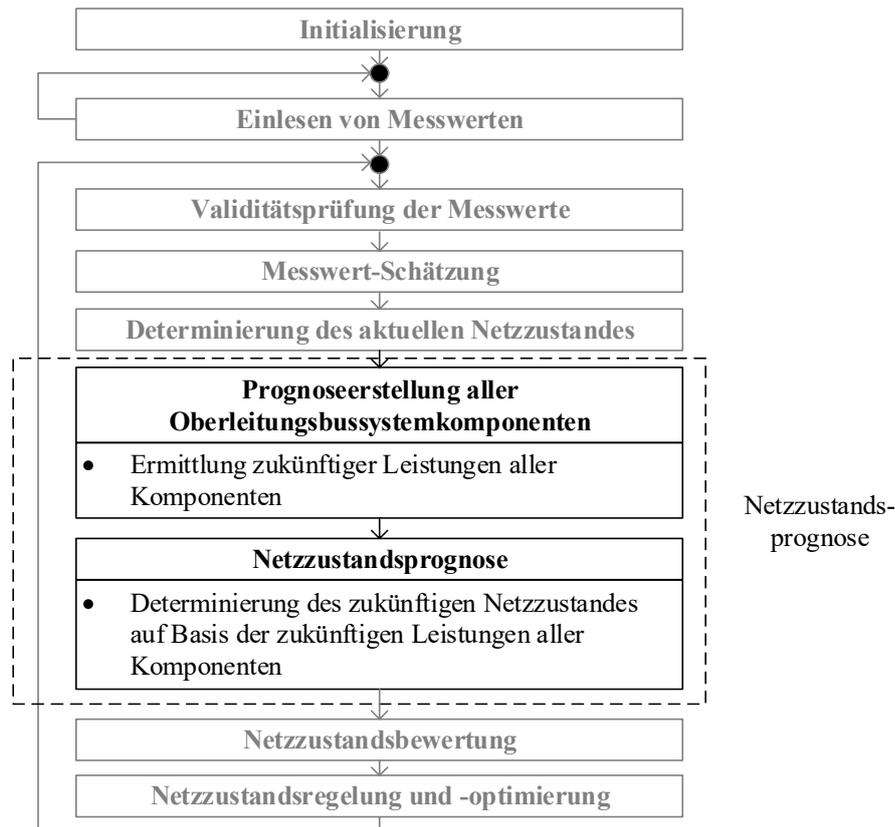
Der Prozess endet bei Erreichen der maximalen elektrischen Zonenanzahl  $n_Z$  eines Oberleitungsbusystems, wobei elektrische Zonen eine galvanische Trennung zueinander aufweisen.

## 3.5 Netzzustandsprognose

Die Netzzustandsprognose erstellt für das Oberleitungsbusssystem eine Prognose des zukünftigen Netzzustandes, welche auf einem erfolgreich identifizierten Netzzustand (Abschnitt 3.4) basiert. Zu diesem Zweck wird im Folgenden die Funktionsweise (Abschnitt 3.5.1) und aufbauend die Prognoseerstellung (Abschnitt 3.5.2), welche aufgeteilt in Komponenten beschrieben ist, erläutert. Folglich wird der zukünftige Netzzustand des Oberleitungsbusystems determiniert (Abschnitt 3.5.3).

### 3.5.1 Funktionsweise

Im Anschluss an die erfolgreiche Netzzustandsidentifizierung findet die Netzzustandsprognose statt. Dabei wird komponentenweise eine prognostizierte Leistung ermittelt. Die Leistungsbedarfe der fahrenden Batterie-/Oberleitungsbusse werden mit Hilfe der im Abschnitt 3.3 vorgestellten Simulation prognostiziert, indem diese anhand der Messwerte oder/und des Busumlaufplanes virtuell im Verkehrsnetz bewegt werden. Anschließend wird die Position in das elektrische Netz übertragen, in welchem die Batterie-/Oberleitungsbusse als bewegliche Lasten agieren, indem sie zusätzliche Netzknoten darstellen.



**Abbildung 3-12: Detailliertes Konzept der Netzzustandsprognose**

Während Batterie-/Oberleitungsbusse sekundlich simuliert und somit sekundlich prognostiziert werden, werden für die weiteren Komponenten (Photovoltaikanlagen und Ladesäulen für Elektrofahrzeuge) Last- bzw. Einspeisereihen für den gesamten Simulationshorizont (siehe Abschnitt 3.5.2) vor der diskreten Simulation der Batterie-/Oberleitungsbusse ermittelt. Eine sekundliche Simulation der Batterie-/Oberleitungsbusse ist aufgrund der hohen Dynamik des Leistungsprofils obligatorisch. Somit findet abschließend eine Leistungsflussberechnung statt, in der die Leistungen aller im Oberleitungsbussystem befindlichen Komponenten miteinfließen, resultierend in einem determinierten Netzzustand. Neben Spannungen und Stromstärken an den bereits erläuterten Komponenten, werden ebenfalls die Spannungen und Stromstärken an den Gleichrichter-Unterwerken mittels der zuvor erwähnten Determinierung des aktuellen Netzzustandes (Abschnitt 3.4.5) ermittelt.

Der Einfluss des Zeithorizontes  $T_H$  der Netzzustandsprognose wird nachgelagert im Abschnitt 4.3 behandelt. Echtzeit und Simulationsdauer beeinflussen den optimalen Zeithorizont, wobei die Simulationsdauer  $T_{Sim}$  zusätzlich in Initialisierungszeit  $T_{Init}$ , Prognosezeit  $T_{Prog}$  und Aktorbefehl-Generierungszeit  $T_A$  zu unterteilen ist.

$$T_{Sim} = T_{Init} + T_{Prog} + T_A \quad (3.22)$$

Die Initialisierung benötigt für jede Netzzustandsprognose eine konstante Zeit, während die Prognosezeit abhängig vom Simulationshorizont  $T_H$  und der Anzahl der aktiven Oberleitungsbussystem-Komponenten  $n_{Komp}$  ist:

$$T_{\text{Prog}} = f(T_H, n_{\text{Komp}}) \quad (3.23)$$

Während sich  $T_H$  aufgrund zusätzlicher Simulationsschritte auf die Prognosedauer auswirkt, bewirkt  $n_{\text{Komp}}$  eine Erhöhung der Dauer der Leistungsflussberechnung. Ein wachsender Simulationshorizont oder eine zunehmende Anzahl an Oberleitungsbussystem-Komponenten bedingt folglich eine steigende Prognosezeit  $T_{\text{Prog}}$ . Die obligatorische, konstante Initialisierungszeit bedingt einen minimalen Simulationshorizont, der nicht unterschritten werden darf. Bei Unterschreitung reicht die Netzzustandsprognose nicht weit genug in die Zukunft, um Aktorbefehle zu generieren und diese anschließend zu übermitteln, bevor der berechnete Netzzustand im realen Oberleitungsbussystem eingetreten ist.

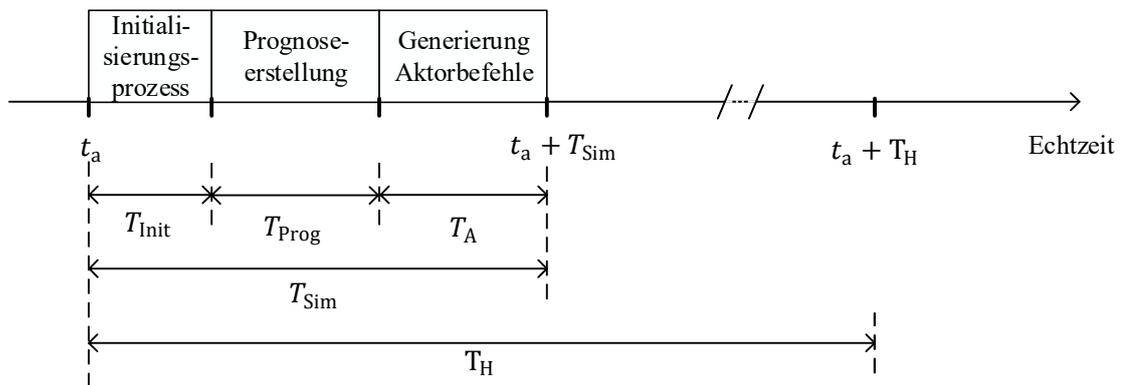


Abbildung 3-13: Visualisierung Simulationshorizont

Abbildung 3-13 visualisiert die beschriebenen Zusammenhänge und zeigt, dass der Simulationshorizont größer sein muss als die Simulationsdauer, da nachfolgend für den Zeitraum des Simulationshorizontes Aktorbefehle generiert werden. Die berechneten Ströme auf den Zweigen sowie die berechneten Knotenspannungen dienen zur Netzzustandsbewertung und prädiktiven Regelung sowie Netzzustandsoptimierung [48].

Nach Abschluss der Prognoseerstellung und Generierung der Aktorbefehle startet die Initialisierung und die Prognoseerstellung erneut. Abbildung 3-14 zeigt, dass in diesem Zuge – nach Fertigstellung einer erneuten Netzzustandsprognose mit Aktorbefehlgenerierung – die zuvor erstellte Netzzustandsprognose sowie die zuvor erstellten Aktorbefehle überschrieben werden. Dabei stellt die Variable  $i$  die Anzahl der erstellten Netzzustandsprognosen (und Aktorbefehle) dar, während  $t_a$  den Zeitpunkt des aktuellen Messwertes widerspiegelt. Bei der zweiten Erstellung einer Netzzustandsprognose ist somit der Zeitpunkt des aktuellen Messwertes  $t_a$  auf der Abszisse nach rechts verschoben. In grün wird der Gültigkeitsbereich der Aktorbefehle eingezeichnet, welche von den verschiedenen Aktoren umgesetzt werden, bevor neue Aktorbefehle ermittelt wurden.

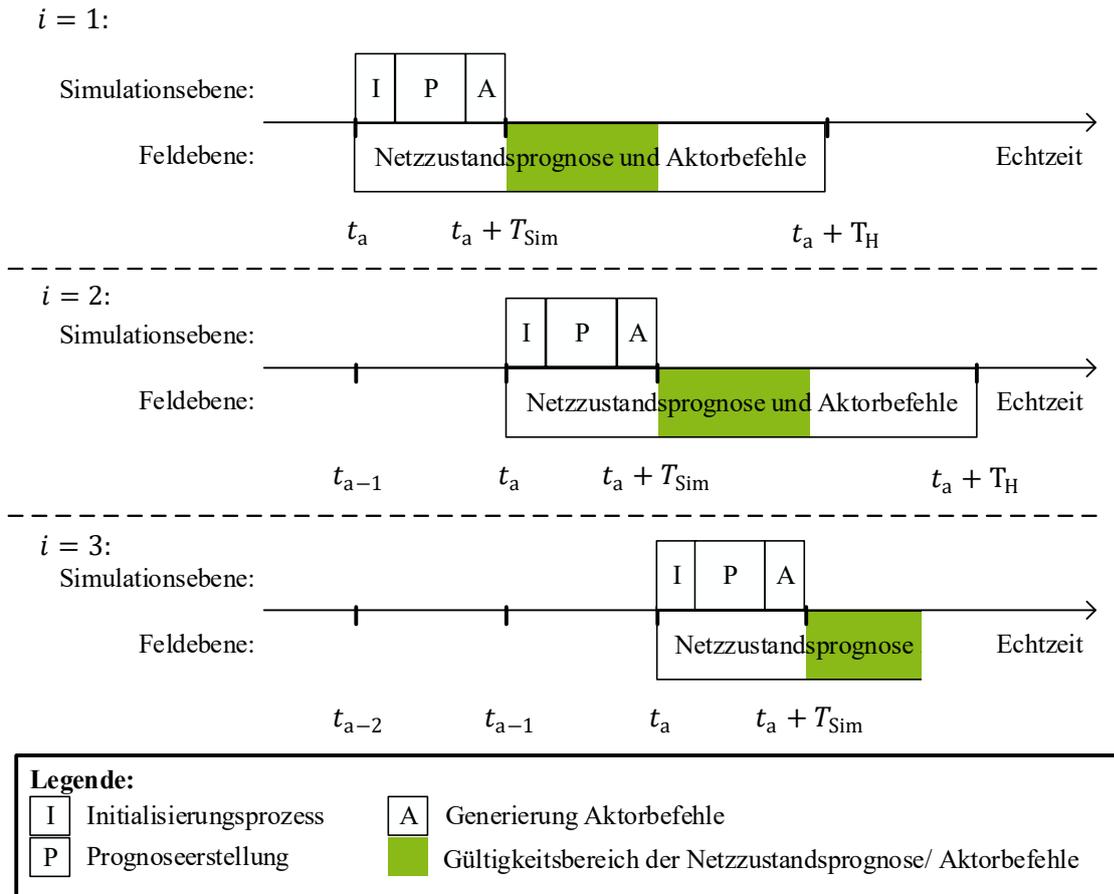


Abbildung 3-14: Erstellung und Überschreibung vorheriger Netzzustandsprognosen und Aktorbefehle

### 3.5.2 Prognoseerstellung

Nachfolgend findet eine komponentenweise Betrachtung der Prognoseerstellung statt, indem jedoch der Fokus verstärkt auf die Batterie-/Oberleitungsbusse gelegt wird. Anschließend finden zusätzliche Betrachtungen hinsichtlich der Prognoseerstellung weiterer Netzteilnehmer (Elektromobilität und Photovoltaikanlagen) statt.

#### Batterie-/Oberleitungsbusse

Batterie-/Oberleitungsbusse stellen aufgrund der hohen Traktions- und Batterieladeleistung die bedeutendste und unkalkulierbarste Netzlast im Oberleitungsbussystem dar. Daraus folgt, dass eine Determinierung der zukünftigen Traktions- und Batterieladeleistung essenziell ist und unterschiedliche Annahmen erhebliche Auswirkungen auf die Abweichung zwischen der Netzzustandsprognose und dem tatsächlichen Netzzustand bedeuten. Damit stellen die Batterie-/Oberleitungsbusse die einflussreichste Komponente im Oberleitungsbussystem dar, weshalb eine präzise Leistungsprognose der Batterie-/Oberleitungsbusse den wichtigsten Bestandteil der Netzzustandsprognose darstellt. Ausgehend von der Messwert-Schätzung für Batterie-/Oberleitungsbusse (Abschnitt 3.4.4) steht eine valide oder geschätzte Busposition und -leistung zur Verfügung. Diese Leistung kann über das Oberleitungsnetz oder bei Batterie-/Oberleitungsbusen über die integrierte Busbatterie bereitgestellt werden.

Abbildung 3-15 zeigt ähnlich zu Abbildung 3-10, dass der Batterie-Oberleitungsbus auf den letzten Halteknoten (z. B. Bushaltestelle) zurückgesetzt wird und ab diesen Punkt, mittels der im Abschnitt 3.3 vorgestellten Oberleitungsbussystem-Simulation, sowohl zurückliegende als auch zukünftige Werte simuliert werden. Diese Vorgehensweise wird gemacht, da das Fahrverhalten (folglich das Geschwindigkeits- und Leistungsprofil) der Busse standardisiert ist. Es wird somit von einem definierten Ausgangspunkt (in der Abbildung: Halteknoten 1) gestartet. Es folgt neben einer Positionierung der Batterie-/Oberleitungsbusse im Verkehrsnetz zusätzlich eine zeitliche Positionierung der Batterie-/Oberleitungsbusse im Busumlaufplan. Eine durch valide Messwerte erfasste Verzögerung zum Busumlaufplan fließt folglich in die zeitliche Positionierung der Batterie-/Oberleitungsbusse ein. Da für die Oberleitungsbussystem-Simulation [19] und folglich ebenfalls für die Prognoseerstellung interne Simulationsparameter wie Fahrmodus und Geschwindigkeit notwendig sind, startet eine Simulation für jeden Batterie-Oberleitungsbus vom letzten Halteknoten (hier: Halteknoten 1) aus bis zum Zeitpunkt des aktuellen Messwertes. Dabei können kleine Abweichungen (z. B. beim Ladezustand der Busbatterie) zwischen den simulierten Werten und den validen, aktuellen Messwerten auftreten, die auf Unterschiede in der realen und simulierten Busbewegung zurückzuführen sind.

Die exemplarische Prognoseerstellung in Abbildung 3-15 ermittelt zukünftige Standorte, Leistungen und Ladezustände aller im Oberleitungsbussystem befindlichen Batterie-/Oberleitungsbusse. Dabei erstellt die Oberleitungsbussystem-Simulation im ersten Schritt ein standardisiertes Geschwindigkeitsprofil zwischen zwei Halteknoten. Aufbauend wird die elektrische Leistung determiniert, welche ein Resultat aus dem Geschwindigkeitsprofil ist. Zwischen Halteknoten 1 und Halteknoten 2 ist der Batterie-Oberleitungsbus mit dem Fahrdrat verbunden, sodass keine Leistung aus der Batterie beansprucht wird. Da die Batterie vollständig geladen ist, entspricht der Leistungsbezug aus der Oberleitung der elektrischen Traktionsleistung des Batterie-Oberleitungsbusse. Das Weiteren findet in der exemplarischen Prognoseerstellung am zweiten Halteknoten ein Abdratvorgang des Batterie-Oberleitungsbusse statt, da nachfolgende Zweige ohne Oberleitung ausgestattet sind. Der Batterie-Betrieb des Batterie-Oberleitungsbusse wird aktiviert. Der Energiebezug – beim Bremsvorgang die Energieeinspeisung – wechselt infolgedessen von der Oberleitung hin zur Batterie, resultierend in einem überwiegend sinkenden Batterie-Ladezustand. Die im Vorfeld definierte Prognosedauer stellt den Simulationshorizont ab Zeitpunkt des aktuellen Messwertes dar, wobei der tatsächliche Simulationshorizont abhängig vom letzten Haltepunkt ist.

Weitere Parameter der Batterie-/Oberleitungsbusse (Stromstärke und Spannung) werden – soweit nicht als Messwert vorhanden und valide – durch die Determinierung des aktuellen Netzzustandes (Abschnitt 3.5.3) des Oberleitungsbussystems determiniert, indem die berechneten Leistungen aller Batterie-/Oberleitungsbusse in die nachgelagerte und für jeden Simulationsschritt durchgeführte Leistungsflussberechnung mit einfließen.

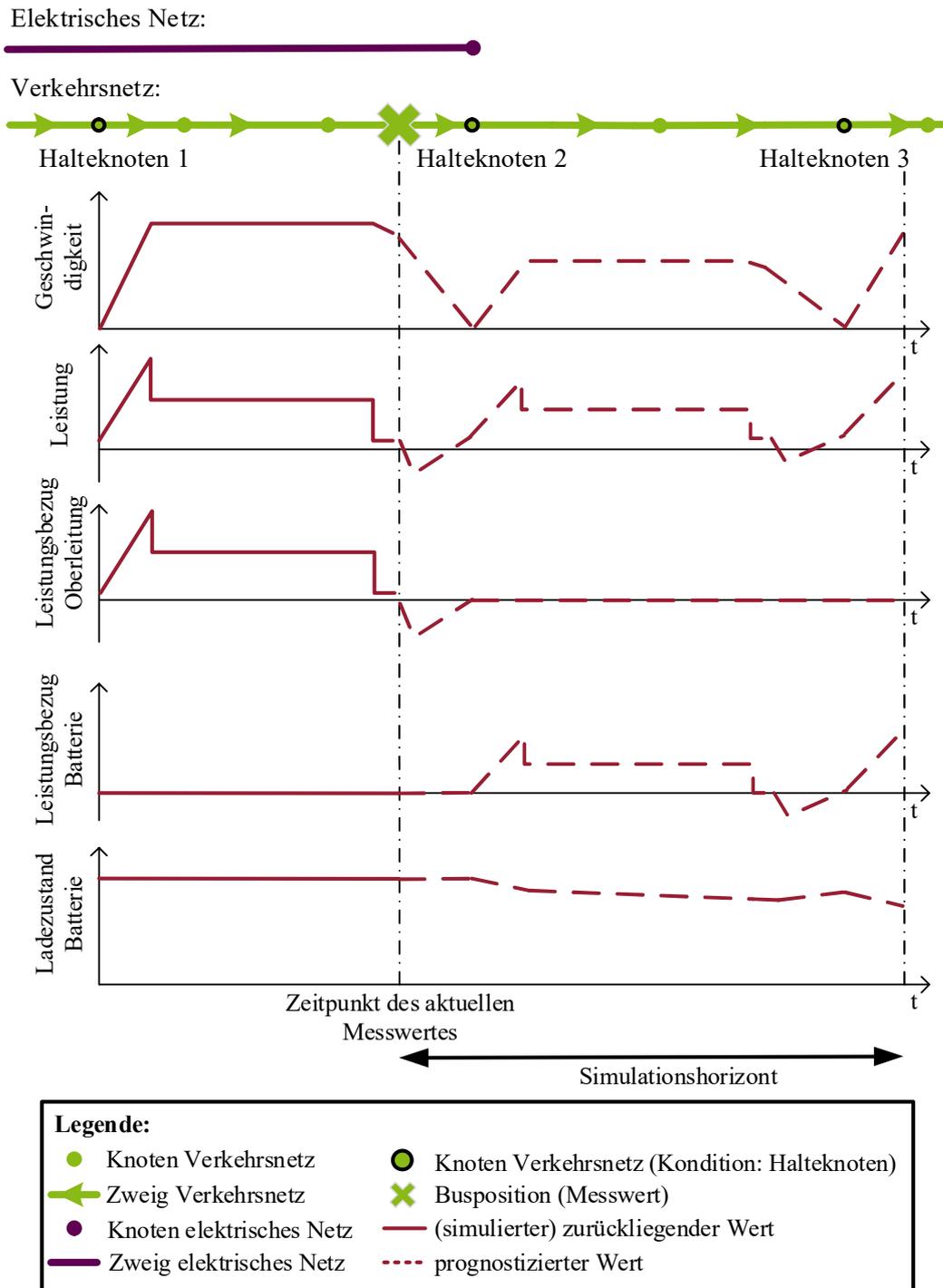


Abbildung 3-15: Exemplarische Prognoseerstellung eines Batterie-Oberleitungsbusses

Dienen Batterie-Oberleitungsbusse als Aktoren im Oberleitungsnetz, setzen diese Regelbefehle aus der prädiktiven Regelung um [48]. Diese Regelbefehle, beispielsweise angedrahteter Batterie-Oberleitungsbuss im Batterie-Betrieb, müssen ebenfalls in der Prognoseerstellung berücksichtigt werden, da die Regelbefehle u. a. Leistung und Batterie-Ladezustand beeinflussen.

### Elektromobilität

Im Bereich der Elektromobilität findet ebenfalls eine Prognoseerstellung statt, da Ladestationen, welche direkt mit dem Oberleitungsnetz elektrisch verbunden sind, einen direkten Einfluss auf

den resultierenden Netzzustand haben. Dabei wird anhand der validen Messwerte ( $P_{EV i}$  und  $\Delta t_{EV i}$ ) entschieden, ob ein Elektrofahrzeug angeschlossen ist und ein Ladevorgang, welcher sich durch einen Leistungsbezug aus dem Oberleitungsnetz nachweisen lässt, erkennbar ist.

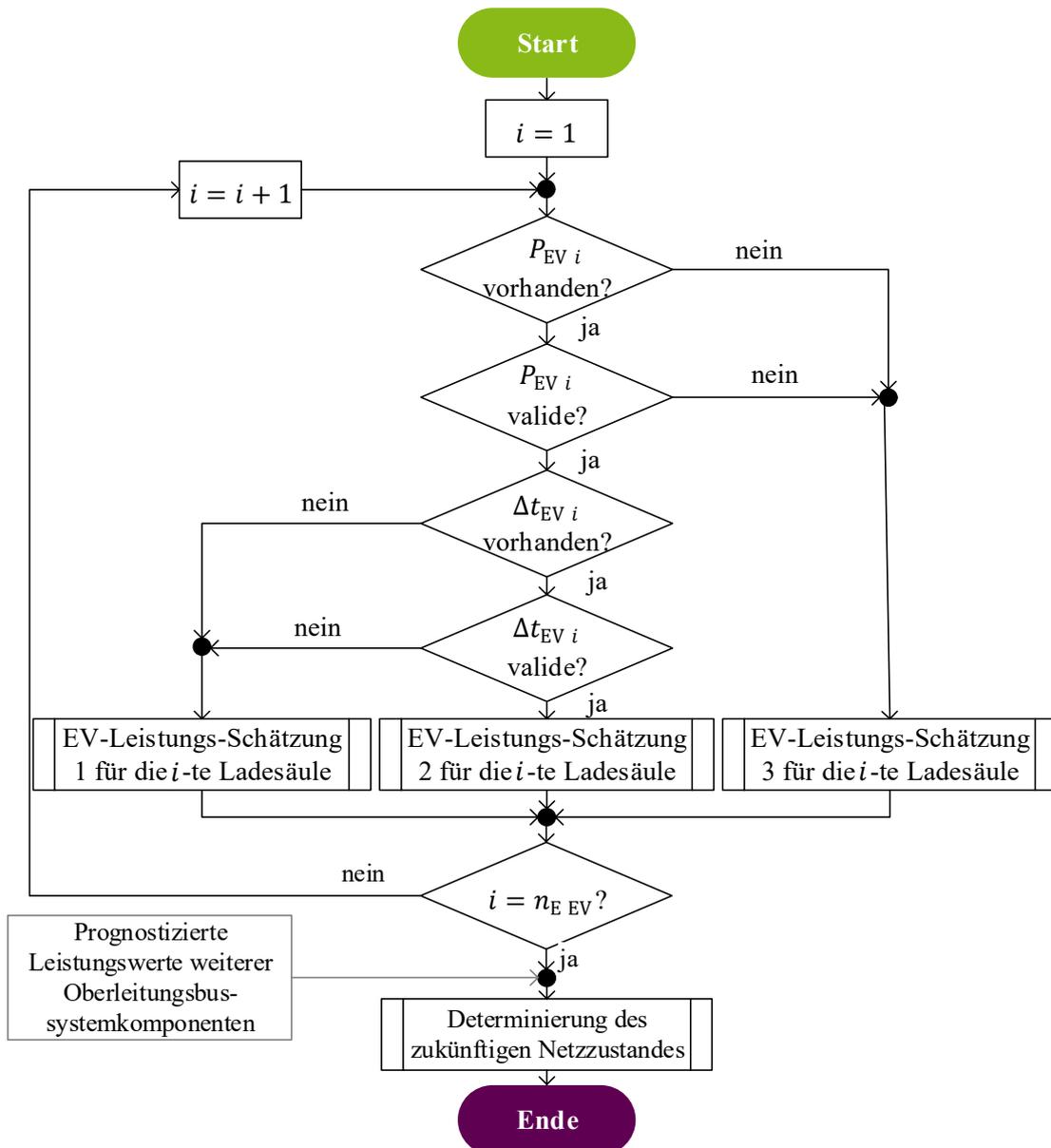


Abbildung 3-16: Prognosekonzept Elektromobilität

Bei nicht übermitteltem Ladezustand bzw. ausstehender Ladedauer  $\Delta t_{EV i}$  der Batterie des angeschlossenen Elektrofahrzeuges an einer entsprechenden Ladestation und validem Leistungsmesswert  $P_{EV i}$ , wird EV-Leistungs-Schätzung 1 durchgeführt. Die Prognoseerstellung ermittelt ein konstantes Leistungsprofil, indem der Ladevorgang bis zum Ende des Simulationshorizontes ( $t_a + T_H$ ) extrapoliert wird (siehe Abbildung 3-17).

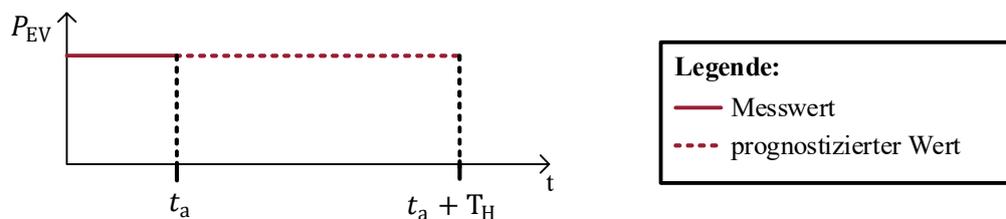
Weitere Effekte (z. B. Leistungsbezug eines angeschlossenen Elektrofahrzeuges durch Vorheizen) werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit vernachlässigt, da solche Leistungsbezüge im Vergleich zum Leistungsbezug eines Batterie-/Oberleitungsbusses nicht signifikant sind.

Die zweite EV-Leistungs-Schätzung basiert auf validen Leistungsmesswerten  $P_{EV i}$ , jedoch ist nun  $\Delta t_{EV i}$  ebenfalls valide. Anschließend wird die linearisierte Ladeleistung konstant bis zum Ende der ausstehenden Ladedauer ( $t_a + \Delta t_{EV i}$ ) angenommen. Die ausstehende Ladedauer  $\Delta t_{EV}$  wird bei Bedarf über den ermittelten Ladezustand  $SoC_{EV i}$  unter Berücksichtigung von  $P_{EV i}$  ermittelt.

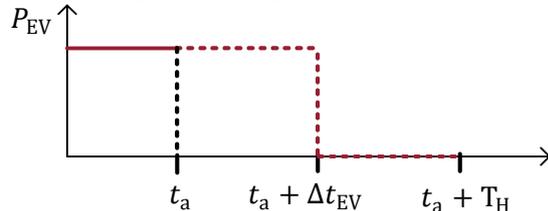
Liegen keine validen Messwerte vor, werden ebenfalls nach [101] Leistungswerte für den gesamten Simulationshorizont prognostiziert (EV-Leistungs-Schätzung 3). Dabei werden Fahrprofile von Elektrofahrzeugen ermittelt, die wiederum in einer EV-Leistungs-Schätzung resultieren.

Diese Vorgehensweise wird schrittweise ( $i$ ) für sämtliche Ladesäulen für Elektrofahrzeuge  $n_{EV}$  ausgeführt, ehe die geschätzten Leistungen oder validen Messwerte  $P_{EV i}$  in die Determinierung des zukünftigen Netzzustandes einfließen. Abbildung 3-17 visualisiert die drei EV-Leistungs-Schätzungen, indem exemplarische Ladeleistungen visualisiert werden.

#### EV-Leistungs-Schätzung 1:



#### EV-Leistungs-Schätzung 2:



#### EV-Leistungs-Schätzung 3:

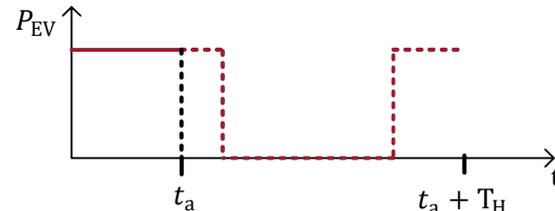


Abbildung 3-17: Beispielhafte Leistungs-Schätzungen der drei unterschiedlichen Ladeleistungsschätzungen für Ladesäulen für Elektrofahrzeuge

### Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen werden mittels Gleichspannungswandler an das Oberleitungssystem angebunden, sodass Batterie-/Oberleitungsbusse oder Ladesäulen für die Elektromobilität die erzeugte elektrische Energie der Photovoltaikanlagen lokal und somit mit minimalen Übertragungsverlusten in weitere Energieformen umgewandelt werden können. Darüber hinaus korrelieren die Energieerzeugungszeiten der Photovoltaikanlage grundsätzlich gut mit den Busumlaufplänen.

Abbildung 3-18 zeigt den Ablauf der Prognoseerstellung der systemzugehörigen Photovoltaikanlagen. Bei vorhandenen und validen Leistungsmesswerten der Photovoltaikanlagen, findet PV-Leistungs-Schätzung 1 Anwendung. Diese Prognoseerstellung der Photovoltaikanlagen basiert auf einer linearen Extrapolation der Einspeiseleistung der bisherigen validen Messwerte. Damit werden Rückschlüsse bisheriger Einspeiseleistungen auf zukünftige Einspeiseleistungen gebildet. Beispielsweise wird somit bei Sonnenaufgang eine steigende Einspeiseleistung prognostiziert. Die lineare Extrapolation erfolgt mittels linearer Einfachregression die zuvor empfangenen und validen Messwerte. Diese liefern einen Achsenabschnitt und eine Steigung, sodass zukünftige Messwerte anhand dieser Gleichung prognostiziert werden. Als Grenzwerte dienen zusätzlich die Bemessungsleistung (maximale Einspeiseleistung der Photovoltaikanlage) sowie  $P_{PV i} = 0 W$ , wenn keine Einspeisung stattfindet.

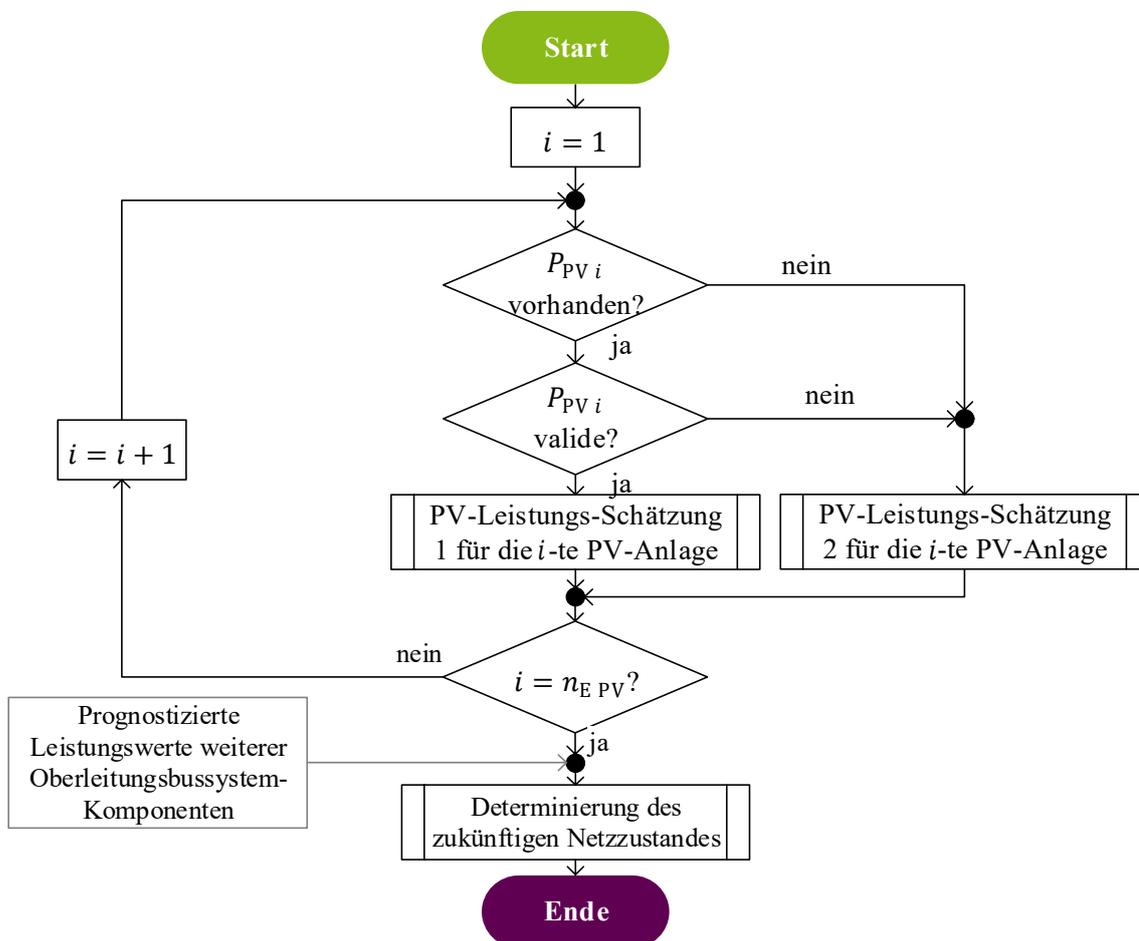


Abbildung 3-18: Prognosekonzept Photovoltaikanlagen

Liegen keine validen Messwerte vor, werden automatisiert Leistungswerte nach [24] anhand verschiedener Parameter (u. a. Uhrzeit, Standort und historischen Einspeisedaten) Einspeiseleistungen erzeugt. Dabei wird ein ideales PV-Leistungsprofil für den aktuellen Standort bestimmt und historische Einspeisedaten reduzieren das ideale PV-Leistungsprofil, indem ein Bewölkungsfaktor anhand der Einspeisedaten determiniert und anschließend übertragen wird.

Diese Vorgehensweise wird schrittweise ( $i$ ) für sämtliche Photovoltaikanlagen  $n_{E\ PV}$  ausgeführt, ehe die geschätzten Leistungen oder validen Messwerte  $P_{PV\ i}$  in die Determinierung des zukünftigen Netzzustandes einfließen.

### 3.5.3 Determinierung des zukünftigen Netzzustandes

Als Grundlage zur Determinierung des zukünftigen Netzzustandes dient die Determinierung des aktuellen Netzzustandes, welche im Abschnitt 3.4.5 erläutert wird. Der zukünftige Netzzustand beinhaltet Netzzustände für jeden Zeitschritt  $t$ , beginnend mit dem aktuellsten Zeitschritt ( $t_a$ ) bis hin zum Zeitpunkt  $t_a + T_H$ , wobei  $T_H$  als Simulationshorizont definiert ist. Abbildung 3-19 stellt den erweiterten Prozess dar. Dabei stellt der „aktuelle“ Netzzustand in diesem Fall den prognostizierten, zukünftigen Netzzustand im Zeitschritt  $t$  dar.

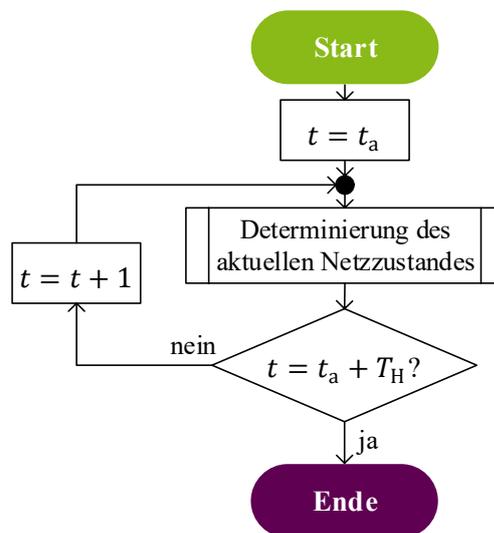


Abbildung 3-19: Determinierung des zukünftigen Netzzustandes

## 3.6 Prädiktive Netzzustandsregelung

Die Erstellung einer Netzzustandsprognose dient dazu – mittels der prädiktiven Regelung aus [48] – kritische Netzzustände im Oberleitungsbussystem vorzubeugen. Abbildung 3-20 stellt das Gesamtkonzept der prädiktiven Regelung des intelligenten Netzleitsystems dar.

Initial findet eine virtuelle Netzzonenpartitionierung<sup>20</sup> statt, bevor repetitiv die vorgestellte Netzzustandsprognose eingelesen wird. Die Netzzustandsprognose übergibt für jeden Zeitschritt im Prognosehorizont einen Netzzustand des Oberleitungsbussystems, welcher anschließend bewertet wird, sodass u. a. Grenzwertverletzungen determiniert und auf ihre Kritikalität hin bewertet werden.

<sup>20</sup> Aufteilung des Oberleitungsnetzes in virtuellen Netzzonen. Eine virtuelle Netzzone stellt dabei ein Gebiet zwischen Gleichrichter-Unterwerken dar.

Nach ausgeführter Netzzustandsbewertung erfolgt die Netzzustandsregelung, welche eingangs eine Analyse der Aktorik erstellt. Für jeden im Oberleitungsnetz befindlichen Aktor wird folgerichtig eine Flexibilität determiniert, welche nach der Priorisierung der Aktoren maßgeblich für die Berechnung der Aktorstellgröße verantwortlich ist. Dabei können unterschiedliche Zielfunktionen ausgewählt werden. Neben einer kostenoptimierten oder netzdienlichen Zielfunktion, steht ebenfalls eine energieeffiziente Optimierung zur Verfügung. Nach einer Verifikation wird die Ausgabe der Regelbefehle eingeleitet, sodass alle im Oberleitungsnetz befindliche Aktoren ihre zugehörigen Regelbefehle erhalten und umsetzen können.

Darüber hinaus muss eine Rückkopplung zur Prognoseerstellung erfolgen, sodass die Prognoseerstellung ebenfalls die generierten Aktorbefehle bei Erstellung einer erneuten Prognose berücksichtigt. Eine detaillierte Beschreibung der prädiktiven Netzzustandsregelung beschreibt [48].

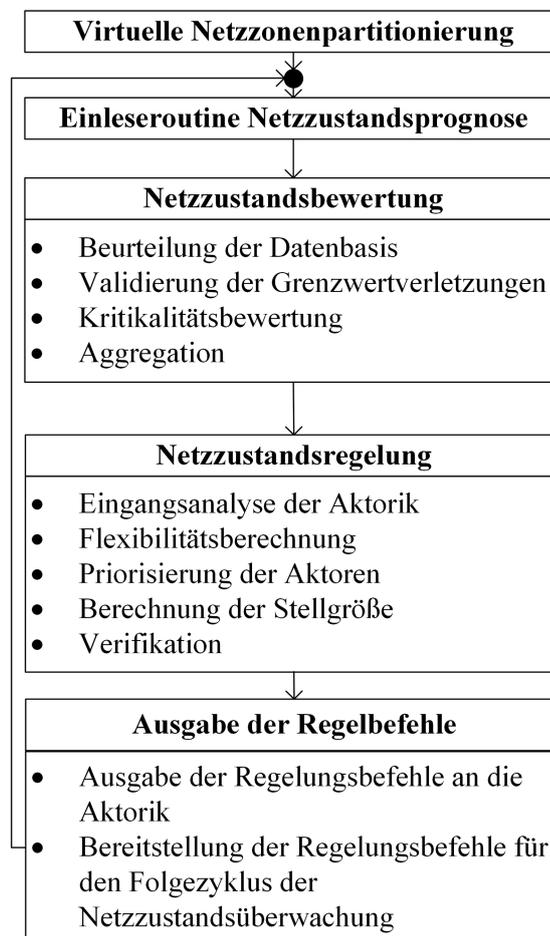


Abbildung 3-20: Gesamtkonzept der Netzzustandsregelung und -optimierung (inkl. Netzzustandsbewertung)



## 4 Evaluation und Validierung des Netzleitsystems

Das erarbeitete Konzept des Netzleitsystems wird im Folgenden anhand eines Labortestes validiert. Dazu beschreibt Abschnitt 4.1 den dazugehörigen Labortestaufbau. Durchgeführte Messfahrten von Batterie-Oberleitungsbussen dienen zusätzlich als Messwertgeber. Abschnitt 4.2 führt aufbauend eine simultorische Analyse durch, sodass wesentliche Einflussfaktoren auf die erstellte Netzzustandsprognose determiniert werden können. Nachdem Abschnitt 4.3 die allgemeine Prognosegüte der Netzzustandsprognose ermittelt, beinhaltet Abschnitt 4.4 eine abschließende Bewertung des vorgestellten Verfahrens.

### 4.1 Labortestaufbau und Integration von Messdaten

Der für die Validierung und Evaluation notwendige Labortestaufbau wird durch Abbildung 3-2 beschrieben:

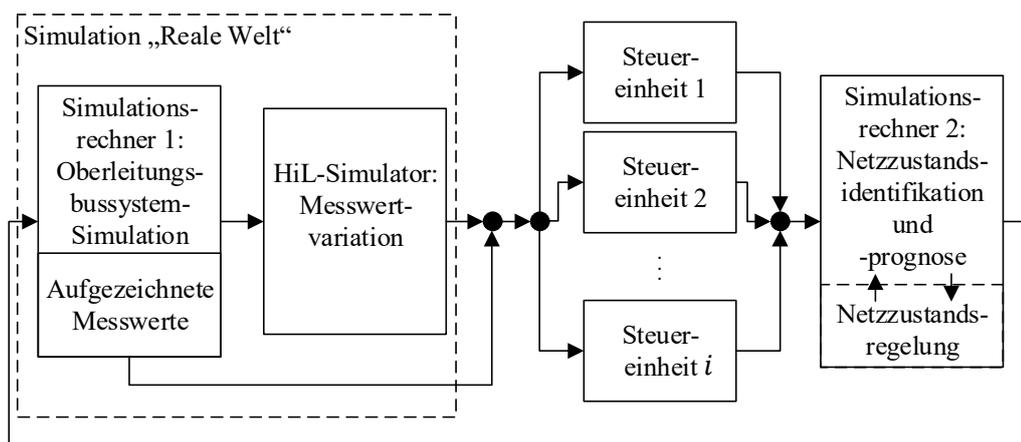


Abbildung 4-1: Labortestaufbau

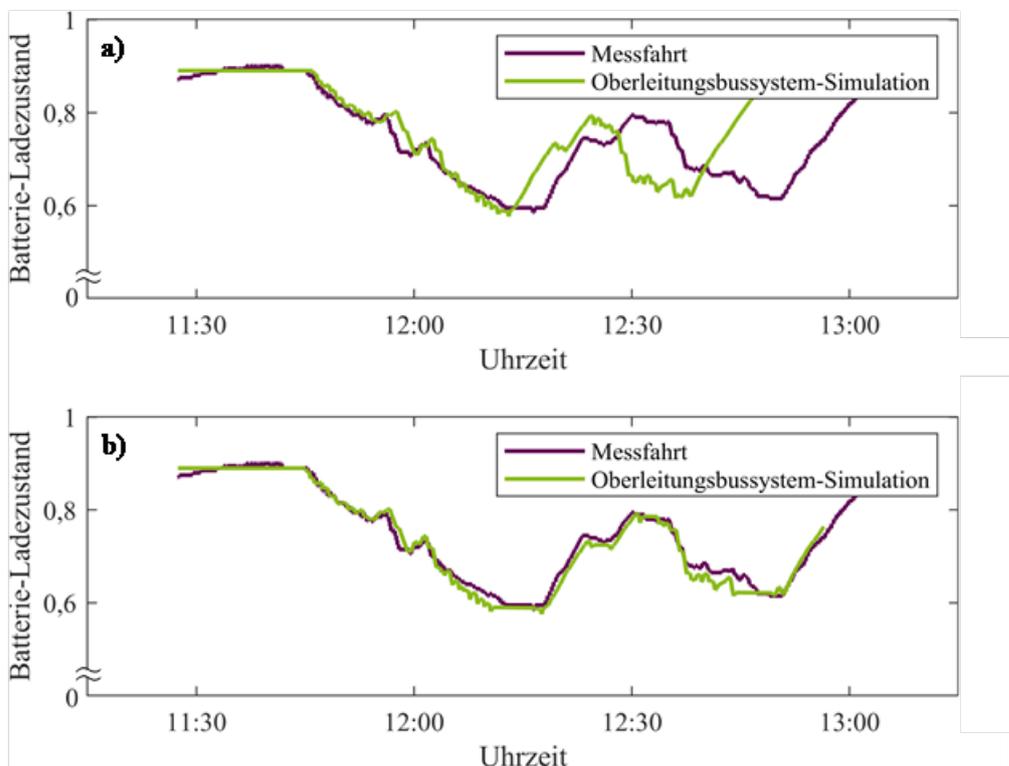
Während Simulationsrechner 1 die adaptierte, echtzeitfähige Oberleitungsbussystem-Simulation ausführt, um sekundliche Messwerte (ohne Messwert-Variation) zu generieren, erfolgt die Übermittlung dieser Messwerte zum HiL-Simulator<sup>21</sup>. Dieser dient dazu die empfangenden Messwerte nach Abschnitt 3.3 zu variieren, um realitätsnahe Messwerte (inkl. Toleranzen und nicht validen Messwerten) zu generieren.

Die mit dem HiL-Simulator verbundenen Steuereinheiten repräsentieren einen Bestandteil der Zielhardware der Batterie-/Oberleitungsbusse, Photovoltaikanlagen und Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Dieser Bestandteil führt Rechenoperationen (z. B. Messwert-Mittelwertbildung in der Feldebene) aus und steuert anschließend die Zielhardware (z. B. Leistungsreduktion einer Ladesäule für Elektrofahrzeuge).

<sup>21</sup> Hardware in the Loop-Simulator

Jede Steuereinheit erhält folglich die für ihre Komponente sekundlich, generierten Messdaten aus der Oberleitungsbussystem-Simulation (siehe Abschnitt 3.4.2), welche mittels des HiL-Simulators variiert wurden. Simulationsrechner 2 beinhaltet die vorgestellten drei Teilaufgaben des intelligenten Netzleitsystems (Netzzustandsidentifikation, –prognose sowie –regelung), wobei die (prädiktive) Netzzustandsregelung im Folgenden aus dem Fokus rückt, da diese gesondert in [48] behandelt wird. Alle in Abbildung 3-2 eingeführten Bestandteile des Labortestaufbau sind physische Geräte, jedoch kann Simulationsrechner 1 und der HiL-Simulator durch Messwerte aus der realen Welt vollständig ersetzt werden.

Des Weiteren werden für die Evaluation und die Validierung des Netzleitsystems aufgezeichnete Messwerte eines Batterie-Oberleitungsbusses in den Labortestaufbau integriert, indem der Simulationsrechner 1 diese gesondert an die Steuereinheiten direkt überträgt. Dabei zeigt Abbildung 4-2 einen Vergleich der Messfahrt mit der vorgestellten Oberleitungsbussystem-Simulation. Im oberen Diagramm (Abbildung 4-2 a)) wird der Ladezustandsverlauf der Batterie-Oberleitungsbussbatterie verglichen. Es fällt auf, dass neben einem zeitlichen Versatz der Ladezustand von der Oberleitungsbussystem-Simulation mit einer hohen Güte simuliert und somit ebenfalls prognostiziert werden kann. Der zeitliche Versatz zum Busumlaufplan stellte sich in der Messfahrt durch mehrere Unwägbarkeiten (u. a. hohe Verkehrsdichte, Arbeitsstellen und separater Halt zur Überprüfung der Klimaanlage) ein.



**Abbildung 4-2:** a) Ladezustandsvergleich der Batterie-Oberleitungsbussbatterie zwischen Messfahrt und Oberleitungsbussystem-Simulation (ohne Wartezeitanpassung)  
 b) Ladezustandsvergleich der Batterie-Oberleitungsbussbatterie zwischen Messfahrt und Oberleitungsbussystem-Simulation (mit Wartezeitanpassung)

Der Ladezustandsverlauf lässt sich im Vergleich zur Leistungsaufnahme eines Batterie-Oberleitungsbusses unkomplizierter bestimmen, da lediglich die Energiebilanz übereinstimmen muss. Da der Oberleitungsbussystem-Netzzustand jedoch von der beanspruchten Leistung der Batterie-Oberleitungsbusse abhängt, muss diese ebenfalls mit einer ausreichenden Güte prognostiziert werden. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Messfahrten von Batterie-/Oberleitungsbussen aufgenommen. Abbildung 4-3 a) zeigt den Leistungsbezugsvergleich zwischen einer Messfahrt und der Oberleitungsbussystem-Simulation. Während Wartezeiten (u. a. an einer Lichtsignalanlage) nicht sekundengenau vorausbestimmbar sind und das Batterie-Oberleitungsbuss-Leistungsprofil der Oberleitungsbussystem-Simulation deutlich homogener als das tatsächliche ist, findet in Abbildung 4-3 b) eine Betrachtung des gleitenden, arithmetischen Mittelwertes  $SMA_k$  statt:

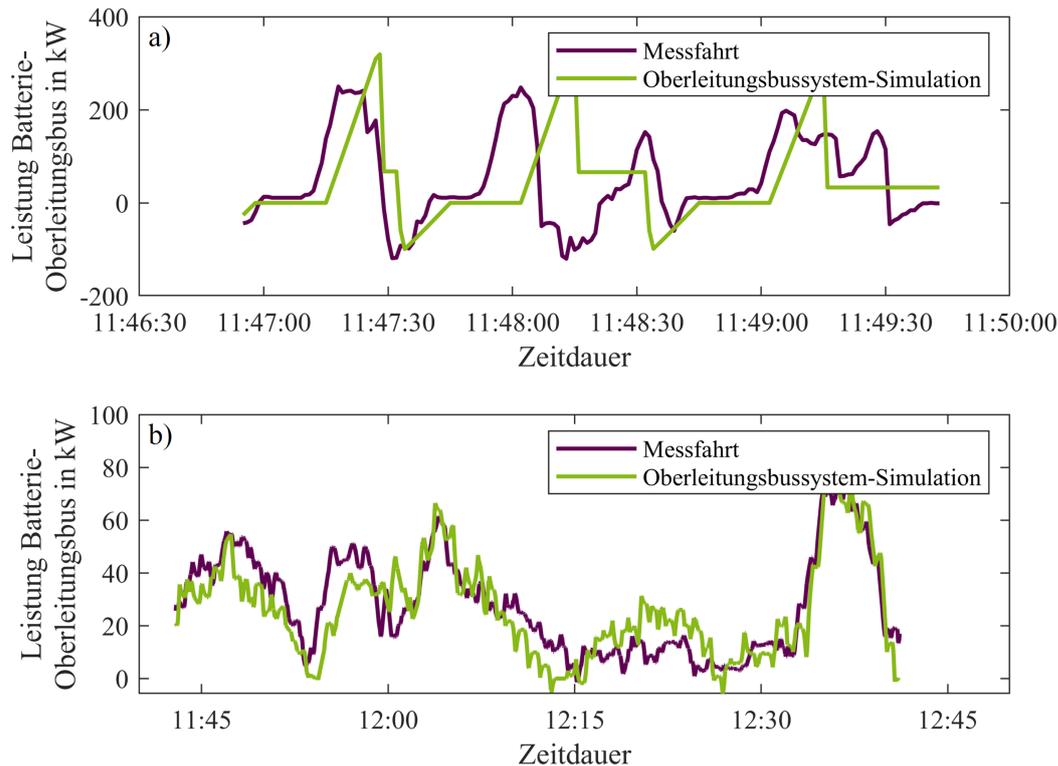
$$SMA_k = \frac{1}{k_{SMA}} \cdot \sum_{i=n_{SMA}-k+1}^{n_{SMA}} p_{SMA,i} \quad (4.1)$$

wobei

- $k_{SMA}$  die Anzahl aufeinanderfolgender Datenpunkte, dessen arithmetischer Mittelwert gebildet wird,
- $i$  eine Laufvariable der Summe
- $n_{SMA}$  die Anzahl aller Datenpunkte
- $p_{SMA,i}$  die Messpunkte
- $SMA$  den gleitenden, arithmetischen Mittelwert (**s**imple **m**oving **a**verage)

darstellen.

Während in Abbildung 4-3 a) zur besseren Übersicht ein kleineres Zeitfenster gewählt wurde, stellt Abbildung 4-3 b) ein deutlich größeres Zeitfenster dar, da die Betrachtung des gleitenden, arithmetischen Mittelwertes eine Dämpfung der Leistungskurve zur Folge hat. Der resultierende und vorwiegend von topografischen Gegebenheiten abhängige Leistungsbezug lässt sich anschließend mit den Daten aus der Messfahrt vergleichen und zeigt auf, dass die Oberleitungsbussystem-Simulation für die Bestimmung der Prognosegüte sowie die Analyse von Einflussfaktoren verwendet werden kann. Während im sekundlichen Vergleich deutliche Abweichungen auftreten, weist der gleitende, arithmetische Mittelwert eine deutlich erhöhte Güte auf.



**Abbildung 4-3:** a) Vergleich des Leistungsbezuges eines Batterie-Oberleitungsbusses zwischen Messfahrt und Oberleitungsbussystem-Simulation (ohne gleitenden, arithmetischen Mittelwert)  
b) Vergleich des Leistungsbezuges eines Batterie-Oberleitungsbusses zwischen Messfahrt und Oberleitungsbussystem-Simulation (mit gleitendem, arithmetischem Mittelwert)

## 4.2 Simulatorische Analyse von Einflussfaktoren

Die Netzzustandsprognose von Oberleitungsbussystemen ist von vielen Faktoren abhängig. Neben einer möglichst akkurat erfassten Verzögerung gegenüber dem Busumlaufplan nehmen unterschiedliche Faktoren Einfluss auf die Güte der Netzzustandsprognose.

Im Folgenden werden die drei wichtigsten Einflussfaktoren untersucht:

- **Standortgenauigkeit** der Batterie-Oberleitungsbusse
- **Max. Messfehler** weiterer, relevanter Messeinrichtungen
- **Sendetakt** der Batterie-Oberleitungsbuss-Messdaten an das Netzleitsystem

Der Zeithorizont bildet ebenfalls einen wichtigen Einflussfaktor auf die Prognosegüte ab und wird ausführlich im Abschnitt 4.3 bei der allgemeinen Gütebestimmung behandelt.

Zur Bewertung der Netzzustandsprognose wird der Key Performance Indicator (KPI) des relativen Spannungsfehlers  $f_{U \text{ rel}}$  eingeführt, welcher wie folgt definiert ist:

$$f_{U \text{ rel}} = \frac{100 \%}{n_E \cdot u_{i \text{ ref}}} \sum_{i=1}^{n_E} |\tilde{u}_i - u_{i \text{ ref}}| \quad (4.2)$$

wobei

- $U_{\text{ref}}$  der Referenzwert der Spannung
- $n_E$  die elektrische Knotenanzahl
- $\tilde{u}_i$  den prognostizierten Spannungswert am elektrischen Knoten  $i$
- $u_{i \text{ ref}}$  den Referenzwert der Spannung am elektrischen Knoten  $i$
- $i$  eine Laufvariable der Summe

darstellen. Zusätzlich dazu wird der relative Stromfehler  $f_{I \text{ rel}}$  eingeführt. Dabei wird der relative Stromfehler nicht auf den wahren Wert (Referenzwert des Stromes  $i_{k \text{ ref}}$ ) bezogen, sondern auf die Dauerstromtragfähigkeit  $i_{k \text{ d FD}}$ . Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass der relative Stromfehler bei kleinen Strömen nicht zu stark ansteigt und ist zulässig, da die Netzzustandsregelung ausschließlich bei großen Strömen eingreift.

$$f_{I \text{ rel}} = \frac{100 \%}{n_{EE}} \sum_{k=1}^{n_{EE}} \frac{|\tilde{i}_k - i_{k \text{ ref}}|}{i_{k \text{ d FD}}} \quad (4.3)$$

wobei

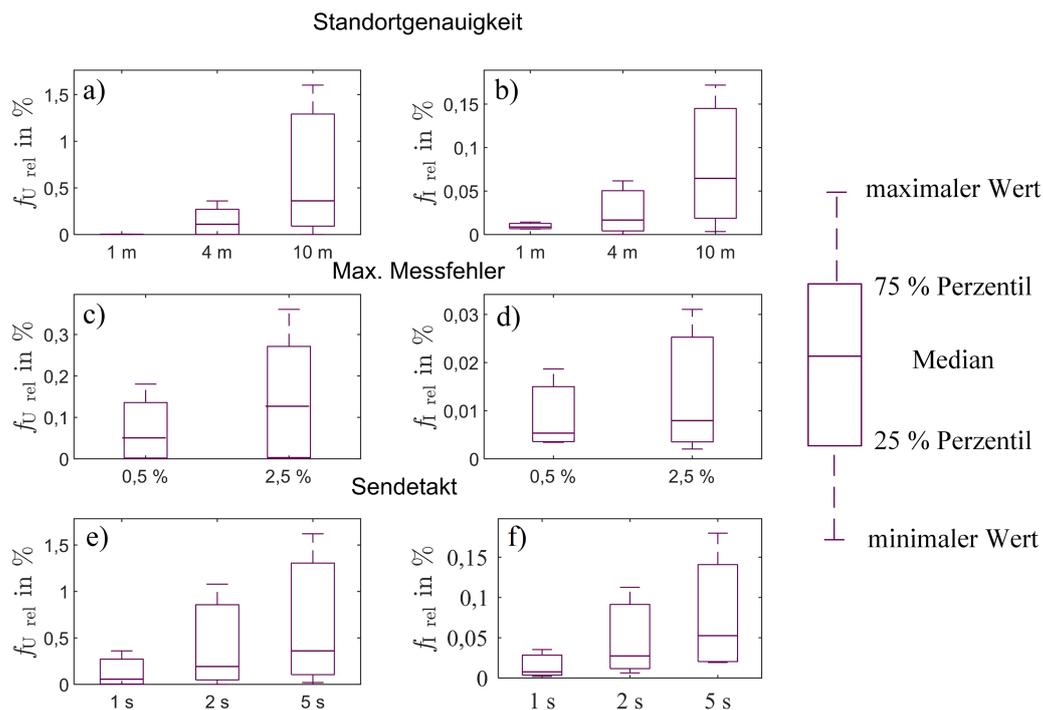
- $n_{EE}$  die elektrische Zweiganzahl
- $\tilde{i}_k$  den prognostizierten Stromwert durch den elektrischen Zweig  $k$
- $i_{k \text{ ref}}$  den Referenzwert des Stroms durch den elektrischen Zweig  $k$
- $i_{k \text{ d FD}}$  die Dauerstromtragfähigkeit des elektrischen Zweiges  $k$
- $k$  eine Laufvariable der Summe

darstellen.

Für die nachfolgende Analyse der Einflussfaktoren werden zunächst keine aufgezeichneten Messwerte integriert. Es wird lediglich die Oberleitungsbussystem-Simulation verwendet. Dabei werden auf dem Simulationsrechner 1 Messwerte erzeugt. Eine Messwert Variation findet hier nur für den ausgewählten Einflussfaktor statt. Alle weiteren Einflussfaktoren, die hier nicht untersucht werden, werden zwischen Simulationsrechner 1 und Simulationsrechner 2 synchronisiert. Das bedeutet, dass beispielsweise Wartezeiten an Ampeln oder Bushaltstellen auf beiden Simulationsrechner identisch sind. Dadurch wird ausschlich der Effekt der Einflussgröße determiniert.

Abbildung 4-4 zeigt die Einflussanalyse dreier unterschiedlicher Faktoren. Zuerst wurde die Standortgenauigkeit (Grafiken a) und b)) der Busmessung untersucht. Während das Global Positioning System (GPS) ursprünglich eine Genauigkeit von 100 Metern aufwies, wurde durch das Abschalten der künstlichen Signalverschlechterung im Jahr 2000 die Genauigkeit gesteigert, sodass 90 % aller Messungen eine Genauigkeit von mindestens 10 Metern aufweisen [102]. Das globale Navigationssatellitensystem Galileo soll in der frei zugänglichen Version eine Genauigkeit von ca. vier Metern erzielen. Darüber hinaus lässt sich die Genauigkeit gegen eine Gebühr steigern, sodass Genauigkeiten von unter einem Meter erreicht werden [103]. Die

Standortgenauigkeit ist ein ausschlaggebender Faktor. Während bei der Positionierung der Busse (Abschnitt 3.4.4) zwar nur relevante Verkehrszweige anhand des Busumlaufplanes betrachtet werden, gibt es beispielsweise keine festdefinierten Streckenverläufe für Leerfahrten (Aus- und Einrück- sowie Überauffahrten). Dadurch können zusätzliche Abweichungen und folglich relative Spannungs- und Stromfehler entstehen. Zusätzlich entstehen Prognosefehler vor allem an Bushaltestellen, da große Ungenauigkeiten zur falschen Positionierung führen, sodass beispielsweise Bushaltestellen durch eine fehlerhafte Positionierung aufgrund unzureichender Standortgenauigkeit „übersprungen“ werden. Eine Verbesserung der Standortgenauigkeit bis hin auf einem Meter resultiert in einer signifikant verbesserten Prognosegüte, da überdies die Busspur präzise determiniert werden kann. Dieser Umstand verbessert die Positionierung erheblich und wirkt sich ebenfalls positiv auf die Leerfahrten aus. Dort sind wie bereits beschrieben keine festdefinierten Streckenverläufe vorhanden, sodass diese Fahrten präzise abgebildet werden können. Während a) relative Spannungsfehler bis ca.  $f_{U\text{rel}} = 1,5\%$  aufzeigt, beinhaltet b) relative Stromfehler bis  $f_{I\text{rel}} = 0,15\%$ . Die geringen relativen Stromfehler sind dadurch zu begründen, dass relativ geringe Ströme in Bezug auf die Dauerstromtragfähigkeit untersucht wurden.



**Abbildung 4-4: Simulatorische Analyse unterschiedlicher Einflussfaktoren auf den relativen Spannungs- $f_{U\text{rel}}$  und Stromfehler  $f_{I\text{rel}}$  (Zeithorizont  $T_H = 5$  Minuten)**

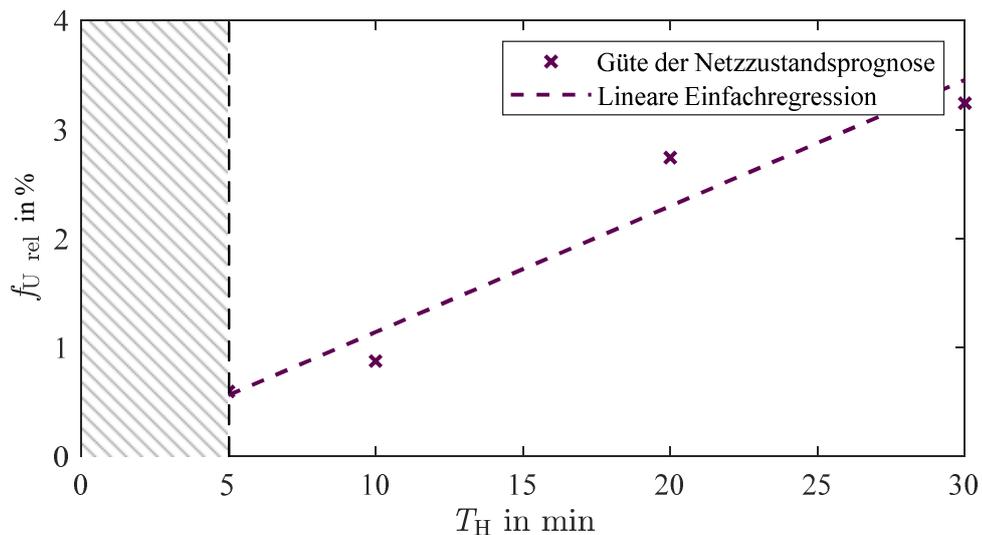
Die Grafiken „Max. Messfehler“ (c) und d)) bezeichnen die Messungenauigkeiten in Prozent der weiteren Übertragungsmessdaten. Darunter sind Strom, Spannung sowie Leistung des Busses zu verstehen. Eine Verbesserung des max. Messfehlers von 2,5 % auf 0,5 % durch entsprechende Sensorik, verbessert zwar die Prognosegüte, jedoch wird deutlich, dass die Standortgenauigkeit

einen viel größeren Einfluss auf die Prognosegüte besitzt. Während relative Spannungsfehler im Bereich bis  $f_{U\text{rel}} = 0,3 \%$  auftreten, liegt der relative Stromfehler bei bis zu  $f_{I\text{rel}} = 0,03 \%$ .

Die letzte Einflussgröße beschreibt den „Sendetakt“ (Grafiken d) und e)), sodass der die Übermittlung der Messwerte von den Batterie-/Oberleitungsbussen zum Netzleitsystem zwischen einer Sekunde, zwei Sekunden und fünf Sekunden variiert wird. Der Einfluss des Sendetaktes liegt auf dem Niveau der Standortgenauigkeit, sodass ein möglichst geringer Sendetakt zu realisieren ist. Der relative Spannungsfehler liegt im Bereich bis  $f_{U\text{rel}} = 1,5 \%$  und der relative Stromfehler liegt bei bis zu  $f_{I\text{rel}} = 0,15 \%$ .

### 4.3 Gütebestimmung

Die Güte der Netzzustandsprognose ist – wie zuvor untersucht – von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig. Für die Bestimmung der Güte der vorgestellten Netzzustandsprognose wird als Bewertungsmaßstab die beschriebene Größe des Spannungsfehlers  $f_{U\text{rel}}$  (Gleichung 4.2) verwendet, da die geringen relativen Stromfehler  $f_{I\text{rel}}$ , aufgrund der relativ geringen Ströme in Bezug auf die Dauerstromtragfähigkeit, nur eine begrenzte Aussagekraft besitzen.



**Abbildung 4-5:** Gütebestimmung der Netzzustandsprognose in Abhängigkeit des Zeithorizontes  $T_H$   
 Schraffierte Fläche: Güte der Netzzustandsprognose konnte in diesem Bereich aufgrund der benötigten Zeitdauern zur Erstellung der Netzzustandsprognose ( $T_{\text{Init}}$  und  $T_{\text{Prog}}$ ) sowie der Aktorbefehlgenerierung ( $T_A$ ) nicht untersucht werden.

Während für Abschnitt 4.2 die Eingabeparameter feste Größen erhalten haben, werden die Eingabeparameter für die nachfolgende Untersuchung variabel gestaltet und die Messwertvariation aller Messwerte aktiviert. Dadurch werden u. a. Wartezeiten an Bushaltestellen und Lichtsignalanlagen probabilistisch determiniert und auf beiden Simulationsrechnern unterschiedlich kalkuliert. Zusätzlich werden aufgezeichnete Messwerte integriert. Im Folgenden wird die Güte des Netzleitsystems unter der Berücksichtigung

verschiedener Zeithorizonte  $T_H$  der Netzzustandsprognose ermittelt. Abbildung 4-5 zeigt den resultierenden durchschnittlichen, relativen Spannungsfehler  $f_{U\text{rel}}$ .

Während ein linearer Trend zwischen des Zeithorizontes  $T_H$  und des durchschnittlichen, relativen Spannungsfehlers zu beobachten ist, lässt sich der Zeithorizont  $T_H$  nicht beliebig weit reduzieren.

Das Netzleitsystem beinhaltet drei – in den Abbildungen 3-13 und 3-14 vorgestellte – Teilaufgaben. Nachdem eine Initialisierung erfolgt ist, wird die Netzzustandsprognose mittels der in [19] erarbeiteten Erkenntnisse generiert, bevor die Aktorbefehlgenerierung aus [48] einsetzt. Die Simulationsdauer  $T_{\text{Sim}}$  setzt sich dabei wie in Gleichung 3.22 bereits gezeigt zusammen aus der Initialisierungsdauer  $T_{\text{Init}}$ , der Netzzustandsprognoseerstellungsdauer  $T_{\text{Prog}}$  und der die Aktorbefehlgenerierungsdauer  $T_A$  zusammen.

Die Zeitdauer der drei genannten Teilaufgaben des Netzleitsystems stellen Funktionen unterschiedlicher Eingabeparameter dar. Neben der Anzahl der Batterie-/Oberleitungsbusse, der Anzahl der Ladestationen für Elektrofahrzeuge und Photovoltaikanlagen fließen ebenfalls die Knoten- und Zweiganzahl (Verkehrs- sowie elektrisches Netz) in die Dauer der Berechnungen mit ein.

$$T_{\text{Sim}} = f(n_E, n_{EE}) \quad (4.4)$$

Dabei muss folgende Bedingung eingehalten werden, um einen ordnungsgemäßen Betrieb des Netzleitsystems zu gewährleisten.

$$T_{\text{Sim}} < T_H \quad (4.5)$$

Typische Dauern für das Solinger Oberleitungsbussystem betragen  $T_{\text{Init}} = 2$  Minuten,  $T_{\text{Prog}} = 1,5$  Minuten (für  $T_H = 5$  Minuten) und  $T_A \leq 0,5$  Minuten, wodurch  $T_{\text{Sim}} \leq 4$  Minuten resultiert. Dadurch startet die Gütebestimmung der Netzzustandsprognose in Abbildung 4-5 inklusive zeitlicher Reserve bei  $T_H = 5$  Minuten (siehe schraffierte Fläche) und ist als Mindestdauer des Zeithorizontes  $T_H$  zu verstehen.

#### 4.4 Bewertung und Grenzen des Verfahrens

Das eingeführte Netzleitsystem bietet die Möglichkeit den Netzzustand eines Oberleitungsbussystems zu determinieren und eine Netzzustandsprognose zu erstellen, welche eine für die nachfolgende prädiktive Netzzustandsregelung ausreichende Güte besitzt.

Die Besonderheit eines Oberleitungsbussystems liegt in ihrer ausgeprägten Dynamik. Durch regelmäßige Anfahr- und Bremsvorgänge variieren die Leistungen der Batterie-/Oberleitungsbusse ausgesprochen stark, sodass diese zwischen ihrer maximalen Bezugsleistung und Rückspeisung durch Rekuperation innerhalb von Sekunden wechseln. Außerdem stellen die Batterie-/Oberleitungsbusse bewegliche Knoten im elektrischen Netz dar, sodass permanent eine

aktualisierte Knotenpunktadmittanzmatrix des DC-Oberleitungsbussystems für die Leistungsflussberechnung erstellt werden muss. Lediglich der Tatsache geschuldet, dass die Batterie-/Oberleitungsbusse einen vordefinierten Busumlaufplan befahren, ermöglicht eine ausreichend präzise Netzzustandsprognose. Bei ansteigenden Zeithorizonten der Netzzustandsprognose reduziert sich folglich die Güte. Dieser Einfluss wird jedoch minimiert, da eine erneute Netzzustandsprognose nach Abschluss einer vorherigen stattfindet, um die zuvor generierten Aktorbefehle nach Fertigstellung ggf. zu korrigieren.

Topologieänderungen des elektrischen Netzes begrenzen die Verwendbarkeit des Netzleitsystems. Durch im Oberleitungsbussystem befindliche Trenner und Brückenschalter, die jenes aufgrund von technologischen Rahmenbedingungen (z. B. Kurzschlussstromerkennbarkeit) in Netzzonen unterteilen, kann die Topologie des Oberleitungsbussystems variiert werden. Diese Stellungen der Trenner und Brückenschalter werden bislang nur als stationäre Eingabeparameter bei der Initialisierung berücksichtigt, sodass eine Topologieänderung (z. B. bei Wartung eines Gleichrichter-Unterwerkes) nicht automatisiert erkannt und berücksichtigt wird. Die Netztopologie ist in diesem Fall manuell einzustellen.

Ebenfalls sinkt die Güte der Netzzustandsprognose bei Leerfahrten, da keine vordefinierten Straßen seitens der Busfahrer befahren werden. Dieser Fakt weitet sich auf Verkehrs-Unwägbarkeiten (z. B. Verkehrsstaus und Arbeitsstellen) aus. Somit wirken Leerfahrten als auch weitere Verkehrs-Unwägbarkeiten als Störgrößen auf das Netzleitsystem, da diese kaum prognostizierbar sind. Somit nimmt das Netzleitsystem in diesen Fällen Busrouten für die Netzzustandsprognose an, die der Bus in einigen Fällen jedoch nicht umsetzt.

Trotzdem liegt die erreichte Güte der Netzzustandsprognose im Bereich von  $f_{U\text{rel}} = 1\%$  ( $T_H = 5$  Minuten bis  $T_H = 10$  Minuten), wodurch Regelungsmöglichkeiten eingeschränkt werden. Jedoch wird dieser Fehler bei der Aktorbefehlgenerierung in [48] berücksichtigt, mit dem Ergebnis, dass die Funktionalität durch den relativen Spannungsfehler der Netzzustandsprognose die Regelung des Netzleitsystems nicht einschränkt bzw. die volle Funktionalität der prädiktiven Regelung gewährleistet ist.

Des Weiteren wird das Oberleitungsbussystem als DC-System angenommen. Eine Übertragbarkeit auf Bahnsysteme, welche mit Wechselspannung betrieben werden, ist möglich, jedoch muss die Leistungsflussberechnung entsprechend angepasst werden.



## 5 Planung von Oberleitungsbussystemen

Für die Einhaltung der beschlossenen Klimaschutzziele der Europäischen Union im Bereich Verkehrswesen ist die Elektromobilität eine Schlüsseltechnologie, um die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern voranzutreiben und die gesetzten Minderungsziele einzuhalten [104, 105]. Dabei stellen städtische und stark vom Verkehr geprägte Gebiete die wesentlichen Belastungsstandorte mit besonders hohen Feinstaub- und Stickstoffoxidbelastungen dar [106]. Zudem erhält die Elektrifizierung des ÖPNV einen hohen Stellenwert und viele Verkehrsunternehmen weltweit forcieren einen Umstieg auf innovative elektrische Antriebskonzepte [107–109].

### 5.1 Herausforderung

Verkehrsunternehmen stehen demzufolge vor der Herausforderung alternative Antriebstechnologien zu bewerten, wobei Oberleitungsbusse, aufgrund der fehlenden Batterie oder der kleiner dimensionierten Pufferbatterie, gegenüber den batterieelektrisch betriebenen Bussen den Vorteil der geringeren Fahrzeuggesamtmasse aufweisen. Dadurch entsteht ein Energieeffizienzvorteil [88]. Bei der Planung eines Oberleitungsbussystems mit Batterie-Oberleitungsbusen entsteht hingegen ein Investitionsvorteil gegenüber konventionellen Oberleitungsbussystemen, die ausschließlich Oberleitungsbusse einschließen, da die Buslinien nicht vollständig mit Fahrdrabt ausgestattet werden müssen. Dieser Investitionsvorteil überwiegt trotz höherer Investitionskosten eines Batterie-Oberleitungsbusse im Vergleich zu konventionellen Oberleitungsbusen. Die Planung eines mit Batterie-Oberleitungsbusen ausgestatteten Oberleitungsbussystems sowie der Ausbau eines vorhandenen Oberleitungsbussystems, in dem eine Integration von Batterie-Oberleitungsbusen stattfindet, erfahren infolgedessen eine Komplexitätssteigerung.

Die zentrale Herausforderung besteht in der Auswahl der zu elektrifizierenden Abschnitte des jeweiligen Busliniennetzes, resultierend in einem maximalen fahrleitungsfreien Anteil eines Oberleitungsbussystems mit Gewährleistung eines sicheren Oberleitungsbusbetriebes. Die optimierte Fahrleitungsplanung birgt den Nachteil einer reduzierten Flexibilität der Busliniengestaltung, sodass dieser Aspekt bei der Planung berücksichtigt werden muss und entsprechende Reserven in die Planung mit einfließen. Das Verhältnis von mit Fahrleitung ausgestatteter Busstrecke zu Gesamtbuslinienstrecke ist u. a. abhängig von der Batteriekapazität der Batterie-Oberleitungsbusse, welche durch zukünftige Innovationen ansteigen wird und dem maximalen Energietransfer von der Oberleitungsbussystem-Infrastruktur in die Batterie-Oberleitungsbusse (inkl. Energietransfer in die Batterie).

Abschnitt 5.6.4 untersucht aufbauend den Einfluss dreier Faktoren (Batteriekapazität des Batterie-Oberleitungsbusse, Leistungstransfer von der Fahrleitung in den Batterie-

Oberleitungsbus und Batterie-Ladeleistung) auf die Infrastrukturinvestitionskosten, um zu determinieren, welche technologische Komponente einen möglichen Engpass verursacht.

## 5.2 Szenariendefinition

Die Planung von Oberleitungsbussystemen stützt sich auf zwei Szenarien, welche sich maßgeblich in der Ausgangssituation unterscheiden. Folglich wird eine unterschiedliche Datengrundlage für die Planung benötigt. Während die Planung einer Erweiterung (Brown-Field-Szenario) eines Oberleitungsbussystems die nutzbare Bestandsinfrastruktur bedingt, benötigt die Planung einer Neuinstallation (Green-Field-Szenario) eines Oberleitungsbussystems diese Informationen nicht, weshalb die Datengrundlage des Green-Field-Szenarios eine Teilmenge der Obermenge der Datengrundlage des Brown-Field-Szenarios abbildet. Die Datengrundlage ist essenziell und fließt u. a. als Nebenbedingungen in der nachfolgenden Optimierung ein.

Diese Datengrundlage (Abschnitt 5.3) setzt sich aus den Verkehrsbetriebsinformationen, der Straßendatenbank, der nutzbaren Bestandsinfrastruktur und baulichen Restriktionen zusammen. Für eine möglichst große Flexibilität in der Busliniengestaltung, fließt die zukünftige Nutzung des ÖPNV in die Szenariengestaltung mit ein. Die zukünftige Gestaltung des ÖPNV ist eng mit den jeweiligen Verkehrsbetrieben abzustimmen und beinhaltet – unter Berücksichtigung des Entwicklungskonzeptes der betrachteten Gebiete – zukünftige Änderungen in der Buslinienführung sowie der dazugehörigen Taktung.

### Green-Field-Szenario

Das Green-Field-Szenario beschreibt eine Neuinstallation eines Oberleitungsbussystems, durch (Teil-)Umstellung der bisherigen Busflotte auf Batterie-/Oberleitungsbusse. Ziel dieses Szenarios ist die Umstellung einzelner oder sämtlicher Buslinien, sodass eine gezielte Planung für diese Auswahl erstellt wird. Für die Generierung einer Datengrundlage werden hier keine Informationen über eine nutzbare Bestandsinfrastruktur verwendet.

### Brown-Field-Szenario

Bei der Planung eines Brown-Field-Szenarios ist ein Oberleitungsbussystem existent, sodass Oberleitungsbusse und/oder Batterie-Oberleitungsbusse bereits einen Teil der Busflotte repräsentieren. Ziel dieses Szenarios ist es, weitere bislang nicht elektrifizierte Buslinien auf Batterie-/Oberleitungsbusse umzustellen. Hier sind Informationen über die nutzbare Bestandsinfrastruktur obligatorisch.

### Determinierung streckengewichteter Planungsvarianten

Unabhängig des gewählten Szenarios kann bei größerer Anzahl der zu elektrifizierenden Buslinien eine Determinierung streckengewichteter Planungsvarianten vom Vorteil sein, um wirtschaftliche Buslinienkombination zu identifizieren. Zur Erstellung möglicher Kombinationen findet eine gewichtete Schnittmengenanalyse der Streckenverläufe sämtlicher Buslinien statt.

Nach einer separaten Betrachtung sämtlicher zu untersuchenden und zu elektrifizierenden Buslinien werden anschließend Kombinationen zweier Buslinien erstellt. Im weiteren Verlauf werden sukzessive Buslinien addiert.

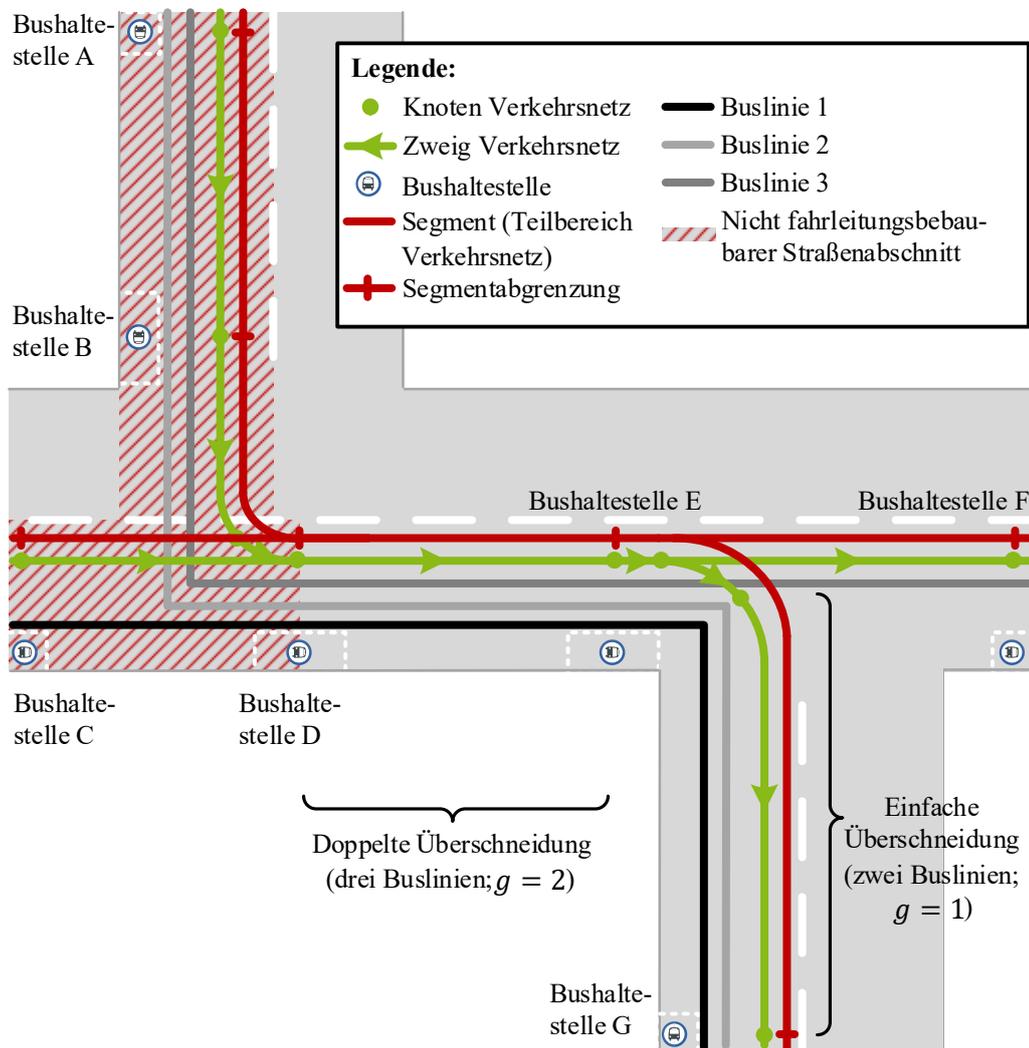


Abbildung 5-1: Gewichtung Streckenabschnitte (überschneidende Buslinien)

Die Schnittmenge verschiedener Buslinien fungiert als erster Indikator für mögliche Synergieeffekte, die im Verlauf der Fallstudien (Abschnitt 5.6) näher untersucht werden. Dabei werden Kombinationen, die eine große Schnittmenge besitzen – d. h. mehrere Buslinien befahren partiell identische Streckenabschnitte und können sich folglich Fahrleitungsabschnitte teilen – bevorzugt untersucht. Zur Berechnung der Schnittmenge verschiedener Buslinien werden alle Streckenabschnitte – ausgenommen nicht fahrleitungsbebaubare Straßenabschnitte – betrachtet. Abbildung 5-1 visualisiert beispielhaft auftretende Überschneidungen dreier Buslinien, wobei lediglich eine einfache Überschneidung zwischen Bushaltestelle E und Bushaltestelle G und eine doppelte Überschneidung zwischen den Bushaltestellen D und E existiert. Weitere Überschneidungen von Straßenabschnitten werden aufgrund der baulichen Restriktionen nicht weiter berücksichtigt. Anschließend fließen die Straßenabschnitte gewichtet – wie nachfolgend

erläutert – in die Planungsvariantendefinition ein. Außerdem zeigt die Abbildung neben den drei Buslinien das Verkehrsnetz (grün), welches von allen drei in der Simulation virtuell befahren wird. Die in Rot eingezeichneten Segmente dienen der Optimierung und stellen jeweils eine Teilmenge des Verkehrsnetzes (siehe Abschnitt 5.3.2) dar. Ein Segment wird in der nachfolgenden Optimierung entweder vollständig mit oder ohne Fahrleitung ausgestattet. Abschnitt 5.5.2 erläutert diesen Sachverhalt, indem eine Segmentierung und Bereichsdefinition eingeführt wird.

Die Menge aller zu untersuchenden und zu elektrifizierenden Buslinien wird durch  $L$  dargestellt. Die Kardinalität der Menge entspricht der Anzahl der Buslinien und wird durch  $n_L = |L|$  ermittelt.

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_n \mid n = n_L\} \quad (5.1)$$

Im Folgenden werden Segmente und Bereiche eingeführt. Während Segmente für die Szenariendefinition verwendet werden, werden Bereiche zusätzlich bei der anschließenden Optimierungsaufgabe benötigt. Ein Bereich beinhaltet alle Busspuren zwischen zwei Bushaltestellen, ein Segment ist jedoch als einzelne Busspur zwischen zwei Bushaltestellen definiert und stellt einen Ausschnitt des Bereiches dar. Abschnitt 5.5.2 führt eine detaillierte Segmentierung und Bereichsdefinition ein.

Für jeden Bereich  $m_{B_i}$  (der Menge  $M_B$ ) existieren  $n_S(m_{B_i}) = |S(m_{B_i})|$  Segmente. Die Menge aller Segmente sämtlicher Bereiche Menge  $M_B$  wird durch  $SB$  repräsentiert, wobei die Kardinalität durch  $n_{SB} = |SB|$  beschrieben wird.

$$SB = \{SB_1, SB_2, SB_3, \dots, SB_n \mid n = n_{SB}\} \quad (5.2)$$

Da jede Buslinie als eine Menge aus Segmenten dargestellt werden kann, gilt für jede Buslinie  $L_i$ :

$$L_i \subseteq SB, \quad i \in \{1, \dots, n_{SB}\} \quad (5.3)$$

Die Gewichtung wird durch die Menge  $g$  beschrieben. Die Elemente  $g_i$  definieren sich als die Gewichtungsfaktoren der zugehörigen Segmente  $S_i$ .

$$g = \{g_1(S_1), g_2(S_2), g_3(S_3), \dots, g_n(S_n) \mid n = n_{SB}\} \quad (5.4)$$

Für jede Planungsvariante wird wiederkehrend für jedes Segment  $S_i$  ein Gewichtungsfaktor berechnet, welcher als gerichteter Graph  $G_S = (V_S, E_S, w_E)$  durch den digitalen Zwilling des in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Verkehrsnetzes definiert wird. Dabei beschreibt ein Gewichtungsfaktor von 1 eine einfache Überschneidung (zweier Buslinien), ein Gewichtungsfaktor von 2 eine doppelte Überschneidung (dreier Buslinien) usw. Liegt keine

Überschneidung vor (eine Buslinie), wird ein Gewichtungsfaktor von 0 für die nachfolgenden Berechnungen herangezogen.

$$g_i(S_i) = f(G_S), \quad i \in \{1, \dots, n_B\} \quad (5.5)$$

Die maximal mögliche Buslinienkombinationsanzahl  $n_K$  lässt sich in Abhängigkeit der Buslinienanzahl  $n_L$  wie folgt ausdrücken:

$$n_K = 2^{n_L} - (n_L + 1) \quad (5.6)$$

Da einzelne Buslinien ebenfalls als Planungsvariante angesehen werden, ergibt sich die maximal mögliche Planungsvariantenanzahl  $n_{SZ}$  zu:

$$n_{SZ} = n_K + n_L = 2^{n_L} - 1 \quad (5.7)$$

Für die Auswahl geeigneter Planungsvarianten werden die streckengewichteten Längen der Planungsvarianten miteinander verglichen. Während  $PL$  die Menge aller streckengewichteten Längen sämtlicher Planungsvarianten beschreibt, beschreibt  $PL_j$  die streckengewichteten Längen einer Planungsvariante.

$$PL = \{PL_j \mid j \in \{1, \dots, n_{SZ}\}\} = \{PL_1, PL_2, \dots, PL_n \mid n = n_{SZ}\} \quad (5.8)$$

Die streckengewichtete Länge einer Planungsvariante lässt sich mittels der Länge eines Segmentes  $l(S_i)$  wie folgt berechnen:

$$PL_j = \sum_{i=1}^{n_S} g_i \cdot l(S_i), \quad i, j \in \mathbb{N}, 1 \leq j \leq n_{SZ} \quad (5.9)$$

Die Anzahl an Kombinationen  $n_{SZk}$  je Betrachtung von  $k$  Buslinien lässt sich mit Hilfe des Binomialkoeffizienten wie folgt darstellen:

$$n_{SZk} = \binom{n_L}{k}, \quad k \in \mathbb{N}, n_L \geq k \quad (5.10)$$

Anschließend findet eine Gruppierung der streckengewichteten Längen aller Planungsvarianten statt, indem eine Gruppe von Planungsvarianten stets eine gleichbleibende Buslinienanzahl aufweist.

$$PL = \underbrace{\{PL_1, \dots, PL_k\}}_{LB_1}, \underbrace{\dots, PL_l, \dots}_{LB_2}, \underbrace{\dots, PL_n}_{LB_k} \mid k = n_{SZ1}, l = n_{SZ2}, \\ m = n_{SZn}, n = n_L \quad (5.11)$$

Die Menge aller nach Buslinienanzahl gruppierten streckengewichteten Längen wird durch  $LB$  repräsentiert, wobei die Kardinalität der Menge der Anzahl der Buslinien  $n_L = |L| = |LB|$  entspricht.

$$LB = \{LB_1, LB_2, \dots, LB_n \mid n = n_L\} \quad (5.12)$$

Mittels der Menge  $a$  kann die Anzahl zu untersuchenden Planungsvarianten definiert werden, wobei  $a_1$  bei einer Betrachtung aller Einzelbuslinien als Planungsvarianten der Buslinienanzahl  $n_L$  entspricht.

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_n \mid n = n_L\} \quad (5.13)$$

Abschließend können die zu untersuchenden Planungsvarianten  $PV$  bestimmt werden, wobei  $\max_m$  die  $m$ -größten Elemente der nachfolgenden Menge entspricht. Daraus resultieren für jedes  $a_i$  (Anzahl an Buslinienkombination)  $m$  Planungsvarianten mit den größten streckengewichteten Längen, welche somit die maximalen Überschneidungen zwischen den Buslinien aufweisen.

$$PV = n_{Sz}(\max_m LB_i), i, m \in \mathbb{N}, m = a, 1 \leq i \leq n_L \quad (5.14)$$

## 5.3 Datengrundlage

Für die Durchführung einer Netzplanung von Oberleitungsbussystemen wird eine Datengrundlage benötigt, welche sich primär aus Verkehrsbetriebsinformationen, einer Straßendatenbank und den baulichen Restriktionen zusammensetzt. Darüber hinaus kann für ein Brown-Field-Szenario nutzbare Bestandsinfrastruktur in die Netzplanung miteinbezogen werden. Diese umfassen ebenfalls Informationen über neuartige Systemkomponenten (Abschnitt 2.4). Weitere optimierungsrelevante Eingabeparameter (wie z. B. die Infrastrukturverluste) beschreibt Abschnitt 10.2 (Anhang).

### 5.3.1 Verkehrsbetriebsinformationen

Die Verkehrsbetriebsinformationen setzen sich aus den Busumlaufplänen und den Busparametern zusammen. Während die Busparameter physikalische Eigenschaften beschreiben, haben die zumeist optimierten Busumlaufpläne das Ziel möglichst viele Passagiere zu befördern, während gleichzeitig die Betriebskosten minimal gehalten werden sollen. Zudem wird in Busumlaufplänen zwischen Nutz- und Leerfahrten unterschieden. Während Nutzfahrten Passagiere befördern, sind Leerfahrten, die dazu dienen zwischen Buslinien zu wechseln oder Fahrten vom/zum Betriebshof darstellen, bei der Erstellung von Busumlaufplänen zu minimieren, um das übergeordnete Ziel der Betriebskostenminimierung zu gewährleisten.

### Busumlaufplan

Der Busumlaufplan stellt dabei das wichtigste Element dar, indem er Informationen über alle Fahrten enthält, die die Busse nacheinander für bestimmte (Typ-)Tage über eine Zeitachse abwickeln.  $B$  stellt die Menge aller (Typ-)Tage dar und repräsentiert somit den Busumlaufplan. Die Anzahl der (Typ-)Tage wird durch die Kardinalität  $n_B = |B|$  beschrieben.

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n \mid n = n_B\} \quad (5.15)$$

Jeder (Typ-)Tag  $b_i$  beinhaltet eine Auflistung aller fahrenden Busse für den entsprechenden (Typ-)Tag. Die Anzahl der Busse wird durch die Kardinalität  $n_b(b_i) = |b_i|$  beschrieben, wobei diese Busanzahl abhängig vom (Typ-)Tag ist.

$$b_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in} \mid i \in \{1, \dots, n_B\}, n = n_b(b_i)\} \quad (5.16)$$

Die Untermenge  $b_{ij}$  (der Menge  $b_i$ ) beinhaltet wiederum Buslinienstrecken zwischen zwei Endhaltestellen einer Buslinie. Für einen Bus  $b_{ij}$  stehen abhängig vom ausgewählten Bus  $n_{BS}(b_{ij}) = |b_{ij}|$  Buslinienstrecken zur Verfügung, die der Bus chronologisch ausführt.

$$b_{ij} = \{b_{ij1}, b_{ij2}, b_{ij3}, \dots, b_{ijn} \mid i \in \{1, \dots, n_B\}, \\ j \in \{1, \dots, n_b(b_i)\}, n = n_{BS}(b_{ij})\} \quad (5.17)$$

Zusätzlich beinhalten die Buslinienstrecken Informationen bezüglich der Buslinie  $b_{ijkBL}$  (ebenfalls können Informationen zu Leerfahrten wie Aus- und Einrückfahrten hinterlegt werden), der Start- und End-Uhrzeit  $b_{ijkSU}$  und  $b_{ijkEU}$ , der Start- und End-Haltestelle  $b_{ijkSH}$  und  $b_{ijkEH}$ , des Bustyps  $b_{ijkBT}$  sowie der Streckenlänge  $b_{ijkL}$ .

$$b_{ijk} = \{b_{ijkBL}, b_{ijkSU}, b_{ijkEU}, b_{ijkSH}, b_{ijkEH}, b_{ijkBT}, b_{ijkL} \\ \mid i \in \{1, \dots, n_B\}, j \in \{1, \dots, n_b(b_i)\}, k \in \{1, \dots, n_{BS}(b_{ij})\}\} \quad (5.18)$$

Abschließend werden Buslinieninformationen benötigt, die die Bushaltestellen zwischen den zuvor genannten End-Haltestellen auflistet. Die Menge  $P$  (englisch *path*) beinhaltet diese Informationen, wobei die Kardinalität durch  $n_P = |P|$  ausgedrückt wird.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n \mid n = n_P\} \quad (5.19)$$

Jede Untermenge  $p_i$  (der Menge  $P$ ) beinhaltet folglich zur Identifizierung die Informationen bezüglich Start- und Endhaltestelle  $p_{iSH}$  und  $p_{iEH}$ , Buslinie  $p_{iBL}$  und Streckenlänge  $p_{iL}$ , welche mit den Elementen der Menge  $b_{ijk}$  bezüglich einer Identifizierung verglichen werden.

$$p_i = \{p_{iSH}, p_{iEH}, p_{iBL}, p_{iL}, p_{iBH} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_P\}\} \quad (5.20)$$

Die Untermenge  $p_{i\text{BH}}$  (der Menge  $p_i$ ) beinhaltet schlussendlich alle Bushaltestellen  $p_{i\text{BH}j}$ , wobei die Kardinalität  $n_{p\text{BH}}(p_i) = |p_{i\text{BH}}|$  von der Menge  $p_i$  abhängig ist.

$$p_{i\text{BH}} = \{p_{i\text{BH}1}, p_{i\text{BH}2}, \dots, p_{i\text{BH}n} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_p\}, n = n_{p\text{BH}}(p_i)\} \quad (5.21)$$

### Busparameter

Für eine realitätsnahe Abschätzung des Energiebedarfs (Abschnitt 5.5.3) werden detaillierte Parameter (physikalische Eigenschaften) der (zukünftig) eingesetzten Busse benötigt. Die Menge der Bustypen beschreibt  $BT$ , wobei die Kardinalität durch  $n_{BT} = |BT|$  gegeben ist.

$$BT = \{bt_1, bt_2, bt_3, \dots, bt_n \mid n = n_{BT}\} \quad (5.22)$$

Jeder Bustyp  $bt_i$  beinhaltet neben der Identifizierung des Bustyps  $bt_{i\text{BT}}$  Informationen über die Leermasse  $bt_{i\text{Mmin}}$ , zulässiges Gesamtmasse  $bt_{i\text{Mmax}}$ , Abmessungen des Busses (Länge:  $bt_{i\text{L}}$ , Breite:  $bt_{i\text{B}}$ , Höhe:  $bt_{i\text{H}}$ , dienen zur Berechnung des Strömungswiderstandes), maximale Geschwindigkeit  $bt_{i\text{Gmax}}$ , maximale Motorleistung  $bt_{i\text{Pmax}}$ , maximale Heiz- und Kühlleistungen ( $bt_{i\text{Hmax}}$  und  $bt_{i\text{Cmax}}$ ), Rollreibungskoeffizienten  $bt_{i\text{RR}}$  (zur Berechnung des Rollwiderstandes), die maximale Passagieranzahl  $bt_{i\text{Pamax}}$  sowie den Batterietyp  $bt_{i\text{BatID}}$ . Die Verknüpfung zum Busumlaufplan erfolgt mittels  $bt_{i\text{BT}}$ , da  $bt_{i\text{BT}} \subseteq b_{i\text{jkBT}}$ .

$$\begin{aligned} bt_i &= \{bt_{i\text{BT}}, bt_{i\text{Mmin}}, bt_{i\text{Mmax}}, bt_{i\text{L}}, bt_{i\text{B}}, bt_{i\text{H}}, bt_{i\text{Gmax}}, bt_{i\text{Pmax}}, \\ &bt_{i\text{Hmax}}, bt_{i\text{Cmax}}, bt_{i\text{RR}}, bt_{i\text{Pamax}}, bt_{i\text{BatID}} \mid i \in \{1, \dots, n_{BT}\}\} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Die Menge der Batterietypen beschreibt  $BAT$ , wobei die Kardinalität durch  $n_{BAT} = |BAT|$  gegeben ist.

$$BAT = \{bat_1, bat_2, bat_3, \dots, bat_n \mid n = n_{BAT}\} \quad (5.24)$$

Die Untermenge  $bat_i$  (der Menge  $BAT$ ) enthält die Batteriekenndaten  $bat_{i\text{ID}}$  ( $bat_{i\text{ID}} \subseteq bt_{i\text{BatID}}$ ),  $bat_{i\text{Z}}$  (Zellchemie),  $bat_{i\text{Imax}}$  (maximaler Batterieladestrom),  $bat_{i\text{Imin}}$  (maximaler Batterieentladestrom) und  $bat_{i\text{EI}}$  (Batterie-Energieinhalt). Ladekurven werden automatisiert anhand der Zellchemie parametrisiert.

$$\begin{aligned} bat_i &= \{bat_{i\text{ID}}, bat_{i\text{Z}}, bat_{i\text{Imax}}, bat_{i\text{Imin}}, \\ &bat_{i\text{EI}} \mid i \in \{1, \dots, n_{BAT}\}\} \end{aligned} \quad (5.25)$$

### 5.3.2 Straßendatenbank

Die Straßendatenbank beschreibt einen digitalen Zwilling des Verkehrsnetzes, somit aller notwendigen Straßen und zugehörigen Punkten (z. B. Bushaltestellen und Lichtsignalanlagen), welche anhand des Busumlaufplanes definiert werden. Der digitale Zwilling des Verkehrsnetzes

wird als gerichteter Graph  $G_S = (V_S, E_S, w_S)$  repräsentiert. Dieser setzt sich aus einer Menge von Verkehrsknoten  $V_S = V(G_S)$  (englisch *vertex*) und einer Menge von Verkehrszweigen  $E_S = E(G_S)$  (englisch *edge*) zusammen. Zusätzlich bildet  $w_S$  die Länge der Verkehrszweige  $E_S$  ab,  $w_S: E_S \rightarrow e_{SAiL}$  (siehe Gleichung 5.31).

Ein Verkehrsknoten stellt einen spezifischen Punkt im Verkehrsnetz dar, welcher als Start- oder Endpunkt eines Verkehrszweiges fungiert. Folglich beinhaltet der gerichtete Graph  $G_S$  keine isolierten Verkehrsknoten:

$$deg_G^+(v_S) + deg_G^-(v_S) > 0, \forall v_S \in V_S, G = G_S \quad (5.26)$$

Während  $deg_G^+(v_S)$  die Anzahl aller Kanten darstellt, die in  $v_S$  starten, stellt  $deg_G^-(v_S)$  die Anzahl aller Kanten dar, die in  $v_S$  enden. Die Summe des Eingangs- und Ausgangsgrades von  $v_S$  beschreibt den Grad des Knotens  $v_S$ , welcher bei isolierten Knoten stets größer null ist.

Zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der Verkehrsknoten wird folgende Menge  $V_{SA}$  eingeführt, wobei die Kardinalität der Menge  $V_{SA}$  der Kardinalität der Verkehrsknoten  $V_S$  bzw. die Verkehrsknotenanzahl  $n_{VS} = |V_S(G_S)| = |V_{SA}|$  entspricht:

$$V_{SA} = \{v_{SA1}, v_{SA2}, v_{SA3}, \dots, v_{SAN} \mid n = n_{VS}\} \quad (5.27)$$

Jedes Element der Menge  $V_{SA}$  beinhaltet mehrere Informationen, beginnend mit einer einzigartigen Verkehrsknotennummer  $v_{SAiD}$ . Des Weiteren enthält jedes Element Informationen über geographische Koordinaten ( $v_{SAix}$  und  $n_{SAiy}$ ) mit einer zusätzlichen Höhenkoordinate  $v_{SAiz}$  sowie einer Identifizierung der Verkehrsknotenart (z. B. Bushaltestelle oder Lichtsignalanlage)  $v_{SAiA}$ . Weitere Informationen zur Verknüpfung der Straßendatenbank mit einer gegebenenfalls vorhandenen Oberleitungsbussystem-Infrastruktur ( $v_{SAie} \subseteq V_E$ ) oder Namen von Bushaltestellen  $v_{SAiN}$  werden bei Bedarf ergänzt.

$$v_{SAi} = \{v_{SAiD}, v_{SAix}, v_{SAiy}, v_{SAiz}, v_{SAiA}, v_{SAie}, v_{SAiN} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{VS}\}\} \quad (5.28)$$

Mittels der einzigartigen Verkehrsknotennummer  $v_{SAiD}$  wird eine Verknüpfung zu der Menge der Verkehrsknoten  $V_S$  geschaffen. Die Menge der Verkehrsknoten  $V_S$  ergibt sich zu:

$$V_S = \{v_{S1}, v_{S2}, v_{S3}, \dots, v_{Sn}\} = \{v_{SA1D}, v_{SA2D}, v_{SA3D}, \dots, v_{SANID} \mid n = n_{VS}\} \quad (5.29)$$

Die Menge der Verkehrszweige  $E_S$  ist so definiert, dass ein Verkehrszweig stets als Verbindung zweier Verkehrsknoten miteinander angesehen werden kann  $E_S \subseteq V_S \times V_S$ . Zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der Verkehrszweige wird folgende Menge  $E_{SA}$  eingeführt, wobei die

Kardinalität der Menge der Verkehrswege  $E_S$  die Verkehrswegeanzahl  $n_{ES} = |E_S(G_S)|$  beschreibt.

$$E_{SA} = \{e_{SA1}, e_{SA2}, e_{SA3}, \dots, e_{SA n} \mid n = n_{ES}\} \quad (5.30)$$

Jedes Element der Menge  $E_{SA}$  beinhaltet mehrere Informationen, beginnend mit der Start- und Endpunktverkehrsknotennummer ( $e_{SAif} \subseteq V_S$  und  $e_{SAit} \subseteq V_S$ ). Weitere Attribute stellen Verkehrsweiglänge  $e_{SAiL}$  sowie die maximale zulässige Höchstgeschwindigkeit  $e_{SAiG}$  auf diesem Verkehrsweig dar. Für die Zweige können Hauptverkehrszeiten<sup>22</sup> hinterlegt werden ( $e_{SAiV}$ ) und ebenfalls mit einer gegebenenfalls vorhandenen Oberleitungsbussystem-Infrastruktur ( $e_{SAief} \subseteq V_E$  und  $e_{SAiet} \subseteq V_E$ ) verknüpft werden.

$$e_{SAi} = \{e_{SAif}, e_{SAit}, e_{SAiL}, e_{SAiV}, e_{SAiG}, e_{SAief}, e_{SAiet} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{ES}\}\} \quad (5.31)$$

Mittels der Start- und Endverkehrsknotennummer ( $e_{SAif}$  und  $e_{SAit}$ ). wird eine Verknüpfung zu der Menge der Verkehrswege  $E_S$  geschaffen. Die Menge der Verkehrswege  $E_S$  ergibt sich zu:

$$E_S = \{\{e_{SA1f}, e_{SA1t}\}, \{e_{SA2f}, e_{SA2t}\}, \dots, \{e_{SA n f}, e_{SA n t}\} \mid n = n_{ES}\} \quad (5.32)$$

### 5.3.3 Nutzbare Bestandsinfrastruktur

Falls eine nutzbare Bestandsinfrastruktur aus einem existierenden Oberleitungsbussystem vorhanden ist (Brown-Field-Szenario), wird diese äquivalent in elektrische Knoten und elektrische Zweige abgebildet. Der digitale Zwilling des elektrischen Netzes wird als ungerichteter Graph  $G_E = (V_E, E_E, w_E)$  repräsentiert. Dieser setzt sich aus einer Menge von elektrischen Knoten  $V_E = V(G_E)$  (englisch *vertex*) und einer Menge von elektrischen Zweigen  $E_E = E(G_E)$  (englisch *edge*) zusammen. Zusätzlich bildet  $w_E$  die Länge der elektrischen Zweige  $E_E$  ab,  $w_E: E_E \rightarrow e_{EAiL}$  (siehe Gleichung 5.38). Durch existente Gleichrichter-Unterwerke und deren Speiseleitungen stellt der Graph  $G_E$  keinen Teilgraph von  $G_S$  dar.

Isolierte elektrische Knoten (Knoten, die weder als Start- noch als Endpunkt eines elektrischen Zweiges fungieren) beinhaltet der ungerichtete Graph  $G_E$  nicht, sodass gilt:

$$deg_G^+(v_E) + deg_G^-(v_E) > 0, \forall v_E \in V_E \quad (5.33)$$

Äquivalent zu Gleichung 5.26 stellt  $deg_G^+(v_E)$  die Anzahl aller Kanten dar, die in  $v_E$  starten und  $deg_G^-(v_E)$  stellt die Anzahl aller Kanten dar, die in  $v_E$  enden. Die Summe des Eingangs- und

<sup>22</sup> Hauptverkehrszeit (ugs. Rush Hour, Spitzenverkehrszeit): Verkehrszeit mit dem größten Verkehrsaufkommen (i. d. R. von 06:00 Uhr bis 09:00 Uhr und 16:00 Uhr bis 19:00 Uhr); neben der Hauptverkehrszeit existieren noch die Nebenverkehrszeit sowie die Schwachverkehrszeit

Ausgangsgrades von  $v_E$  beschreibt den Grad des Knotens  $v_E$ , welcher bei isolierten Knoten stets größer null ist.

Zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der elektrischen Knoten wird folgende Menge  $V_{EA}$  eingeführt, wobei die Kardinalität der Menge der elektrischen Knoten  $V_E$  die Anzahl der elektrischen Knoten  $n_E = |V_E(G_E)|$  beschreibt:

$$V_{EA} = \{v_{EA\ 1}, v_{EA\ 2}, v_{EA\ 3}, \dots, v_{EA\ n} \mid n = n_E\} \quad (5.34)$$

Die Menge  $V_{EA}$  beinhaltet mehrere Informationen, angefangen mit einer einzigartigen Nummer für jeden elektrischen Knoten  $v_{EA\ i\ ID}$ . Des Weiteren enthält jedes Element Informationen über geographische Koordinaten ( $v_{EA\ i\ x}$  und  $v_{EA\ i\ y}$ ) sowie einer Identifizierung der Art des elektrischen Knotens  $v_{EA\ i\ A}$ . Gleichrichter-Unterwerke, Photovoltaikanlagen, Ladesäulen für Elektrofahrzeuge und Oberleitungsbussystem-Streckenelemente (z. B. Streckentrenner, Querkupplungen oder Weichen) können als elektrische Knotenart definiert werden. Spezifische Namen (z. B. von Gleichrichter-Unterwerken)  $v_{EA\ i\ N}$  können bei Bedarf ergänzt werden.

$$v_{EA\ i} = \{v_{EA\ i\ ID}, v_{EA\ i\ x}, v_{EA\ i\ y}, v_{EA\ i\ A}, v_{EA\ i\ N} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_E\}\} \quad (5.35)$$

Mittels der einzigartigen elektrischen Knotennummer  $v_{EA\ i\ ID}$  wird eine Verknüpfung zu der Menge der elektrischen Knoten  $V_E$  geschaffen. Die Menge der elektrischen Knoten  $V_E$  ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} V_E &= \{v_{E\ 1}, v_{E\ 2}, v_{E\ 3}, \dots, v_{E\ n}\} \\ &= \{v_{EA\ 1\ ID}, v_{EA\ 2\ ID}, v_{EA\ 3\ ID}, \dots, v_{EA\ n\ ID} \mid n = n_E\} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Die Menge der elektrischen Zweige  $E_E$  ist so definiert, dass ein elektrischer Zweig stets als Verbindung zweier elektrischer Knoten miteinander angesehen werden kann:  $E_E \subseteq V_E \times V_E$ . Zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der elektrischen Zweige wird folgende Menge  $E_{EA}$  eingeführt, wobei die Kardinalität der Menge der elektrischen Zweige  $E_E$  die elektrische Zweiganzahl  $n_{EE} = |E_E(G_E)|$  beschreibt.

$$E_{EA} = \{e_{SA\ 1}, e_{SA\ 2}, e_{SA\ 3}, \dots, e_{SA\ n} \mid n = n_{EE}\} \quad (5.37)$$

Jedes Element der Menge  $E_{EA}$  beinhaltet mehrere Informationen, beginnend mit der elektrischen Start- und Endpunktknotennummer ( $e_{EA\ i\ f} \subseteq V_E$  und  $e_{EA\ i\ t} \subseteq V_E$ ). Weitere Attribute stellen elektrische Zweiglänge  $e_{EA\ i\ L}$ , maximale zulässige Stromtragfähigkeit  $e_{EA\ i\ I}$ , Widerstandsbelag  $e_{EA\ i\ R}$  sowie die elektrische Zonenzugehörigkeit<sup>23</sup>  $e_{EA\ i\ Z}$  dar.

<sup>23</sup> Eine elektrische Zone eines Oberleitungsbusnetzes beschreibt ein System von Ober- und Speiseleitungen, welche einen geschlossenen Weg darstellen. Dieses System von Ober- und Speiseleitungen ist galvanisch entkoppelt mit anderen elektrischen Zonen und über Trennschalter realisiert, um beispielsweise die Kurzschlussstromerkennbarkeit zu gewährleisten.

$$e_{EAi} = \{e_{EAif}, e_{EAit}, e_{EAiL}, e_{EAiI}, e_{EAiR}, e_{EAiZ} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{EE}\}\} \quad (5.38)$$

Mittels der elektrischen Start- und Endpunktknotennummer ( $e_{EAif}$  und  $e_{EAit}$ ) wird eine Verknüpfung zu der Menge der Verkehrszweige  $E_S$  geschaffen. Die Menge der elektrischen Zweige  $E_E$  ergibt sich zu:

$$E_E = \{\{e_{EA1f}, e_{EA1t}\}, \{e_{EA2f}, e_{EA2t}\}, \dots, \{e_{EAnf}, e_{EAnt}\} \mid n = n_{EE}\} \quad (5.39)$$

Zusätzliche Informationen der weiteren Oberleitungsbussystem-Streckenelemente (z. B. Grundstellung der Weichen) werden nicht benötigt, da diese keinen Einfluss auf das elektrische Abbild des Oberleitungsbussystems besitzen.

### 5.3.4 Bauliche Restriktionen

Bauliche Restriktionen bilden einen wichtigen Bestandteil bei der Planung eines Oberleitungsbussystems ab und repräsentieren den nichtnutzbaren Raum. Neben technischen und wirtschaftlichen Aspekten, werden ebenfalls Belange der Bürger, das Stadtbild und Bebauungspläne miteinbezogen. Daraus ergeben sich potentielle Standorte für entstehende Gleichrichter-Unterwerke sowie nicht fahrleitungsbebaubare Straßenabschnitte.

Bei der Berücksichtigung von baulichen Restriktionen erhält die Menge  $v_{SAi}$  in Gleichung 5.28 mit  $v_{SAiR}$  ein zusätzliches Element (Binärzahl), welches beschreibt, ob eine Restriktion für den Bau eines Gleichrichter-Unterwerkes in unmittelbarer geographischer Umgebung dieses Verkehrsknotens besteht. Äquivalent wird der Menge  $e_{SAi}$  das Element  $e_{SAiR}$  (Binärzahl) in Gleichung 5.31 hinzugefügt, welches ebenfalls beschreibt, ob eine Restriktion zur Ausstattung dieses Verkehrszweiges mit einem elektrischen Fahrdraht besteht. Diese Informationen stellen üblicherweise die Verkehrsbetriebe zur Verfügung.

## 5.4 Technologische Rahmenbedingungen

Die genormten Spannungssysteme erlauben weite Spannungstoleranzen (Abschnitt 2.3.2), welche der stark volatilen Leistungsbezüge der Batterie-/Oberleitungsbusse geschuldet sind. Außerdem existiert ein höherer Längswiderstand im Vergleich zu Straßenbahnsystemen, da die Rückleitung ebenfalls durch eine Fahrleitung realisiert wird, statt über ein Gleis. Rekuperierende Batterie-/Oberleitungsbusse unter der Oberleitung heben zusätzlich das elektrische Potenzial punktuell deutlich an [78].

Die Planung des Oberleitungsbussystems folgt diesen Spannungstoleranzen, sodass eine Spannungshaltung zwischen  $U_{\min}$  und  $U_{\max 2}$  erfolgt und sämtliche Spannungsintervalle

zwischen  $U_{\max 1}$  und  $U_{\max 2}$  kleiner als fünf Minuten sind. Der nachfolgende Optimierungsprozess wird dabei durch die parametrisierbare Nennspannung (Abschnitt 2.3.2) und den gewählten Speisefaktor (Abschnitt 2.3.3) beeinflusst.

Neben der Spannungshaltung muss eine Unterscheidung zwischen Kurzschlussströmen und Betriebsströmen durchführbar sein. Die Kombination hoher Leistungsbedarfe mit weiten Speiseweiten führt zu hohen Betriebsströmen und kann gegebenenfalls in den Bereich geringer Kurzschlussströme gelangen [78]. Der Abschaltstrom  $I_A$  zur Kurzschlussstromauslösung in einem Gleichrichter-Unterwerk erfordert demnach einen Abstand zum maximalen Betriebsstrom  $I_{B \max}$  und zum minimalen Kurzschlussstrom  $I_{K \min}$  und ist nach VDV-Schrift 520 wie folgt definiert:

$$1,1 \cdot I_{B \max} < I_A < 0,9 \cdot I_{K \min} \quad (5.40)$$

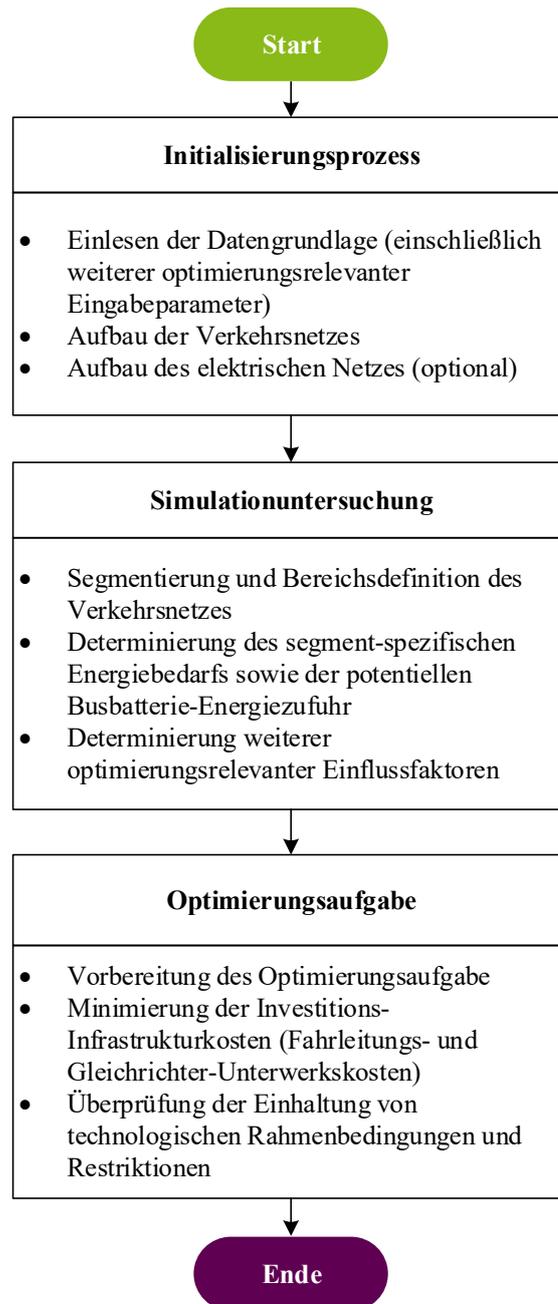
Da der Abschaltstrom von den maximalen Betriebsströmen und den minimalen Kurzschlussströmen abhängig ist, erfolgt bei neugeplanten Oberleitungsbussystemen die Dimensionierung des Abschaltstroms erst in späteren Planungsphasen. Sollte die Spannungshaltung oder die Bedingung zur Kurzschlussstromerkennbarkeit nicht eingehalten werden können, schaffen geringere Speiseweiten und größere Fahrleitungsquerschnitte Abhilfe [78].

Der dritte Aspekt der technologischen Rahmenbedingungen beinhaltet die Betriebsmittelbelastungen. Die Überprüfung, der bei der Planung angestrebten Fahrleitungs- und Speiseleitungsquerschnitte sowie der Gleichrichter-Unterwerksbelastungen erfolgt in der Validierung der jeweiligen Fallstudien (Abschnitt 5.6) über berechnete, zeitgewichtete Belastungsdauerkurven.

## 5.5 Planungsmethode

Die Planungsmethode besteht aus einem einleitend ausgeführten Initialisierungsprozess, welche dazu dient die im Abschnitt 5.3 dargelegte Datenbank einzulesen und anhand dieser das Verkehrsnetz und ggf. das elektrische Netz zu initialisieren.

Die Planungsmethode besteht aus einer anschließend ausgeführten Simulationsuntersuchung, mit der im Abschnitt 3.3 erläuterten Oberleitungsbussystem-Simulation, welche neben einer Segmentierung und Bereichsdefinition der Buslinien primär für die segmentspezifische Determinierung des Energiebedarfs sowie die potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr verantwortlich ist. Ferner werden weitere optimierungsrelevante Einflussfaktoren, u. a. die Batterie-/Oberleitungsbusanzahl pro Segment und Zeitschritt sowie der zeitliche Versatz zwischen Batterie-/Oberleitungsbussen aufgezeichnet. Anhand dieser simulierten segmentspezifischen Energie-Daten lässt sich die Optimierung der Fahrleitungs-Investitionskosten durchführen.



**Abbildung 5-2:** Ablaufschema der Planungsmethode

Die Optimierungsaufgabe, welche mittels eines evolutionären Algorithmus gelöst wird, erzeugt der natürlichen, biologischen Evolution angelehnt Lösungskandidaten. Für jeden Lösungskandidaten dieser Optimierungsaufgabe wird die Anzahl der elektrisch zusammenhängenden Zonen ermittelt und die notwendige Anzahl an Gleichrichter-Unterwerken determiniert. Der Begriff der elektrischen Zone wurde im Abschnitt 5.3.3 eingeführt. Mittels der summierten Gleichrichter-Unterwerksanzahl lassen sich folglich die Gleichrichter-Unterwerks-Investitionskosten ermitteln. Diese setzen sich mit den Fahrleitungs-Investitionskosten zu den Infrastruktur-Investitionskosten zusammen, welche schließlich in der Zielfunktion minimiert werden (siehe Abbildung 5-2). Während der Optimierung, findet für jeden Lösungskandidaten

eine Überprüfung statt, welche die Einhaltung technologischer Rahmenbedingungen und Restriktionen sicherstellt.

Zu erwähnen ist, dass nachfolgend Infrastruktur-Investitionskosten minimiert werden, jedoch Betriebskosten nicht berücksichtigt werden. Da eine Umstellung auf nachhaltige Antriebe obligatorisch ist, findet eine reine Infrastrukturkostenanalyse von Oberleitungsbussystemen statt.

Zunächst wird auf die Initialisierung (Abschnitt 5.5.1), anschließend auf die Segmentierung und Bereichsdefinition des Verkehrsnetzes (Abschnitt 5.5.2) sowie auf die Determinierung des Energiebedarfs (Abschnitt 5.5.3) und der potentiellen Busbatterie Energiezufuhr (Abschnitt 5.5.4) eingegangen. Bevor die wesentliche geschachtelte Optimierungsaufgabe in den Abschnitten 5.5.6 bis 5.5.8 erläutert wird, findet die Aufzeichnung weiterer optimierungsrelevanter Einflussfaktoren (Abschnitt 5.5.5) statt.

### **5.5.1 Initialisierungsprozess**

Der im folgenden durchgeführte Initialisierungsprozess dient dazu den digitalen Zwilling des Verkehrsnetzes sowie optional das elektrische Netz zu erstellen. Dafür wird die im Abschnitt 5.3 beschriebene Datengrundlage verwendet.

#### **Einlesen der Datengrundlage**

Die Oberleitungsbussystem-Simulation benötigt eine Vielzahl an Eingabeparametern (u. a. simulierte Schrittweite  $\Delta t_{sim}$ ), die in [19] erläutert und durch die im Abschnitt 5.3 erläuterte Datengrundlage komplettiert werden. Die Umgebungstemperatur  $T_U$  und die Masse der Batterie-/Oberleitungsbusse besitzen dabei signifikante Einflüsse auf den Energiebedarf der Batterie-/Oberleitungsbusse (Abschnitt 5.5.3). Im Zuge einer Worstcase-Simulation müssen diese entsprechend parametrisiert werden, sodass die Energiebedarfe der Batterie-/Oberleitungsbusse für den energieintensivsten Tag des Jahres bestimmt werden und diese wiederum in die anschließende Optimierung einfließen können.

#### **Aufbau des Verkehrsnetzes und des elektrischen Netzes (optional)**

Der Aufbau des Verkehrsnetzes sowie des elektrischen Netzes ist in Abbildung 5-3 visualisiert. Im obersten Straßenabbild (Straßennetz) ist die vorherrschende Situation mit einer partiell ausgestatteten Oberleitung abgebildet. Zu erkennen sind gegebene Lichtsignalanlagen sowie eine Bushaltestelle. Die Oberleitung wird mittels einer Weiche in zwei Fahrleitungen aufgeteilt.

Das mittlere Straßenabbild zeigt das Verkehrsnetz, welches aus einer Vielzahl von Verkehrsknoten besteht. Beispielsweise bildet ein Verkehrsknoten eine Lichtsignalanlage ab, die in der Oberleitungsbussystem-Simulation berücksichtigt werden, indem das Batterie-/Oberleitungsbusprofil (Geschwindigkeit und Leistungsanspruch) entsprechend angepasst wird.

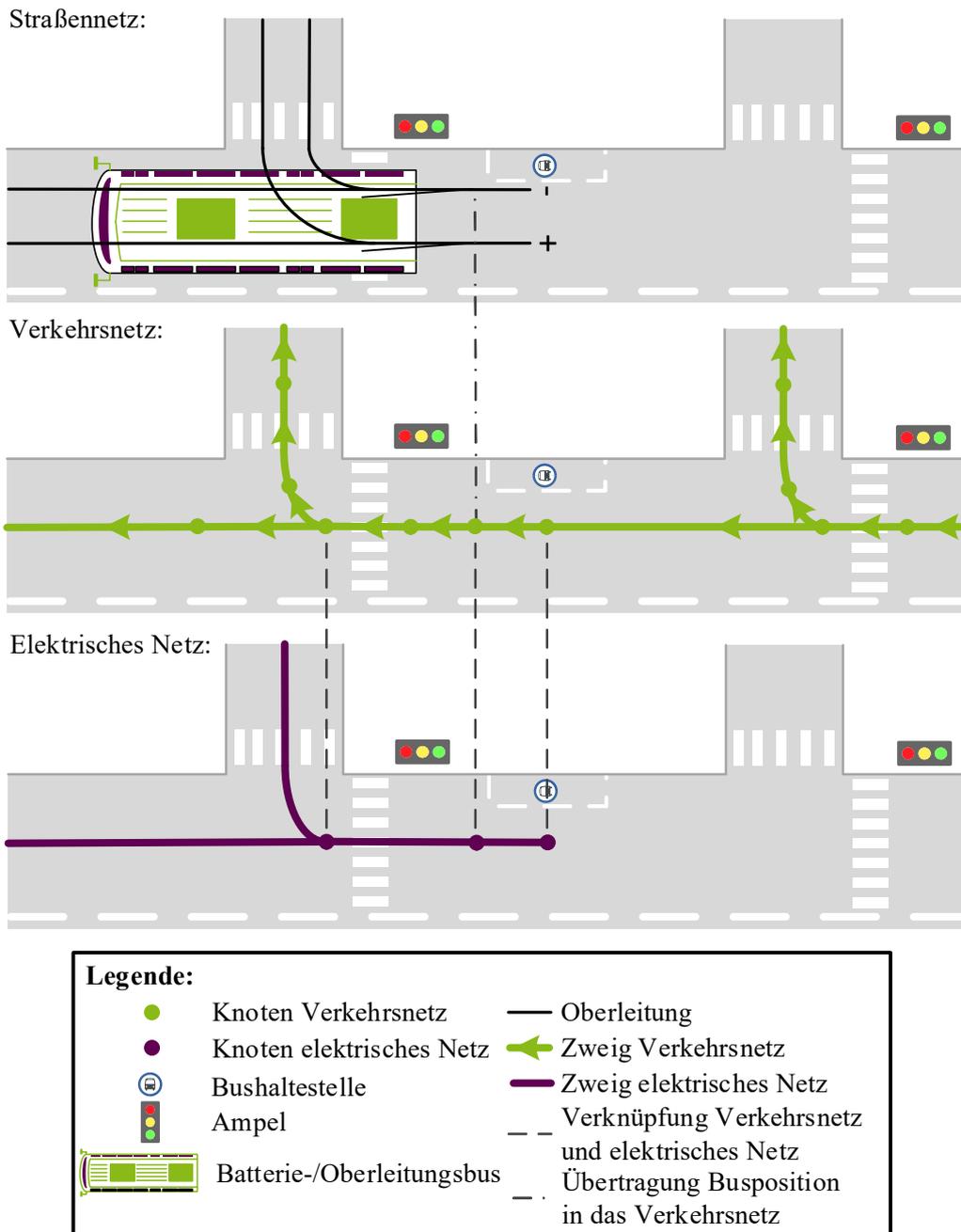


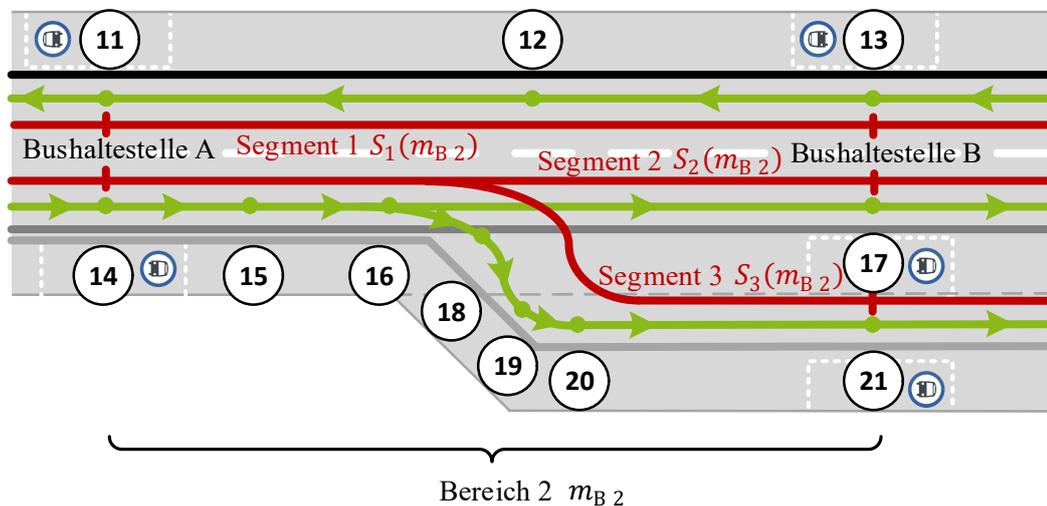
Abbildung 5-3: Visualisierung Verkehrsnetz und elektrisches Netz

Das elektrische Netz wird im dritten Straßenabbild gezeigt, welches deutlich weniger Knoten aufweist. Für eine Leistungsflussberechnung ist eine möglichst geringe Anzahl von Knoten innerhalb des elektrischen Netzes im Hinblick auf die Dauer der Leistungsflussberechnung vorteilhaft.

Die Verknüpfung der beiden Netze erfolgt über die elektrischen Netzknoten mit den dazugehörigen Verkehrsknoten, wie es Abbildung 5-3 andeutet. Dadurch wird die Position eines Batterie-/Oberleitungsbusses vom Verkehrsnetz in das elektrische Netz übertragen.

### 5.5.2 Segmentierung und Bereichsdefinition des Verkehrsnetzes

Die Segmentierung und Bereichsdefinition der Buslinien dient dem Zweck in der nachfolgenden Optimierungsaufgabe notwendige Segmente der Buslinien mit Fahrleitung auszustatten. Während ein Bereich alle Busspuren zwischen zwei Bushaltestellen beinhaltet, ist ein Segment als Busspur zwischen zwei Bushaltestellen definiert. Eine Segmentierung jeder Busspur zwischen Bushaltestellen bietet den Vorteil, dass der Auf- und Abdrahtvorgang möglichst effizient umgesetzt werden kann, da die Batterie-Oberleitungsbusse überwiegend an Bushaltestellen einen Haltevorgang durchführen. Eine vom Fahrerplatz aus gesteuerte Vorrichtung zum automatischen Auf- und Abdrahten ist obligatorisch. Für etwaige, zukünftige Entwicklungen (z. B. Auf- und Abdrahtvorgänge während des Fahrens) kann ebenfalls eine feinstufigere Segmentierung verwendet werden. Darüber hinaus kann ein Segment von mehreren Buslinien befahren werden (siehe Abbildung 5-1).



| Menge          | Elemente (ausschließlich Verkehrsknoten)     | Kardinalität |
|----------------|--|--------------|
| $m_{B 2}$      | {11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21} | 11           |
| $S_1(m_{B 2})$ | {11, 12, 13}                                 | 3            |
| $S_2(m_{B 2})$ | {14, 15, 16, 17}                             | 4            |
| $S_3(m_{B 2})$ | {14, 15, 16, 18, 19, 20, 21}                 | 7            |

**Legende:**

- Knoten Verkehrsnetz
- Zweig Verkehrsnetz
- Bushaltestelle
- Segment
- + Segmentabgrenzung
- 11 Verkehrsknotennummer
- Busspur 1
- Busspur 2
- Busspur 3

Abbildung 5-4: Beispiel einer Segmentierung und Bereichsdefinition

Abbildung 5-4 zeigt einen beispielhaften Bereich aus der Menge  $M_B$  (Kardinalität  $n_{M_B} = |M_B|$ ), welche alle Bereiche beinhaltet. Jedes Element  $m_{B i}$  beinhaltet somit neben den Bushaltestellen

A und B die dazugehörigen Verkehrsknoten und –zweige zwischen diesen Bushaltestellen. Es sei zu erwähnen, dass Abbildung 5-4 exemplarisch die nachfolgenden Mengen darstellt, jedoch bewusst in Bezug auf einer gesteigerten Anschaulichkeit auf die Nummerierung der Verkehrszweige und die Auflistung dieser Elemente in der Tabelle verzichtet. Die Menge  $M_B$  ist wie folgt definiert:

$$M_B = \{m_{B1}, m_{B2}, \dots, m_{Bn} \mid n = n_{MB}\} \quad (5.41)$$

Durch die drei Busspuren ergeben sich in der Abbildung folglich drei Segmente, die potentiell mit Fahrleitung in der Optimierungsaufgabe ausgestattet werden könnten. Die Menge aller Segmente  $S(m_{B_i})$  (Kardinalität  $n_s = |S(m_{B_i})|$ ), welche bereichsabhängig (abhängig von  $m_{B_i}$ ) ist, ist wie folgt definiert:

$$S(m_{B_i}) = \{S_1(m_{B_i}), S_2(m_{B_i}), \dots, S_n(m_{B_i}) \mid n = n_s(m_{B_i}), \\ i \in \{1, \dots, n_{MB}\}\} \quad (5.42)$$

$S(m_{B_i})$  ist somit nicht nur bushaltestellenspezifisch, sondern zusätzlich busspurspezifisch. Es gilt, dass die Mengen der Segmenten  $S_j$  Teilmengen der Bereiche  $m_{B_i}$  darstellen, welche wiederum eine Teilmenge des Verkehrsnetzes  $V_S \cup E_S$  abbilden:

$$S_j \subseteq m_{B_i} \subseteq (V_S \cup E_S), \quad i \in \{1, \dots, n_{MB}\}, \quad j \in \{1, \dots, n_s\} \quad (5.43)$$

### 5.5.3 Determinierung des Energiebedarfs

Die Planung eines aus dem Mittelspannungsnetz gespeisten Oberleitungsbussystem bedingt eine präliminierte Determinierung des beanspruchten Energiebedarfs aller Systemkomponenten, resultierend in einem System-Energiebedarf. Der System-Energiebedarf  $W_{Sys}$  setzt sich aus dem Energiebedarf der Busse  $W_{Bus}$ , der neuartigen Systemkomponenten  $W_{SK}$  sowie den Infrastrukturverlusten<sup>24</sup>  $W_{IV}$  zusammen und wird für jedes Buslinienssegment berechnet.

$$W_{Sys} = W_{Bus} + W_{SK} + W_{IV} \quad (5.44)$$

Die leistungsstärkste und energieintensivste Systemkomponente besteht dabei aus den Batterie-/Oberleitungsbussen, welche neben dem Bedarf an Traktions- und Batterieladeenergie ebenfalls einen Energiebedarf der Nebenverbraucher verzeichnen, dominierend durch Heizung und Klimatisierung. Weitere Einflüsse neuartiger Systemkomponenten (beispielsweise Photovoltaikanlagen) erläutert Abschnitt 2.4, sodass in diesem Abschnitt lediglich eine konzentrierte Energiebedarfsübersicht dargestellt wird.

<sup>24</sup> Infrastrukturverluste stellen Übertragungsverluste im Oberleitungsbussystem dar.

### Batterie-/Oberleitungsbusse

Batterie-/Oberleitungsbusse, welche im Folgenden ausschließlich als rekuperierende Batterie-/Oberleitungsbusse angenommen werden, besitzen einen spezifischen Gesamtenergiebedarf  $\bar{W}_{\text{Bus}}$ , welcher sich aus der spezifischen Traktionsenergie  $\bar{W}_{\text{Bus T}}$ , den spezifischen Nebenverbraucherenergiebedarf  $\bar{W}_{\text{Bus NV}}$  und den spezifischen Verlusten im Batterie-/Oberleitungsbus  $\bar{W}_{\text{Bus V}}$  zusammensetzt.

$$\bar{W}_{\text{Bus}} = \bar{W}_{\text{Bus T}} + \bar{W}_{\text{Bus NV}} + \bar{W}_{\text{Bus V}} \quad (5.45)$$

Ferner unterteilt sich der spezifische Nebenverbraucherenergiebedarf  $\bar{W}_{\text{Bus NV}}$  in den spezifischen Heizungs- und Klimatisierungsenergiebedarf  $\bar{W}_{\text{Bus NV HC}}$  sowie weiteren Nebenverbrauchern  $\bar{W}_{\text{Bus NV wN}}$ , welche sich u. a. aus Beleuchtung und Informationsdisplays zusammensetzen.

$$\bar{W}_{\text{Bus NV}} = \bar{W}_{\text{Bus NV HC}} + \bar{W}_{\text{Bus NV wN}} \quad (5.46)$$

Der spezifische Heizungs- und Klimatisierungsbedarf  $\bar{W}_{\text{Bus NV HC}}$  korreliert mit der Jahreszeit und Klimaregion ( $0,25 \text{ kWh/km} \leq \bar{W}_{\text{Bus NV HC}} \leq 0,54 \text{ kWh/km}$ ) und beträgt im arithmetischen Mittel  $0,31 \text{ kWh/km}$  [75]. Konventionelle Oberleitungsbusse besitzen einen spezifischen Gesamtenergiebedarf (abzüglich Rekuperation) von  $2,43 \text{ kWh/km}$  [110]. Für die Ermittlung des (jährlichen) Gesamtenergiebedarfs aller Batterie-/Oberleitungsbusse  $W_{\text{Bus}}$  eines Verkehrsbetriebes ist die (Jahres)-Fahrleistung  $Y$  der Busflotte erforderlich.

$$W_{\text{Bus}} = \bar{W}_{\text{Bus}} \cdot Y \quad (5.47)$$

Mit den spezifischen Energiebedarfen lassen sich Jahresgesamtenergiebedarfe rudimentär abschätzen, jedoch sind für die Planung einer Oberleitungsbusinfrastruktur detailliertere und segmentspezifische Energiebedarfe vonnöten. Insbesondere stellen die topografischen und klimaregionalen Gegebenheiten signifikante Einflüsse dar, weshalb für die Determinierung des Energiebedarfs die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Oberleitungsbusssystem-Simulation verwendet wird.

Abbildung 5-5 zeigt ein standardisiertes (links oben) sowie ein situationsbedingtes Leistungsprofil (unten) eines Batterie-/Oberleitungsbusses. Das situationsbedingte Leistungsprofil beinhaltet verkehrsbedingte, topografische und ökologische Einflüsse (z. B. zur Grunde liegende Verkehrssituation, Straßensteigungen und Wetterdaten).

Unter Berücksichtigung von Gleichung 5.48 lässt sich  $\bar{W}_{\text{Bus}}$  bestimmen, wodurch sich spezifische Gesamtenergiebedarfe sowie deren Abhängigkeiten ermitteln lassen.

$$\bar{W}_{\text{Bus}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{Bus}}(t) dt, \forall t: t \in \mathbb{R} \quad (5.48)$$

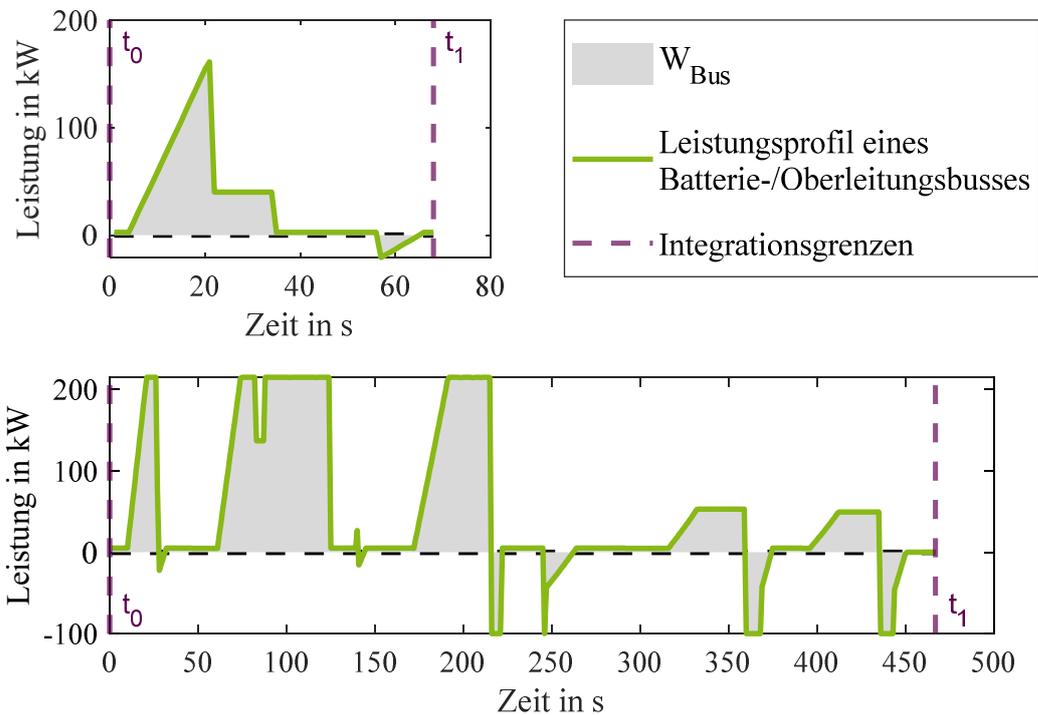


Abbildung 5-5: Standard-Leistungsprofil (links oben) und situationsbedingtes Leistungsprofil (unten) eines simulierten Batterie-/Oberleitungsbusses

Im Anhang (Abschnitt 10.3) werden die relevanten Einflussgrößen (Masse, Umgebungstemperatur und Höhenmeter) auf den Leistungsbedarf der Busse detailliert behandelt. Die Einflussgrößen resultieren in einem signifikanten Unterschied zwischen zwei ausgewählten Szenarien (Trendszenario und Worstcase-Szenario; Abbildung 5-6).

Das Trendszenario simuliert den Energiebedarf an einem charakteristischen Werktag in der Übergangszeit (Frühling oder Herbst), sodass die im Abschnitt 10.3 behandelten Einflussgrößen keine Extremwerte (bspw. bei der Umgebungstemperatur) annehmen. Abbildung 5-6 zeigt für Fallstudie 1 (Abschnitt 5.6.2) erzielte Energiebedarfe. Das Trendszenario basiert neben einer mittleren Passagierauslastung auf Temperaturdurchschnittswerte aus Innsbruck. Das Trendszenario liefert folglich durchschnittliche Energiebedarfe, wobei die Bandbreite durch unterschiedlich simulierte Buslinien, die wiederum unterschiedliche Höhenprofile aufweisen, zu erklären ist. Das Worstcase-Szenario (ebenfalls für Fallstudie 1) betrachtet im Gegensatz zum Trendszenario die Extremwerte der Eingangsparameter, sodass aus historischen Temperaturdaten der kälteste Wintertag für die Simulationsuntersuchung herangezogen wird. Zusätzlich wird die Passagierauslastung maximiert, resultierend in einer gesteigerten Busmasse. Es folgen Energiebedarfe, die sich deutlich oberhalb von denen im Trendszenario befinden. Zusätzlich unterscheidet Abbildung 5-6 in Solo- und Gelenkbussen, aufgrund unterschiedlichen Masseverhältnissen. Gelenkbusse besitzen im Gegensatz zu 12 Meter langen Solobussen ein

Knickgelenk im hinteren Drittel des Fahrzeuges, wodurch eine Länge von 18 Metern erzielt wird. Neben einer erhöhten Passagierkapazität steigt auch die Leermasse im Vergleich zu Solobussen.

Bei der Planung eines Oberleitungsbussystems wird obligatorisch vom Worstcase-Szenario ausgegangen, da das Oberleitungsbussystem so ausgelegt sein muss, dass ein störungsfreier Betrieb auch im Extremfall (kältester Wintertag) gewährleistet werden muss. Dadurch ergeben sich deutliche Flexibilitäten im Trendszenario.

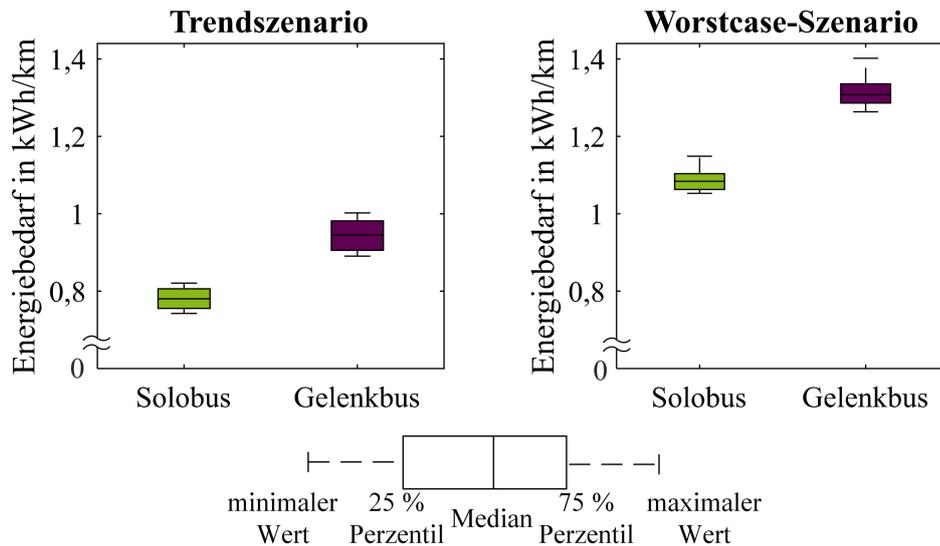


Abbildung 5-6: Vergleich des spezifischen Energiebedarfs von Batterie-Oberleitungsbussen abhängig von gewählten Szenarien (links: Trendszenario; rechts: Worstcase-Szenario)

Die Leistungsbedarfsermittlung des Oberleitungsbussystems findet nach den Gleichungen 5.57 und 5.58 statt, wodurch zum Zeitpunkt  $t_{max}$  der Leistungsbedarf der Batterie-/Oberleitungsbusse  $P_{Bus}(t_{max})$  resultiert. Dieser Zeitpunkt fällt häufig mit der maximal beanspruchten Batterie-/Oberleitungsbusleistung zusammen, da die Batterie-/Oberleitungsbusse die leistungsstärkste Systemkomponente darstellen.

### Neuartige Systemkomponenten

Neben dem Energie- und Leistungsbedarf der Batterie-/Oberleitungsbusse findet eine Betrachtung der neuartigen Systemkomponenten statt. Da eine Photovoltaikanlage, bedingt durch den saisonalen Sonnenstand, im Sommer einen höheren Ertrag generieren kann als im Winter, sind für die Photovoltaikanlagenleistung und dem damit resultierenden Photovoltaikanlagen-Energieertrag  $W_{PV}$  mehrere saisonale Simulationen durchzuführen, um einen repräsentativen Energieertrag  $W_{PV}$  zu erhalten. Im Gegensatz zu  $W_{PV}$  stellt die Elektromobilität zusätzliche Lasten und somit einen zusätzlichen Energiebedarf  $W_{EV}$  im Oberleitungsbussystem dar, welche je nach Anzahl und Ladeleistung der Ladestationen für Elektrofahrzeuge einen signifikanten Anteil darstellen. Für  $W_{SK}$  folgt:

$$W_{SK} = W_{PV} + W_{EV} \tag{5.49}$$

Abschnitt 10.4 (Anhang) visualisiert einen simulativen Energieertrag und –bedarf der beschriebenen Systemkomponenten sowie zusätzlich Infrastrukturverluste.

#### 5.5.4 Determinierung der potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr

Neben der Determinierung des Leistungs- und Energiebedarfs ist die Determinierung der potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr für jedes Busliniensegment vonnöten. Die potentielle Busbatterie-Energiezufuhr beschreibt die theoretisch maximale Energiezufuhr, die durch eine Oberleitungsinfrastruktur bereitgestellt werden kann, um die im Batterie-Oberleitungsbus befindliche Batterie zu laden. Die Oberleitungsinfrastruktur ist in der nachfolgenden Optimierungsaufgabe (Abschnitte 5.5.6 bis 5.5.8) entweder nutzbare Bestandsinfrastruktur (siehe Abschnitt 5.3.3) oder Teil des Lösungskandidaten des evolutionären Algorithmus. Somit stellt die potentielle Busbatterie-Energiezufuhr die Möglichkeit dar, Traktionsenergie aus dieser Oberleitungsinfrastruktur zu beziehen und gegebenenfalls zusätzlich die Batterie eines Batterie-Oberleitungsbusses aufzuladen.

Der maximale Stromtransfer von einem Fahrdrat in einem Batterie-/Oberleitungsbus beträgt während der Fahrt  $I_{D \max}$ . Während eines Stillstandes reduziert sich der Stromtransfer auf maximal  $I_{S \max}$ . Folglich ist der Stromtransfer von der Geschwindigkeit  $v_{\text{BUS}}$  des Batterie-Oberleitungsbusses abhängig und der Stromtransfer während eines Stillstandes hängt von der Standzeit  $t_S$  (bei  $v_{\text{BUS}} = 0$ ) des Batterie-Oberleitungsbusses  $v_{\text{BUS}}$  ab. Dadurch ergibt sich für dem Bus maximal zur Verfügung stehenden Strom  $I_{\text{BUS max}}$  folgendes:

$$I_{\text{BUS max}}(v_{\text{BUS}}, t_S) = \begin{cases} I_{\text{BUS max}}(I_{S \max}, t_S), & v_{\text{BUS}} = 0 \\ I_{D \max}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.50)$$

Der für den Bus maximal zur Verfügung stehende Strom  $I_{\text{BUS max}}$  die Abhängigkeit von  $v_{\text{BUS}}$  und  $t_S$  teilt sich in zwei Ströme auf, welche für die Fortbewegung  $I_{\text{BUS T}}$  und für das potentielle Laden der Batterie  $I_{\text{BUS Bat}}$  zuständig sind. Übersichtshalber werden die oben beschriebenen Abhängigkeiten nicht aufgelistet, jedoch die simulationsdauerabhängige Variable  $t$  ergänzt, die implizit alle Abhängigkeiten darstellt:

$$I_{\text{BUS max}}(t) = I_{\text{BUS Bat}}(t) + I_{\text{BUS T}}(t) \quad (5.51)$$

Mit Hilfe der simulierten und zeitabhängigen Batterie-Oberleitungsbusleistung  $P_{\text{BUS}}$  und der Nennspannung  $U_n$  lassen sich  $I_{\text{BUS Bat}}$ , die potentielle Batterieladeleistung  $P_{\text{BUS Bat}}$  sowie die potentielle Busbatterie-Energiezufuhr  $W_{\text{BUS Bat}}$  bestimmen.

$$I_{\text{BUS Bat}}(t) = I_{\text{BUS max}}(t) - I_{\text{BUS T}}(t) \quad (5.52)$$

$$I_{\text{BUS Bat}}(t) = I_{\text{BUS max}}(t) - \frac{P_{\text{BUS}}(t)}{U_n} \quad (5.53)$$

$$P_{\text{Bus Bat}}(t) = I_{\text{Bus Bat}}(t) \cdot U_n \quad (5.54)$$

$$W_{\text{Bus Bat}} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{Bus Bat}}(t) dt, \forall t: t \in \mathbb{R} \quad (5.55)$$

Bei Gleichung 5.53 ist zu beachten, dass der maximale Ladestrom der Batterie des Batterie-Oberleitungsbusses  $I_{\text{Bus Bat max}} \subseteq \text{bat}_i I_{\text{max}}, i \in \{1, \dots, n_{\text{BAT}}\}$  (vgl. Gleichung 5.25) nicht überschritten wird:

$$I_{\text{Bus Bat}} = \begin{cases} I_{\text{Bus Bat}}, & I_{\text{Bus Bat}} \leq I_{\text{Bus Bat max}} \\ I_{\text{Bus Bat max}}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.56)$$

Das Ergebnis stellt eine potentielle Busbatterie-Energiezufuhr dar, mit der die Batterie der Batterie-Oberleitungsbusse aufgeladen werden kann, insofern eine Oberleitungsinfrastruktur (Bestandsinfrastruktur oder optimierte Fahrleitungsinfrastruktur) und eine nicht vollgeladene Batterie existent sind.

### 5.5.5 Determinierung weiterer optimierungsrelevanter Einflussfaktoren

Der System-Leistungsbedarf  $P_{\text{Sys}}$  wird definiert als Maximalwert der summierten Gleichrichter-Unterwerksleistung  $P_{\text{GUW}}$  aller  $n_{\text{E GUW}}$  Gleichrichter-Unterwerke.

$$P_{\text{Sys}} = \max \left\{ \sum_{i=1}^{n_{\text{E GUW}}} P_{\text{GUW}}(t) \right\}, \forall t: t \in \mathbb{R}, \forall n_{\text{E GUW}}: n_{\text{E GUW}} \in \mathbb{N} \quad (5.57)$$

Bei einem zu planenden Oberleitungsbussystem lässt sich mit Hilfe vom Zeitpunkt  $t_{\text{max}}$ , an dem der System-Leistungsbedarf maximal ist, äquivalent die maximale summierte Gleichrichter-Unterwerksleistung  $P_{\text{Sys}}$  als Summe der zeitzugehörigen Leistungen der Systemkomponenten und Infrastrukturverluste darstellen.

$$P_{\text{Sys}} = P_{\text{Bus}}(t_{\text{max}}) + P_{\text{SK}}(t_{\text{max}}) + P_{\text{IV}}(t_{\text{max}}) \quad (5.58)$$

Die segmentspezifische Batterie-/Oberleitungsbusanzahl wird für die Bestimmung maximaler Speiseweiten in der verwendeten Oberleitungsbussystem-Simulation für jeden Zeitschritt aufgezeichnet, wodurch dynamisch die zonenspezifische Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{\text{Bus } k}$  anhand des Lösungsvektors  $A_L$  (siehe Abschnitt 5.5.7) bestimmt wird.

$$n_{\text{Bus } k} = f(A_L) \quad (5.59)$$

Ebenfalls registriert die Oberleitungsbussystem-Simulation die minimale Zeitdifferenz zweier Batterie-/Oberleitungsbusse für jede Bushaltestelle, sodass ausgehend aus dieser Zeitdifferenz der minimale Batterie-/Oberleitungsbusabstand  $\Delta s$  bestimmt wird. Beispielhafte maximale

Speiseweiten in Abhängigkeit der zonenspezifische Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{\text{Bus } k}$  sowie des minimalen Batterie-/Oberleitungsbusabstandes  $\Delta s$  erläutert Abschnitt 5.5.8.

### 5.5.6 Konzept der Optimierungsaufgabe

Das Ziel der Optimierungsaufgabe ist die Minimierung der Infrastruktur-Investitionskosten bei der Planung eines Oberleitungsbusystems unter Berücksichtigung aller Restriktionen und Einhaltung technologischer Rahmenbedingungen. Die Restriktionen umfassen, neben einer ganzzahligen Optimierung von mit Fahrleitung ausstattungs-fähigen Segmenten, die Batterie-Ladezustände der Batterie-Oberleitungsbusse, die baulichen Restriktionen sowie die nutzbare Bestandsinfrastruktur aus Abschnitt 5.3.

Die Optimierungsaufgabe teilt sich in zwei Teil-Optimierungsaufgaben auf (siehe Abbildung 5-7), wobei die erste Optimierungsaufgabe mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus, welches einem stochastischen Suchverfahren entspricht, gelöst wird. Evolutionäre Algorithmen sind an der natürlichen biologischen Evolution angelehnt und bieten somit Vorteile gegenüber anderen Lösungsalgorithmen. Neben der Unterstützung von (stark) nichtlinearen und diskontinuierlichen Zielfunktionen sowie multimodalen Funktionsräumen, können Sie eine Vielzahl von möglichen Lösungen bereitstellen, die bei der Optimierung der Infrastrukturinvestitionskosten vorteilhaft sind [111]. Somit können im Nachgang äquivalente Lösungen mit nicht signifikanten Investitionsunterschieden miteinander verglichen werden.

Teil-Optimierungsaufgabe 1 widmet sich der Minimierung des Investitionsbedarfs der Fahrleitung. Nach der Erzeugung der ersten Generation von Lösungskandidaten, werden diese mittels der technologischen Rahmenbedingungen sowie der Restriktionen (u. a. Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung) evaluiert. Dabei entstehen angesichts der Batterie-Oberleitungsbusse mehrere Teil-Oberleitungsbusnetze, statt einem kontinuierlichen und lückenlosen Oberleitungsbusssystem, welches ausschließlich mit Oberleitungsbusen ausgestattet ist.

Für Lösungskandidaten der aktuellen Generation, deren Evaluation erfolgreich verläuft, findet die zweite Teil-Optimierungsaufgabe statt, welche sich auf die Minimierung der Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten fokussiert. Eine Zonenbestimmung für jeden Lösungskandidaten der aktuellen Generation findet statt, die jeden Verkehrsknoten (entspricht durch die Segmentierung ausschließlich Bushaltestellen) einer Zone zuordnet. Jede Zone bzw. jedes Teil-Oberleitungssystem benötigt wiederum eine eigene Energieversorgung über Gleichrichter-Unterwerke. Je nach Netztopologie sowie Energie- und Leistungsbedarf variieren die Anzahl der Gleichrichter-Unterwerke sowie die Auslegungen der Transformatoren. Folglich werden mit Hilfe von Gleichzeitigkeitsfaktoren zuerst die minimale Anzahl an Gleichrichter-Unterwerken ermittelt und aufbauend eine Gleichrichter-Unterwerkspositionierung durchgeführt. Diese Gleichrichter-Unterwerkspositionierung wird für alle möglichen Startpositionen jeder Zone eines Lösungskandidaten der aktuellen Generation durchgeführt. Nach erfolgreicher Prüfung der

Kurzschlussstromerkennbarkeit wird die wirtschaftlichste Lösung aller durchgeführten Gleichrichter-Unterwerkspositionierungen ermittelt.

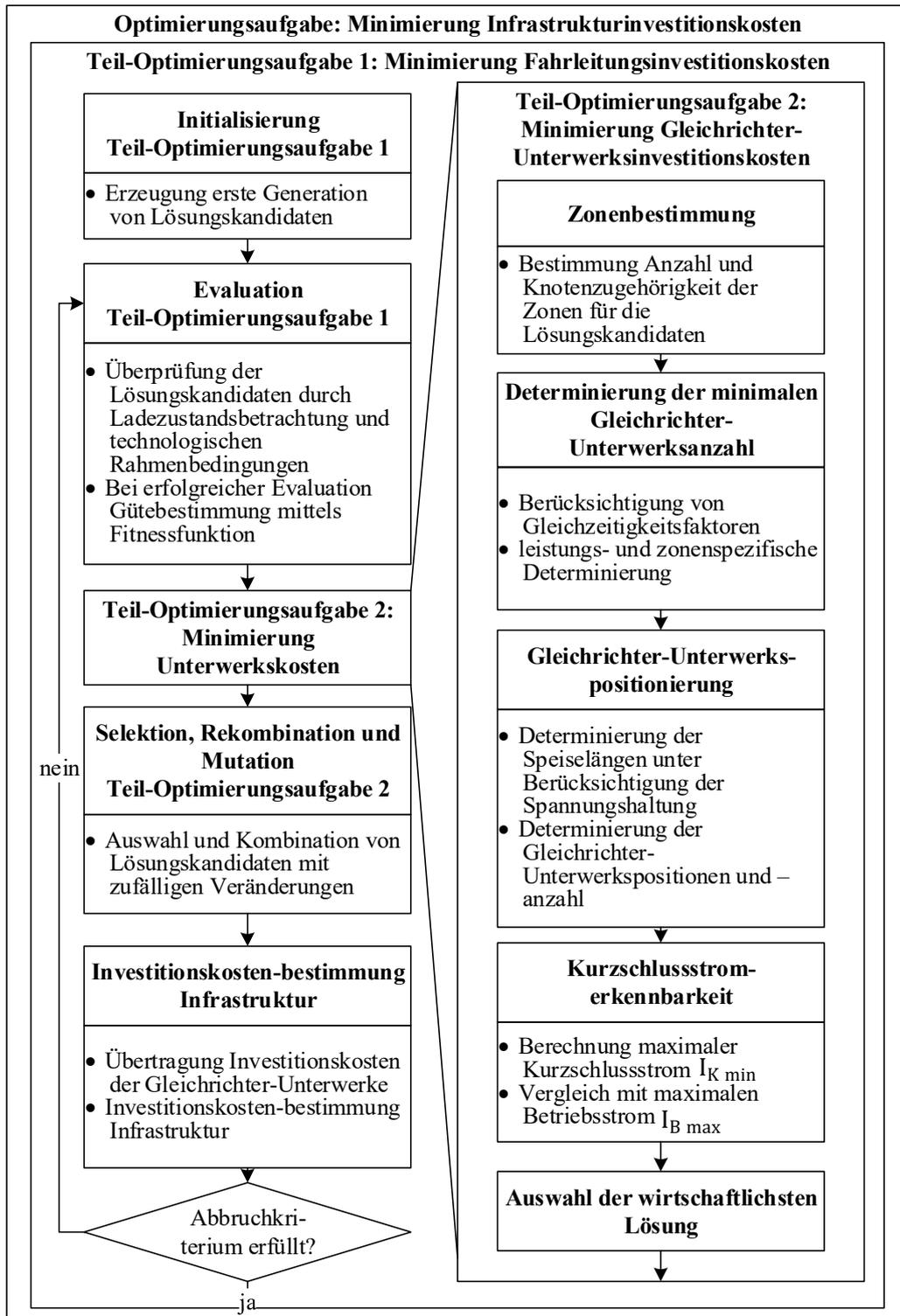


Abbildung 5-7: Ablaufschema der Optimierungsaufgabe

Anschließend werden die Ergebnisse in die erste Teil-Optimierungsaufgabe übertragen und die aktuelle Generation von Lösungskandidaten wird selektiert, kombiniert und mutiert, um neue Lösungskandidaten – angelehnt an die Natur – zu erzeugen. Nach einer Kostenbestimmung der

Fahrleitungsinvestitionskosten sowie der Übertragung der Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten, werden die Gesamtinvestitionskosten der Infrastruktur berechnet. Folgende Gleichung beschreibt die übergeordnete Zielfunktion, indem die summierten Investitionskosten  $K_I$ , welche sich aus den Fahrleitungsinvestitionskosten  $K_{IF}$ , den Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten  $K_{IGUW}$  und weiteren Infrastrukturinvestitionskosten  $K_{IW}$  (Luftweichen, siehe Abschnitt 5.5.7) zusammensetzen, und zu  $K_{I\min}$  mittels der beschriebenen Optimierung minimiert werden.

$$K_{I\min} = \min\{K_I\} = \min\{K_{IF} + K_{IGUW} + K_{IW}\} \quad (5.60)$$

Die Optimierung wird durch eine Abbruchbedingung beendet, bei der die relative Änderung der Infrastrukturinvestitionskosten von den einzelnen Lösungskandidaten betrachtet wird. Mittels einer möglichst großen ersten Generation von Lösungskandidaten wird die Wahrscheinlichkeit lokale Optima zu determinieren minimiert. Durch Einhaltung aller Restriktionen innerhalb der Optimierung gewährleistet die determinierte Lösung bei Identifikation eines Kostenoptimums einen sicheren Betrieb.

### 5.5.7 Teil-Optimierungsaufgabe 1: Minimierung Fahrleitungsinvestitionskosten

Bei der Ermittlung der minimalen Investitionskosten  $K_{I\min}$  handelt es sich um ein ganzzahliges nicht-lineares Optimierungsproblem. Die Fahrleitungsinvestitionskosten  $K_{IF}$  stellen dabei den ersten und erfahrungsgemäß größten Teil der Investitionskosten  $K_I$  dar. Im Folgenden wird erläutert, wie sich  $K_{IF}$  mathematisch unter Berücksichtigung der zugehörigen Nebenbedingungen abbilden lässt. Die Nebenbedingungen gewährleisten einen sicheren Betrieb der Batterie-/Oberleitungsbusse und berücksichtigen Bestandsinfrastruktur sowie bauliche Restriktionen.

Der in der nachfolgenden Optimierungsaufgabe aktuelle Lösungskandidat  $A_L$ , welcher mit Hilfe des evolutionären Algorithmus erzeugt und variiert wird, kann wie folgt beschrieben werden:

$$A_L = \{a_{L1}, a_{L2}, \dots, a_{Ln} \mid n = n_{SB}\} \quad (5.61)$$

Die Elemente  $a_{Li}$  sind dabei wie folgt definiert:

$$a_{Li} = \begin{cases} \{1\}, & \triangleq \text{Fahrdraht auf zugehörigem Segment} \\ \{0\}, & \triangleq \text{keinen Fahrdraht auf zugehörigen Segment} \end{cases} \quad (5.62)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n_{SB}\}$$

Die im Vorfeld durchgeführte Segmentierung und Bereichsdefinition des Verkehrsnetzes (Abschnitt 5.5.2) resultiert in einer ganzzahligen Optimierung. Während ein Bereich zwei Bushaltestellen sowie die darin befindlichen Busspuren beinhaltet, bezeichnen Segmente lediglich eine Busspur eines Bereiches (siehe Abbildung 5-1). Batterie-/Oberleitungsbusse halten vorwiegend an Bushaltestellen, sodass Auf- und Abdrahtvorgänge während dieser Standzeiten durchführbar sind und Segmente vollständig im Folgenden mit oder ohne Fahrdraht ausgestattet

werden. Die maximale Bereichsanzahl  $n_{MB}$  ist definiert als Anzahl aller Bereiche zwischen jeweils zwei Bushaltestellen eines Verkehrsnetzes, während  $n_{SB}$ , neben der Kardinalität von der Menge  $SB$ , gleichzeitig die maximale mit Fahrdrabt ausgestattete und lösungskandidatenabhängige Busspuranzahl aller Bereiche bedeutet.

Folglich werden die Fahrleitungsinvestitionskosten  $K_{IF}$  wie folgt definiert:

$$K_{IF} = \sum_{i=1}^{n_{MB}} \sum_{j=1}^{n_S(m_{B_i})} k(j) \cdot l(m_{B_i}, A_L, G_S, j) + k_{WI} \tag{5.63}$$

Dabei bildet die Funktion  $l(m_{B_i}, A_L, G_S, j)$  die mit Fahrdrabt auszustattende Busspurlänge, abhängig von der Busspuranzahl  $j$ , ab. Abbildung 5-8 zeigt beispielhaft für einen Bereich mit zwei Segmenten und zwei ausgewählten Lösungskandidaten die unterschiedlichen Längen  $l_1$  und  $l_2$  (Busspurlänge der vom Lösungskandidaten abhängigen mit Fahrdrabt auszustattenden einfachen bzw. zweifachen Busspur).

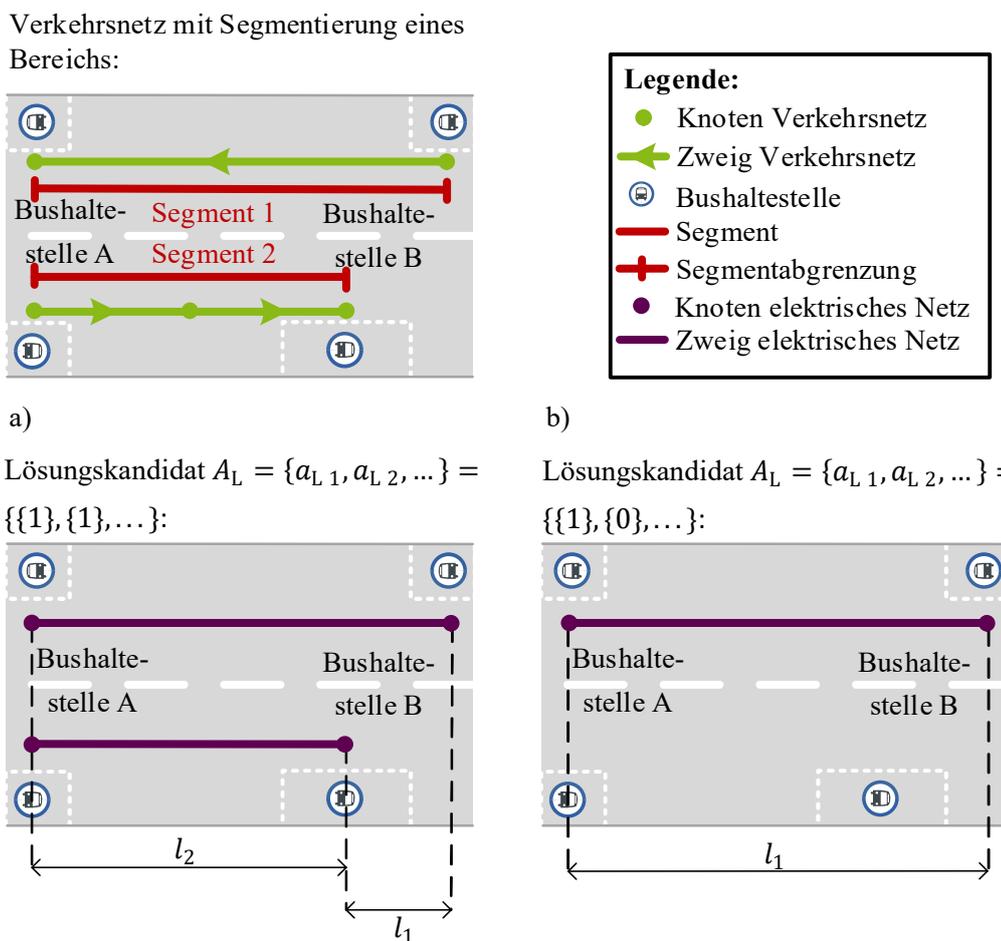


Abbildung 5-8: Fahrdrabtlängenbestimmung abhängig vom Lösungskandidaten

Im Beispiel a) ergibt sich für den ausgewählten Bereich anhand des Lösungskandidaten (beide Busspuren werden mit Fahrleitung ausgestattet) und des Verkehrsnetzes (repräsentiert durch den

gerichteten Graphen  $G_S$ ) eine Länge  $l_2$ , die anschließend mit den spezifischen zweispurigen Fahrleitungs-Investitionskosten  $\bar{k}_{F2}$  und eine Länge  $l_1$ , die mit den spezifischen einspurigen Fahrleitungs-Investitionskosten  $\bar{k}_{F1}$  verrechnet werden. Die Längen werden anhand des Graphen  $G_S$  ermittelt.

Im Beispiel b) wird lediglich (aufgrund des aktuellen Lösungskandidaten) ein Segment mit Fahrdrabt ausgestattet, sodass die gesamte Strecke folglich mit den spezifischen einspurigen Fahrleitungs-Investitionskosten  $\bar{k}_{F1}$  verrechnet wird.

Die Kostenfunktion  $k(j)$  ist, mit Hilfe der spezifischen Busspurinvestitionskosten ( $\bar{k}_{F1}$ ,  $\bar{k}_{F2}$  und  $\bar{k}_{F\Delta}$  (spez. Investitionskosten je weiterer Busspur); siehe Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2), wie folgt definiert:

$$k(j) = \begin{cases} \bar{k}_{F1}, & \text{wenn } j = 1 \\ \bar{k}_{F2}, & \text{wenn } j = 2, j \in \mathbb{N}, j \geq 1 \\ \bar{k}_{F2} + \bar{k}_{F\Delta} \cdot (j - 2), & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.64)$$

### Bestimmung weiterer Infrastrukturinvestitionskosten

Zusätzliche Kosten entstehen bei der Installation der Infrastruktur durch die notwendigen Luftweichen und resultierenden Kreuzungen. Die Luftweichen unterscheiden sich in Auslauf- und Einlaufweichen, wobei Auslaufweichen eine Weichensteuerung besitzen müssen, welche entweder vom Batterie-/Oberleitungsbus oder von einem Betriebsleitsystem angesteuert werden. Einlaufweichen hingegen führen lediglich zwei Oberleitungsbusspuren zusammen. Kreuzungen besitzen einen komplexen Aufbau, da Plus- und Minuspol vollständig voneinander isoliert sein müssen, wodurch ebenfalls zusätzliche Kosten entstehen.

Die weiteren betrachteten Infrastrukturinvestitionskosten setzen sich folglich aus den Kosten für die Luftweichen  $k_W(A_L)$  und die Kreuzungen  $k_K(A_L)$ , welche abhängig vom gewählten Lösungskandidaten  $A_L$  sind, zusammen. Die Luftweichenkosten  $k_W(A_L)$  setzen sich wiederum aus den Kosten für die Einlaufweichen  $k_{EW}(A_L)$  und Auslaufweichen  $k_{AW}(A_L)$  zusammen.

$$k_{WI} = k_K(A_L) + k_W(A_L) = k_K(A_L) + k_{EW}(A_L) + k_{AW}(A_L) \quad (5.65)$$

### Nebenbedingung 1: Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung

Die erste Nebenbedingung führt eine Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung durch, welche für einen zuverlässigen Betrieb obligatorisch ist. Ziel dieser Nebenbedingung ist, die Ladezustände sämtlicher Batterie-Oberleitungsbusse über alle Segmente hinweg zu überprüfen und Lösungskandidaten auszusortieren, deren resultierende Ladezustände nicht die fest definierte Ladezustandsgrenze einhalten.

Dazu wird die Menge der Nebenbedingungen der Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung  $H_N$  eingeführt.

$$H_N = \{h_1, h_2, \dots, h_n \mid n = n_{SB}\} \quad (5.66)$$

Jedes Element der Menge  $H_N$  ist definiert als eine Nebenbedingung.

$$h_i = \min\{\text{row}_i(\mathbf{SOC})\} \geq f_{\text{Bus Bat R } i} \quad (5.67)$$

Der im Anhang (Abschnitt 10.2) eingeführte SoC-Reservefaktor  $f_{\text{Bus Bat R}}$  beschreibt den minimalen Busbatterie-Ladezustand am Ende sämtlicher Segmente über den gesamten Simulationshorizont, den die Batterie-Oberleitungsbusse bei dieser Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung erreichen dürfen. Mittels des SoC-Reservefaktors lassen sich nicht vorhersehbare Verkehrssituationen indirekt abbilden. Verkehrsstaus stellen solche Verkehrssituationen dar, in denen der Verkehr zum Erliegen oder stark ins Stocken geraten ist und beanspruchen bei nichtvorhandener Fahrleitung die Busbatterie zusätzlich. Ein weiterer Aspekt beinhaltet verkehrslenkende Maßnahmen wie Umleitungen, die außerplanmäßig die Busbatterie-Ladezustände verringern können. Folglich schützt ein erhöhter Sicherheitsfaktor vor einer vollständig entladenen Busbatterie, resultiert aber gleichzeitig in einem erhöhten Infrastrukturbedarf. Bei Nichtbetrachtung des Reservefaktors kann dieser für einen oder sämtliche Busse auf  $f_{\text{Bus Bat R}} = 0$  bzw.  $f_{\text{Bus Bat R}} = \mathbf{0}$  reduziert werden. Für jeden Bus wird ein spezifischer Reservefaktor erstellt, sodass  $f_{\text{Bus Bat R}}$  die Dimension  $m \times 1$  besitzt. Die folgende Betrachtung findet über  $m = n_b(b_i)$  (siehe Gleichung 5.16) Batterie-Oberleitungsbusse sowie über  $n = f(L_i)$  (siehe Gleichung 5.3) Busumlaufplan-Segmente statt. Dabei wird in der Planung der Worstcase-(Typ-)Tag  $i_{WC} \in \{1, 2, \dots, n_B\}$  ermittelt und in der weiteren Planung verwendet.

$$f_{\text{Bus Bat R}} = \begin{bmatrix} f_{\text{Bus Bat R } 1} \\ f_{\text{Bus Bat R } 2} \\ \vdots \\ f_{\text{Bus Bat R } m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{\text{Bus Bat R}(b_{i 1})} \\ f_{\text{Bus Bat R}(b_{i 2})} \\ \vdots \\ f_{\text{Bus Bat R}(b_{i m})} \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}, \quad (5.68)$$

$$m = n_b(b_i), i = i_{WC}$$

Des Weiteren wird in der Regel von einer initial vollständig geladenen Busbatterie, bei Verlassen des Busdepots, ausgegangen. Diese Annahme schlägt sich in einer vorhandenen Busdepot-Lademöglichkeit für alle  $m$  Batterie-Oberleitungsbusse nieder. Alternativ existiert die Möglichkeit einen verminderten Initial-Ladezustand  $f_{\text{Bus Bat SoC}}$  zu verwenden (siehe Abschnitt 10.2). Es folgt:

$$\mathbf{f}_{\text{Bus Bat SoC}} = \begin{bmatrix} f_{\text{Bus Bat SoC}}(b_{i1}) \\ f_{\text{Bus Bat SoC}}(b_{i2}) \\ \vdots \\ f_{\text{Bus Bat SoC}}(b_{im}) \end{bmatrix} \leq \mathbf{1}, \quad (5.69)$$

$$m = n_b(b_i), i = i_{\text{WC}}$$

Die Matrix **SOC** setzt wie folgt zusammen, wobei der erste Spaltenvektor dem Initial-Ladezustand  $\mathbf{f}_{\text{Bus Bat SoC}} = \text{col}_1(\mathbf{SOC})$  entspricht. Dabei sei  $n_{Lj} = |L_j|$ .

$$\mathbf{SOC} = \begin{bmatrix} \text{SOC}_{1,1} & \cdots & \text{SOC}_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{SOC}_{m,1} & \cdots & \text{SOC}_{m,n} \\ \hline \text{SOC}_{*,1} & & \end{bmatrix}, \quad (5.70)$$

$$m = n_b(b_i), n = n_{Lj} + 1, i = i_{\text{WC}}, j \in \{1, 2, \dots, n_L\}$$

Alle weiteren Elemente (ab Spalte 2) der Matrix **SOC** werden wie folgt berechnet, wobei die Funktion  $a_L(i, j)$  das Element des Lösungsvektors des aktuell vom Batterie-Oberleitungsbus befahrenden Segmentes zeigt:

$$\begin{aligned} \text{SOC}_{i,j} &= \text{SOC}_{i,j-1} + \frac{W_{\text{Bus } i,j-1}}{W_{\text{Bus Bat EI } j-1}} (a_L(i, j) - 1) \\ &\quad + \frac{W_{\text{Bus Bat } i,j-1}}{W_{\text{Bus Bat EI } j-1}} a_L(i, j), \end{aligned} \quad (5.71)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, n_b(b_m)\}, j \in \{2, \dots, n_{Lj}\}, m = i_{\text{WC}}, n \in \{1, 2, \dots, n_L\}$$

Die zuvor betrachteten skalaren Werte  $W_{\text{Bus}}$  und  $W_{\text{Bus Bat}}$  (Abschnitte 5.5.3 und 5.5.4) werden zu diesem Zweck zu den Matrizen  $\mathbf{W}_{\text{Bus}}$  und  $\mathbf{W}_{\text{Bus Bat}}$ , wodurch die Elemente  $W_{\text{Bus } m,n}$  und  $W_{\text{Bus Bat } m,n}$  resultieren:

$$\mathbf{W}_{\text{Bus}} = \begin{bmatrix} W_{\text{Bus } 1,1} & \cdots & W_{\text{Bus } 1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{\text{Bus } m,1} & \cdots & W_{\text{Bus } m,n} \end{bmatrix}, \quad (5.72)$$

$$m = n_b(b_i), n = n_{Lj}, i = i_{\text{WC}}, j \in \{1, 2, \dots, n_L\}$$

und

$$\mathbf{W}_{\text{Bus Bat}} = \begin{bmatrix} W_{\text{Bus Bat } 1,1} & \cdots & W_{\text{Bus Bat } 1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{\text{Bus Bat } m,1} & \cdots & W_{\text{Bus Bat } m,n} \end{bmatrix}, \quad (5.73)$$

$$m = n_b(b_i), n = n_L, i = i_{WC}, j \in \{1, 2, \dots, n_L\}$$

Jedes Element ( $W_{\text{Bus } m,n}$  und  $W_{\text{Bus Bat } m,n}$ ) entspricht dabei dem determinierten Energiebedarf bzw. der potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr eines Batterie-Oberleitungsbusses und eines Segmentes. Die Werte werden mit den in den Abschnitten 5.5.3 und 5.5.4 beschriebenen Methoden sowie mittels der Oberleitungsbussystem-Simulation für alle Busse und Segmente ermittelt.

Bei der konsekutiven Berechnung der Ladezustände  $soc_{m,n}$  wird folgende obligatorische Begrenzung des maximalen Ladezustandes zusätzlich berücksichtigt:

$$soc_{m,n} = \begin{cases} 1 & soc_{m,n} > 1 \\ soc_{m,n} & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.74)$$

### Nebenbedingung 2: Existierende Fahrleitung

Existierende Fahrleitungen senken die zu erwartenden Investitionskosten und finden bei der Beschreibung des unteren Grenzwertes des Lösungskandidaten  $A_L$  Anwendung. Aufgrund der beschriebenen ganzzahligen Optimierungsaufgabe und der zuvor gewählten Definition mit Fahrleitung ausgestatteter Segmente ( $a_L = 1$ ) sowie nicht mit Fahrleitung ausgestattete Segmente ( $a_L = 0$ ), lassen sich existierende Fahrleitungen wie folgt berücksichtigen:

$$u = \{\{1\}, \dots, \{1\}\}, u \subseteq A_L \quad (5.75)$$

Dabei beschreibt  $u$  den unteren Grenzwert der Optimierungsaufgabe und ist als Teilmenge des Lösungskandidaten  $A_L$  definiert. Segmente mit existenter Fahrleitung erhalten als unteren Grenzwert 1, infolgedessen wird der Lösungskandidat dahingehend optimiert, dass diese Segmente (aufgrund der ganzzahligen Optimierung) stets eine Fahrleitung erhalten.

### Nebenbedingung 3: Bauliche Restriktionen

Der obere Grenzwert  $o$  beinhaltet die baulichen Restriktion des nichtbebaubaren Raumes. Äquivalent zum unteren Grenzwert  $u$  ist der obere Grenzwert  $o$  als Teilmenge des Lösungskandidaten  $A_L$  definiert und beinhaltet die Segmente, auf denen kein Fahrdracht errichtet werden kann oder darf.

$$o = \{\{0\}, \dots, \{0\}\}, o \subseteq A_L \quad (5.76)$$

Als Restriktion der Optimierungsaufgabe erhalten Segmente, die keine Fahrleitung besitzen dürfen den oberen Grenzwert 0, wodurch die Optimierung einen Lösungskandidaten ermittelt, der auf diesen Segmenten keinen Fahrdracht aufweist.

### 5.5.8 Teil-Optimierungsaufgabe 2: Minimierung Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten

Der zweite Teil der Optimierung bezieht sich auf die Determinierung der Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten. Für einen existierenden Lösungskandidaten  $A_L$  (siehe Abschnitt 5.5.7) werden die minimalen Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten ermittelt. Dabei wird kein zweiter evolutionärer Algorithmus angewandt, sondern Lösungen sämtlicher Startknoten ermittelt, validiert und anschließend das wirtschaftliche Optimum ausgewählt. Die Determinierung der Unterwerksinvestitionskosten teilt sich in folgende Unterschritte auf:

- Zonenbestimmung
- Determinierung der minimalen leistungs- und zonenspezifischen Gleichrichter-Unterwerksanzahl
- Gleichrichter-Unterwerkspositionierung
- Prüfung Kurzschlussstromerkennbarkeit
- Auswahl der wirtschaftlichsten Lösung

#### Zonenbestimmung

Die Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten  $K_{I\ GUW}$  stellen einen Teil der zu minimierenden Infrastruktur-Investitionskosten  $K_I$  dar. Ausgehend vom Lösungskandidaten  $A_L$  resultiert eine Menge von Zonen  $z$ , wobei die Kardinalität  $n_z = |z|$  und somit die Anzahl der Zonen entspricht.

$$z = f(A_L) \quad (5.77)$$

Eine Zone stellt einen elektrisch zusammenhängenden Abschnitt des Fahrleitungsnetzes dar. Die Gleichrichter-Unterwerke, deren Position- und Dimensionierung im Folgenden stattfinden, bilden dabei die Grenze einer Zone, da diese mit dem vorgelagerten Mittelspannungsnetz verbunden sind. Da jede Zone von mindestens einem Gleichrichter-Unterwerk versorgt wird (bei Planung gemäß des  $(n - 1)$ -Kriteriums von mindestens 2 Gleichrichter-Unterwerken), ist die Zonenanzahl  $z$  ein primärer Faktor zur Ermittlung der Infrastruktur-Investitionskosten  $K_I$ . Eine geringere Zonenanzahl führt mehrheitlich zu einer verminderten Anzahl der notwendigen Gleichrichter-Unterwerke.

Mit Hilfe der im Abschnitt 5.3 erläuterten Datengrundlage sowie dem aktuellen Lösungskandidaten  $A_L$  wird ein Graph  $G_L$ , bestehend aus den im Lösungskandidaten referenzierten Zweigen und den dazugehörigen Knoten, erstellt. Der entstehende Graph  $G_L$  des Lösungskandidaten beschreibt anschließend einen Teilgraphen des Graphen  $G_S$ , welcher sich aus der Straßendatenbank zusammensetzt. Der Graph  $G_L$  repräsentiert ein Oberleitungsnetz, welches durch die Kanten und Knoten der nutzbaren Bestandsinfrastruktur (Graph  $G_E$ ) ergänzt wird. Der ermittelte Graph  $G_L$  des Lösungskandidaten fungiert als Grundlage zur Zonenbestimmung, indem der Graph auf zusammenhängende Knoten untersucht wird. Die maximal zusammenhängenden

Teilgraphen des Lösungsgraphen  $G_L$  werden in der Graphentheorie als Zusammenhangskomponenten von  $G_L$  und im weiteren Verlauf dieser Arbeit als Zonen bezeichnet. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft Abbildung 5-9 dargestellt, in dem der Lösungsgraph  $G_L$  zwei zusammenhängende Zonen enthält.

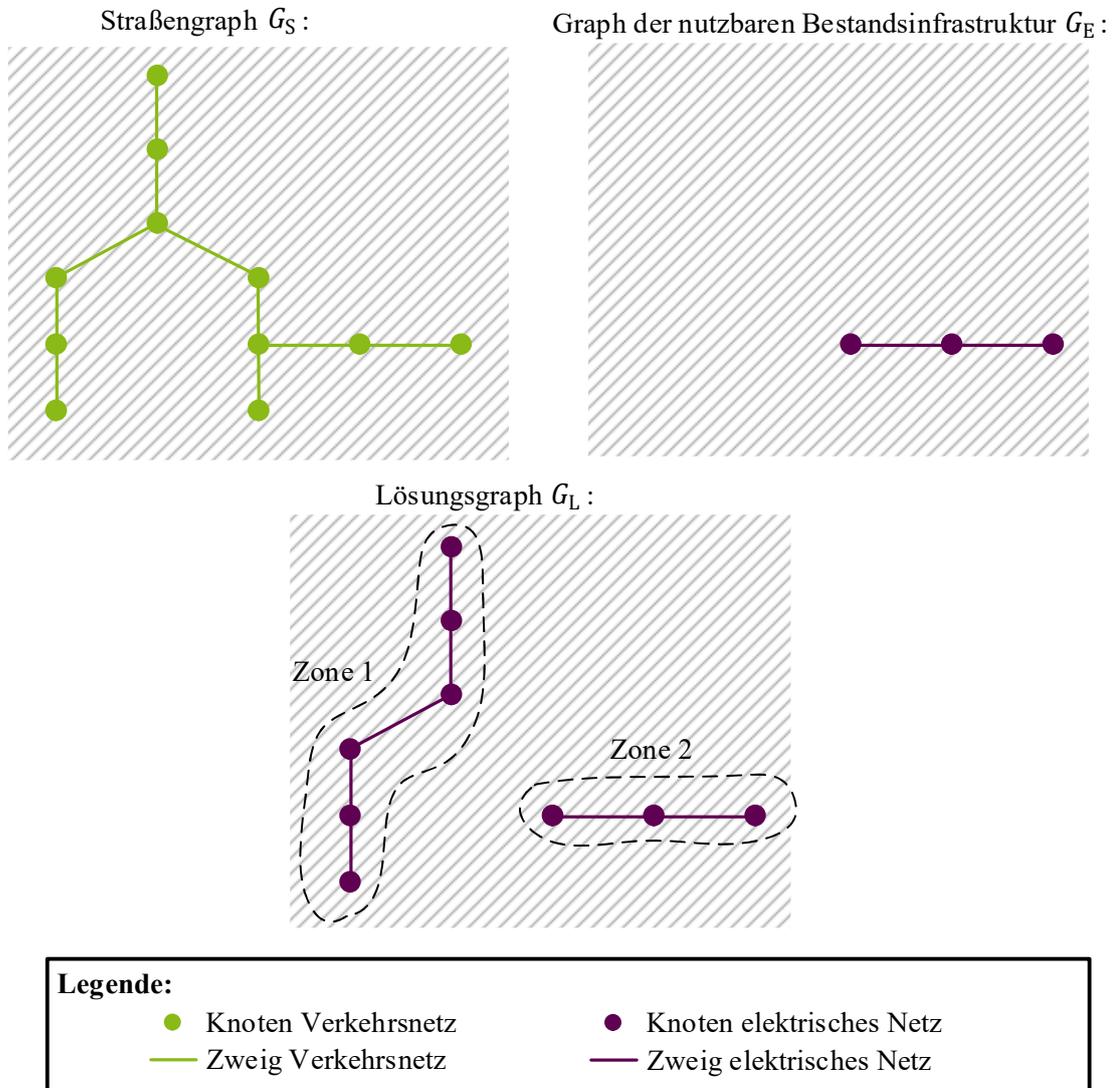


Abbildung 5-9: Beispiel eines Lösungsgraphen  $G_L$  mit den zugehörigen Zusammenhangskomponenten bzw. Zonen

### Determinierung der minimalen leistungs- und zonenspezifischen Gleichrichter-Unterwerksanzahl

Nach erfolgreicher Zonenanzahlbestimmung  $n_z$  findet die Determinierung der minimalen Zonen-Unterwerksanzahl  $n_{GUWk \min}$  über die Ermittlung der maximalen Gleichrichter-Unterwerksleistung, basierend auf Gleichzeitigkeitsfaktoren, statt. Dazu ist zunächst die maximale auftretende Anzahl von Batterie-/Oberleitungsbusse in sämtlichen Zonen zu ermitteln. Die Anzahl der Batterie-/Oberleitungsbusse pro Segment und Zeitschritt wird bei der Determinierung des Energiebedarfs (Abschnitt 5.5.3) zusätzlich in Matrizen  $A_0$

(Oberleitungsbusse) und  $\mathbf{A}_B$  (Batterie-Oberleitungsbusse) aufgezeichnet. Für  $s = n_{SB}$  Segmente und  $t = t_H$  Zeitschritte ( $t_H$  entspricht den Simulations-Zeithorizont) und ergeben sich jeweils eine Matrix der Dimension  $s \times t$ :

$$\mathbf{A}_O = \begin{pmatrix} A_{O\ 1,1} & \dots & A_{O\ 1,t_H} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{O\ n_{SB},1} & \dots & A_{O\ n_{SB},t_H} \end{pmatrix} \quad (5.78)$$

$$\mathbf{A}_B = \begin{pmatrix} A_{B\ 1,1} & \dots & A_{B\ 1,t_H} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{B\ n_{SB},1} & \dots & A_{B\ n_{SB},t_H} \end{pmatrix} \quad (5.79)$$

Die für jede Zone generierbaren Teilmatrizen  $\mathbf{A}_{O\ i}$  und  $\mathbf{A}_{B\ i}$  enthalten ausschließlich Segmente, die der entsprechenden Zone zugehörig sind, wodurch sich die Zeilenanzahl – jedoch nicht die Spaltenanzahl – reduziert:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{O\ i}[\beta, \gamma], \mathbf{A}_{B\ i}[\beta, \gamma], \beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{m'}\} \subseteq \{1, 2, \dots, n_{SB}\}, \\ m' = n'_{SB}, \gamma = \{1, 2, \dots, t_H\}, i \in \{1, 2, \dots, n_z\} \end{aligned} \quad (5.80)$$

Dabei bezeichnet die Indexmenge  $\beta$  eine Teilmenge der ursprünglichen Indexmenge, während die Indexmenge  $\gamma$  der ursprünglichen Indexmenge (Spaltenanzahl bleibt erhalten) entspricht.

Zur Bestimmung der maximalen Gleichrichter-Unterwerksleistung  $P_{GUW\ k}$  sämtlicher  $k$  Zonen, werden simuliert-generierte Gleichzeitigkeitsfaktoren  $GZF$  eingesetzt. Dabei bezeichnet  $n_{Bus}$  die maximale im Oberleitungsnetz befindliche Busanzahl,  $P_{Bus\ max}$  die maximale Leistung eines Busses (einschließlich Nebenverbraucher) und  $P_{Bus}(t)$  die zeitabhängige Busleistung.

$$GZF = \frac{\max \{ \sum_{i=1}^{n_{Bus}} P_{Bus\ i}(t) \}}{\sum_{i=1}^{n_{Bus}} P_{Bus\ max\ i}} \quad (5.81)$$

Die Gleichzeitigkeitsfaktoren wurden in Abbildung 5-10 für Oberleitungsbusse  $GZF_O$  und Batterie-Oberleitungsbusse  $GZF_B$  bestimmt und sind in als Gleichungen in 5.82 und 5.83 angegeben. Die Gleichzeitigkeitsfaktoren der Oberleitungsbusse wurden simulativ (Worstcase-Simulation) unter Verwendung von Gleichung 5.81 bestimmt, indem für Fallstudie 2 ausschließlich Oberleitungsbusse angenommen wurden. Die Determinierung der Gleichzeitigkeitsfaktoren von Batterie-Oberleitungsbussen fand ebenfalls simulativ (Worstcase-Simulation, Fallstudie 1) statt, jedoch wurden diese iterativ (mehrere Planungsdurchläufe) bestimmt, da nicht auf ein Oberleitungsbussystem mit Batterie-Oberleitungsbussen zurückgegriffen werden konnte.

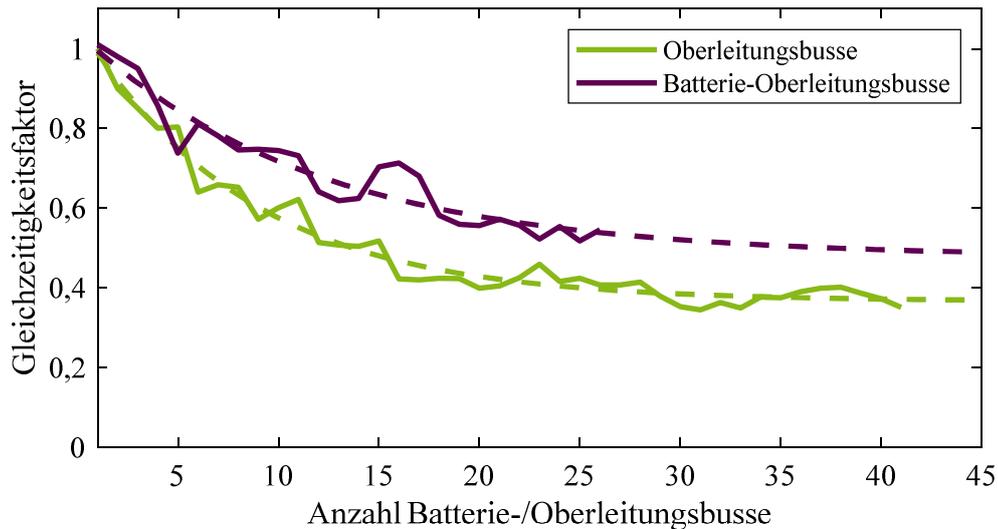


Abbildung 5-10: Gleichzeitigkeitsfaktoren für Batterie-/Oberleitungsbusse

$$GZF_O = 0,3660 + 0,7041 \cdot e^{-0.1215 \cdot x} \quad (5.82)$$

$$GZF_B = 0,4768 + 0,5637 \cdot e^{-0.08533 \cdot x} \quad (5.83)$$

Mit den zugrundeliegenden Gleichzeitigkeitsfaktoren, die mittels einer exponentiellen Regression nach der Funktion  $a - b \cdot e^{-c \cdot x}$  berechnet sind, lassen sich die zu erwartenden maximalen Gleichrichter-Unterwerksleistungen sämtlicher Zonen  $P_{GUW k}$  bestimmen.

$$P_{GUW k} = \max \left\{ \left( \sum_{i=1}^{n_{SB}} A_{O i}[\beta, \gamma] \cdot GZF_O[\beta, \gamma] \cdot P_{Bus \max i} + \sum_{i=1}^{n_{SB}} A_{B i}[\beta, \gamma] \cdot GZF_B[\beta, \gamma] \cdot P_{Bus \max i} \right) \right\}, \quad (5.84)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, t_{\text{end}}\}, k \in \{1, 2, \dots, n_z\}, i \in \{1, 2, \dots, n_{SB}\}$$

Diese resultieren unter Betrachtung der Gleichrichter-Unterwerksbemessungsleistung  $P_{GUW r}$  ( $P_{GUW r} \in m_{EGUW T i P}$ ) in eine zonenspezifische, aufgerundete minimale Gleichrichter-Unterwerkszahl  $n_{GUW k \min}$ .

$$n_{GUW k \min} = \left\lceil \frac{P_{GUW k}}{P_{GUW r}} \right\rceil, k \in \{1, 2, \dots, n_z\} \quad (5.85)$$

Über die Zonenanzahl  $n_z$  findet abschließend die Bestimmung der minimalen Gleichrichter-Unterwerksanzahl  $n_{GUW \min}$  statt.

$$n_{GUW \min} = \sum_{k=1}^{n_z} n_{GUW k \min} \quad (5.86)$$

Weitere Systemkomponenten können ebenfalls berücksichtigt werden. Für Ladestationen für Elektrofahrzeuge wird für die Worstcase-Simulation angenommen, dass über den gesamten Simulationshorizont ein Elektrofahrzeug mit voller Ladeleistung am vorgesehenen Ladepunkt lädt. Während Ladestationen für Elektrofahrzeuge spannungssenkend wirken, erhöhen Photovoltaikanlagen das Spannungsniveau. In einer Worstcase-Simulation werden Photovoltaikanlagen deshalb nicht betrachtet, da diese die Spannungssituation verbessern. Nachfolgend werden die weiteren Systemkomponenten nicht betrachtet, da die Batterie-/Oberleitungsbusse fokussiert werden.

### Gleichrichter-Unterwerkspositionierung

Der maximale auftretende Spannungsabfall in einem Oberleitungsbusssystem ist von mehreren Parametern abhängig und ist limitiert auf  $\Delta U_{\text{lim}} = U_{\text{GUW}} - U_{\text{min}1}$ .

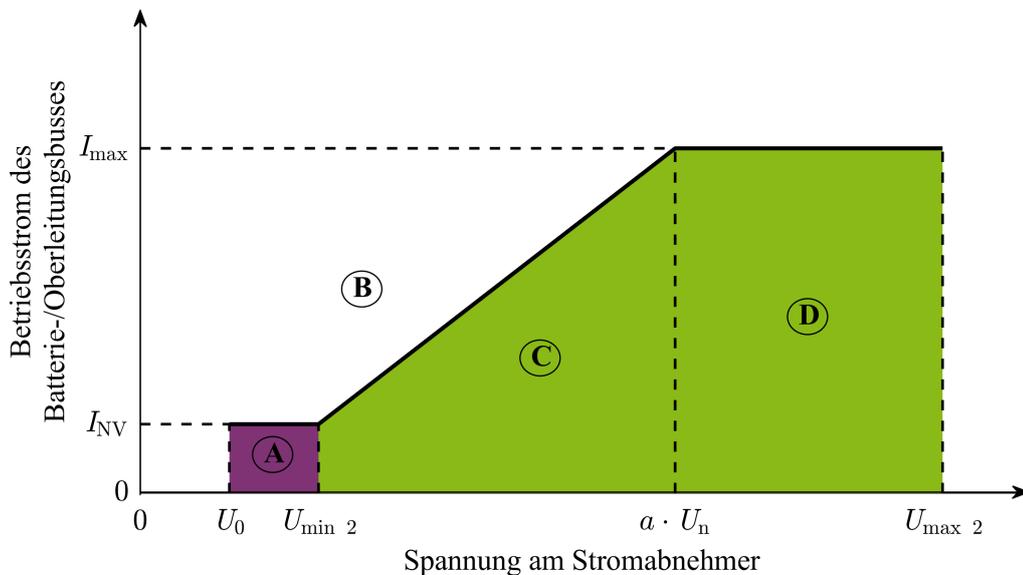
$$\Delta U_{\text{max}} = f(n_{\text{BUS}}, I_{\text{BUS } i}, L_{\text{BUS } i}, R) \leq \Delta U_{\text{lim}} \quad (5.87)$$

Dabei bezeichnet  $n_{\text{BUS}}$  die auftretende Anzahl an Batterie-/Oberleitungsbusen im untersuchten Speiseabschnitt,  $I_{\text{BUS } i}$  den Strom des  $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusse,  $L_{\text{BUS } i}$  den Abstand des  $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusse zum Gleichrichter-Unterwerk und  $R$  den Fahrdrahtwiderstand.

Die Determinierung der maximalen Speiselänge  $L_{\text{max}}$  kann somit ebenfalls als Funktion dargestellt werden, indem Gleichung 5.87 entsprechend umgestellt wird.  $L_{\text{max}}$  bildet zusätzlich den maximalen Abstand eines Batterie-/Oberleitungsbusse zum Gleichrichter-Unterwerk ab.

$$L_{\text{max}} = f(n_{\text{BUS}}, \Delta U_{\text{max}}, I_{\text{BUS } i}, R) \quad (5.88)$$

Für die Sicherstellung eines stabilen Betriebes eines schwach ausgelegten Oberleitungsbusystems oder unter außerordentlichen Betriebsbedingungen, besitzen Batterie-/Oberleitungsbusse eine automatische Steuerung des maximalen Betriebsstromes. Dabei wird der maximal zulässige Betriebsstrom im Spannungsbereich von  $U_{\text{min}2}$  bis  $a \cdot U_n$  linear begrenzt (Abbildung 5-11) mit dem Ziel das Spannungsniveau nicht noch weiter zu reduzieren. Der Knickfaktor  $a$  besitzt beispielsweise bei einer Nennspannung von  $U_n = 750_{\text{DC}}$  den Wert 0,8. [112]. Unterhalb von  $U_{\text{min}2}$  ist kein Traktionsstrom erlaubt, jedoch ist bis zur Spannung  $U_0$  die Versorgung der Nebenverbraucher über  $I_{\text{NV}}$  (z. B. Klimaanlage, Heizung, Beleuchtung und Laden der Batterie [113]) gestattet. Die Spannung  $U_0$  beschreibt die Unterspannungsabschaltung und liegt zwischen  $0,85 U_{\text{min}2}$  und  $0,95 U_{\text{min}2}$  [97].



**Abbildung 5-11: Qualitative Darstellung des maximalen Betriebsstroms als Funktion der Spannung am Stromabnehmer (eigene Darstellung in Anlehnung an [112])**

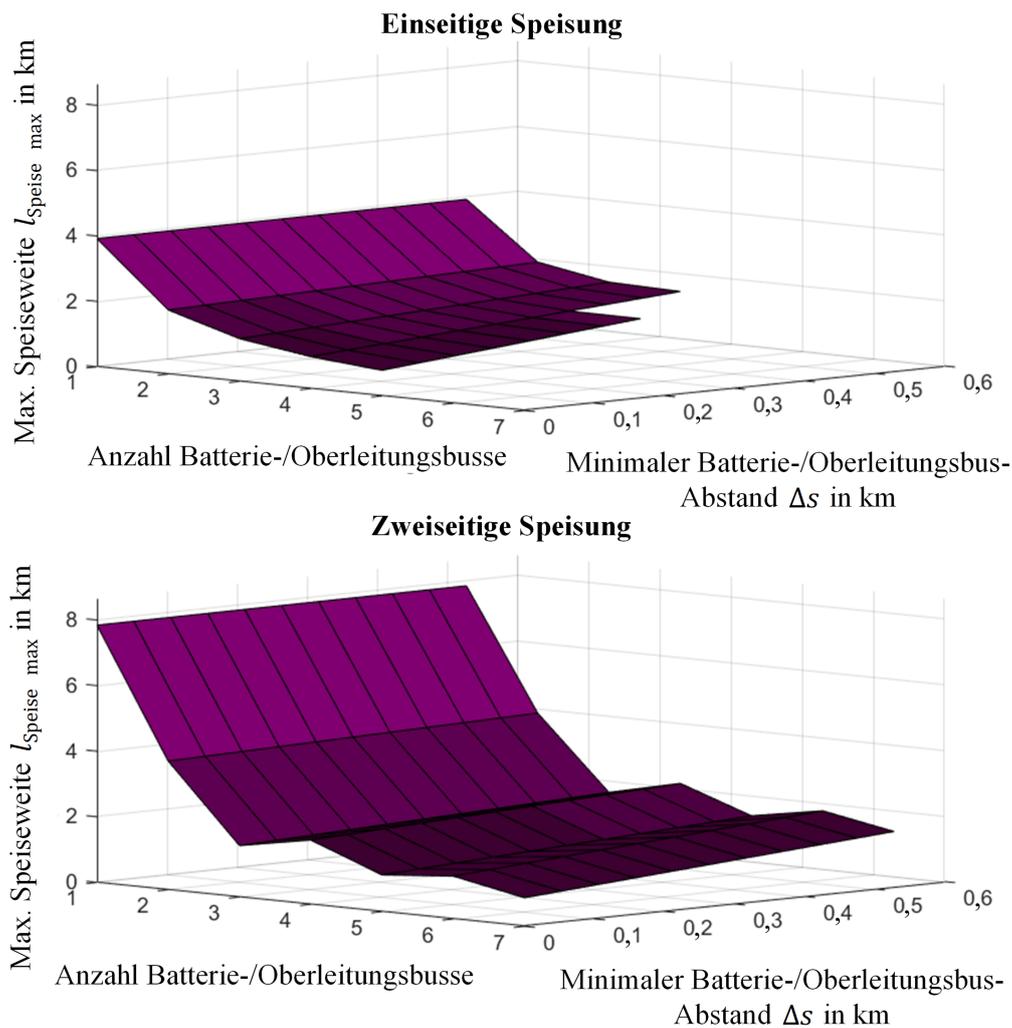
- A: kein Traktionsstrom (Versorgung der Nebenverbraucher über  $I_{NV}$  erlaubt)
- B: zulässiger Betriebsstrom überschritten
- C: zulässige Betriebsstromwerte (reduzierter Traktions- und Batterieladestrom)
- D: zulässige Betriebsstromwerte

Die weitere Planung eines Oberleitungsbussystems verfolgt das Ziel, dass die Strombegrenzungssteuerung von Batterie-/Oberleitungsbussen nur in Ausnahmefällen agiert. Folglich wird Punkt  $(a \cdot U_n / I_{max})$  als Grundlage für die Definition des maximalen Belastungsfalls herangezogen. Dieser Punkt dient zugleich als Restriktion der Spannungshaltung, da der maximale Belastungsfall diese Spannungsgrenze verursacht.  $\Delta U_{max}$  ergibt sich mit der Gleichrichter-Unterwerksspannung  $U_{GUW}$  somit zu:

$$\Delta U_{max} = U_{GUW} - a \cdot U_n \quad (5.89)$$

Mit Bezug auf Abschnitt 2.3.3 wird in Gleichung 5.87 nicht die Nennspannung  $U_n$ , sondern die Gleichrichter-Unterwerksspannung  $U_{GUW}$  eingesetzt. Abschnitt 2.3.1 beschreibt die ein- und zweiseitige Speisung, jedoch sind beispielsweise dreiseitige Speisungen in Batterie-/Oberleitungsbussystemen möglich. Diese werden in der weiteren Planung nicht weiter betrachtet und stellen beim Auftreten zusätzliche Kapazitätsreserven dar.

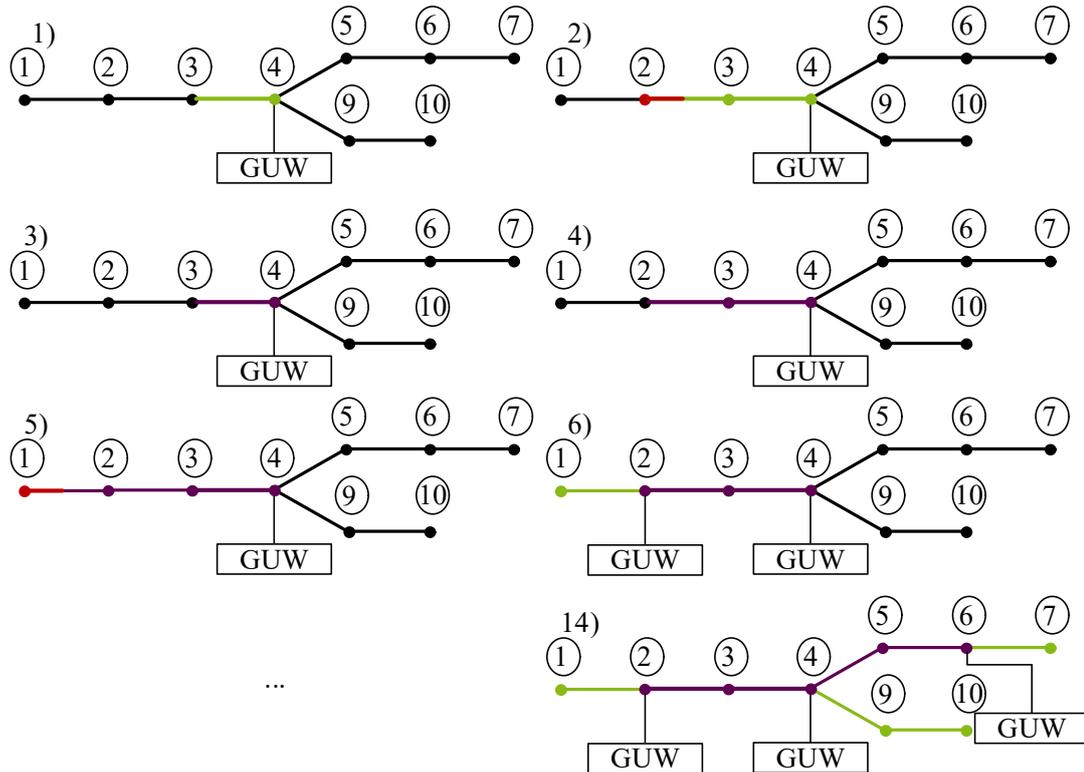
Sowohl die zonenspezifische Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{Bus\ k}$  als auch der simulativ ermittelte minimale Batterie-/Oberleitungsbusabstand  $\Delta s$  (siehe Abschnitt 5.5.5) resultiert in unterschiedliche Speiseweiten  $L_{Speise\ max}$ .



**Abbildung 5-12: Speiseweiten-Vergleich bei ein- und zweiseitiger Speisung**

Abbildung 5-12 zeigt einen beispielhaften Vergleich der Speiseweiten abhängig von der maximal auftretenden Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{\text{Bus}} = 1 \dots 7$  sowie vom minimalen Batterie-/Oberleitungsbusabstand  $\Delta s = 0,1 \text{ km} \dots 0,6 \text{ km}$ . Widerstandsbelag der Fahrleitung  $R'_F = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}}$ , die maximalen Batterie-/Oberleitungsbus-Stromaufnahme  $I_{\text{Bus max}} = 500 \text{ A}$  sowie die Gleichrichter-Unterwerks-  $U_{\text{GUW}} = 900 \text{ V}$  und die Minimal-Spannung  $U_{\text{min}} = 500 \text{ V}$  sind dabei als konstant anzusehen. Eine rasch abfallende Speiseweite bei zunehmender Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{\text{Bus}}$  ist ersichtlich, während der minimale Batterie-/Oberleitungsbusabstand  $\Delta s$  eine untergeordnete Rolle einnimmt. Auffällig ist das Auf- und Absenken der Speiseweiten im Falle der zweiseitigen Speisung, bedingt durch eine gerade bzw. ungerade Anzahl von Batterie-/Oberleitungsbussen. Während sich ein Batterie-/Oberleitungsbus bei einer ungeraden Anzahl an Batterie-/Oberleitungsbussen exakt mittig zwischen zwei Gleichrichter-Unterwerken befindet, existiert bei einer geraden Batterie-/Oberleitungsbus-Anzahl stets ein Abstand  $(\Delta s/2)$  zwischen Batterie-/Oberleitungsbus und der Mitte zweier Gleichrichter-

Unterwerke (siehe Abschnitt 2.3.1). Dies resultiert das Auf- und Absenken der Speiseweiten im Falle der zweiseitigen Speisung. Fehlende Speiseweiten bei einseitiger Speisung in Abbildung 5-12 lassen sich durch eine zu große Batterie-/Oberleitungsbus-Anzahl bzw. einen zu großen minimalen Batterie-/Oberleitungsbusabstand  $\Delta s$  begründen. Das Gleichrichter-Unterwerk ist nicht mehr in der Lage die Vielzahl an Batterie-/Oberleitungsbussen zu versorgen, weshalb für diese Fälle keine Speiseweiten berechnet werden können.



**Abbildung 5-13: Visualisierung einer beispielhaften Gleichrichter-Unterwerkspositionierung anhand dynamischer, segmentspezifischer Speiseweiten-Betrachtung (einseitige Speisung: grün; zweiseitiger Speisung: violett, Spannungsbandverletzung im Worstcase-Fall: rot)**

Abbildung 5-13 zeigt ein beispielhaftes Verkehrsnetz, dem Lösungskandidat  $A_L$  entstehend, welches mit Oberleitung ausgestattet wird. Die angewandte Bedingung ist, dass die segmentspezifische Speiseweite größer sein muss als die zu vergleichende(n) Segmentlänge(n).

Die Determinierung der Gleichrichter-Unterwerksposition und -anzahl startet exemplarisch im Knoten 4, nach erfolgreicher Ausführung des nachfolgend beschriebenen Algorithmus werden alle weiteren Knoten fortlaufend als Startknoten verwendet. Die determinierte Gleichrichter-Unterwerksanzahl wird anschließend für jeden Startknoten verglichen und die Lösung mit minimaler Gleichrichter-Unterwerksanzahl im Folgenden weiterverwendet.

- 1) Folglich wird in diesem Beispiel an Knoten 4 ein Gleichrichter-Unterwerk gesetzt und die Überprüfung der segmentspezifischen Speiseweiten mit den Zweiglängen beginnt. Zuerst folgt eine Betrachtung mit einseitiger Speisung, wodurch der Zweig von Knoten 3 nach Knoten 4 versorgt werden kann, da in diesem Beispiel die berechnete

- segmentspezifische Speiseweite größer ist als die Zweiglänge von Knoten 3 nach Knoten 4. Zweig 3-4 wird grün eingefärbt (einseitige Speisung).
- 2) Der Zweig von Knoten 2 nach Knoten 3 kann hier jedoch nicht versorgt werden, da die segmentspezifische Speiseweite, die wie zuvor beschrieben u. a. abhängig von der maximalen Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  $n_{\text{BUS}}$  ist, in diesem Fall nicht ausreichend ist. Zweig 2-3 wird teilweise grün (einseitige Speisung) und teilweise rot (Spannungsbandverletzung) eingefärbt.
  - 3) Anschließend startet eine neue, äquivalente Betrachtung mit zweiseitiger Speisung, resultierend, dass der Zweig von Knoten 3 nach Knoten 4 wieder versorgt werden kann. Die Position des zweiten Gleichrichter-Unterwerkes für die zweiseitige Speisung soll nun determiniert werden und wird nachfolgend – abhängig von den zuvor erwähnten Kriterien – gesetzt. Zweig 3-4 wird violett eingefärbt (zweiseitige Speisung).
  - 4) Mittels zweiseitiger Speisung kann nun ebenfalls der Zweig von Knoten 2 nach Knoten 3 versorgt werden, welcher zuvor mit einseitiger Speisung nicht versorgt werden konnte. Zweig 2-3 wird violett eingefärbt (zweiseitige Speisung).
  - 5) Der Zweig von Knoten 1 nach Knoten 2 kann trotz zweiseitiger Speisung nicht versorgt werden. Zweig 2-3 wird teilweise violett (zweiseitige Speisung) und teilweise rot (Spannungsbandverletzung) eingefärbt.
  - 6) Die Folge ist ein neu gesetztes Gleichrichter-Unterwerk am Knoten 2, da die Zweige 3-4 und 2-3 – wie zuvor überprüft – mittels zweiseitiger Speisung versorgt werden können. Anschließend findet eine erneute Betrachtung mit einseitiger Speisung für den Zweig von Knoten 1 nach Knoten 2 statt, welche in diesem Beispiel erfolgreich verläuft. Zweig 1-2 wird grün eingefärbt (einseitige Speisung).
  - 7) ... 13) Der beschriebene Algorithmus in den vorausgegangenen Schritten wird weiter fortgeführt. Dabei werden alle Zweige zuerst mittels einseitiger Speisung überprüft. Sollte eine einseitige Speisung ausreichen und ein Blatt<sup>25</sup> wurde erreicht, so wird die nächste Abzweigung im Graph untersucht. Dabei wird der Suchalgorithmus der Tiefensuche angewandt, um rekursiv alle Knoten/Zweige zu untersuchen. Bei nicht erfolgreicher einseitiger Speisung wird entsprechend einer zweiseitigen Speisung überprüft und wie zuvor beschrieben fortgefahren.
- 14) Das fertige Ergebnis zeigt, dass Knoten 9 und Knoten 10 mittels des gesetzten Gleichrichter-Unterwerkes in Knoten 4 über eine einseitige Speisung versorgt werden können (grün eingefärbt). Für die Knoten 5 und Knoten 6 ist eine zweiseitige Speisung notwendig (violett eingefärbt) und Knoten 7 kann wieder über eine einseitige Speisung versorgt werden (grün eingefärbt). Die Determinierung ist beendet mit dem Ergebnis,

---

<sup>25</sup> Blatt: Knoten mit genau einem Nachbarn (auch: Endknoten)

dass bei Startknoten 4 drei Gleichrichter-Unterwerke (Knoten 2, Knoten 4 und Knoten 6,  $n_{\text{GUW } k \text{ i}=4} = 3$ ) notwendig sind, um eine ausreichende Versorgung zu gewährleisten.

Der Algorithmus wird für sämtlich Knoten  $i$  als Startknoten und anschließend für alle elektrischen Zonen  $k$  ausgeführt. Es resultiert  $n_{\text{GUW } k \text{ i}}$ . Dabei darf die minimale Gleichrichter-Unterwerksanzahl  $n_{\text{GUW } k \text{ min}}$  einer elektrischen Zone  $k$  (vgl. Gleichung 5.86) nicht unterschritten werden. Bei Unterschreitung wird das entsprechende Element durch  $n_{\text{GUW } k \text{ min}}$  ersetzt.

Die Anzahl der Gleichrichter-Unterwerke ergibt sich nach dieser Vorgehensweise, wobei  $n_z$  die Anzahl aller elektrischen Zonen beschreibt, zu:

$$N_{\text{GUW}} = \sum_{i=1}^{n_z} \min\{n_{\text{GUW } k \text{ min}}\} \quad (5.90)$$

### Kurzschlussstromerkennbarkeit

Abschließend findet eine Kurzschlussstrombetrachtung (zwischen den beiden Fahrdrähten) statt, um nicht betriebszulässige Lösungen zu eliminieren. Ziel ist es einen definierten Abstand zwischen maximalem Betriebsstrom und minimalem Kurzschlussstrom nach Abschnitt 5.4 und Gleichung 5.40 einzuhalten.

Der maximale Betriebsstrom wird mittels der eingeführten Gleichzeitigkeitsfaktoren bestimmt, während der Kurzschlussstrom  $I_K$  bei konstanter Gleichrichter-Unterwerksspannung  $U_{\text{GUW}}$  und unveränderlichen Fahrleitungseigenschaften ( $\rho_F$  und  $A_F$ ) antiproportional zur Länge der Fahrleitung  $l_F$  ist.

$$U_{\text{GUW}} = 2 \cdot R_F \cdot I_K = 2 \cdot \rho_F \cdot \frac{l_F}{A_F} \cdot I_K = 2 \cdot R'_F \cdot l_F \cdot I_K \quad (5.91)$$

$$I_K = \frac{U_{\text{GUW}}}{2 \cdot R_F} = \frac{U_{\text{GUW}} \cdot A_F}{2 \cdot \rho_F \cdot l_F} = \frac{U_{\text{GUW}}}{2 \cdot R'_F} \cdot \frac{1}{l_F} \quad (5.92)$$

$$I_K \sim \frac{1}{l_F} \quad (5.93)$$

Der minimale Kurzschlussstrom  $I_{K \text{ min}}$  tritt somit am Ende einer einseitigen Speisung bzw. in der Mitte einer zweiseitigen Speisung auf.

$$I_{K \text{ min}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{GUW}}}{R'_F} \cdot \frac{1}{l_F}, & \text{einseitige Speisung} \\ \frac{U_{\text{GUW}}}{R'_F} \cdot \frac{2}{l_F}, & \text{zweiseitige Speisung} \end{cases} \quad (5.94)$$

Für jede Gleichrichter-Unterwerkslösung findet eine Kurzschlussstrombetrachtung statt, indem die kürzesten Distanzen zwischen benachbarten Gleichrichter-Unterwerken bestimmt werden.

Dabei stellt  $d_{\text{GUW } i,j}$  den kürzesten Pfad zwischen den Gleichrichter-Unterwerks-Knoten  $i$  und  $j$  im Graph  $G_L$  dar:

$$\mathbf{D}_{\text{GUW}} = \begin{pmatrix} d_{\text{GUW } 1,1} & \dots & d_{\text{GUW } 1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{\text{GUW } i,1} & \dots & d_{\text{GUW } i,j} \end{pmatrix}, i, j \in \{1, 2, \dots, n_{\text{GUW}}\} \quad (5.95)$$

Der Punkt des minimalen Kurzschlussstromes zwischen zwei Gleichrichter-Unterwerken kann wie folgt bestimmt werden:

$$\mathbf{d}_{\text{GUW}} = \frac{\max\{\text{row}_i(\mathbf{D}_{\text{GUW}})\}}{2}, i \in \{1, 2, \dots, n_{\text{GUW}}\} \quad (5.96)$$

Dafür wird die maximale Distanz zwischen zwei Gleichrichter-Unterwerken ermittelt, indem für jede Zeile das Maximum bestimmt wird. Anschließend wird mit Hilfe des Divisors 2 die Distanz halbiert, da der Punkt des minimalen Kurzschlussstromes sich in der Mitte der beiden Gleichrichter-Unterwerke befindet (zweiseitige Speisung). Sollten drei oder mehr Gleichrichter-Unterwerke durch eine Fahrleitung in einem elektrischen Knoten verbunden sein, ergeben sich zusätzliche Flexibilitäten.

Anschließend werden die Blätter des Graphen  $G_L$  determiniert:

$$v_{L_B} = v_L \deg_G(v_L) = 1, \forall v_L \in V_L \quad (5.97)$$

Für alle Blätter  $v_{L_B}$  des Graphen  $G_L$  werden folglich die kürzesten Pfade zu allen Gleichrichter-Unterwerken ermittelt, wobei  $d_{B_i,j}$  die kürzeste Distanz zwischen Blatt  $i$  und Gleichrichter-Unterwerksknoten  $j$  widerspiegelt. Die Anzahl aller Blätter ist durch  $n_{v_B}$  gegeben.

$$\mathbf{D}_B = \begin{pmatrix} d_{B_1,1} & \dots & d_{B_1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{B_i,1} & \dots & d_{B_i,j} \end{pmatrix}, i \in \{1, 2, \dots, n_{v_B}\}, j \in \{1, 2, \dots, n_{\text{GUW}}\} \quad (5.98)$$

Der kürzeste Pfad jeder Zeile von  $\mathbf{D}_B$  beschreibt die Distanz des nächstgelegenen Gleichrichter-Unterwerks:

$$\mathbf{d}_B = \min\{\text{row}_i(\mathbf{D}_B)\}, i \in \{1, 2, \dots, n_{v_B}\} \quad (5.99)$$

Die ermittelten Distanzen müssen nicht mehr halbiert werden, da es sich um eine einseitige Speisung handelt und die Blätter die Endknoten darstellen.

Abschließend werden mittels Gleichung 5.94 die minimalen Kurzschlussströme jeder Zone ermittelt, indem die berechneten Distanzen ( $\mathbf{d}_B$  und  $\mathbf{d}_{\text{GUW}}$ ) eingesetzt werden und mittels Gleichung 5.40 die Überprüfung der Kurzschlussstromerkennbarkeit durchgeführt wird. Gleichrichter-Unterwerks-Lösungen, die die Bedingung nicht erfüllen, werden aussortiert. Die

maximalen Betriebsströme sämtlicher Segmente werden anhand der Gleichzeitigkeitsfaktoren und der maximalen Batterie-/Oberleitungsbusanzahl ermittelt, sodass diese anschließend mit den berechneten Kurzschlussströmen verglichen werden. Durch Gleichung 5.40 geht hervor, dass der maximale Betriebsstrom maximal das 1,2-fache des minimalen Kurzschlussstromes betragen darf. Sollte diese Bedingung nicht eingehalten werden, wird dieser Lösungskandidat nicht weiter betrachtet.

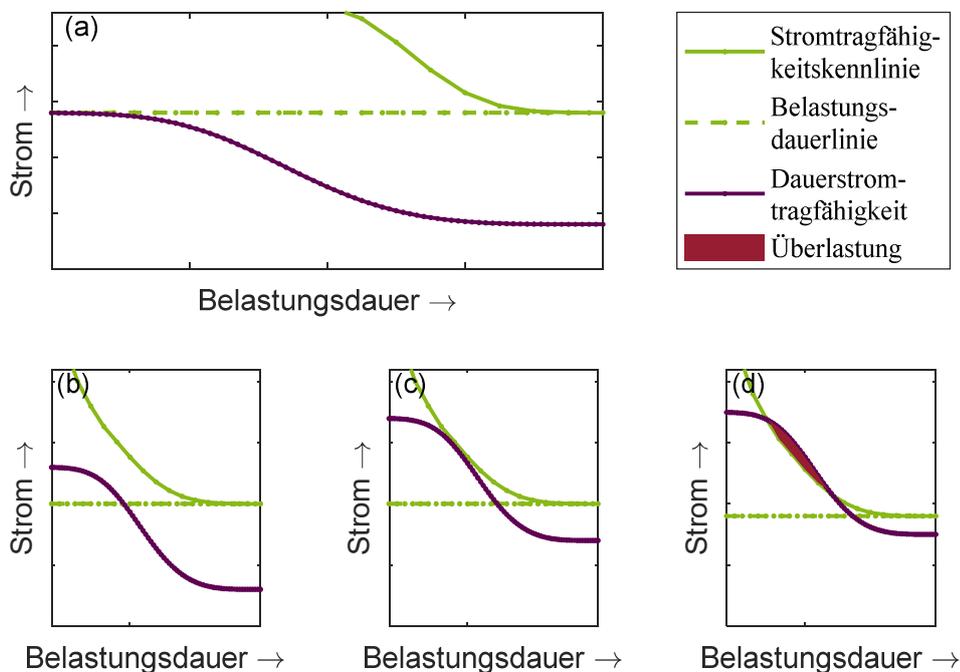
**Thermische Betrachtung der Fahrleitung**

Bei der thermischen Betrachtung der Fahrleitung gibt es zwei verschiedene Verfahren zur Bemessung der Fahrleitung.

Das Verfahren zur Bemessung der Fahrleitung nach der höchsten Last (*auch*: Bemessung anhand der Dauerstromtragfähigkeit) vergleicht den bereits determinierten maximalen Betriebsstrom  $I_{B\ max}$  mit der Dauerstromtragfähigkeit der Fahrleitung  $I_{d\ FD}$ , resultierend in das folgende Kriterium:

$$I_{d\ FD} \geq I_{B\ max} \tag{5.100}$$

Das zweite Bemessungsprinzip nähert Belastungsdauer- und Stromtragfähigkeitskennlinie aneinander an, sodass Fahrleitungen nicht überdimensioniert werden, aber folglich auch weniger thermische Reserven in der Fahrleitung existieren.



**Abbildung 5-14: Bemessung anhand der Dauerstromtragfähigkeit (a) und thermisches Bemessungsprinzip mit Annäherung der Belastungsdauerlinie an die Stromtragfähigkeitskennlinie (b) – (d) (eigene Darstellung in Anlehnung an [114] und [78]):**  
 - (b): Überdimensionierung oder Dimensionierung mit Reserve

- (c): Exakte Dimensionierung (keine Reserve vorhanden)
- (d): Unterdimensionierung

Die Stromtragfähigkeitskennlinie lässt sich mittels der Fahrdrachteigenschaften und des auftretenden Stromes  $I$  wie folgt ermitteln (vgl. [114]):

$$t = -\frac{m_C \cdot c \cdot T_m}{I^2 \cdot R'_F + N_S} \cdot \ln\left(\frac{T_m - T}{T_m - T_1}\right) = -\tau \cdot \ln\left(\frac{T_m - T}{T_m - T_1}\right) \quad (5.101)$$

wobei

- $t_B$  die seit Auftreten des Stromes  $I$  vergangene Zeit (Belastungsdauer)
- $m_C$  die Leitermasse
- $c$  die spezifische Wärmekapazität Luft
- $T_m$  die stationäre Fahrdrachttemperatur nach Auftreten des Stromes  $I$
- $R'_F$  den Widerstandsbelag (bei 20°C)
- $N_S$  den Energieeintrag durch die Sonne
- $T$  den Fahrdrachttemperaturanstieg zwischen der Ausgangstemperatur  $T_1$  und der stationären Fahrdrachttemperatur  $T_m$
- $T_1$  die Fahrdrachttemperatur unmittelbar vor Auftreten des Stromes  $I$
- $\tau$  die thermische Zeitkonstante

darstellen.

Die Belastungsdauerlinie liefert die Oberleitungsbussystem-Simulation, wobei alle auftretenden Ströme sämtlicher Fahrleitungen konsekutiv und mit der simulierten Schrittweite  $\Delta t_{\text{sim}}$  aufgezeichnet werden. Anschließend wird eine geordnete zeitgewichtete Belastungsdauerlinie erstellt. Bei einer Schrittweiten-Betrachtung  $\Delta t > \Delta t_{\text{sim}}$  wird wie folgt vorgegangen:

$$I(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \cdot \sum_{t_0}^{t_0+t} I^2 \cdot \Delta t} \quad (5.102)$$

### Überprüfung des $(n - 1)$ -Kriteriums

Für die Überprüfung des  $(n - 1)$ -Kriteriums werden  $N_{\text{GUW}}$  Oberleitungsbussystem-Simulationen ausgeführt, bei der nacheinander jeweils ein Gleichrichter-Unterwerk abgeschaltet wird, welches im Simulationsdurchgang nicht weiter betrachtet wird.

Anschließend erfolgt eine Überprüfung der Einhaltung der zuvor erläuterten Kriterien (Kurzschlusserkennbarkeit, Spannungshaltung, Betriebsmittelbelastungen (thermische Betrachtung der Fahrleitung und Gleichrichter-Unterwerks-Belastung) und Busbatterie-Ladezustandsbetrachtung).

### Auswahl der wirtschaftlichsten Lösung

Die resultierende Auswahl der wirtschaftlichsten Lösung erfolgt mittels der minimalen Gleichrichter-Unterwerksanzahl aller Gleichrichter-Unterwerkslösungen, wobei jedoch  $n_{\text{GUW } k \text{ min}}$  (Gleichung 5.86, minimale Gleichrichter-Unterwerksanzahl je Zone) nicht unterschritten werden darf.

Die Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten  $K_{\text{I GUW}}$  ergeben sich mittels der Gleichrichter-Unterwerksanzahl aller Zonen  $N_{\text{GUW}}$  zu:

$$N_{\text{GUW}} = \sum_{j=1}^{n_z} \min\{\text{row}_i(N_{\text{GUW}} > n_{\text{GUW } j \text{ min}})\}, i \in \{1, 2, \dots, n_{\text{VL}}\} \quad (5.103)$$

$$K_{\text{I GUW}} = N_{\text{GUW}} \cdot \bar{k}_{\text{GUW}} \cdot P_{\text{GUW}} \quad (5.104)$$

Dafür werden die spezifischen Gleichrichter-Unterwerkskosten  $\bar{k}_{\text{GUW}}$  berücksichtigt, welche ebenfalls Fixkosten (bspw. Grundstückskosten) enthalten. Bei einer Optimierung wird eine konstante Gleichrichter-Unterwerksleistung  $P_{\text{GUW}}$  für alle Gleichrichter-Unterwerke definiert.

Abschließend findet eine Übertragung dieser Gleichrichter-Investitionskosten in die übergelagerte Optimierung (Abschnitt 5.5.7) statt, wobei der evolutionäre Algorithmus die Gesamt-Investitionskosten  $K_{\text{I}}$  (Gleichung 5.60) anschließend minimiert.

## 5.6 Fallstudien

Die vorgestellte Planungsmethode wird im Folgenden auf zwei Fallstudien angewandt, indem im ersten Schritt eine Auswahl beispielhafter Städte stattfindet (Abschnitt 5.6.1). Für jede Fallstudie ist die Generierung einer Datengrundlage vonnöten, welche nachfolgend graphisch aufbereitet präsentiert wird. Der nächste Schritt ist die Determinierung des Energiebedarfs sowie der potentiellen Busbatterie-Energiezufuhr je Segment. Anschließend wird die eingeführte Planungsmethode auf die ausgewählten Städte angewandt, resultierend in einer optimierten und zu installierenden Oberleitungsinfrastruktur.

Abschließend findet eine Ermittlung unterschiedlicher Einflussgrößen auf die Oberleitungsbussystem-Infrastruktur statt (Abschnitt 5.6.4). Hauptsächlich werden drei unterschiedliche Faktoren untersucht, die die höchste Hebelwirkung zur Verringerung der benötigten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur bieten.

Für die im folgenden betrachteten Szenarien wird eine adäquate Oberleitungsbus-Infrastruktur am Betriebshof als existent angenommen, sodass alle Batterie-Oberleitungsbusse den Tagesfahrplan mit einer initial vollständig aufgeladenen Batterie bestreiten.

### 5.6.1 Auswahl beispielhafter Städte

Für die Auswahl beispielhafter Städte zur Anwendung der Planungsmethode werden verschiedene Faktoren berücksichtigt. Zum einen soll ein Green-Field- und ein Brown-Field-Szenario betrachtet werden (Abschnitt 5.2).

Die erste der zwei Fallstudien (Green-Field-Szenario) beschäftigt sich mit der österreichischen Stadt Innsbruck, welche bereits auf Erfahrungen mit Oberleitungsbussen zurückgreifen kann, da in der Vergangenheit bereits zwei zeitinvariante Oberleitungsbetriebe existierten. Außerdem bietet die Stadt Innsbruck aufgrund angrenzender Gebirgsketten eine abwechslungsreiche Topografie.

Der Beschluss für den ersten Innsbrucker Oberleitungsbetrieb, welcher von 1944 bis 1976 andauerte, wurde vom Treibstoffmangel begünstigt. Insgesamt wurden drei Oberleitungsbuslinien betrieben, jedoch wurden ab 1976 ausschließlich Dieselsebusse für den ÖPNV eingesetzt, welche neben wirtschaftlichen Vorteilen ebenfalls die Flexibilität erhöhten. Im Jahre 1986 entschied sich die Stadt Innsbruck erneut für ein Oberleitungsbussystem, sodass sich dieses System gegenüber der Straßenbahn – angesichts wirtschaftlicher Gründe und baulichen Restriktionen – durchsetzen konnten. Der Oberleitungsbetrieb wurde somit im Jahre 1988 wiederaufgenommen, wobei zwei Buslinien mit Oberleitungsbussen befahren wurden. Im Laufe der Zeit wurden vermehrt Dieselsebusse auf den beiden Buslinien eingesetzt, sodass der zweite Oberleitungsbetrieb im Jahr 2007 endete.

Für die Fallstudie eines Brown-Field-Szenarios ist ein existentes Oberleitungsbussystem obligatorisch, da dieses mittels Elektrifizierung weiterer Dieselsebuslinien erweitert wird. In Deutschland existieren derzeit drei Oberleitungsbussysteme (Solingen, Esslingen und Eberswalde), wobei Solingen mit einer Fahrleitungslänge von 102 km das mit Abstand größte deutsche Oberleitungsbussystem besitzt [79]. Die Stadt Solingen beschloss Anfang der 1950er Jahre einen Umstieg von der bisherigen Straßenbahn hin zu einem Oberleitungsbussystem, welcher im Jahre 1959 vollständig abgeschlossen war. Während das Oberleitungsnetz in den 1980er und 1990er Jahren sowie 2014 stets erweitert wurde, wurden mehrere Generationen von Oberleitungsbussen beschafft, sodass seit der vierten Generation an Oberleitungsbussen mittlerweile ausschließlich Gelenk-Oberleitungsbusse eingesetzt werden. Die Stadtwerke Solingen GmbH betreibt derzeit sechs reine Oberleitungsbuslinien, während im Zuge des Forschungsprojektes „BOB Solingen“ [81] eine weitere Buslinie mittels Batterie-Oberleitungsgelenkbussen elektrifiziert wurde. Diese Buslinie wird von vier Batterie-Oberleitungsgelenkbussen seit 2019 befahren, wobei weitere Auslieferungen von Batterie-Oberleitungsgelenkbussen sowie Batterie-Oberleitungssolobussen geplant sind.

## 5.6.2 Fallstudie 1: Green-Field-Szenario Innsbruck

Fallstudie 1, welche ein Green-Field-Szenario darstellt, beschäftigt sich mit der österreichischen Stadt Innsbruck.

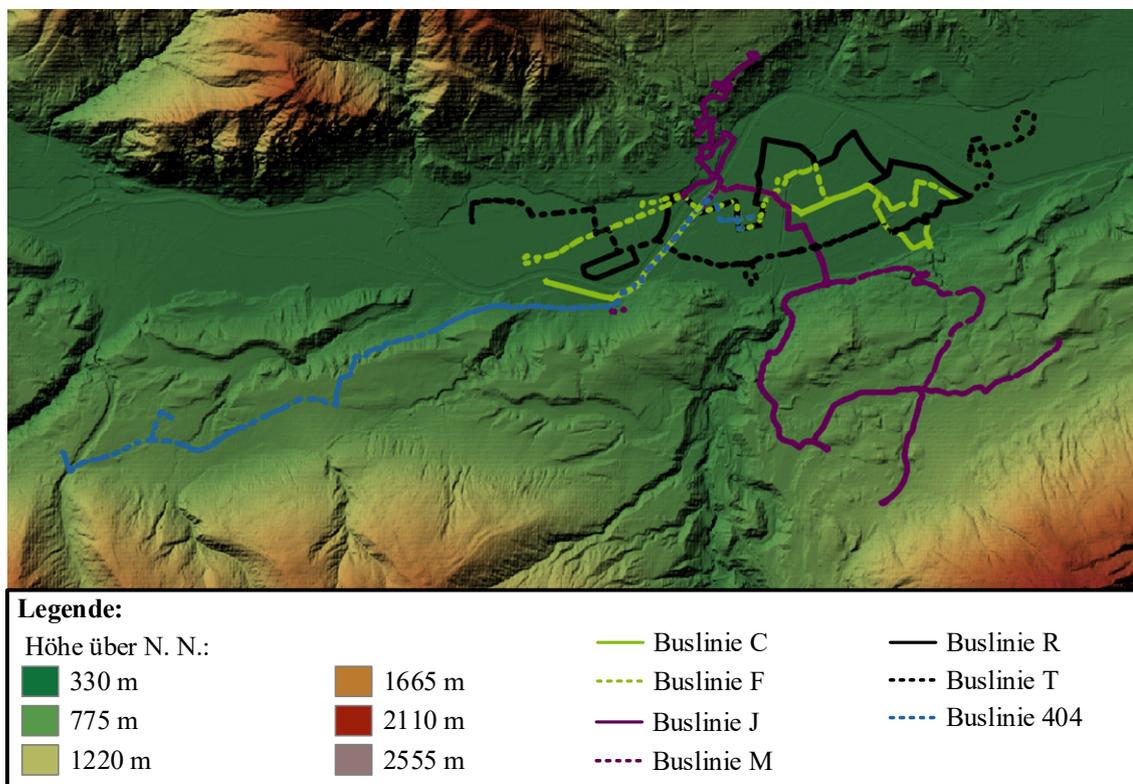


Abbildung 5-15: Kartendarstellung der zu untersuchenden Buslinien (Fallstudie 1: Innsbruck)

Für die Planung einer optimierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur werden nachfolgend eine Datengrundlage visualisiert dargestellt sowie die Energiebedarfe und potentiellen Energiezufuhren für die Batterie-Oberleitungsbusse mittels der Oberleitungsbussystem-Simulation bestimmt. Folglich wird die optimierte planungsvarianten-abhängige Oberleitungsbussystem-Infrastruktur vorgestellt, welche abschließend validiert wird.

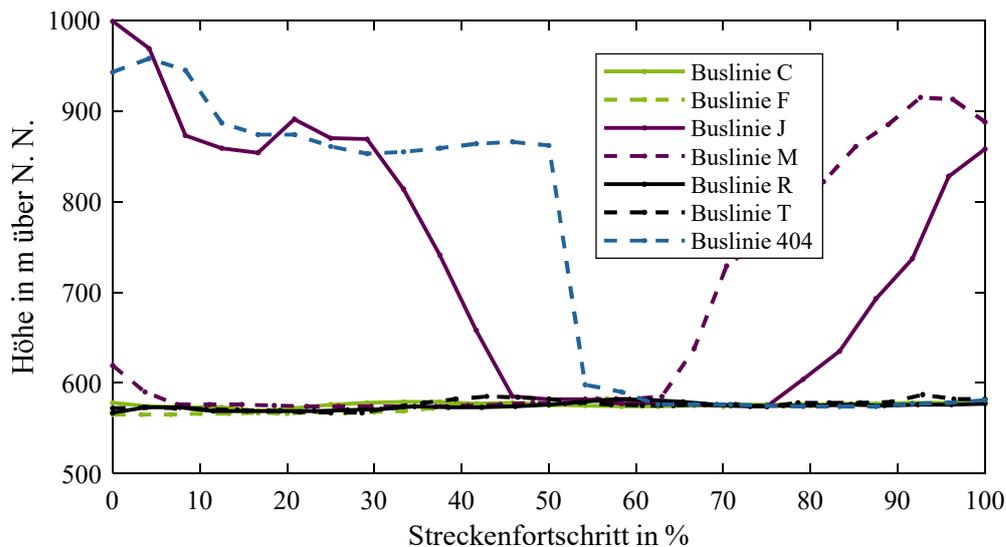
### Generierung einer Datengrundlage

Das Bus- und Tramliniennetz in Innsbruck umfasst 34 Linien, wobei nachfolgend der Fokus auf sieben Buslinien (C, F, J, M, R, T und 404) gelegt wird. Eine Übersicht der zu untersuchenden Buslinien liefert Abbildung 5-15.

Während die Buslinien C, F, R und T reine Tallinien sind und somit relativ wenige Höhenmeter überwinden, ist der Streckenverlauf der Buslinien J, M und 404 topographisch anspruchsvoll, da beispielsweise bei der Buslinie J gleich zwei Talstation (Patscherkofelbahn und Hungerburg) angefahren werden. Das dazugehörige Höhenmeterdiagramm liefert Abbildung 5-16. Zu beachten ist, dass auf den Buslinien M und J Solobusse eingesetzt werden und folglich als Solo-Batterie-Oberleitungsbusse simuliert werden. Alle anderen aufgeführten Innsbrucker Buslinien werden von Gelenkbussen befahren und somit als Gelenk-Batterie-Oberleitungsbusse simuliert.

Die Datengrundlage besteht aus den Verkehrsbetriebsdaten, der Straßendatenbank und der nutzbaren Bestandsinfrastruktur (vgl. Abschnitt 5.3).

Die Verkehrsbetriebsdaten wiederum setzen sich aus den Busumlaufplänen sowie den Busparametern zusammen. Eine exemplarische Erläuterung des verwendeten Busumlaufplanes sowie die dazugehörigen Streckeninformationen werden im Anhang 10.5.1 gegeben. Die verwendeten Busparameter werden ebenfalls im Anhang 10.5.1 aufgelistet.



**Abbildung 5-16: Grafisch aufbereitete Straßendatenbank (Höhenmeterdiagramm)**

Der zweite Teil der Datengrundlage umfasst die aus Verkehrsknoten und Verkehrszweigen bestehende Straßendatenbank und beinhaltet die im Abschnitt 5.3 beschriebenen Straßendaten. Diese Straßendatenbank wird in Abbildung 5-17 b) visualisiert dargestellt, indem alle zu untersuchenden Buslinienstrecken digital erfasst worden sind.

Der dritte Teil der Datengrundlage beinhaltet die nutzbare Bestandsinfrastruktur, welche hier aufgrund des ausgewählten Green-Field-Szenarios nicht vorhanden ist.

Abschließend werden noch Informationen über die baulichen Restriktionen benötigt, welche aus unterschiedlichsten Gründen (siehe Abschnitt 5.3) nicht mit Oberleitung versehen werden können. Hauptsächlich soll im Stadtzentrum keine Oberleitung vorgesehen werden, es gibt aber auch außerhalb des Stadtzentrums Bereiche, die nicht für eine Oberleitungsinstallation geeignet sind. Die Busstrecken, die nicht mit Oberleitung versehen werden dürfen und somit aus der Optimierungsaufgabe ausgeschlossen werden sind in Abbildung 5-17 c) graphisch aufbereitet in rot dargestellt, während alle weiteren Busstrecken, die mit Oberleitung theoretisch versehen werden könnten, in Grün dargestellt sind.

Sämtliche Planungsvarianten werden als Worstcase-Szenario mit gealterter Batterie (Abbildung 10-1, hier: Batterienettkapazität von 36 kWh) simuliert, wodurch die zu ermittelnde Oberleitungsinfrastruktur für diesen Fall bemessen ist und schließlich alle weiteren und weniger

energieintensiven Fälle ebenfalls ausreichend ist. Die im Abschnitt 10.2 weiteren planungsrelevanten Eingabeparameter werden ebenfalls im Anhang in der Tabelle 10-9 aufgelistet.

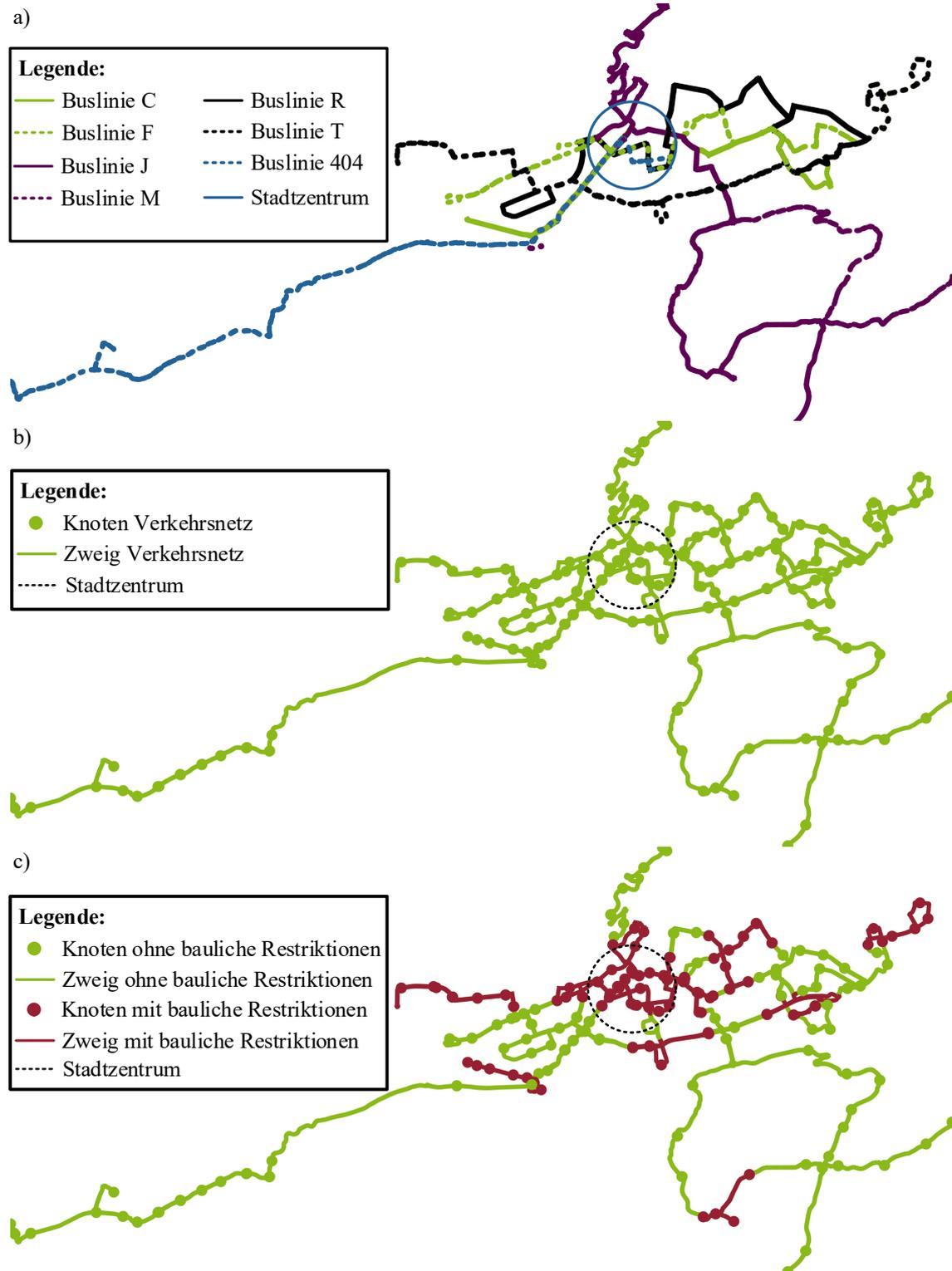


Abbildung 5-17: a) Untersuchte Buslinien (bei Überschneidungen wird lediglich eine Buslinie angezeigt)  
 b) Verkehrsnetz  
 c) Bauliche Restriktionen

## Ableitung von Planungsvarianten

Tabelle 5-1: Definition der Planungsvarianten

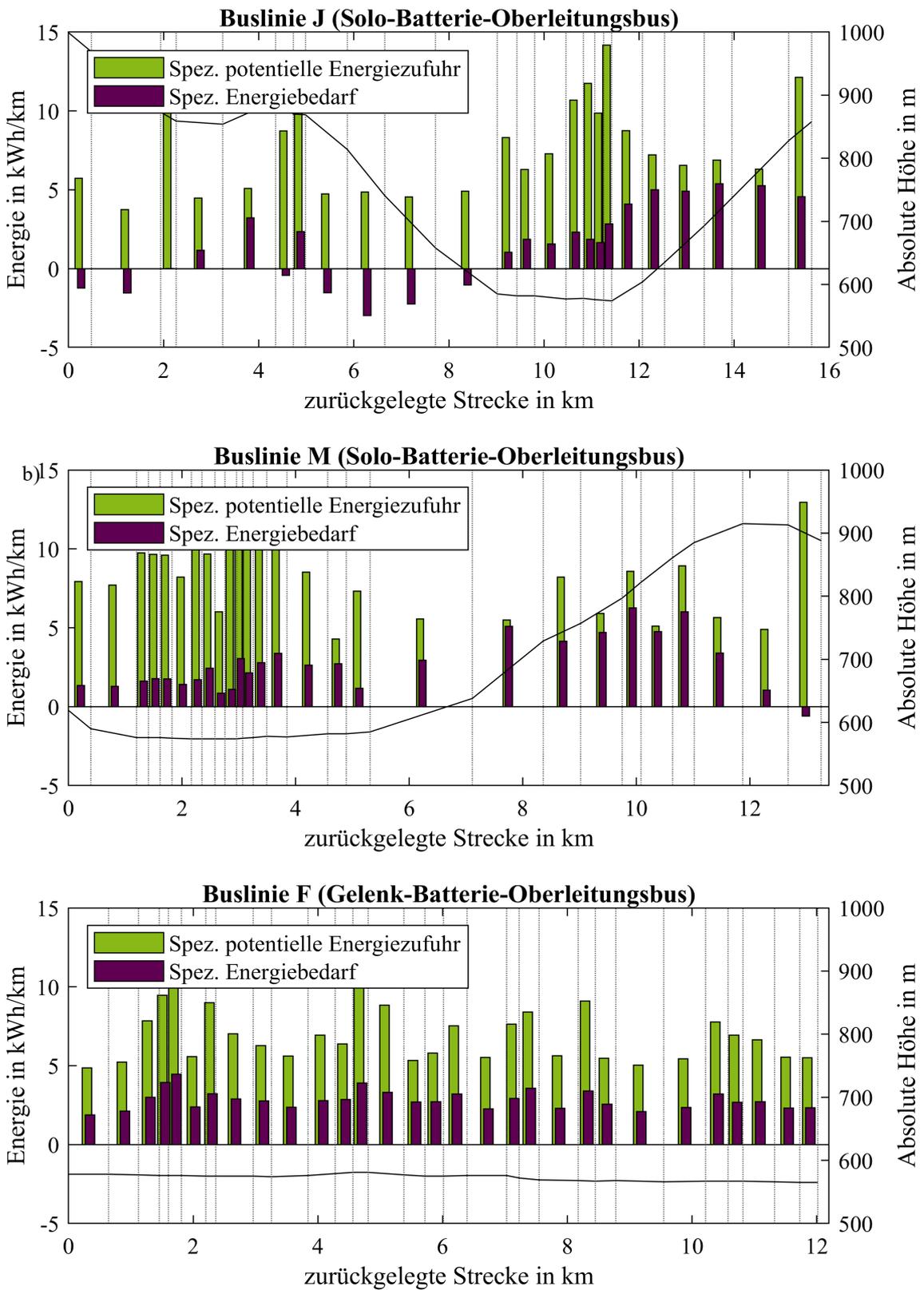
| Planungs-variante | Buslinie(n) | Planungs-variante | Buslinie(n) | Planungsvariante | Buslinie(n)           |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|------------------|-----------------------|
| 1 (C)             | C           | 10 (M404)         | M, 404      | 19 (CFRT)        | C, F, R, T            |
| 2 (F)             | F           | 11 (CM)           | C, M        | 20 (CRT404)      | C, R, T, 404          |
| 3 (J)             | J           | 12 (CR)           | C, R        | 21 (FRT404)      | F, R, T, 404          |
| 4 (M)             | M           | 13 (FRT)          | F, R, T     | 22 (CFRT404)     | C, F, R, T, 404       |
| 5 (R)             | R           | 14 (CRT)          | C, R, T     | 23 (CFMRT)       | C, F, M, R, T         |
| 6 (T)             | T           | 15 (CFT)          | C, F, T     | 24 (CFMRT404)    | C, F, M, R, T, 404    |
| 7 (404)           | 404         | 16 (CR404)        | C, R, 404   | 25 (CFJMRT404)   | C, F, J, M, R, T, 404 |
| 8 (RT)            | R, T        | 17 (CFR)          | C, F, R     |                  |                       |
| 9 (FT)            | F, T        | 18 (CM404)        | C, M, 404   |                  |                       |

Tabelle 5-1 zeigt die resultierende Szenariendefinition nach der beschriebenen Vorgehensweise aus Abschnitt 5.2. Dabei sei  $a = \{7,5,6,3,2,1,1\}$ , was bedeutet, dass 7 Planungsvarianten mit einer Buslinie (Einzelbuslinie), 5 Planungsvarianten mit zwei kombinierten Buslinien, 6 Planungsvarianten mit drei kombinierten Buslinien, 3 Planungsvarianten mit vier kombinierten Buslinien usw. untersucht werden. Dabei fällt auf, dass die Schnittmenge der Buslinie J mit den anderen zu untersuchenden Buslinien sehr gering ist. Dieser Zustand ist darauf zurückzuführen, dass die weiteren Buslinien Tallinien darstellen und unter Miteinbeziehung der baulichen Restriktionen (nicht fahrleitungsbebaubare Straßenabschnitte im Stadtzentrum, Abbildung 5-17) ergeben sich in der Folge minimale Schnittmengen mit der Buslinie J. Es resultieren bis auf die Betrachtung aller Buslinien keine weiteren Szenarien, die die Buslinie J beinhalten, wodurch Synergieeffekte der Buslinie J mit weiteren zu untersuchenden Buslinien unwahrscheinlich sind.

Die in den Abschnitten 5.5.3 und 5.5.4 vorgestellten spez. Energiebedarfe sowie spez. potentielle Busbatterie-Energiezufuhr werden beispielhaft in Abbildung 5-18 visualisiert. Während der spez. Energiebedarf die beanspruchte Energie eines Busses auf einer zurückgelegten Strecke beschreibt, stellt die spez. potentielle Busbatterie-Energiezufuhr die theoretische Energie dar, die der Bus auf einer zurückgelegten Strecke zusätzlich zum Fahrstrom über die Oberleitung beziehen könnte. Dabei werden drei Buslinien ausgewählt. Die topografisch anspruchsvollen Buslinien J und M, welche von Solo-Batterie-Oberleitungsbussen simuliert wurden sowie die Tallinie F, welche jedoch mit einem Gelenk-Batterie-Oberleitungsbuss simuliert wurde.

Während Buslinie F näherungsweise einen konstanten spez. Energiebedarf über die volle Distanz aufweist, sind die spez. Energiebedarfe der Buslinien J und M insbesondere topografisch abhängig. Bei Gefällen werden (aufgrund der hohen Masse eines Busses) ebenfalls negative spez. Energiebedarfe ermittelt (siehe Buslinie J bis 9 km), sodass diese rekuperierte Energie wieder in die Batterie zurückgespeist werden kann.

**Energiebedarf und potentielle Busbatterie-Energiezufuhr**



**Abbildung 5-18: Spez. Energiebedarf und spez. potentielle Energiezufuhr nach Streckenverlauf für ausgewählte Buslinien**  
 Vertikale, gepunktete Linien: Bushaltestellen

Während die spez. Energiebedarfe weitestgehend von der Topografie abhängig sind, ist für die spez. potentiellen Energiezufuhren die Zeit unter einer möglichen Fahrleitung ausschlaggebend. Die Zeit unter einer möglichen Fahrleitung hängt wiederum von der Streckenführung (bspw. Anzahl Lichtsignalanlagen und Kreuzungen und Geschwindigkeitsbegrenzungen) ab. Trotzdem ist es ersichtlich, dass bei starken Steigungen der Großteil der zur Verfügung stehenden Energie einer möglichen Oberleitungsinfrastruktur für die Fortbewegung und das Bewahren der Busraum-innentemperatur genutzt wird (z B. Buslinie M 7 km bis 11 km).

### **Optimierte Oberleitungsinfrastruktur**

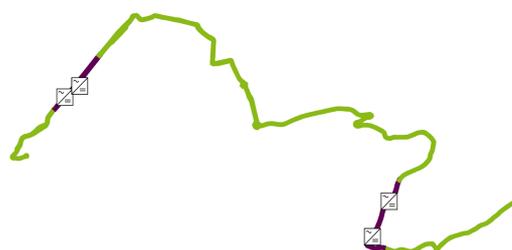
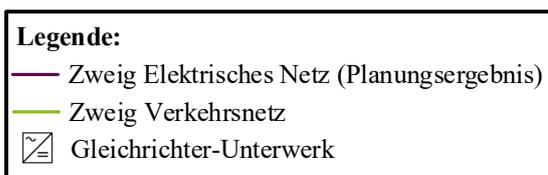
Für drei aufbauende Planungsvarianten visualisiert Abbildung 5-19 das erzielte Planungsergebnis. Dabei wird in der Abbildung die optimierte Oberleitungsinfrastruktur für eine Elektrifizierung der Buslinie M, für die kombinierte Elektrifizierung der Buslinien M und 404 sowie die kombinierte Elektrifizierung der Buslinien M, 404 und C veranschaulicht.

Die Buslinie M muss demnach mit einer Fahrleitungslänge von 4,7 km (hier: 2,35 km zweispurige Fahrleitung) ausgestattet werden, um das simulierte Worstcase-Szenario mit den zugrundeliegenden Toleranzen und Sicherheiten zu absolvieren. Außerdem werden insgesamt vier Gleichrichter-Unterwerke benötigt. Dabei wird das  $(n - 1)$ -Kriterium berücksichtigt, resultierend in einer Mindestanzahl von zwei Gleichrichter-Unterwerken je Fahrleitungszone.

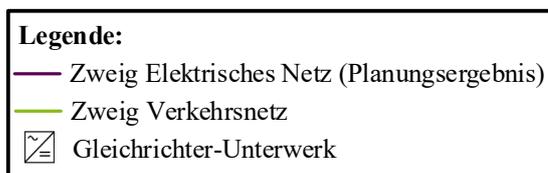
Bei der Kombination der Buslinien M und 404 lassen sich Synergieeffekte anhand von Verwendung gleicher Fahrleitungsabschnitte unterschiedlicher Buslinien erzielen. Konkret wird der mittlere Fahrleitungsabschnitt in Abbildung 5-19 b) von beiden Buslinien verwendet. Für die Kombination beider Buslinien wird eine Fahrleitungslänge von 10,8 km (hier: 5,4 km zweispurige Fahrleitung) sowie eine Gleichrichter-Unterwerksanzahl von sechs benötigt, während für die Buslinie 404 in der Einzelbetrachtung mindestens eine Fahrleitungslänge von 8,9 km (hier: 3,9 km zweispurige Fahrleitung sowie 1,1 km einspurige Fahrleitung) notwendig wäre.

Abbildung 5-19 c) zeigt folglich die Elektrifizierung der Buslinien M, 404 und C, welche wiederum gesteigerte Synergieeffekte aufweist. Die Fahrleitungslänge muss lediglich von 10,8 km auf 12,8 km gesteigert werden, um zusätzlich Buslinie C zu elektrifizieren. Zwei zusätzliche Gleichrichter-Unterwerke (insgesamt 8 Gleichrichter-Unterwerke) sind notwendig, um das Worstcase-Szenario zu bewältigen.

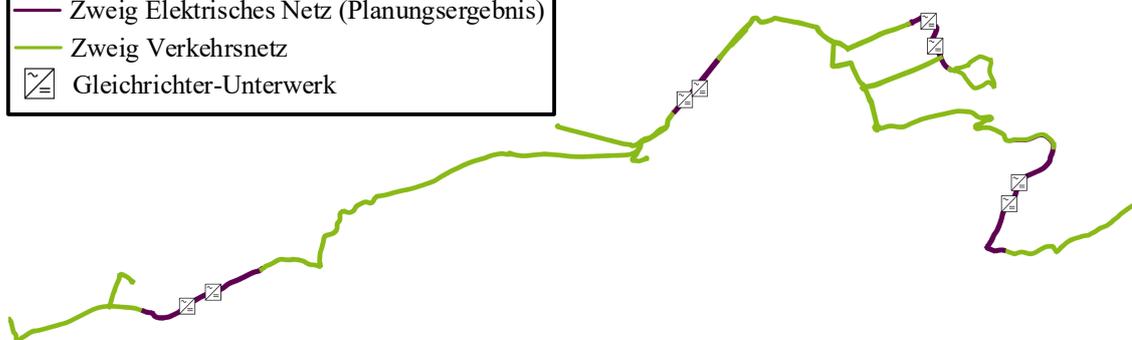
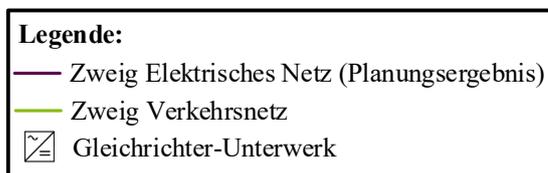
a)



b)



c)

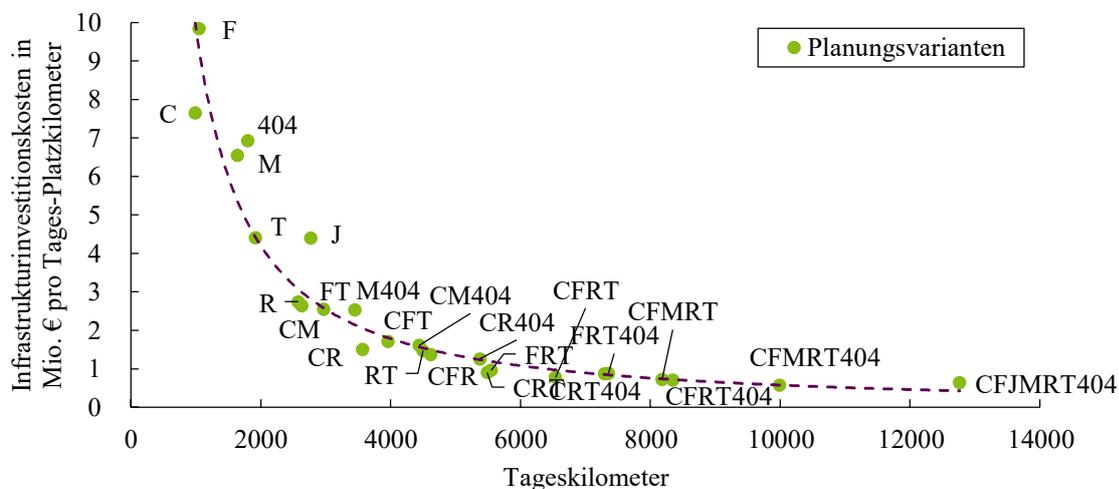


**Abbildung 5-19: Planungsergebnis für ausgewählte Planungsvarianten**  
 a) Planungsvariante M (Buslinie M)  
 b) Planungsvariante M404 (Buslinien M und 404)  
 c) Planungsvariante CM404 (Buslinien M, 404 und C)

Abbildung 5-20 vergleicht die Wirtschaftlichkeit aller Planungsvarianten miteinander, sodass auf der Abszisse die Tageskilometer aller fahrenden Busse einer Planungsvariante aufgetragen werden, während die Ordinate die ermittelten Infrastrukturinvestitionskosten (in Mio. €) pro Beförderungsleistung präsentiert.

Die Tageskilometer resultieren aus dem Busumlaufplan für das betrachtete Worstcase-Szenario. Dafür werden die Fahrleistungen sämtlicher Batterie-Oberleitungsbusse innerhalb einer

Planungsvariante addiert. Für die erforderliche Beförderungsleistung wird zusätzlich noch die maximal mögliche Passagierzahl berücksichtigt, sodass Gelenk-Batterie-Oberleitungsbusse keinen Nachteil aufgrund des höheren spez. Verbrauchs – welcher aus der gesteigerten Masse resultiert – gegenüber Solo-Batterie-Oberleitungsbussen besitzen. Die Berücksichtigung der Passagierzahl geht auf die gesteigerte Wichtigkeit des ÖPNV zurück, sodass ein möglichst großer Anteil an Passagieren klimaneutral befördert werden soll. Anschließend werden die ermittelten Infrastrukturinvestitionskosten auf die Tages-Platzkilometer bezogen, welche das Produkt aus Tages-Fahrleistung und Platzangebot (Anzahl Sitz- und Stehplätze) je Fahrzeug widerspiegelt.



**Abbildung 5-20: Wirtschaftlichkeitsvergleich aller Planungsvarianten**

Die Abbildung zeigt deutlich, dass bei den Planungsvarianten, die lediglich eine Buslinie untersuchen, die wirtschaftlich optimalen Buslinien J, R und T darstellen. Zwar benötigt Buslinie C zur Elektrifizierung den geringsten Fahrleistungsanteil von 3,7 km (hier: 1,75 km zweispurige Fahrleitung sowie 0,2 km einspurige Fahrleitung), die Wirtschaftlichkeit wird aber durch die geringe Fahrleistung und somit geringe Passagierzahl in der abschließenden Beförderungsleistung-Betrachtung verschlechtert. Während beispielsweise Buslinie C, anhand der  $(n - 1)$ -Kriteriums und der zwei entstehenden Oberleitungszonen, vier Gleichrichter-Unterwerke benötigt, sind für die Buslinie F sechs Gleichrichter-Unterwerke vonnöten. Außerdem ist die Beförderungsleistung der Buslinie F ähnlich gering wie bei der Buslinie C. Die Buslinien J und R hingegen bieten durch die hohe Fahrzeuganzahl eine demensprechend hohe Beförderungsleistung und finden sich im wirtschaftlich-optimalen Bereich wieder.

Da die Buslinie J wenig Synergieeffekte mit den anderen Buslinien aufweist, findet sich diese nicht in den weiteren Planungsvarianten (mit Ausnahme der Planungsvariante sämtlicher Buslinien) wieder. Die Buslinie R hingegen weist mit den weiteren Buslinien die größten Schnittmengen aus, sodass ausgehend von der Buslinie R weitere Buslinien anhand von

Synergieeffekten wirtschaftlich optimal elektrifiziert werden können. Die Kombinationen mit den Buslinien C und T (CR, RT und CRT) treten dabei in den Vordergrund.

Auffällig ist weiterhin, dass eine gesteigerte Anzahl an elektrifizierten Buslinien in einer erhöhten Wirtschaftlichkeit münden, sodass die Infrastrukturinvestitionskosten pro Tages-Platzkilometer bei zunehmender Anzahl von Buslinien deutlich sinken.

### Validierung der Lösung

Zur Validierung der Lösung werden im ersten Schritt Ladezustandsverläufe betrachtet. Dazu werden in Abbildung 5-21 zwei beispielhafte Ladezustandsverläufe dargestellt, wobei die SoC-Reserve  $f_{\text{Bus Bat R}}$  nicht unterschritten werden darf, damit eine vorher definierte Rest-Flexibilität stets vorhanden ist, um unerwartete Verkehrssituationen (Verkehrsstaus oder Straßen-Arbeitsstellen<sup>26</sup>) bei Bedarf erfolgreich zu bewältigen.

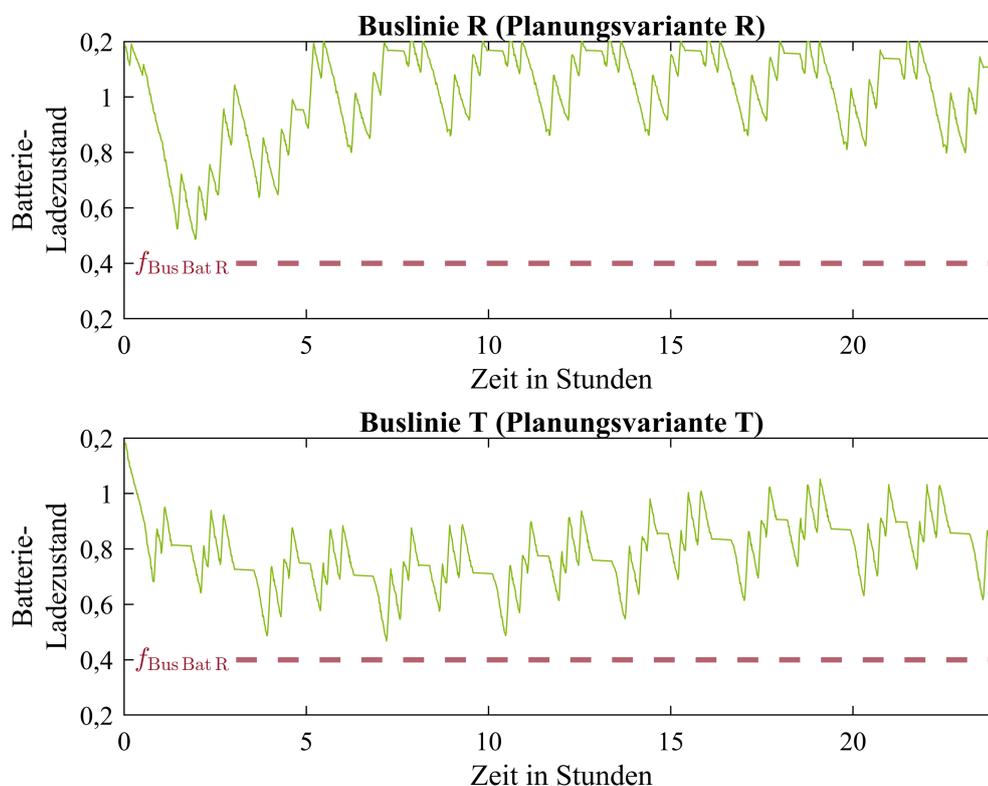


Abbildung 5-21: Ladezustandsverläufe ausgewählter Planungsvarianten

Außerdem zeigt die Abbildung einen stark verringerten Ladezustand nach der Ausrückfahrt vom Busdepot zur Buslinie R (unmittelbar nach dem Start), sodass hier bei der Umlaufplangenerierung ein Optimierungspotential herrscht, um den notwendigen Fahrleistungsanteil weiter zu verringern. Konkret fährt der Batterie-Oberleitungsbus bei der Ausrückfahrt zum Start der Buslinie R, welcher sich am Stadtrand befindet, statt beispielsweise im Stadtzentrum mit dem Umlaufplan zu starten.

<sup>26</sup> Verkehrsfläche, die aufgrund einer Baumaßnahme vorübergehend vollständig oder teilweise für den Verkehr gesperrt ist.

Eine beispielhafte Validierung der Kurzschlussstromerkennbarkeit zeigt Abbildung 5-22, indem der Kurzschlussstrom in Abhängigkeit von der Distanz zu den Gleichrichter-Unterwerken aufgetragen wurde, resultierend in einem minimalen Kurzschlussstrom für jeden elektrischen Zweig. Zusätzlich wurde der maximale Betriebsstrom der einzelnen elektrischen Zweige aufgetragen. Aus Gleichung 5.40 resultiert, dass folgende Bedingung eingehalten werden muss, um die Kurzschlusserkennbarkeit zu gewährleisten:

$$\frac{I_{K \min}}{I_{B \max}} > 1,22 \quad (5.105)$$

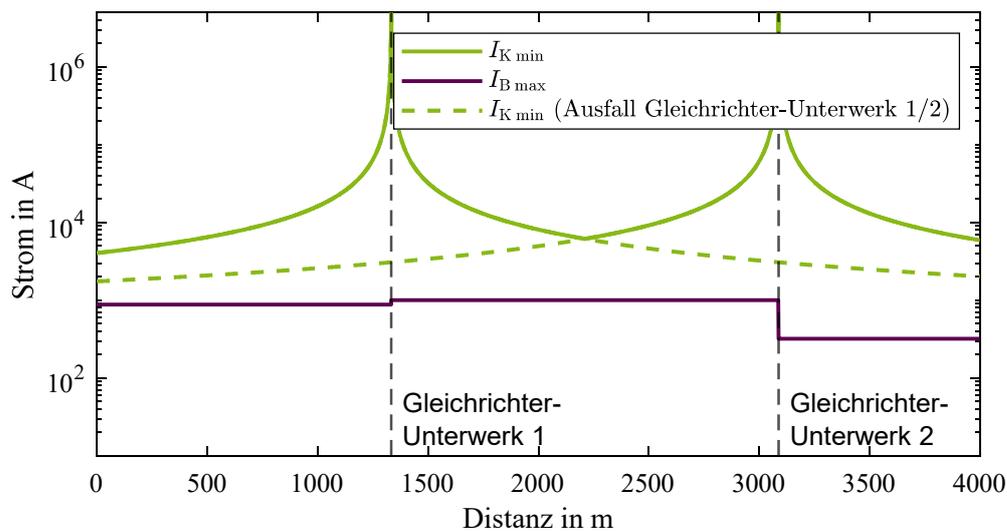


Abbildung 5-22: Kurzschlussstromerkennbarkeit (Planungsvariante CFMRT404)

Die Betrachtung des thermischen Grenzstromes die das Ziel der Einhaltung der Stromtragfähigkeitskennlinie verfolgt, zeigt Abbildung 5-23. Dabei werden zwei Planungsvarianten ausgewählt, die allein durch die Anzahl der zu elektrifizierenden Buslinien eine große Diskrepanz aufweisen. Die in der Planungsmethode verwendeten Fahrdrähte (Querschnitt  $q = 120 \text{ mm}^2$ ) zeigen bei der Elektrifizierung lediglich einer Buslinie (Planungsvariante C) eine Dimensionierung mit großzügiger Reserve auf. Bei der Elektrifizierung von sechs Buslinien (Planungsvariante CFMRT404) hingegen ist die Reserve deutlich abgeschwächt, sodass die Auslastung der Oberleitung dementsprechend hoch ist.

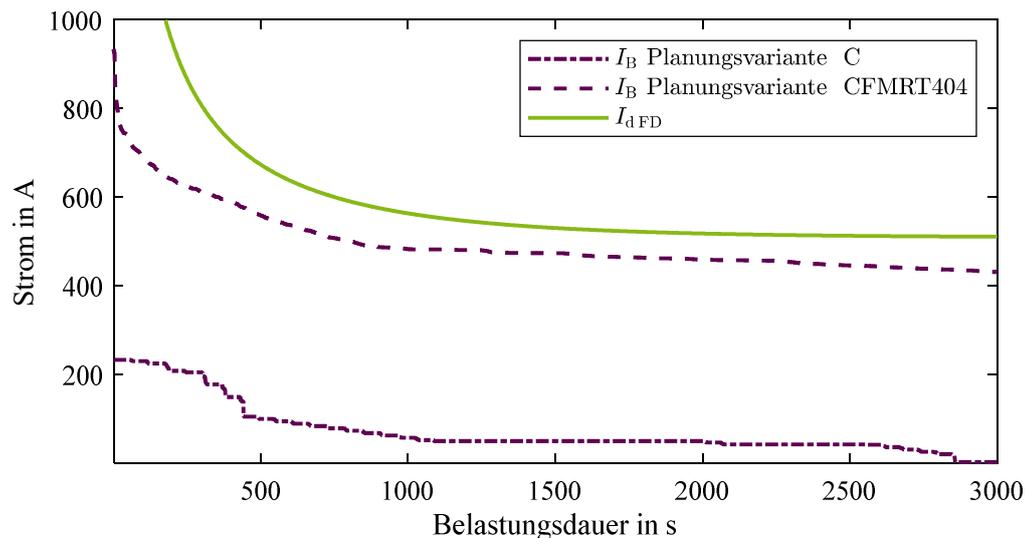


Abbildung 5-23: Thermische Betrachtung einer Fahrleitung (Planungsvarianten C und CFMRT404)

### 5.6.3 Fallstudie 2: Brown-Field-Szenario Solingen

Fallstudie 2 befasst sich mit der deutschen Stadt Solingen, welche bereits mit einem Oberleitungsnetz ausgestattet ist, sodass dort eine Integration von Batterie-Oberleitungsbussen realisierbar scheint.

#### Generierung einer Datengrundlage

Der Verkehrsbetrieb der Stadtwerke Solingen GmbH betreibt das Solinger Oberleitungsnetz, welches aus sechs Oberleitungsbuslinien besteht, sowie 18 Dieselbuslinien (inkl. sechs Nachtlinien). Die sechs Oberleitungsbuslinien (681 bis 686) bilden dabei Durchmesserlinien<sup>27</sup>, welche vollständig mit Oberleitung ausgestattet sind.

Für die Datengrundlage werden im ersten Schritt die Verkehrsbetriebsinformationen benötigt, welche sich aus dem Busumlaufplan sowie den Busparametern zusammensetzt.

Abbildung 5-24 a) visualisiert die topografischen Gegebenheiten der im Bergischen Land liegenden Stadt Solingen. Die topografischen Verhältnisse sind dementsprechend anspruchsvoll. Das Verkehrsnetz (Abbildung 5-24 b)) umfasst die bereits erwähnten 24 Buslinien, wobei das Oberleitungsnetz (Abbildung 5-24 c)) lediglich die sechs Oberleitungsbuslinien (681 bis 686) abdeckt. Das bestehende Oberleitungsnetz wird mittels 22 Gleichrichter-Unterwerken aus dem 10 kV-Mittelspannungsnetz gespeist und besitzt eine Nennspannung von  $U_n = 600 V$  und einen Speisefaktor von  $f_{\text{Speise}} = 0,5$ , sodass  $U_{GUW} = 660 V$  entspricht.

<sup>27</sup> Durchgehende Buslinie, die sich über mehrere Ortsteile hinweg erstreckt und dabei durch das Ortszentrum verläuft.

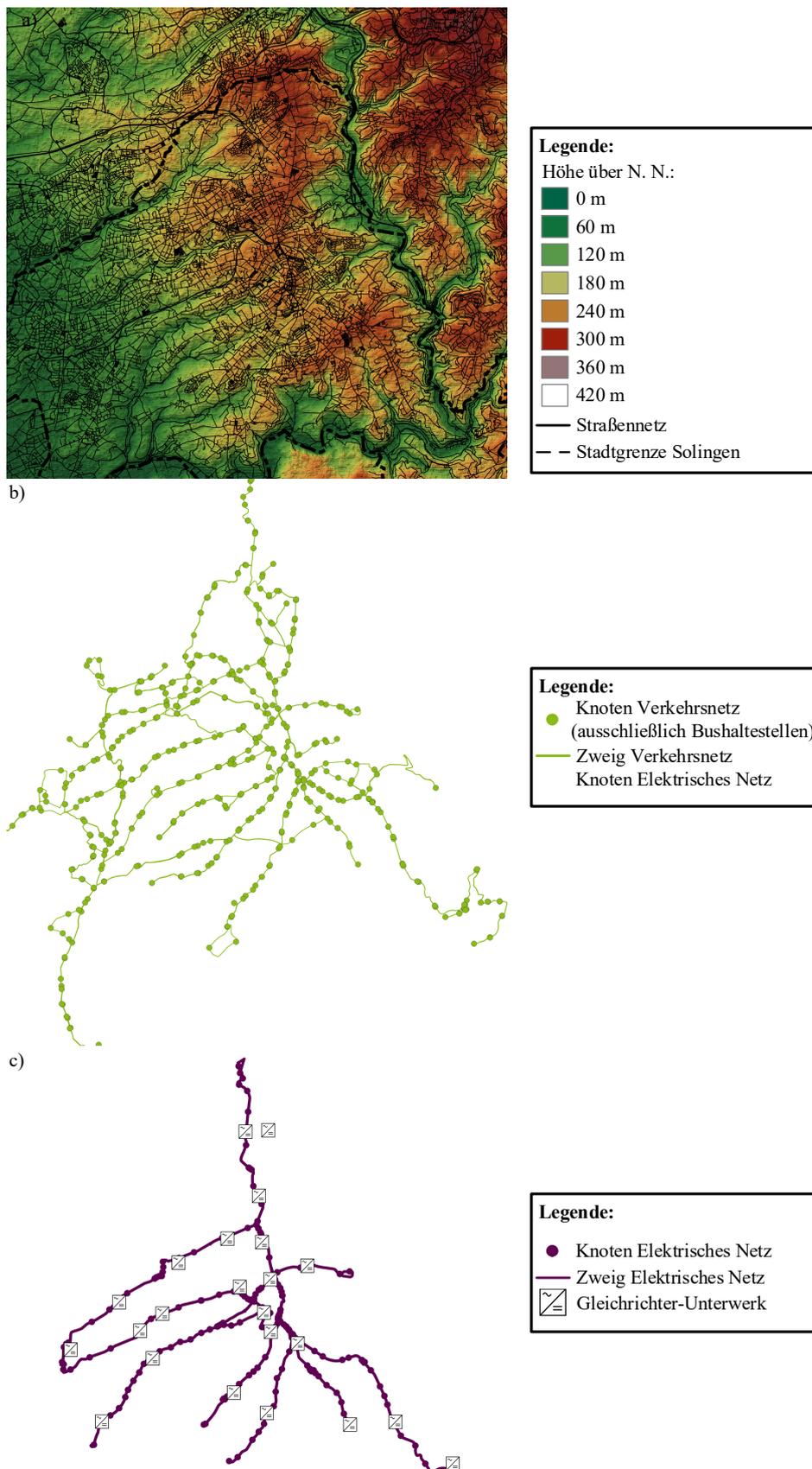


Abbildung 5-24: Visualisierte Datengrundlage der Stadt Solingen (Fallstudie 2)

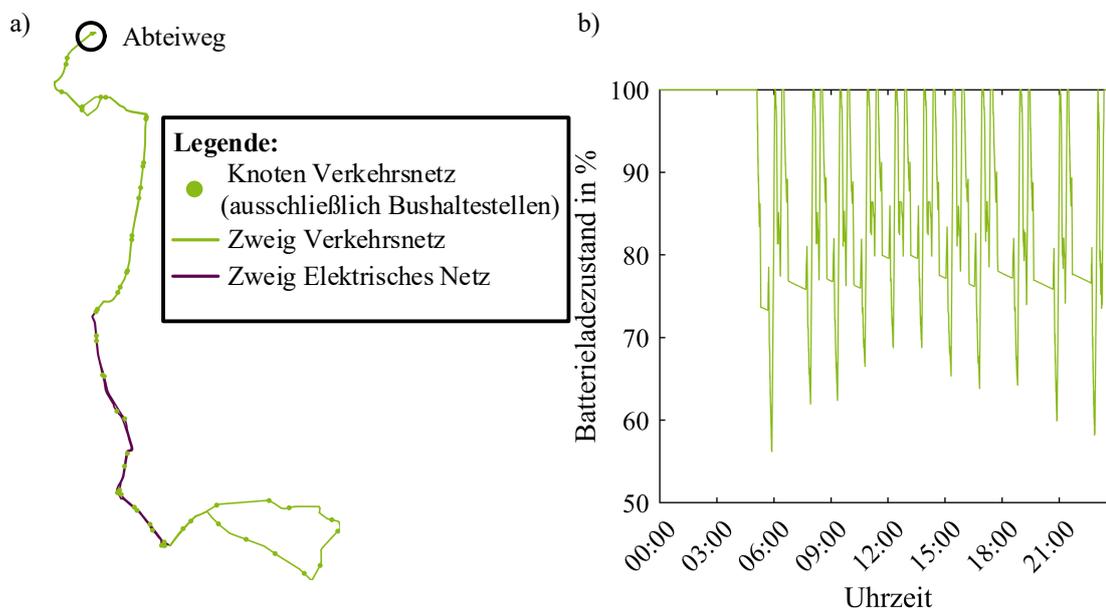
a) Topografische Karte

b) Verkehrsnetz

c) Elektrisches Netz (Oberleitungsnetz)

### Energiebedarf und potentielle Busbatterie-Energiezufuhr

Im Zuge des Forschungsprojektes „BOB Solingen“ – wobei das Akronym BOB für **B**atterie-**O**berleitungs-**B**us steht – wird eine bislang von Dieselnissen befarende Buslinie (695) auf vollelektrischen Betrieb umgestellt [81]. Möglich wird dies dadurch gemacht, dass ein Teil der Buslinie 695 bereits mit Oberleitung ausgestattet ist.



**Abbildung 5-25:** a) Buslinie 695  
b) Exemplarischer Batterie-Ladezustandsverlauf eines Batterie-Oberleitungsbusses auf der Buslinie 695

Abbildung 5-25 a) zeigt Buslinie 695, welche einen Oberleitungsanteil von knapp einem Drittel (inkl. Ein- und Ausrückfahrten) aufweist. Mittels einer für den Batterie-Oberleitungsbus errichteten Ladeinfrastruktur an der nördlichen Endhaltestelle (Abteiweg), werden Fahrpausen aktiv zum Laden des Batterie-Oberleitungsbusses genutzt. Folglich resultiert anhand der Oberleitungsbussystem-Simulation der Ladezustandsverlauf aus Abbildung 5-25 b).

Weitere Buslinien können nicht durch eine Eins-zu-eins-Umsetzung von Dieselnissen auf Batterie-Oberleitungsbussen umgestellt werden, weshalb für diese Buslinien – äquivalent zur Fallstudie 1 (Abbildung 5-18) – der Energiebedarf sowie die potentielle Energiezufuhr für alle Segmente bestimmt wird. Abbildung 5-27 zeigt eine komprimierte Ansicht des spez. Energiebedarfs im Worstcase-Szenario der zwei betrachteten Bustypen (Solobus und Gelenkbus) aller unterschiedlichen Buslinien (partiell auch Buslinien-Verschneidungen). Der Solobus weist gegenüber dem Gelenkbus aufgrund der geringeren Masse einen deutlich geringeren Energiebedarf auf.

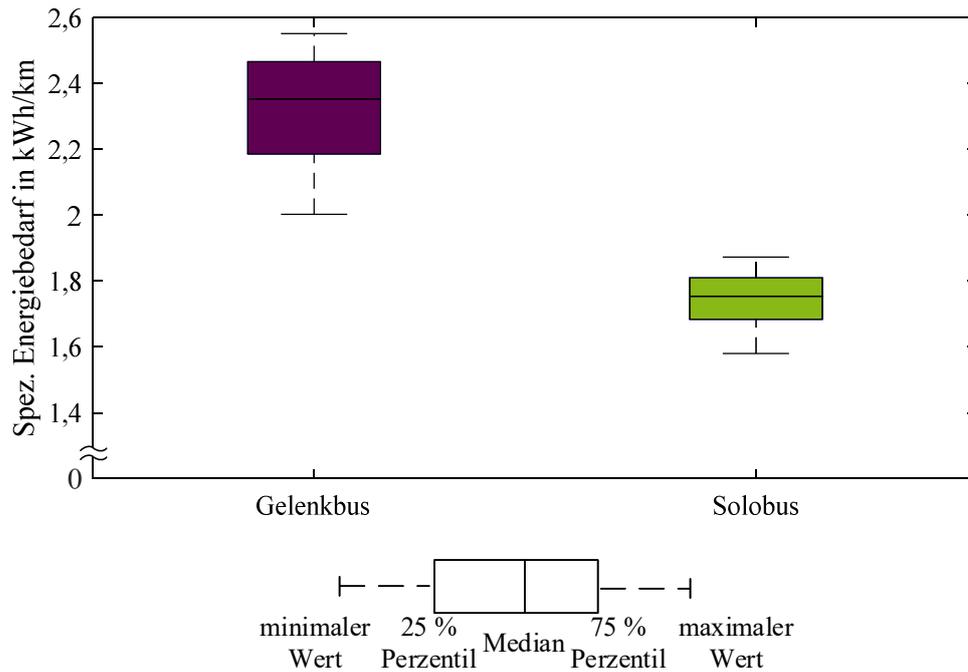


Abbildung 5-26: Energiebedarfe der betrachteten Bustypen (Fallstudie 2)

### Optimierte Oberleitungsinfrastruktur

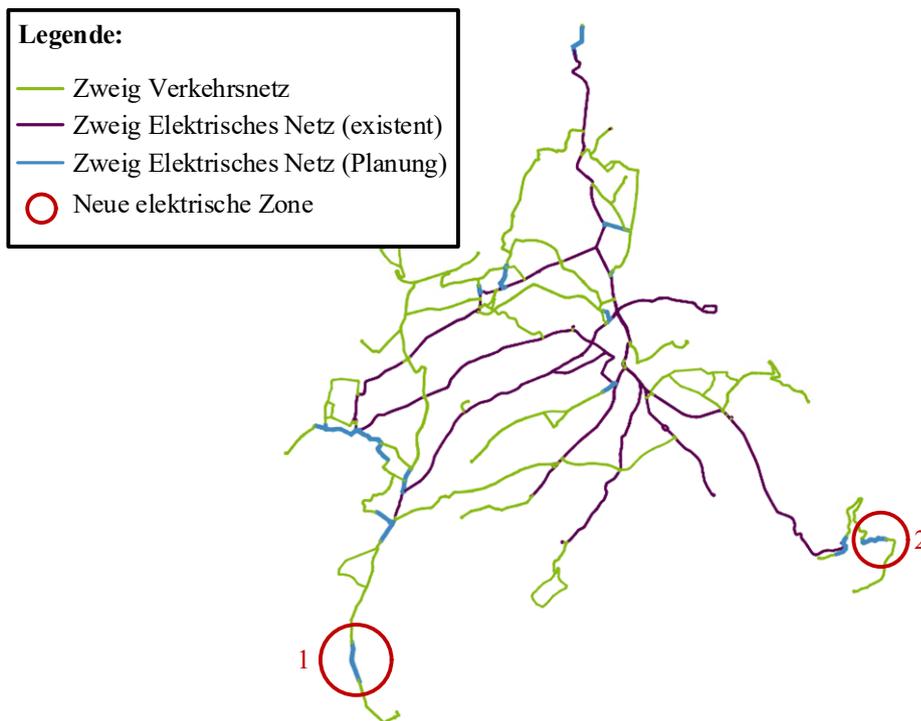


Abbildung 5-27: Planungsergebnis für Fallstudie 2 (Solingen)

Aufgrund des gegebenen Brown-Fields-Szenarios existiert bereits ein Oberleitungsbusssystem, welches aufgrund der nicht durchführbaren Eins-zu-eins-Umsetzung von Dieselnissen auf Batterie-Oberleitungsbusen zusätzliche EVI benötigt. Folge Untersuchung soll zeigen, wie das Oberleitungsnetz bei einer Vollelektrifizierung (Umstellung sämtlicher Buslinien auf Batterie-

Oberleitungsbusse) aussehen könnte. Dabei sollen erneut die Investitionskosten minimiert werden, sodass die Bestandsinfrastruktur dabei maximal genutzt wird.

Abbildung 5-27 zeigt das Planungsergebnis für Fallstudie 2, sodass das existente Oberleitungsbussystem wiederholt in violett und das Verkehrsnetz in grün dargestellt wird. Die zusätzlich benötigte Fahrleitung von ca. 13,4 km wird in blau angezeigt und erweitert – bis auf zwei Ausnahmen – das existente Oberleitungsbussystem. Lediglich im Südwesten (Richtung Stadt Leichlingen, roter Kreis 1) und im Südosten (Richtung Solinger Schloss Burg, roter Kreis 2) werden neue Fahrleitungsabschnitte errichtet, die nicht mit dem bisherigen Oberleitungsbussystem verbunden sind.

### **Validierung der Lösung**

Die Validierung des Planungsergebnisses erfolgt äquivalent zur Validierung von Fallstudie 1 und wird aus Redundanzgründen nicht explizit aufgeführt.

### **5.6.4 Determinierung von Einflussfaktoren auf die Infrastrukturinvestitionskosten**

Abschließend findet eine simulative Einfluss-Analyse dreier wesentlicher Eingabeparameter auf die resultierenden Infrastrukturinvestitionskosten statt. Dabei sollen vorwiegend die drei nachfolgend aufgeführten Eingabeparameter untersucht werden:

1. Batteriekapazität des Batterie-Oberleitungsbusse
2. Leistungstransfer von der Fahrleitung in den Batterie-Oberleitungsbus (während der Fahrt)
3. Batterie-Ladeleistung

Dafür wird in Fallstudie 1 (Green-Field-Szenario) die drei Einflussfaktoren einzeln sowie kombiniert bewertet. Ein Green-Field-Szenario eignet sich für diese Untersuchung aufgrund der planerischen Freiheiten im besonderen Maße, da Infrastrukturinvestitionskosten nicht durch eine Bestandsinfrastruktur beeinflusst werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die zu untersuchenden Planungsvarianten. Ausgehend von den Ergebnissen aus Fallstudie 1 (Abbildung 5-27) ist das nachfolgende Umsetzungskonzept wirtschaftlich optimal. Das Umsetzungskonzept kann durch eine schrittweise Umstellung der Buslinien oder eine direkte Umstellung aller Buslinien erfolgen. Die wirtschaftlichsten Planungsvarianten lauten: R, RT, CRT, CFRT, CFRT404 und CFMRT404. Infrastrukturinvestitionskosten werden nachfolgend für diese ausgewählten Buslinienkombinationen determiniert. Planungsvarianten mit Buslinie J werden aufgrund ausbleibender Synergieeffekte nicht betrachtet.

**Tabelle 5-2: Übersicht Einflussfaktorvariante (Berechnung der Rest-Nettobatteriekapazität nach Abschnitt 10.2)**

| <b>Einflussfaktorvariante</b> | <b>Einflussfaktor 1:<br/>Rest-Nettobatteriekapazität/<br/>Anfangs-Bruttobatteriekapazität<br/>in kWh</b> | <b>Einflussfaktor 2:<br/>Leistungstransfer<br/>(Fahrleitung<br/>→ Bus) während der<br/>Fahrt in kW</b> | <b>Einflussfaktor 3:<br/>Batterie-Ladeleistung in kW</b> |
|-------------------------------|--|--|--|
| 0)                            | 36,00/60,00  | 500  | 180  |
| 1)                            | <b>282,24/441,00</b>   | 500  | 180  |
| 2)                            | 36,00/60,00  | <b>1.000</b>   | 180  |
| 3)                            | 36,00/60,00  | 500  | <b>300</b>   |
| 4)                            | <b>282,24/441,00</b>   | <b>1.000</b>   | <b>300</b>   |

Einflussfaktorvariante 0 entspricht den Planungsvarianten (R, RT, CRT, CFRT, CFRT404 und CFMRT404) aus Fallstudie 1 (Tabelle 5-1) und dient als Bewertungsmaßstab.

Für Einflussfaktorvariante fungiert der Mercedes-Benz eCitaro/eCitaro G als Vorlage, welcher eine maximale Anfangs-Bruttobatteriekapazität von 441 kWh aufweist. Diese Batteriekapazität ist für den Solo- als auch für den Gelenkbus verfügbar. Wie im Anhang (Abschnitt 10.2) beschrieben, resultiert eine Rest-Nettobatteriekapazität von 282,24 kWh. Im Gegensatz zur bereits verwendeten LTO<sup>28</sup>-Technologie wird eine Festkörperbatterie verwendet, welche höhere Energiedichten aufweist. Bei einer Energiedichte von 0,138 kWh/kg beträgt die Masse der 441 kWh großen Batterie ca. 3.200 kg. Im Vergleich beträgt die Masse der zuvor betrachteten LTO-Batterie ca. 1460 kg, was einer Energiedichte von lediglich 0,041 kWh/kg entspricht. Die Leermassen<sup>29</sup> der Solo- und Gelenkbusse werden dementsprechend für die Simulationsuntersuchung angepasst [115–117].

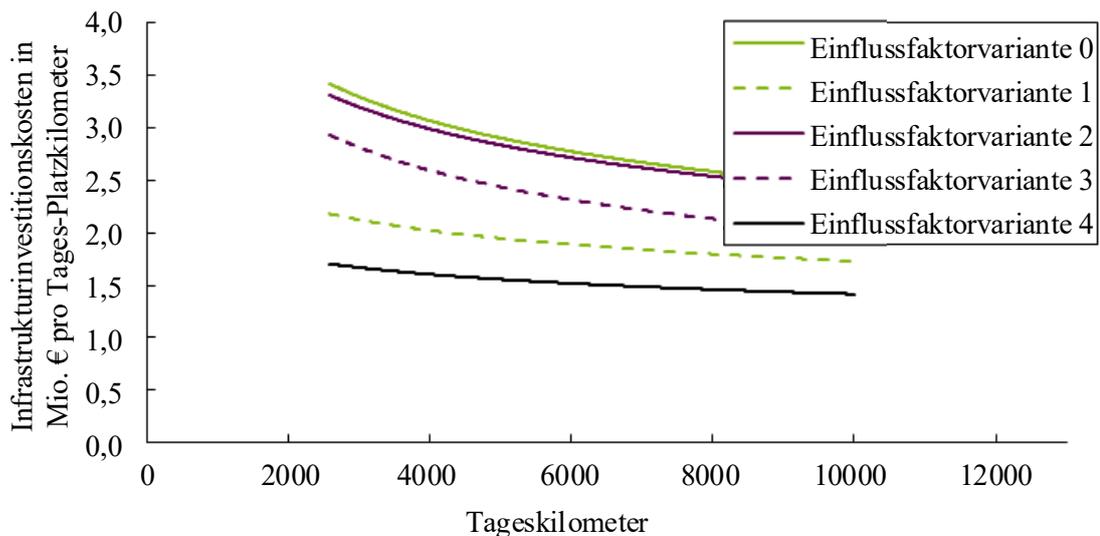
Der zweite Einflussfaktor (Einflussfaktorvariante 2) betrifft den maximalen Leistungstransfer von der Fahrleitung in den Batterie-Oberleitungsbus während der Fahrt. In den zuvor gewählten Varianten wird auf das IMC500 (In Motion Charging) zurückgegriffen, welches einen maximalen Leistungstransfer von bis zu 500 kW von der Fahrleitung in den Batterie-Oberleitungsbus ermöglicht. Für die gewählte Einflussfaktorvariante wird diese Leistung auf 1000 kW erhöht, sodass ebenfalls die Querschnitte der Fahrleitungen entsprechend erhöht werden [118].

<sup>28</sup> LTO: Lithium-Titanat (engl. lithium-titanium-oxide)

<sup>29</sup> Leermasse: Masse eines Fahrzeuges (einschließlich Fahrer (75 kg) sowie weitere für den Betrieb notwendige Mittel (z. B. voll aufgefülltes Kühlwasser) und zu 90 % gefüllter Kraftstoffbehälter)

Das IMC500 kann die maximale Motorleistung von insgesamt 320 kW sowie parallel die maximale Batterieladeleistung von 180 kW bereitstellen, jedoch wird die maximale Motorleistung nur kurzzeitig bezogen, sodass Einflussfaktorvariante 3 untersucht, ob freie Kapazitäten im Leistungstransfer vorhanden sind und folglich die Auslastung maximiert werden kann. Dafür wird die maximale Batterieladeleistung auf 300 kW angehoben.

Einflussfaktorvariante 4 kombiniert abschließend alle drei Einflussfaktoren. Bei allen Planungsvarianten ist wie bereits in den zuvor durchgeführten Fallstudien eine SoC-Reserve von 20 % mit eingeplant.



**Abbildung 5-28: Einflussfaktorenuntersuchung auf die Infrastrukturinvestitionskosten**

Abbildung 5-28 zeigt das Ergebnis der Einflussuntersuchung. Im Vergleich zum Bewertungsmaßstab (Einflussfaktorvariante 0) zeigt die Erhöhung des Leistungstransfers (Einflussfaktorvariante 2) keinen signifikanten Einfluss auf die spez. Infrastrukturinvestitionskosten, da die Kurven fast identisch verlaufen. Der limitierende Faktor stellt in dieser Planungsvariante die Batterie-Ladeleistung dar. Außerdem zeigt Abbildung 5-23, dass der thermische Grenzstrom auch bei kombinierter Buslinienbetrachtung ausreichend groß dimensioniert ist. Hier könnten sich lediglich bei Betrachtung zusätzlicher Buslinien Infrastrukturinvestitionskostenvorteile ergeben. Der Einfluss der Batterie-Ladeleistung (Einflussfaktorvariante 3) hat hingegen einen größeren Einfluss, da die Kurve für die Infrastrukturinvestitionskosten deutlich unterhalb des Bewertungsmaßstabes liegt, jedoch zeigt die Abbildung auch, dass die Batteriekapazität (Einflussfaktorvariante 1) den größten Einflussfaktor darstellt. Zu beachten ist jedoch, dass zusätzliche Investitionskosten bei der Batterie-Oberleitungsbusbeschaffung entstehen, die kompensiert werden müssen. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt, dass primär eine Vergrößerung der Anfangs-Bruttobatteriekapazität fokussiert werden sollte, da diese Einzelmaßnahme die größten Infrastrukturkostenvorteile mit sich bringt.



## 6 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Die erarbeitete Planungsmethode sowie das vorgestellte Netzleitsystem für Oberleitungsbussysteme reihen sich als innovative Lösungsoptionen in die Elektrifizierung des Verkehrssektors und damit als Teil der Energiewende ein. Verkehrsbetriebe und –verbunde stehen folglich vor der noch nie dagewesenen Herausforderung, die vorhandene Busflotte nachhaltig und emissionsarm zu gestalten. Diese Herausforderung gilt es als differenziert zu betrachten, da heterogene Ausgangssituationen vorzufinden sind. Infolgedessen werden unterschiedliche Optimierungsebenen betrachtet, sodass in dieser Arbeit die Optimierung des *Betriebes* ebenso die Optimierung der *Planung* für den (Aus-)Bau eines Oberleitungsbussystems betrachtet werden (vgl. Abschnitt 1.1). Während derzeitige Echtzeit-ÖPNV-Überwachungssysteme sich auf die Ankunftszeiten fahrender Busse beschränken, richtet sich der Fokus dieser Arbeit im Hinblick auf die Optimierung der *Betriebsebene* auf die Determinierung des (zukünftigen) elektrischen Netzzustandes, welches als Teil des intelligenten Netzleitsystems fungiert. Der Aspekt der *Planungsebene* erweitert den bisherigen Stand der Wissenschaft und Technik, indem die vollständige Oberleitungsbussystem-Infrastruktur unter dem Gesichtspunkt minimaler Infrastruktur-Investitionskosten determiniert wird (vgl. Abschnitt 1.2).

Die Hochphase von Oberleitungsbussystemen in Deutschland und der Welt beendete der große Anstieg des Individualverkehrs, welcher durch einen verkehrspolitischen Paradigmenwechsel zugunsten des privaten Pkws ab den 1960er Jahren gesteuert wurde. Folglich wurde eine weltweite Resignation eingeleitet (vgl. Abschnitt 2.1). Die Energiewende und die damit verbundene Elektrifizierung des ÖPNV bedeutet eine Renaissance von elektrischen Antriebsarten, wobei ein technologischer Fortschritt innovative Konzepte der Energiezu- sowie -mitführung ermöglicht (vgl. Abschnitt 2.2). Während der Fokus auf Batterie-Oberleitungsbusse gelegt wird, erläutert Abschnitt 2.3 die elektrische Energieversorgung von Oberleitungsbussystemen, indem detailliert auf die für diese Arbeit relevanten Komponenten eingegangen wird. Der forschungshafte Einsatz neuartiger Systemkomponenten innerhalb bestehender Oberleitungsbussysteme ermöglicht die Einfluss-Untersuchung dieser Systemkomponenten sowie die Auswirkung der Integration von Batterie-Oberleitungsbussen (vgl. Abschnitt 2.4). Infolgedessen resultieren zwei wesentliche Herausforderungen. Der *Betrieb* bestehender Oberleitungsbussysteme kann mittels eines Netzleitsystems optimiert werden, sodass die Integration von Batterie-Oberleitungsbussen ohne ergänzenden Oberleitungsbussystemausbau realisierbar ist. Bei nichtexistenter Oberleitungsbussystem-Infrastruktur oder unumgänglichen Ausbau, ist eine *Planung*, die sowohl die Vorteile des technologischen Fortschrittes als auch dessen Restriktionen berücksichtigt, resultierend in einer – im Vergleich zu konventionellen Oberleitungsbussystemen – diminuierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur, durchzuführen (vgl. Abschnitt 2.5).

Kapitel 3 führt folgerichtig ein intelligentes Netzleitsystem für Oberleitungsbussysteme ein. Das Konzept des Netzleitsystems beinhaltet drei wesentliche Komponenten, wobei die Netzzustandsidentifikation sowie die Netzzustandsprognose Bestandteil dieser Arbeit sind (vgl. Abschnitt 3.1). Das Netzleitsystem stützt sich auf eine bestehende Oberleitungsbussystem-Simulation, welche zusätzlich für die Generierung von Pseudo-Messwerten für eine forschungshafte Erprobung adaptiert wird (vgl. Abschnitt 3.3). Nach erfolgreicher Einbindung von (Pseudo-)Messwerten wird der aktuelle Netzzustand des Oberleitungsbussystems identifiziert, indem sämtliche Messwerte auf ihre Validität hin überprüft werden. Im Falle gescheiteter Validitätsprüfungen werden jene geschätzt. Dabei entfällt das Hauptaugenmerk auf die Messwert-Schätzung der Batterie-/Oberleitungsbusse, welche sich wiederum in Buspositions- sowie Busleistungs-Schätzung unterteilen lassen (vgl. Abschnitt 3.4). Ausgehend vom aktuellen Netzzustand wird eine Netzzustandsprognose erstellt. Während Systemkomponenten wie Ladesäulen für Elektrofahrzeuge oder Photovoltaikanlagen stationäre elektrische Knoten repräsentieren, stellen Batterie-/Oberleitungsbusse bewegliche, dynamische elektrische Knoten dar, die maßgeblich als Netzlast, aber partiell ebenfalls als Einspeiser fungieren. Um demzufolge Netzzustände prognostizieren zu können, sind die zukünftigen Leistungen der Batterie-/Oberleitungsbusse obligatorisch. Diese basieren auf zukünftige Buspositionen, die mit den zugehörigen Busumlaufplänen einhergehen. Um möglichst präzise Netzzustandsprognosen erstellen zu können, ist die Erfassung einer möglichen Abweichung zum Busumlaufplan als Voraussetzung anzusehen. Nach erfolgreicher Leistungs-Prognose sämtlicher Komponenten, wird aufbauend für jeden Zeitschritt der zugehörige Netzzustand determiniert. Abschließend wird das Konzept für die prädiktive Netzzustandsregelung vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.6).

Das Netzleitsystem wird im Kapitel 4 mittels eines Labortestes evaluiert und validiert. Dafür werden der prinzipielle Labortestaufbau dargelegt und Messwerten einer Testfahrt in den Labortest integriert. Ein Vergleich zwischen Testfahrt-Messwerte und Oberleitungsbussystem-Simulation demonstriert wie präzise der Ladezustand aber auch das Leistungsprofil eines Batterie-Oberleitungsbusses prognostiziert werden kann. Bei langen Prognosezeiten liegt der Schwachpunkt beim zeitlichen Versatz der prognostizierten Busleistungen, da die akkurate Abbildung des Verkehrs äußerst komplex ist und von außergewöhnlichen Verkehrssituationen (z. B. Verkehrsstaus) abhängig ist (vgl. Abschnitt 4.1). Um Einflüsse auf das Netzleitsystem zu untersuchen, werden drei Einflussfaktoren eingehend betrachtet, wobei die Standortgenauigkeit der Batterie-Oberleitungsbusse als auch der Sendetakt zur Übertragung der Messwerte die größten Einflussfaktoren darstellen (vgl. Abschnitt 4.2). Die Gütebestimmung der Netzzustandsprognose richtet sich ebenfalls nach dem Prognosehorizont, welcher im Abschnitt 4.3 variiert wird und möglichst minimal gehalten werden sollte, um die Güte zu maximieren. Abschließend liefert Abschnitt 4.4 eine Bewertung des vorgestellten Netzleitsystems.

Kapitel 5 führt eine innovative Planungsmethode von Oberleitungsbussystemen ein. Dafür wird die Herausforderung dieser Planung hervorgehoben, die darin besteht, die Auswahl der zu elektrifizierenden Abschnitte des jeweiligen Busliniennetzes zu determinieren, resultierend in einem maximalen fahrleitungsfreien Anteil eines Batterie-Oberleitungsbussystems bei Gewährleistung eines sicheren Oberleitungsbusbetriebes (vgl. Abschnitt 5.1). Zu diesem Zweck findet eine Einführung zweier divergenter Szenarien (Green-Field- und Brown-Field-Szenario) statt, die sich in ihrer Ausgangslage unterscheiden (vgl. Abschnitt 5.2). Um die Planungsmethode auszuführen, bedarf es für die Szenarien einer Datengrundlage, welche Verkehrsbetriebsinformationen, eine Straßendatenbank sowie ggf. eine nutzbare Bestandsinfrastruktur und bauliche Restriktionen beinhaltet. Das aus der Straßendatenbank resultierende Verkehrsnetz stellt einen digitalen Zwilling dar, sodass Batterie-/Oberleitungsbusse sich digital innerhalb dieses Verkehrsnetzes fortbewegen. Zusätzlich werden weitere planungsrelevante Eingabeparameter eingeführt, um aufbauend die kosteneffizienteste Lösung zu ermitteln (vgl. Abschnitt 5.3). Für eine Simulationsvalidierung sowie eine praktische Umsetzung ist die Einhaltung von technologischen Rahmenbedingungen obligatorisch. Dabei liegt der Fokus auf der Einhaltung der in der Norm definierten Spannungstoleranzen, der Kurzschlussstromerkennbarkeit sowie der Betriebsmittelüberlastungen (vgl. Abschnitt 5.4). Anschließend führt Abschnitt 5.5 die Planungsmethode ein. Nach einer Initialisierung, welche die Datengrundlage einliest und das Verkehrsnetz sowie ggf. das elektrische Netz aufbaut, findet konsekutiv eine Segmentierung und Bereichsdefinition des Verkehrsnetzes statt. Ein Segment beschreibt einen Straßenabschnitt zwischen zwei Bushaltestellen, sodass dieser in der folgenden Optimierungsaufgabe entweder mit oder ohne Fahrdracht ausgestattet wird – vorausgesetzt es bestehen keine baulichen Restriktionen. Ferner findet eine simulative Determinierung des Energiebedarfes sowie der potentiellen Energiezufuhr aller Batterie-/Oberleitungsbusse auf sämtlichen Segmenten statt, die in der nachfolgenden Optimierungsaufgabe Aufschluss über die Batterie-Ladezustände der Batterie-Oberleitungsbusse bei (Nicht-)Setzung einer Fahrleitung geben. In diesem Zuge werden weitere optimierungsrelevante Einflussfaktoren u. a. der minimale Busabstand determiniert, die bspw. Auswirkungen auf die Speiseweite der Gleichrichter-Unterwerke haben. Schließlich wird die Optimierungsaufgabe erläutert, welche die Infrastrukturinvestitionskosten für das zu planende Oberleitungsbussystem minimiert. Darin werden zwei Teilaspekte behandelt, sodass sich ein wirtschaftliches Optimum zwischen den Fahrleitungs- und den Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten einstellt. Innerhalb dieser Optimierung findet eine Validierung der ermittelten Lösung statt, sodass die zuvor eingeführten technologischen Rahmenbedingungen überprüft werden. Komplettiert wird die Validierung durch die Überprüfung des  $(n - 1)$ -Kriteriums. Die Planungsmethode wird im Abschnitt 5.6 innerhalb von zwei Fallstudien umfangreich angewendet, sodass die Optimierungsaufgabe sowohl auf einem Green-Field- als auch auf einem Brown-Field-Szenario angewandt wird. Nach einer Auswahl beispielhafter Städte dieser Fallstudien findet für jedes Szenario eine Generierung der Datengrundlage, die

Determinierung einer optimierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur und eine abschließende Validierung statt. Die Anwendung des Planungsverfahrens auf zwei unterschiedliche Fallstudien stellt somit die Praxistauglichkeit des vorgestellten Planungsverfahrens umfassend unter Beweis. Schließlich wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Infrastrukturinvestitionskosten ermittelt, wobei in dieser Untersuchung der limitierende Faktor die Batterie-Ladeleistung darstellt.

Der weitere Forschungsbedarf unterteilt sich ebenfalls in zwei Aspekte, welche in der *Betriebs-* als auch in der *Planungsebene* zu finden sind. Bezüglich der *Betriebsebene* gilt es den Verkehr (insbesondere außergewöhnliche Verkehrssituationen bspw. Verkehrsstaus) detailgetreuer abzubilden, um die Güte weiterhin zu steigern, sodass die aufbauende Netzzustandsregelung ebenfalls gezieltere Eingriffe durchführen kann. Eine Übertragbarkeitsuntersuchung auf unterschiedliche Bahnstromsysteme ist ebenfalls denkbar.

Die *Planungsebene* bietet hauptsächlich weiteren Forschungsbedarf in einer kombinierten Optimierung des Busumlaufplanes und der vorgestellten Planungsmethode. Die Planungsmethode erhält den zugrundeliegenden Busumlaufplan, optimiert diesen jedoch nicht, um ein wirtschaftliches Nutzen zu erzielen. Vor allem die Verschneidung von Buslinien bietet ein großes Potential zur Infrastrukturkostensparnis, da in diesem Fall der benötigte Fahrleitungsanteil weiter reduziert werden kann. Ebenfalls stellt die Thematik der Dimensionierung der Fahrzeugbatterie in Kombination mit der Infrastruktur weiteren Forschungsbedarf dar, da eine übergreifende Optimierung nicht nur die Infrastrukturinvestitionskosten, sondern auch die Fahrzeugkosten optimieren kann. Außerdem gilt es die Planungsmethode auf weitere elektrische Antriebskonzepte zu erweitern, um hybride Systeme (Batterie-Oberleitungsbusse mit Brennstoffzellenbussen und/oder Batteriebusen) abbilden und optimiert planen zu können. Ebenfalls besteht Forschungsbedarf unter Einbeziehung zukünftiger Technologie-Entwicklungen, sodass prognostiziert werden kann, wann ausreichende Batteriekapazitäten zur Verfügung stehen, um vollständig auf Fahrleitung zu verzichten.

## 7 Summary and Outlook

The developed planning method and the presented control system for trolleybus systems are innovative solution options for the electrification of the transport sector and thus part of the energy transition. Consequently, transport companies and associations are faced with the unprecedented challenge of making the existing bus fleet sustainable and low-emission. This challenge must be viewed in a differentiated manner, as heterogeneous initial situations are encountered. Consequently, different optimisation levels are considered. This thesis considers the optimisation of the *operation* and an innovative *planning* method for the (extension) construction of trolleybus systems (cf. section 1.1). While current real-time public transport monitoring systems are limited to the arrival times of moving buses, the focus of this work is on optimising the *operational level* is directed to the determination of the (future) electrical network state, which acts as part of the intelligent network control system. The *planning level* aspect extends the previous state of the art by determining the complete trolleybus system infrastructure from the perspective of minimal infrastructure investment costs (cf. section 1.2).

The heyday of trolleybus systems in Germany and the world ended with a significant increase in individual transport, steered by a transport policy paradigm shift favouring private cars starting in the 1960s. Consequently, a worldwide resignation was initiated (cf. section 2.1). The energy transition and the associated electrification of public transport means a renaissance of electric drive types, with technological progress enabling innovative concepts of energy supply and transport (cf. section 2.2). While focusing on battery trolleybuses, section 2.3 explains the electrical power supply of trolleybus systems by detailing the components relevant to this thesis. The use of existing trolleybus systems enables the investigation of the influence of novel network components and the impact of the integration of battery trolleybuses (cf. section 2.4). As a result, two main challenges arise. The *operation* of existing trolleybus systems can be optimised through a network control system. The integration of battery trolleybuses can be realised without supplementary trolleybus system expansion. In case of non-existing trolleybus system infrastructure or unavoidable expansion of the same, *planning* that considers both the advantages of technological progress and its restrictions, resulting in a - compared to conventional trolleybus systems - diminished trolleybus system infrastructure, is to be carried out (cf. section 2.5).

Chapter 3 consequently introduces an intelligent network control system for trolleybus systems. The concept of the network control system contains three essential components, whereby the network state identification and the network state prognosis are part of this work (cf. section 3.1). The network control system is based on an existing trolleybus system simulation, which is also adapted to generate pseudo-measurement values for a research-like test (cf. section 3.2). After the successful integration of (pseudo) measured values, the current network state of the trolleybus system is identified by checking all measured values for validity. In case of failed validity checks,

those are estimated. The main focus is on the measured value estimation of the (battery) trolleybuses, subdivided into bus position and bus power estimation (cf. section 3.3). Based on the current network state, a network state forecast is generated. While network components such as charging stations for electric vehicles or photovoltaic systems represent stationary electrical nodes, (battery) trolleybuses represent mobile, dynamic electrical nodes that act primarily as network loads and partially as feeders. Consequently, to forecast grid conditions, the future powers of the (battery) trolleybuses are mandatory. These are based on future bus positions, accompanied by the associated bus circulation schedules. In order to produce the most accurate network condition forecasts possible, the recording of any deviation from the bus circulation plan must be considered a prerequisite. After successful power forecasting of all components, the corresponding network state is determined for each time step. Finally, the concept for integrating the actuator commands is presented (cf. section 3.5).

The network control system was evaluated and validated in chapter 4 through a laboratory test. For this purpose, the primary laboratory test setup is described, and measured values of a test drive are integrated into the laboratory test. A comparison between test drive measured values and trolleybus system simulation demonstrates how precisely the state of charge but also the performance profile of a (battery) trolleybus can be predicted. The weak point is the time offset of the predicted bus performance with long prediction times. The accurate traffic mapping is highly complex and depends on exceptional traffic situations (e.g., traffic infarctions) (cf. section 4.1). In order to investigate influences on the network control system, three influencing factors were considered in detail, whereby the location accuracy of the battery trolleybuses and the transmission rate for the transmission of the measured values represent the more significant influencing factors (cf. section 4.2). The quality determination of the network state forecast also depends on the forecast horizon, which was varied in section 4.3 and should be kept as minimal as possible to maximise the quality. Finally, section 4.4 evaluates and suitability of the presented network control system.

Chapter 5 introduces an innovative planning method of trolleybus systems. For this purpose, the challenge of this planning is highlighted, which consists in determining the selection of the segments of the respective bus line network to be electrified, resulting in a maximum catenary-free share of a battery trolleybus system with a guarantee of a safe trolleybus operation (cf. section 5.1). For this purpose, an introduction of two divergent scenarios (green-field and brown-field scenarios), which differ in their initial situation, takes place (cf. section 5.2). In order to execute the planning method, a data basis is required for the scenarios, which includes traffic operation information, a road database and, if available, usable existing infrastructure and construction restrictions. The traffic network resulting from the road database represents a digital twin, so that (battery) trolleybuses move digitally within this traffic network. In addition, further planning-relevant input parameters are introduced to determine the most cost-efficient solution based on this (cf. section 5.3). For the simulation validation and the practical implementation,

compliance with technological framework conditions is mandatory. The focus is on compliance with the voltage tolerances defined in the standard, short-circuit current detectability and equipment overloads (cf. section 5.4). Section 5.5 then introduces the planning method. After initialisation, which reads the data basis and sets up the traffic network and, if available, the electrical network, a segmentation and area definition of the traffic network takes place consecutively. A segment describes a road section between two bus stops. This segment is equipped in the following optimisation task either with or without contact wire - provided that there are no constructional restrictions. Furthermore, a simulative determination of the energy demand, as well as a potential energy supply of all (battery) trolleybuses on all segments, takes place, which in the following optimisation task provides information about battery charge states of the (battery) trolleybuses in case of (non-)setting of an overhead contact line. In the course of this, other optimisation-relevant influencing factors are determined, e.g., the minimum bus spacing, which, for example, affects the feed width of the rectifier substations. Finally, the optimisation task is explained, which minimises the infrastructure investment costs for the trolleybus system to be planned. Two sub-aspects are addressed to achieve an economic optimum between the catenary and the rectifier substation investment costs. Within this optimisation, a validation of the determined solution takes place so that the previously introduced technological framework conditions are checked. The validation is completed by checking the (n-1) criterion. The planning method is extensively applied in section 5.6 within two case studies so that the optimisation task is applied to both a green-field and a brown-field scenario. After selecting exemplary cities in this case study, a generation of the data basis, the determination of an optimised trolleybus system infrastructure, and a final validation take place for each scenario. The application of the planning procedure to two different case studies thus comprehensively demonstrates the practical suitability of the planning procedure presented. Finally, the impact of various factors on infrastructure investment costs is determined, with the limiting factor in this study being battery charging capacity.

The further need for investigation is also divided into two aspects, which can be found in the *operational* and *planning levels*. Regarding the *operational level*, the traffic (in particular extraordinary traffic situations, e.g., traffic jams) must be better mapped to further increase the quality so that the network state control built up can also carry out more targeted interventions.

The *planning level* mainly offers the further need for investigation in a combined optimisation of the bus circulation plan and the presented planning method. The planning method preserves the underlying bus circulation plan but does not optimise it to achieve an economic benefit. Especially the intersection of bus routes offers excellent potential for infrastructure cost savings because, in this case, the required catenary can be further reduced. The topic of the dimensioning of the vehicle battery in combination with the infrastructure also represents a need for further research, since an overarching optimisation can not only optimise the infrastructure investment costs, but also the vehicle costs. In addition, the planning method must be extended to other electric drive

concepts to map hybrid systems (battery trolleybuses with fuel cell buses and/or battery buses) and plan them in an optimised manner. There is also a need to investigate future technology developments to predict when sufficient battery capacities will be available to dispense with overhead contact lines.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Europäischen Union:  
**Übereinkommen von Paris**  
Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, Belgien, 2016.
- [2] Europäische Kommission:  
**EUROPA 2020 - Eine Strategie für intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum**  
Mitteilung der Europäischen Kommission, Brüssel, Belgien, 2013.
- [3] Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt:  
**Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2019**  
Hintergrund, Dessau-Roßlau, 2020.
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU):  
**Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung**  
Berlin, 2016.
- [5] Umweltbundesamt:  
**Umweltfreundlich mobil!: Ein ökologischer Verkehrsartenvergleich für den Personen- und Güterverkehr in Deutschland**  
Dessau-Roßlau, 2021.
- [6] Statistisches Bundesamt (Destatis):  
**Unternehmen, Beförderte Personen, Beförderungsleistung, Fahrleistung, Beförderungsangebot (Personenverkehr m. Bussen u. Bahnen): Deutschland, Jahre, Tätigkeit der Unternehmen**  
[Online]: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=46181-0003&bypass=true&levelindex=0&levelid=1641199355144#abreadcrumb> (Zuletzt geprüft am: 23.03.2022).
- [7] NOW GmbH und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):  
**Energiewende im Verkehr im kommunalen Umfeld - Kopplung der Sektoren Verkehr und Strom für Kommunen, Stadtwerke, Verteilnetzbetreiber und Verkehrsunternehmen**  
Berlin, 2019.
- [8] M. Wagner:  
**Elektromobilität als Baustein der Energiewende - Chancen und Potentiale der**

- zukünftigen Individualmobilität in ausgesuchten Raum- und Siedlungsstrukturen**  
Dissertation, Technische Universität München, München, 2016.
- [9] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):  
**Etablierung der Nationalen Plattform Elektromobilität am 3. Mai 2010 -  
Gemeinsame Erklärung von Bundesregierung und deutscher Industrie**  
Berlin, 2010.
- [10] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE):  
**Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase**  
Berlin, 2018.
- [11] NOW GmbH und Universität Stuttgart:  
**Elektromobilität in Kommunen - Handlungsleitfaden: Bausteine zur Entwicklung  
kommunaler Strategien für Planer und Entscheidungsträger**  
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, 2014.
- [12] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen:  
**Marktuntersuchung Eisenbahnen 2019**  
Bonn, 2019.
- [13] M. Lehnert:  
**Energieversorgung und Betrieb eines Nahverkehrssystems mit on-board-Speicher  
und Nachladepunkten**  
Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2012.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU):  
**Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des  
Klimaschutzplans 2050**  
Berlin, 2019.
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB):  
**Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik**  
Ausgabe 2017, Berlin, 2017.
- [16] European Parliament and the Council of the European Union:  
**Directive 2019/1161 on the promotion of clean and energy-efficient road transport  
vehicles (Clean Vehicles Directive)**  
Brüssel, Straßburg, 2019.
- [17] Bundesgesetzblatt:  
**Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 zur  
Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und**

- energieeffizienter Straßenfahrzeuge sowie zur Änderung vergaberechtlicher Vorschriften**, Bonn, 2021.
- [18] European Parliament and the Council of the European Union:  
**Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge**  
Brüssel, Straßburg, 2019.
- [19] M. Abohat:  
**Real-World Simulation Model for Advanced Analyses and Developments of a Trolleybus System**  
Dissertation, Neue Energie aus Wuppertal, Wuppertal, Deutschland.
- [20] D. Baumeister, M. Salih, M. Wazifehdust, P. Steinbusch und M. Zdrallek:  
**Modelling and Simulation of a Public Transport System with Battery-Trolleybuses for an Efficient E-Mobility Integration**  
1st E-Mobility Power System Integration Symposium, Berlin, 2017.
- [21] M. Salih, M. Koch, D. Baumeister, M. Wazifehdust, P. Steinbusch und M. Zdrallek:  
**Adapted Newton-Raphson Power Flow Method for a DC Traction Network including Non-receptive Power Sources and Photovoltaic Systems**  
2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), pp. 1–5, Bukarest, 2019, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905722.
- [22] D. Baumeister, M. Salih, M. Wazifehdust, M. Koch, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour und C. Troullier:  
**Scenario Analyses of a Dynamic LVDC Smart-Trolleybus-Network with Battery-Assisted Traction Loads**  
3rd E-Mobility Power System Integration Symposium, Dublin, 2019.
- [23] M. Salih, D. Baumeister, M. Wazifehdust, M. Koch, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour und C. Troullier:  
**Optimized Positioning for Storage Systems in an LVDC Traction Grid with Non-Receptive Power Sources and Photovoltaic Systems**  
9th Solar & Storage Integration Workshop, Dublin, 2019.
- [24] M. Salih, D. Baumeister, M. Wazifehdust, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour, P. Deskovic und T. Küll:  
**Impact Assessment of Integrating Novel Battery-Trolleybuses, PV Units and EV Charging Stations in a DC Trolleybus Network**  
Proceedings of the 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium, Stockholm, Sweden (2018).

- [25] M. Wazifehdust, D. Baumeister, M. Salih, M. Koch, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour, C. Troullier, M. Wazifehdust, D. Baumeister, M. Salih, P. Steinbusch, M. Zdrallek, S. Mour und C. Troullier:  
**Potential Analysis for the Integration of Renewables and EV Charging Stations within a Novel LVDC Smart-Trolleybus Grid**  
25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019), Madrid, 2019, doi: 10.34890/653.
- [26] D. Baumeister, M. Salih, M. Wazifehdust, M. Koch, M. Zdrallek, P. Steinbusch, C. von Kalben, J.-O. Schumacher und J. O. Schumacher:  
**Power Control Model for Conventional and Battery Trolleybuses to Improve Voltage Profile in a DC Traction Network Simulation**  
International CIRED 2021 Conference, pp. 1231–1235, Virtual, 2021, doi: 10.1049/icp.2021.2029.
- [27] Y. Gao, S. Guo, J. Ren, Z. Zhao, A. Ehsan und Y. Zheng:  
**An Electric Bus Power Consumption Model and Optimization of Charging Scheduling Concerning Multi-External Factors**  
Energies, vol. 11, no. 8, p. 2060, 2018, doi: 10.3390/en11082060.
- [28] L. LI, S. You und C. Yang:  
**Multi-objective Stochastic MPC-based System Control Architecture for Plug-in Hybrid Electric Buses**  
IEEE Trans. Ind. Electron., p. 1, 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2547359.
- [29] L. LI, C. Yang, Y. Zhang, L. Zhang und J. Song:  
**Correctional DP-Based Energy Management Strategy of Plug-In Hybrid Electric Bus for City-Bus Route**  
IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 7, pp. 2792–2803, 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2352357.
- [30] N. A. El-Taweel und H. E. Z. Farag:  
**Incorporation of Battery Electric Buses in the Operation of Intercity Bus Services**  
2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Detroit, MI, USA, Jun. 2019 - Jun. 2019, pp. 1–6.
- [31] S. Stockar, V. Marano, M. Canova, G. Rizzoni und L. Guzzella:  
**Energy-Optimal Control of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Real-World Driving Cycles**  
IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 7, pp. 2949–2962, 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2158565.

- [32] Z. Gao, Z. Lin, T. J. LaClair, C. Liu, J.-M. Li, A. K. Birky und J. Ward:  
**Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service**  
Energy, vol. 122, pp. 588–600, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.01.101.
- [33] N. A. El-Taweel, A. Zidan und H. E. Z. Farag:  
**Novel Electric Bus Energy Consumption Model Based on Probabilistic Synthetic Speed Profile Integrated With HVAC**  
IEEE Trans. Intell. Transport. Syst., vol. 22, no. 3, pp. 1517–1531, 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.2971686.
- [34] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin und M. J. Barth:  
**Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions**  
Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 64, pp. 36–52, 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.08.008.
- [35] D. Baumeister, M. Salih, M. Wazifehdust, M. Zdrallek, C. von Kalben und J.-O. Schumacher:  
**Intelligent Trolleybus Guidance System with Short-Term Grid State Forecast**  
2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), pp. 1–6, Virtual, 2021, doi: 10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639967.
- [36] S. A. Saad, A. 'A. B. Hisham, M. H. I. Ishak, M. H. M. Fauzi, M. A. Baharudin und N. H. Idris:  
**Real-time on-campus public transportation monitoring system**  
2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA), Batu Feringghi, Mar. 2018 - Mar. 2018, pp. 215–220.
- [37] A. S. Hassan, C. E. Marmaras, N. Jenkins, L. M. Cipcigan und S. Xydias:  
**Electric Vehicle Load Forecasting using Data Mining Methods**  
Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013), London, UK, Nov. 2013, 10.1-10.1.
- [38] A. Luo, J. Yuan, F. Liang, Q. Yang und D. Mu:  
**Load Forecasting of Electric Vehicle Charging Station Based on Edge Computing**  
2020 IEEE 3rd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology (CCET), Beijing, China, Aug. 2020 - Aug. 2020, pp. 34–38.
- [39] D. Kodaira und J. Kondoh:  
**Probabilistic Forecasting Model for Non-normally Distributed EV Charging Demand**  
2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), Perth, Australia, Nov. 2020 - Nov. 2020, pp. 623–626.

- [40] C. Yong, J. YingDa, X. Gang, C. JiaJia, Q. DaYu und Z. XiMing:  
**Load forecasting of electric vehicles based on Monte Carlo method**  
2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), Harbin, China, Dec. 2020 - Dec. 2020, pp. 1203–1206.
- [41] H. Liu, Q. Li und F. Gao:  
**Traction Power System Model and Simulation for Estimation and Forecast of Traction Load**  
2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, Mar. 2010 - Mar. 2010, pp. 1–4.
- [42] W. Zi Yu, Z. Xing Dong und G. Hai Chun:  
**A Metro Traction Power Load Forecasting Model Based on Dynamic Passenger Flow**  
2021 IEEE 4th International Electrical 28.05.2021 - 30.05.2021, pp. 1–6.
- [43] Q. Ma, Y. Peng, P. Luo, Q. Li, J. Sun und H. Wang:  
**Electrified Railway Traction Load Prediction Based on Deep Learning**  
IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, Oct. 2020 - Oct. 2020, pp. 4679–4684.
- [44] Q. Ma, Y. Peng, P. Luo, Q. Li, H. Wang und J. Yu:  
**A Traction Load Forecasting Method of Electrified Railway Based on LSTM**  
2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), Nanjing, China, Nov. 2020 - Dec. 2020, pp. 2861–2866.
- [45] Y. Yuhang, L. Yingliang, M. Yao, X. Yingju und Y. Hao:  
**Training Data Selection for Short Term Load Forecasting**  
2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai, China, Jan. 2011 - Jan. 2011, pp. 1040–1043.
- [46] Y. Pang und H. Li:  
**Short-term harmonic forecasting and evaluation affected by electrified railways on the power grid based on stack auto encoder neural network method**  
2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Chengdu, Sep. 2017 - Sep. 2017, pp. 1071–1076.
- [47] A. A. Komyakov, V. V. Erbes und V. I. Ivanchenko:  
**Application of artificial neural networks for electric load forecasting on railway transport**  
2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, Italy, Jun. 2015 - Jun. 2015, pp. 43–46.

- [48] M. Wazifehdust:  
**Prädiktive Regelung und Optimierung eines Oberleitungsbussystems**  
Dissertation, Neue Energie aus Wuppertal, Band 51, Wuppertal, Deutschland, 2022.
- [49] M. Wazifehdust, D. Baumeister, M. Salih, P. Steinbusch, M. Zdrallek, C. von Kalben und C. Troullier:  
**Grid State Evaluation of a LVDC Traction Network: Methods for the Analysis of Forecast Data**  
International CIRED 2021 Conference, Virtual, 2021.
- [50] M. Wazifehdust, D. Baumeister, M. Salih, P. Steinbusch, M. Zdrallek, von Kalben C. und Schumacher J.-O.:  
**Predictive Flexibility Calculation for Battery-Trolleybuses**  
ETG-Kongress 2021: 18.-19. Mai 2021, Online, Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [51] M. Wazifehdust, D. Baumeister, M. Salih, M. Zdrallek, C. von Kalben und A. Dogge:  
**Modelbased Predictive Control System for Battery-Trolleybuses in a LVDC Traction Network**  
2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Brisbane, Australia, Dec. 2021 - Dec. 2021, pp. 1–5.
- [52] D. Baumeister, M. Wazifehdust, M. Salih, M. Zdrallek, C. von Kalben und J.-O. Schumacher:  
**Optimal Catenary Planning of Trolleybus Systems**  
ETG-Kongress 2021: 18.-19. Mai 2021, Online, Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2021, ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- [53] M. Xylia, S. Leduc, P. Patrizio, F. Kraxner und S. Silveira:  
**Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm**  
Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 78, pp. 183–200, 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.03.005.
- [54] K. Kivekas, J. Vepsalainen und K. Tammi:  
**Stochastic Driving Cycle Synthesis for Analyzing the Energy Consumption of a Battery Electric Bus**  
IEEE Access, vol. 6, pp. 55586–55598, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2871574.
- [55] C. Sasidharan, A. Ray und S. Das:  
**Selection of Charging Technology for Electric Bus Fleets in Intra-city Public Transport in India**  
2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), BANGALURU, India, Oct. 2019 - Oct. 2019, pp. 1–8.

- [56] P. Sadeghi-Barzani, A. Rajabi-Ghahnavieh und H. Kazemi-Karegar:  
**Optimal fast charging station placing and sizing**  
Applied Energy, vol. 125, pp. 289–299, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.077.
- [57] H. S. Hayajneh, M. N. Bani Salim, S. Bashetty und X. Zhang:  
**Optimal Planning of Battery-Powered Electric Vehicle Charging Station Networks**  
2019 IEEE Green Technologies Conference(GreenTech), Lafayette, LA, USA, Apr. 2019  
- Apr. 2019, pp. 1–4.
- [58] Y. Dong, S. Qian, J. Liu, L. Zhang und K. Zhang:  
**Optimal placement of charging stations for electric taxis in urban area with profit maximization**  
2016 17th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), Shanghai, China, May. 2016 - Jun. 2016, pp. 177–182.
- [59] F. Zinnari, S. Strada, M. Tanelli, S. Formentin und S. M. Savaresi:  
**Electrification Potential of Fuel-Based Vehicles and Optimal Placing of Charging Infrastructure: A Large-Scale Vehicle-Telematics Approach**  
IEEE Trans. Transp. Electrific., vol. 8, no. 1, pp. 466–479, 2022, doi:  
10.1109/TTE.2021.3114497.
- [60] L. Yang, W. Huang, C. Guo, D. Zhang, C. Xiang, X. Xi und F. Gu:  
**A Coordinating Model Between Electric Vehicle Charging Station Planning Based on Thermal Maps of Vehicle Flow Rates and Distribution Devices Planning**  
2021 International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS), Shanghai, China, May. 2021 - May. 2021, pp. 364–367.
- [61] A. Kunitz, R. Mendelevitch und D. Goehlich:  
**Electrification of a city bus network—An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems**  
International Journal of Sustainable Transportation, vol. 11, no. 10, pp. 707–720, 2017, doi: 10.1080/15568318.2017.1310962.
- [62] D. Grygar, L. Jánošíková, P. Jankovič und M. Koháni:  
**Kernel Search for Overhead Wires Network Planning for Battery-assisted Trolleybuses**  
Transportation Research Procedia, vol. 55, pp. 1266–1272, 2021, doi:  
10.1016/j.trpro.2021.07.109.
- [63] D. Grygar und M. Kohani:  
**Generalized Location-based Linear Model for Overhead Wires Network Planning**

- for Battery-assisted Trolleybuses**  
2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES),  
Budapest, Hungary, Jul. 2021 - Jul. 2021, 000029-000024.
- [64] Y. J. Jang, E. S. Suh und J. W. Kim:  
**System Architecture and Mathematical Models of Electric Transit Bus System Utilizing Wireless Power Transfer Technology**  
IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 2, pp. 495–506, 2016, doi:  
10.1109/JSYST.2014.2369485.
- [65] U. Kreutzer and E. Blocher:  
**Mit Strom auf die Straße - Von der Elektromote zum eHighway**  
[Online]: <https://new.siemens.com/de/de/unternehmen/konzern/geschichte/stories/mit-strom-auf-die-strasse.html> (Zuletzt geprüft am: 23.03.2022).
- [66] H. Schaden und G. Mackinger:  
**Positionspapier Trolleybus - Betreffend die EU-Verordnung zur Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge im Personenverkehr**  
Salzburg, Österreich, 2004.
- [67] C. Vana:  
**Der elektrische Antriebsstrang in Nahverkehrssystemen**  
Elektrotech. Inftech., vol. 123, no. 10, pp. 419–423, 2006, doi: 10.1007/s00502-006-0376-5.
- [68] W. Reinhardt:  
**Öffentlicher Personennahverkehr: Technik - rechtliche und betriebswirtschaftliche Grundlagen**  
1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, ISBN: 3834812684.
- [69] R. J. Buckley:  
**A study in the decline of the British street tramway industry in the twentieth century with special reference to South Yorkshire**  
Department of Economic and Social History, The University of Hull, 1987.
- [70] W. Brauer:  
**Trolleybus – ein umstrittenes Verkehrssystem: Am Obus scheiden sich die Geister / Weltweit Ausbau und Abbau**  
Fahrgastzeitung PRO BAHN Hessen, no. 70, 2008.
- [71] J. Spousta:  
**Trolleybus intermodal compendium**  
Centrum dopravního výzkumu Divize rozvoje dopravy (Transport Research Centre Transport Development Division), Brno, 2013, ISBN: 978-80-86502-50-2.

- [72] P. Stepanov:  
**Characteristics of construction and operation of trolleybus systems in the world**  
PKG, vol. 22, no. 3, pp. 64–72, 2019, doi: 10.4467/2543859XPKG.19.018.11284.
- [73] L. Kenning und J. Lehmann:  
**Obusse in Deutschland**  
Nordhorn, 2011, ISBN: 3933613310.
- [74] W. Stock:  
**Obus-Anlagen in Deutschland: Die Entwicklung der Oberleitungs-Omnibus-Betriebe im Deutschen Reich, in der Bundesrepublik Deutschland und in der Deutschen Demokratischen Republik seit 1930**  
Bielefeld: Busch, 1987, ISBN: 3-926882-00-X.
- [75] F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger:  
**Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV**  
Umweltforschung Heidelberg GmbH; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST); Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ), Heidelberg, Landshut, München, 2015.
- [76] H. Hondius:  
**E-Mobilität: Welche Rolle kann der Trolleybus spielen? Stand und Perspektiven eines unterschätzten Verkehrsmittels**  
Der Nahverkehr, 2018.
- [77] J. Görgler:  
**E-Busse: Die "Spannung" steigt**  
Busmagazin, vol. 2012, 09/2012, pp. 8–15, 2012.
- [78] M. Krail, T. Gnann, S. Funke, S. Körner, E. Fritz, A. Müller, H. Neumann, F. Bartels, M. Steude, M. Franke, J. Elger, M. Balsler, J. Hietzge, P. Strauß, H. Schäuble, C. Hocke, A. Stephan und R. Kayser:  
**Machbarkeit eines Hybridoberleitungsbusbetriebs – „Berlin-Spandau“**  
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; PTV Transport Consult GmbH; IFB Institut für Bahntechnik GmbH; Technische Universität Dresden, Karlsruhe, Dresden, 2019.
- [79] D. Vierling, J. Dworacek, H. Ben Zid und B. Schmuelling:  
**Smart trolley-bus systems: Why a presumed dead relic makes the difference to re-electrify public transportation**  
2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Piscataway, NJ: IEEE, 2016, 2016, pp. 1–6.

- [80] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):  
**Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS)**, Berlin, 2018.
- [81] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI):  
**Energie auf neuen Wegen: Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung**  
Berlin, 2018.
- [82] T. Otto und M. Kiepsch:  
**Untersuchung zur Einführung elektrisch betriebener Linienbusse in Sachsen-Anhalt unter besonderer Berücksichtigung von Emissionen und Wirtschaftlichkeit**  
VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH; NASA GmbH, Berlin, 2016.
- [83] M. Rohs:  
**E-Bus-Radar: Wie elektrisch ist der öffentliche Nahverkehr**  
PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Frankfurt am Main, 2020.
- [84] F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger:  
**Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen**  
Fokuspapier Kostenrechnung Hybrid-Oberleitungsbuss, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH; BELICON - Institut für Fahrzeugforschung; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 2015.
- [85] Mobilservice und EnergieSchweiz:  
**Der Trolleybus behauptet sich gegen den Dieselbus**  
Bern, 2003.
- [86] Hochschule Landshut, BELICON - Institut für Fahrzeugforschung und An-Instituts für angewandte Nutzfahrzeugforschung und Abgasanalytik:  
**Ökologischer und ökonomischer Vergleich der SWG-Busflotte in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung auf den Zeithorizonten „heute“ und „mittelfristig“**  
Stadtwerke Gießen AG (SWG), Gießen, 2018.
- [87] Persönliche Kommunikation: Jens Olaf Schumacher:  
**Fahrzeug- und Investitionskostenevaluierung für Oberleitungsbussysteme**  
Solingen, 2020.
- [88] Öko-Institut e.V., kcw GmbH und BHP Unternehmensberatung:  
**Innovative und systematische Ansätze für mehr Energieeffizienz im kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr: Handlungsleitfaden**  
FoPS-Forschungsvorhaben Nr. 70.908/2015, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, Hamburg, 2018.

- [89] Ž. Filipović:  
**Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung**  
5. Auflage, Berlin: Springer Vieweg, 2013, ISBN: 978-3-642-45226-0.
- [90] NOW GmbH:  
**Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV: Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte**  
Berlin, 2018.
- [91] T.-A. Fay:  
**Methodischer Technologievergleich von Systemkonzepten für die Elektrifizierung von Stadtbussen**  
Dissertation, Technische Universität Berlin, doi: 10.14279/depositonce-9065.
- [92] Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI:  
**E-Bus-Standard: Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse**  
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB),  
Dresden, 2017.
- [93] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven:  
**Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen**  
2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011, ISBN: 3834814121.
- [94] Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE und M-Five:  
**Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw**  
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Karlsruhe, 2017.
- [95] S. Methner:  
**Dimensionierung elektrischer Bahnsysteme mit mehrkriteriellen genetischen Algorithmen**  
Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011.
- [96] P. Schmidt:  
**Energieversorgung elektrischer Bahnen**  
1. Auflage, Berlin: Transpress, 1988, ISBN: 3-344-00250-3.
- [97] Deutsches Institut für Normung (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE):  
**DIN EN 50163 (VDE 0115-102): Speisespannungen von Bahnnetzen**  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2022.

- [98] Deutsches Institut für Normung (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE):  
**DIN EN 50502 (VDE 0115-502): Fahrzeuge – Elektrische Ausrüstung in O-Bussen – Sicherheitsanforderungen und Stromabnehmersystem**  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [99] R. W. A. de Doncker, B. Mortimer und A. H. O. Hinz:  
**Mittelspannungs-Gleichstrom gespeiste Unterwerke für Stadtbahnssysteme**  
RWTH Aachen University, 2018, doi: 10.18154/RWTH-2018-222899.
- [100] Deutsches Institut für Normung (DIN):  
**DIN 1319-1:1995-01: Grundlagen der Meßtechnik**  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1995.
- [101] R. Uhlig:  
**Nutzung der Ladeflexibilität zur optimalen Systemintegration von Elektrofahrzeugen**  
Dissertation, Neue Energie aus Wuppertal, Band 13, Wuppertal, Deutschland.
- [102] A. Mischke:  
**Vorlesungsskript zur Veranstaltung Vermessungskunde**  
Ruhr-Universität Bochum, 2022.
- [103] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR):  
**Bis auf den Meter genau: Navigation mit Galileo**  
Köln, 2018.
- [104] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler:  
**Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie**  
Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013, ISBN: 978-3-642-31985-3.
- [105] A. W. Kunith:  
**Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs**  
Dissertation, Technische Universität Berlin, Wiesbaden: Springer Fachmedien  
Wiesbaden, 2017, ISBN: 978-3-658-19346-1.
- [106] Umweltbundesamt (UBA):  
**Entwicklung der Luftqualität in Deutschland**  
Dessau-Roßlau, 2009.
- [107] U.-D. Choi, H.-K. Jeong und S.-K. Jeong:  
**Commercial operation of ultra low floor electric bus for Seoul city route**

- 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2012): Seoul, South Korea, 9 - 12 October 2012, Seoul, Korea (South), 2012, pp. 1128–1133.
- [108] E. Kahrmanovic und A. Khaligh:  
**Feasibility of installing additional battery pack on a conventional city transit bus to power the auxiliary loads and reduce the fuel consumption**  
2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2011): Chicago, Illinois, USA, 6 - 9 September 2011, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1–5.
- [109] R. Beekman und R. van den Hoed:  
**Operational demands as determining factor for electric bus charging infrastructure**  
6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016): 2-3 Nov. 2016, London, UK, 2016, 3 (6.)-3 (6.).
- [110] U. Langer:  
**Vergleichende Untersuchung der Energie-, Kosten- und Emissionsbilanz im öffentlichen Nahverkehr bei Einsatz von Oberleitungsbussen und Dieselnissen der Stadtwerke Solingen**  
Forschungsbericht der Fachhochschule Köln, Köln, 2004. Accessed: Mar. 23 2022  
[Online]: <https://web.archive.org/web/20070927141135/http://www.obus-ew.de/d301fh-koeln-forsch2.htm>
- [111] H. Pohlheim:  
**Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis**,  
Berlin: Springer, 2000, ISBN: 3540664130.
- [112] Deutsches Institut für Normung (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE):  
**DIN EN 50388 (VDE 0115-606): Bahnanwendungen - Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität**  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.
- [113] Deutsches Institut für Normung (DIN) und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE):  
**DIN EN 60349-1 (VDE 0115-400-1): Elektrische Zugförderung - Drehende elektrische Maschinen für Bahn- und Straßenfahrzeuge**  
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [114] F. Kiessling, R. Puschmann und A. Schmieder:  
**Fahrleitungen elektrischer Bahnen - Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb**  
5. Auflage, Hoboken: Wiley, 2014

- [Online]: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1708808##>, ISBN: 9783895784071.
- [115] Mercedes-Benz:  
**Der neue eCitaro: Technische Information.**  
[Online]: [https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-technical-brochures/images/content/regular-service-buses/ecitaro/ecitaro-08-19/de\\_TI\\_eCitaro\\_2019.pdf](https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-technical-brochures/images/content/regular-service-buses/ecitaro/ecitaro-08-19/de_TI_eCitaro_2019.pdf) (Zuletzt geprüft am: 23.03.2022).
- [116] G. Stegmaier:  
**Elektro-Bus Mercedes eCitaro G: Hier fährt die Feststoffbatterie in Serie**  
auto motor und sport, Komplementär-GmbH, Stuttgart, 11.07.2020  
[Online]: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/mercedes-ecitaro-g-feststoffbatterie-brennstoffzelle-range-extender/#:~:text=Ein%20Modul%20wiegt%20etwa%20450,0%2C11%20kWh%2Fkg.> (Zuletzt geprüft am: 23.03.2022).
- [117] S. Leichsenring:  
**Mercedes eCitaro mit 441-kWh-Festkörperakku schon im Einsatz**  
*Elektrisch angetriebener Stadtbus mit interessanter Hochtemperatur-Batterie*  
[Online]: <https://insideevs.de/news/537743/mercedes-ecitaro-festkorperakku-bjorn-nyland/> (Zuletzt geprüft am: 10.02.2022).
- [118] Kiepe Electric GmbH:  
**IMC500 / E-Bus mit In Motion Charging (IMC®).** Accessed: Feb. 10 2022  
[Online]: <https://kiepe.knorr-bremse.com/de/de/busse-und-e-mobilitaet/e-systeme/imc500-e-bus-mit-in-motion-charging-imc/>
- [119] M. Longo, W. Yaici, F. Foiadelli und M. Bottari:  
**Next Generation of Recharge Types for Electric Buses**  
2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, Nov. 2018 - Nov. 2018, pp. 1–6.
- [120] M. Bartłomiejczyk:  
**Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines**  
Electric Power Engineering (EPE) 2017, Kouty nad Densou, Czech Republic, 2017, doi: 10.1109/EPE.2017.7967239.
- [121] A. S. Tomar, B. Veenhuizen, L. Buning und B. Pyman:  
**Estimation of the Size of the Battery for Hybrid Electric Trolley Busses Using Backward Quasi-Static Modelling**  
Proceedings, vol. 2, no. 23, p. 1499, 2018, doi: 10.3390/proceedings2231499.

- [122] R. Faria, P. Marques, R. Garcia, P. Moura, F. Freire, J. Delgado und A. T. de Almeida:  
**Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective**  
Journal of Power Sources, vol. 262, pp. 169–177, 2014, doi:  
10.1016/j.jpowsour.2014.03.092.
- [123] E. Wood, M. Alexander und T. H. Bradley:  
**Investigation of battery end-of-life conditions for plug-in hybrid electric vehicles**  
Journal of Power Sources, vol. 196, no. 11, pp. 5147–5154, 2011, doi:  
10.1016/j.jpowsour.2011.02.025.
- [124] C. Heymans, S. B. Walker, S. B. Young und M. Fowler:  
**Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling**  
Energy Policy, vol. 71, pp. 22–30, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.04.016.
- [125] B. Williams und T. Lipman:  
**Analysis of the combined vehicle- and post-vehicle-use value of lithium-ion plug-in-vehicle propulsion batteries: Task 3, Second life applications and value of „traction“ lithium batteries**  
University of California, Berkeley, 2011.

## 9 Formelzeichen und Abkürzungen

### 9.1 Formelzeichen

#### Allgemeingültige Festlegungen

|                     |  |
|---------------------|--|
| $[x]$ ,             | $x$ wird aufgerundet                           |
| $\forall$           | Für alle Elemente                              |
| $\subseteq$         | Teilmenge                                      |
| $\cup$              | Vereinigungsmenge                              |
| $\in$               | Elementzeichen                                 |
| $\mathbb{N}$        | Menge der natürlichen Zahlen (exklusive 0)     |
| $x, X$              | Skalare Größe oder Menge                       |
| $\mathbf{x}$        | Vektor   |
| $\mathbf{X}$        | Matrix   |
| $col_i(\mathbf{X})$ | $i$ -te Spalte von Matrix $\mathbf{X}$         |
| $deg_G^+(v)$        | Ausgangsgrad des Knotens $v$ eines Graphen $G$ |
| $deg_G^-(v)$        | Eingangsgrad des Knotens $v$ eines Graphen $G$ |
| $l(x)$              | Länge der Strecke $x$                          |
| $\max_m$            | $m$ -größten Elemente der nachfolgenden Menge  |
| $row_i(\mathbf{X})$ | $i$ -te Zeile von Matrix $\mathbf{X}$          |

#### Griechische Formelzeichen

|  |  |
|--|--|
| $\alpha$   | Zufälliger Winkel zur Pseudo-Messwert-Generierung                        |
| $\beta$  | Indexmenge   |
| $\gamma$   | Indexmenge   |
| $\eta_{\text{Bus}}$                              | Wirkungsgrad eines Batterie-/Oberleitungsbusses                          |
| $\lambda$  | Geographische Länge  |
| $\Delta\lambda$                                  | Toleranz geographische Länge   |
| $\lambda_i$                                      | Geographische Länge zum Zeitpunkt $t_i$                                  |
| $\lambda_{\text{Bus}} / \lambda_{\text{Bus } i}$ | Geographische Länge eines / des $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusses    |
| $\lambda'_{\text{Bus}}$                          | Geschätzte geographische Länge eines Batterie-/Oberleitungsbusses        |
| $\lambda_{\text{Bus Sim}}$                       | Simulierte geographische Länge eines Batterie-/Oberleitungsbusses        |
| $\lambda_{\text{Bus M}}$                         | (Pseudo-)Messwert geographische Länge eines Batterie-/Oberleitungsbusses |
| $\lambda_{\text{max}}$                           | Maximale geographische Länge eines betrachteten, validen Gebietes        |

|  |   |
|--|---|
| $\lambda_{\min}$                           | Minimale geographische Länge eines betrachteten, validen Gebietes         |
| $\mu$                                      | Erwartungswert  |
| $\rho$                                     | Spezifischer Widerstand   |
| $\rho_F$                                   | Spezifischer Widerstand   |
| $\sigma$                                   | Standardabweichung  |
| $\sigma^2$                                 | Varianz   |
| $\tau$                                     | Thermische Zeitkonstante  |
| $\phi$                                     | Geographische Breite  |
| $\Delta\phi$                               | Toleranz Geographische Breite   |
| $\phi_i$                                   | Geographische Breite zum Zeitpunkt $t_i$                                  |
| $\phi_{\text{Bus}} / \phi_{\text{Bus } i}$ | Geographische Breite eines / des $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusses    |
| $\phi'_{\text{Bus}}$                       | Geschätzte geographische Breite eines Batterie-/Oberleitungsbusses        |
| $\phi_{\text{Bus Sim}}$                    | Simulierte geographische Breite eines Batterie-/Oberleitungsbusses        |
| $\phi_{\text{Bus M}}$                      | (Pseudo-)Messwert geographische Breite eines Batterie-/Oberleitungsbusses |
| $\phi_{\text{Max}}$                        | Maximale geographische Breite eines betrachteten, validen Gebietes        |
| $\phi_{\text{Max}}$                        | Minimale geographische Breite eines betrachteten, validen Gebietes        |

### Lateinische Formelzeichen

|                        |   |
|------------------------|---|
| $a$                    | Menge zu untersuchender Planungsvarianten   |
| $a_L$                  | Element des Lösungskandidaten $A_L$   |
| $A_B / A_{B i}$        | (Teil-)Matrix: Anzahl der Batterie-/Oberleitungsbusse pro Segment und Zeitschritt |
| $A_F$                  | Fahrdrahtfläche   |
| $A_L$                  | Lösungskandidat   |
| $A_O / A_{O i}$        | Matrix: Anzahl der Oberleitungsbusse pro Segment und Zeitschritt                  |
| $a_{\text{Bus}}$       | Beschleunigung Batterie-/Oberleitungsbus  |
| $a_p$                  | Standortgenauigkeit   |
| $b_i$                  | Menge aller fahrenden Busse je (Typ-)Tag  |
| $b_{i j}$              | Mengen aller Buslinienstrecken je fahrenden Bus und je (Typ-)Tag                  |
| $b_{i j k}$            | Mengen mit Informationen je Buslinienstrecke, je fahrenden Bus und je (Typ-)Tag   |
| $b_{i j k \text{ BL}}$ | Element mit dem Inhalt „Buslinieninformation“ der Menge $b_{i j k}$               |
| $b_{i j k \text{ BT}}$ | Element mit dem Inhalt „Bustyp“ der Menge $b_{i j k}$                             |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $b_{i j k \text{ EH}}$ | Element mit dem Inhalt „End-Bushaltestelle“ der Menge $b_{i j k}$              |
| $b_{i j k \text{ EU}}$ | Element mit dem Inhalt „End-Uhrzeit“ der Menge $b_{i j k}$                     |
| $b_{i j k \text{ SH}}$ | Element mit dem Inhalt „Start-Bushaltestelle“ der Menge $b_{i j k}$            |
| $b_{i j k \text{ SU}}$ | Element mit dem Inhalt „Start-Uhrzeit“ der Menge $b_{i j k}$                   |
| $bat_i$                | Unter-Menge der Menge $BAT$ mit Informationen über Batteriekenndaten           |
| $bat_i \text{ EI}$     | Element mit dem Inhalt „Batterie-Energieinhalt“ der Menge $bat_i$              |
| $bat_i \text{ ID}$     | Element mit dem Inhalt „Batterietyp Batterieentladeleistung“ der Menge $bat_i$ |
| $bat_i \text{ Imax}$   | Element mit dem Inhalt „maximaler Batterieentladestrom“ der Menge $bat_i$      |
| $bat_i \text{ Imin}$   | Element mit dem Inhalt „maximaler Batterieentladestrom“ der Menge $bat_i$      |
| $bat_i \text{ Z}$      | Element mit dem Inhalt „Zellchemie“ der Menge $bat_i$                          |
| $bt_i$                 | Unter-Menge der Menge $BT$ mit Informationen über Busskenndaten                |
| $bt_i \text{ B}$       | Element mit dem Inhalt „Breite“ der Menge $bt_i$                               |
| $bt_i \text{ BatID}$   | Element mit dem Inhalt „Batterietyp“ der Menge $bt_i$                          |
| $bt_i \text{ Cmax}$    | Element mit dem Inhalt „maximale Kühlleistung“ der Menge $bt_i$                |
| $bt_i \text{ Gmax}$    | Element mit dem Inhalt „maximale Geschwindigkeit“ der Menge $bt_i$             |
| $bt_i \text{ H}$       | Element mit dem Inhalt „Höhe“ der Menge $bt_i$                                 |
| $bt_i \text{ Hmax}$    | Element mit dem Inhalt „maximale Heizleistung“ der Menge $bt_i$                |
| $bt_i \text{ L}$       | Element mit dem Inhalt „Länge“ der Menge $bt_i$                                |
| $bt_i \text{ Mmax}$    | Element mit dem Inhalt „zulässige Gesamtmasse“ der Menge $bt_i$                |
| $bt_i \text{ Mmin}$    | Element mit dem Inhalt „Leermasse“ der Menge $bt_i$                            |
| $bt_i \text{ Pmax}$    | Element mit dem Inhalt „maximale Motorleistung“ der Menge $bt_i$               |
| $bt_i \text{ RR}$      | Element mit dem Inhalt „Rollreibungskoeffizient“ der Menge $bt_i$              |
| $B$                    | Menge aller (Typ-)Tage eines Busumlaufplanes                                   |
| $B_{\text{Bus } 1}$    | Validitätsbedingung 1 für Batterie-/Oberleitungsbusse                          |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $B_{\text{Bus } 2}$   | Validitätsbedingung 2 für Batterie-/Oberleitungsbusse  |
| $B_{\text{Bus } 3}$   | Validitätsbedingung 3 für Batterie-/Oberleitungsbusse  |
| $BAT$                 | Menge aller Busbatterietypen   |
| $BT$                  | Menge aller Bustypen   |
| $c$                   | Spez. Wärmekapazität   |
| $d$                   | Distanz  |
| $d_B$                 | Kürzeste Distanz zwischen einem Blatt und einem Gleichrichter-Unterwerk                                |
| $D_B$                 | Matrix mit den Elementen $d_B$   |
| $d_{\text{GUW } i,j}$ | Kürzester Pfad zwischen Knoten $i$ und $j$   |
| $D_{\text{GUW}}$      | Matrix mit den Elementen $d_{\text{GUW } i,j}$   |
| $e_{EA i}$            | Unter-Menge der Menge $E_{EA}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines elektrischen Zweiges |
| $e_{EA i f}$          | Element mit dem Inhalt „Elektrische Startknotennummer“ der Menge $e_{EA i}$                            |
| $e_{EA i I}$          | Element mit dem Inhalt „Maximal zulässiger Strom“ der Menge $e_{EA i}$                                 |
| $e_{EA i L}$          | Element mit dem Inhalt „Zweiglänge“ der Menge $e_{EA i}$   |
| $e_{EA i R}$          | Element mit dem Inhalt „Widerstandsbelag“ der Menge $e_{EA i}$   |
| $e_{EA i t}$          | Element mit dem Inhalt „Elektrische Endknotennummer“ der Menge $e_{EA i}$                              |
| $e_{EA i Z}$          | Element mit dem Inhalt „Elektrische Zonenzugehörigkeit“ der Menge $e_{EA i}$                           |
| $e_{SA i}$            | Unter-Menge der Menge $E_{SA}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Verkehrszweiges      |
| $e_{SA i ef}$         | Element mit dem Inhalt „Startknotennummer des elektrischen Netzes“ der Menge $e_{SA i}$                |
| $e_{SA i et}$         | Element mit dem Inhalt „Endknotennummer des elektrischen Netzes“ der Menge $e_{SA i}$                  |
| $e_{SA i f}$          | Element mit dem Inhalt „Startknotennummer des Verkehrsnetzes“ der Menge $e_{SA i}$                     |
| $e_{SA i G}$          | Element mit dem Inhalt „maximal zulässige Geschwindigkeit“ der Menge $e_{SA i}$                        |
| $e_{SA i L}$          | Element mit dem Inhalt „Verkehrszweiglänge“ des elektrischen Netzes“ der Menge $e_{SA i}$              |
| $e_{SA i R}$          | Element mit dem Inhalt „Restriktion“ des elektrischen Netzes“ der Menge $e_{SA i}$                     |
| $e_{SA i t}$          | Element mit dem Inhalt „Endknotennummer des Verkehrsnetzes“ der Menge $e_{SA i}$                       |

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| $e_{SA i V}$                        | Element mit dem Inhalt „Hauptverkehrszeiten“ der Menge $e_{SA i}$   |
| $E_{Bus Bat EOL}$                   | End of Life (EOL) Batterienettokapazität eines Batterie-Oberleitungsbusses  |
| $E_E$                               | Menge aller elektrischen Zweige   |
| $E_{EA}$                            | Menge zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der elektrischen Knoten   |
| $E_S$                               | Menge aller Verkehrszweige  |
| $E_{SA}$                            | Menge zur Beschreibung zusätzlicher Attribute der Verkehrsknoten  |
| $f_{Bus Bat R} / f_{Bus Bat R}$     | Prozentuale Reserve der Batterie eines/sämtlicher Batterie-Oberleitungsbusses für die Planung von Oberleitungsbussystemen |
| $f_{Bus Bat SoC} / f_{Bus Bat SoC}$ | Start-SoC der Batterie eines/sämtlicher Batterie-Oberleitungsbusses für die Planung von Oberleitungsbussystemen           |
| $f_{I rel}$                         | Relativer Stromfehler   |
| $f_P$                               | Leistungs-Toleranzfaktor  |
| $f_{Speise}$                        | Speisefaktor  |
| $f_U$                               | Spannungs-Toleranzfaktor  |
| $f_{U rel}$                         | Relativer Spannungsfehler   |
| $g$                                 | Gewichtungsfaktor   |
| $g_K$                               | Genauigkeitsklasse  |
| $G$                                 | Eigenabweichung   |
| $G_E$                               | Ungerichteter Graph des elektrischen Netzes   |
| $G_L$                               | Lösungsgraph  |
| $G_S$                               | Gerichteter Graph des Verkehrsnetzes  |
| $GZF$                               | Gleichzeitigkeitsfaktor   |
| $GZF_B$                             | Gleichzeitigkeitsfaktor Batterie-Oberleitungsbuss   |
| $GZF_O$                             | Gleichzeitigkeitsfaktor Oberleitungsbuss  |
| $H$                                 | Höhe  |
| $Hm_{\pm}$                          | Absolute Höhenmeter   |
| $Hm_{+}$                            | Höhenmeter (ausschließlich positive Topografiedifferenzen)  |
| $i$                                 | Laufvariable  |
| $\tilde{i}_k$                       | Prognostizierter Stromwert durch den elektrischen Zweig $k$   |
| $i_{k d FD}$                        | Dauerstromtragfähigkeit des elektrischen Zweiges $k$  |
| $i_{k ref}$                         | Referenzwert des Stroms durch den elektrischen Zweig $k$  |
| $I_A$                               | Abschaltstrom   |
| $I_{B max}$                         | Maximaler Betriebsstrom   |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $I_{\text{Bus Bat}}$         | (Potentieller) Batterieladestrom eines Batterie-Oberleitungsbusses   |
| $I_{\text{Bus max}}$         | Maximaler Betriebsstrom eines Batterie-/Oberleitungsbusses   |
| $I_{\text{Bus T}}$           | Erforderlicher Strom für die Fortbewegung eines Batterie-Oberleitungsbusses (Traktionsstrom)   |
| $I_{\text{D max}}$           | Maximaler Stromtransfer von der Fahrleitung in den Bus während der Fahrt   |
| $I_{\text{K min}}$           | Minimaler Kurzschlussstrom   |
| $I_{\text{S max}}$           | Maximal zulässiger Stromtransfer von der Fahrleitung in den Bus während des Stillstandes   |
| $I_{\text{Speise max}}$      | Maximal zulässiger Strom der Speiseleitung   |
| $j$                          | Laufvariable   |
| $k$                          | Laufvariable   |
| $\bar{k}_{\text{AW}}$        | Stückkosten Auslaufweiche  |
| $\bar{k}_{\text{EW}}$        | Stückkosten Einlaufweiche  |
| $\bar{k}_{\text{F1}}$        | Spez. Investitionskosten einer einspurigen Fahrleitung   |
| $\bar{k}_{\text{F2}}$        | Spez. Investitionskosten einer zweispurigen Fahrleitung  |
| $\bar{k}_{\text{F}\Delta}$   | Spez. Investitionskosten einer zusätzlicher Spur einer Fahrleitung   |
| $\bar{k}_{\text{GUW}}$       | Spez. Investitionskosten eines Gleichrichter-Unterwerkes   |
| $\bar{k}_{\text{K}}$         | Stückkosten Kreuzungen   |
| $k_{\text{SMA}}$             | Anzahl an aufeinanderfolgenden Datenpunkte, dessen arithmetischer Mittelwert gebildet werden soll  |
| $K_{\text{Bus v}}$           | Validitätskonsequenz für Batterie-/Oberleitungsbusse   |
| $l$                          | Laufvariable   |
| $l_{\text{Speise}}$          | Leitungslänge der Speiseleitung  |
| $l_{\text{Speise max } i,j}$ | Maximale Leitungslänge der Speiseleitung eines Gleichrichter-Unterwerkes mit $i$ -seitiger Speisung und $j$ Batterie-/Oberleitungsbussen |
| $L$                          | Menge aller Buslinien  |
| $LB$                         | Menge aller nach Buslinienanzahl gruppierten streckengewichteten Längen  |
| $L_{\text{max}}$             | Maximale Speiselänge   |
| $m$                          | Laufvariable   |
| $m_{\text{C}}$               | Fahrdrahtmasse   |
| $m_{\text{E EV } i}$         | Unter-Menge der Menge $M_{\text{E EV}}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung einer Ladesäule für Elektrofahrzeuge                |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $m_{E\ EV\ i\ LP}$           | Element mit dem Inhalt „Anzahl Ladepunkte“ der Menge $m_{E\ EV\ i}$   |
| $m_{E\ EV\ i\ P}$            | Element mit dem Inhalt „Maximale Ladeleistung“ der Menge $m_{E\ EV\ i}$   |
| $m_{E\ GUW\ i}$              | Unter-Menge der Menge $M_{E\ GUW}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Gleichrichter-Unterwerkes                         |
| $m_{E\ GUW\ i\ MS}$          | Element mit dem Inhalt „Zugehörige elektrische Knotennummer des vorgelagerten Mittelspannungsnetzes“ der Menge $m_{E\ GUW\ i}$          |
| $m_{E\ GUW\ G\ i}$           | Unter-Menge der Menge $M_{E\ GUW\ G}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Gleichrichters eines Gleichrichter-Unterwerkes |
| $m_{E\ GUW\ G\ i\ B}$        | Element mit dem Inhalt „Bidirektionalität“ der Menge $m_{E\ GUW\ G\ i}$   |
| $m_{E\ GUW\ G\ i\ I}$        | Element mit dem Inhalt „Maximal zulässiger Strom“ der Menge $m_{E\ GUW\ i}$   |
| $m_{E\ GUW\ G\ i\ ID}$       | Element mit dem Inhalt „Identifikationsnummer des Gleichrichtertyps“ der Menge $m_{E\ GUW\ i}$  |
| $m_{E\ GUW\ T\ i}$           | Unter-Menge der Menge $M_{E\ GUW\ T}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Transformators eines Gleichrichter-Unterwerkes |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ MS}$       | Element mit dem Inhalt „Spannungsniveau auf der Mittelspannungsseite“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$                                      |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ NS}$       | Element mit dem Inhalt „Spannungsniveau auf der Niederspannungsseite“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$                                      |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ P}$        | Element mit dem Inhalt „Nennleistung“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$  |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ SA}$       | Element mit dem Inhalt „Schrittzahl“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$   |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ SW}$       | Element mit dem Inhalt „Schrittweite“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$  |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ ID}$       | Element mit dem Inhalt „Identifikationsnummer des Transformatortyps“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$                                       |
| $m_{E\ GUW\ T\ i\ \ddot{U}}$ | Element mit dem Inhalt „Übersetzungsverhältnis“ der Menge $m_{E\ GUW\ T\ i}$  |
| $m_{E\ PV\ i}$               | Unter-Menge der Menge $M_{E\ PV}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung einer Photovoltaik-Anlage                                |
| $m_{E\ PV\ i\ Al}$           | Element mit dem Inhalt „geographische Höhe“ der Menge $m_{E\ PV\ i}$  |
| $m_{E\ PV\ i\ Az}$           | Element mit dem Inhalt „Azimut“ der Menge $m_{E\ PV\ i}$  |
| $m_{E\ PV\ i\ ID}$           | Element mit dem Inhalt „Identifikationsnummer“ der Menge $m_{E\ PV\ i}$   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $m_{E PV i P}$     | Element mit dem Inhalt „Peakleistung“ der Menge $m_{E PV i}$  |
| $m_{E SP i}$       | Unter-Menge der Menge $M_{E SP}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines stat. Speichersystems |
| $m_{E SP i E}$     | Element mit dem Inhalt „Nutzbarer Energieinhalt“ der Menge $m_{E SP i}$                                   |
| $m_{E SP i I max}$ | Element mit dem Inhalt „Maximal zulässiger Strom“ der Menge $m_{E SP i}$                                  |
| $m_{E SP i I min}$ | Element mit dem Inhalt „Minimal zulässiger Strom“ der Menge $m_{E SP i}$                                  |
| $m_{E SP i U max}$ | Element mit dem Inhalt „Maximal zulässige Spannung“ der Menge $m_{E SP i}$                                |
| $m_{E SP i U min}$ | Element mit dem Inhalt „Minimal zulässige Spannung“ der Menge $m_{E SP i}$                                |
| $m_{E T i}$        | Unter-Menge der Menge $M_{E T}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Streckentrenners       |
| $m_{E T i F}$      | Element mit dem Inhalt „Fernauslösefähigkeit“ der Menge $m_{E T i}$                                       |
| $m_{E T i ID}$     | Element mit dem Inhalt „Identifikationsnummer“ der Menge $m_{E T i}$                                      |
| $m_{E T i SS}$     | Element mit dem Inhalt „Schalterstellung“ der Menge $m_{E T i}$   |
| $M_B$              | Menge aller Bereiche eines Verkehrsnetzes   |
| $M_{E EV}$         | Menge aller Ladesäulen für Elektrofahrzeuge   |
| $M_{E GUW}$        | Menge aller Gleichrichter-Unterwerke  |
| $M_{E GUW G}$      | Menge aller Gleichrichtertypen der Gleichrichter-Unterwerke   |
| $M_{E GUW T}$      | Menge aller Transformatortypen der Gleichrichter-Unterwerke   |
| $M_{E PV}$         | Menge aller Photovoltaik-Anlagen  |
| $M_{E SP}$         | Menge aller stat. Speichersysteme   |
| $M_{E T}$          | Menge aller Streckentrenner   |
| $n$                | Laufvariable  |
| $n_b$              | Kardinalität der Menge $b_i$  |
| $n_B$              | Kardinalität der Menge $B$  |
| $n_{BAT}$          | Kardinalität der Menge $BAT$  |
| $n_{Bus}$          | Zonenspezifische Batterie-/Oberleitungsbusanzahl  |
| $n_{BS}$           | Kardinalität der Menge $b_{i j}$  |
| $n_{BT}$           | Kardinalität der Menge $BT$   |
| $n_E$              | Kardinalität der Menge $V_E$  |
| $n_{EE}$           | Kardinalität der Menge $E_E$  |
| $n_{ES}$           | Kardinalität der Menge $E_S$  |

|                  |   |
|------------------|---|
| $n_{E EV}$       | Kardinalität der Menge $M_{E EV}$   |
| $n_{E GUW}$      | Kardinalität der Menge $M_{E GUW}$  |
| $n_{E GUW G}$    | Kardinalität der Menge $M_{E GUW G}$  |
| $n_{E GUW T}$    | Kardinalität der Menge $M_{E GUW T}$  |
| $n_{Komp}$       | Anzahl Oberleitungsbussystem-Komponenten  |
| $n_{E PV}$       | Kardinalität der Menge $M_{E PV}$   |
| $n_{E SP}$       | Kardinalität der Menge $M_{E SP}$   |
| $n_{E T}$        | Kardinalität der Menge $M_{E T}$  |
| $n_{GUW}$        | Anzahl Gleichrichter-Unterwerke   |
| $n_{GUW k \min}$ | Minimale, erforderliche, aufgerundete Gleichrichter-Unterwerksanzahl für Zone $k$             |
| $n_K$            | Buslinienkombinationsanzahl   |
| $n_L$            | Kardinalität der Menge $L$  |
| $n_{MB}$         | Kardinalität der Menge $M_B$  |
| $n_p$            | Kardinalität der Menge $p_i$  |
| $n_P$            | Kardinalität der Menge $P$  |
| $n_S$            | Kardinalität der Menge $S$  |
| $n_{SB}$         | Kardinalität der Menge $SB$   |
| $n_{SMA}$        | Anzahl aller Datenpunkte einer gleitenden, arithmetischen Mittelwertbildung                   |
| $n_{Sz}$         | Maximal mögliche Planungsvariantenanzahl  |
| $n_{Sz k}$       | Maximale Kombinationsanzahl von Planungsvarianten je Betrachtung von $k$ Buslinien            |
| $n_{VS}$         | Kardinalität der Menge $V_S$  |
| $n_{Sa}$         | Maximale segmentspezifische Busspuranzahl   |
| $n_Z$            | Elektrische Zonenanzahl eines Oberleitungsbussystems  |
| $N_{GUW}$        | Anzahl Gleichrichter-Unterwerke   |
| $N_S$            | Energieeintrag durch die Sonne  |
| $o$              | Oberer Grenzwert der Optimierungsaufgabe  |
| $p_A$            | Wahrscheinlichkeit für die Erzeugung von Messwert-Ausreißern                                  |
| $p_i$            | Unter-Menge von $P$ mit Informationen bezüglich des <i>paths</i>                              |
| $p_{i BH}$       | Unter-Menge von $p_i$ mit dem Inhalt aller Bushaltestellen zwischen $p_{i SH}$ und $p_{i EH}$ |
| $p_{i BH k}$     | $k$ -tes Element entspricht $k$ -te Bushaltestelle der Menge $p_{i BK}$                       |
| $p_{i BL}$       | Element mit dem Inhalt „Buslinie“ der Menge $p_i$   |
| $p_{i BL}$       | Element mit dem Inhalt „Buslinie“ der Menge $p_i$   |

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| $p_{i\text{EH}}$                     | Element mit dem Inhalt „End-Bushaltestelle“ der Menge $p_i$   |
| $p_{i\text{L}}$                      | Element mit dem Inhalt „Streckenlänge“ der Menge $p_i$  |
| $p_{i\text{SH}}$                     | Element mit dem Inhalt „Start-Bushaltestelle“ der Menge $p_i$   |
| $p_{\text{L}}$                       | Wahrscheinlichkeit für das Löschen von Messwerten   |
| $p_{\text{SMA},i}$                   | Messpunkte einer gleitenden, arithmetischen Mittelwertbildung   |
| $P$                                  | Menger aller <i>paths</i>   |
| $P_{\text{Bus}} / P_{\text{Bus } i}$ | Leistungsmesswert oder -bedarf eines / des $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse |
| $P_{\text{EV } i}$                   | Leistungsmesswert der $i$ -ten Ladesäule für Elektrofahrzeuge   |
| $P_{\text{Bus Bat}}$                 | (Potentielle) Batterieladeleistung eines Batterie-/Oberleitungsbusses   |
| $P_{\text{Bus max k}}$               | Maximale konsumierende Leistung eines Batterie-/Oberleitungsbusses  |
| $P_{\text{Bus max r}}$               | Maximale Batterie-/Oberleitungsbusrückspeiseleistung  |
| $P_{\text{GUW}}$                     | Leistungsbedarf eines Gleichrichter-Unterwerks  |
| $P_{\text{GUW r}}$                   | Gleichrichter-Unterwerksbemessungsleistung  |
| $P_{\text{IV}}$                      | Verlustleistung der Infrastruktur (Oberleitungsnetz)  |
| $PL$                                 | Menge aller streckengewichteten Längen sämtlicher Planungsvarianten   |
| $P_{\text{Sys}}$                     | Leistungsbedarf des Oberleitungsbussystems  |
| $PV$                                 | Menge ausgewählter und zu untersuchender Planungsvarianten  |
| $q$                                  | Fahrleitungsquerschnitt   |
| $R_{\text{F}}$                       | Widerstand der Fahrleitung  |
| $R'_{\text{F}}$                      | Widerstandsbelag der Fahrleitung  |
| $R'_{\text{Speise}}$                 | Widerstandsbelag der Speiseleitung  |
| $\Delta s$                           | Minimaler Batterie-/Oberleitungsbusabstand  |
| $\Delta s_{\text{Bus max}}$          | Maximale Distanz zwischen zweier Batterie-/Oberleitungsbuspositionsmessungen  |
| $\Delta s_{\text{Bus M}}$            | Distanz zwischen zweier valider oder geschätzten Batterie-/Oberleitungsbuspositionsmessungen                        |
| $S$                                  | Menge aller Segmente eines Bereichs   |
| $SB$                                 | Menge aller Segmente aller Bereiche   |
| $SMA$                                | Gleitender, arithmetischer Mittelwert   |
| $soc$                                | Element der Ladezustandsmatrix <b>SOC</b>   |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| <b>SOC</b>                        | Ladezustandsmatrix   |
| $SOC_{EV}$                        | Ladezustand des angeschlossenen Elektrofahrzeuges einer Ladesäule für Elektrofahrzeuge |
| $t$                               | Zeitschritt  |
| $\Delta t$                        | Zeitdifferenz  |
| $\Delta t_{Sim}$                  | Simulierte Schrittweite  |
| $t_0$                             | Betrachteter Zeitpunkt   |
| $t_1$                             | Betrachteter Zeitpunkt mit $t_1 > t_0$   |
| $t_2$                             | Betrachteter Zeitpunkt mit $t_2 > t_1$   |
| $t_a$                             | Zeitpunkt des aktuellen Messwertes   |
| $t_B$                             | Belastungsdauer  |
| $t_{BUP}$                         | Geplante Uhrzeit laut Busumlaufplan  |
| $\Delta t_{EV} / \Delta t_{EV i}$ | Ausstehende Ladedauer einer / der $i$ -ten Ladesäule für Elektrofahrzeuge              |
| $t_{max}$                         | Zeitpunkt des maximalen System-Leistungsbedarfs  |
| $t_{M n}$                         | Uhrzeit des $n$ -ten Messwertes  |
| $t_S$                             | Standzeit eines Batterie-/Oberleitungsbusses   |
| $t_{V n} / t_{V n-1}$             | Berechnete Verzögerung zum Busumlaufplan zum Zeitpunkt/Messwert $n$ bzw. $n - 1$       |
| $T$                               | Fahrdrahttemperaturanstieg   |
| $T_1$                             | Fahrdrahttemperatur unmittelbar vor Auftreten eines Stromes                            |
| $T_A$                             | Aktorbefehl-Generierungszeit   |
| $T_H$                             | Zeithorizont der Simulation  |
| $T_{Init}$                        | Initialisierungszeit   |
| $T_m$                             | Stationäre Fahrdrahttemperatur nach Auftreten eines Stromes                            |
| $T_{Prog}$                        | Prognosezeit   |
| $T_{Sim}$                         | Simulationsdauer   |
| $T_U$                             | Umgebungstemperatur  |
| $u$                               | Unterer Grenzwert der Optimierungsaufgabe  |
| $\tilde{u}_i$                     | Prognostizierter Spannungswert am elektrischen Knoten $i$                              |
| $u_{i ref}$                       | Referenzwert der Spannung am elektrischen Knoten $i$                                   |
| $U_B$                             | Batterie-/Oberleitungsbussspannung   |
| $U_{Bus} / U_{Bus i}$             | Spannungsmesswert eines / des $i$ -ten Batterie-/Oberleitungsbusses                    |
| $U_{EV i}$                        | Spannungsmesswert der $i$ -ten Ladesäule für Elektrofahrzeuge                          |
| $U_{GUW}$                         | Gleichrichter-Unterwerksspannung   |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $\Delta U_{\text{lim}}$      | Limitierender Spannungsabfall   |
| $U_{\text{min}}$             | Untere Toleranz des Nennspannungsbereiches  |
| $U_{\text{min} 1}$           | Niedrigste nichtpermanente Dauerspannung  |
| $U_{\text{min} 2}$           | Niedrigste Dauerspannung  |
| $\Delta U_{\text{max}}$      | Maximal auftretender Spannungsabfall  |
| $U_{\text{max} 1}$           | Höchste Dauerspannung   |
| $U_{\text{max} 2}$           | Höchste nichtpermanente Spannung  |
| $U_{\text{n}}$               | Nennspannung (des Oberleitungsbussystems)   |
| $U_{\text{n MS}}$            | Nennspannung des Mittelspannungsnetzes  |
| $v_{\text{Bus}}$             | Geschwindigkeit eines Batterie-/Oberleitungsbusses  |
| $v_{\text{Bus max}}$         | Maximale Geschwindigkeit eines Batterie-/Oberleitungsbusses   |
| $v_{\text{E}}$               | Element der Menge $V_{\text{E}}$  |
| $v_{\text{EA } i}$           | Unter-Menge der Menge $V_{\text{EA}}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines elektrischen Knotens |
| $v_{\text{EA } i A}$         | Element mit dem Inhalt „Art des elektrischen Knotens“ der Menge $v_{\text{EA } i}$                            |
| $v_{\text{EA } i \text{ID}}$ | Element mit dem Inhalt „elektrische Knotennummer“ der Menge $v_{\text{EA } i}$                                |
| $v_{\text{EA } i \text{N}}$  | Element mit dem Inhalt „Name des elektrischen Knotens“ der Menge $v_{\text{EA } i}$                           |
| $v_{\text{EA } i x}$         | Element mit dem Inhalt „x-Koordinate“ der Menge $v_{\text{EA } i}$  |
| $v_{\text{EA } i y}$         | Element mit dem Inhalt „y-Koordinate“ der Menge $v_{\text{EA } i}$  |
| $v_{\text{L}}$               | Element des Graphen $V_{\text{L}}$  |
| $v_{\text{L B}}$             | Blätter des Graphen $V_{\text{L}}$  |
| $v_{\text{S}}$               | Element der Menge $V_{\text{S}}$  |
| $v_{\text{SA } i}$           | Unter-Menge der Menge $V_{\text{SA}}$ mit zusätzlichen Attributen zur Beschreibung eines Verkehrsknotens      |
| $v_{\text{SA } i A}$         | Element mit dem Inhalt „Verkehrsknotenart“ der Menge $v_{\text{SA } i}$                                       |
| $v_{\text{SA } i e}$         | Element mit dem Inhalt „zugehörige Knotennummer des elektrischen Netzes“ der Menge $v_{\text{SA } i}$         |
| $v_{\text{SA } i \text{ID}}$ | Element mit dem Inhalt „Verkehrsknotennummer“ der Menge $v_{\text{SA } i}$                                    |
| $v_{\text{SA } i \text{N}}$  | Element mit dem Inhalt „Bushaltestellenname“ der Menge $v_{\text{SA } i}$                                     |
| $v_{\text{SA } i \text{R}}$  | Element mit dem Inhalt „Restriktion“ der Menge $v_{\text{SA } i}$   |
| $v_{\text{SA } i x}$         | Element mit dem Inhalt „x-Koordinate“ der Menge $v_{\text{SA } i}$  |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $v_{SA i y}$          | Element mit dem Inhalt „y-Koordinate“ der Menge $v_{SA i}$   |
| $v_{SA i z}$          | Element mit dem Inhalt „z-Koordinate“ der Menge $v_{SA i}$   |
| $V_E$                 | Menge aller elektrischen Knoten  |
| $V_{EA}$              | Unter-Menge der Menge $V_E$ mit Attributen der elektrischen Knoten   |
| $V_S$                 | Menge aller Verkehrsknoten   |
| $V_{SA}$              | Unter-Menge der Menge $V_S$ mit Verkehrsknotenattribute  |
| $W_{Bus}$             | Energiebedarf eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse  |
| $\bar{W}_{Bus}$       | Spezifischer Energiebedarf eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse   |
| $W_{Bus Bat}$         | (Potentielle) Busbatterie-Energiezufuhr eines Batterie-Oberleitungsbusses  |
| $\bar{W}_{Bus, NV}$   | Spezifischer Nebenverbrauchenergiebedarf eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse                                 |
| $\bar{W}_{Bus NV HC}$ | Spezifischer Heizungs- und Klimatisierungsenergiebedarf eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse                  |
| $\bar{W}_{Bus NV wN}$ | Spezifischer Energiebedarf weiterer Nebenverbraucher (z. B. Beleuchtung) eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse |
| $\bar{W}_{Bus T}$     | Spezifischer Traktionsenergiebedarf eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse                                      |
| $\bar{W}_{Bus, V}$    | Spezifische Energieverluste eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse  |
| $W_{EV}$              | Energiebedarf der Elektromobilität   |
| $W_{IV}$              | Energieverluste der Infrastruktur (Oberleitungsnetz)   |
| $W_{SK}$              | Energiebedarf der neuartigen Systemkomponenten (Photovoltaik und Elektromobilität)   |
| $W_{PV}$              | Energieertrag einer Photovoltaikanlage/ mehrerer Photovoltaikanlagen   |
| $W_{Sys}$             | System-Energiebedarf   |
| $x_{n-1}$             | Anwendung des $(n - 1)$ -Kriteriums  |
| $x_V$                 | Maximale An- und Abdrahtvorgänge je Umlauf und Buslinie  |
| $Y$                   | Fahrleistung eines Batterie-/Oberleitungsbusses/ aller Batterie-/Oberleitungsbusse   |

$z$ 

z-Wert

## 9.2 Abkürzungen und Akronyme

|       |  |
|-------|--|
| AC    | Alternating Current                            |
| BOB   | Batterie-Oberleitungs-Bus                      |
| CVD   | Clean Vehicles Directive                       |
| DC    | Direct Current                                 |
| DIN   | Deutsches Institut für Normung                 |
| EN    | Europäische Norm                               |
| EOL   | End of Life                                    |
| EU    | Europäische Union                              |
| EVI   | Energieversorgungsinfrastruktur                |
| GPS   | Global Positioning System                      |
| HiL   | Hardware in the Loop                           |
| IMC   | In Motion Charging                             |
| KAIST | Korea Advanced Institute of Technology         |
| KPI   | Key Performance Indicator                      |
| LTO   | Lithium-Titanat (engl. lithium-titanium-oxide) |
| MKS   | Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie            |
| ÖPNV  | Öffentlicher Personennahverkehr                |
| Pkw   | Personenkraftwagen                             |
| Stat. | Stationär                                      |
| VDV   | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen          |



## 10 Anhang

### 10.1 Datengrundlage: Weitere nutzbare Bestandsinfrastruktur

Im Nachfolgenden werden weiterführende Informationen für die elektrischen Knotenarten aufgeführt:

**Gleichrichter-Unterwerke** werden durch die Menge  $M_{E\text{ G UW}}$  beschrieben. Die Kardinalität der Menge der Gleichrichter-Unterwerke beschreibt  $n_{E\text{ G UW}} = |M_{E\text{ G UW}}|$ .

$$M_{E\text{ G UW}} = \{m_{E\text{ G UW } 1}, m_{E\text{ G UW } 2}, \dots, m_{E\text{ G UW } n} \mid n = n_{E\text{ G UW}}\} \quad (10.1)$$

Jedes Gleichrichter-Unterwerk enthält zusätzlich zur elektrischen Knotennummer  $m_{E\text{ i ID}}$  Informationen über die zugehörige elektrische Knotennummer des vorgelagerten Mittelspannungsnetzes  $m_{E\text{ G UW } i\text{ MS}}$ , des zugehörigen Transformatortyps  $m_{E\text{ G UW } i\text{ T ID}}$  sowie des zugehörigen Gleichrichtertyps  $m_{E\text{ G UW } i\text{ G ID}}$ .

$$m_{E\text{ G UW } i} = \{m_{E\text{ G UW } i\text{ ID}}, m_{E\text{ G UW } i\text{ MS}}, m_{E\text{ G UW } i\text{ T ID}}, \\ m_{E\text{ G UW } i\text{ G ID}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{ G UW}}\}\} \quad (10.2)$$

Dabei stellt  $M_{E\text{ G UW T}}$  die Menge aller **Transformatortypen** dar, wobei die Kardinalität der Menge der Transformatortypen durch  $n_{E\text{ G UW T}} = |M_{E\text{ G UW T}}|$  gegeben ist.

$$M_{E\text{ G UW T}} = \{m_{E\text{ G UW T } 1}, m_{E\text{ G UW T } 2}, \dots, m_{E\text{ G UW T } n} \mid n = n_{E\text{ G UW T}}\} \quad (10.3)$$

Die Untermengen  $m_{E\text{ G UW T } i}$  erhalten neben  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ ID}}$  Informationen über das Übersetzungsverhältnis  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ Ü}}$ , die Ausführung des Stufenschalters des Transformators (Stufenanzahl  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ SA}}$  und Schrittweite  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ SW}}$ ), die Spannungsniveaus auf Mittelspannungs- und Oberleitungsbussystemseite ( $m_{E\text{ G UW T } i\text{ MS}}$  und  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ NS}}$ ) sowie die Nennleistung  $m_{E\text{ G UW T } i\text{ P}}$ .

$$m_{E\text{ G UW T } i} = \{m_{E\text{ G UW T } i\text{ ID}}, m_{E\text{ G UW T } i\text{ Ü}}, m_{E\text{ G UW T } i\text{ SA}}, m_{E\text{ G UW T } i\text{ SW}}, \\ m_{E\text{ G UW T } i\text{ MS}}, m_{E\text{ G UW T } i\text{ NS}}, m_{E\text{ G UW T } i\text{ P}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{ G UW T}}\}\} \quad (10.4)$$

Äquivalent zu den Transformatoren besitzen die Gleichrichter-Unterwerke **Gleichrichter**, deren Menge durch  $N_{E\text{ G UW G}}$  abgebildet wird. Die Kardinalität beträgt  $n_{E\text{ G UW G}} = |M_{E\text{ G UW G}}|$ .

$$M_{E\text{ G UW G}} = \{m_{E\text{ G UW G } 1}, m_{E\text{ G UW G } 2}, \dots, m_{E\text{ G UW G } n} \\ \mid n = n_{E\text{ G UW G}}\} \quad (10.5)$$

Zugehörige Untermengen  $m_{E\text{GUW}Gi}$  besitzen neben  $m_{E\text{GUW}Gi\text{ID}}$  Informationen über den maximalen zulässigen Betriebsstrom  $m_{E\text{GUW}Gi\text{I}}$  und der Bidirektionalität  $m_{E\text{GUW}Gi\text{B}}$  des Gleichrichters.

$$m_{E\text{GUW}Gi} = \{m_{E\text{GUW}Gi\text{ID}}, m_{E\text{GUW}Gi\text{I}}, m_{E\text{GUW}Gi\text{B}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{GUW}G}\}\} \quad (10.6)$$

Die Menge der **Photovoltaikanlagen** ist anhand von  $M_{E\text{PV}}$  beschrieben, wobei die Kardinalität der Menge der Photovoltaikanlagen durch  $n_{E\text{PV}} = |M_{E\text{PV}}|$  gegeben ist.

$$M_{E\text{PV}} = \{m_{E\text{PV}1}, m_{E\text{PV}2}, m_{E\text{PV}3}, \dots, m_{E\text{PV}n} \mid n = n_{E\text{PV}}\} \quad (10.7)$$

Photovoltaikanlagen besitzen neben der bereits beschriebenen einzigartigen elektrischen Knotennummer  $m_{Ei\text{ID}}$  Informationen über die Peakleistung  $m_{E\text{PV}i\text{P}}$ , geographische Höhe  $m_{E\text{PV}i\text{Al}}$  und zugehöriges Azimut  $m_{E\text{PV}i\text{Az}}$ .

$$m_{E\text{PV}i} = \{m_{Ei\text{ID}}, m_{E\text{PV}i\text{P}}, m_{E\text{PV}i\text{Al}}, m_{E\text{PV}i\text{Az}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{PV}}\}\} \quad (10.8)$$

Darüber hinaus bildet  $M_{E\text{EV}}$  die Menge aller Ladestationen für Elektrofahrzeuge ab, wobei  $n_{E\text{EV}} = |M_{E\text{EV}}|$  die Kardinalität dieser Menge beschreibt.

$$M_{E\text{EV}} = \{m_{E\text{EV}1}, m_{E\text{EV}2}, m_{E\text{EV}3}, \dots, m_{E\text{EV}n} \mid n = n_{E\text{EV}}\} \quad (10.9)$$

**Ladestationen für Elektrofahrzeuge** besitzen zusätzlich zur einzigartigen elektrischen Knotennummer  $m_{Ei\text{ID}}$  Informationen über die Anzahl der Ladepunkte  $m_{E\text{EV}i\text{LP}}$  sowie die zugehörigen Spitzenleistungen der Ladepunkte  $m_{E\text{EV}i\text{P}}$ .

$$m_{E\text{EV}i} = \{m_{Ei\text{ID}}, m_{E\text{EV}i\text{LP}}, m_{E\text{EV}i\text{P}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{EV}}\}\} \quad (10.10)$$

**Streckentrenner** stellen Knoten im elektrischen Netz dar, die das Oberleitungsnetz je nach Schalterstellung elektrisch voneinander ent- bzw. koppeln können und werden durch die Menge  $N_{E\text{T}}$  repräsentiert. Die Kardinalität dieser Menge beträgt  $n_{E\text{T}} = |N_{E\text{T}}|$  beträgt.

$$N_{E\text{T}} = \{m_{E\text{T}1}, m_{E\text{T}2}, m_{E\text{T}3}, \dots, m_{E\text{T}i} \mid n = n_{E\text{T}}\} \quad (10.11)$$

Attribute der Streckentrenner sind neben der einzigartigen elektrischen Knotennummer  $n_{Ei\text{ID}}$  die Schalterstellung  $n_{E\text{T}i\text{SS}}$  sowie die Fernauslösefähigkeit  $n_{E\text{T}i\text{F}}$ .

$$m_{E\text{T}i} = \{m_{Ei\text{ID}}, m_{E\text{T}i\text{SS}}, m_{E\text{T}i\text{F}} \mid i \in \{1, 2, \dots, n_{E\text{T}}\}\} \quad (10.12)$$

## 10.2 Weitere planungsrelevante Eingabeparameter

Für die nachfolgende optimierte Planung eines Oberleitungsbussystems sind weitere Eingabeparameter (Tabelle 10-1) erforderlich.

**Tabelle 10-1: Planungsrelevante Eingabeparameter**

| Eingabeparameter  |   | Einheit  | Formelzeichen      |                     |
|---|---|--|--------------------|---------------------|
| Investitionskosten                                      | Fahrleitung                             | einspurig  | €/km               | $\bar{k}_{F1}$      |
|   |   | zweispurig   | €/km               | $\bar{k}_{F2}$      |
|   |   | je weiterer Spur   | €/km               | $\bar{k}_{F\Delta}$ |
|   | Weichen                                 | Auslaufweiche  | €/Stk.             | $\bar{k}_{AW}$      |
|   |   | Einlaufweiche  | €/Stk.             | $\bar{k}_{EW}$      |
|   |   | Kreuzungen   | €/Stk.             | $\bar{k}_K$         |
| Gleichrichter-<br>Unterwerk                             | komplett                                | €/MW   | $\bar{k}_{GUW}$    |                     |
| Elektrotechnische<br>Eingabe-<br>Parameter              | Spannungssystem                         | Nennspannung   | V                  | $U_n$               |
|   |   | Speisefaktor   |                    | $f_{Speise}$        |
|   | Fahrleitung                             | Spez. elektr. Widerstand   | $\Omega/\text{km}$ | $R'_F$              |
|   | Stromtransfer<br>(Fahrleitung<br>→ Bus) | Maximaler Strom während<br>der Fahrt<br>(Dauerstombelastbarkeit) | A                  | $I_{D\max}$         |
|   |   | Maximaler Strom<br>(Stillstand)                                  | A                  | $I_{S\max}$         |
|   | Gleichrichter-<br>Unterwerk             | Transformatorleistung  | kVA                | $P_{GUW}$           |
|   | Einspeisung                             | Leitungslänge  | m                  | $l_{Speise}$        |
|   |   | Maximaler Strom  | A                  | $I_{Speise\max}$    |
|   |   | Spez. elektr. Widerstand   | $\Omega/\text{km}$ | $R'_{Speise}$       |
|   | $(n - 1)$ -Kriterium                    |  |                    | $x_{n-1}$           |
| Batterie-<br>Oberleitungsbusse                          | SoC-Reserve                             |  |                    | $f_{Bus\ Bat\ R}$   |
|   | Start-SoC (am Betriebshof)              |  |                    | $f_{Bus\ Bat\ SoC}$ |
|   | EOL-Batterienettkapazität               |  | kWh                | $E_{Bus\ Bat\ EOL}$ |
| Maximale An- und Abdrahtvorgänge je Umlauf und Buslinie |   |  |                    | $x_V$               |

Obligatorisch sind Eingabeparameter bezüglich der Investitionskosten (Fahrleitung und Gleichrichter-Unterwerke), da die optimierte Planung eines Oberleitungsbussystems die Minimierung der Investitionskosten als Zielvorgabe besitzt. Während die Fahrleitungs-Investitionskosten abhängig von der Spuranzahl sind, sind die Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten  $\bar{k}_{GUW}$  abhängig von der ausgewählten Transformatorleistung.

Weitere Gleichrichter-Unterwerksinvestitionskosten durch beispielsweise Grundstückskosten werden im vorherigen Wert direkt berücksichtigt.

Darüber hinaus sind weitere elektrotechnische Eingabeparameter bezüglich des Spannungssystems (Nennspannung und Speisefaktor) notwendig, resultierend in  $U_{\min}$ ,  $U_{\max 1}$ ,  $U_{\max 2}$  und  $U_{GUW}$  (siehe Abschnitte 2.3.2 f.). Informationen über die zu planende Fahrleitung (spez. elektrischer Widerstand) sowie Informationen über den maximalen Stromtransfer von der Fahrleitung in den Bus beeinflussen nachfolgend die technologischen Rahmenbedingungen (Abschnitt 5.4) und den Energietransfer in den Batterie-Oberleitungsbus. Während der Fahrt werden beim Energietransfer Leistungen von bis zu 500 kW von der Oberleitungsinfrastruktur in den Batterie-Oberleitungsbus realisiert [119–121]. Der Leistungsbezug reduziert sich, aufgrund thermischer Belastungen, deutlich im Stillstand und wird in der Planungsmethode entsprechend berücksichtigt.

Der SoC-Reservefaktor  $f_{\text{BUS Bat R}}$  beschreibt für jeden Batterie-Oberleitungsbus einen definierten minimalen Busbatterie-Ladezustand am Ende sämtlicher Segmente über den gesamten Simulationshorizont, den ein Batterie-Oberleitungsbus bei der Planung nicht unterschreiten darf. Darüber hinaus kann mittels des Initial-Ladezustandes  $f_{\text{BUS Bat SoC}}$  der Ladezustand sämtlicher Batterie-Oberleitungsbusse bei Verlassen des Busdepots angegeben werden.

Ebenso wird die Batterienettokapazität der Batterie-Oberleitungsbusse zum Zeitpunkt des End of Life (EOL) benötigt, welche im Automotive-Bereich zwischen ca. 70 % und 80 % der Anfangs-Batterienettokapazität entspricht [122–125]. Zur Maximierung der Lebensdauer wird selbst bei neuer Batterie eine Anfangs-Batterienettokapazität von beispielsweise 75 % der Anfangs-Batteriebruttokapazität verwendet. Da die Planung eines Oberleitungssystems ein Worstcase-Szenario abbildet, darf nicht die Anfangs-Batterienettokapazität in die Planungsmethode einfließen. Stattdessen wird, wie in Abbildung 10-1 gezeigt, eine Restkapazität ermittelt. Dabei gilt es wiederum zwischen Restbrutto- und Restnettokapazität zu unterscheiden. Eine nach Alterung angenommene Restkapazität von 80 % der der Anfangs-Batterienettokapazität entspricht unter Berücksichtigung des Sicherheitspuffers und der nicht nutzbaren Kapazität lediglich 60 % der Anfangs-Batteriebruttokapazität. Dieser Wert wird als EOL-Batterienettokapazität definiert.

Darüber hinaus findet in der nachfolgenden Optimierung eine Positionierung der notwendigen Gleichrichter-Unterwerke statt. Dafür werden automatisiert Speiseleitungen mit der Länge  $l_{\text{Speise}}$  mit zugehörigen Eigenschaften (spez. elektrischer Widerstand und maximaler Strom) platziert.

Standardmäßig wird das  $(n - 1)$ -Kriterium bei der optimierten Planung angewandt, welches jedoch ebenfalls bei Bedarf deselektiert werden kann. Abschließend können die maximale An- und Abdrahtvorgänge je Umlauf und Buslinie übermittelt werden.

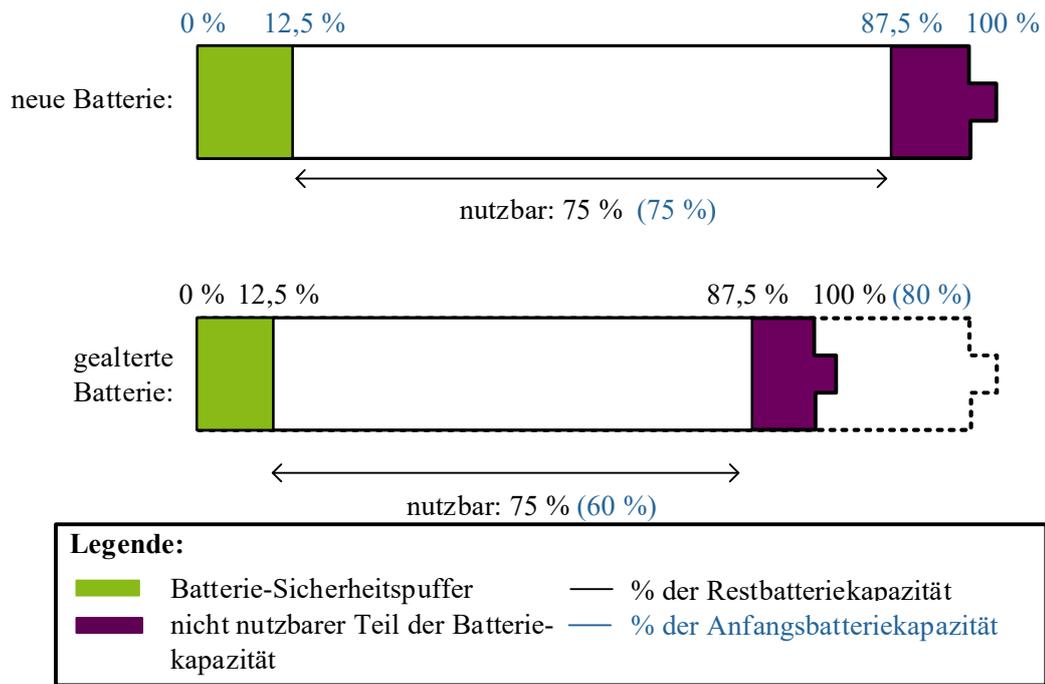


Abbildung 10-1: Batteriedimensionierung

Eine weitere Annahme betrifft Querkupplungen, welche in der nachfolgenden Planungsmethode unter der Prämisse einer optimierten Oberleitungsbussystem-Infrastruktur automatisiert an Bushaltestellen gesetzt werden.

### Exemplarische Infrastruktur-Investitionskosten

Im Folgenden findet ein Fokus auf die Infrastruktur-Investitionskosten statt. Neben derzeit ebenfalls höheren Fahrzeug-Investitionskosten (siehe Abbildung 2-3), sind die Infrastrukturkosten bei Oberleistungsbussystem deutlich höher als bei anderen Buskonzepten, weshalb eine Optimierung der Infrastrukturinvestitionskosten mit Ausnutzung möglicher Synergien signifikante Einsparungen erzielt [84].

Tabelle 10-2 zeigt einen Überblick über Infrastrukturinvestitionskosten für Batteriebuskonzepte. Die Oberleitungsinvestitionskosten besitzen dabei unterschiedliche Abhängigkeiten. Bei beispielsweise deutlich reduziertem Mastabstand in Kurven, steigen die Oberleitungsinvestitionskosten dementsprechend an. Die aufgeführten Werte bilden dabei Richtwerte und können bei lokalen Gegebenheiten merklich abweichen. Der leistungsbezogene Orientierungswert für den Neubau eines Gleichrichter-Unterwerkes, einschließlich Transformator und Gleichrichter, beträgt bis zu 600.000 €/MW. Zusätzlich können Grunderwerbskosten von ca. 60.000 € pro Unterwerk entstehen [78].

Je nach Buskonzept sind Ladepunkte am Betriebshof und auf den Buslinien notwendig. Dabei bestimmt die verfügbare Ladeleistung die Investitionskosten des Ladepunktes. Langsamladepunkte (< 60 kW) sind mit ca. 15.900 €/Stk. deutlich kostengünstiger als

Schnellladepunkte mit einer Ladeleistung von 300 kW, die zwischen 250.000 €/Stk. und 400.000 €/Stk. für die Neuerrichtung kosten.

**Tabelle 10-2: Infrastrukturinvestitionskosten für Batteriebuskonzepte [66, 75, 78, 84, 87]**

| Infrastruktur  |                               | Spez. Kosten                      |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|
| Oberleitung  | einspurig                     | 266.000 €/km                      |
|  | zweispurig                    | 350.000 €/km bis 500.000 €/km     |
|  | Kosten je weiterer<br>Busspur | 200.000 €/km                      |
|  | Querkupplung                  | 900 €/Stk.                        |
|  | Streckentrenner               | 5.000 €/Stk.                      |
|  | Einlaufweiche                 | 3.000 €/Stk.                      |
|  | Auslaufweiche                 | 5.000 €/Stk.                      |
|  | Kreuzung                      | 5.000 €/Stk.                      |
| Gleichrichter-Unterwerk  |                               | 430.000 €/MW bis 600.000 €/MW     |
| Langsamladepunkt < 60 kW<br>(für Batterie-Oberleitungsbusse<br>und Gelegenheitslader am Betriebshof) |                               | 15.900 €/Stk.                     |
| Quer   |                               | 29.000 €/Stk. bis 36.000 €/Stk.   |
| Schnellladepunkt 300 kW<br>(für Gelegenheitslader auf Busstrecken)                                   |                               | 250.000 €/Stk. bis 400.000 €/Stk. |

### 10.3 Energiebedarfsrelevante Einflussgrößen von Batterie-/Oberleitungsbusse

Mit der Umgebungstemperatur, der Masse sowie den buslinienspezifischen Höhenmetern (Topografie) werden im Folgenden drei essentielle Abhängigkeiten ausgeführt. Während Masse, buslinienspezifischen Höhenmetern und Umgebungstemperatur den größten Einfluss haben, können sich weitere Faktoren (wie z. B. Verkehrsdichte, Geschwindigkeitsbegrenzungen, maximal Motorleistung, Bushaltestellenabstand und Fahrweise) signifikant auf  $\bar{W}_{\text{BUS}}$  auswirken. In der verwendeten Oberleitungsbussystem-Simulation werden – bis auf die Fahrweise – alle Faktoren berücksichtigt.

Während die Umgebungstemperatur entscheidend  $\bar{W}_{\text{BUS NV HC}}$  beeinflusst, wirken sich die buslinienspezifischen Höhenmetern und die Masse direkt auf das Leistungsprofil eines Batterie-/Oberleitungsbusse ( $\bar{W}_{\text{BUS T}}$ ) aus. Als absolute Höhenmeter  $Hm_{\pm}$  wird gemäß Gleichung 10.13 die absolute Summe aller positiver sowie negativer Topografiedifferenzen betrachtet.

$$Hm_{\pm} = \sum_{i=2}^n |H(i) - H(i-1)|, \forall i: (i \in \mathbb{N} | 1 < i \leq n) \tag{10.13}$$

$Hm_{+}$  betrachtet dahingegen nur die Summe der positiven Topografiedifferenzen und wie ist folgt definiert:

$$Hm_{+} = \sum_{i=2}^n \frac{H(i) - H(i-1) + |H(i) - H(i-1)|}{2}, \forall i: (i \in \mathbb{N} | 1 < i \leq n) \tag{10.14}$$

Abbildung 10-2 zeigt eine simulative Abhängigkeit des spez. Verbrauches eines Batterie-/Oberleitungsbusses in Abhängigkeit von den drei erläuterten Einflussgrößen. Bezüglich der Höhenmeter existiert eine lineare Beziehung zwischen den zu überwindenden absoluten Höhenmetern und den resultierenden spez. Verbrauch. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf den spez. Verbrauch eines Batterie-/Oberleitungsbusses zeigt Abbildung 10-2, in dem für den gesamten Simulationshorizont ein Temperaturverlauf erstellt worden ist, welcher im arithmetischen Mittel die Temperatur auf der Abszisse darstellt. Der Heizungs- und Klimatisierungsbedarf wird maßgeblich von der Umgebungstemperatur und zeigt – ausgehend vom Minimum bei einer Umgebungstemperatur im Wohlfühlbereich bei ca. 20°C– bei Temperaturzu- sowie Temperaturabnahme eine deutliche Steigerung.

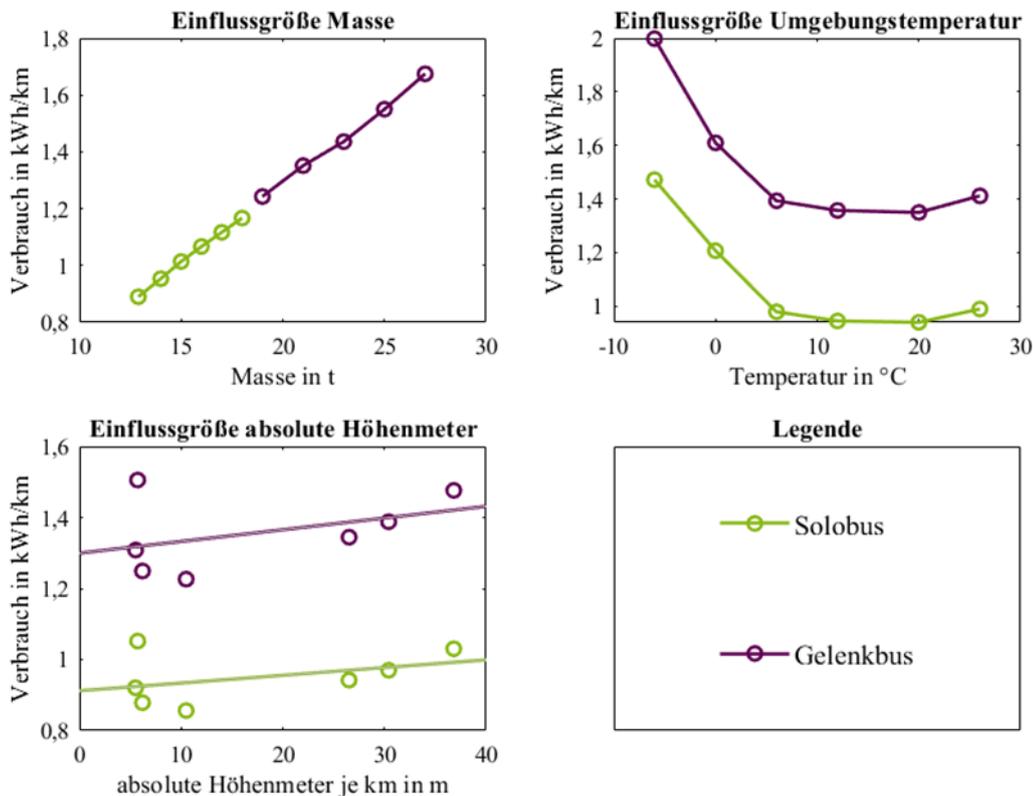


Abbildung 10-2: Simulative Abhängigkeit des spezifischen Verbrauches

Abbildung 10-3 zeigt einen summierten Tagesleistungsbedarf aller Batterie-/Oberleitungsbusse, indem die situationsbedingten Leistungsprofile addiert werden. Während der 15-Minuten-Leistungsmittelwert ausreichend ist, um den Gesamtenergiebedarfs aller Batterie-/Oberleitungsbusse zu bestimmen, lassen sich mit den sekundlichen Leistungswerten Leistungsspitzen und hohe Batterie-/Oberleitungsbusleistungen identifizieren.

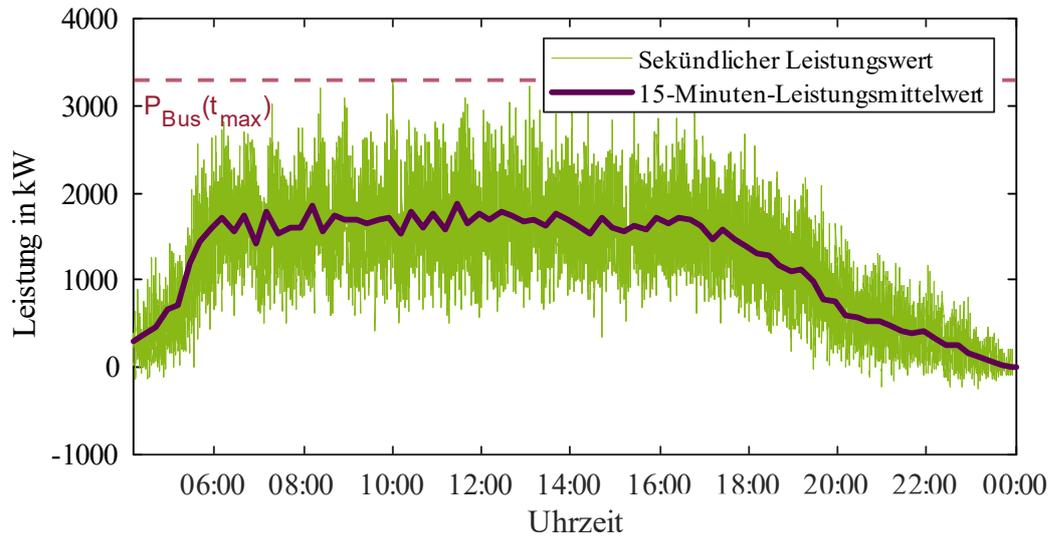


Abbildung 10-3: Simulativer, summierter Tages-Leistungsbedarf aller Batterie-/Oberleitungsbusse in einem Oberleitungsbusssystem

#### 10.4 Simulativer Energieertrag und –bedarf neuartiger Systemkomponenten sowie Infrastrukturverluste

Abbildung 10-4 veranschaulicht einen simulativen Energieertrag und -bedarf von  $W_{PV}$  und  $W_{EV}$ . Die simulativen Systemverluste komplettieren den Energiebedarf.

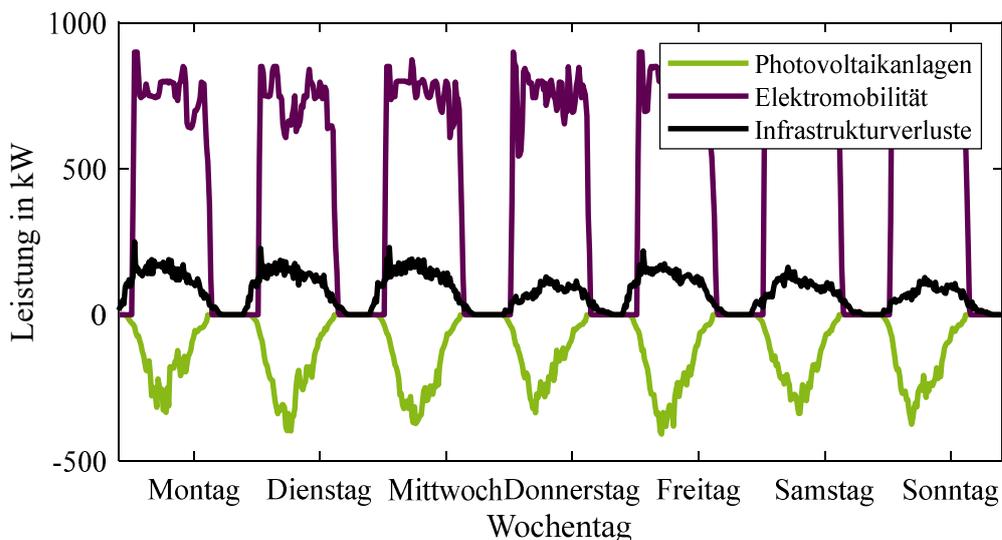


Abbildung 10-4: Simulativer Energiebedarf neuartiger Systemkomponenten sowie Infrastrukturverluste

Während die Einspeisung der Photovoltaikanlagen das Spannungsniveau anheben, besitzen die Ladesäulen für die Elektromobilität den gegenteiligen Effekt. Zusätzlich werden die Infrastrukturverluste dargestellt, welche durch die Verteilung der erzeugten Energie hin zum Verbraucher (z. B. Ladesäulen für Elektromobilität aber auch Batterie-/Oberleitungsbusse) tagsüber ansteigen. Somit korreliert die Einspeisung der Photovoltaikanlagen sowie die Verwendung von Ladesäulen für Elektrofahrzeuge mit den Infrastrukturverlusten. Diese simulativen Energieerträge können bei Bedarf bei der Planung von Oberleitungsbussystemen berücksichtigt werden.

## 10.5 Fallstudie 1: Green-Field-Szenario Innsbruck

Nachfolgend werden für das österreichische Innsbruck, welches das Green-Field-Szenario der beiden Fallstudien (Abschnitt 5.6) bei der Planung von Oberleitungsbussystem darstellt, weitere Informationen und Ergebnisse dargelegt.

### 10.5.1 Datengrundlage

Der Busumlaufplan ist so strukturiert, dass in erster Instanz die Menge  $B$  alle (Typ-)Tage beinhaltet (Tabelle 10-3). Da die Planung eines Oberleitungsbussystems eine Worstcase-Betrachtung bedeutet, wird im Folgenden der Werktag für weitere Berechnungen herangezogen.

**Tabelle 10-3: (Typ-)Tage/Beschreibung der Menge  $B$  und deren Untermengen  $b_i$  mit Worstcase-Szenario (violett) für Fallstudie 1 (Innsbruck)**

$$B = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{Werktag} & \text{Samstag} & \text{Sonntag/Feiertag} \\ \hline \end{array}$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{b_1} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{b_2} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{b_3}$$

Innerhalb der Menge  $B$  befinden sich die Untermengen  $b_i$ , wobei diese wiederum aus den Untermengen  $b_{i,j}$  bestehen.

Die Menge  $b_i$  beschreiben den kompletten Tagesablauf aller fahrenden Batterie-/Oberleitungsbusse des ausgewählten (Typ-)Tages. Die Untermengen  $b_{i,j}$  werden nachfolgend (Tabelle 10-4) als Blöcke dargestellt, wobei ein Batterie-/Oberleitungsbus jeweils einen eigenen Block erhält. Die Kardinalität der Menge  $b_{i,j}$  repräsentiert dabei die Anzahl aller Batterie-/Oberleitungsbusse, die in der Planungsmethode betrachtet werden.



Tabelle 10-6: Auszug aus den Streckeninformationen, Beschreibung der Menge *P* für Fallstudie 1 (Innsbruck)

|     |       | $p_{iSH}$ | $p_{iEH}$ | $p_{iBL}$ | $p_{iL}$ | $p_{iBH}$      |                         |     |                |
|-----|-------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|-------------------------|-----|----------------|
| $P$ | $p_1$ | REH       | DEZ       | R         | 11,04 km | Rehgasse (REH) | Fischnalerstr.          | ... | DEZ            |
|     | $p_2$ | DEZ       | REH       | R         | 10,4 km  | DEZ            | St.Pirmin/<br>Volkshaus | ... | Rehgasse (REH) |
|     | $p_3$ | REH       | DEZ       | R         | 9,7 km   | Rehgasse (REH) | Fischnalerstr.          | ... | DEZ            |
|     | $p_4$ | DEZ       | REH       | R         | 11,59 km | DEZ            | Griesauweg              | ... | Rehgasse (REH) |
|     | $p_5$ | HBF       | DEZ       | R         | 5,54 km  | HBF            | Bundesbahndirektion     | ... | DEZ            |
|     | $p_6$ | HBF       | DEZ       | R         | 6,88 km  | HBF            | Bundesbahndirektion     | ... | DEZ            |
|     | $p_7$ | HBF       | REH       | R         | 4,71 km  | HBF            | Klinik/<br>Universität  | ... | Rehgasse (REH) |
| ⋮   |       |           |           |           |          |                |                         |     |                |

Der zweite Teil der Verkehrsbetriebsinformationen setzt sich aus den Busparametern zusammen, welche in Tabelle 10-7 aufgelistet sind. Diese werden durch die Menge *BT* repräsentiert. Die größten Einflussfaktoren auf die Oberleitungsbussystem-Simulation stellen dabei die effektive Masse, maximale Motorleistung ( $bt_{iPmax}$ ) und die maximalen Heiz- und Kühlleistungen ( $bt_{iHmax}$  und  $bt_{iCmax}$ ) dar.

Die effektive Masse beträgt minimal die Leermasse des verwendeten Bustyps ( $bt_{iMmin}$ ) und maximal die zulässige Gesamtmasse ( $bt_{iMmax}$ ). Zwischen diesen beiden Massen kann mittels der Passagieranzahl, welche durch  $bt_{iPamax}$  begrenzt ist, die effektive Masse an Bushaltestellen, durch das Ein- bzw. Aussteigen von Passagieren, variiert werden.

Mit dem Bustyp „BOB“ wird ein Gelenk-Batterie-Oberleitungsbus bezeichnet, während „SoloBOB“ einen Solo-Batterie-Oberleitungsbus kennzeichnet.

Tabelle 10-7: Batterie-Oberleitungsbusparameter der Solo- (SoloBOB) und Gelenkbusse (BOB)

|    |                 | $bt_1$  | $bt_2$  | Beschreibung                     |
|----|-----------------|---------|---------|----------------------------------|
| BT | $bt_{i, BT}$    | SoloBOB | BOB     | Identifizierung des Bustyps      |
|    | $bt_{i, Mmin}$  | 12.700  | 18.000  | Leermasse in kg                  |
|    | $bt_{i, Mmax}$  | 19.500  | 28.000  | Zul. Gesamtmasse in kg           |
|    | $bt_{i, L}$     | 11,95   | 18,75   | Länge in m                       |
|    | $bt_{i, B}$     | 2,55    | 2,55    | Breite in m                      |
|    | $bt_{i, H}$     | 3,49    | 3,49    | Höhe in m                        |
|    | $bt_{i, Cmax}$  | 70      | 70      | Max. Geschwindigkeit in km/h     |
|    | $bt_{i, Pmax}$  | 75      | 150     | Max. Passagieranzahl             |
|    | $bt_{i, Max}$   | 0,015   | 0,015   | Rollreibungskoeffizient          |
|    | $bt_{i, Pmax}$  | 160.000 | 320.000 | Max. Motorleistung in W          |
|    | $bt_{i, Hmax}$  | 17.000  | 50.440  | Max. Heizleistung in W           |
|    | $bt_{i, Cmax}$  | 12.000  | 30.240  | Max. Kühlleistung in W           |
|    | $bt_{i, BatID}$ | 1       | 1       | Identifizierung des Batterietyps |

Die größten Einflussfaktoren bezüglich vorgestellter Planungsmethode sind die maximalen Lade- und Entladeleistungen der Batterie sowie der nutzbare Batterie-Energieinhalt (Abschnitt 5.6.4). Der Tatsache geschuldet, dass die Planungsmethode auf die Oberleitungsbussystem-Simulation basiert, stellen die zuvor genannten Parameter infolgedessen ebenfalls Einflussfaktoren der Planungsmethode dar. Tabelle 10-8 zeigt folglich die Batteriekenndaten. Neben der Zellchemie, welche das Simulationsverhalten beeinflusst, sind maximale Lade- und Entladeströme vorgegeben. Der Energieinhalt wird in kWh (nicht SI-Einheit) angegeben.

Tabelle 10-8: Batteriekenndaten/Beschreibung der Menge *BAT*

|            |  | <i>bat<sub>1</sub></i>      |                                  |
|------------|--|-----------------------------|----------------------------------|
|            |  | Beschreibung                |                                  |
| <i>BAT</i> | <i>bat<sub>i</sub> ID</i>              | 1                           | Identifizierung des Batterietyps |
|            | <i>bat<sub>i</sub> z</i>               | Lithium-Titanat-Technologie | Zellchemie                       |
|            | <i>bat<sub>i</sub> I<sub>max</sub></i> | 400                         | Max. Ladestrom in A              |
|            | <i>bat<sub>i</sub> I<sub>min</sub></i> | 240                         | Max. Entladestrom in A           |
|            | <i>bat<sub>i</sub> EI</i>              | 45                          | Energieinhalt in kWh             |

Abschließend führt Tabelle 10-9 die weiteren planungsrelevanten Eingabeparameter der Fallstudie 1 auf. Neben den Investitionskosten-Eingabeparametern von Fahrdraht und Gleichrichter-Unterwerken, sind ebenfalls Eingabeparameter über die Nennspannung und Speisefaktor obligatorisch. Ebenfalls werden weitere Fahrdraht-Informationen hinterlegt und spezifische Planungseingabeparameter (SoC-Reserve oder Betrachtung des  $(n - 1)$ -Kriteriums) hinterlegt.

Tabelle 10-9: Planungsrelevante Eingabeparameter

| Formelzeichen            | Wert       | Einheit            |
|--------------------------|------------|--------------------|
| $\bar{k}_{F1}$           | 750.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{F2}$           | 800.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{F\Delta}$      | 200.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{GUW}$          | 430.000,00 | €/MW               |
| $U_n$                    | 750        | V                  |
| $f_{Speise}$             | 1          |                    |
| $R'_F$                   | 0,153      | $\Omega/\text{km}$ |
| $I_{D \max}$             | 550        | A                  |
| $I_{S \max}$             | 100        | A                  |
| $P_{GUW}$                | 1.400      | kVA                |
| $l_{Speise}$             | 50         | m                  |
| $I_{Speise \max}$        | 600        | A                  |
| $R'_{Speise}$            | 0,1        | $\Omega/\text{km}$ |
| $x_{n-1}$                | true       |                    |
| $f_{\text{Bus Bat R}}$   | 0,2        |                    |
| $f_{\text{Bus Bat SoC}}$ | 1,0        |                    |
| $E_{\text{Bus Bat EOL}}$ | 36         | kWh                |
| $x_V$                    | 8          |                    |

## 10.6 Fallstudie 2: Brown-Field-Szenario Solingen

Solingen stellt die zweite Fallstudie dar, welches dank des bestehenden Oberleitungssystems bereits einen hohen Anteil elektrifizierter Buslinien aufweist. Der Solinger ÖPNV soll aber durch der folgenden Planungsmethode den Solinger ÖPNV weiter elektrifiziert werden. Nachfolgend werden für die deutsche Stadt Solingen weitere Informationen und Ergebnisse dargelegt.

### 10.6.1 Datengrundlage

Der Busumlaufplan, welcher die Menge  $B$  alle (Typ-)Tage beinhaltet zeigt Tabelle 10-10. Die Worstcase-Betrachtung (in Violett dargestellt) stellt die maximale Busanzahl eines (Typ-)Tages dar und trifft in diesem Fall auf  $b_1$  (Montag-Donnerstag) zu.

**Tabelle 10-10: (Typ-)Tage/Beschreibung der Menge  $B$  und deren Untermengen  $b_i$  mit Worstcase-Szenario (violett) für Fallstudie 2 (Solingen)**

|       |                       |         |         |                  |
|-------|-----------------------|---------|---------|------------------|
| $B =$ | Montag-<br>Donnerstag | Freitag | Samstag | Sonntag/Feiertag |
|       | ⏟                     | ⏟       | ⏟       | ⏟                |
|       | $b_1$                 | $b_2$   | $b_3$   | $b_4$            |

Wie im Abschnitt 5.3.1 erläutert und äquivalent zur Fallstudie 1 besitzt die Menge  $B$  die Untermengen  $b_i$ , wobei diese wiederum aus den Untermengen  $b_{i j}$  bestehen.

Tabelle 10-11 beschreibt einen Auszug des Inhaltes der Untermenge  $b_i$  (hier:  $b_1$ ) mit den Inhalten  $b_{i j}$  (hier:  $b_{1 1}$  und  $b_{1 2}$ ), welche als Blöcke (Tagesfahrplan eines Busses) dargestellt sind. Die Kardinalität der Menge  $b_{i j}$  repräsentiert dabei die Anzahl aller Batterie-/Oberleitungsbusse, die in der Planungsmethode betrachtet werden.

Tabelle 10-11: Beschreibung der Mengen  $b_i$  und  $b_{i,j}$  für Fallstudie 2 (Solingen)

|           |       |        |       |           |      |      |      |          |
|-----------|-------|--------|-------|-----------|------|------|------|----------|
| $b_{1,1}$ | $b_1$ | 681    | 5:56  | 5:59      | BHOF | MANG | OGL  | 0,57 km  |
|           |       | 681    | 5:59  | 6:16      | MANG | HÄST | OGL  | 5,30 km  |
|           |       | 681    | 6:24  | 7:00      | HÄST | HAHF | OGL  | 11,26 km |
|           |       | 682    | 7:01  | 7:48      | HAHF | BROB | OGL  | 13,13 km |
|           |       | 682    | 8:04  | 8:47      | BROB | HAHF | OGL  | 13,04 km |
|           |       | 681    | 8:50  | 9:27      | HAHF | HÄST | OGL  | 11,14 km |
|           |       | 681    | 9:44  | 10:20     | HÄST | HAHF | OGL  | 11,26 km |
|           |       | 682    | 10:21 | 11:08     | HAHF | BROB | OGL  | 13,13 km |
|           |       | 682    | 11:24 | 12:07     | BROB | HAHF | OGL  | 13,04 km |
|           |       | 681    | 12:10 | 12:47     | HAHF | HÄST | OGL  | 11,14 km |
|           |       | 681    | 13:04 | 13:40     | HÄST | HAHF | OGL  | 11,26 km |
|           |       | 682    | 13:41 | 14:28     | HAHF | BROB | OGL  | 13,13 km |
|           |       | 682    | 14:44 | 15:27     | BROB | HAHF | OGL  | 13,04 km |
|           |       | 681    | 15:30 | 16:07     | HAHF | HÄST | OGL  | 11,14 km |
|           |       | 681    | 16:24 | 17:00     | HÄST | HAHF | OGL  | 11,26 km |
|           |       | 682    | 17:01 | 17:48     | HAHF | BROB | OGL  | 13,13 km |
|           |       | 682    | 18:05 | 18:25     | BROB | MANG | OGL  | 5,46 km  |
|           |       | 682    | 18:25 | 18:30     | MANG | BHOF | OGL  | 0,49 km  |
|           |       |        |       | Auslaufen | 5:59 | 6:02 | ELBA | MANG     |
|           |       | 681/18 | 6:02  | 6:22      | MANG | HÄST | OGL  | 5,30 km  |
|           |       | 681/18 | 6:34  | 7:10      | HÄST | HAHF | OGL  | 11,26 km |
|           |       | ⋮      |       |           |      |      |      |          |
|           |       | ⋮      |       |           |      |      |      |          |

In Tabelle 10-11 wurde eine Zeile in Grün eingefärbt (hier:  $b_{1,1,3}$ ). Jede Zeile beschreibt wiederum eine Untermenge der Menge  $b_{i,j}$  und werden allgemein als Untermengen  $b_{i,j,k}$  gekennzeichnet.

Tabelle 10-12 beschreibt die einzelnen Elemente der Untermenge  $b_{i,j,k}$  und umfassen Buslinien-Informationen  $b_{i,j,k,BL}$ , Start- und End-Uhrzeit  $b_{i,j,k,SU}$  und  $b_{i,j,k,EU}$ , Start- und End-Haltestelle  $b_{i,j,k,SH}$  und  $b_{i,j,k,EH}$ , Bustypinformationen  $b_{i,j,k,BT}$  sowie die zugehörige Streckenlänge  $b_{i,j,k,L}$ .

Tabelle 10-12: Beispiel für die Elemente der Menge  $b_{i,j,k}$  Fallstudie 2 (Solingen)

| $b_{1,1,3}$    |                |                |                |                |                |               |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| 681            | 6:24           | 7:00           | HÄST           | HAHF           | OGL            | 11,26 km      |
| $b_{1,1,3,BL}$ | $b_{1,1,3,SU}$ | $b_{1,1,3,EU}$ | $b_{1,1,3,SH}$ | $b_{1,1,3,EH}$ | $b_{1,1,3,BT}$ | $b_{1,1,3,L}$ |

Zwischen den Endhaltestellen, existieren noch weitere Bushaltestellen, die die Batterie-/Oberleitungsbusse anfahren. Die Verknüpfung der Mengen  $b_{i,j,k}$  und  $p_i$  erfolgt über die Elemente  $b_{i,j,k,BL}$  und  $p_{i,BL}$ ,  $b_{i,j,k,SH}$  und  $p_{i,SH}$  sowie  $b_{i,j,k,L}$  und  $p_{i,L}$ .

Tabelle 10-13: Auszug aus den Streckeninformationen, Beschreibung der Menge  $P$  Fallstudie 2 (Solingen)

|   |       | $p_{iSH}$ | $p_{iEH}$ | $p_{iBL}$ | $p_{iL}$ | $p_{iBH}$                    |                    |     |                   |
|---|-------|-----------|-----------|-----------|----------|------------------------------|--------------------|-----|-------------------|
| P | $p_1$ | HAHF      | MANG      | 681       | 9,57 km  | Hbf (HAHF)                   | Agentur für Arbeit | ... | Mangenberg (MANG) |
|   | $p_2$ | HÄST      | HAHF      | 681       | 11,26 km | Hästen (HÄST)                | Balkhauser Weg     | ... | Hbf (HAHF)        |
|   | $p_3$ | HÄST      | MANG      | 681       | 5,51 km  | Hästen (HÄST)                | Balkhauser Weg     | ... | Mangenberg (MANG) |
|   | $p_4$ | KLIH      | HAHF      | 681       | 9,25 km  | Klingenhalle (KLIH)          | Graf-Wilhelm-Platz | ... | Hbf (HAHF)        |
|   | $p_5$ | MANG      | BÜLP      | 681       | 3,60 km  | Mangenberg (MANG)            | Freiligrathstraße  | ... | Bülowplatz (BÜLP) |
|   | $p_6$ | MANG      | HÄST      | 681       | 5,30 km  | Mangenberg (MANG)            | Freiligrathstraße  | ... | Hästen (HÄST)     |
|   | $p_7$ | BROB      | HAHF      | 682       | 13,04 km | Höhscheid-Brockenberg (BROB) | Höhscheid          | ... | Hbf (HAHF)        |
| ⋮ |       |           |           |           |          |                              |                    |     |                   |

Der zweite Teil der Verkehrsbetriebsinformationen (Busparameter) ist identisch zu den bereits erläuterten Parametern aus Fallstudie 1 (Abschnitt 10.5.1). Abschließend führt Tabelle 10-14 die weiteren planungsrelevanten Eingabeparameter der Fallstudie 1 auf:

Tabelle 10-14: Planungsrelevante Eingabeparameter

| Formelzeichen            | Wert       | Einheit            |
|--------------------------|------------|--------------------|
| $\bar{k}_{F1}$           | 750.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{F2}$           | 800.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{F\Delta}$      | 200.000,00 | €/km               |
| $\bar{k}_{GUW}$          | 430.000,00 | €/M                |
| $U_N$                    | 600        | V                  |
| $f_{Speise}$             | 0,5        |                    |
| $R'_F$                   | 0,153      | $\Omega/\text{km}$ |
| $I_{D \max}$             | 550        | A                  |
| $I_{S \max}$             | 100        | A                  |
| $P_{GUW}$                | 1.400      | kVA                |
| $l_{Speise}$             | 50         | m                  |
| $I_{Speise \max}$        | 600        | A                  |
| $R'_{Speise}$            | 0,1        | $\Omega/\text{km}$ |
| $x_{n-1}$                | true       |                    |
| $f_{\text{Bus Bat R}}$   | 0,2        |                    |
| $f_{\text{Bus Bat SoC}}$ | 1,0        |                    |
| $E_{\text{Bus Bat EOL}}$ | 36         | kWh                |
| $x_V$                    | 8          |                    |