

Simulationsbasierte Planung und Evaluation von Depots für elektrische Busse

vorgelegt von

M. Sc.

Enrico Lauth

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich

Prof. Dr.-Ing. Eric Sax

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13. Juli 2021

Berlin 2021

Für Asia, Lilia & Kalina

Kurzfassung

Derzeit befinden sich Verkehrsbetriebe weltweit im Spannungsfeld zwischen der zügigen Einführung von emissionsfreien Stadtbussen zur Erreichung umwelt- und klimapolitischer Ziele, der Implementierung der dafür notwendigen, passenden Infrastruktur und der parallelen Umstellung von Betriebsprozessen. Bei dem aktuellen Roll-Out werden überwiegend batterieelektrische Stadtbusse vorgesehen. Mit deren zunehmendem Anteil konzentrieren sich die Herausforderungen auf die Gestaltung der Busdepots. Insbesondere bei Neuplanungen stellt sich die Frage der räumlichen Anordnung von Abstellplätzen und der erforderlichen Anlagen für den Fahrzeug-Service. Ladeinfrastruktur muss implementiert und eine ausreichende Stromversorgung sichergestellt werden. Hinzu kommt, dass unterschiedliche Ladestrategien existieren, die Auswirkungen auf den Energie- und Leistungsbedarf im Depot besitzen. Um diesen Bedarf zu decken ist der Ladevorgang in den Betriebsablauf so zu integrieren, dass weiterhin ein störungsfreier, effizienter Betrieb möglich ist.

In der Literatur wurde die Planung von elektrischen Busdepots nur unzureichend untersucht. Daher ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur Planung und Evaluation von elektrischen Busdepots, um Betreiber im Planungsprozess zu unterstützen und somit eine zügige Realisierung zu ermöglichen. Auf Basis einer Analyse von Busdepots und der Identifizierung relevanter Merkmale und Wirkungszusammenhänge, wurde ein diskretes, ereignisorientiertes Simulationsmodell entwickelt, um den dynamischen Depotbetrieb realitätsnah abzubilden. Wichtige Bestandteile des Modells sind Steuerungs- und Optimierungsalgorithmen für das Abstellen und Disponieren der Busse zur effizienten Nutzung der Abstellanlage, für das Lade- und Lastmanagement zur Auslegung des Netzanschlusses und für die Konfiguration der Abstellflächen. Das Modell kann durch den modularen Aufbau eine Vielzahl von Planungsszenarien abdecken.

Die Anwendung der Methodik wird anhand eines realen Fallbeispiels zum Bau eines elektrischen Busdepots für den Betrieb von 39 Linien demonstriert. Das Ergebnis ist eine Planungsgrundlage bestehend aus einem Depotlayout, Fahrzeug-, Stellplatz- und Ladeinfrastrukturbedarf sowie Lastprofile zur Auslegung des Netzanschlusses. Weiterhin wird die Leistungsfähigkeit des elektrischen Depots durch quantitative Indikatoren bewertet.

Abstract

Transport operators worldwide are currently facing the challenge of a rapid introduction of zero-emission city buses to achieve environmental and climate policy goals, an implementation of the appropriate and necessary infrastructure, and a parallel conversion of operating processes. The current roll-out predominantly involves battery-electric city buses. With their increasing share, the challenges are concentrated on the design of the bus depots. The question of the spatial arrangement of parking spaces and the necessary facilities for vehicle servicing arises in particular in the case of new planning. Charging infrastructure must be implemented and a sufficient power supply must be ensured. In addition, different charging strategies exist, which have an impact on the energy and power demand in the depot. In order to meet this demand, the charging process must be integrated into the operational sequence in such a way to guarantee unobstructed, efficient operation.

In the literature, the design of electric bus depots has been insufficiently investigated. Therefore, the aim of this thesis is to develop a methodology for the planning and evaluation of electric bus depots in order to support operators in the planning process and thus enable a rapid realization. Based on an analysis of bus depots and the identification of relevant characteristics and interdependencies, a discrete, event-oriented simulation model has been developed to realistically represent the dynamic depot operation. Important components of the model are control and optimization algorithms for parking and dispatching of buses to ensure efficient use of parking facilities, for charging and load management in order to design the grid connection and for the configuration of parking spaces. The model can cover a wide range of planning scenarios due to its modular design.

The application of the methodology is demonstrated using a real case study for the construction of an electric bus depot for the operation of 39 lines. The result is a planning basis consisting of a depot layout, the demand for vehicles, parking spaces and charging infrastructure as well as load profiles for the design of the grid connection. Furthermore, the performance of the electric depot is evaluated by quantitative indicators.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik der Technischen Universität Berlin. Während der letzten Jahre haben mehrere Menschen zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen, denen ich hiermit danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich, für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit, den zahlreichen und zielführenden fachlichen Diskussionen sowie der vertrauensvollen und menschlichen Zusammenarbeit. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Eric Sax für die Bereitschaft zur Begutachtung und den konstruktiven Austausch danken. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter.

Weiterhin bedanke ich mich ganz besonders bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets, insbesondere über den fachlichen Austausch und die Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe Electric Transport Solutions. Die vielen Diskussionen u. a. zum Thema Elektrobusse im „H4119“ mit den Herren Dominic Jefferies und Pavel Boev habe ich sehr geschätzt und fehlen nach über einem Jahr Homeoffice.

Ein großer Dank gilt auch allen Studierenden, die mich in den vergangenen Jahren als studentische Hilfskräfte oder Abschlussarbeiter tatkräftig unterstützt haben. Stellvertretend herausheben möchte ich Patrick Mundt, Konstantin Brüske, Benjamin Bober, Daniel Robles Mogollon, Jan Holldorb und Niklas Homann.

Zudem danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Ermöglichung der Forschungsarbeiten im Forschungscampus Mobility2Grid und den Berliner Verkehrsbetrieben, insbesondere Frau Simone Torzynski und den Herren Dr. Daniel Hesse, Denny Chen und Hendrik Wüst für die gute Zusammenarbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für das entgegenbrachte Verständnis und die Motivation zum Promovieren.

Schließlich bedanke ich mich bei Maria Heuschkel für das ausführliche Lektorat.

Berlin, im Juli 2021

Enrico Lauth

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vii
Danksagung	ix
Abbildungsverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xxi
Symbolverzeichnis	xxiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ausgangssituation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik und Wissenschaft	7
2.1 Elektrifizierung des urbanen Busverkehrs	7
2.1.1 Systemkonzepte	7
2.1.2 Netzintegration der Ladeinfrastruktur	9
2.1.3 Ladeschnittstellen im Depot	15
2.2 Planung und Betrieb von Busdepots	16
2.2.1 Konventionelle Busdepots	16
2.2.2 Depotmanagementsysteme	21
2.2.3 Zusammenfassung der Anforderungen für Betreiber zur Pla- nung elektrischer Busdepots	23
2.2.4 Beispiele elektrischer Busdepots	25
2.3 Simulations- und Optimierungsmethoden	27
2.4 Verwandte wissenschaftliche Publikationen	32
3 Forschungsumfang	37
3.1 Forschungsbedarf	37
3.2 Forschungsfragen	38

3.3	Zielsetzung und Vorgehensweise	39
3.4	Abgrenzung der Arbeit	41
4	Anforderungsdefinition und Systemanalyse	45
4.1	Anforderungsdefinition	45
4.1.1	Systemgrenze	45
4.1.2	Anforderungen an das Modell	47
4.2	Systemanalyse	48
4.2.1	Analyse von Stand- und Einsatzzeiten	49
4.2.2	Betriebsablauf	52
4.2.3	Konzeptmodell	54
5	Modellformalisierung und Implementierung	59
5.1	Modellstruktur	59
5.2	Hauptklassen	60
5.2.1	<i>Schedule</i>	60
5.2.2	<i>DepotControl</i>	62
5.2.3	<i>Vehicle</i>	64
5.2.4	<i>Area</i>	64
5.2.5	<i>Process</i>	65
5.2.6	<i>Resource</i>	69
5.2.7	<i>DepotEvaluation</i>	69
5.3	Abstell- und Dispositionsstrategien	69
5.3.1	Lösungsstruktur	70
5.3.2	Bewertungskriterien	73
5.3.3	Gewichtung	79
5.4	Lade- und Lastmanagement <i>Smart</i>	80
5.5	Konfiguration der Abstellflächen	83
5.5.1	Flächenbedarfsprüfung	84
5.5.2	Genetischer Algorithmus	85
5.6	Visualisierung	87
6	Modellüberprüfung und Indikatoren	91
6.1	Verwendete Methoden zur Verifikation und Validierung	91
6.1.1	Animation	91
6.1.2	Verifikation durch Monitoring und Trace-Analyse	92
6.1.3	Validierung im Dialog und Begutachtung	93
6.2	Indikatoren zur Verifikation und zur Planung und Evaluierung von E-Depots	93
6.2.1	SoC-Stände bei Ankunft und Abfahrt	94

6.2.2	Prozessanalyse	95
6.2.3	Stau im Betriebsablauf	97
6.2.4	Bedarf und Auslastung von Fahrzeugen und Infrastruktur	98
6.2.5	Zeitpunkte der Disposition	100
6.2.6	Verteilung der Ladeflexibilität	101
6.2.7	Lastprofile und Netzanschluss	102
7	Fallstudie: Simulationsbasierte Planung und Evaluation eines E-Depots	105
7.1	Ausgangssituation und Rahmenbedingungen	105
7.2	Auslegung des Depotlayouts	108
7.3	Evaluierung des E-Depots	114
7.4	Parametervariation	119
8	Diskussion	123
8.1	Ergebnisdiskussion in Bezug zu den Forschungsfragen dieser Arbeit	123
8.2	Limitationen	126
9	Fazit	129
9.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	129
9.2	Ausblick	132
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang	145
A.1	Eigene Veröffentlichungen	145
A.2	Betreute Abschlussarbeiten	147
A.3	Netznutzungsentgelte	148
A.4	Legende Abstell- und Dispositionsstrategie	149
A.5	Paarweiser Vergleich	150
A.6	Parameter und Ergebnisse des genetischen Algorithmus zur Konfiguration der Abstellflächen	153

Abbildungsverzeichnis

1.1	Emissionstrend Treibhausgase seit 1990 in Deutschland	2
1.2	Anteil elektrischer Fahrzeuge am globalen Fahrzeugbestand nach Segmenten	3
1.3	Aufbau der Arbeit	5
2.1	Morphologischer Kasten der verfügbaren Technologieoptionen für einen batterieelektrischen Stadtbusverkehr	8
2.2	Aufbau und Funktionsweise des deutschen Stromnetzes	10
2.3	Zusammensetzung des durchschnittlichen Strompreises für Industriekunden (24 GWh/a) in Deutschland 2019 ohne Umsatzsteuer und Vergünstigungen	13
2.4	Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland im März 2020	14
2.5	Optimierungsziele für ein Lade- und Lastmanagement	14
2.6	Gängige Ladeschnittstellen im Depot	15
2.7	Schematische Darstellung einer Ladestation mit drei Ladepunkten . .	16
2.8	Zuführungsmöglichkeiten der manuellen Kontaktierung	16
2.9	Beispiel (schematisch) für ein Busdepot mit 100 Linienbussen	18
2.10	Beispiel für eine Blockabstellung von 100 Linienbussen	19
2.11	Beispiel für eine Schrägabstellung von 100 Linienbussen	20
2.12	Ermittelte Hauptaufgaben eines Depotmanagementsystems	21
2.13	Geschlossene und offene Systemarchitektur eines Depotmanagementsystems	22
2.14	Übersicht der betrieblichen und technischen Anforderungen für Betreiber (A_B) zur Planung von Depots für batterieelektrische Stadtbusse .	24
2.15	E-Depot der Hamburger Hochbahn AG im Stadtteil Alsterdorf	26
2.16	Ladesäulen auf dem Depot der BVG	26
2.17	Depot am Flughafen Amsterdam Schiphol	27
2.18	Anwendungsfelder der Simulation nach VDI 3633	28
2.19	Allgemeiner Simulationszyklus	29
2.20	Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI 3633	30
2.21	Gegenüberstellung Simulation und Optimierung	31
3.1	Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Lösungsansätze	40

3.2	Vorgehensweise der Entwicklung und Anwendung der Methodik	41
3.3	Übersicht Simulationstool eFLIPS	42
4.1	Systemgrenze des Depotmodells	46
4.2	Übersicht der modellierungsrelevanten Anforderungen (A_M 1 - A_M 18)	47
4.3	Verteilung der Ankünfte und Abfahrten von sechs Depots (a)-(f) von Montag bis Freitag	49
4.4	Verteilung der Ankünfte und Abfahrten von sechs Depots (a)-(f) von Samstag bis Sonntag	50
4.5	Verteilung von Stand- und Einsatzzeiten der Busse der Depots (a)-(f) von Montag bis Freitag	51
4.6	Verteilung von Stand- und Einsatzzeiten der Busse der Depots (a)-(f) von Samstag bis Sonntag	51
4.7	Betriebsablauf im Depot mit Lademöglichkeiten als Aktivitätsdiagramm	52
4.8	Relevante Merkmale und Optionen eines E-Depots als morphologischer Kasten	54
4.9	Konzeptmodell als Grundlage zur Modellformalisierung und Implementierung	56
5.1	Vereinfachtes Klassendiagramm des Simulationsmodells auf Basis des Konzeptmodells (siehe Abb. 4.9)	61
5.2	Aufgabe der Klasse <i>DepotControl</i> als Flussdiagramm	63
5.3	Default Ablaufplan (<i>plan</i>)	64
5.4	Berücksichtigte Flächentypen	65
5.5	Schematischer Ladeverlauf beim CC/CV Verfahren	67
5.6	Algorithmus für die Abstellung (Schritt ⑥a aus Abb. 5.2)	71
5.7	Algorithmus für die Disposition (Schritt ⑩ aus Abb. 5.2)	72
5.8	Beispielsituation für <i>BufferPark</i>	73
5.9	Beispielsituation für <i>TypestackPark</i>	75
5.10	Beispielsituation für <i>RfdDiffPark</i>	76
5.11	Verlauf von $v_{RfdDiffPark}(\Delta t_{a,b})$	76
5.12	Beispielsituation für <i>RfdDiffDispatch</i>	77
5.13	Verlauf von $v_{RfdDiffDispatch}(t_{i,max})$	77
5.14	Beispielsituation für <i>EmptySlotsExitPark</i>	79
5.15	Algorithmus zur preisorientierten Ladeplanung mit variabler Leistungsgrenze	81
5.16	Problemstellung der Flächenbedarfsprüfung mit Stellflächen A_{1-11} (links) und der Fläche einer Abstellanlage A_{park} (rechts)	85
5.17	Sortierung der Stellflächen A_i und Anordnung auf Fläche einer Abstellanlage A_{park}	85

5.18	Genetischer Algorithmus für das Optimierungsproblem der Konfiguration der Abstellflächen	86
5.19	Umsetzung des Architekturmusters <i>Model-View-ViewModel</i> mit <i>.NET</i>	88
5.20	Grafische Benutzeroberfläche der Depotsimulation	88
6.1	Beispiel eines animierten Simulationsablaufs	92
6.2	SoC-Stände bei Ankunft (fiktives Beispiel)	94
6.3	SoC-Stände bei Abfahrt (fiktives Beispiel)	94
6.4	Standzeiten und Prozessübersicht aller Fahrzeuge eines Depots (fiktives Beispiel)	96
6.5	Verteilung von Stauzeiten der Fahrzeuge (fiktives Beispiel)	97
6.6	Anzahl der Fahrzeuge auf Staufläche (fiktives Beispiel)	97
6.7	Fahrzeugbedarf (fiktives Beispiel)	98
6.8	Auslastung einer Ladeinfrastruktur mit einer maximalen Ladeleistung von 150 kW (fiktives Beispiel)	99
6.9	Verlauf der Leistung einer Ladeinfrastruktur mit einem Ladeprozess mit maximal 150 kW und mit einem Prozess zur Vorkonditionierung mit 20 kW (fiktives Beispiel)	99
6.10	Auslastung von Stellplätzen in Prozent und als Farbverlauf. Rot: geringe Auslastung, Grün: hohe Auslastung (fiktives Beispiel)	100
6.11	Zeitpunkte der Disposition (fiktives Beispiel)	101
6.12	Verteilung der Zeitpunkte der Disposition (fiktives Beispiel)	101
6.13	Verteilung der Ladeflexibilität bei Fahrzeugen im Depot (fiktives Beispiel)	102
6.14	Vergleich der Lastprofile mit und ohne Lade- und Lastmanagement (fiktives Beispiel)	103
7.1	Längen der einzelnen Umläufe für SB und AB	106
7.2	SoC der E-Busse bei Ankunft im Depot	106
7.3	Geländeplan mit Flächen	106
7.4	Untersuchte Varianten eine E-Depots (rot, blau) mit Simulationsparametern und Rahmenbedingungen	107
7.5	Anzahl der Fahrzeuge im Depot	108
7.6	Zielfunktionsraum (SB) mit den Zielfunktionen $f_1(\vec{x}) = c(\vec{x})$ (Stellplatzkapazität) und $f_2(\vec{x}) = \bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$ (Flexibilitätskennzahl)	109
7.7	Ausgewählte Konfigurationen in der pareto-optimalen Menge (SB)	110
7.8	Zielfunktionsraum (AB) mit den Zielfunktionen $f_1(\vec{x}) = c(\vec{x})$ (Stellplatzkapazität) und $f_2(\vec{x}) = \bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$ (Flexibilitätskennzahl)	111
7.9	Ausgewählte Konfigurationen in der pareto-optimalen Menge (AB)	112
7.10	Depotlayout	113
7.11	Standzeiten und Prozessübersicht aller Fahrzeuge des E-Depots	115

7.12	Verteilung der Zeitpunkte der Disposition mit vorgegebener Vorlaufzeit von 60 min	116
7.13	Auslastung des Service (tägl. Innenreinigung/Versorgung)	116
7.14	Anzahl der Fahrzeuge auf Staufläche des E-Depots	116
7.15	Auslastung der Stellplätze pro Tag in Prozent als Farbverlauf. Rot: geringe Auslastung, Grün: hohe Auslastung	117
7.16	Verteilung der Ladeflexibilität bei Fahrzeugen im E-Depot	118
7.17	Vergleich der Lastprofile mit und ohne Lade- und Lastmanagement . .	118
7.18	Anzahl der Fahrzeuge auf Staufläche des E-Depots	120
7.19	Auslastung des Service (tägl. Innenreinigung/Versorgung)	120
7.20	Unterschiedliche Preiskurven	121
A.1	Legende Abstell- und Dispositionsstrategie	149
A.2	Geometrische Parameter der Abstellfläche und Abstellordnungen . . .	154
A.3	Weitere Konfigurationen für SB-Abstellanlage	154
A.4	Weitere Konfigurationen für AB-Abstellanlage	155

Tabellenverzeichnis

2.1	Orientierungswerte der maximalen Anschlusskapazitäten in Abhängigkeit der Spannungsebene	11
2.2	Einteilung der Stromkunden	12
2.3	Übersicht verwandte wissenschaftliche Publikationen	33
5.1	Beispiel für ein <i>Schedule</i> (Umlaufplan) als Datenschnittstelle	62
5.2	Anforderungen für Abstellung und Disposition	72
5.3	Übersicht der Kriterien zur Bewertung eines Stellplatzes bei Abstellung und eines Fahrzeuges bei Disposition	74
5.4	Mittelwert der Gewichtung der Kriterien bei Abstellung	79
5.5	Mittelwert der Gewichtung der Kriterien bei Disposition	80
6.1	Monitoring von Zustandsgrößen und Variablen	93
6.2	Kennwerte im Intervall Mi 0:00 Uhr - Do 0:00 Uhr (fiktives Beispiel) .	104
7.1	Zielfunktionswerte der ausgewählten Konfigurationen (SB)	110
7.2	Zielfunktionswerte der ausgewählten Konfigurationen (AB)	112
7.3	Ergebnisse bei unterschiedlichen Servicekapazitäten	113
7.4	Kennwerte im Intervall Mi. 0:00 Uhr - Do. 0:00 Uhr	119
7.5	Ergebnisse bei inhomogener Verteilung der maximalen Ladeleistung .	120
7.6	Kosten der Strombeschaffung für verschiedene Preiskurven im Intervall Mi 0:00 Uhr - Do 0:00 Uhr	121
A.1	Netzentgelte in 2020 für Benutzungsdauer < 2.500 h/a	148
A.2	Netzentgelte in 2020 für Benutzungsdauer ≥ 2.500 h/a	148
A.3	Punktevergabe zur Beurteilung der Wichtigkeit zweier Kriterien K_1 und K_2	150
A.4	Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Abstellung von Enrico Lauth	150
A.5	Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Abstellung von Patrick Mundt	151
A.6	Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Disposition von Enrico Lauth	151

A.7 Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Disposition von Patrick Mundt	152
A.8 Parameter des genetisches Algorithmus	153
A.9 Geometrische Parameter der Abstellfläche und Abstellordnungen . . .	153

Abkürzungsverzeichnis

- AB *Articulated Bus* 18 m (dt. Gelenkbus)
- API . . . *Application Programming Interface* (dt. Programmierschnittstelle)
- BVG . . . Berliner Verkehrsbetriebe
- CC/CV . *Constant Current / Constant Voltage* (dt. Konstantstrom / Konstantspannung)
- CCS . . . *Combined Charging System*
- CVD . . . *Clean Vehicles Directive*
- DC *Depot Charging* (dt. Laden im Depot)
- DDR . . . *Direct Double Row* (dt. Schrägabstellung in Doppelreihe)
- DMS . . . Depotmanagementsystem
- DSR . . . *Direct Single Row* (dt. Schrägabstellung in Einzelreihe)
- E-Bus . . Elektrobus
- E-Depot . Depot für Elektrobusse
- EEG . . . Erneuerbare-Energien-Gesetz
- EEX . . . *European Energy Exchange*
- eFLIPS . *Electric Fleet and Infrastructure Planning / Simulation*
- FIFO . . . *First-In-First-Out* (dt. der Reihe nach)
- GUI . . . *Graphical User Interface* (dt. grafische Benutzeroberfläche)
- ID Identifikator
- L *Line* (dt. Blockabstellung)
- LFP . . . Lithium-Eisenphosphat
- LTO . . . Lithiumtitanatoxid
- MVVM . *Model-View-ViewModel*
- NMC . . . Nickel-Mangan-Kobalt
- OC *Opportunity Charging* (dt. Gelegenheitsladen)
- rfd *Ready for Departure* (dt. abfahrbereit)
- RLM . . . Registrierende Lastgangsmessung
- SB Standard-Bus 12 m

SLP	. . .	Standardlastprofil
SoC	. . .	<i>State of Charge</i> (dt. Ladezustand)
SoH	. . .	<i>State of Health</i> (dt. Gesundheitszustand)
V&V	. . .	Verifikation und Validierung
VDI	. . .	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDV	. . .	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
ÖPNV	. .	Öffentlicher Personennahverkehr

Symbolverzeichnis

$E_{bus,bat}^{nom}$	. . . .	Nominale Kapazität einer Batterie eines E-Busses [kWh]
$E_{bus,bat}^{real}$	. . . .	Reale Kapazität einer Batterie eines E-Busses [kWh]
$E_{bus}^{dem,const.P}$	. . . .	Energiebedarf eines E-Busses bei konstanter Ladeleistung [kWh]
E_{bus}^{dem}	. . . .	Energiebedarf eines E-Busses [kWh]
$P_{bus,infr}^{ch,max}$	. . . .	Verfügbare Ladeleistung [kW]
$P_{bus}^{ch,max}$	. . . .	Maximale Ladeleistung eines E-Busses [kW]
P_{grid}^{limit}	. . . .	Limit der Gesamtladeleistung für Zeitintervalle Δt [kW]
P_{grid}^{rest}	. . . .	Restliche verfügbare Leistung in einem Zeitintervall Δt [kW]
P_{grid}	. . . .	Ladeleistung in einem Zeitintervall Δt [kW]
$P_{i,infr}^{ch,max}$	. . . .	Maximale Ladeleistung aller Ladeinfrastrukturen i [kW]
$P_{infr}^{ch,max}$	. . . .	Maximale Ladeleistung einer Ladeinfrastruktur [kW]
P_{opt}	. . . .	Optimierte Verteilung der Ladeleistung als Matrix [s, kW]
S_{buses}^{depot}	. . . .	Datenmatrix für eine Anzahl von E-Bussen in einem Depot [kWh, kW, s, s, s]
Sig_{opt}	. . . .	Datenmatrix der Signale die zur Optimierung genutzt werden [s, €, kW]
SoC_{bus}^{arr}	. . . .	<i>State of Charge</i> bei Ankunft im Depot [%]
SoC_{bus}^{dep}	. . . .	<i>State of Charge</i> bei Abfahrt aus Depot [%]
SoC_{max}	. . . .	Obere betriebliche Grenze des <i>State of Charge</i> [%]
SoC_{min}	. . . .	Unterer betriebliche Grenze des <i>State of Charge</i> [%]
$SoC_{threshold}$	. . . .	Schwellenwert des <i>State of Charge</i> für den Phasenübergang des Ladevorgangs beim CC-CV Verfahren [%]
$SoH_{bus,bat}$	. . . .	<i>State of Health</i> einer Batterie eines E-Busses [%]
T_{bus}^{arr}	. . . .	Ankunftszeit eines Buses [s]
T_{bus}^{dep}	. . . .	Abfahrtszeit eines Buses [s]
c_{max_e}	. . . .	Schätzung der maximal möglichen Stellplatzkapazität in einem Szenario [1]
$c(\vec{x})$	. . . .	Stellplatzkapazität einer Lösung \vec{x} , Zielfunktionswert 1 der Optimierung der Parkflächenkonfiguration [1]

ΔE_{bus}^{dem}	. . . .	Differenz des Energiebedarfs bei konstanter und veränderbarer Ladeleistung [kWh]
$\Delta T_{bus}^{ch,flex}$	. . . .	Zeitliche Ladeflexibilität [s]
ΔT_{bus}^{ch}	. . . .	Dauer eines Ladeprozesses eines E-Busses [s]
η_{ch}	. . . . .	Wirkungsgrad für einen Ladeprozess [%]
$\bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$	. . .	Mittelwert der Anzahl nicht blockierter, abfahrereiter Fahrzeuge einer Lösung \vec{x} , Zielfunktionswert 2 der Optimierung der Parkflächenkonfiguration [1]
p_{el}	. . . . .	Strompreis für ein Zeitintervall $\Delta t \in \{0.25h, 1h\}$ [€]
$\Delta t_{a,b}$	. . . . .	Differenz der Zeitpunkte, zu denen Fahrzeuge a und b abfahrereit sind [s]
$t_{i,max}$	. . . . .	Maximaler rfd-Wert aller Fahrzeuge t_{rfd_i} einer Reihe [s]

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ausgangssituation

Aufgrund des globalen Klimawandels, der Ressourcenknappheit und der lokalen Luftverschmutzung steigt zunehmend der Handlungsdruck in allen Sektoren Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen zu reduzieren und zu vermeiden. Als klimapolitischer Maßstab gilt der Abschluss des umfassenden und rechtsverbindlichen, weltweiten Klimaschutzabkommens, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2°C begrenzt ist.¹ In Europa ist die Bewältigung der klima- und umweltbedingten Herausforderungen im europäischen Grünen Deal verankert, der unter anderem eine Treibhausgasneutralität bis 2050 und ein Null-Schadstoff-Ziel vorsieht.² Zur Einhaltung der Zielvorgaben gilt auf nationaler Ebene der Klimaschutzplan 2050³, das Bundes-Klimaschutzgesetz⁴ und das nationale Luftreinhalteprogramm⁵.

In Deutschland ist seit 1990 ein Rückgang der Treibhausgasemissionen zu verzeichnen, wie Abb. 1.1 zeigt. Die größten Fortschritte konnten in der Energiewirtschaft erzielt werden, was auf die Reform des europäischen Emissionshandels, den niedrigen Gaspreis, den Ausbau von Wind- und Sonnenenergie sowie die Abschaltung erster Kohlekraftwerksblöcke zurückzuführen ist.⁶ Der Verkehrssektor stagniert allerdings auf dem Niveau von 1990 und macht in 2019 ca. 20 % der gesamten Treibhausgasemissionen aus. Grund hierfür ist die stetig steigende Verkehrsleistung im Straßengüter- und Straßenpersonenverkehr, die teilweise die technischen Verbesserungen an den Fahrzeugen kompensierte.

Der Ausstoß von allen Luftschadstoffen ist seit 1990 gesunken.⁷ Allerdings hat der Straßenverkehr 2019 weiterhin einen deutlichen Anteil an der Emissionsentstehung, insbesondere bei Stickstoffoxiden (ca. 39 %), Kohlenmonoxid (ca. 33 %), und Feinstaub (PM 2,5: ca. 20 %, PM 10: ca. 14 %).

¹Vgl. United Nations (2015).

²Vgl. Europäische Kommission (2019).

³Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019a).

⁴Vgl. Bundestag (2019).

⁵Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019b).

⁶Vgl. Umweltbundesamt (2020).

⁷Vgl. Umweltbundesamt (2021).

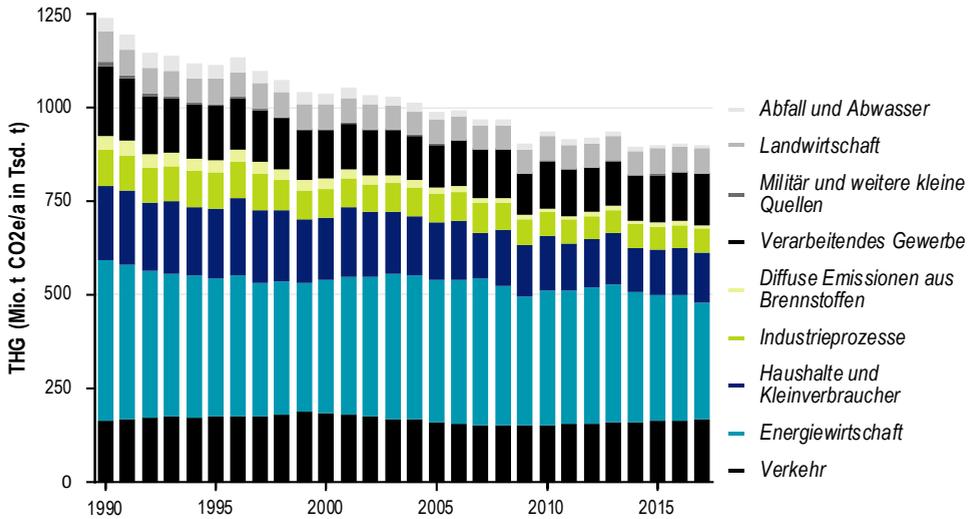


Abb. 1.1: Emissionstrend Treibhausgase seit 1990 in Deutschland⁸

Um einen Rückgang der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor zu bewirken, werden verschiedene Ziele und Maßnahmen verfolgt, wie Verkehrsvermeidung, Nutzung umweltfreundlicherer Verkehrsmittel, Effizienzsteigerungen durch Digitalisierung und Elektrifizierung von Fahrzeugen.⁹ Hierbei wird dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), insbesondere dem Busverkehr, eine bedeutende Rolle bei der Erreichung dieser Ziele zugeschrieben.

Die Einführung von elektrischen Bussen in Innenstadtbereichen ist ein vielversprechender Weg, um die Luftqualität zu verbessern sowie schädliche Emissionen und Lärm zu reduzieren.¹⁰ Zudem ist eine Elektrifizierung von Stadtbusflotten aufgrund des regelmäßigen Einsatzprofils mit geplanten Routen mit weniger Hürden verbunden als der Einsatz von elektrischen Pkw. Die europäische Kommission hat mit der *Clean Vehicles Directive* (CVD) höhere verbindliche Quoten bei öffentlicher Auftragsvergabe für Busse eingeführt, um umweltfreundliche Verkehrsmittel zu fördern.¹¹ Die Mindestziele für „saubere“ Busse im ÖPNV¹² liegen für den Zeitraum 2021 bis 2025 bei 45 % und ab 2026 bis Ende 2030 bei 65 %. Anlässlich der bereits erhöhten Marktreife von lokal emissionsfreien¹³ Stadtbussen muss die Hälfte der beschafften Busse emis-

⁸Göhlich et al. (2021), nach Umweltbundesamt (2019).

⁹Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2019a, S. 49 ff.).

¹⁰Vgl. Bloomberg New Energy Finance (2018, S. 1).

¹¹Vgl. Europäisches Parlament (2019).

¹²Fahrzeuge die mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden, z. B. Strom, Wasserstoff, Erdgas, synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe. Eine Mischung mit konventionellen, fossilen Kraftstoffen ist nicht erlaubt.

¹³Busse die weniger als 1 g CO₂/kWh ausstoßen.

sionsfrei sein. Eine Marktprognose ergab, dass sich der Anteil elektrischer Busse am globalen Fahrzeugbestand deutlich schneller gegenüber anderen Fahrzeugsegmenten entwickeln wird und 2030 ca. 45% ausmachen kann, wie in Abb. 1.2 zu sehen ist.¹⁴ Weltweit haben Großstädte teilweise sogar ambitioniertere Ziele für eine fossilfreie Fahrzeugflotte im ÖPNV formuliert, wie z. B. Los Angeles, Mexico City, Rio De Janeiro, Rom, Seoul, die ab 2025 ausschließlich lokal emissionsfreie Busse beschaffen werden.¹⁵

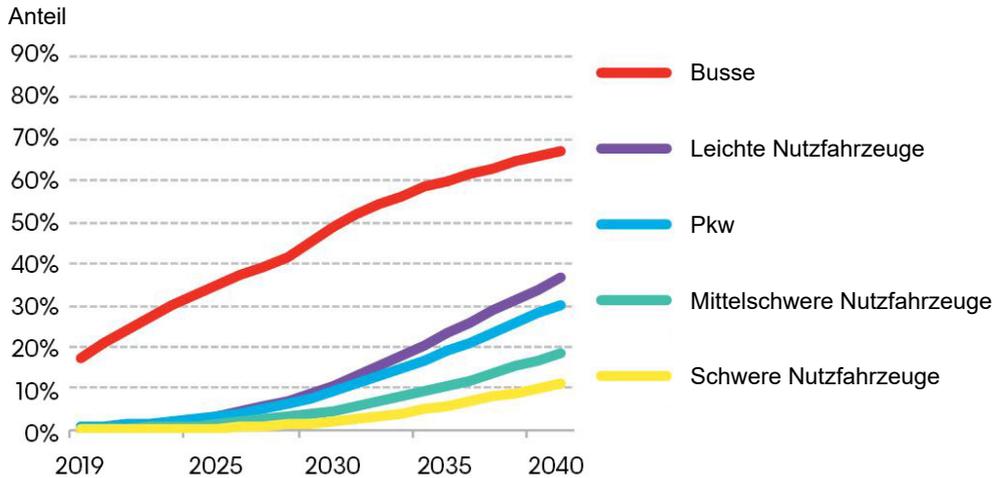


Abb. 1.2: Anteil elektrischer Fahrzeuge am globalen Fahrzeugbestand nach Segmenten¹⁶

Die Vielfalt an verfügbaren Technologieoptionen erschwert allerdings die Identifikation eines geeigneten elektrischen Stadtbussystems.¹⁷ Daher haben kommunale Busunternehmen in Europa in den letzten sieben Jahren verschiedene Technologiekombinationen in Pilotprojekten erprobt. Die Erkenntnisse führten dazu, dass bei dem laufenden Roll-Out hauptsächlich batterieelektrische Stadtbusse in Europa beschafft werden.¹⁸ Die zukünftige Entwicklung des Busmarkts in Europa deutet ebenfalls auf einen deutlich höheren Anteil von batterieelektrischen Stadtbussen gegenüber Bussen mit Brennstoffzellentechnologie hin.¹⁹ In Deutschland ist eine ähnliche Tendenz er-

¹⁴Vgl. Bloomberg New Energy Finance (2019).

¹⁵Vgl. C40 Cities (2020).

¹⁶Nach Bloomberg New Energy Finance (2019), Hinweis: Die Zahlen für Pkw und Busse sind global. Die Segmente der Nutzfahrzeuge decken die Hauptmärkte in China, Europa und den USA ab.

¹⁷Vgl. Göhlich et al. (2018); Häll, Ceder, Ekström und Quttineh (2019).

¹⁸Vgl. Mathieu (2018, S. 10), in 2017 wurden in Europa 83% batterieelektrische Busse, 8% Oberleitungsbusse mit Batterie, 8% Plug-in Hybridbusse und 1% Brennstoffzellenbusse von insgesamt 1140 Bussen von den Betreibern bestellt.

¹⁹Vgl. ZeEUS (2017, S. 10).

kennbar.²⁰ Aus diesen Gründen liegt der Fokus dieser Arbeit²¹ auf batterieelektrischen Stadtbussen²².

Mit zunehmenden Anteil von E-Bussen in der Flotte ergeben sich neue Herausforderungen, insbesondere für die Planung und den Betrieb von Busdepots.²³ Die Busbetreiber stehen vor der Aufgabe, Ladeinfrastruktur in normalerweise platzbeschränkten Depots zu implementieren und eine ausreichend dimensionierte Stromversorgung für den hohen Energie- und Leistungsbedarf der Elektroflotte sicherzustellen. Der Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur stellt zudem neue Anforderungen an die Layoutplanung des Depots und der räumlichen Anordnung von Stellplätzen. Darüber hinaus kann sich die Integration des Ladevorgangs in den Betriebsablauf im Depot auf andere Prozesse auswirken. Durch die Komplexitätssteigerung kann der Einsatz von Softwarelösungen notwendig werden, um einen störungsfreien und effizienten Betrieb zu gewährleisten.

Die Verkehrsunternehmen befinden sich somit im Spannungsfeld einer zügigen Einführung von E-Bussen zur Erreichung umwelt- und klimapolitischer Ziele, der gleichzeitigen Realisierung der notwendigen Infrastruktur und der Umstellung von Betriebsprozessen. Hinzu kommt, dass die Einflussfaktoren und die Auswirkungen der neuen Technologien auf das Systemdesign teilweise noch unklar sind. Um die Verkehrsunternehmen in diesem Prozess zu unterstützen und das Planungsrisiko für zukünftige Depots zu verringern, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur simulationsbasierten Planung und Evaluation von Depots für E-Busse (E-Depot) entwickelt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ein Überblick des Aufbaus der Arbeit ist in Abb. 1.3 dargestellt. Zunächst wird in Kapitel 2 der Stand der Technik und Wissenschaft beschrieben. Es umfasst die gegenwärtigen Entwicklungen bei der Elektrifizierung des urbanen Busverkehrs sowie bei der Planung und dem Betrieb von konventionellen und elektrischen Busdepots. Weiterhin werden grundlegende Simulations- und Optimierungsmethoden adressiert und relevante Themenbereiche verwandter Publikationen gegenübergestellt.

²⁰Burmeister (2021), in 2020 wurden in Deutschland 72 % batterieelektrische Busse, 24 % Brennstoffzellenbusse inkl. Range-Extender, 3 % Oberleitungsbusse mit Batterie und 1 % Plug-in Hybridbusse von insgesamt 1950 Stadtbussen betrieben oder bestellt.

²¹Der Fokus der Arbeit auf batterieelektrische Busse bedeutet allerdings nicht, dass Busse mit Brennstoffzellentechnologie nicht relevant sind. Sobald die Rahmenbedingungen es zulassen, wie z. B. „grüner“ Wasserstoff in ausreichender Menge vorhanden, hat diese Technologie eine Daseinsberechtigung.

²²Folgend als Elektrobus (E-Bus) bezeichnet.

²³Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2020b).

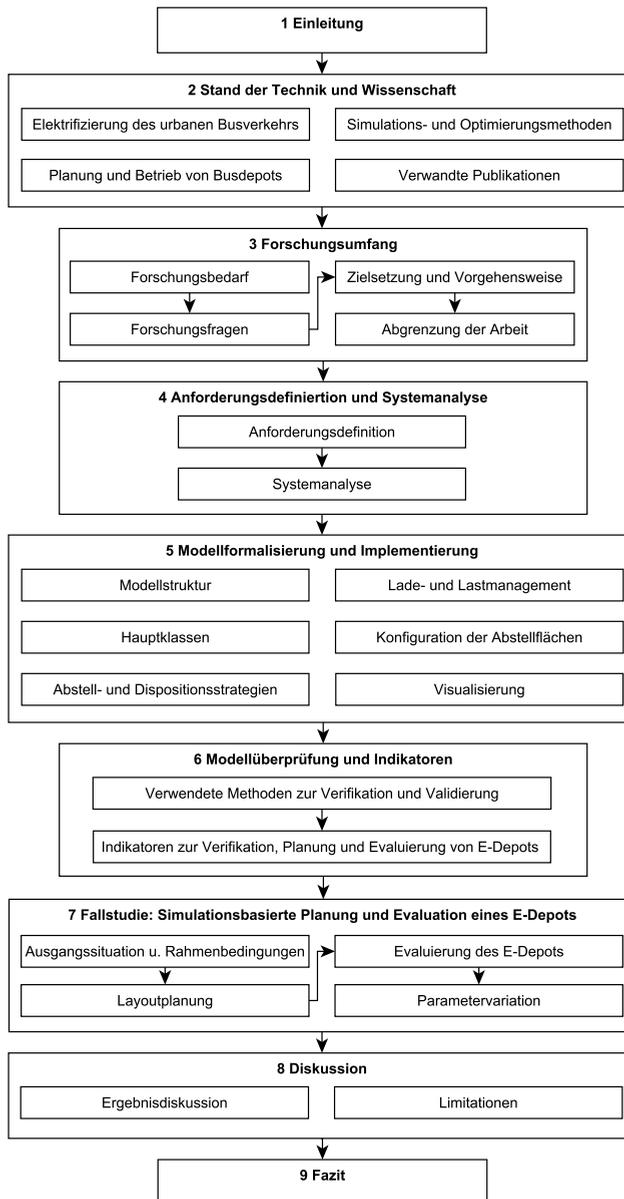


Abb. 1.3: Aufbau der Arbeit

Mit diesem Wissen wird in Kapitel 3 der Forschungsumfang der Arbeit formuliert. Der Umfang besteht aus der Ermittlung des Forschungsbedarfs, der Definition von Forschungsfragen, der Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit sowie einer Abgrenzung. In den folgenden drei Kapiteln wird die Entwicklung des Simulationsmodells dargestellt. In Kapitel 4 wird ein Konzeptmodell basierend auf definierten Anforder-

rungen und einer Systemanalyse entworfen. Das Konzeptmodell ist die Grundlage für die anschließende Modellformalisierung und Implementierung in Kapitel 5. Dieses Kapitel besteht aus der Vorstellung der Modellstruktur mit den relevanten Elementen und Funktionen. In dem darauf folgenden Kapitel 6 werden die angewandten Methoden zur Verifikation und Validierung erläutert. Zudem werden Indikatoren ermittelt, die zur Verifikation des Simulationsmodells sowie zur Planung und Evaluierung von E-Depots herangezogen werden können. In Kapitel 7 wird das entwickelte Simulationsmodell an einem realen Beispiel angewandt. In der Fallstudie wird ein Layout für ein E-Depot ausgelegt und anhand der Indikatoren evaluiert. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse kritisch diskutiert und die Limitationen der Methodik aufgezeigt. Kapitel 9 schließt mit einer Zusammenfassung, Schlussfolgerungen für das reale System und einem Ausblick ab.

Teilergebnisse dieser Arbeit wurden bereits veröffentlicht.²⁴ Eine Liste der eigenen Veröffentlichungen ist im Anhang A.1 zu finden.

²⁴Boev, Lauth und Göhlich (2020); Göhlich et al. (2021); Lauth et al. (2021 (noch nicht veröffentlicht)); Lauth, Mundt und Göhlich (2019); Raab, Lauth, Heinekamp, Strunz und Göhlich (2019); Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2017, 2019).

2 Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel werden die aktuellen Entwicklungen im Bereich elektrische Busdepots sowie gegenwärtige Erkenntnisse aus der Wissenschaft aufgezeigt, um eine theoretische Basis für die folgenden Kapitel zu schaffen. Zunächst wird auf die Elektrifizierung des urbanen Busverkehrs eingegangen. Es folgt ein Überblick was bei der Planung und dem Betrieb von Busdepots zu beachten ist. Im vorletzten Abschnitt werden relevante Simulations- und Optimierungsmethoden vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einem Vergleich zu verwandten Publikationen ab.

2.1 Elektrifizierung des urbanen Busverkehrs

2.1.1 Systemkonzepte

Den Busbetreibern stehen eine Vielzahl an verschiedenen Technologieoptionen zur Elektrifizierung ihrer Fahrzeugflotte zur Verfügung, wie in Abb. 2.1 dargestellt.²⁵ Alle Optionen weisen spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich technologischer Komplexität, Investitionsbedarf und Betriebskosten auf und müssen sinnvoll zu einer Systemlösung kombiniert werden. Da Betreiber oft unterschiedliche Fahrzeugtypen je nach Einsatzzweck nutzen, muss dies ebenso bei der Technologiewahl berücksichtigt werden. Es kann zwischen vier relevanten Fahrzeugtypen unterschieden werden, die sich hauptsächlich hinsichtlich der Fahrzeuglänge und des zulässigen Gesamtgewichts bzw. der maximalen Fahrgastkapazitäten differenzieren lassen: Standard-Bus 12 m (SB), Gelenkbus 18 m (AB, engl. *Articulated Bus*), Doppelgelenkbus 24 m und Doppeldeckerbus 10,5–13,7 m.

Für die Versorgung mit elektrischer Energie stehen grundsätzlich Stromnetze zur Verfügung. Die Auswahl erfolgt nach dem erforderlichen Gesamtstrombedarf und entsprechend der Netzebene, aus der der Strom bezogen wird. Die Ladestrategie und die damit verbundene Ladeschnittstelle bestimmen maßgeblich das Systemkonzept und beeinflussen zudem die Auswahl der geeigneten Batterietechnologie. Allgemein kann zwischen drei Ladestrategien unterschieden werden:

²⁵Vgl. Clairand, Guerra-Terán, Serrano-Guerrero, González-Rodríguez und Escrivá-Escrivá (2019); Göhlich et al. (2018, 2021).

Kategorie	Optionen				
Netzan- schluss- ebene	 Niederspannung	 Mittelspannung	 Hochspannung		
Lade- strategie	 Gelegenheitsladen (statisch)	 Gelegenheitsladen (dynamisch)	 Laden im Depot		
Lade- schnitt- stelle	 Stecker	 Pantograph	 Induktion	 Stromabnehmer	 Batteriewechsel
Batterie					
	NMC	LFP	LTO		

Abb. 2.1: Morphologischer Kasten der verfügbaren Technologieoptionen für einen batterieelektrischen Stadtbusverkehr²⁶

- Das Konzept des statischen Gelegenheitsladens sieht mehrere Ladevorgänge hauptsächlich während der kurzen Verweilzeiten (< 10 min) an den Endhaltestellen vor, was eine hohe Ladeleistung (derzeit bis zu 450 kW üblich²⁷) mit einer automatisierten Ladeschnittstelle (Pantograph, Induktion) erforderlich macht. Während der Betriebspause im Depot kann zusätzlich eine Nachladung erfolgen.
- Im Gegensatz erfolgt ein Ladevorgang beim dynamischen Gelegenheitsladen während der Fahrt mittels Stromabnehmer an einer Oberleitung. Um Streckenabschnitte ohne Oberleitung zu überbrücken werden zusätzlich Batteriespeicher eingesetzt. Dieses Konzept ist eine Weiterentwicklung des klassischen Oberleitungsbussystems und eignet sich besonders bei einem bestehenden Oberleitungsnetz.
- Die Ladestrategie Laden im Depot sieht ein Ladevorgang ausschließlich während längerer Betriebspausen im Depot vor. Diese Strategie bietet eine große Einsatzflexibilität und ist vergleichbar mit dem bisherigen Betrieb von konventionellen Bussen. Allerdings sind die Fahrzeuge in ihrer Reichweite (bis zu 300 km²⁸) beschränkt und eine hinreichend lange Standzeit für den Ladevorgang im Depot ist zu berücksichtigen. Bei Einmalladung im Depot wird üblicherweise eine manuel-

²⁶Nach Göhlich et al. (2018, 2021).

²⁷Vgl. Jaeger, Cremer, Hoffmann und Held (2020).

²⁸Vgl. Göhlich et al. (2018).

le Kontaktierung mit einem Stecker eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Entkopplung von Fahrzeug und Batterie mittels Batteriewechselstationen. Diese Vorgehensweise ist allerdings aktuell noch eine Nischentechnologie und wird derzeit hauptsächlich im asiatischen Raum erprobt.

Derzeit werden hauptsächlich Lithium-basierte Batterien in Elektrobussen eingesetzt.²⁹ Je nach Ladestrategie werden unterschiedliche Zelltypen bevorzugt. Die gebräuchlichsten Zelltypen sind Nickel-Mangan-Kobalt (NMC), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithiumtitanatoxid (LTO), deren Eigenschaften, wie Energiedichte, maximaler Ladeleistung, Lebensdauer und Kosten, variieren.³⁰ Um den Zustand einer Batterie zu beurteilen werden die Kennwerte *State of Charge* (dt. Ladezustand) (SoC) und *State of Health* (dt. Gesundheitszustand) (SoH) herangezogen. Der SoC beschreibt den derzeitigen Ladezustand im Vergleich zur maximalen Kapazität der Batterie.³¹ Der SoH gibt den aktuellen Zustand der Batterie im Vergleich zu einer neuen an. Die Lebensdauer der Batterie ist abhängig von dem unbelasteten Zustand (kalendarische Alterung) und dem betrieblichen Nutzungsverhalten (zyklische Alterung).³² Weitere wichtige Einflussfaktoren sind die Temperatur, der Energiedurchsatz und die Stromstärke für die Be- und Entladungsprozesse. Ein Batteriemanagementsystem überwacht und regelt diese Werte.

Im Folgenden wird auf die Netzintegration der Ladeinfrastruktur und deren Schnittstellen im Depot eingegangen. Technologien, die außerhalb des Depots Anwendung finden, werden nicht weiter betrachtet. Hier wird auf die Literatur verwiesen.³³

2.1.2 Netzintegration der Ladeinfrastruktur

Anschluss an das Stromnetz

In Deutschland wird Strom hauptsächlich über Drehstromnetze übertragen und verteilt, die hierarchisch aufgebaut sind und aus mehreren Netzebenen mit unterschiedlichen Betriebsspannungen bestehen.³⁴ Der Aufbau und die Funktionsweise des deutschen Stromnetzes sind in Abb. 2.2 dargestellt.

Es gliedert sich in vier Netzebenen: Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannung, die durch Transformatoren in den Umspannwerken verbunden sind. Das ursprünglich für einen unidirektionalen Lastfluss ausgelegte Stromnetz transportiert den Strom

²⁹Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2020b, S. 17).

³⁰Vgl. Göhlich et al. (2018).

³¹Vgl. Dorn, Schwartz und Steurich (2013, S. 178).

³²Vgl. Lamp (2013, S. 410).

³³Vgl. Clairand et al. (2019); Göhlich et al. (2018, 2021); Kunith (2017).

³⁴Vgl. Niederhausen und Burkert (2014, S. 18 ff.), Konstantin (2017, S. 314 ff.).

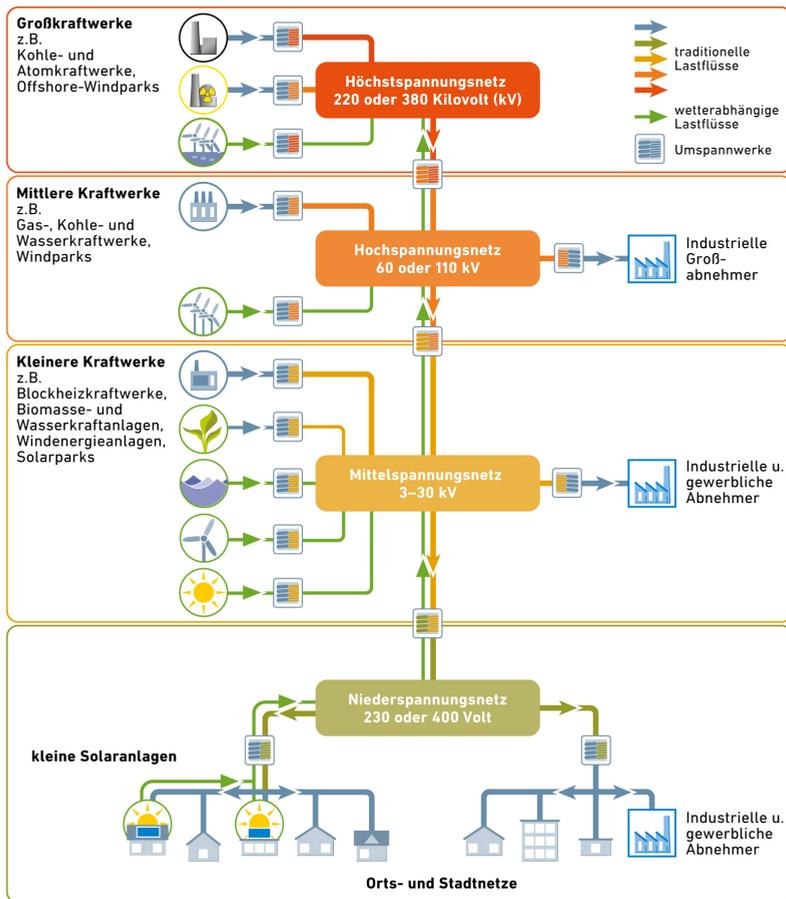


Abb. 2.2: Aufbau und Funktionsweise des deutschen Stromnetzes³⁷

der Großkraftwerke aus dem Höchstspannungsnetz über große Entfernungen zu den Verbrauchsschwerpunkten.³⁵ Die Hochspannungsnetze verteilen den Strom großflächig auf die Mittelspannungsnetze, an die industrielle und gewerbliche Abnehmer angeschlossen sind. Mittelspannungsnetze verteilen den Strom weiter auf die Orts- und Stadtnetze im Niederspannungsbereich. Im Zuge des Ausbaus der Erneuerbaren Energien auf allen Netzebenen, insbesondere im Mittel- und Hochspannungsbereich³⁶, kehren sich die Lastflüsse zeitweise um und der Strom kann von den unteren in die oberen Netzebenen fließen.

An welche Netzebene ein Depot angeschlossen wird, hängt von dem Leistungsbedarf und den technischen Randbedingungen ab, in der Regel jedoch im Mittelspannungs-

³⁵Vgl. Schmidt-Curreli, Knebel und Lawrenz (2016, S. 50).

³⁶Vgl. Bundesnetzagentur (2018, S. 14 f.).

³⁷Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2021).

netz. Hierfür gelten keine allgemeingültigen Vorgaben. In Tabelle 2.1 sind die maximalen Netzanschlusskapazitäten als Orientierungswerte angegeben. Diese sind mit dem zuständigen Netzbetreiber zu identifizieren, da lokale Gegebenheiten im Einzelfall zu anderen Werten führen können.

Tabelle 2.1: Orientierungswerte der maximalen Anschlusskapazitäten in Abhängigkeit der Spannungsebene³⁸

Entnahmespannungsebene	Maximale Kapazität
Hochspannung (110 kV)	> 12.000 kVA
Mittelspannung Sammelschiene (10 kV)	11.000 - 12.000 kVA
Mittelspannung (10 kV)	1.500 - 3.000 kVA
Niederspannung Sammelschiene (0,4 kV)	540 kVA
Niederspannung (0,4 kV)	100 kVA

Einteilung von Stromkunden und Zusammensetzung des Strompreises

Das Bundeskartellamt unterscheidet grundsätzlich zwischen Letztverbrauchern, deren Verbrauch auf Basis einer registrierenden Lastgangsmessung (RLM) oder mit Annahme eines Standardlastprofils (SLP) erfasst wird, wie in Tabelle 2.2 dargestellt.³⁹ SLP-Kunden haben geringe Verbrauchsmengen, hierzu zählen Haushaltskunden und kleinere Gewerbekunden. Bei RLM-Kunden handelt es sich in der Regel um gewerbliche oder industrielle Großverbraucher mit einer jährlichen Entnahme ab 100.000 kWh, wozu zukünftige E-Depots zu zählen sind. Die Zusammensetzung des Strompreises ist für alle Kunden ähnlich und kann in die drei Bestandteile untergliedert werden: i) Steuern, Abgaben und Umlagen, ii) Strombeschaffung und Vertrieb und iii) Netzentgelt. Bei RLM-Kunden besteht das Netzentgelt aus einem Arbeits- und Leistungspreis, abhängig von der Höhe der Jahresbenutzungsdauer und der Spannungsebene, in welcher der Strom entnommen wird.⁴⁰ Die Jahresbenutzungsdauer ergibt sich aus dem Quotienten der Jahresarbeit und der viertelstündig gemessenen Jahreshöchstlast.⁴¹ Das bedeutet, dass eine einzige Lastspitze im Jahr ausschlaggebend für die Kalkulation des Leistungspreises ist und sollte möglichst vermieden werden.

Die Höhe des Strompreises wird bei RLM-Kunden individuell mit dem Lieferanten vereinbart. In Abb. 2.3 ist der arithmetische Mittelwert und die Zusammensetzung des Strompreises von 2019 für Industriekunden für den Abnahmefall 24 GWh/a dar-

³⁸Vgl. Mitnetz Strom (2019); Regionetz GmbH (2019); Stromnetz Hamburg (2018); Westnetz (2019).

³⁹Vgl. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 50).

⁴⁰In Abschnitt A.3 sind die unterschiedlichen Netzentgelte der Spannungsebenen aufgelistet.

⁴¹Nach Anlage 4, Nr. 3 StromNEV.

Tabelle 2.2: Einteilung der Stromkunden

	Haushalt	Kleingewerbe	Großgewerbe / Industrie
Jährlicher Verbrauch	< 10.000 kWh	< 100.000 kWh	≥ 100.000 kWh
Verbrauchserfassung	SLP		RLM
Strompreisbestandteile	- Steuern, Abgaben und Umlagen - Beschaffung und Vertrieb - Netzentgelt:		
Jahresbenutzungsdauer	Arbeits- + ggf. Grundpreis		Arbeits- + Leistungspreis
	-		< 2.500 h ≥ 2.500 h

gestellt. Der Gesamtpreis lag bei der Analyse zwischen 14,11–17,65 ct/kWh.⁴² Die Kosten für Steuern, Abgaben und Umlagen (grau) bildeten dabei den größten Teil mit ca. 58 %. Treibender Kostenfaktor ist dabei die Umlage gemäß dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Die Kosten für die Energiebeschaffung, Vertrieb und Marge (dunkelblau) machten einen Anteil von rund 27 % aus und das Netzentgelt inkl. Messung (hellblau) fällt mit ca. 15 % ins Gewicht.

Unter bestimmten Voraussetzung können Unternehmen gesetzliche Vergünstigungen in Anspruch nehmen und somit bei Steuern, Abgaben und Umlagen sowie bei dem Netzentgelt den Gesamtstrompreis um bis zu 10,7 ct/kWh reduzieren.⁴³ Flottenbetreiber profitieren aktuell kaum von den Vergünstigungen, da sie z. B. nicht zu stromintensiven Unternehmen gezählt werden⁴⁴ und die Stromsteuerentlastung nicht für Strom gewährt wird, der für Elektromobilität Verwendung findet.⁴⁵ Allerdings haben RLM-Kunden⁴⁶ die Möglichkeit zeit- und/oder lastvariable Stromtarife mit dem Lieferanten zu vereinbaren, um die Kosten der Strombeschaffung zu verringern. Bei zeitvariablen Tarifen variieren die Preise der Strombeschaffung je nach Tageszeit (z. B. Tag/Nacht) und bei lastvariablen Tarifen richten sie sich hingegen nach der Menge des Stromverbrauchs.⁴⁷ Zudem gibt es Tarife, die die aktuellen Börsenstrompreise abbilden.⁴⁸

⁴²Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 284 f.), für die Preisauswertungen zum Abnahmefall wurden die Angaben von insgesamt 205 Lieferanten herangezogen.

⁴³Vgl. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 285 f.).

⁴⁴Gemäß § 64 Absatz 1 EEG 2017 können lediglich stromintensive Unternehmen der Anlage 4 EEG 2017 berücksichtigt werden.

⁴⁵Gemäß § 9b Absatz 1 StromStG.

⁴⁶Bei SLP-Kunden wird dies durch intelligente Stromzähler (engl. smart meters) ermöglicht.

⁴⁷Vgl. Heuell (2014, S. 534).

⁴⁸Vgl. Next Kraftwerke (2020).

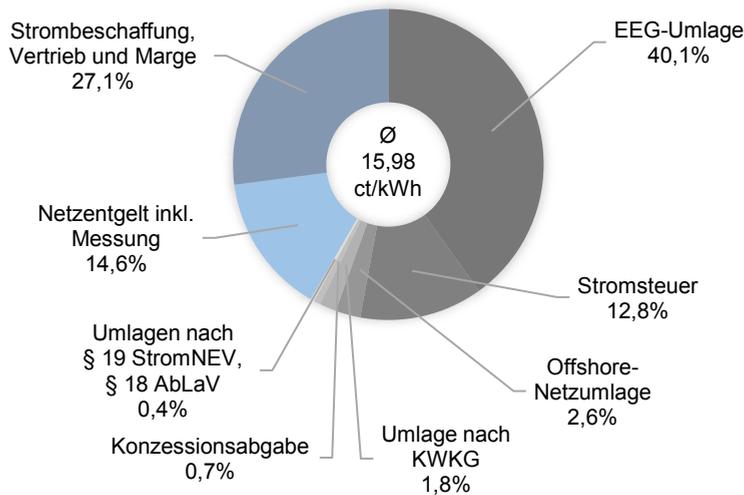


Abb. 2.3: Zusammensetzung des durchschnittlichen Strompreises für Industriekunden (24 GWh/a) in Deutschland 2019 ohne Umsatzsteuer und Vergünstigungen⁴⁹

Durch die Liberalisierung in der Energiewirtschaft ist u. a. Strom zur Handelsware geworden. In Deutschland ist hierfür die Energiebörse *European Energy Exchange* (EEX) der etablierte Marktplatz.⁵⁰ An der EEX kann Strom langfristig am Terminmarkt bis zu sechs Jahre in die Zukunft als auch kurzfristig am Spotmarkt (EPEX SPOT) gehandelt werden. Der Handel auf dem Spotmarkt erfolgt üblicherweise in Stunden- und Zeitblöcken als Auktion einen Tag vor der physischen Erfüllung (Day-Ahead) oder kontinuierlich am selben Tag der Lieferung (Intraday). Die Abb. 2.4 zeigt die Stromproduktion und die Börsenstrompreise (Day Ahead Auktion und Intraday kontinuierlich) in Deutschland für den März 2020. Es ist zu erkennen, dass die Strompreise aufgrund von Angebot und Nachfrage deutlich schwanken. Die Einspeisung von Erneuerbaren Energien (Solar, Wind) tragen wegen ihrer geringen Grenzkosten zur Senkung der Börsenstrompreise bei (sogenannter Merit-Order-Effekt).⁵¹ Falls ein höheres Angebot an Erneuerbaren Energien als prognostiziert wurde auf eine geringe Nachfrage trifft, kann es sogar zu negativen Börsenpreisen kommen.

Zur Auslegung und bestmöglichen Nutzung eines Netzschlusses sowie zur Anwendung variabler Stromtarife ist eine Koordination, Überwachung und Steuerung der Ladevorgänge notwendig.

⁴⁹Nach Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 284).

⁵⁰Vgl. Konstantin (2017, S. 434 ff.), Schiffer (2019, S. 243 ff.).

⁵¹Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019, S. 67).

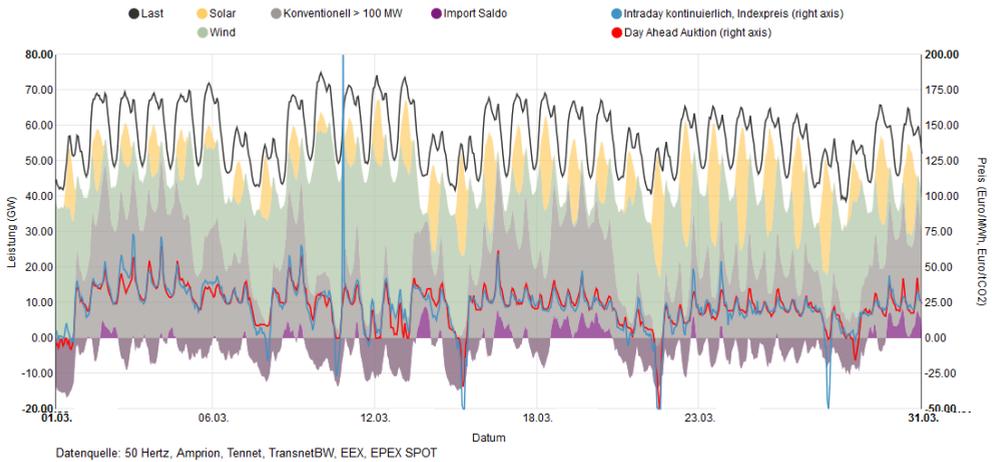


Abb. 2.4: Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland im März 2020⁵²

Lade- und Lastmanagement

Ein Lade- und Lastmanagementsystem nutzt die Ladeflexibilität der Fahrzeugflotte, um Ladevorgänge und die Verteilung der Stromlast zu optimieren. Es existieren verschiedene Ziele zur optimalen Ladung von Elektrofahrzeugen, welche zusammengefasst in Abb. 2.5 dargestellt sind.⁵³

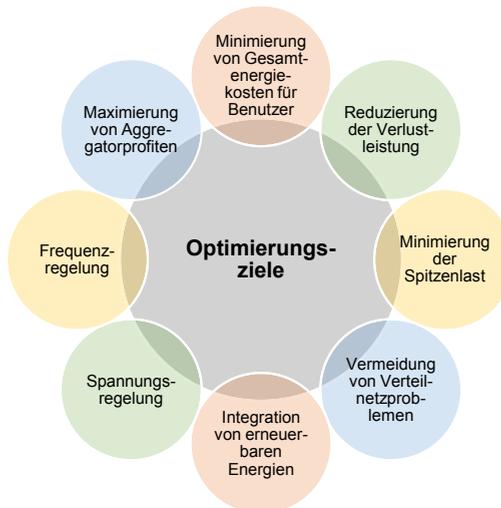


Abb. 2.5: Optimierungsziele für ein Lade- und Lastmanagement⁵⁴

⁵²Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2020).

⁵³Vgl. Amjad, Ahmad, Rehmani und Umer (2018); Hu, Morais, Sousa und Lind (2016).

⁵⁴Nach Amjad et al. (2018)

Für E-Flottenbetreiber sind die Minimierung der Gesamtenergiekosten, die Minimierung der Spitzenlast und die Unterstützung der Integration Erneuerbarer Energien von großer Bedeutung. Je nachdem welche stromnetzseitigen Rahmenbedingungen vorliegen, kann ein Einsatz eines Lade- und Lastmanagementsystem sogar obligatorisch sein. In Abhängigkeit vom Optimierungsziel eignen sich unterschiedliche Optimierungsansätze und -methoden, wie z. B. Heuristiken, die eine einfache Implementierung und zufriedenstellende Lösungen für verschiedene komplexe Probleme liefert.⁵⁵

2.1.3 Ladeschnittstellen im Depot

Die gängigsten Ladeschnittstellen im Depot für elektrische Busse sind in Abb. 2.6 dargestellt und decken ein Leistungsband bis zu 900 kW ab. Prinzipiell besteht die Möglichkeit neben den aufgeführten konduktiven Systemen, induktive Ladesysteme einzusetzen. Diese konnten sich allerdings bis jetzt nicht durchsetzen.⁵⁶ Das Gleiche gilt für die Batteriewechseltechnologie, die größtenteils nur im asiatischen Raum getestet wird.⁵⁷ Grundsätzlich lassen sich die Ladeschnittstellen nach einem manuellen oder automatischen Kontaktierungsverfahren charakterisieren.⁵⁸

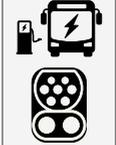
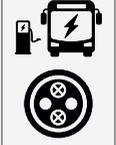
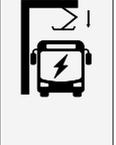
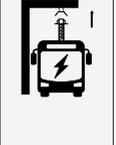
Ladeschnittstellen im Depot							
manuelle Kontaktierung					automatische Kontaktierung		
AC-Laden		DC-Laden			DC-Laden		
Anschluss	Typ 1 / Typ 2 Stecker	CCS Combo 1 / Combo 2 Stecker	CHAdeMO Stecker	GB/T Stecker	ChaoJi Stecker*	Top-down-Pantograph**	Bottom-up-Pantograph**
Leistung bis	43,5 kW	350 kW	400 kW	237,5 kW	900 kW	700 kW**	700 kW**
Region	USA / Europa	USA / Europa, Rest der Welt	weltweit	China	China, Japan	weltweit	weltweit
							
	<small>* ChaoJi Standard ist noch in Entwicklung ** Pantographen sind noch nicht standardisiert *** Pulsladung bis 30s</small>						

Abb. 2.6: Gängige Ladeschnittstellen im Depot⁵⁹

⁵⁵Vgl. Amjad et al. (2018).

⁵⁶Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2020a).

⁵⁷Vgl. Ahmad, Saad Alam, Saad Alsaïdan und Shariff (2020).

⁵⁸Vgl. Boev et al. (2020); Göhlich et al. (2021).

⁵⁹Boev et al. (2020).

Die manuelle Kontaktierung mit einem Stecker wird u. a. wegen der einfachen Handhabung von Flottenbetreibern im Depot bevorzugt. In Europa dominiert der Ladestandard *Combined Charging System (CCS)* mit dem Typ-2-Stecker. Üblicherweise ist eine Ladestation nur mit einem Abgang ausgestattet. Aus Platzgründen kann allerdings die Ladetechnik ebenso von der Ladeschnittstelle räumlich getrennt werden und zudem mehrere Abgänge besitzen, die individuell steuerbar sind (siehe Abb. 2.7). Weiterhin können die kabelgebundenen Schnittstellen mit Befestigungssystemen kombiniert werden, wie z. B. in Abb. 2.8 mit Kabelrollen dargestellt.

Die automatisierten Kontaktierungslösungen werden genutzt, um den Ladevorgang zu beschleunigen und den Komfort für das Personal zu erhöhen. Die gängigsten automatisierten Ladelösungen in Europa bestehen aus einem Pantographensystem. Hierbei ist entweder jedes Fahrzeug mit einem Dachpantographen ausgestattet, der an der Ladestation zu einer Ladehaube angehoben wird. Oder ein an der Ladestation befestigter invertierte Pantograph, der sich auf Kontakte auf dem Fahrzeugdach absenkt.

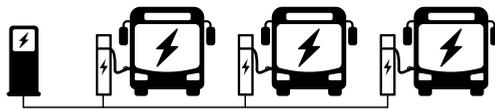


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Ladestation mit drei Ladepunkten⁶⁰



Abb. 2.8: Zuführungsmöglichkeiten der manuellen Kontaktierung⁶¹

2.2 Planung und Betrieb von Busdepots

2.2.1 Konventionelle Busdepots

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) hat die Planung von Busdepots in der VDV-Schrift 822 wie folgt definiert:

„Die Planung eines Betriebshofes [Depots] bedeutet in erster Linie eine Ressourcen- und Prozessbetrachtung und daraus abgeleitet die Festlegung

⁶⁰Boev et al. (2020).

⁶¹Boev et al. (2020).

von Art, Größe und sinnvoller Zuordnung der notwendigen Einzelanlagen mit ihren Einrichtungen. Sie muss auf die speziellen Aufgaben und Unternehmensziele des Verkehrsbetriebes zugeschnitten und zukunftsgerichtet sein sowie einen übersichtlichen und rationellen Einsatz der Arbeitskräfte und möglichst niedrige Investitions- und Betriebskosten gewährleisten.“⁶²

Diese VDV-Schrift dient den Verkehrsunternehmen als Planungshilfe für Neu- und Umbauten von konventionellen Depots, indem der Ablauf aller notwendigen Prozessschritte aufgezeigt wird.

Bei der Gestaltung von Depots müssen verschiedene betriebliche, technische, wirtschaftliche und rechtliche Anforderungen berücksichtigt werden. Die betrieblichen Anforderungen umfassen den Personal- und Fahrzeugeinsatz. Hierzu gehört das Abstellen von Bussen, die Durchführung von Vorbereitungs- und Abschlussarbeiten sowie die Personal- und Fahrzeugverwaltung. Zu den technischen Anforderungen gehören die Durchführung des Fahrzeug-Service, welcher hauptsächlich aus Instandhaltung, Versorgung und Reinigung der Fahrzeuge besteht. Zusammengenommen wird folgende Depot-Infrastruktur benötigt:⁶³

- Ein- und Ausfahrt, Stauräume, Fahrstraßen, Abstellanlagen, Fußwege, Parkplätze für Pkw,
- Anlagen und Einrichtungen für die Instandhaltung, Versorgung und Reinigung der Fahrzeuge und
- Räume und Einrichtungen für das Personal.

Bei Neuplanungen von Depots sind insbesondere wirtschaftliche und rechtliche Kriterien, z. B. Arbeits-, Umwelt-, Brand- und Emissionsschutz, relevant.⁶⁴ Vor allem in städtischen Gebieten, in denen Flächen nur begrenzt zur Verfügung stehen, ist die Flächenaufteilung ein wichtiger Planungsaspekt. Um einen geeigneten Standort zu finden, müssen Vor- und Nachteile wie die Nähe zum verkehrlichen Wirkungsbereich, Aufwendungen für Grundstücke und Anschluss an Infrastrukturen abgewogen werden. Die Größe der benötigten Fläche an einem Standort hängt im Wesentlichen von der Menge der zu stationierenden Busse ab, die ausschlaggebend für die Anzahl an benötigten Depot-Infrastrukturen ist. Die benötigte Fahrzeuganzahl ist wiederum abhängig vom dem zu bedienenden Liniennetz⁶⁵ und der (Fahrzeug-)Umlaufplanung. Ein sogenannter (Fahrzeug-)Umlauf⁶⁶ beschreibt alle Fahrten eines bestimmten Fahrzeugtyps vom Einsetzen vom Depot bis zum Aussetzen zum Depot.⁶⁷ Ein Umlaufplan

⁶²Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 7).

⁶³Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 10).

⁶⁴Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 9).

⁶⁵Eine Bündelung von mehreren Linien, die einen festgelegten Streckenverlauf kennzeichnen.

⁶⁶Im Folgenden wird Fahrzeugumlauf als Umlauf bezeichnet.

⁶⁷Vgl. Schnieder (2015, S. 105).

besteht aus einer Liste von Umläufen, aus denen der erforderliche Fahrzeugbedarf ermittelt werden kann. Zusätzlich ist eine Fahrzeugreserve für die Instandhaltung und den Schienenersatzverkehr zu berücksichtigen. Der VDV empfiehlt eine Gesamtreserve von 10%.⁶⁸

In Abb. 2.9 ist ein Beispieldepot für 100 Busse abgebildet. Die Ziffern 1-18 kennzeichnen die erforderlichen Depot-Infrastrukturen, welche durch mögliche Fahrwege der Fahrzeuge mit Pfeilverbindungen verbunden sind. Die Anzahl der Depot-Infrastrukturen richtet sich in diesem Beispiel nach den empfohlenen Kennzahlen der VDV-Schrift. Der typische Betriebsablauf für konventionell angetriebene Busse sieht wie folgt aus: Busse stellen sich nach Einfahrt auf das Gelände (17) zunächst auf eine Stauraumfläche (12). Die Größe hängt von der Einfahrfrequenz bzw. der Tagesganglinien ab. Von dort können die Busse bei Bedarf zu den Einrichtungen des Fahrzeug-Service (1-7) fahren, wo eine Instandhaltung, Versorgung und Reinigung der Fahrzeuge stattfindet. Die Versorgung mit Treibstoff und Innenreinigung erfolgt im Normalfall täglich. Busse, die keinen Service benötigen, werden auf der Abstellanlage (13) geparkt und warten auf den nächsten Einsatz. Eine Abweichung vom typischen Betriebsablauf kann auftreten, falls Busse direkt wieder eingesetzt werden sollen oder Mängel nicht zeitnah behoben werden können.

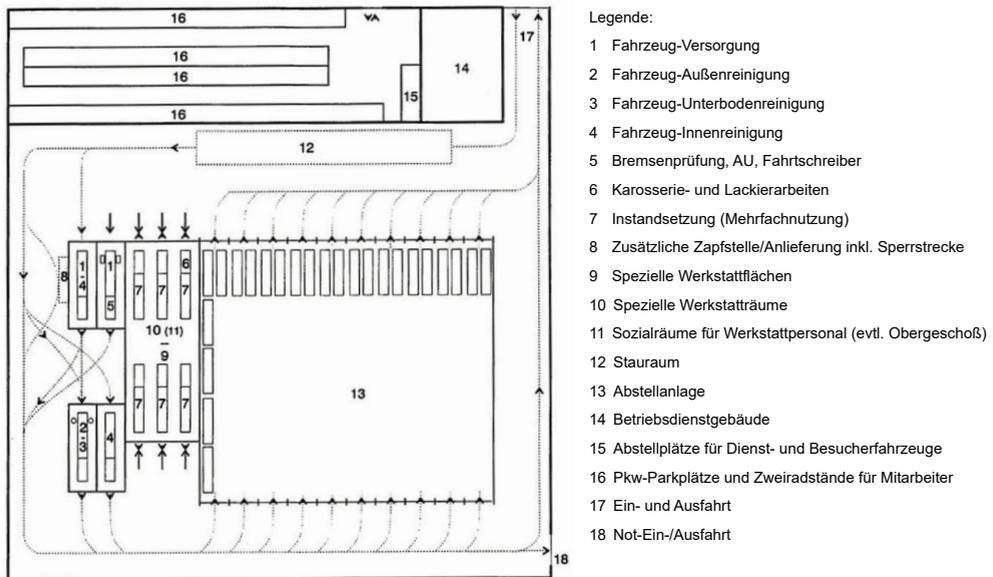


Abb. 2.9: Beispiel (schematisch) für ein Busdepot mit 100 Linienbussen⁶⁹

⁶⁸Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2019, S. 26).

⁶⁹Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 44).

Die Abstellanlage hat eine bedeutende Funktion im Depot und zudem einen großen Flächenbedarf. Zum Schutz vor Witterungseinflüssen und Verringerung von Schallemissionen werden oft Überdachungen oder Abstellhallen genutzt. Letztere haben den Vorteil, dass sich der Aufwand einer Vorkonditionierung des Fahrzeuginnenraums vor Abfahrt reduziert. Gegenüber der Freiabstellung sind überdachte Lösungen allerdings mit höheren Investitionskosten verbunden und die Stützen benötigen zusätzlich Platz. Als Abstellordnung kommen drei Varianten infrage:

- Blockabstellung (in dieser Arbeit mit L, engl. *line*, gekennzeichnet),
- Schrägabstellung in Einzelreihe (DSR, engl. *direct single row*) und
- Schrägabstellung in Doppelreihe (DDR, engl. *direct double row*).

Diese drei Abstellordnungen sind in den Abb. 2.10 und Abb. 2.11 für eine Beispielflotte aus 100 Standard-Bussen skizziert. Dabei ist die Abstellordnung immer ein Kompromiss zwischen dem Belegungsgrad (Buseinheit je Abstellfläche), dem Beweglichkeitsgrad (kleinste Gruppe hintereinander abgestellter Fahrzeuge) und dem Geländeauschnitt.⁷⁰

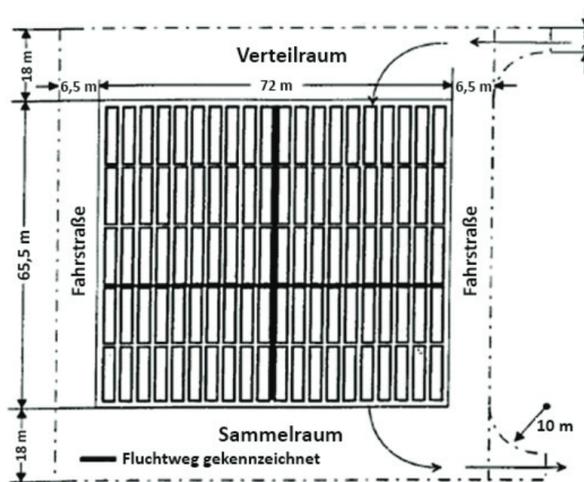


Abb. 2.10: Beispiel für eine Blockabstellung von 100 Linienbussen⁷¹

Die Blockabstellung hat den Vorteil, dass Fahrzeuge mit geringem Abstand zueinander geparkt werden können. Mit Berücksichtigung von Fluchtwegen sowie Fahrstraßen und Rangierflächen auf den Stirnseiten ergibt sich für das Beispiel in Abb. 2.10 ein Flächenbedarf von $86,9 \text{ m}^2 / \text{Bus}$.⁷² Der Belegungsgrad bei der Schrägabstellung ist schlechter,

⁷⁰Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 45).

⁷¹Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b).

⁷²Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 45).

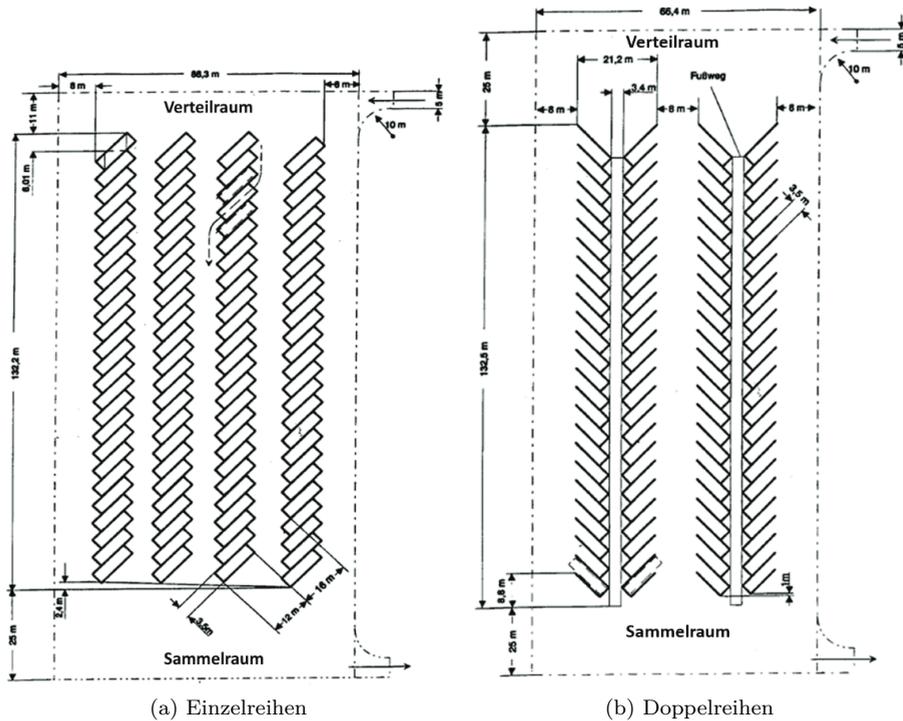


Abb. 2.11: Beispiel für eine Schrägabstellung von 100 Linienbussen⁷⁴

da zusätzliche Fahrwege hinzukommen. In dem Beispiel in Abb. 2.11 beträgt der Flächenbedarf bei Einzelreihen $148,4 \text{ m}^2/\text{Bus}$ und bei Doppelreihen $123,8 \text{ m}^2/\text{Bus}$.⁷³ Bei begrenztem Platz für eine Abstellanlage sollte somit die Blockabstellung präferiert werden.

Allerdings unterscheiden sich die drei Abstellvarianten in ihrem Beweglichkeitsgrad. Bei der Blockabstellung könnte ein Fahrzeug sowohl beim Ein- als auch Ausparken von einem anderen Fahrzeug behindert werden. Umso länger die Reihe hintereinander abgestellter Fahrzeuge ist, desto schlechter wird der Beweglichkeitsgrad. Dem vorteilhaften Belegungsgrad steht dann ein eingeschränkter Zugriff gegenüber. Die Schrägabstellung bietet hier eine wesentlich größere Flexibilität, da jeder Stellplatz ohne Einschränkung genutzt werden kann. Dies setzt allerdings ein Rückwärtsfahren⁷⁵ bei Schrägabstellung in Doppelreihen voraus. Falls dies nicht möglich ist, müssen die

⁷³Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 46f).

⁷⁴Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b).

⁷⁵Der VDV weist darauf hin, dass ein Rückwärtsfahren bzw. -rangieren aus Sicherheitsgründen zu vermeiden ist oder andernfalls die Sicherheit durch Einweiser oder technische Hilfsmittel, z. B. Rückfahrkameras, zu gewährleisten ist.

Fahrzeuge von der Stirnseite abwechselnd links und rechts über den Mittelstreifen ausfahren. Somit hätte man beim Einparken vollste Flexibilität, nur beim Ausparken wäre der Beweglichkeitsgrad kleiner.

Weiterhin ist die Dimensionierung der Abstellanlage vom Geländezuschnitt und den unterschiedlichen Fahrzeugmerkmalen, wie z. B. die Fahrzeuglänge, abhängig. Um bei einer Blockabstellung die Blocklänge vollständig auszunutzen, sollten Busse gleicher Länge hintereinander abgestellt werden. Bei gemischter Abstellung sollte die Blocklänge ein gemeinsames Vielfaches der Längen der Bustypen sein. Hierfür wäre dann allerdings eine Stellplatzzuweisung notwendig. Ebenso muss bei der Disposition, also der Zuweisung eines geeigneten Fahrzeugs und Personal auf einen Fahrzeugumlauf, unter anderem die Zugänglichkeit in der Blockabstellung und die Typenkompatibilität gewährleistet sein.⁷⁶

2.2.2 Depotmanagementsysteme

Hersteller von Depotmanagementsystemen (DMS) versprechen einen effizienteren Betrieb, indem die Prozesse im Depot vernetzt und automatisiert sowie der Personal- und Fahrzeugeinsatz optimiert werden. Solche IT-Systeme werden in der Regel bei größeren Verkehrsbetrieben eingesetzt. Die übernommenen Aufgaben können vielfältig sein. Mit einer Analyse existierender DMS konnten die Hauptaufgaben identifiziert werden, wie Abb. 2.12 zeigt.

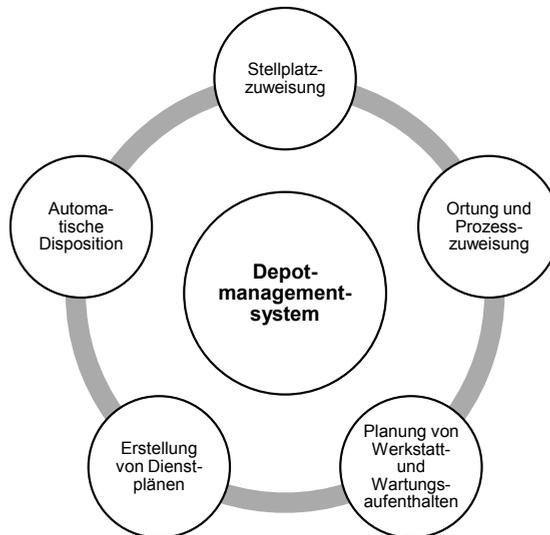


Abb. 2.12: Ermittelte Hauptaufgaben eines Depotmanagementsystems

⁷⁶Vgl. Scholz (2016, S. 208 ff.).

Bei Ankunft im Depot wird der Fahrzeugstatus dem System übermittelt.⁷⁷ Das DMS entscheidet dann, je nach definiertem Betriebsablauf, welche Stationen besucht werden müssen und weist dem Fahrzeug einen geeigneten Stellplatz zu. Durch eine permanente Ortung kann ein Depotmanager nachvollziehen, wo sich die einzelnen Fahrzeuge im Depot befinden. Weiterhin können die erforderlichen Prozesse, wie beispielsweise Reinigung und Versorgung, zugewiesen und Werkstatt- und Wartungsarbeiten überwacht und geplant werden. Aufgrund der Steuerung der Fahrzeugbewegungen kann das Rangieren auf ein Minimum reduziert werden. Außerdem übernimmt ein DMS die Personalplanung und erstellt Dienstpläne. Das System berechnet nach verschiedenen Kriterien den geeignetsten Umlauf und weist diesen einem Fahrzeug zu (Disposition), was dem Fahrpersonal kurz vor Abfahrt mitgeteilt wird.

Im Zuge der Umstellung auf Elektromobilität kann die Integration weiterer IT-Systeme unerlässlich sein. Hierzu zählt zum Beispiel ein Lade- und Lastmanagement⁷⁸ um Ladeprozesse zu steuern und die Ladeinfrastruktur zu überwachen. Es bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten dies in die Systemarchitektur zu integrieren, wie dies in Abb. 2.13 dargestellt ist.

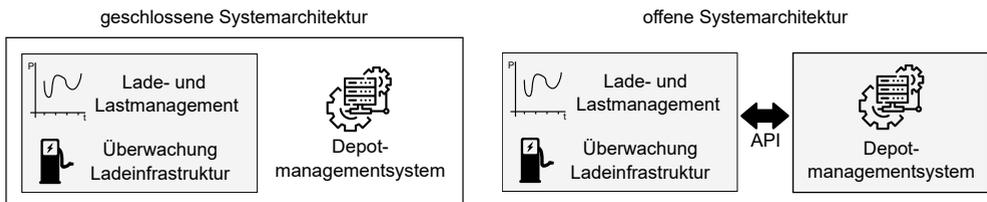


Abb. 2.13: Geschlossene und offene Systemarchitektur eines Depotmanagementsystems⁷⁹

Bei einer geschlossenen Architektur ist das Lade- und Lastmanagement ein Submodul eines DMS. Beide Systeme werden von einem Softwareanbieter bereitgestellt und es werden interne Kommunikationsprotokolle genutzt. Im Gegensatz können bei einer offenen Architektur zwei verschiedene Systeme unterschiedlicher Anbieter über eine standardisierte Programmierschnittstelle *Application Programming Interface* (dt. Programmierschnittstelle) (API) kommunizieren. Solch eine Kommunikationsschnittstelle wird aktuell durch den VDV erarbeitet und soll in der VDV-Schrift 463 veröffentlicht werden. Mit einer offenen Systemarchitektur erhofft man sich mehr Flexibilität bei der Auswahl eines geeigneten Systems.

⁷⁷Vgl. Scholz (2016, S. 212).

⁷⁸Siehe Abschnitt 2.1.2.

⁷⁹Vgl. Boev et al. (2020).

Die Softwareanbieter von Depotmanagementsystemen, die größtenteils Lade- und Lastmanagementlösungen integriert haben, sind folgend aufgelistet:⁸⁰

- IVU Traffic Technologies AG⁸¹
- PSI Transcom GmbH⁸²
- initperdis GmbH⁸³
- COS mbH⁸⁴
- Trapeze Switzerland GmbH⁸⁵
- Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH⁸⁶

Diese DMS unterscheiden sich im Funktionsumfang und sind aufgrund der aktuellen Erarbeitung einer standardisierten API als geschlossene Systemarchitektur aufgebaut.⁸⁷

2.2.3 Zusammenfassung der Anforderungen für Betreiber zur Planung elektrischer Busdepots

Mit der Umstellung auf Elektromobilität ergeben sich weitere Anforderungen für Betreiber zur Planung elektrischer Busdepots. Die VDV-Schrift 825⁸⁸ gibt einen groben Überblick über die zusätzlichen Anforderungen alternativer Fahrzeugtechnologien an Depots und Werkstätten. Die relevanten betrieblichen und technischen Anforderungen zur Planung von E-Depots für batterieelektrische Busse sind aus der VDV-Schrift in Abb. 2.14 zusammengefasst und werden im Folgenden erläutert. Die Anforderungen wurden zudem im Rahmen des Forschungsprojekts Forschungscampus Mobility2Grid⁸⁹ mit den beteiligten Flottenbetreibern Berliner Verkehrsbetriebe und Berliner Stadtreinigung diskutiert und konkretisiert.⁹⁰

Es ist möglich bestehende Depots schrittweise bei laufendem Betrieb umzustellen oder an einem anderen Standort neu zu bauen. Ein wichtiger Planungsaspekt ist die Festlegung einer oder mehrerer Ladestrategie(n)⁹¹ mit der passenden Fahrzeug- und

⁸⁰Keine Gewähr auf Vollständigkeit.

⁸¹Siehe IVU Traffic Technologies AG (2020).

⁸²Siehe PSI Transcom GmbH (2020).

⁸³Siehe Meissner (2019).

⁸⁴Siehe COS GmbH (2020).

⁸⁵Siehe Trapeze Switzerland GmbH (2017).

⁸⁶Siehe Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH (2020).

⁸⁷Die PSI Transcom GmbH erprobt die offene Systemarchitektur gemeinsam mit der Hamburger Hochbahn AG (PSI Transcom GmbH (2021)).

⁸⁸Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2015, 2020b).

⁸⁹Vgl. Göhlich und Raab (2021).

⁹⁰Vgl. Chen und Hesse (2021 (noch nicht veröffentlicht)); Lauth et al. (2021 (noch nicht veröffentlicht)); Tost (2021 (noch nicht veröffentlicht)).

⁹¹Siehe Unterabschnitt 2.1.1.

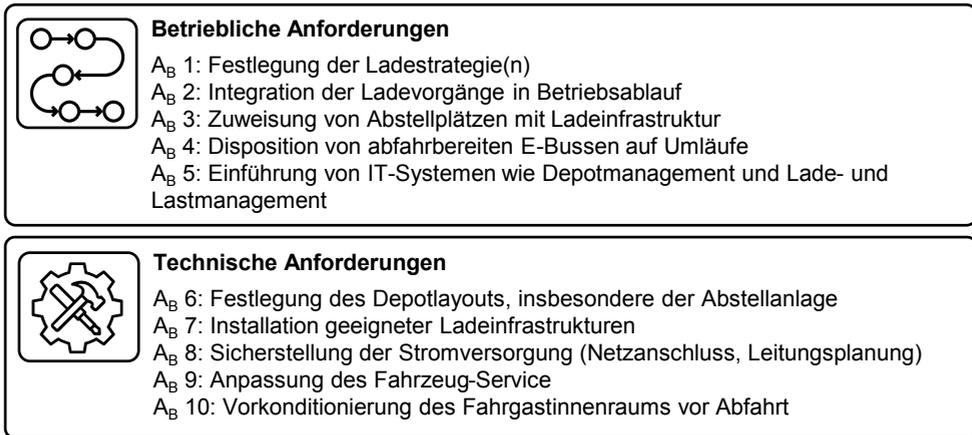


Abb. 2.14: Übersicht der betrieblichen und technischen Anforderungen für Betreiber (A_B) zur Planung von Depots für batterieelektrische Stadtbusse

Ladeinfrastrukturtechnologie, da diese Einfluss auf den Energie- und Leistungsbedarf sowie den erforderlichen Platzbedarf besitzen (A_B 1).

Die betrieblichen Anforderungen beruhen auf der Notwendigkeit der Integration der Ladevorgänge in den Betriebsablauf (A_B 2).⁹² Hierzu zählen die Zuweisung der ein-fahrenden E-Busse auf einen Abstellplatz mit Ladeinfrastruktur (A_B 3) und nach er-folgreicher Ladung die Disposition des Fahrzeugs auf einen geeigneten Umlauf (A_B 4). Für größere Flotten kann für den Depotbetrieb ein DMS in Kombination mit einem Lade- und Lastmanagement zur Überwachung und Planung der Ladevorgänge not-wendig werden (A_B 5).⁹³

Die Bestimmung des Depotlayouts (A_B 6) wird maßgeblich von der Größe der Ab-stellanlage beeinflusst. Zusätzlich zu den benötigten Depot-Infrastrukturen⁹⁴ müssen Ladeinfrastrukturen installiert werden (A_B 7). Der Energie- und Leistungsbedarf so-wie die Standzeiten der Fahrzeuge im Depot hängen hauptsächlich von der Lade-strategie ab. Fahrzeuge, die in der Regel außerhalb des Depots geladen werden, haben demzufolge einen geringeren Energiebedarf, als Fahrzeuge die ausschließlich im De-pot laden. Trotzdem kann unabhängig der Ladestrategie eine Ladeinfrastruktur im Depot erforderlich sein. Die Depotladeinfrastruktur unterscheidet sich hauptsächlich im Platzbedarf, der Ladeschnittstelle und dem Leistungsband.⁹⁵ Dabei stellt sich die Frage, welche am geeignetsten für das vorgesehene Depotkonzept ist. Zudem muss ent-schieden werden, wie viele Ladeinfrastrukturen für die Fahrzeugflotte notwendig sind,

⁹²Siehe Abschnitt 2.2.

⁹³Siehe Unterabschnitt 2.2.2.

⁹⁴Siehe Unterabschnitt 2.2.1.

⁹⁵Siehe Unterabschnitt 2.1.3.

was vorrangig vom Gleichzeitigkeitsfaktor⁹⁶ abhängig ist.

Für die Ladeprozesse muss eine ausreichend dimensionierte Stromversorgung sichergestellt werden (A_B 8). Der Anschluss eines Depots an das öffentliche Netz eines Verteilnetzbetreibers stellt den Regelfall dar.⁹⁷ Durch den hohen Leistungsbedarf ist mindestens eine Anbindung an das Mittelspannungsnetz (1.500–12.000 kVA) erforderlich. Der Netzbetreiber muss frühzeitig eingebunden werden, da je nach gegebener Infrastruktur mit einer Planungszeit von 1-5 Jahren zu rechnen ist.⁹⁸ Weiterhin ist ein Konzept zur Verteilung der Stromleitungen im Depot notwendig.

Für die Fahrzeuginstandhaltung muss ein Konzept, das für elektrische Fahrzeuge geeignet ist, erarbeitet werden (A_B 9).⁹⁹ Hierbei sind u. a. der Ausstattungsgrad der Werkstatt (z. B. Dacharbeitsstände), die Personalqualifikation und die Werkstattpkapazität zu berücksichtigen. Weiterhin kann die Änderung des täglichen Reinigungsprozesses notwendig werden, um Ladevorgänge nicht zu unterbrechen.¹⁰⁰

Eine besondere Herausforderung ist die Gewährleistung einer komfortablen und ausreichenden Heizleistung während des Fahrgastbetriebs aufgrund des hohen Energiebedarfs.¹⁰¹ Daher wird ein Vorkonditionieren des Fahrgastinnenraums durch ein definiertes Vorheizen vor dem Verlassen des Depots empfohlen (A_B 10).

2.2.4 Beispiele elektrischer Busdepots

Nachdem viele Pilotprojekte von Verkehrsbetrieben abgeschlossen sind, rücken mit zunehmender Vergrößerung der Elektrobussflotte die Depots in den Vordergrund. Entweder werden neue Depots geplant oder bestehende umgerüstet. Im Folgenden werden aktuelle Beispiele elektrischer Busdepots mit ihren Besonderheiten vorgestellt.

Seit 2019 ist das auf E-Mobilität ausgelegte neuentstandene Busdepot der Hamburger Hochbahn AG im Stadtteil Alsterdorf in Betrieb.¹⁰² Es bietet Platz für 240 emissionsfreie Busse, die in Blockabstellung unter insgesamt sechs Überdachungen parken und dort über eine hängende Kabelvorrichtung mit Druckluft und Strom versorgt werden können (siehe Abb. 2.15). Die Elektrobusse sollen hauptsächlich über Nacht geladen werden. Für die Sicherstellung der Energieversorgung wurde ein 110/20 kV

⁹⁶Der Gleichzeitigkeitsfaktor gibt an, wie viele Verbraucher gleichzeitig im Betrieb sind und dient zur Bestimmung der Auslastung zur Dimensionierung elektrischer Anlagen Kasicki (2018, S. 313).

⁹⁷Siehe Abschnitt 2.1.2; Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016a, S. 15).

⁹⁸Vgl. Schneider (2019, S. 25).

⁹⁹Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2015, S. 24 f.).

¹⁰⁰Vgl. Müller (2018).

¹⁰¹Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2015, S. 18).

¹⁰²Vgl. Hamburger Hochbahn AG (2020); Muth (2019).

Umspannwerk errichtet. Ein Depotmanagementsystem übernimmt die automatische Steuerung der Betriebsabläufe und Ladeprozesse.



Abb. 2.15: E-Depot der Hamburger Hochbahn AG im Stadtteil Alsterdorf¹⁰³

Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) haben sich zunächst für den Umbau eines existierenden Depots in der Indira-Gandhi-Str. bei gleichzeitigem Betrieb mit Dieselbussen entschieden.¹⁰⁴ Seit 2018 wurden stufenweise bis zu 119 Ladestationen mit einer Leistung zwischen 60–150 kW errichtet. Wie in Abb. 2.16 zu sehen, stehen die Busse in Freiabstellung im Block mit den Ladestationen zwischen den Reihen, was den Reihenabstand zur vorherigen Abstellung etwas erhöht. Eine neue Anbindung an das Mittelspannungsnetz stellt die Energieversorgung sicher.

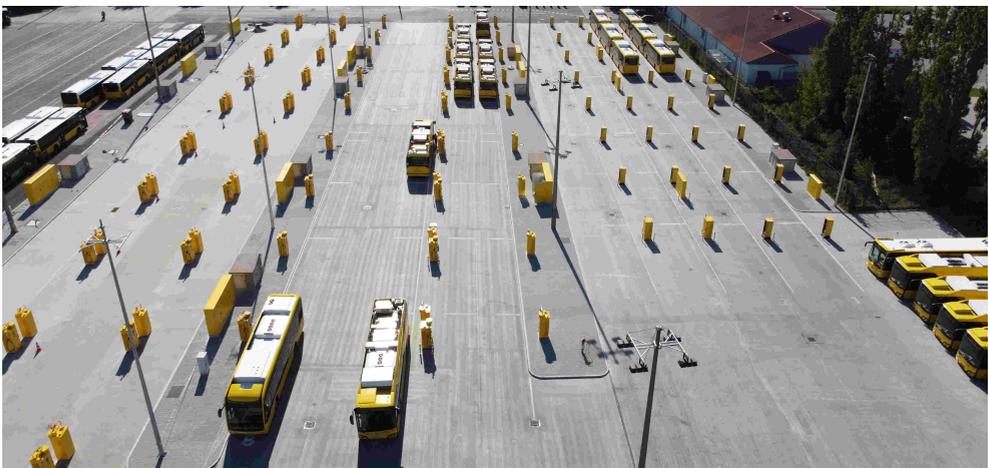


Abb. 2.16: Ladesäulen auf dem Depot der BVG¹⁰⁵

¹⁰³Foto: David Goltz für die Hamburger Hochbahn AG.

¹⁰⁴Vgl. Hesse und Weber (2020).

¹⁰⁵Wiedergegeben mit Erlaubnis der BVG.

Im Flughafengebiet Amsterdam Schiphol wurden zwei Busdepots mit Ladeinfrastruktur ausgestattet und 2018 in Betrieb genommen.¹⁰⁶ Mit einem Stromabnehmer können sich die Elektrobusse mit den an Traversen befestigten Ladehauben verbinden, wie in Abb. 2.17 zu sehen. Das Konzept sieht eine Kombination der Ladestrategien Gelegenheits- und Depotladung vor, indem die Busse wahlweise mit einer Leistung von 30 kW (über Nacht) oder 450 kW (tagsüber) über nur eine Schnittstelle geladen werden können. Die Busse stehen wie im vorherigen Beispiel in Freiabstellung in einem Block (in Abb. 2.17 oben links).



Abb. 2.17: Depot am Flughafen Amsterdam Schiphol¹⁰⁷

Weitere bekannte E-Depots sind in Wiesbaden¹⁰⁸, Köln¹⁰⁹, Hamburg Holstein¹¹⁰, Osnabrück¹¹¹ am Entstehen.

2.3 Simulations- und Optimierungsmethoden

Simulations- und Optimierungsmethoden spielen eine große Rolle in vielen industriellen Bereichen der Ingenieur-, Natur- und Wirtschaftswissenschaften. Die Simulationstechnik gilt als ein allgemein anerkanntes Hilfsmittel bei Planung, Realisierung und Betrieb von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, wie in Abb. 2.18

¹⁰⁶Vgl. Heliox (2018).

¹⁰⁷©Heliox, wiedergegeben mit Erlaubnis von Heliox, Anbieter von Ladeinfrastruktur für E-Busse und E-LKW; ©Google.

¹⁰⁸Vgl. Giesen (2020).

¹⁰⁹Vgl. Anemüller (2020).

¹¹⁰Vgl. Müller (2018).

¹¹¹Vgl. Kossow und Müller (2020).

dargestellt.¹¹² Busdepots sind mit diesen Systembereichen aufgrund der Abläufe vergleichbar. Dort wird fast ausschließlich eine diskrete, ereignisorientierte Simulation (Ablaufsimulation) eingesetzt, um das dynamische Systemverhalten abzubilden. Die Veränderungen der Systemzustände werden typischerweise durch Ereignisse verursacht, beispielsweise durch die Ankunft eines Fahrzeugs oder den Ausfall einer Maschine.¹¹³

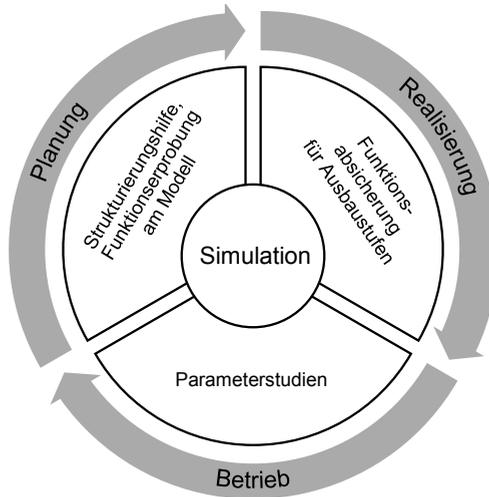


Abb. 2.18: Anwendungsfelder der Simulation nach VDI 3633¹¹⁴

Der Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) definiert die Simulation wie folgt:

„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“¹¹⁵

Die Durchführung einer Simulation durchläuft den in Abb. 2.19 dargestellten allgemeinen Zyklus.¹¹⁶ Zunächst wird das zu untersuchende reale System abstrahiert und modelliert. Mit der Ausführung von Experimenten erhält man Simulationsergebnisse, die im nächsten Schritt interpretiert werden, um Schlussfolgerungen für das reale System ziehen zu können. Durch Variation der Modellparameter kann die Genauigkeit des Systemabbilds in der Simulation verbessert werden.

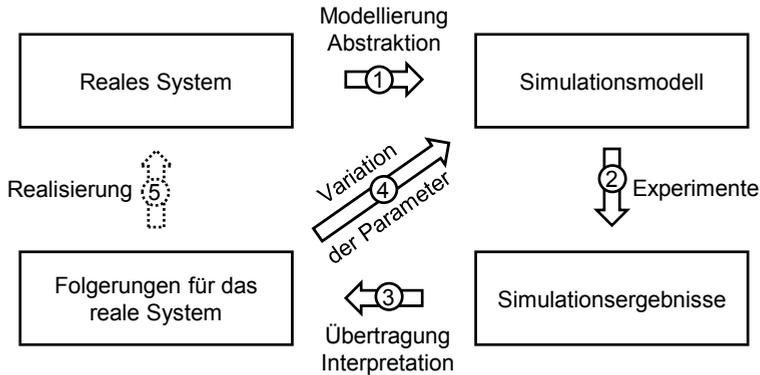
¹¹²Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 4).

¹¹³Rose und März (2011, S. 14); Kuhn und Wenzel (2008, S. 79).

¹¹⁴Eigene Darstellung nach Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 5), wiedergegeben mit Erlaubnis des Vereins Deutscher Ingenieure e.V.

¹¹⁵Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 3).

¹¹⁶Vgl. Baudach et al. (2013, S. 371).

Abb. 2.19: Allgemeiner Simulationszyklus¹¹⁷

Die Grundlagen der Vorgehensweise zur Durchführung einer Simulationsstudie von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen sind in der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 beschrieben.¹¹⁸ In Abb. 2.20 ist die prinzipielle Bearbeitungsreihenfolge dargestellt mit den sieben Phasen (Ellipsen) und den dazugehörigen Phaseergebnissen (Rechtecke).

Grundsätzlich sind zwischen allen Phasen Iterationsschleifen möglich und sinnvoll, wenn das Ergebnis der vorherigen Phase nicht den Erwartungen an das erzielte Ergebnis entspricht.¹¹⁹ Zu Beginn wird die Zielerreichung definiert und die durchzuführenden Aufgaben festgelegt. Es folgt eine Systemanalyse zur Aufdeckung relevanter Merkmale und Wirkungszusammenhänge des Untersuchungsobjektes.¹²⁰ Das Ergebnis der Analyse ist ein gedanklich abstrahiertes, nicht experimentierbares Konzeptmodell.¹²¹ Dieses Modell wird in den folgenden Phasen formalisiert und anschließend in ein ausführbares Softwaremodell überführt. Parallel hierzu findet eine Datenbeschaffung und -aufbereitung statt. Die letzte Phase sieht eine zielgerichtete empirische Untersuchung des Modellverhaltens durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischer Parameter- oder Strukturvariation vor.¹²² Begleitend zu allen Phasen wird eine Verifikation und Validierung durchgeführt, um die Phaseergebnisse auf ihre Korrektheit („Ist das Modell richtig?“)¹²³ und Eignung („Ist es das richtige Modell?“)¹²⁴ zu prüfen.¹²⁵

¹¹⁷Eigene Darstellung nach Baudach et al. (2013, S. 372); ASIM Fachgruppe 4.5.6 (1997).

¹¹⁸Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014).

¹¹⁹Vgl. Wenzel (2018, S. 21).

¹²⁰Vgl. Grundig (2018, S. 232).

¹²¹Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 22).

¹²²Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 3).

¹²³Vgl. Rabe, Spieckermann und Wenzel (2008, S. 14).

¹²⁴Vgl. Rabe et al. (2008, S. 15).

¹²⁵Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 37).

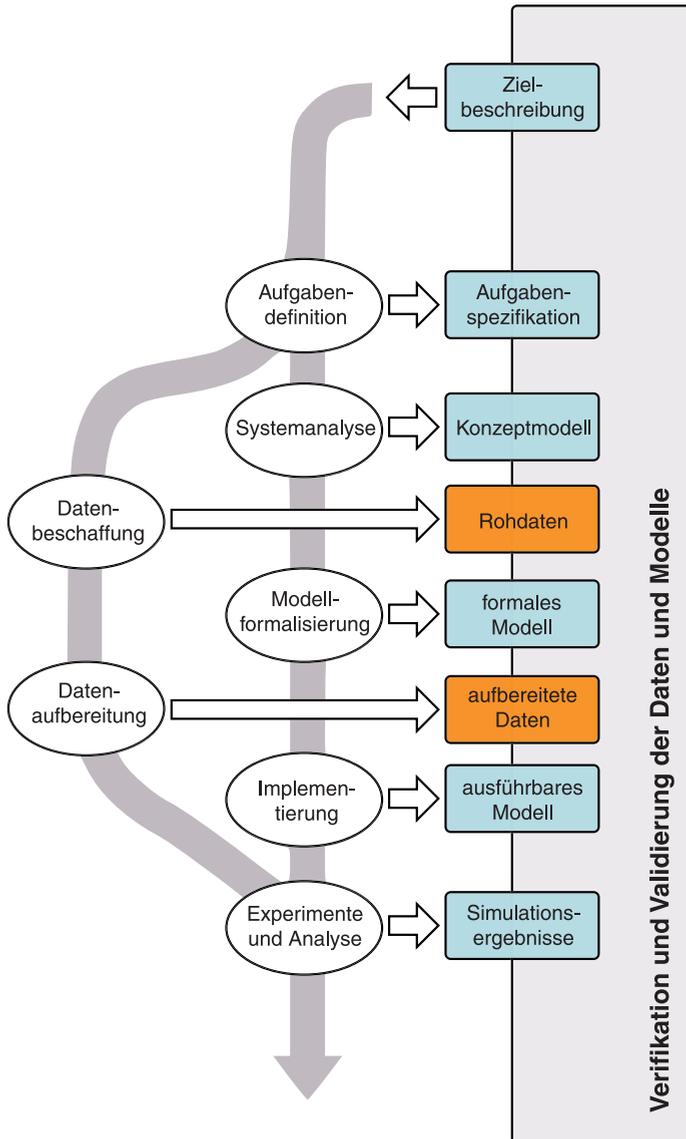


Abb. 2.20: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie nach VDI 3633¹²⁶

Neben der ereignisorientierten Simulation ist die mathematische Optimierung¹²⁷ eine weitere leistungsfähige Methode zur Lösung einer Vielzahl strategischer, taktischer und operativer Problemstellungen in der Verkehrs- und Transportlogistik.¹²⁸ Je nach Problemstellung werden diese aufgrund ihrer methodischen Stärken und Schwächen

¹²⁶Verein deutscher Ingenieure (2014), wiedergegeben mit Erlaubnis des VDI e.V.

¹²⁷Zur Lösung von Minimierungs- und Maximierungsproblemen mit Nebenbedingungen in Form von Gleichungen und Ungleichungen.

¹²⁸Vgl. Baudach et al. (2013, S. 340 f.).

üblicherweise getrennt voneinander eingesetzt. In Abb. 2.21 sind die Unterschiede der beiden Methoden gegenübergestellt.

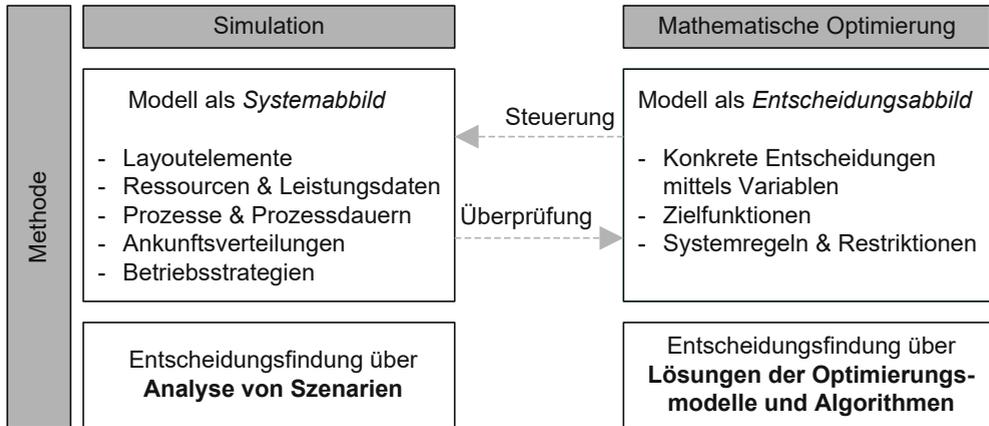


Abb. 2.21: Gegenüberstellung Simulation und Optimierung¹²⁹

Der Vorteil der Simulation ist die realitätsnahe Abbildung komplexer Modelle mit einem hohen Detaillierungsgrad.¹³⁰ Allerdings kann dies den Aufwand zur Entscheidungsfindung erhöhen, da üblicherweise unterschiedliche Szenarien analysiert werden müssen.¹³¹ Im Gegensatz können bei der mathematischen Optimierung eine Vielzahl an Entscheidungen getroffen werden, jedoch mit niedrigerem Detaillierungsgrad.

Wie die Stärken der beiden Methoden Simulation und mathematische Optimierung durch eine Verknüpfung genutzt werden können, ist in der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 12 beschrieben.¹³² Diese Richtlinie charakterisiert verschiedene Optimierungsprobleme und kategorisiert mögliche sequenzielle und hierarchische Arten der Verknüpfung. In der Literatur wird diese Kombination auch simulationsgestützte bzw. simulationsbasierte Optimierung genannt und kommt zum Einsatz, sobald eine analytische Ermittlung von Zielfunktionswerten nicht möglich ist.¹³³ Zudem sind in Logistik- und Produktionssystemen oft mehrere Ziele gleichzeitig zu erreichen, wofür sich überwiegend heuristische Optimierungsverfahren bzw. -algorithmen eignen.¹³⁴

¹²⁹Eigene Darstellung nach Baudach et al. (2013, S. 341).

¹³⁰Vgl. März und Weigert (2011, S. 18); Baudach et al. (2013, S. 340 f.).

¹³¹Vgl. Baudach et al. (2013, S. 340).

¹³²Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2020).

¹³³Vgl. März und Weigert (2011, S. 3 ff.); März (2019, S. 366 ff.).

¹³⁴Vgl. Krug und Rose (2011, S. 21).

2.4 Verwandte wissenschaftliche Publikationen

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die wichtigsten verwandten Publikationen in der Wissenschaft, die Themenbereiche adressieren, die eine wesentliche Rolle bei der Planung von E-Depots spielen. Die Publikationen sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Die Themenbereiche beruhen auf den Anforderungen an Betreiber (siehe Abb. 2.14). Im Folgenden wird der aktuelle Stand der 6 Themenbereiche

- Analyse von Ladestrategien (A_B 1),
- Betriebsabläufe im Depot (A_B 2, A_B 9),
- Stellplatzzuweisung (A_B 3),
- Dispositionsstrategien (A_B 4),
- Lade- und Lastmanagement (A_B 5, A_B 7, A_B 8, A_B 10)¹³⁵ und
- Layoutplanung Busdepot (A_B 6) dargelegt und diskutiert.

In der Literatur gibt es zahlreiche Studien, die Ladestrategien für den batterieelektrischen Stadtbusverkehr technisch-wirtschaftlich untersuchen und anhand der Gesamtkosten bewerten, wie in Jefferies und Göhlich (2020), Lajunen (2018), Kunith (2017) und Meishner, Satvat und Sauer (2017). Der Fokus der Arbeiten liegt auf den Ladestrategien Ladung im Depot und Gelegenheitsladung an Endhaltestellen. Jedoch werden in den Untersuchungen nur sehr vereinfachte Annahmen für das Depot getroffen und somit sind die Auswirkungen auf ein Depot, abgesehen von dem Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturbedarf, unklar.

Der Betriebsablauf eines Busdepots und die Integration von Lademöglichkeiten wurden durch Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019) ermittelt. Im Rahmen einer Studie zu selbstfahrenden Bussen in Depots haben Lauber, Sax und Wiedemann (2018) den Betriebsablauf in Stuttgart-Gaisburg identifiziert und die Dauer der einzelnen Prozessschritte erfasst. Im Durchschnitt benötigen die Prozesse für die Versorgung und tägliche Reinigung der Busse 7 min, die Außenreinigung 4 min und die notwendigen Fahrzeugbewegungen dauern zwischen 0,5 min und 3 min.

Ein allgemeiner Ablauf der Stellplatzzuweisung und Disposition von konventionellen Bussen und welche Abhängigkeiten zu anderen System bestehen wurde von Scholz (2016, S. 208 ff.) beschrieben. Winter (1999) hat in seiner Dissertation die Zuweisung von Stellplätzen und die Disposition von Fahrzeugen auf Umläufe in Straßenbahndepots untersucht. Er zeigte zudem die Übertragbarkeit der Methode auf konventionelle Busdepots und Übersee-Containanerterminals. Er berücksichtigt zwar die Blockabstellung von Fahrzeugen, allerdings wurde die Annahme getroffen, dass der Abstand

¹³⁵In der Literatur wird bei Untersuchungen zum Lade- und Lastmanagement größtenteils mehrere Betreiberanforderungen adressiert und daher hier zusammengefasst.

Tabelle 2.3: Übersicht verwandte wissenschaftliche Publikationen

Quelle	Fallstudie	Fahrzeugtyp	Analyse von Ladestrategien	Betriebsabläufe im Depot	Stellplatzzuweisung	Dispositionsstrategien	Lade- und Lastmanagement
Jefferies und Göhlich (2020)	Berlin	E-Bus	✓				
Lajunen (2018)	Finland	E-Bus	✓				
Kunith (2017)	Berlin	E-Bus	✓				
Meishner et al. (2017)	Barcelona, Oberhausen, Bremen	E-Bus	✓				
Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019)	Berlin	E-Bus	✓	✓			✓
Lauber et al. (2018)	Stuttgart	E-Bus	✓	✓	(✓)		
Scholz (2016)		Bus		✓	(✓)	(✓)	
Winter (1999)	Wolfsburg	Bus, Tram			✓	✓	
Hamdoui et al. (2006, 2007)		Bus			✓	✓	
Rinaldi et al. (2018)	Luxemburg	E-Bus			✓	✓	(✓)
Messaoudi und Oulamara (2019)	Frankreich	E-Bus			✓	✓	✓
Amjad et al. (2018)		E-Auto					✓
Hu et al. (2016)		E-Auto					✓
Detzler (2017)		E-Auto					✓
Wei et al. (2018)		E-Auto			(✓)		✓
Dietmannsberger et al. (2016, 2017)	Hamburg	E-Bus					✓
Jahic et al. (2019a, 2019b, 2019c)	Hamburg	E-Bus				(✓)	✓
Wang et al. (2018)	Shenzhen	E-Bus				(✓)	✓
Houbbadi et al. (2019)		E-Bus					✓
Gallet et al. (2019)	Singapur	E-Bus				(✓)	✓

untersucht ✓; teilweise untersucht (✓)

zwischen hintereinander abgestellten Bussen ausreichend groß ist und diese sich somit nicht blockieren können. Dies ist aufgrund des begrenzten Platzes in Busdepots normalerweise nicht der Fall. Eine Erweiterung des Stellplatz- und Dispositionsproblems von konventionellen Flotten für eine einfache Blockabstellung wurde von Hamdouni et al. (2006) sowie von Hamdouni et al. (2007) mathematisch beschrieben und theoretisch untersucht. Es sind jedoch nur zwei Arbeiten bekannt, die die Ladethematik beim Parken und Disponieren adressieren. Die Autoren Rinaldi et al. (2018) stellten eine Methode zur optimalen Disposition von Elektro- und Hybridbussen an Endhaltestellen unter Berücksichtigung von Ladezeitbeschränkungen vor. Messaoudi und Oulamara (2019) haben ein Optimierungsmodell für die Umlaufplanung von Elektrobussen entwickelt, das bereits Stellplatz- und Ladebeschränkungen im Depot berücksichtigt.

In der Literatur existieren bereits einige Methoden für das intelligente Laden von Pkw-Flotten, wie beispielsweise von Wei et al. (2018) und Detzler (2017) entwickelt. Amjad et al. (2018) und Hu et al. (2016) haben unterschiedliche Methoden in einem Review analysiert und kategorisiert. Im Bereich von Elektrobussen mit ihren besonderen Rahmenbedingungen sind im Vergleich zu Pkw-Flotten allerdings nur wenige Arbeiten bekannt.

Dietmannsberger et al. (2017) haben ein Modell entwickelt, um den Leistungs- und Energiebedarf von Elektrobusflotten, die ausschließlich im Depot laden, zu berechnen.¹³⁶ In der Studie wurden alle acht Depots der Hamburger Hochbahn AG analysiert. Der maximale Leistungsbedarf der Depots für eine Vollelektrifizierung der Flotte liegt zwischen 4,4 MW und 15,1 MW und ist abhängig von der Anzahl, dem Energiebedarf und dem Ladeverhalten der Busse. Das Modell berücksichtigt jedoch nicht die Abläufe im Depot und wendet nur einfache Ladealgorithmen an.

Die Autoren Jahic et al. (2019b) haben das Ladeverhalten von Elektrobussen in Depots genauer analysiert und zwei Algorithmen zur Minimierung von Lastspitzen vorgestellt.¹³⁷ Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe der Algorithmen das Lastprofil des Depots mit 127 E-Bussen in Alsterdorf der Hamburger Hochbahn AG um 24–27 % abgeflacht werden kann. Houbbadi et al. (2019) haben eine Lademethode für größere Elektrobusflotten in einem Depot vorgestellt, welche zusätzlich die Alterung der Batterie minimiert. Ein Echtzeit-Lademanagementsystem namens bCharge wurde von Wang et al. (2018) entwickelt, welches die Betriebs- und Ladekosten für große Elektrobusflotten minimieren kann. Am Beispiel der chinesischen Stadt Shenzhen konnte gezeigt werden, dass die Ladekosten für die 16.359 Elektrobusse um 17,8 % gesenkt werden können.

¹³⁶Siehe hierzu auch Dietmannsberger et al. (2016).

¹³⁷Siehe hierzu auch Jahic et al. (2019a, 2019c).

Alle drei Modelle vernachlässigen allerdings die Prozesse im Depot, die einen erheblichen Einfluss auf die verfügbare Ladezeit haben können, wie durch Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019) gezeigt wurde. Des Weiteren wird eine mögliche Blockierung der Fahrzeuge auf der Abstellanlage nicht beachtet.

Gallet et al. (2019) haben ein agentenbasiertes mikroskopisches Modell für den Betrieb und das Laden von Elektrobussen entwickelt, um verschiedene Elektrifizierungsszenarien in Großstädten, wie z. B. Singapur, zu untersuchen. Die Endhaltestellen und Depots besitzen eine begrenzte Kapazität an Stellplätzen, die mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden können. Das Nachrücken an Endhaltestellen sowie die Disposition von Fahrzeugen erfolgt im Modell nach einfachen Regeln: zufällig, First-In-First-Out, Last-In-Last-Out, höchster SoC zuerst und niedrigster SoC zuerst.

Es wurden keine Publikationen gefunden, die Methoden zur Layoutplanung für Busdepots, insbesondere zur Konfiguration der Abstellanlage, adressieren.

3 Forschungsumfang

In diesem Kapitel wird der Forschungsbedarf aufgezeigt und die daraus abgeleiteten Forschungsfragen definiert. Im Anschluss werden die Zielsetzung und die Lösungsansätze vorgestellt sowie die Arbeit abgegrenzt.

3.1 Forschungsbedarf

Mit zunehmendem Anteil von elektrischen Bussen ergeben sich neue Herausforderungen für die Betreiber, insbesondere für die Planung und den Betrieb von Depots.¹³⁸

Die Betreiber stehen vor der Aufgabe, geeignete Ladeinfrastrukturen (A_B 7) in typischerweise platzbeschränkten Depots bereitzustellen und eine ausreichend dimensionierte Stromversorgung (A_B 8) für den hohen Energie- und Leistungsbedarf der Elektrofahrzeuge zu gewährleisten. Bei einer größeren Anzahl an elektrischen Bussen (ca. 50+) können Lade- und Lastmanagementsysteme (A_B 5) zur Überwachung und Regelung der Ladeprozesse notwendig werden. Das Gleiche gilt für die Gewährleistung eines effizienten Betriebs durch ein Depotmanagementsystem (A_B 5), mit dem Ziel, Fahrzeugbewegungen zu kontrollieren (A_B 3) und abfahrbereite Fahrzeuge auf Umläufe zu disponieren (A_B 4). Die Auswirkungen der Integration des Ladeprozesses (A_B 2), inklusive der Vorkonditionierung des Fahrgastinnenraums vor Abfahrt (A_B 10), in den Betriebsablauf im Depot sind unklar. Dies betrifft ebenso die Anpassung des Fahrzeug-Service (A_B 9). Zudem ist ungewiss, wie die Wahl der Ladestrategie (A_B 1) das Layout eines Depots (A_B 6) beeinflusst, insbesondere bei der Gestaltung der Abstellanlage und den zu wählenden Abstellordnungen.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, finden sich in der Literatur zwar Arbeiten, die einzelne Themenbereiche bzw. Anforderungen an Betreiber adressieren, jedoch als Planungsgrundlage für elektrische Busdepots nur bedingt geeignet sind. Der Fokus der verwandten Publikationen liegt in der Berechnung und Optimierung von Lastprofilen und der Auslegung des erforderlichen Netzanschlusses, wofür Energiebedarfssimulationen durchgeführt wurden. Die Betriebsprozesse in Depots sowie die Integration

¹³⁸Siehe Abschnitt 2.2.

des Ladeprozesses in den Betriebsablauf (A_B 2) sind hingegen nicht berücksichtigt. Weiterhin ist nur eine Publikation (Messaoudi und Oulamara (2019)) bekannt, die sowohl die Stellplatzzuweisung (A_B 3) als auch die Disposition (A_B 4) von elektrischen Bussen in Depots untersucht. Gemäß der Literaturrecherche in Abschnitt 2.4 existiert keine Methode oder Modell, das alle elementaren Themenbereiche und Anforderungen an Betreiber abbildet, um E-Depots zu analysieren, planen und evaluieren.

Gängige Depotmanagementsysteme zielen darauf ab den Betrieb in einem Depot in Echtzeit zu automatisieren und zu optimieren.¹³⁹ Diese Systeme sind allerdings zur Planung von Depots und zur Bewertung von Elektrifizierungskonzepten ungeeignet, da die Vielfalt von verschiedenen Lösungsmöglichkeiten nicht abbildbar wäre.

Die VDV-Schrift 825¹⁴⁰ gibt zwar einen Überblick von Anforderungen für die Einführung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in Depots, ist allerdings zur Planung unzureichend. Es ist eine systematisches und nachvollziehbares Vorgehen notwendig.

3.2 Forschungsfragen

Durch den ermittelten Forschungsbedarf können folgende Forschungsfragen abgeleitet werden:

Forschungsfrage 1: Welche grundsätzlichen Auswirkungen hat die Elektrifizierung von Stadtbussen auf den Betrieb von Depots?

Ein Busdepot dient einerseits der Abstellung von Fahrzeugen in Betriebspausen, andererseits können zudem Wartungs-, Reparatur- und Reinigungsarbeiten durchgeführt sowie Betriebsstoffe aufgefüllt werden, damit die Fahrzeuge für den nächsten Umlauf einsatzbereit sind. Im Zuge der Flottenumstellung müssen zusätzlich, abhängig von der Ladestrategie, die notwendigen Ladeprozesse in den bestehenden Betriebsablauf integriert sowie Lade- und Stromnetzinfrastrukturen im Depot aufgebaut werden. Im Unterschied zum Tanken muss für den Ladeprozess eine hinreichend lange Standzeit, abhängig vom Energiebedarf und der zur Verfügung stehenden Ladeleistung im Depot¹⁴¹, berücksichtigt werden. Weiterhin weisen Elektrobusse nicht die gleichen Reichweiten wie konventionelle Dieselbusse auf. Dies hat eine Auswirkung

¹³⁹Siehe Unterabschnitt 2.2.2.

¹⁴⁰Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2015, 2020b).

¹⁴¹Bei einem Energiebedarf von 300 kWh und einer Ladeleistung von 100 kW würde die Mindestladezeit 3 h entsprechen, im Vergleich zu einem Tankprozess von wenigen Minuten.

auf die Umlaufplanung und dementsprechend auf die Häufigkeit der Depotaufenthalte. Die neuen Anforderungen können ein Anpassen der anderen Betriebsprozesse oder des gesamten Betriebskonzepts erfordern. Um diese Forschungsfrage zu beantworten werden die Betriebsprozesse in Busdepots ermittelt und analysiert, um mögliche Varianten zur Integration des Ladeprozesses in den Betriebsablauf aufzuzeigen.

Forschungsfrage 2: Wie können relevante Elemente und Funktionen eines elektrischen Busdepots abgebildet werden, um Betreiber bei der Planung zu unterstützen?

Wie im vorherigen Abschnitt ausgeführt, ist keine geeignete Methodik zur Planung von elektrischen Busdepots bekannt. Eine mögliche Methode um die dynamischen Zusammenhänge eines Depotbetriebs abzubilden ist Simulation. Bei der Entwicklung der Softwarelösung ist darauf zu achten, dass alle erforderlichen Elemente und Funktionen mit einem geeigneten Detaillierungsgrad modelliert werden. Dies betrifft insbesondere die Aspekte Lade- und Lastmanagement, Stellplatzzuweisung, Dispositionsstrategien sowie die Konfiguration eines Depotlayouts. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse können technisch-wirtschaftliche Indikatoren zur Planung und Evaluierung von E-Depots abgeleitet werden.

Forschungsfrage 3: Wie können Konzepte für elektrische Busdepots entwickelt und evaluiert werden, sodass sie als Planungsgrundlage genutzt werden können?

Die Vielzahl an Lösungs- und Kombinationsmöglichkeiten erschweren das Finden eines geeigneten Konzepts für ein E-Depot. Zusätzlich sind die Einflussfaktoren auf das Systemdesign unbekannt. Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage sollen unterschiedliche Szenarien simuliert und Parametervariationen durchgeführt werden, um das Planungsrisiko zu verringern. Insbesondere können das Depotlayout mit dem großen Flächenbedarf der Abstellanlage, der erforderliche Fahrzeug- und Infrastrukturbedarf für den Betrieb eines städtischen Buslinienetzes und die Auslastung der Infrastruktur im Depot entscheidende Evaluierungskriterien sein.

3.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Mit der Darstellung des Forschungsbedarfs und den Forschungsfragen können nun die Ziele dieser Arbeit definiert werden. Angesichts der Tatsache, dass die Planung von E-Depots bis jetzt nur punktuell methodisch unterstützt wurde, ist das Gesamtziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur Planung und Evaluation von Depots

für elektrische Busse. Dieses Ziel wird durch die Beantwortung der Forschungsfragen und Umsetzung der untergeordneten Lösungsansätze erreicht, wie in Abb. 3.1 dargestellt.

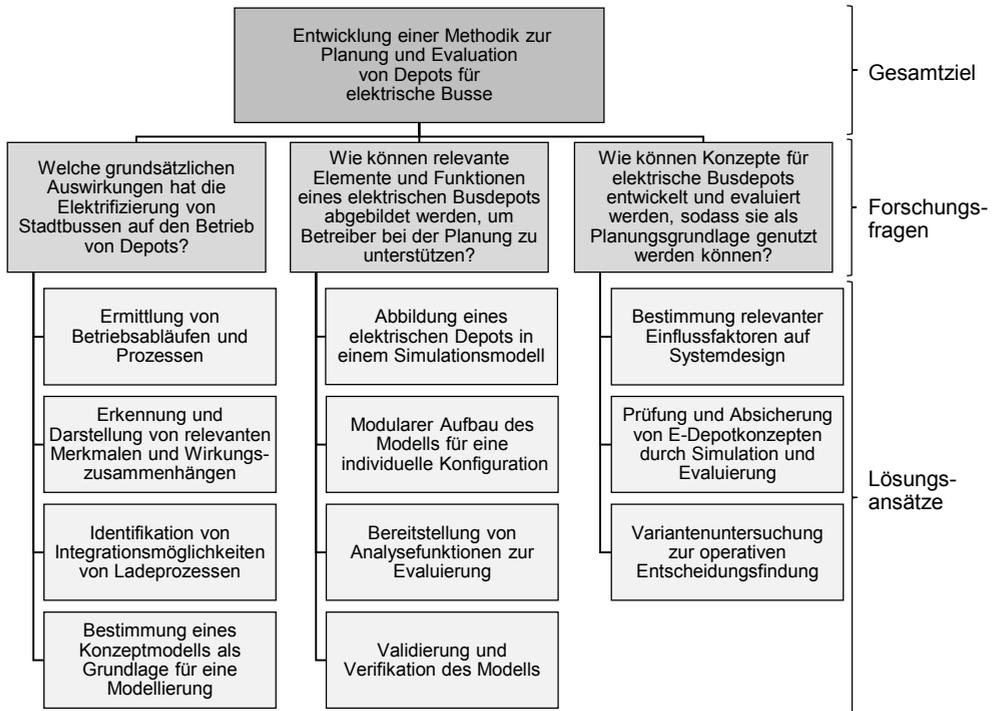


Abb. 3.1: Ziel der Arbeit, Forschungsfragen und Lösungsansätze

Es ist ein prinzipielles Verständnis der relevanten Merkmale und Wirkungszusammenhänge eines Depotbetriebs notwendig, um diese bei der Entwicklung eines Simulationsmodells zu berücksichtigen. Hierfür werden die Abläufe und Kernprozesse im Depot bei Busbetreibern ermittelt sowie Beziehungen erfasst und dargestellt. Ein entscheidender Punkt ist hierbei die Identifizierung von Integrationsmöglichkeiten der erforderlichen Ladeinfrastruktur und des zugehörigen Ladeprozesses in den Betriebsablauf. Im Anschluss der Analyse wird das E-Depot durch ein nicht experimentierbares Konzeptmodell beschrieben, das als Basis der Modellierung dient.

Um den dynamischen Busbetrieb in einem Depot abzubilden und zu analysieren wird ein Simulationsmodell im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Das Modell soll alle erforderlichen Elemente und Funktionen eines E-Depots enthalten und modular aufgebaut sein, um individuelle Konfigurationen vornehmen zu können. Es müssen zudem geeignete Analysefunktionen zur Evaluierung implementiert werden. Bevor das Modell angewendet wird, muss dieses validiert und verifiziert werden.

Zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage sollen zunächst relevante Einflussfaktoren auf das Systemdesign bestimmt werden. Durch Prüfung und Absicherung von unterschiedlichen E-Depotkonzepten sowie Variantenuntersuchungen mittels Simulation und Evaluation kann der operative Entscheidungsprozess unterstützt und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Die Vorgehensweise der Entwicklung und Anwendung der Methodik orientiert sich an der VDI-Richtlinie 3633¹⁴² und gliedert sich in vier Phasen, wie in Abb. 3.2 dargestellt. Grundsätzlich sind durch Erkenntnisgewinne in einzelnen Phasen auch Rücksprünge möglich.

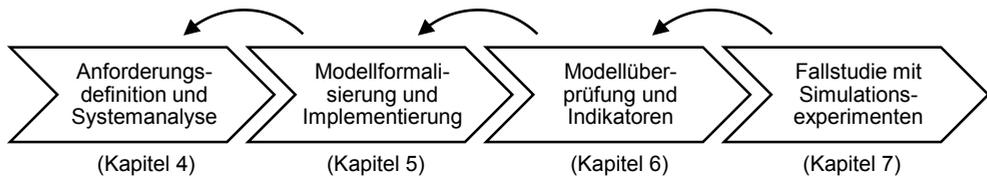


Abb. 3.2: Vorgehensweise der Entwicklung und Anwendung der Methodik

In der ersten Phase wird die Systemgrenze definiert und Anforderungen an das zu entwickelnde Modell beschrieben. Das Ergebnis ist ein Konzeptmodell, das im folgenden Schritt in ein formales und ausführbares Modell überführt wird. In der dritten Phase werden Indikatoren, die zur Evaluierung herangezogen werden können, ermittelt. Weiterhin wird in dieser Phase das Gesamtmodell verifiziert und validiert. Im letzten Schritt werden anhand einer realen Fallstudie Simulationsexperimente durchgeführt, um die Auswirkung unterschiedlicher Depot-Konfigurationen zu bestimmen und zu bewerten.

3.4 Abgrenzung der Arbeit

Am Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik der Technischen Universität Berlin wurde im Rahmen verschiedener Elektromobilitätsprojekte gemeinsam mit Dominic Jefferies und Pavel Boev das Simulations- und Planungstool eFLIPS¹⁴³ entwickelt, um verschiedene Systemkonzepte für E-Flotten technisch und wirtschaftlich zu analysieren und zu vergleichen. Der Schwerpunkt der Anwendung des Tools liegt auf dem Busverkehr, allerdings wird es ebenso für den Bahn- und Wirtschaftsverkehr eingesetzt.¹⁴⁴ Die Abb. 3.3 zeigt eine schematische Übersicht von

¹⁴²Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2014), siehe Abschnitt 2.3.

¹⁴³Electric Fleet and Infrastructure Planning / Simulation.

¹⁴⁴Vgl. Jefferies und Göhlich (2018, 2020); Lauth et al. (2019).

eFLIPS, welches aus zwei Teilen besteht: der Flottensimulation, die Gegenstand der Dissertation von Dominic Jefferies¹⁴⁵ ist und der Depotsimulation, welche in dieser Arbeit entwickelt wird. Die Verknüpfung der beiden Simulationen ermöglicht eine integrierte Planung von E-Busflotten und Depots.

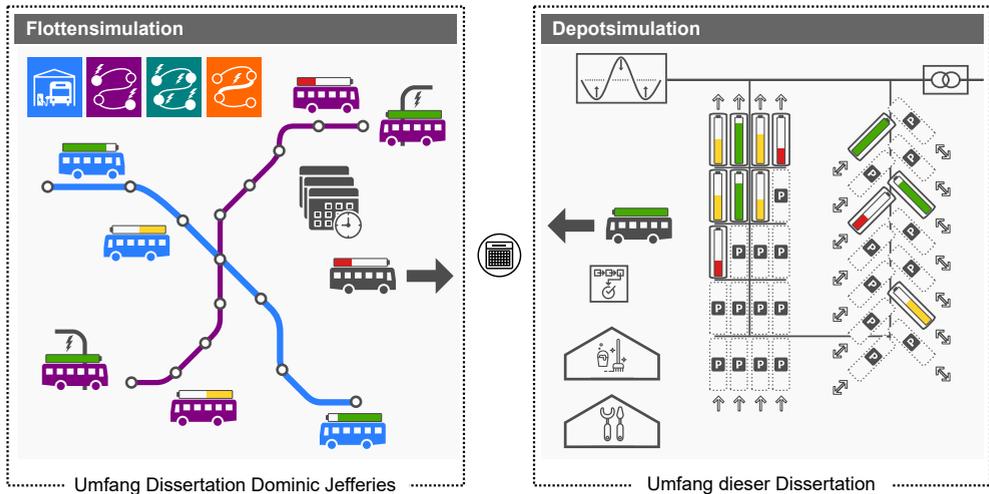


Abb. 3.3: Übersicht Simulationstool eFLIPS

Mit der Flottensimulation¹⁴⁶ können alle gängigen Ladestrategien simuliert werden. Weiterhin umfasst es eine Umlaufplanung für ein Liniennetz für Depot- und Gelegenheitsladung, um die Reichweiten- und Ladezeitbeschränkungen von Elektrobussen zu berücksichtigen. Außerdem können Ladestationen an Haltestellen kostenoptimal platziert werden.

Die Depotsimulation nutzt die Flottensimulation als Dateninput für die einfahrenden Fahrzeuge sowie für die Anforderungen an Fahrzeugabfahrten gemäß Umlaufplanung. Die notwendigen Daten können allerdings ebenso von dritter Seite, z. B. durch Flottenbetreiber, bereitgestellt werden. Diese Datenschnittstelle¹⁴⁷ besteht aus folgenden Informationen:

- Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Umläufe,
- Umlauflänge,
- Einzusetzende Fahrzeugtypen und
- Ankunfts- und Ziel-Ladezustände der Fahrzeuge.

Somit kann durch die Depotsimulation bei geplanter Abfahrt ein geeignetes und abfahrtsberechtigtes Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin können mit Hilfe der

¹⁴⁵Vgl. Jefferies (2021 (noch nicht veröffentlicht)).

¹⁴⁶Vgl. Jefferies und Göhlich (2018).

¹⁴⁷Der Aufbau der Datenschnittstelle wird in Unterabschnitt 5.2.1 beschrieben.

Depotsimulation unterschiedliche Konzepte detailliert analysiert, entwickelt und evaluiert werden. Falls die Erkenntnisse der Depotanalyse eine Änderung des Umlaufplans erfordert, da z. B. noch mehr Fahrzeuge im Depot Platz hätten, kann die Umlaufplanung erneut durchgeführt werden. Durch dieses iterative Verfahren können der Umlaufplan und das Grundkonzept eines E-Depots aufeinander abgestimmt werden.

4 Anforderungsdefinition und Systemanalyse

Aus dem vorherigen Kapitel aufgezeigten Forschungsumfang und der Zielsetzung dieser Arbeit werden nun Anforderungen an die Entwicklung des Simulationsmodells abgeleitet. Es folgt eine Systemanalyse eines E-Depots mit dem Ergebnis eines Konzeptmodells, welches als Grundlage für die Modellformalisierung im folgenden Kapitel 5 genutzt wird.

4.1 Anforderungsdefinition

4.1.1 Systemgrenze

Für das Depotmodell wird die Systemgrenze wie in Abb. 4.1 eingezeichnet definiert. Das betrachtete System besteht aus den Elementen ①-⑦, Elemente außerhalb der Systemgrenze sind mit ⑧-⑬ gekennzeichnet.

Das Lade- und Lastmanagement ① ist ein integraler Bestandteil des Modells, um Ladeprozesse unter Berücksichtigung betrieblicher Anforderungen zu variieren, damit der Netzanschluss ⑦ bestmöglich ausgenutzt und das Potential durch den Einsatz von günstigen, zeit- und lastvariablen Stromtarifen dargestellt werden kann. Die Netzanschlussbedingungen sollen zwar beachtet werden, allerdings ist die eigentliche Netzinfrastruktur ⑪ außerhalb des Depots nebensächlich. Des Weiteren wird eine Verschaltung der Ladeinfrastrukturen einbezogen, die elektrotechnische Leitungsplanung im Depot ⑫ ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Außerdem werden keine expliziten Kommunikationsprotokolle ⑬, die zur Steuerung eines Ladeprozesses notwendig sind, berücksichtigt. Es wird vorausgesetzt, dass eine Kommunikation zwischen verschiedenen Elementen prinzipiell möglich ist.

Wie bereits in Abschnitt 3.4 erläutert, wird für das Depotmodell ein für Elektrobusse geeigneter Umlaufplan ⑨ benötigt, damit Ankunfts- und Abfahrtszeiten sowie der Status der Fahrzeuge bekannt sind. Zusätzlich ist im Umlaufplan für jeden Umlauf der erforderliche Fahrzeugtyp ③ festgelegt. Diese Typen unterscheiden sich hauptsächlich in Gefäßgröße, Batterieeigenschaften und Ladeschnittstelle und können entsprechend im Depotmodell hinterlegt werden.

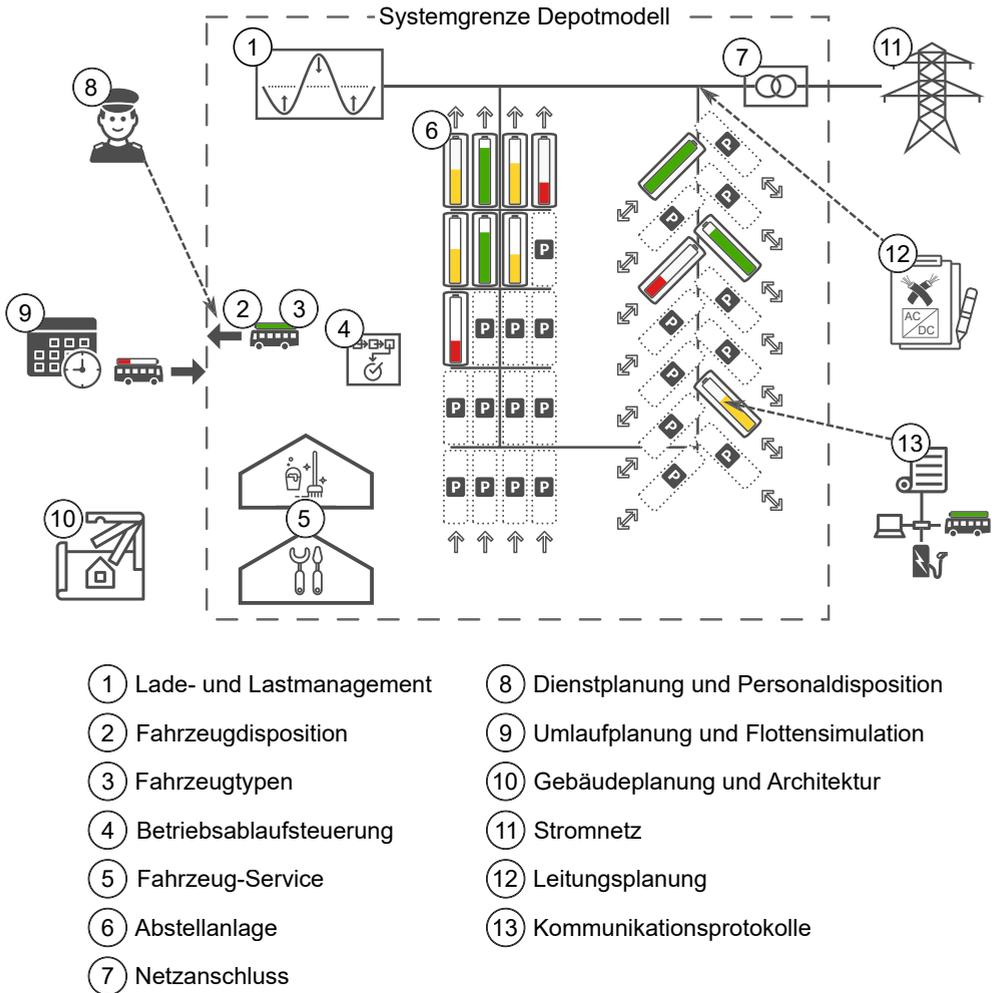


Abb. 4.1: Systemgrenze des Depotmodells

Das zentrale Element ist die Betriebsablaufsteuerung ④, welche die Fahrzeugbewegungen im Depot entsprechend der durchzuführenden Prozesse in den Anlagen des Fahrzeug-Service ⑤ und der Abstellanlage ⑥ regelt. Die Anlagen können sich in Fahrzeugkapazität, Prozessangebot und Ressourcen unterscheiden, eine Gebäudeplanung und Architektur ⑩ ist allerdings nicht vorgesehen. Ebenso werden Betriebsgebäude nicht modelliert. Die abfahrtsbereiten Fahrzeuge auf der Abstellanlage können auf einen Umlauf disponiert ② werden. Aufgrund der Komplexität findet hingegen keine Dienstplanung und Personaldisposition ⑧ statt.

4.1.2 Anforderungen an das Modell

Die vorangegangenen Ausführungen der berücksichtigten Modellelemente¹⁴⁸, der Betreiberanforderungen¹⁴⁹ und des Forschungsumfangs¹⁵⁰ ermöglichen die Ableitung der Anforderungen an das Depotmodell. Es konnten insgesamt 18 betriebliche, technische und allgemeine Modellanforderungen (A_M) identifiziert werden, die in Abb. 4.2 aufgelistet sind.

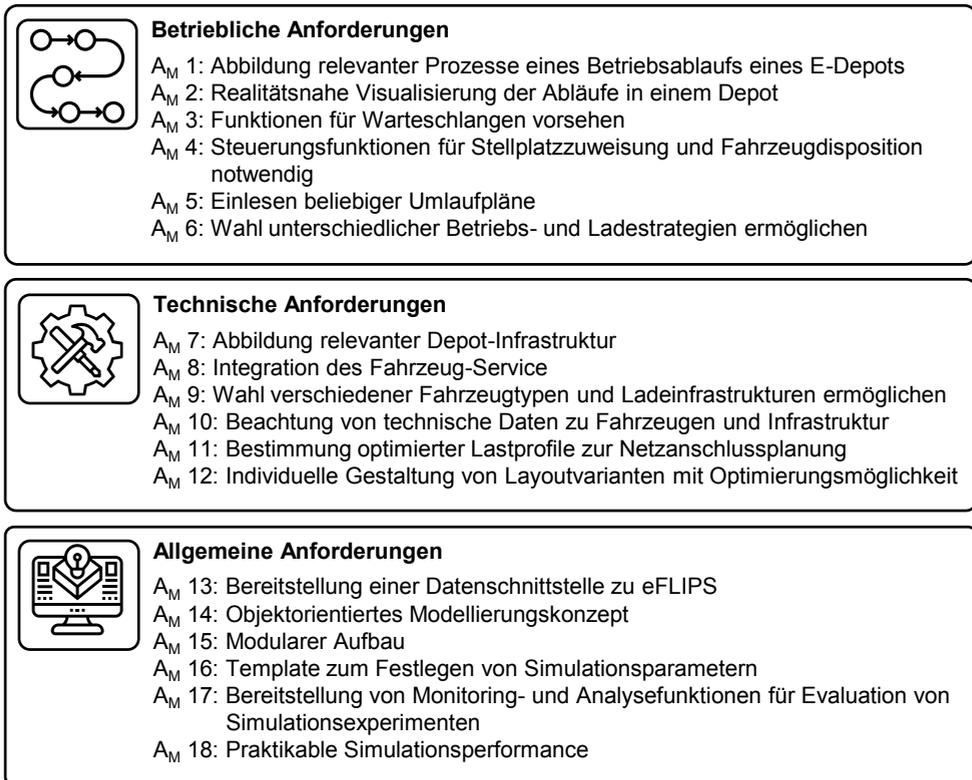


Abb. 4.2: Übersicht der modellierungsrelevanten Anforderungen (A_M 1 - A_M 18)

Bei der Modellentwicklung müssen alle relevanten Prozesse in einem E-Depot berücksichtigt und hinreichend genau modelliert werden (A_M 1 folgt u. a. aus A_B 2). Zum besseren Verständnis sowie zur Überprüfung sollen die Abläufe im Depot realitätsnah visualisiert werden (A_M 2). Um das Verhalten von Fahrzeugbewegungen innerhalb eines Depots abzubilden, sind Funktionen für Warteschlangen vorzusehen, da Prozesse und Anlagen einer Kapazitäts- und Ressourcenbeschränkung unterliegen

¹⁴⁸Siehe Abb. 4.1.

¹⁴⁹Siehe Unterabschnitt 2.2.3.

¹⁵⁰Siehe Kapitel 3.

können (A_M 3). Zudem sind Steuerungsfunktionen für die Fahrzeugbewegungen zu implementieren, insbesondere für eine Stellplatzzuweisung und Fahrzeugdisposition (A_M 4 folgt aus A_B 3 und A_B 4). Weiterhin muss die Möglichkeit bestehen beliebige Umlaufpläne in einem zu definierten Format einzulesen (A_M 5) und die Wahl von verschiedenen Betriebs- und Ladestrategien muss gewährleistet sein (A_M 6 folgt aus A_B 1).

Zu den technischen Anforderungen gehört die Abbildung relevanter Infrastruktur für das Depot (Anlagen und Stauräume, A_M 7 folgt aus A_B 7). Es ist besonders darauf zu achten, dass die Aufgaben des Fahrzeug-Service, bestehend aus Instandhaltung, Versorgung und Reinigung, integriert werden können (A_M 8 folgt aus A_B 9). Zudem muss das Modell Konfigurationsmöglichkeiten von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur zulassen und alle wesentlichen technischen Daten berücksichtigen (A_M 10 folgt aus A_B 1 und A_B 7). Mit der Integration eines Lade- und Lastmanagement sollen optimierte Lastprofile zur Auslegung des notwendigen Netzanschlusses bestimmt werden (A_M 11 folgt aus A_B 5 und A_B 8). Weiterhin muss gewährleistet werden, dass ein Depotlayout individuell gestaltet werden kann und eine Optimierungsmöglichkeit vorhanden ist (A_M 12 folgt u. a. aus A_B 5 und A_B 6).

Darüber hinaus sind allgemeine Anforderungen an das Modell zu erfüllen. Die Kompatibilität mit der Flottensimulation von eFLIPS muss über eine geeignete Datenschnittstelle garantiert werden (A_M 13, siehe Abschnitt 3.4). Zur Sicherstellung eines transparenten und leicht verständlichen Modellaufbaus soll das Konzept der Objektorientierung genutzt werden (A_M 14). Mit der Ausrichtung an der Realität können Objekte, wie z. B. Fahrzeuge, Stellplätze und Ladeinfrastruktur, intuitiv nachgebildet werden und deren Beziehung untereinander dargestellt werden. Zudem ist auf einen modularen Aufbau zu achten, um eine individuelle Konfiguration und Erweiterbarkeit zu ermöglichen (A_M 15). Die Konfiguration der Simulationsparameter soll über Templates gesteuert werden (A_M 16). Darüber hinaus müssen Monitoring und Analysefunktionen für die Evaluation von Simulationsexperimenten bereitgestellt werden (A_M 17). Die Durchführung eines Experiments soll in einer praktikablen Zeit liegen (A_M 18).

4.2 Systemanalyse

Ziel der Systemanalyse ist es ein genaueres Verständnis der Merkmale und Wirkungszusammenhänge eines Depotbetriebs zu erlangen. Es werden Entscheidungen darüber getroffen, welche Systemeigenschaften relevant und welche vernachlässigbar sind.¹⁵¹

¹⁵¹Vgl. Verein deutscher Ingenieure (2014, S. 22).

Für diese sind Planungs- und Realdaten erforderlich. Das Ergebnis der Analyse ist ein Konzeptmodell, das die Basis für die folgende Modellierung ist.

4.2.1 Analyse von Stand- und Einsatzzeiten

Es wurde eine Analyse historischer Einsatzpläne¹⁵² durchgeführt, um die Verteilung von Ankünften und Abfahrten sowie Stand- und Einsatzzeiten von Bussen in Depots zu ermitteln. Hierfür wurde der Einsatzplan eines Busbetreibers einer deutschen Großstadt aus dem Jahr 2016 ausgewertet. In dem Datensatz sind sechs Depots mit insgesamt über 440.000 Umläufen von 1.264 Bussen enthalten.

Die Auswertungen in Abb. 4.3 und Abb. 4.4 zeigen die relative Anzahl von Ankünften und Abfahrten an Werktagen (Mo.-Fr.) und am Wochenende (Sa.-So.). Das Profil ist bei allen sechs Depots (a-f) ähnlich. Es ist zu erkennen, dass werktags zwischen 20:00 Uhr und 21:00 Uhr sowie gegen 01:00 Uhr eine größere Anzahl von Fahrzeugen im Depot ankommen. Tagsüber kehren ebenfalls Busse ins Depot zurück, allerdings weniger als abends und nach Mitternacht. Die Abfahrten vom Depot häufen sich im Zeitraum von 04:00 Uhr bis 07:00 Uhr. Außer zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr verlassen sonst kaum noch Fahrzeuge die Depots.

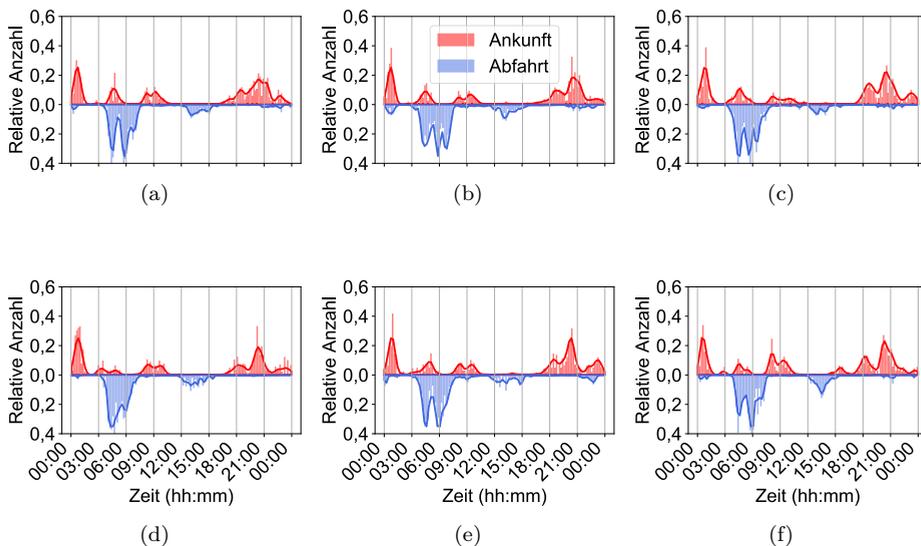


Abb. 4.3: Verteilung der Ankünfte und Abfahrten von sechs Depots (a)-(f) von Montag bis Freitag

¹⁵²Im Vergleich zu einem Umlaufplan (siehe Unterabschnitt 2.2.1.) ist bei einem Einsatzplan einem Umlauf ein reales, identifizierbares Fahrzeug und nicht nur einen Fahrzeugtyp zugeordnet.

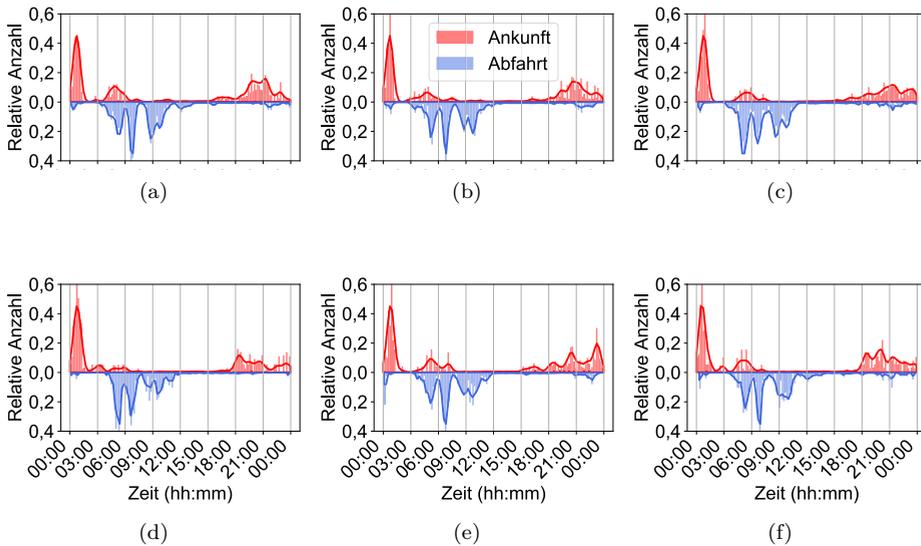


Abb. 4.4: Verteilung der Ankünfte und Abfahrten von sechs Depots (a)-(f) von Samstag bis Sonntag

Das Profil am Wochenende gleicht dem Profil von Mo.-Fr. Allerdings ist die relative Anzahl der Ankünfte nach Mitternacht größer. Des Weiteren konzentrieren sich die Abfahrten auf einen größeren Zeitraum zwischen 5:00 Uhr und 10:00 Uhr.

Durch die Identifikation des vorangegangenen Umlaufs eines Fahrzeugs mit dem nächsten Umlauf lassen sich die jeweiligen Standzeiten auf den sechs Depots berechnen. In Abb. 4.5 und Abb. 4.6 sind die Verteilung von Stand- und Einsatzzeiten von Mo.-Fr. bzw. Sa.-So. als Box-Plot dargestellt.

Im Mittel stehen die Busse bei einem Depotaufenthalt werktags zwischen 7,2 h und 8,3 h und am Wochenende zwischen 11,9 h und 15,2 h. Es fällt auf, dass die Streuung der Standzeit am Wochenende bei den Depots (c), (d) und (f) größer ist als bei den Depots (a), (b) und (e). Die Mittelwerte der Einsatzzeiten von Mo.-Fr. liegen im Bereich von 11,0 h bis 13,5 h und von Sa.-So. zwischen 13,7 h und 15,1 h. Die längeren Stand- und Einsatzzeiten am Wochenende lassen vermuten, dass durch das geringe Fahrangebot weniger Fahrzeuge als unter der Woche eingesetzt werden, diese allerdings länger im Betrieb sind.

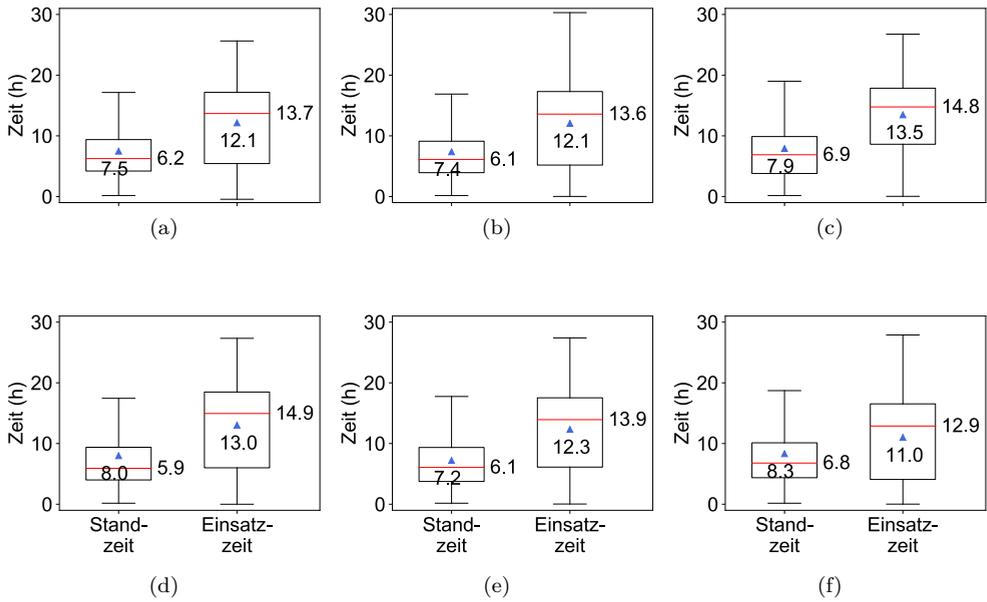


Abb. 4.5: Verteilung von Stand- und Einsatzzeiten der Busse der Depots (a)-(f) von Montag bis Freitag

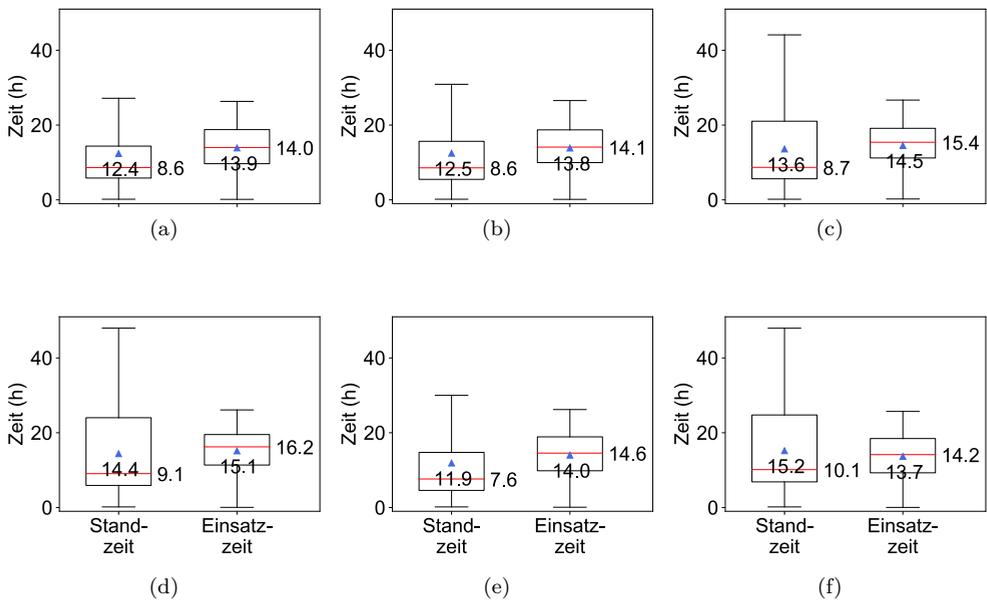


Abb. 4.6: Verteilung von Stand- und Einsatzzeiten der Busse der Depots (a)-(f) von Samstag bis Sonntag

4.2.2 Betriebsablauf

Um einen detaillierten Einblick in die Abläufe eines Depotbetriebs zu bekommen, wurden jeweils zwei Busdepots der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) und der Hamburger Hochbahn besichtigt und die einzelnen Prozessschritte mit Experten diskutiert. Die innerstädtischen Busdepots der BVG Indira-Gandhi-Straße¹⁵³ und Lichtenberg beheimaten ca. 260 bzw. 150 Busse. Die ebenfalls zentralen Busdepots der Hamburger Hochbahn in Langenfeld und Alsterdorf¹⁵⁴ sind für ca. 200 Busse bzw. 240 emissionsfreie Busse ausgelegt. Zudem wurden im Rahmen des Themenfelds Bus- und Wirtschaftsverkehr des Forschungscampus Mobility2Grid¹⁵⁵ mehrere Interviews mit weiteren Experten der BVG durchgeführt. Die Erkenntnisse der Bestandsaufnahme beruhen größtenteils auf Erfahrungswissen und betriebsinternen Statistiken. In Abb. 4.7 ist ein allgemeiner Betriebsablauf als Aktivitätsdiagramm dargestellt. Die aufeinanderfolgenden Schritte können jedoch je nach Betreiber variieren.

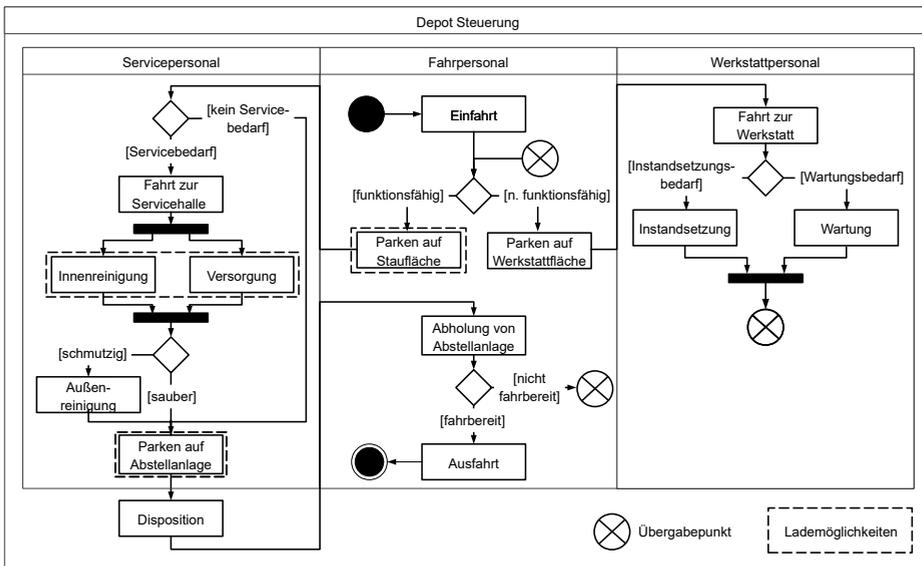


Abb. 4.7: Betriebsablauf im Depot mit Lademöglichkeiten als Aktivitätsdiagramm¹⁵⁶

Die Fahrzeugbewegungen im Depot werden entweder durch die Definition von Reihenfolgen und Regeln oder durch ein Managementsystem gesteuert. Üblicherweise hat das Personal unterschiedliche Zuständigkeiten. In diesem Fall werden die Fahrzeuge

¹⁵³Siehe Abb. 2.16, aktuell im Umbau für Elektrobusse.

¹⁵⁴Siehe Abb. 2.15.

¹⁵⁵Vgl. Göhlich et al. (2021).

¹⁵⁶Vgl. Raab et al. (2017); Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019).

durch das Service-, Fahr- und Werkstattpersonal im Depot bewegt. Nach der Einfahrt durch das Fahrpersonal wird die Funktionsfähigkeit des Busses durch eine Sichtkontrolle sowie auftretende Mängel während der Betriebsfahrt beurteilt und anschließend auf temporären Abstellflächen geparkt. Falls Mängel am Fahrzeug erkannt werden, übernimmt das Werkstattpersonal die Instandsetzung oder Wartung und gibt es anschließend wieder als funktionsfähig frei. Im Normalfall wird allerdings der Bus vom Servicepersonal zur Servicehalle gebracht, in der Stellflächen zur Innenreinigung und Versorgung mit Betriebsmitteln bereitstehen. Es sei denn, es besteht kein Servicebedarf, dann wird das Fahrzeug direkt zur Abstellanlage gefahren. Jeder Bus wird täglich gereinigt und mit Betriebsmitteln aufgefüllt. Im Anschluss findet eine Außenreinigung statt, falls das Servicepersonal dies für notwendig erachtet. Diese wird üblicherweise alle drei Tage durchgeführt, ist allerdings wetterabhängig. Weiterhin werden die Fahrzeuge regelmäßig, z. B. einmal im Monat, einer Grundreinigung unterzogen. Nach den Serviceprozessen werden die Busse auf der Abstellanlage geparkt und können von dort disponiert werden. Verkehrsbetriebe, die kein Managementsystem einsetzen, nutzen üblicherweise einfache Abstell- und Dispositionslogiken. Die Abstellflächen können beispielsweise gleichmäßig oder reihenweise unter Berücksichtigung des Fahrzeugtyps befüllt bzw. frei gemacht werden. Das Fahrpersonal prüft vor Abfahrt, ob alle technischen Voraussetzungen zum Fahren erfüllt sind und verlässt dann das Depot mit dem Bus.

Es wurden drei sinnvolle Möglichkeiten zur Integration des Ladeprozesses, wie in Abb. 4.7 hervorgehoben, identifiziert. Aufgrund der längeren Verweilzeiten eignen sich grundsätzlich alle Abstellflächen im Depot, wie die Staufläche und die Abstellanlage. Der Pfad von nicht funktionsfähigen Fahrzeugen wurde nicht berücksichtigt, da dieser durch ungeplante Fehler einzelner Busse gekennzeichnet ist. Trotzdem sollte Ladeinfrastruktur in geringer Stückzahl in der Werkstatt vorgesehen werden. Des Weiteren kann während der Innenreinigung/Versorgung in der Servicehalle geladen werden.

Um möglichst die gesamte Aufenthaltszeit eines E-Busses für die Planung des Ladevorgangs auszunutzen, ohne an jeder Stelle Ladeinfrastruktur vorzusehen, sind die bestehenden Ablaufstrukturen anzupassen. Falls die tägliche Innenreinigung/Versorgung der Fahrzeuge mobil möglich ist, können die Fahrzeuge direkt nach Ankunft auf der Abstellanlage geparkt werden und dort geladen, gereinigt und versorgt werden. Hierdurch wäre eine Unterbrechung des Ladeprozesses nicht mehr notwendig und die Wartezeit auf der Staufläche und die benötigte Zeit für den täglichen Reinigungs- und Versorgungsvorgang von 8–11 min¹⁵⁷ würden wegfallen. Sofern die tägliche Innenreinigung/Versorgung in einer Servicehalle stattfinden muss, kann trotzdem die

¹⁵⁷Lauber et al. (2018); Angaben von einem Betreiber.

Staufläche in die Abstellanlage integriert werden. Dieser Multifunktionsansatz eignet sich besonders für platzbeschränkte Depots, ist jedoch in der Steuerung der Fahrzeugbewegungen aufwändiger. Weiterhin ist die Vorkonditionierung des Fahrgastinnenraums vor dem Ausrücken mit der erforderlichen Vorheizzeit und elektrischen Leistung einzuplanen, was wiederum Auswirkungen auf den Ladeprozess haben kann.

4.2.3 Konzeptmodell

Mit Hilfe der vorangegangenen Anforderungsdefinition und Systemanalyse können die relevanten Merkmale eines E-Depots bestimmt werden. Es wurden acht Merkmale identifiziert, die ein E-Depot maßgeblich charakterisieren. Diese Merkmale und deren mögliche Optionen sind als morphologischer Kasten in Abb. 4.8 dargestellt. Durch die Kombination von Optionen kann eine Variante eines E-Depots beschrieben werden. Jede Variante hat mindestens eine Option pro Merkmal.

Merkmal	Optionen		
Netzanschluss-ebene	 Niederspannung	 Mittelspannung	 Hochspannung
Fahrzeug-typ	 12 m Standard-Bus	 18 m Gelenkbus	 Doppeldeckerbus
Lade-schnittstelle	 Manuell	 Automatisch	
Lade- und Lastmanagement	 Nicht gesteuert	 Gesteuert	 Smart
Ladeort	 Abstellanlage	 Servicehalle	 Staufläche
Reinigung / Versorgung	 Abstellanlage	 Servicehalle	
Abstell-ordnung	 Reihe (Line)	 Schrägabstellung Einzelreihe (DSR)	 Schrägabstellung Doppelreihe (DDR)
Abstell- und Dispositions-strategie	 Gleichmäßig (Even)	 Reihenweise (First)	 Smart

Abb. 4.8: Relevante Merkmale und Optionen eines E-Depots als morphologischer Kasten

Das erste Merkmal definiert die Spannungsebene¹⁵⁸ des notwendigen Netzanschlusses. Die Anschlussebene wird dabei entsprechend dem prognostizierten Leistungsbedarf

¹⁵⁸Siehe Tabelle 2.1.

und den technischen Anschlussbedingungen festgelegt. Grundsätzlich kann eine Flotte aus beliebig vielen Fahrzeugtypen bestehen. Hier sind die drei häufigsten eingesetzten Bustypen berücksichtigt, die sich in Abmessungen, Energiebedarf und Batterietechnologie unterscheiden können. Die folgenden drei Merkmale beziehen sich auf das Laden der Elektrobusse. Bei der Ladeschnittstelle wird zwischen einem manuellen und automatischen Kontaktierungsverfahren differenziert.¹⁵⁹ Eine Mischung verschiedener Ladeschnittstellen oder auch Leistungsklassen ist denkbar, sollte aber aus Kompatibilitätsgründen vermieden werden. Das Lade- und Lastmanagement ist in drei Funktionsstufen unterteilt und dient in erster Linie der Reduzierung des notwendigen Netzanschlusses. Die einfachste Implementierung ist das nicht gesteuerte Laden. Sobald der Bus an die Ladeschnittstelle angeschlossen ist, beginnt der Ladevorgang mit der maximal möglichen Ladeleistung und dauert so lange, bis das Fahrzeug von der Infrastruktur getrennt wird oder die Batterie vollständig aufgeladen ist. Die gesteuerte Ladeoption berücksichtigt zusätzlich die Standzeit des Fahrzeugs und reduziert entsprechend die konstante Ladeleistung. Die letzte Option kann weitere Kenngrößen für das Lade- und Lastmanagement berücksichtigen, z. B. die Netzanschlusskapazität und den Strompreis.¹⁶⁰ Die Ladeinfrastruktur kann auf der Abstellanlage, der Servicehalle und/oder der Stauffläche integriert werden.¹⁶¹ Aufgrund der geringen Standzeit in der Servicehalle ist dort nur eine hohe Ladeleistung sinnvoll. Die tägliche Innenreinigung/Versorgung kann entweder mobil auf der Abstellanlage oder in einer Servicehalle stattfinden. Mit den letzten beiden Merkmalen wird die Anordnung der Abstellplätze sowie das Abstellen und Disponieren auf der Abstellanlage definiert. Die Abstellordnung sehen zwei unterschiedliche Konzepte vor. Entweder eine Anordnung in Reihe, womit sich Fahrzeuge blockieren können, oder frei zugängliche Einzelstellplätze, üblicherweise in Schrägabstellung.¹⁶² Für das Abstellen und Disponieren sind drei Strategien vorgesehen. Zwei einfache Schemata, die Fahrzeuge gleichmäßig oder reihenweise auf die Stellplätze zuordnet oder disponiert, wozu nicht zwingend ein Managementsystem notwendig wäre. Die letzte Strategie nutzt Informationen zum Fahrzeug- und Stellplatzstatus für eine effizientere Zuweisung.

Nach der Ermittlung der relevanten Merkmale kann durch weitere Reduktion und Idealisierung ein nicht ausführbares Konzeptmodell erstellt werden, um ein auf das Wesentliche beschränkte Abbild eines E-Depots zu erhalten. In Abb. 4.9 ist das Konzeptmodell dargestellt. Das Modell gliedert sich in drei Teilbereiche: erforderliche Daten, Simulation/Optimierung und Ergebnisse.

Für die Simulation sind technische und betreiberspezifische Basisdaten notwendig.

¹⁵⁹Siehe Unterabschnitt 2.1.3.

¹⁶⁰Siehe Abschnitt 2.1.2.

¹⁶¹Siehe Abb. 4.7.

¹⁶²Siehe S. 19.

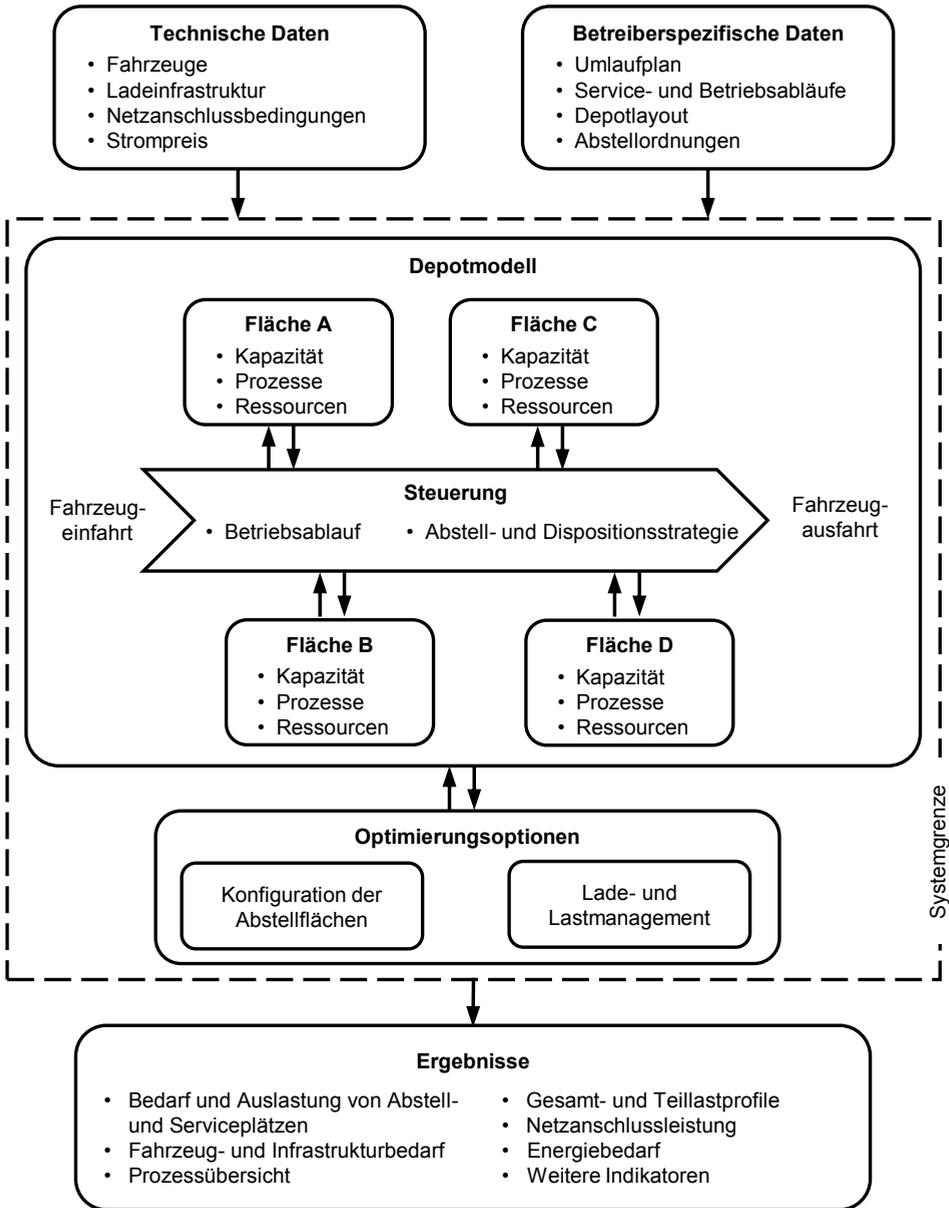


Abb. 4.9: Konzeptmodell als Grundlage zur Modellformalisierung und Implementierung

Die technischen Eigenschaften der unterschiedlichen Fahrzeugtypen, insbesondere die der Batterie, müssen bekannt sein. Das Gleiche gilt für die Leistungskennzahlen der vorgesehenen Ladeinfrastruktur. Je nach Standort können zudem abweichende Netz-

anschlussbedingungen vorliegen, welche die Grenze der Leistungsentnahme vorgeben. Weiterhin sind Informationen zum Strompreis erforderlich, um zeit- und lastvariable Stromtarife zu ermöglichen. Die betreiberspezifischen Daten beinhalten einen Umlaufplan, der entweder durch den Flottenbetreiber vorgegeben oder durch die Flottensimulation von eFLIPS¹⁶³ berechnet wird. Da sich Service- und Betriebsabläufe im Depot je nach Betreiber unterscheiden können, werden diese ebenfalls eingelesen. Außerdem kann ein Depotlayout, das die Anzahl der Anlagen und Stauräume sowie deren Platzverhältnisse aufzeigt, hinterlegt werden. Falls dies nicht vorliegt, können hierfür sinnvolle Grundannahmen bestimmt werden. Dies gilt gleichermaßen für die vorgesehenen Abstellordnungen.

Der Kern des Konzeptmodells besteht aus einem Depotmodell mit zusätzlichen Optimierungsoptionen. In einem Depot kann ein ankommendes Fahrzeug aufgrund von Service- und Energiebedarf an der sofortigen Zuweisung zu einem neuen Umlauf gehindert werden. Je nach Status und vorgesehenen Service- und Betriebsabläufen wird das Fahrzeug nacheinander auf verschiedenen Flächen abgestellt, auf denen Prozesse durchgeführt werden können. Eine zentrale Steuerung koordiniert diese Fahrzeugbewegungen im Depot. Die Flächen haben eine Abstellordnung und eine begrenzte Kapazität, das heißt Fahrzeuge können die Fläche nur anfahren, falls ein Platz frei ist, andernfalls müssen diese warten. Zur Durchführung von Prozessen, wie Reinigen, Laden oder Vorkonditionieren, können Ressourcen erforderlich sein, z. B. Mitarbeiter im Service oder Ladeschnittstellen auf Stellplätzen. Durch die Konfiguration von Prozesseigenschaften kann der Prozessablauf definiert werden. Die Reduktion auf eine zeitliche Komponente bei Serviceprozessen wird als ausreichender Detaillierungsgrad angesehen.

Da die platzintensive Abstellanlage und die Dimensionierung der Stromversorgung eine zentrale Rolle bei der Planung und Auslegung von E-Depots spielen, besteht die Möglichkeit die Konfiguration der Abstellflächen zu optimieren und ein Lade- und Lastmanagement durchzuführen. Hierbei übernehmen die Optimierungskomponenten die Steuerung des Simulationsmodells und nutzen Teilergebnisse für eine Verbesserung der Konfigurationsparameter.

¹⁶³Siehe Abschnitt 3.4.

5 Modellformalisierung und Implementierung

Das aus dem vorherigen Kapitel erarbeitete Konzeptmodell ist die Grundlage für die Umsetzung in ein ablauffähiges Simulationsmodell. Zunächst wird die entwickelte Modellstruktur (Abschnitt 5.1) dargelegt und darauffolgend die einzelnen Modellkomponenten (Abschnitt 5.2) formal beschrieben. Weiterhin werden die Entwicklung und Umsetzung der Steuerungs- und Optimierungsoptionen für die Abstell- und Dispositionsstrategien (Abschnitt 5.3), das Lade- und Lastmanagements (Abschnitt 5.4) sowie der Konfiguration der Abstellflächen (Abschnitt 5.5) erläutert. Das Kapitel schließt mit der Implementierung einer Visualisierung der Simulation (Abschnitt 5.6) ab.

5.1 Modellstruktur

Aufgrund der Modellanforderungen¹⁶⁴ und den relevanten Merkmalen und Optionen¹⁶⁵ eines E-Depots eignet sich der objektorientierte Modellierungsansatz zur Entwicklung einer Modellstruktur. Da einzelne Modellelemente (z. B. Fahrzeuge, Flächen, Prozesse und Ressourcen) im Modell mehrfach auftreten, können sie zu Klassen zusammengefasst werden. Eine Klasse ist im Prinzip ein Bauplan für Objekte, die durch Attribute (Eigenschaften) und Methoden (Verhalten) spezifiziert werden.

Die entwickelte Modellstruktur ist als vereinfachtes Klassendiagramm in Abb. 5.1 dargestellt, das die wichtigsten Klassen und deren Eigenschaften sowie Beziehungen zueinander aufzeigt. Diese Struktur beruht auf den Elementen des Konzeptmodells¹⁶⁶. Im Mittelpunkt steht die Depot-Klasse, die Assoziationen in Form von Aggregation und Komposition¹⁶⁷ zu 7 Hauptklassen hat und im folgenden Abschnitt 5.2 funktional beschrieben und formalisiert wird:

- *Schedule*: Ein Depot besitzt einen Umlaufplan (*Schedule*), der alle Umläufe (*trips*) und deren Eigenschaften beinhaltet (Unterabschnitt 5.2.1).

¹⁶⁴Siehe Abb. 4.2.

¹⁶⁵Siehe Abb. 4.8.

¹⁶⁶Siehe Abb. 4.9.

¹⁶⁷„Eine Aggregation ist eine „Ganzes/Teil“-Beziehung. Eine Komposition ist eine Aggregation, in der die Teile vom Ganzen existenzabhängig sind“ (Czuchra (2010, S. 73)).

- *DepotControl*: Steuert die Fahrzeugbewegungen im Depot und ermöglicht das Abstellen und Disponieren der Fahrzeuge nach verschiedenen Strategien (Unterabschnitt 5.2.2 und Abschnitt 5.3).
- *Vehicle*: Diese Klasse repräsentiert ein E-Fahrzeug, das eine Batterie und einen individuellen Prozessablauf im Depot (*DepotWorkingData*) besitzt (Unterabschnitt 5.2.3).
- *Area*: Das Layout eines Depots wird maßgeblich durch diese Klasse definiert. Eine *Area* kann entweder aus jederzeit zugänglichen Stellplätzen (*Direct*) oder Stellplätzen in Reihe (*Line*) bestehen (Unterabschnitt 5.2.4).
- *Process*: Eine *Area* kann verschiedene Prozesse, wie Laden (*Charging*), Reinigen/Versorgen (*Service*), Rangieren (*Shunting*), Vorkonditionieren (*Precondition*) und Warten (*Standby*) bereitstellen (Unterabschnitt 5.2.5).
- *Resource*: Einer *Area* können Ressourcen zur Prozessdurchführung zugeordnet werden. Eine Ressource ist entweder eine Ladeinfrastruktur (*ChargingInterface*) oder ein Mitarbeiter (*Worker*) (Unterabschnitt 5.2.6).
- *DepotEvaluation*: Diese Klasse wird zum Datenlogging während der Simulation, zur Datenanalyse und Ergebnisdarstellung genutzt (Unterabschnitt 5.2.7).

Die Anforderung zur realitätsnahen Visualisierung der Abläufe im Depot während eines Simulationsdurchlaufs ($A_M 2$) wird durch die Klassen *DepotAreaView* und *VehicleSlotView* beschrieben. Die Formalisierung und Realisierung wird in Abschnitt 5.6 erläutert. Weiterhin sind die beiden Optimierungsoptionen¹⁶⁸ zur Dimensionierung der Abstellanlage und des Netzanschlusses Gegenstand der Modellstruktur und werden in Abschnitt 5.4 und Abschnitt 5.5 erläutert und formalisiert.

Das Modell ist in der Programmiersprache Python implementiert. Die Infrastruktur zur diskreten, ereignisorientierten Simulation wurde mittels SimPy realisiert, das u. a. eine Prozess- und Eventverwaltung, kapazitätsbeschränkte Ressourcen und eine Simulationsuhr bereitstellt.¹⁶⁹

5.2 Hauptklassen

5.2.1 *Schedule*

Ein *Schedule* beinhaltet alle Informationen eines Umlaufplans sowie der ein- und ausfahrenden Fahrzeuge und wird zu Beginn der Simulation eingelesen. Die notwendigen Daten können entweder durch die Flottensimulation von eFLIPS¹⁷⁰ oder durch

¹⁶⁸Siehe Abb. 4.9.

¹⁶⁹Vgl. Lünsdorf und Scherfke (2018).

¹⁷⁰Siehe Abschnitt 3.4.

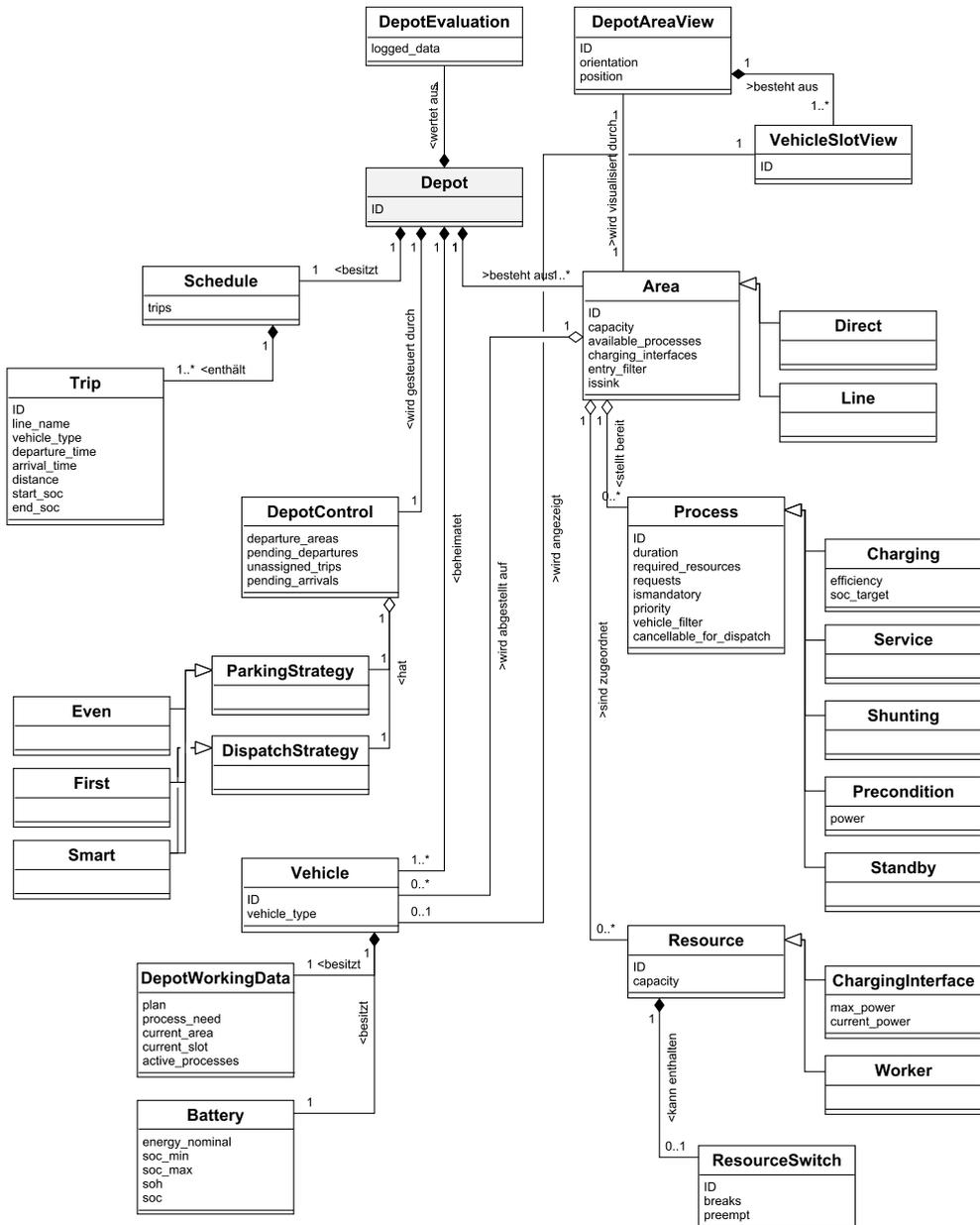


Abb. 5.1: Vereinfachtes Klassendiagramm des Simulationsmodells auf Basis des Konzeptmodells (siehe Abb. 4.9)

einen Flottenbetreiber bereitgestellt werden. In Tabelle 5.1 ist die Datenschnittstelle mit einem Beispiel dargestellt. Jeder Umlauf (*trip*) hat einen durchlaufenden, eindeutigen Identifikator (ID) und eine Bezeichnung der Linie (*line*). Zudem ist jedem Umlauf ein bevorzugter Fahrzeugtyp (*vehicle_type*) zugewiesen, der sich in Maße, Batterieeigenschaften und Ladestrategie unterscheiden kann. Es können beliebig viele Fahrzeugtypen definiert werden. Die geplanten Abfahrts- und Ankunftszeiten (*std*, *sta*) sind in Sekunden ab 0:00 Uhr (Simulationsbeginn) angegeben. Bei Abfahrt vom Depot kann ein Ladezustand (SoC_{bus}^{dep}) definiert werden, welcher normalerweise den maximal möglichen SoC widerspiegelt. Der Ladezustand bei Ankunft im Depot (SoC_{bus}^{arr}) ist abhängig von der Ladestrategie und den Fahrzeug- und Umlaufeigenschaften. Die Umlauflänge (*distance*) kann zudem genutzt werden, um die Jahres-km für die einzelnen Fahrzeuge anzugleichen und das Wartungsintervall einzuhalten.

Tabelle 5.1: Beispiel für ein *Schedule* (Umlaufplan) als Datenschnittstelle

<i>ID</i>	<i>line</i>	<i>vehicle_type</i>	<i>std</i> [s]	<i>sta</i> [s]	<i>distance</i> [km]	SoC_{bus}^{dep} [%]	SoC_{bus}^{arr} [%]
1	162	SB_DC	360	17640	129,95	90	24,3
2	M11	AB_OC	8760	100920	433,39	95	73,3
3	123	SB_DC	12360	38064	115,00	90	19,8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
433	N60	SB_DC	85800	103380	125,15	90	25,1

std = scheduled time of departure, *sta* = scheduled time of arrival

SB_DC = Standard Bus Depot Charging, AB_OC = Articulated Bus Opportunity Charging

5.2.2 DepotControl

Die Klasse *DepotControl* steuert die Fahrzeugbewegungen im Depot. Wie im Konzeptmodell¹⁷¹ beschrieben, beinhaltet dies die Koordination des Betriebsablaufs jedes einzelnen Fahrzeugs sowie das Abstellen und Disponieren. In Abb. 5.2 ist dies als Flussdiagramm wiedergegeben.

Bei der Ankunft im Depot checkt das Fahrzeug ein ① und bekommt einen individuellen, digitalen Ablaufplan zugewiesen. Ein Ablaufplan ist eine Liste aus einzelnen Standorten, die während des Depotaufenthalts angefahren werden müssen. Der Plan wird in einer Schleife abgearbeitet. Solange der Plan nicht leer ist ②, wird der nächste Standort entfernt ③. In den nächsten beiden Schritten ④ und ⑤ wird überprüft, ob das Fahrzeug am Standort und für die angebotenen Prozesse zugelassen ist. Nach dem Schritt ⑥ wird das Fahrzeug entweder direkt auf die zugehörige Fläche des Standorts

¹⁷¹Siehe Abb. 4.9.

versetzt ⑦) oder falls Flächen zu einer Gruppe zusammengefasst sind, zunächst eine Abstellstrategie angewandt, um eine Fläche zu bestimmen ⑥a). In Schritt ⑧) werden Prozesse geplant, gestartet und beendet. Handelt es sich bei der Fläche um eine Senke ⑨), d. h. Fahrzeuge können von der Fläche das Depot verlassen, ist das Fahrzeug abfahrtsbereit und wartet auf die Disposition zu einem Umlauf ⑩). Mit der Disposition ist die Abfahrtszeit bekannt und somit kann die Vorkonditionierungszeit zugewiesen werden ⑪). Bis zur hinterlegten Abfahrtszeit wartet das Fahrzeug auf der Fläche ⑫) und verlässt dann das Depot ⑬).

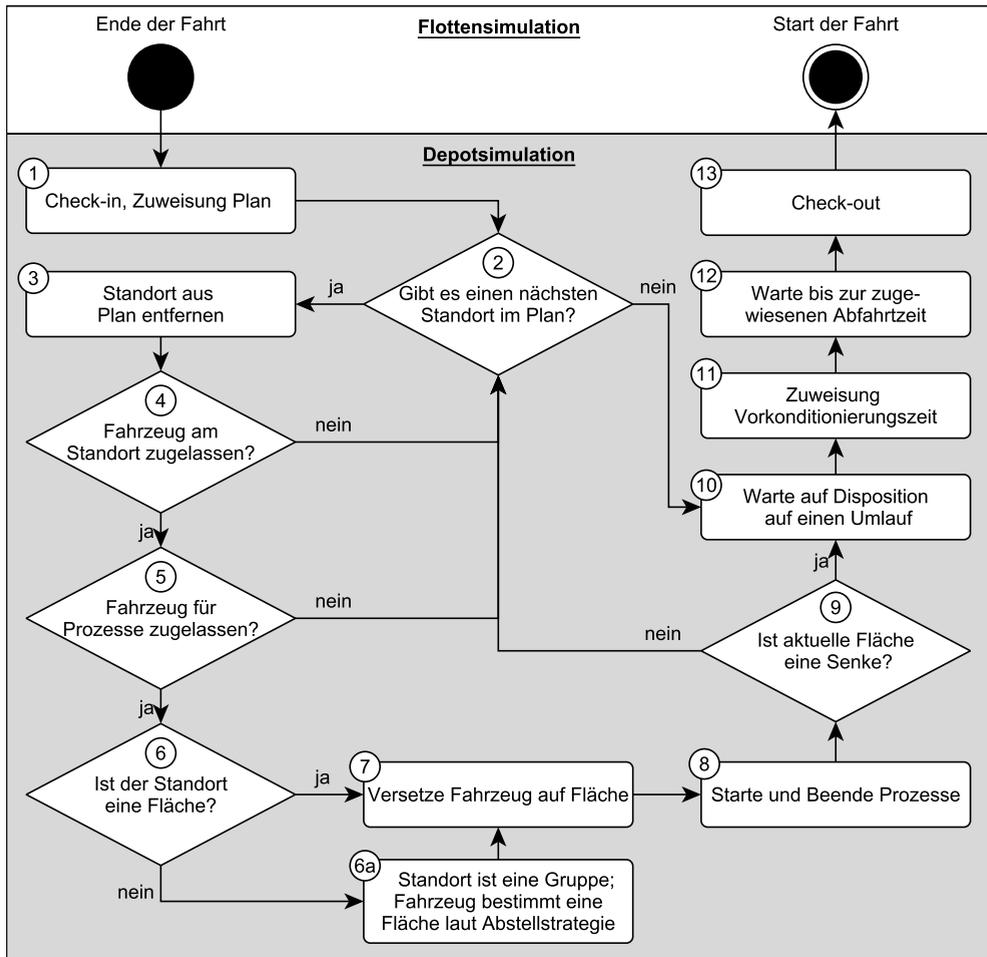


Abb. 5.2: Aufgabe der Klasse *DepotControl* als Flussdiagramm¹⁷²

¹⁷²Vgl. Lauth et al. (2019).

5.2.3 Vehicle

Ein Fahrzeug wird hauptsächlich durch ein Fahrzeugtyp definiert. Es besitzt in der Simulation einen Datencontainer *DepotWorkingData*, der die Kommunikation zwischen Depot und Fahrzeug sicherstellt, sowie eine Fahrzeugbatterie (*Battery*).

DepotWorkingData

Ein Attribut der Klasse ist der Ablaufplan (*plan*), der durch *DepotControl* gesteuert wird. Grundsätzlich kann ein Plan für jedes Fahrzeug individuell vorgeben werden oder z. B. auch nur für einzelne Fahrzeugtypen gelten. Die Einstellungen eines Plans können über ein Template eingelesen werden. In Abb. 5.3 ist ein beispielhafter Ablaufplan mit einer linearen Sequenz von Standorten dargestellt. Die Standorte können aus einzelnen Flächen (*Area*) oder Gruppenflächen (*AreaGroup*) bestehen.

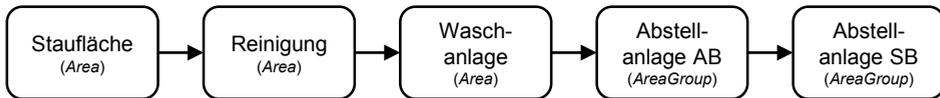


Abb. 5.3: Default Ablaufplan (*plan*)

Weiterhin ist der Klasse bekannt welche Prozesse das Fahrzeug benötigt und welche gerade aktiv sind. Dies betrifft auch die aktuelle Fläche und der dazugehörige Stellplatz (*slot*) auf der Fläche (siehe Abb. 5.1).

Battery

Eine Fahrzeugbatterie wird über ihre Eigenschaften definiert. Diese bestehen aus dem nominalen Energiegehalt $E_{\text{bus, bat}}^{\text{nom}}$ in kWh und dem SoC-Fenster (SoC_{min} , SoC_{max}) in dem die Batterie betrieben werden kann, um die Lebensdauer der Batterie zu erhöhen. Weiterhin ist der Klasse der SoH und der aktuelle Ladezustand SoC bekannt. Die Definitionen der einzelnen Batterieparameter werden in Abschnitt 5.2.5 beschrieben.

5.2.4 Area

Eine Fläche (*Area*) repräsentiert einen Standort für Fahrzeuge im Depot. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Stellplätze und den Typ: Einzel (*Direct*) und

Reihe (*Line*), wie in Abb. 5.4 dargestellt. *Direct Areas* besitzen Stellplätze, die jederzeit zugänglich sind und normalerweise für den Service und die Abstellanlage genutzt werden. Um Flächen zu implementieren, in denen sich Fahrzeuge in einer Reihe gegenseitig blockieren können, wurde die Standard *SimPy-Store*-Funktionalität um eine *LineStore*-Unterklasse erweitert. Flächen können zudem gruppiert werden, um Fahrzeuge mehreren Flächen zuzuweisen. Dies ist eine Voraussetzung für die Anwendung von Abstell- und Dispositionsstrategien.

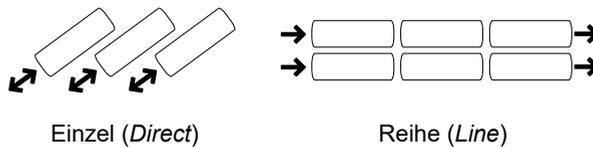


Abb. 5.4: Berücksichtigte Flächentypen

5.2.5 Process

Die Kernfunktionen der *Process*-Klasse sind das Starten, Pausieren und Beenden von Prozessen sowie die Handhabung der erforderlichen Ressourcen. Ein Prozess hat verschiedene Eigenschaften, z. B. eine Dauer, eine Priorität, eine obligatorische Durchführung und verschiedene Filtermöglichkeiten. Es können beliebig viele Prozesse implementiert werden. Im Folgenden werden die fünf Grundprozesse beschrieben.

Charging

Das Laden eines Busses wird in der Simulation als eigenständiger Prozess definiert und kann jeder Fläche zugewiesen werden, die eine Ladeinfrastruktur als Ressource hat. Es können zudem mehrere verschiedene Ladeprozesse implementiert werden, um ein spezifisches Ladeverhalten abzubilden, beispielsweise für unterschiedliche Fahrzeugtypen oder Ladestrategien.

Der Energiebedarf eines Elektrobusses E_{bus}^{dem} hängt im Wesentlichen von dem Ladezustand der Batterie bei Ankunft im Depot SoC_{bus}^{arr} und einem festzulegenden Zielladestand bei Abfahrt SoC_{bus}^{dep} ab. Der SoC wird als das Verhältnis des verfügbaren Ladungszustands zur maximalen Ladungsmenge der Batterie definiert.¹⁷³ Falls eine Lademöglichkeit außerhalb des Depots besteht, ist SoC_{bus}^{arr} üblicherweise höher als bei Bussen die ausschließlich im Depot geladen werden. Es gilt folgender Zusammenhang:

¹⁷³Vgl. How, Hannan, Hossain Lipu und Ker (2019).

$$E_{bus}^{dem} = (SoC_{bus}^{dep} - SoC_{bus}^{arr}) \cdot E_{bus,bat}^{real} \quad (5.1)$$

mit

$$E_{bus,bat}^{real} = E_{bus,bat}^{nom} \cdot SoH_{bus,bat} \quad (5.2)$$

Dabei ist $E_{bus,bat}^{real}$ die reale Batteriekapazität in kWh, $E_{bus,bat}^{nom}$ die nominalen Batteriekapazität in kWh und $SoH_{bus,bat}$ der Gesundheitszustand der Batterie, der unter Berücksichtigung der Alterung den noch nutzbaren Anteil der nominalen Kapazität definiert.

Für die in E-Bussen üblicherweise eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien¹⁷⁴ existieren eine Vielzahl verschiedener Ladeverfahren.¹⁷⁵ Eine weitverbreitete Methode ist das Ladeverfahren *Constant Current / Constant Voltage* (dt. Konstantstrom / Konstantspannung) (CC/CV), wie in Abb. 5.5 schematisch dargestellt.¹⁷⁶ Hierbei wird die Batterie in einer ersten Phase mit konstantem Strom aufgeladen, bis die Spannung einen festgelegten Grenzwert erreicht, üblicherweise bei einem $SoC_{threshold}$ von ca. 70–80 %¹⁷⁷. In der anschließenden Phase wird die Spannung konstant gehalten, bis der Strom auf einen vorbestimmten Wert abfällt, z. B. von 0,1 C¹⁷⁸, um ein Überladen der Batterie zu verhindern. Der Abfall des Stroms in der CV-Phase verläuft näherungsweise exponentiell¹⁷⁹, wodurch der Ladezustand der Batterie ebenfalls nicht mehr linear mit der Zeit steigt und der Ladeprozess sich verlangsamt. Des Weiteren wird die Batterie in der Praxis nur in einem definierten SoC-Fenster betrieben, in Abb. 5.5 durch SoC_{min} und SoC_{max} gekennzeichnet, z. B. zwischen 10–90 %, um eine frühzeitige Alterung durch Tiefentladung bzw. Überladung zu vermeiden. Die Angaben werden vom Batteriehersteller vorgegeben und variieren je nach Zelltyp.¹⁸⁰

Zur Vereinfachung des Ladeverlaufs wird angenommen, dass die Ladeleistung in Abhängigkeit vom SoC nach folgendem allgemeinen Zusammenhang ausgedrückt werden kann:

$$P(SoC) = \begin{cases} b & , SoC_{min} < SoC \leq SoC_{threshold} \\ a \cdot exp(SoC) + b & , SoC_{threshold} < SoC < SoC_{max} \end{cases} \quad (5.3)$$

¹⁷⁴Siehe Unterabschnitt 2.1.1.

¹⁷⁵Vgl. Tomaszewska et al. (2019).

¹⁷⁶Vgl. Leuthner (2013, S. 15 f.); Hoimoja, Rufer, Dziechciaruk und Vezzini (2012).

¹⁷⁷Vgl. Bauer (2020); Hoimoja et al. (2012); Sassone et al. (2014).

¹⁷⁸Vgl. Tar und Fayed (2016).

¹⁷⁹Vgl. Amin, Ismail und Hapid (2018); Bauer (2020).

¹⁸⁰Siehe Unterabschnitt 2.1.1.

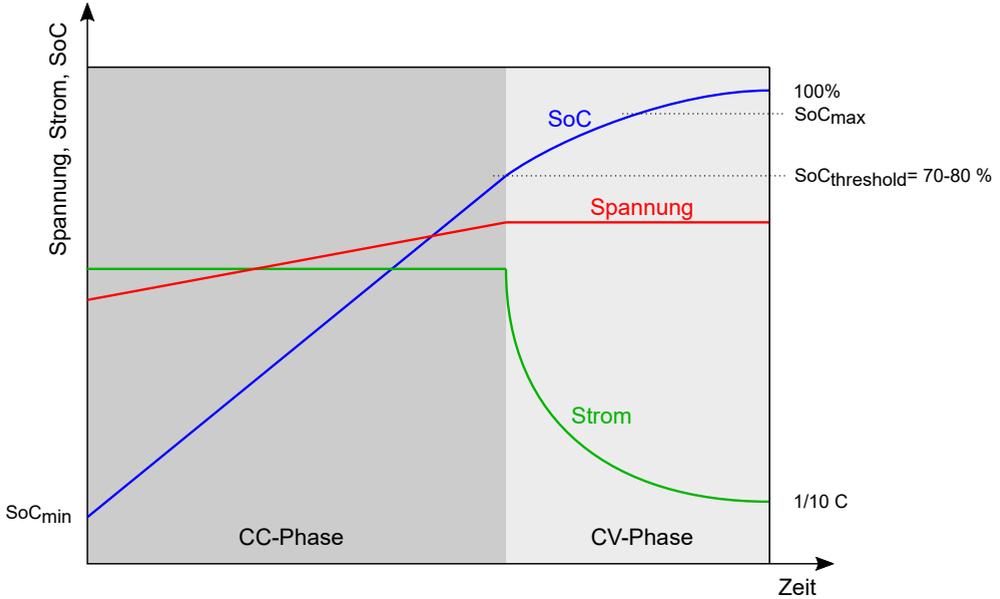


Abb. 5.5: Schematischer Ladeverlauf beim CC/CV Verfahren

Somit ist die Leistung bis zu $SoC_{threshold}$ konstant und fällt anschließend exponentiell ab. Die Koeffizienten a und b können anhand der Batterieparameter berechnet werden. Die konstante Ladeleistung in der ersten Phase wird wie folgt ermittelt:

$$P_{bus,infr}^{ch,max} = \min(P_{bus}^{ch,max}, P_{infr}^{ch,max}) \cdot \eta_{ch} \quad (5.4)$$

Dabei ist $P_{bus}^{ch,max}$ die maximale Ladeleistung des Batteriesystems des Busses und $P_{infr}^{ch,max}$ die maximale Ladeleistung der Ladeinfrastruktur. Es wird der minimale Wert genutzt, damit sichergestellt ist, dass der Ladeprozess nur mit einer maximal möglichen Ladeleistung durchgeführt wird. Zudem kann für den Ladeprozess ein Wirkungsgrad η_{ch} berücksichtigt werden.

Der Ladevorgang gilt als beendet, sobald der Zielladezustand erreicht wird. Im Normalfall wird der Bus bis zum maximal möglichen Ladezustand geladen, somit gilt $SoC_{bus}^{dep} = SoC_{max}$. Falls bei der Disposition kein passendes vollgeladenes Fahrzeug zur Verfügung steht, kann der Ladeprozess abgebrochen werden, sofern der Ladezustand für den zugewiesenen Umlauf ausreicht.

Nun kann es vorkommen, dass Fahrzeuge länger an einer Ladeinfrastruktur verbunden sind als notwendig. Diese Dauer gibt Aufschluss über das Flexibilitätspotenzial des Ladevorgangs und berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\Delta T_{bus}^{ch,flex} = T_{bus}^{dep} - T_{bus}^{arr} - \Delta T_{bus}^{ch} \quad (5.5)$$

Dabei ist T_{bus}^{dep} die Abfahrtszeit des Busses von der Ladeinfrastruktur, T_{bus}^{arr} die Ankunftszeit an der Ladeinfrastruktur und ΔT_{bus}^{ch} die Dauer des simulierten ungesteuerten Ladevorgangs.

Service

Der Service-Prozess wird für die Reinigung und die Instandhaltung genutzt. Üblicherweise werden mehrere unterschiedlich lange Prozesse parallel durchgeführt, wie z. B. die tägliche Innenreinigung und das Auffüllen von Betriebsmitteln. Für jeden Vorgang ist eine freistehende Ressource, hier Mitarbeitern, notwendig. Weiterhin können Wartungsintervalle abhängig der Jahresfahrleistungen definiert werden.

Shunting

Um die Dauer der Fahrzeugbewegungen von Fläche zu Fläche zu berücksichtigen, kann der Rangierprozess genutzt werden. Fahrzeuge benötigen zum Fahren eine *human Resource* und bleiben dann auf einer definierten Rangierfläche für die angegebene Zeit stehen, was das Fahren im Depot simuliert.

Precondition

Die Vorkonditionierung (*Precondition*) des Fahrgastinnenraums wird im Anschluss der Disposition eingeplant. Hierfür wird dem Fahrzeug für eine definierte Zeit vor Abfahrt eine Leistung zur Verfügung gestellt. Der Prozess kann zudem abgebrochen werden, falls dies notwendig wird.

Standby

Falls Fahrzeuge eine Mindestzeit auf einer Fläche verweilen müssen, kann der Standby-Prozess den obligatorischen Aufenthalt erzwingen.

5.2.6 Resource

Um einen Prozess durchzuführen ist eine *Resource* erforderlich. Diese sind z. B. Ladeschnittstellen auf Stellplätzen oder Mitarbeiter im Service. Die Ressourcen können mehreren Stellplätzen zugewiesen werden und zudem Kapazitätsbeschränkungen unterliegen und nur zu gewissen Zeiten zur Verfügung stehen. Durch einen *Resource-Switch* kann eine periodische Einschränkung realisiert werden, wie es z. B. im Service mit Schichtbetrieb der Fall ist. Solange Ressourcen nicht verfügbar sind, wird ein Prozess pausiert und die Fahrzeuge warten entsprechend auf der Fläche.

5.2.7 DepotEvaluation

Hauptaufgabe dieser Klasse ist die Speicherung von Objektattributen gemäß Abb. 5.1 während eines Simulationsdurchlaufs, um diese nach Abschluss einer Simulation auszuwerten und zu analysieren. Für jedes Objekt können die zu speichernden Attribute festgelegt werden. Die Änderungszustände werden ereignisorientiert gespeichert. Das Vorgehen zur Berechnung von Indikatoren zur Verifikation des Modells und zur Planung und Evaluierung von E-Depots wird in Abschnitt 6.2 beschrieben.

5.3 Abstell- und Dispositionsstrategien

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sind zum Betrieb einer Abstellanlage von E-Bussen Steuerungsfunktionen für die Stellplatzzuweisung und Fahrzeugdisposition notwendig (A_M 4). Zum einen müssen die Fahrzeuge mit Ladebedarf an einen geeigneten Stellplatz mit kompatibler Ladeschnittstelle abgestellt werden. Zum anderen ist sicherzustellen, dass ein abfahrereites und passendes Fahrzeug zur Disposition zur Verfügung steht, sobald eins gemäß Umlaufplan benötigt wird. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden im Folgenden drei Abstell- und Dispositionsstrategien, wie bereits in Abb. 4.8 aufgezeigt, vorgestellt, die gemeinsam mit Patrick Mundt im Rahmen seiner Abschlussarbeit entwickelt und implementiert wurden:¹⁸¹

- **Gleichmäßig (*Even*):** Gleichmäßige Abstellung an der Ausfahrtseite und Disposition nach der Methode First-In-First-Out (FIFO)
- **Reihenweise (*First*):** Abstellung auf dem ersten verfügbaren Stellplatz in einer Reihe und Disposition nach der Methode FIFO
- **Smart:** Abstellung und Disposition nach einem multikriteriellen Entscheidungsverfahren

¹⁸¹Vgl. Lauth et al. (2019); Mundt (2020).

Verkehrsbetriebe die keine Managementlösungen einsetzen, nutzen einfache Strategien, wie eine gleichmäßige (*Even*) oder reihenweise (*First*) Befüllung einer Abstellfläche in Blockabstellung unter Berücksichtigung der Fahrzeugtypkompatibilität.¹⁸² Die Disposition erfolgt bei diesen Strategien üblicherweise ebenfalls nach einfachen Regeln. Hier wurde eine bekannte Methode für Warteschlangen FIFO¹⁸³ angewandt, da davon auszugehen ist, dass Fahrzeuge die früher geparkt werden auch früher wieder aufgeladen sind. Die *Even*-Strategie hat den Vorteil einer hohen Fahrzeugverfügbarkeit für die Disposition, da die Fahrzeuge näher an der Ausfahrtseite stehen und sich dadurch weniger blockieren können. Allerdings kann es bei dieser Strategie vorkommen, dass die Abstellfläche nicht vollständig ausgenutzt werden kann. Bereits parkende Fahrzeuge können eine Reihe blockieren und somit ein Auffüllen am Anfang einer Reihe erschweren. Dies wird bei der *First*-Strategie besser umgesetzt, jedoch bei einer schlechteren Fahrzeugverfügbarkeit. Um eine Abstellfläche effizienter zu nutzen und gleichzeitig eine hohe Fahrzeugverfügbarkeit zu gewähren, müssen entweder Fahrzeuge rangiert werden oder die Zuweisung muss weitere Kriterien mit einbeziehen. Da ein Rangieren zeit- und personalaufwändig ist, wurde die Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart* entwickelt und im Folgenden erläutert.

5.3.1 Lösungsstruktur

Abstellen und Disponieren können sich gegenseitig beeinflussen, daher wird für beide Vorgänge eine gemeinsame Lösungsstruktur festgelegt, um eine kooperative Lösung zu erreichen. Die beiden Hauptziele dieser Strategie sind die Erhöhung von freien und zugänglichen Stellplätzen und die Erhöhung der Verfügbarkeit von abfahrbereiten Fahrzeugen. Die Zielerreichung soll auf Basis mehrerer Kriterien erfolgen.

Die Entscheidungen zum Abstellen und Disponieren müssen im Betriebsablauf vielfach getroffen werden, einmal pro Ankunft bzw. Abfahrt auf/von der Abstellfläche.¹⁸⁴ Die Entscheidung über einen geeigneten Stellplatz für ein Fahrzeug wird während der Depotsimulation unmittelbar vor der Abstellung getroffen, damit der aktuelle Fahrzeug- und Abstellflächenstatus in Betracht gezogen werden kann. Die Disposition eines Fahrzeugs auf einen Umlauf kann vor dem geplanten Abfahrzeitpunkt stattfinden und ist frei wählbar.¹⁸⁵ Es werden keine zukünftigen Fahrzeugbewegungen im Depot sowie

¹⁸²Siehe Unterabschnitt 2.2.2.

¹⁸³Vgl. Hower (2019, S. 70).

¹⁸⁴Siehe Schritte ⑦ und ⑩ aus Abb. 5.2.

¹⁸⁵Für Prozesse die eine Abfahrzeitpunkt benötigen, wie z. B. ein Vorkonditionieren des Fahrgastinnenraums, ist es wichtig den Dispositionsprozess so zu wählen, dass die Prozesse noch durchgeführt werden können, z. B. 30 min vor Abfahrt.

keine vorausschauenden Betrachtungen des Umlaufplans berücksichtigt, d.h. Entscheidungen werden generell unter Unsicherheit getroffen.¹⁸⁶ Für die Planung eines Depots sollte dieser Ansatz ausreichend sein, wenn möglich aber bei Echtzeitanwendungen im Realbetrieb beachtet werden.¹⁸⁷

Für multikriterielle Entscheidungsprobleme (im engl. Multi-Criteria Decision Analysis) stellt die Entscheidungstheorie diverse Methoden bereit.¹⁸⁸ Dieses Mehrzielproblem wird durch zwei heuristische Algorithmen (siehe Abb. 5.6 und Abb. 5.7) gelöst, die im Kern ein Scoring-Modell beinhalten, welches dem Prinzip einer vereinfachten Nutzwertanalyse nach Zangemeister (2014) entspricht. Diese weitverbreitete Methode eignet sich besonders, wenn mehrere entscheidungsrelevante Zielkriterien zu beachten sind.¹⁸⁹ Aufgrund der Häufigkeit der Entscheidungen in einem Simulationsverlauf¹⁹⁰ wurde die Kombination mit einem heuristischen Verfahren gewählt, um akzeptable Lösungen in einer vertretbaren Rechenzeit zu bestimmen.¹⁹¹

```

1 bestimme  $slots_{available}$ ;
2 bestimme  $slots_{compatible}$  mit  $vehicle$  aus  $slots_{available}$ ;
3 if  $any\ slots_{compatible}$  then
4   | for  $slot \in slots_{compatible}$  do
5   |   | bestimme  $r(slot)$ ;
6   |   end for
7   |   ordne  $slot$  mit  $max(r)$  dem  $vehicle$  zu;
8 else
9   | füge  $vehicle$  der Warteschlange hinzu
10 end if

```

Abb. 5.6: Algorithmus für die Abstellung (Schritt 6a) aus Abb. 5.2)

Zu Beginn der Algorithmen werden die kompatiblen Alternativen für die Abstellung ($slots_{compatible}$, Abb. 5.6 Zeile 2) bzw. Disposition ($vehicles_{compatible}$, Abb. 5.7 Zeile 7) bestimmt. Diese müssen die Anforderungen laut Tabelle 5.2 erfüllen, um in der folgenden Bewertung berücksichtigt zu werden.

Falls mindestens zwei Alternativen die Anforderungen erfüllen, erfolgt im nächsten Schritt die Bewertung ($r(slot)$, Abb. 5.6 Zeile 5 bzw. $r(vehicle)$, Abb. 5.7 Zeile 10) anhand verschiedener Kriterien. Das Ergebnis v eines Kriteriums i für eine Alternative x kann sowohl positiv (vorteilhaft) als auch negativ (nachteilhaft) oder 0 (neutral) sein.¹⁹² Der Wertebereich der Skala geht von -1 bis 1. Die Gesamtwert-

¹⁸⁶Vgl. Mundt (2020, S. 23).

¹⁸⁷Siehe Unterabschnitt 2.2.2.

¹⁸⁸Vgl. Marttunen, Lienert und Belton (2017); Schenk, Wirth und Müller (2014, S. 745 ff.).

¹⁸⁹Vgl. Zangemeister (2014, S. 7).

¹⁹⁰Siehe Abb. 5.2.

¹⁹¹Vgl. Haahr, Lusby und Wagenaar (2015).

¹⁹²Mundt (2020, S. 24); Hier weicht diese Methode von der klassischen Nutzwertanalyse ab, indem negative Ergebnisse eines Kriteriums zur besseren Verständlichkeit zugelassen sind, wie z. B. auch in Garau, Hampson, Devlin, Mazzanti und Profico (2018).

```

1 success = wahr;
2 while success = wahr do
3   bestimme trips_pending;
4   if any trips_pending then
5     for trip ∈ trips_pending do
6       bestimme vehicles_pending;
7       bestimme vehicles_compatible mit trip aus vehicles_pending;
8       if any vehicles_compatible then
9         for vehicle ∈ vehicles_compatible do
10          | bestimme r(vehicle);
11        end for
12        ordne vehicle mit max(r) einem trip zu;
13        success = wahr;
14        break;
15      else
16        | success = falsch;
17      end if
18    end for
19  else
20    | break;
21  end if
22 end while

```

Abb. 5.7: Algorithmus für die Disposition (Schritt ⑩ aus Abb. 5.2)

Tabelle 5.2: Anforderungen für Abstellung und Disposition

Abstellung	Disposition
Stellplatz ist frei	Fahrzeug ist abfahrbereit
Fahrzeug auf Stellplatz zugelassen	Fahrzeugtyp ist mit Umlauf kompatibel
Bei Blockabstellung: Stellplatz am dichtesten an Ausfahrtseite	Fahrzeug erfüllt Mindestreichweite des Umlaufs
Bei Schrägabstellung: Stellplatz mit niedrigster ID	Fahrzeug wird nicht blockiert

tung $r(x)$ einer Alternative ergibt sich aus der Summe aller mit w_i gewichteten Einzelwerte:

$$r(x) = \sum_{i=1}^n v_i(x) \cdot w_i, \quad (v_i \in \mathbb{R}, w_i \in \mathbb{R}^+, \sum_{i=1}^n w_i = 1) \quad (5.6)$$

Die Alternative mit der höchsten Gesamtwertung wird ausgewählt. Bei mehreren Alternativen mit der höchsten Wertung wird diejenige mit der niedrigsten Flächen-ID berücksichtigt. Im Folgenden wird die Bestimmung der Bewertungskriterien $v_i(x)$ und der Gewichtung w_i erläutert.

5.3.2 Bewertungskriterien

Für die Abstellung und Disposition wurden jeweils fünf äquivalente Kriterien¹⁹³ identifiziert, die zur kooperativen Zielerreichung genutzt werden. Die Ziele bestehen in der

- Maximierung der Verfügbarkeit von abfahrbereiten Fahrzeugen (Ziel 1) und der
- Maximierung der Verfügbarkeit von freien, zugänglichen Stellplätzen (Ziel 2).

Nicht alle Kriterien haben einen Einfluss auf die Zielerreichung, daher sind diese den beiden Zielen zugeordnet. In Tabelle 5.3 sind die Kriterien aufgelistet mit der Zuordnung zu den Zielen, den angewandten Flächentypen¹⁹⁴ und des jeweiligen Wertebereichs. Die Kriterien werden im Folgenden erläutert und mit Beispielsituationen (Legende¹⁹⁵ in Abb. A.1) verdeutlicht.

BufferPark und BufferDispatch

Die *Direct*-Stellplätze werden von der Abstell- und Dispositionsstrategie als Puffer genutzt, da diese jederzeit zugänglich sind. Dies bedeutet, dass ein zu parkendes Fahrzeug, falls kein geeigneter Stellplatz gefunden wird, dort abgestellt werden kann. Ebenso wird der Puffer bei der Disposition berücksichtigt, falls kein geeignetes Fahrzeug auf den anderen *Line*-Stellplätzen zur Verfügung steht. Somit werden Pufferflächen beim Abstellen zunächst befüllt und bei Disposition erst als letzte Wahl genutzt. Um auszuschließen, dass nur Fahrzeuge eines Typs auf den Pufferflächen abgestellt werden, wird eine Bedarfsprüfung durchgeführt. Diese überprüft die Anteile der geparkten Fahrzeuge auf der Pufferfläche zum Gesamtanteil der Fahrzeugflotte. Dies wird durch ein Minimalbeispiel in Abb. 5.8 verdeutlicht. Das Kriterium des zu parkenden SB wird mit $v_{BufferPark} = 1$ bewertet, da ein Bedarf besteht, andernfalls wäre $v_{BufferPark} = 0$.

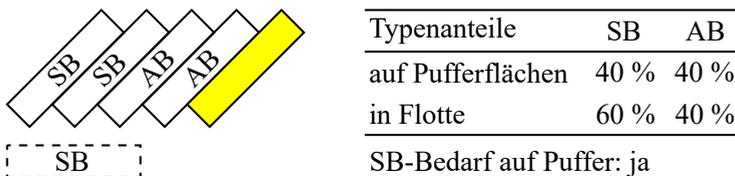


Abb. 5.8: Beispielsituation für BufferPark¹⁹⁷

¹⁹³Die Kriterien haben jeweils zusätzlich das Kürzel Park bzw. Dispatch am Namensende.

¹⁹⁴Wenn der jeweilige Flächentyp nicht berücksichtigt wird, ist die Wertung neutral.

¹⁹⁵Die Fahrzeuglänge wird in den Beispielen nicht berücksichtigt.

¹⁹⁶Vgl. Mundt (2020, S. 28, S. 34).

¹⁹⁷Mundt (2020, S. 29).

Tabelle 5.3: Übersicht der Kriterien zur Bewertung eines Stellplatzes bei Abstellung und eines Fahrzeuges bei Disposition ¹⁹⁶

Kriterium	Kurzbeschreibung	Ziel 1	Ziel 2	Flächentypen	Wertebereich
<i>BufferPark</i>	Prüfung ob die Fläche als Puffer genutzt wird und ob der Typ des abzustellenden Fahrzeuges dort benötigt wird	✓	✓	<i>Direct</i>	{0, 1}
<i>TypestackPark</i>	Vergleich der Typen des abzustellenden und der übrigen auf der Fläche abgestellten Fahrzeuge	✓		<i>Line</i>	{-1, 0, 1}
<i>RfdDiffPark</i>	Betrachtung der Differenz der Abfahrbereitschaft des abzustellenden Fahrzeuges und des vorigen Fahrzeuges in der Reihe	✓	✓	<i>Line</i>	{-1, ..., 1}
<i>AvailablePower</i>	Betrachtung der verfügbaren Leistung am Stellplatz	✓		<i>Direct & Line</i>	{0, ..., 1}
<i>EmptySlotsExitPark</i>	Betrachtung der blockierten freien Stellplätze auf der Ausfahrtseite einer Reihe		✓	<i>Line</i>	{-1, ..., 0}
<i>BufferDispatch</i>	Prüfung ob die Fläche als Puffer genutzt wird	✓	✓	<i>Direct</i>	{-1, 0}
<i>TypestackDispatch</i>	Vergleich der Typen des betrachteten und der übrigen auf der Fläche abgestellten Fahrzeuge	✓		<i>Line</i>	{0, 1}
<i>RfdDiffDispatch</i>	Bestimmung der maximalen Dauer bis zum Erreichen der Abfahrbereitschaft aller Fahrzeuge auf einer Fläche		✓	<i>Line</i>	{0, ..., 1}
<i>AvailablePower</i>	Betrachtung der verfügbaren Leistung am Stellplatz	✓		<i>Direct & Line</i>	{0, ..., 1}
<i>EmptySlotsExitDispatch</i>	Betrachtung der blockierten freien Stellplätze auf der Ausfahrtseite einer Reihe		✓	<i>Line</i>	{0, ..., 1}

TypestackPark und TypestackDispatch

Das *Typestack*-Kriterium wird genutzt, um *Line*-Flächen bezüglich des Fahrzeugtyps zu harmonisieren. Aus Sicht der Abstell- und Dispositionsstrategie sind hintereinander abgestellte Fahrzeuge des gleichen Typs vorteilhaft, da die erforderliche Fahrzeugtyp-Reihenfolge gemäß Umlaufplan nicht zwangsläufig mit der Abstellreihenfolge auf den *Line*-Flächen übereinstimmen muss. Durch dieses Kriterium wird die Fahrzeugverfügbarkeit erhöht. Das Minimalbeispiel in Abb. 5.9 zeigt, dass ein AB zwar einsatzbereit ist, allerdings durch ein SB blockiert wird. Folglich wird die Alternative 1 mit $v_{TypestackPark} = 1$ bewertet und die Alternative 2 mit $v_{TypestackPark} = -1$. Eine neutrale Wertung wird bei leeren Reihen eingesetzt, um explizit das Abstellen gleicher Fahrzeugtypen zu fördern und somit Reihen für andere Fahrzeuge freizuhalten. Bei der Disposition wird das Kriterium zur Auflösung typengemischter Reihen genutzt, deren Entstehung bei der Abstellung nicht vermieden werden konnte. Dementsprechend werden typengemischter Reihen positiv mit $v_{TypestackDispatch} = 1$ bewertet.

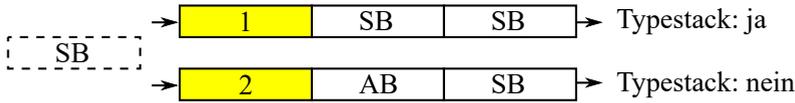


Abb. 5.9: Beispielsituation für *TypestackPark*¹⁹⁸

RfdDiffPark und RfdDiffDispatch

Diese Kriterien beziehen die Abfahrbereitschaft (ready for depature (rfd)) von Fahrzeugen mit ein, um ein unnötiges Warten zu verhindern. Beim Abstellen wird die Differenz zum bereits geparkten Fahrzeug nach Gleichung 5.7 berechnet:

$$\Delta t_{a,b} = t_{rfd_a} - t_{rfd_b}, \quad (t_{rfd_a}, t_{rfd_b} \in \mathbb{N}, \Delta t_{a,b} \in \mathbb{Z}) \tag{5.7}$$

Dabei ist t_{rfd_a} der *rfd*-Zeitpunkt des abzustellenden Fahrzeugs und t_{rfd_b} des bereits abgestellten Fahrzeugs. Für leere Reihen gilt $v_{RfdDiffPark} = 0$. In Abb. 5.10 wird dies in einer Beispielsituation mit zwei Stellplatzalternativen illustriert.

Die Bewertung von *RfdDiffPark* ist abhängig von $\Delta t_{a,b}$ und wird nach Gleichung 5.8¹⁹⁹ berechnet.

¹⁹⁸Mundt (2020, S. 29).

¹⁹⁹Vgl. Mundt (2020, S. 30).

$$v_{RfdDiffPark}(\Delta t_{a,b}) = \begin{cases} \frac{1}{|t_{l_park}|} \Delta t_{a,b}, & \text{falls } t_{l_park} < \Delta t_{a,b} < 0 \\ -\frac{1}{t_{u_park}} \Delta t_{a,b} + 1, & \text{falls } 0 \leq \Delta t_{a,b} < t_{u_park} \\ -1 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.8)$$

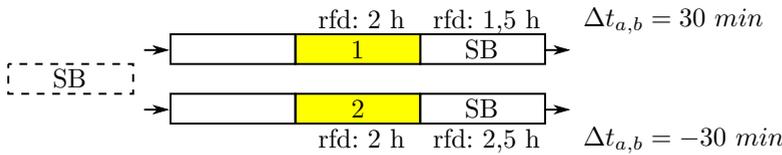


Abb. 5.10: Beispielsituation für RfdDiffPark²⁰⁰

t_{l_park} und t_{u_park} sind die untere bzw. obere Grenze des Zeitbereichs, der als akzeptabel angesehen wird. Basierend auf der Analyse unterschiedlicher Simulationsszenarien werden die Grenzen mit $t_{l_park} = -20 \text{ min}$ und $t_{u_park} = 120 \text{ min}$ als konstant festgelegt. In Abb. 5.11 ist der Funktionsverlauf dargestellt.

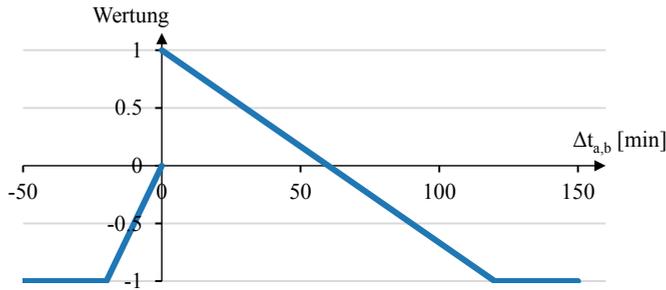


Abb. 5.11: Verlauf von $v_{RfdDiffPark}(\Delta t_{a,b})$ ²⁰¹

Hieraus ist ersichtlich, dass $\Delta t_{a,b} = 0$ am vorteilhaftesten bewertet wird und geringe positive Werte noch akzeptabel sind. Durch die schlechte Wertung außerhalb der Grenzen kann die Stellplatzverfügbarkeit und die Verfügbarkeit abfahrtsbereiter, nicht blockierender Fahrzeuge erhöht werden.

Bei dem Dispositionsalgorithmus wird das *RfdDiffDispatch*-Kriterium genutzt, um Reihen schnellstmöglich zu leeren, damit diese wieder vollständig zur Verfügung stehen. Dies wird durch die Berechnung des maximalen rfd-Werts aller Fahrzeuge t_{rfd_i} einer Reihe erreicht:

²⁰⁰Mundt (2020, S. 30).

²⁰¹Vgl. Mundt (2020, S. 31).

$$t_{i,max} = \max(t_{rfd_i}), \quad (t_{rfd_i} \in \mathbb{N}) \quad (5.9)$$

In Abb. 5.12 wird dies durch eine Beispielsituation dargestellt.

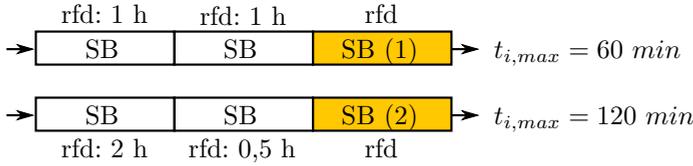


Abb. 5.12: Beispielsituation für RfdDiffDispatch²⁰²

Die Berechnung der Wertung erfolgt anschließend durch²⁰³:

$$v_{RfdDiffDispatch}(t_{i,max}) = \begin{cases} -\frac{1}{t_{u_disp}} t_{i,max} + 1, & \text{falls } 0 \leq t_{i,max} < t_{u_disp} \\ 0, & \text{falls } t_{u_disp} \leq t_{i,max} \end{cases} \quad (5.10)$$

mit

$$t_{u_disp} = 180 \text{ min}. \quad (5.11)$$

Mit dem Funktionsverlauf in Abb. 5.13 wird erreicht, dass ein Wert von $t_{i,max} = 0$ die vorteilhafteste Fahrzeugalternative ist. Die Annahme mit einer oberen Grenze der Funktion von $t_{u_disp} = 180 \text{ min}$ wurde experimentell bestimmt.

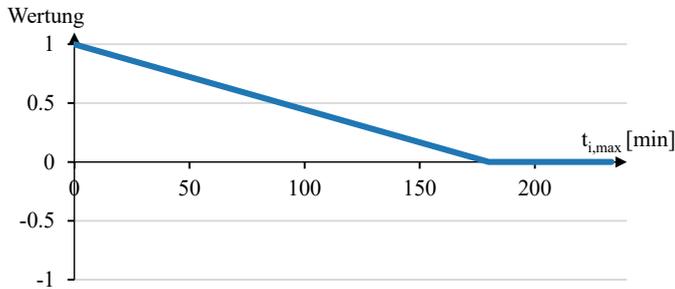


Abb. 5.13: Verlauf von $v_{RfdDiffDispatch}(t_{i,max})$ ²⁰⁴

²⁰²Mundt (2020, S. 36).

²⁰³Ebd.

²⁰⁴Vgl. Mundt (2020, S. 36).

AvailablePower

Das *AvailablePower*-Kriterium wird für beide Flächentypen angewandt und unterscheidet sich nicht zwischen dem Abstellen und der Disposition.²⁰⁵ Falls für Abstellflächen oder sogar einzelne Abstellplätze unterschiedliche statische Ladeleistungen vorgesehen werden, wird angenommen, dass eine höhere Ladeleistung bei der Auswahl eines Abstellplatzes vorteilhaft ist, sowie beim Disponieren ein Stellplatz mit höherer Ladeleistung freigegeben werden sollte. Die Wertung des Kriteriums erfolgt entsprechend folgender Formel:

$$v_{AvailablePower}(P_a) = k_P \cdot P_a \quad (5.12)$$

mit

$$k_P = \frac{1}{P_{i,infr}^{ch,max}} \quad (5.13)$$

Dabei ist P_a die Leistung am Stellplatz a , welche durch einen konstanten Faktor k_p normalisiert wird, um Werte zwischen 0 und 1 zu erreichen. Der Faktor ist abhängig von der maximalen Ladeleistung aller Ladeinfrastrukturen i auf den Abstellflächen.

EmptySlotsExitPark und EmptySlotsExitDispatch

Das Kriterium *EmptySlotsExit* bewertet die Anzahl der freien, nicht zugänglichen Stellplätze auf der Ausfahrtsseite einer Reihe. Je höher die Anzahl, desto schlechter ist die Bewertung beim Abstellen bzw. besser beim Disponieren, um Reihen wieder schnellstmöglich zu leeren. Die Berechnung der Bewertung eines Stellplatzes erfolgt nach folgender Gleichung:

$$v_{EmptySlotsExitPark}(m_a) = k_{m_park} \cdot (-m_a) \quad (5.14)$$

mit

$$k_{m_park} = \begin{cases} \frac{1}{m_{max} - 2}, & \text{falls } m_{max} > 2 \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.15)$$

Dabei wird die Anzahl freier, blockierter Stellplätze m der Reihe des alternativen Stellplatzes a bestimmt und mit einem Normalisierungsfaktor k_{m_park} multipliziert, um Werte zwischen -1 und 0 zu erreichen. m_{max} ist dabei die größte Blocklänge aller Blockflächen der gesamten Parkfläche. Dieser Zusammenhang kann durch ein Beispiel in Abb. 5.14 nachvollzogen werden.

²⁰⁵Auf ein Kürzel am Ende des Namens wurde verzichtet.

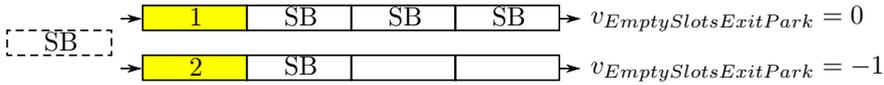


Abb. 5.14: Beispielsituation für $EmptySlotsExitPark$ ²⁰⁶

Äquivalent wird $EmptySlotsExitDispatch$ berechnet, allerdings liegt hier der Wertebereich zwischen 0 und 1:

$$v_{EmptySlotsExitDispatch}(m_a) = k_{m_disp} \cdot m_a \tag{5.16}$$

mit

$$k_{m_disp} = \frac{1}{m_{max} - 1} \tag{5.17}$$

5.3.3 Gewichtung

Die einzelnen Bewertungskriterien sind nicht alle gleichbedeutend, daher wurden Gewichtungsfaktoren bestimmt. Hierfür wurde die universell einsetzbare Methode paarweiser Vergleich genutzt.²⁰⁷ Die Gegenüberstellung der Kriterien erfolgte mit 4 Punkten pro Paar (siehe Tabelle A.3). Der paarweise Vergleich in Präferenzmatrizen wurde durch Patrick Mundt (siehe Tabelle A.5 und Tabelle A.7) und Enrico Lauth (siehe Tabelle A.4 und Tabelle A.6) durchgeführt. Die darauf beruhenden Mittelwerte der eruierten Gewichtungsfaktoren sind in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5 aufgelistet.

Tabelle 5.4: Mittelwert der Gewichtung der Kriterien bei Abstellung

Kriterien	Gewicht	Rang
BufferPark	0,31	1
TypestackPark	0,18	3
RfdDiffParkPos	0,11	5
RfdDiffParkNeg	0,20	2
AvailablePower	0,03	6
EmptySlotsExitPark	0,17	4

Die Kriterien *BufferPark* und *BufferDispatch* sind als wichtig eingestuft worden, da diese speziell die *Direct*-Stellplätze berücksichtigen und einen grundlegenden Einfluss auf die angewandte Abstell- und Dispositionsstrategie haben. Weiterhin ist auffällig, dass das *AvailablePower*-Kriterium als eher unwichtig bewertet wurde. Dies ist darauf

²⁰⁶Vgl. Mundt (2020, S. 33).

²⁰⁷Vgl. Feldhusen et al. (2013, S. 388 ff.).

Tabelle 5.5: Mittelwert der Gewichtung der Kriterien bei Disposition

Kriterien	Gewicht	Rang
BufferDispatch	0,20	3
TypestackDispatch	0,32	1
RfdDiffDispatch	0,25	2
AvailablePower	0,06	5
EmptySlotsExitDispatch	0,17	4

zurückzuführen, dass ein Depot aus Kompatibilitätsgründen eher mit gleich verteilten Ladeleistungen konfiguriert wird. Die restlichen Kriterien haben einen ähnlichen Einfluss auf die Gesamtbewertung. Zusätzlich wurde *RfdDiffPark* in einen positiven und negativen Wert aufgeteilt, um das Blockieren durch nicht abfahrbereite Fahrzeuge stärker einzubeziehen.

5.4 Lade- und Lastmanagement *Smart*

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben existieren unterschiedliche Lösungsverfahren und Optimierungsziele für ein Lade- und Lastmanagement von elektrischen Fahrzeugen. Für die Planung von Depots für Elektrobusse ist eine Dimensionierung der erforderlichen Stromnetzinfrastrukturen essenziell. Weiterhin werden die Energiekosten durch den hohen Energiebedarf der Flotte immer relevanter, daher soll das Potential durch den Einsatz von zeit- und lastvariablen Stromtarifen ermittelt werden.

Um gleichzeitig die Kosten für die Stromnetzinfrastruktur und den Energiebezug zu verringern, ist ein heuristischer Algorithmus (siehe Abb. 5.15) entwickelt worden.²⁰⁸ Dieser nutzt das Flexibilitätspotenzial $\Delta T_{bus}^{ch,flex}$ der Flotte aus, um die Ladevorgänge kostengünstigen Zeitintervallen zuzuordnen unter Berücksichtigung einer variabel einstellbaren Leistungsgrenze.

Als Input für den Algorithmus sind Informationen der einzelnen simulierten Ladevorgänge der Busse notwendig. Diese werden durch eine Datenmatrix ausgedrückt, welche die zuvor beschriebenen Variablen der Gleichungen (5.1), (5.4) und (5.5) einer ID zuweist:

²⁰⁸Vgl. Lauth et al. (2019); Robles Mogollon (2018).

$$\mathbf{S}_{\text{buses}}^{\text{depot}} = \begin{bmatrix} E_{\text{bus}}^{\text{dem}} & P_{\text{bus,infr}}^{\text{ch,max}} & T_{\text{bus}}^{\text{arr}} & T_{\text{bus}}^{\text{dep}} & \Delta T_{\text{bus}}^{\text{ch,flex}} \\ s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & s_{n3} & s_{n4} & s_{n5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ID_{\text{bus},1} \\ ID_{\text{bus},2} \\ \vdots \\ ID_{\text{bus},n} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

```

input :  $\mathbf{S}_{\text{buses}}^{\text{depot}}, \mathbf{Sig}_{\text{opt}}$ 
output:  $P_{\text{opt}}$ 
1 Sortiere  $\mathbf{S}_{\text{buses}}^{\text{depot}}$  nach  $\Delta T_{\text{bus}}^{\text{ch,flex}}$  in aufsteigender Reihenfolge;
2 Sortiere  $\mathbf{Sig}_{\text{opt}}$  nach  $p_{\text{el}}$  in aufsteigender Reihenfolge;
3 for  $ID_{\text{bus}} \in \mathbf{S}_{\text{buses}}^{\text{depot}}$  do
4    $\Delta E_{\text{bus}}^{\text{dem}} = E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} - E_{\text{bus}}^{\text{dem}};$ 
5   for  $ID_{\text{sig}} \in \mathbf{Sig}_{\text{opt}}$  do
6     if  $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} = 0$  then
7       break;
8     end if
9      $P_{\text{grid}}^{\text{rest}} = P_{\text{grid}}^{\text{limit}} - P_{\text{grid}}(ID_P = ID_{\text{sig}});$ 
10    if  $\Delta t$  is within  $(T_{\text{bus}}^{\text{arr}}, T_{\text{bus}}^{\text{dep}})$  and  $P_{\text{grid}}^{\text{rest}} > 0$  then
11      if  $P_{\text{grid}}^{\text{rest}} \geq P_{\text{bus,infr}}^{\text{ch,max}} / \eta_{\text{ch}}$  then
12        if  $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} \geq \Delta t * P_{\text{bus,infr}}^{\text{ch,max}}$  then
13           $P_{\text{grid}}(ID_P = ID_{\text{sig}}) += P_{\text{bus,infr}}^{\text{ch,max}} / \eta_{\text{ch}};$ 
14           $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} -= \Delta t * P_{\text{bus,infr}}^{\text{ch,max}};$ 
15        else
16           $P_{\text{grid}}(ID_P = ID_{\text{sig}}) += E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} / (\Delta t * \eta_{\text{ch}});$ 
17           $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} = 0;$ 
18        end if
19      else
20        if  $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} \geq \Delta t * P_{\text{grid}}^{\text{rest}}$  then
21           $P_{\text{grid}}(ID_P = ID_{\text{sig}}) += P_{\text{grid}}^{\text{rest}};$ 
22           $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} -= \Delta t * P_{\text{grid}}^{\text{rest}} * \eta_{\text{ch}};$ 
23        else
24           $P_{\text{grid}}(ID_P = ID_{\text{sig}}) += E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} / (\Delta t * \eta_{\text{ch}});$ 
25           $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} = 0;$ 
26        end if
27      end if
28    end if
29  end for
30  if  $E_{\text{bus}}^{\text{dem,const.P}} > 0$  then
31    return  $P_{\text{grid}}^{\text{limit}}$  zu niedrig;
32  end if
33  if  $\Delta E_{\text{bus}}^{\text{dem}} > 0$  then
34    Differenz am Ende des Ladevorgangs abziehen;
35  end if
36 end for
    
```

Abb. 5.15: Algorithmus zur preisorientierten Ladeplanung mit variabler Leistungsgrenze

Die Energiepreise p_{el} eines variablen Stromtarifs sowie die Leistungsgrenzen P_{grid}^{limit} für bestimmte Zeitintervalle Δt , z. B. $\Delta t \in \{0.25h, 1h\}$ werden mit einem Identifikator $ID_{sig,i}$ durch folgende Datenmatrix hinterlegt:

$$\mathbf{Sig}_{opt} = \begin{array}{ccc|c} \Delta t & p_{el} & P_{grid}^{limit} & \\ \hline sig_{11} & sig_{12} & sig_{13} & ID_{sig,1} \\ sig_{21} & sig_{22} & sig_{23} & ID_{sig,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ sig_{n1} & sig_{n2} & sig_{n3} & ID_{sig,n} \end{array} \quad (5.19)$$

Dabei kann das Preissignal beliebige Werte annehmen, z. B. historische Daten einer Strombörse oder Strompreisprognosen.

Im Folgenden wird der Ablauf des Algorithmus in Abb. 5.15 beschrieben: Zu Beginn werden die Datenmatrizen $\mathbf{S}_{buses}^{depot}$ nach $\Delta T_{bus}^{ch,flex}$ und \mathbf{Sig}_{opt} nach p_{el} in aufsteigender Reihenfolge sortiert. Dies ist ein wesentlicher Schritt, da darauf zwei verschachtelte Schleifen folgen, die sicherstellen, dass Ladeprozesse mit geringer Flexibilität eine hohe Priorität bekommen und kostengünstigen sowie passenden Zeitintervallen zugeordnet werden. Es wird vorausgesetzt, dass ein Ladeprozess in mehrere Zeitintervalle unterteilt werden kann und nicht zusammenhängen muss. Der Ladeprozess wird zunächst mit einer konstanten Ladeleistung über die gesamte Dauer verteilt:

$$E_{bus}^{dem,const.P} = P_{bus,infr}^{ch,max} \cdot \Delta T_{bus}^{ch} \quad (5.20)$$

Dadurch kann sich allerdings nach (5.3) eine Differenz zum tatsächlichen Energiebedarf E_{bus}^{dem} ergeben. Daher wird diese Differenz nach erfolgreicher Zuweisung am Ende eines Ladeprozesses abgezogen (Zeile 33-34). Ein Ladeprozess gilt als beendet, sobald die Bedingung $E_{bus}^{dem,const.P} = 0$ erfüllt ist.

Die eigentliche Zuweisung der Ladeleistung findet in der inneren Schleife statt (Zeile 10-28). Zunächst wird geprüft, ob das aktuelle Zeitintervall Δt zwischen der Ankunft- und Abfahrtzeit liegt und ob das vorgegebene P_{grid}^{limit} schon erreicht wurde, welches durch die Gleichung in Zeile 9 bestimmt wird. Trifft dies zu, wird im Folgenden die maximal mögliche Leistung der Datenmatrix \mathbf{P}_{opt} (siehe (5.21)) hinzugefügt und $E_{bus}^{dem,const.P}$ entsprechend reduziert. Falls für einen Ladeprozess kein geeignetes Zeitintervall gefunden wird, da P_{grid}^{limit} zu niedrig gewählt wurde, muss das Limit erhöht werden. Am Ende des Algorithmus wird eine optimierte Leistungsverteilung für jedes Zeitintervall mit P_{grid} ausgegeben:

$$\mathbf{P}_{opt} = \begin{matrix} \Delta t & P_{grid} \\ \left[\begin{array}{cc} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \\ \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} \end{array} \right] & \begin{array}{l} ID_{P,1} \\ ID_{P,2} \\ \vdots \\ ID_{P,n} \end{array} \end{matrix} \quad (5.21)$$

mit

$$0 \leq P_{i2} \leq sig_{i3} \quad \text{für } i = 1, 2 \dots n \quad (5.22)$$

5.5 Konfiguration der Abstellflächen

Die drei Varianten der Abstellordnung²⁰⁹ charakterisieren die Abstellanlage maßgeblich und beanspruchen die größte Fläche im Depot. Die Wahl der passenden Konfigurationsparameter der Abstellflächen, wie z. B. räumliche Aufteilung der Stellplätze und Länge der Reihen, ist nicht trivial und beruht üblicherweise auf Erfahrungswerten. Um Herauszufinden welchen Einfluss dies auf das Gesamtkonzept des Depots hat, wurde gemeinsam mit Patrick Mundt, im Rahmen seiner Masterarbeit²¹⁰, ein Modell entwickelt, das die Konfigurationsparameter der Abstellflächen optimiert. Hierfür wurde das Verfahren der iterativen simulationsbasierten Optimierung genutzt, das die (sub)optimale Wertebelegung für Entscheidungsvariablen eines vorliegenden Optimierungsproblems ausgibt, indem Layouts durch Simulation bewertet werden.²¹¹ Für das Optimierungsproblem wurde ein Zielkonflikt identifiziert. Einerseits ist die zur Verfügung stehende Fläche bestmöglich durch Stellplätze auszunutzen (z. B. durch Blockabstellung), andererseits soll eine hohe Fahrzeugverfügbarkeit erreicht werden, wie z. B. durch flexible, direkt verfügbare Stellplätze in Schrägabstellung. Daher ist dies ein multikriterielles Optimierungsproblem mit folgenden definierten Zielfunktionen:

$$\mathbf{max} \quad f_1(\vec{x}) = c(\vec{x}) = \begin{cases} c_L(\vec{x}) + c_{DSR}(\vec{x}) + c_{DDR}(\vec{x}), & \text{falls Flächenbedarfs-} \\ & \text{prüfung bestanden} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{max} \quad f_2(\vec{x}) = \bar{n}_{v,urfd}(\vec{x}) = \frac{1}{t_{end}} \sum_{i=1}^{t_{end}} \sum_{j=1}^{n_{areas}} n_{v,urfd,ij}(\vec{x}) \quad (5.24)$$

²⁰⁹Siehe S. 19.

²¹⁰Vgl. Mundt (2020).

²¹¹Vgl. Kämpf (2009, S. 10).

mit

t_{end} : Enzeitpunkt Simulation

n_{areas} : Anzahl der Abstellflächen

$n_{v,urfd,ij}$: Anzahl nicht blockierter, abfahrbereiter Fahrzeuge der Fläche j zum Zeitpunkt i der Lösungen \vec{x}

wobei

$$\begin{aligned} g_{delay}(\vec{x}) &= 0 \\ h_{congestion}(\vec{x}) &= 0 \end{aligned}$$

Mit Gleichung 5.23 wird die gesamte Stellplatzkapazität c der Lösungen \vec{x} des Depots maximiert. Falls die Abstellflächen einer Lösung in einen vorgegebenen Bereich passen, wird die Summe der Stellplatzkapazitäten der einzelnen Varianten der Abstellordnung²¹² L , DSR und DDR zurückgegeben. Durch Gleichung 5.24 wird der Mittelwert der Anzahl nicht blockierter, abfahrbereiter Fahrzeuge $\bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$ über den Betrachtungszeitraum t maximiert. Diese Kennzahl gibt Aufschluss wie flexibel die Abstellkonfiguration hinsichtlich der Fahrzeugverfügbarkeit ist. Weiterhin gilt, dass Fahrzeuge pünktlich zum vorgesehenen Abfahrzeitpunkt das Depot verlassen $g_{delay}(\vec{x}) = 0$ sowie kein Stau in der Zufahrt zur Abstellanlage auftritt $h_{congestion}(\vec{x}) = 0$.

5.5.1 Flächenbedarfsprüfung

Wie in Gleichung 5.23 festgelegt, muss eine gefundene Abstellflächenkonfiguration die Flächenbedarfsprüfung bestehen. Hierfür wird geprüft, ob eine Menge von Abstellflächen A_i auf eine definierte rechteckige Fläche einer Abstellanlage A_{park} passt, wie in Abb. 5.16 skizziert. Überdies sind die Abstellflächen platzsparend anzuordnen, um Konfigurationen mit einer hohen Stellplatzkapazität, bezogen auf die Abstellanlage, als Lösungskandidaten zu berücksichtigen. Um die einzelnen Stellplätze herum sind in Grau die Flächen markiert, die für den Ein- und Ausparkvorgang bzw. für Fahrwege (am Rand von A_{park}) frei bleiben müssen, sich aber gegenseitig überschneiden dürfen.

Diese Problemstellung wird in der Literatur als *Bin Packing Problem* bezeichnet.²¹³ Auf dieser Grundlage wurde ein heuristischer Algorithmus entwickelt, der im Detail in Mundt (2020) nachvollzogen werden kann. Die Vorgehensweise besteht aus Sortieren

²¹²Siehe S. 19.

²¹³Vgl. Hamdi-Dhaoui, Labadie und Yalaoui (2012); Johnson (1973); Wäscher, Haußner und Schumann (2007).

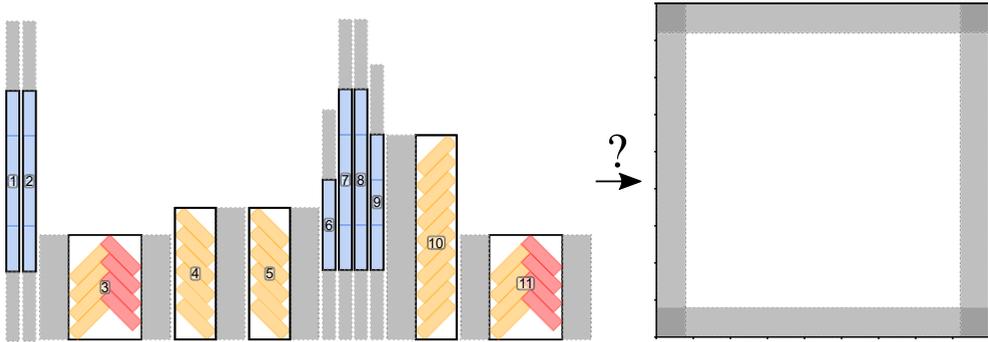


Abb. 5.16: Problemstellung der Flächenbedarfsprüfung mit Stellflächen A_{1-11} (links) und der Fläche einer Abstellanlage A_{park} (rechts)

der zu berücksichtigten Flächen, primär nach Breite²¹⁴ und sekundär nach Länge, wie in Abb. 5.17 dargestellt. Im Anschluss werden schrittweise die einzelnen Flächen A_i in A_{park} beginnend von unten links platziert. Nach jeder Platzierung werden die restlichen rechteckigen Platzierungsmöglichkeiten erfasst und im nächsten Schritt für eine Prüfung in Betracht gezogen. Falls alle A_i in A_{park} passen, gilt die Flächenbedarfsprüfung als bestanden.

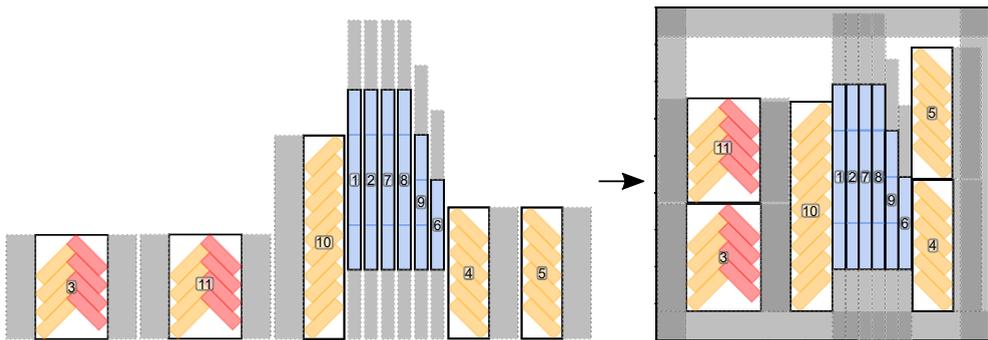


Abb. 5.17: Sortierung der Stellflächen A_i und Anordnung auf Fläche einer Abstellanlage A_{park}

5.5.2 Genetischer Algorithmus

Für das multikriterielle Optimierungsproblem kann nur eine Kompromisslösung bestimmt werden, was mit heuristischen Optimierungsverfahren im diskreten Suchraum möglich ist.²¹⁵ Das Ziel ist eine Auswahl von Lösungskandidaten zu finden, die auf

²¹⁴Bis auf die spiegelverkehrte Variante von DSR A_4 und A_5 .

²¹⁵Vgl. Krug und Rose (2011, S. 21).

oder wenigstens nahe an der Pareto-Grenze²¹⁶ liegen.²¹⁷ Genetische Algorithmen eignen sich besonders zur Approximation von Problemen mit mehreren Zielen, da sie auf Lösungsmengen basieren.²¹⁸ Das Grundprinzip besteht darin, Evolutionsprinzipien wie z. B. Mutation und Selektion auf Populationen von Lösungskandidaten anzuwenden, d. h. Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften während des Optimierungsverlaufs zu bevorzugen, um eine (hinreichend gute) Näherungslösung zu finden.²¹⁹ In Anlehnung an einen allgemeinen Ablauf eines genetischen Algorithmus²²⁰ wurde folgender Algorithmus entwickelt:

```

input : Optimierungsparameter und Eingangsdaten des Szenarios
output: pop, pareto – optimaleMenge
1 Initialisiere pop;
2 for ind ∈ pop do
3   | Bestimme fitness von ind
4 end for
5 while kein Abbruchkriterium erfüllt do
6   | Erzeuge offspring durch Kopie von pop;
7   | for pair ∈ offspring do
8     | if random ≤ pcx then
9       | | Wende Rekombination auf pair an
10      | end if
11   | end for
12   | for k ← 1 to 2 do
13     | for ind ∈ offspring do
14       | if random ≤ pmut then
15         | | Wende Mutation auf ind an
16         | end if
17     | end for
18   | end for
19   | for ind ∈ offspring do
20     | Bestimme fitness von ind
21   | end for
22   | Ersetze pop durch eine Selektion aus pop und offspring;
23   | Update pareto – optimaleMenge
24 end while

```

Abb. 5.18: Genetischer Algorithmus für das Optimierungsproblem der Konfiguration der Abstellflächen²²¹

Zu Beginn wird eine Population *pop* aus unterschiedlichen Individuen *ind* initialisiert, die durch die Variablen Flächenanzahl $N_{A_i} \in \mathbb{N}^+$, Flächentyp $type_i \in \{L, DSR, DDR\}$ und Stellplatzkapazität $c_i \in \mathbb{N}^+$ charakterisiert sind. Die Wertebelegung ist anfangs

²¹⁶„Eine Lösung $\vec{x}_a \in \mathcal{X}$ ist dann pareto-optimal, wenn es keine andere Lösung $\vec{x}_b \in \mathcal{X}$ gibt, welche die Lösung \vec{x}_a dominiert. Eine Lösung \vec{x}_a dominiert eine Lösung \vec{x}_b genau dann, wenn sie mindestens hinsichtlich eines Zielfunktionswertes besser und hinsichtlich keines Zielfunktionswertes schlechter ist“ Kämpf (2009, S. 23).

²¹⁷Vgl. Kruse et al. (2015c, S. 279).

²¹⁸Vgl. Kramer (2017, S. 53).

²¹⁹Vgl. Kruse et al. (2015a, S. 157 f.).

²²⁰Vgl. Kruse et al. (2015b, S. 219 ff.).

²²¹Vgl. Mundt (2020, S. 58).

zufällig. Anschließend wird die Fitness (siehe Zielfunktionen Gleichung 5.23 und Gleichung 5.24) der Individuen bestimmt. Darauf hin wird eine Schleife bis zu einem Abbruchkriterium durchgeführt, wie z. B. Anzahl von Generationen. Innerhalb der Schleife wird eine Kopie der Population *offspring* erzeugt, auf die nacheinander die Operatoren Rekombination und Mutation angewandt werden.

Die Rekombination wird für alle Paare von *offspring* durchgeführt, falls eine Zufallszahl $random \in \{0 \dots 1\} \leq p_{cx} \in \{0 \dots 1\}$, dem Wahrscheinlichkeitsfaktor für Rekombination, ist. Die Individuenpaare werden dann an einer zufälligen Stelle gekreuzt (Ein-Punkt-Rekombination), wodurch sich die Zusammensetzung der Stellflächen ändert. Die Auswahl der zu mutierenden Individuen wird durch den Wahrscheinlichkeitsfaktor für Mutation $p_{mut} \in \{0 \dots 1\}$ bestimmt. Es können N_{A_i} , $type_i$ und c_i in bestimmten Grenzen²²² verändert werden. Nach Bewertung aller Individuen werden durch eine Turnierauswahl²²³ geeignete Individuen selektiert, basierend auf Dominanz der Fitness der Individuen und der Diversität der Population. Die Gewinner bilden die neue Population. Die besten Individuen, die jemals im Evolutionsprozess erzeugt wurden, werden in der pareto-optimalen Menge gespeichert, gleichbedeutet mit der Pareto-Front.

5.6 Visualisierung

Um das Simulationsmodell bedienbar zu machen, Layouts von Depots zu konfigurieren und den Simulationsverlauf nachzuvollziehen wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) gemeinsam mit Benjamin Bober entwickelt und programmiert.²²⁴ Weiterhin kann die GUI als visuelle Verifikation genutzt werden.

Zur Implementierung einer GUI in Python gibt es zahlreiche Frameworks. Aufgrund der Vorerfahrungen wurde das Paket *Python.NET* verwendet, welches das Microsoft .NET-Framework in Python integriert. Das Framework stellt u. a. eine Laufzeitumgebung (*Common Language Runtime*) und eine Programmbibliothek (*Windows Presentation Foundation*) zur plattformübergreifenden Entwicklung und Gestaltung einer GUI bereit. Die Bibliothek nutzt das Architekturmuster *Model-View-ViewModel* (MVVM), das die Darstellung und Logik der Benutzerschnittstelle entkoppelt, wie in Abb. 5.19 dargestellt.

²²²Eine Mutationen erfolgt nur, falls N_{A_i} und c_i in definierten Größenordnungen liegt, z. B. eine maximale Anzahl an Flächen und Stellplatzkapazitäten.

²²³Turniere zwischen zwei zufällig aus der Gesamtheit von pop und offspring gewählten Individuen durchgeführt, bis Gewinner festgestellt wurden, welche die Vorgeneration ersetzen und ein neue Population pop bilden.

²²⁴Vgl. Bober (2020).

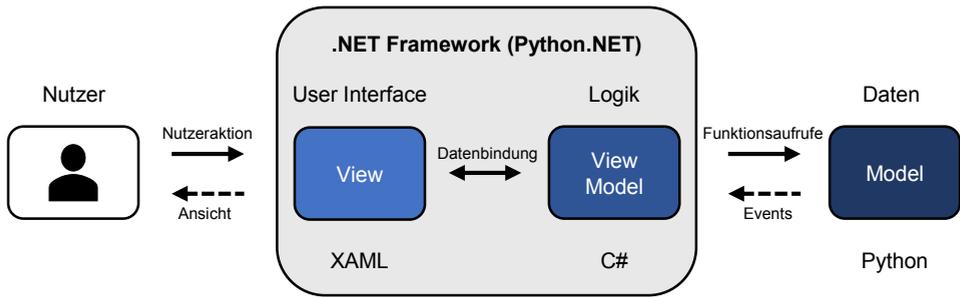
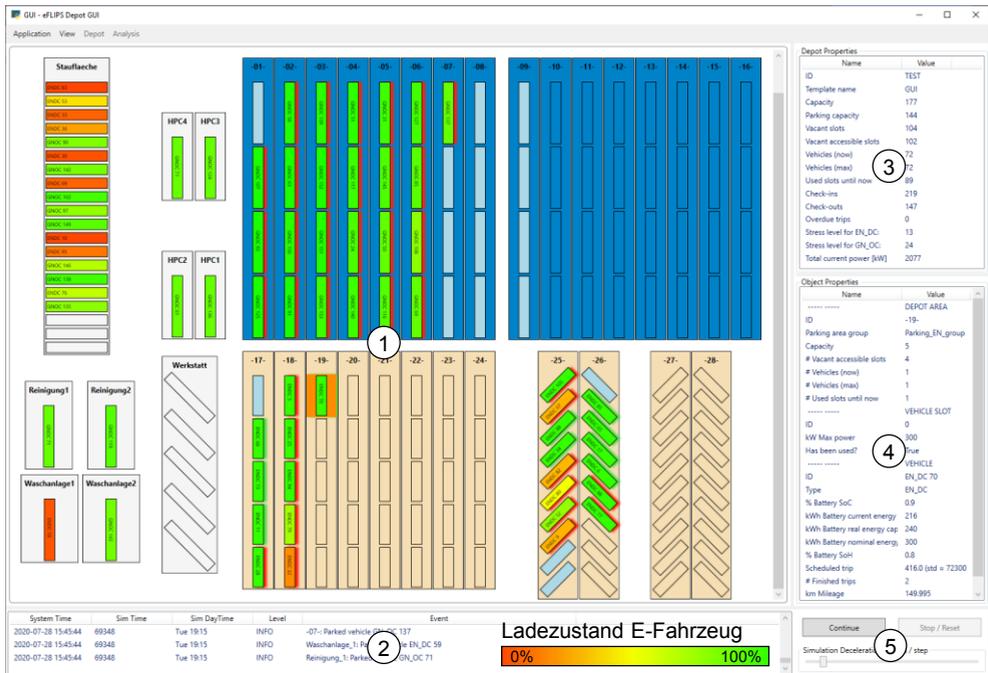


Abb. 5.19: Umsetzung des Architekturmusters *Model-View-ViewModel* mit *.NET*²²⁵

Hierdurch können die Module unabhängig programmiert und zudem in unterschiedlichen Programmiersprachen geschrieben werden. Der Nutzer interagiert lediglich mit dem *View*-Modul. Zwischen den Modulen *View* und *ViewModel* besteht eine bidirektionale Datenbindung. Das *ViewModel* kann Funktionen des eigentlichen Simulationsmodells aufrufen und sich Events ausgeben lassen, die dann dem Nutzer angezeigt werden. In Abb. 5.20 ist die Hauptansicht der entwickelten GUI dargestellt.



① Depotlayout ② Status ③ Eigenschaften (Depot) ④ Eigenschaften (Bus) ⑤ Start/Stop

Abb. 5.20: Grafische Benutzeroberfläche der Depotsimulation

²²⁵Vgl. Bober (2020, S. 31).

Die Ansicht ist in fünf Fenster ① - ⑤ eingeteilt. In ① ist ein fiktives Depotlayout als Beispiel in Form von Stellplätzen mit farblich hinterlegter Abstellanlage (blau, beige) vorkonfiguriert. Die Konfiguration der einzelnen Flächen sowie der Simulationsparameter erfolgt durch ein Konfigurationsfenster und kann im Anschluss als Vorlage gespeichert und editiert werden.²²⁶ Die „blauen“ Abstellflächen sind im Block angeordnet und ausschließlich Bussen mit einer Länge von 18m vorbehalten. Die „beigen“ Flächen sind für kürzere Busse vorgesehen. Die Abstellung erfolgt hier entweder im Block oder in schrägen Doppelreihen. Im linken Teil des Fensters sind zusätzlich Flächen für ankommende Fahrzeuge, Reinigung, Waschanlage, Werkstatt sowie Schnellladeplätze angeordnet. Sobald Busse auf einem Stellplatz stehen, wird die Fahrzeug-ID und der aktuelle SoC farblich (rot: Batterie leer, grün: Batterie voll) dargestellt. Die Fahrzeuge auf der Abstellanlage haben zusätzlich einen Identifikator, der anzeigt, ob das Fahrzeug schon einem Umlauf zugeordnet wurde. Bereits genutzte Stellplätze erscheinen in Hellblau. In ② können die Statusmeldungen der Simulation nachvollzogen werden, wie z. B. Simulationszeit, Uhrzeit sowie Park- und Dispositionsvorgänge. Die beiden rechten Fenster ③ und ④ zeigen Eigenschaften des Depots bzw. einzelner Fahrzeuge an, indem diese markiert werden. In dem Fenster ⑤ kann die Simulation gestartet, gestoppt und die Simulationsgeschwindigkeit angepasst werden.

²²⁶Siehe Bober (2020, S. 34 ff.).

6 Modellüberprüfung und Indikatoren

In diesem Kapitel werden die angewandten Methoden zur Verifikation und Validierung (V&V) vorgestellt, um das entwickelte Modell zu überprüfen und die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse zu erhöhen. Weiterhin werden Indikatoren ermittelt, die zur Planung und Evaluierung von E-Depots herangezogen werden können. Die Indikatoren werden anhand eines fiktiven Beispiels erläutert.

6.1 Verwendete Methoden zur Verifikation und Validierung

Es eignen sich viele verschiedene Methoden zur V&V von Simulationsmodellen.²²⁷ Grundsätzlich sollten mehrere, unterschiedliche Methoden genutzt werden; eine Kombination ist ebenso möglich. Im Folgenden werden die Anwendung und Eignung der ausgewählten Methoden beschrieben.

6.1.1 Animation

Die entwickelte Visualisierung in Abschnitt 5.6 dient u. a. zur Nachvollziehbarkeit des Modellverhaltens in bestimmten Situationen durch Animation der Fahrzeugbewegungen im Depot. Durch das Pausieren einer Simulation und durch die Möglichkeit der Anpassung der Ablaufgeschwindigkeit können Vorgänge verfolgt werden, um potenzielle Fehler zu lokalisieren. Allerdings birgt die Animation auch die Gefahr, dass selten auftretende Fehler nicht erkannt werden. In Abb. 6.1 ist ein Beispiel einer Animation gezeigt, das zur Überprüfung des Park- und Dispositionsverhaltens genutzt wird. Es ist zu sehen, dass um 23:00 Uhr das erste Fahrzeug auf den ersten Parkplatz im Block zur Ausfahrtseite abgestellt wird. Nach und nach werden die Parkreihen gefüllt. Um 02:00 Uhr sind bereits zwei Fahrzeuge einem Umlauf zugewiesen, was an dem grünen Identifikator zu erkennen ist. Ab 03:00 Uhr kann überprüft werden, ob die gewählte Dispositionsstrategie richtig umgesetzt wird, z. B. dass Reihen wieder frei gemacht werden.

²²⁷Vgl. Rabe et al. (2008, S. 95 ff.).

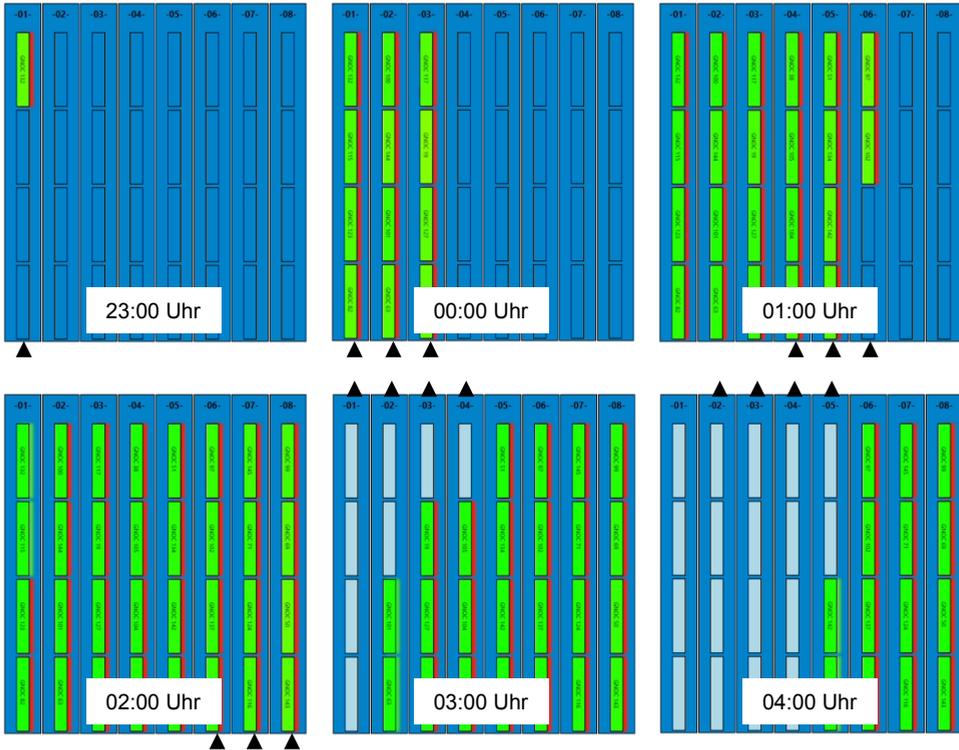


Abb. 6.1: Beispiel eines animierten Simulationsablaufs

6.1.2 Verifikation durch Monitoring und Trace-Analyse

Ein umfangreiches Monitoring bietet die Grundlage für die meisten V&V-Methoden. Während eines Simulationsdurchlaufs werden die Werte der Zustandsgrößen und Variablen von relevanten Objekten aufgezeichnet²²⁸, um im Nachgang einer Simulation eine detaillierte Analyse zu ermöglichen. Die erfassten Zustandsgrößen und Variablen der Objekte sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Mit Hilfe der Daten werden Berechnungen durchgeführt, um Hauptelemente des Depotmodells²²⁹ zu verifizieren und Objektzustände, wie z. B. Auslastung von Parkplätzen oder Prozesshistorie von Fahrzeugen, nachzuvollziehen. Weiterhin wird die Methode der Objektverfolgung Trace-Analyse genutzt, um das logische Verhalten und die Plausibilität zu überprüfen.²³⁰ Hierfür werden überwiegend Diagramme erzeugt, die den zeitlichen Verlauf einbeziehen. Das Vorgehen zur Analyse der aufgezeichneten Daten wird in Abschnitt 6.2 beschrieben.

²²⁸Siehe Unterabschnitt 5.2.7.

²²⁹Siehe Abschnitt 5.2 - Abschnitt 5.4. Die Verifikation des Algorithmus zur Konfiguration der Abstellflächen wird in Abschnitt 7.2 diskutiert.

²³⁰Vgl. Rabe et al. (2008, S. 107).

Tabelle 6.1: Monitoring von Zustandsgrößen und Variablen

Objekte	Zustandsgrößen und Variablen
<i>Depot</i>	<i>amount_vehicles, checkins, checkouts, total_power,</i>
<i>Vehicles</i>	<i>arrival_times, departure_times, energy, soc, assigned_trips,</i> <i>visited_areas, visited_slots, run_processes, delays, congestions</i>
<i>Areas</i>	<i>utilizations, amount_unblocked_vehicles, amount_unblocked_slots</i>
<i>Processes</i>	<i>starts, ends</i>
<i>Resources</i>	<i>utilizations</i>
<i>Schedule</i>	<i>assigned_trips, times_disposition</i>
<i>DepotControl</i>	<i>ratings_parking, ratings_disposition</i>

6.1.3 Validierung im Dialog und Begutachtung

Die Validierung geschieht kontinuierlich durch Vorstellung und Diskussion der Phasen- und Simulationsergebnisse mit Fachexpertinnen und Fachexperten, um die Frage zu klären, ob das erstellte Modell ein hinreichend genaues Abbild eines E-Depots ist. Die Expertinnen und Experten haben Kenntnisse über das reale System und bestehen aus ÖPNV-Betreibern, Teilnehmende auf Fachkonferenzen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Forschungsprojekts Forschungscampus Mobility2Grid. Ein Vergleich mit aufgezeichneten Daten eines E-Depots war nicht möglich, da diese noch nicht fertiggestellt bzw. Daten nicht verfügbar sind.

Die Methodik zur Entwicklung des Simulationsmodells und die Ergebnisse wurden größtenteils veröffentlicht²³¹ und somit von externen Fachexpertinnen und Fachexperten begutachtet. Durch die Peer-Reviews wurden Fehler aufgedeckt und das Modell stetig verbessert. Eine Liste der eigenen Veröffentlichungen ist im Anhang A.1 zu finden.

6.2 Indikatoren zur Verifikation und zur Planung und Evaluierung von E-Depots

Durch das Monitoring²³² können Indikatoren ermittelt werden, um die Plausibilität der Simulationsergebnisse und die Leistungsfähigkeit eines E-Depots zu beurteilen. Folgend werden die Indikatoren anhand von fiktiven Beispielen erläutert.

²³¹Boev et al. (2020); Göhlich et al. (2021); Lauth et al. (2021 (noch nicht veröffentlicht), 2019); Raab, Lauth, Heinekamp et al. (2019); Raab et al. (2017); Raab, Lauth, Strunz und Göhlich (2019).

²³²Siehe Tabelle 6.1.

6.2.1 SoC-Stände bei Ankunft und Abfahrt

Zu Beginn einer Simulation sind die Inputdaten des Modells wie Umlaufpläne auf Plausibilität zu prüfen. Für die Überprüfung, ob die Werte innerhalb definierter Grenzen liegen, eignen sich Grafiken, welche die Verteilung des Ladezustands der Fahrzeuge bei Ankunft und Abfahrt zeigen. In Abb. 6.2 sind beispielhaft die Ladezustände bei Ankunft für drei identische aufeinanderfolgende Werktage für zwei Ladestrategien zu sehen: ausschließliches Laden im Depot (DC, engl. *Depot Charging*) mit Standard-Bussen (SB_DC) und statisches Gelegenheitsladen (OC, engl. *Opportunity Charging*) mit Nachladung im Depot mit Gelenkbussen (AB_OC). Abb. 6.2 zeigt, dass Fahrzeuge, die eine Nachlademöglichkeit außerhalb des Depots besitzen, mit einem höheren SoC einfahren, als Fahrzeuge, die größtenteils ihre Reichweite voll ausgenutzt haben und in das Depot zurückkehren. Das definierte SoC-Fenster von 10–90 % (in Grau) wird bei allen Fahrzeugen eingehalten. Ebenso kann die zeitliche Verteilung Aufschluss über die Plausibilität des Umlaufplans geben.

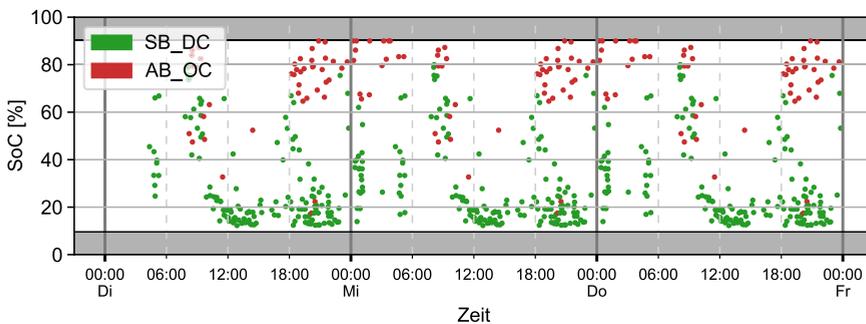


Abb. 6.2: SoC-Stände bei Ankunft (fiktives Beispiel)

Das Gleiche gilt für den SoC bei Abfahrt. Nach der Simulation müssen üblicherweise alle abgefahrenen Busse den maximalen Ladezustand erreicht haben, es sei denn es wird explizit gefordert, dass Busse auch mit niedrigerem SoC abfahren dürfen, falls dies notwendig wird. Fahrzeuge können zudem unterschiedliche Endladezustände besitzen, wie in Abb. 6.3 dargestellt.

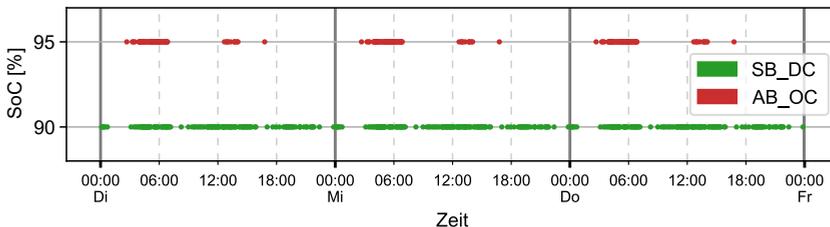


Abb. 6.3: SoC-Stände bei Abfahrt (fiktives Beispiel)

6.2.2 Prozessanalyse

Zur Überprüfung von Aufenthaltszeiten, Standzeiten und durchgeführten Prozessen eignen sich Übersichten, wie Abb. 6.4, das die Historie von Fahrzeugen in einem Depot über drei Tage darstellt. Um einen typischen Wochentag zu analysieren wurde der Simulationszeitraum von Dienstag 00:00 Uhr bis Donnerstag 00:00 Uhr gewählt, da zu Beginn der Simulation ein Depot noch leer ist und sich erst nach ca. 24 h ein Gleichgewichtszustand der generierten Fahrzeugobjekte einstellt. Die letzten 24 h der Simulationszeit dienen lediglich zur Überprüfung, ob ein Gleichgewichtszustand erreicht wurde, was u. a. an der Anzahl der im Depot befindlichen Fahrzeuge (blaue Kurve) zu erkennen ist. Die Anzahl der Fahrzeuge im Depot kann mit anderen betriebstypischen Verlaufskurven von Depotbetreibern verglichen und die Auslastung des Depots beurteilt werden. In diesem Beispiel sind zwar 144 Fahrzeuge dem Depot zugeordnet, allerdings maximal 121 gleichzeitig im Depot. Somit lässt sich der Stellplatz- und Ladeinfrastrukturbedarf abschätzen, der allerdings höher liegen kann, da je nach Abstellordnung nicht jeder Stellplatz mit Ladeinfrastruktur jederzeit verfügbar ist. Die Länge der farblichen Balken gibt Aufschluss über die Dauer. Die Aufenthaltszeit im Depot ist in Dunkelgrau und die Standzeit auf einem Stellplatz in Hellgrau wiedergegeben. Zudem ist am Ende jedes Aufenthalts die ID des zugewiesenen Umlaufs in Schwarz gekennzeichnet, wie in der Ausschnittvergrößerung von Abb. 6.4 dargestellt. In dem vergrößerten Ausschnitt des Beispiels ist zu sehen, dass die Service-Prozesse (Blautöne) vor dem Abstellen auf einen Stellplatz eingeplant sind. Während der Parkzeit findet üblicherweise ein Ladevorgang statt. Eine Vorkonditionierung des Fahrgastinnenraums (Schwarz) wird hier erst bei Zuweisung zu einem Umlauf, allerdings üblicherweise frühestens 30 min vor Abfahrt, durchgeführt. Diese Übersicht erlaubt es die vorgesehenen Prozesse näher zu analysieren, um Prozesszusammenhänge zu erkennen, z. B. indem die Dauer des Ladevorgangs zur gesamten Standzeit auf einem Stellplatz verglichen wird. Zudem kann es vorkommen, dass während einer Simulation Abfahrtsverspätungen auftreten, d. h. ein Fahrzeug verlässt das Depot nicht rechtzeitig. Dies wird deutlich mit einem roten Kreis in Abb. 6.4 mit der jeweiligen Dauer der Verspätung hervorgehoben. Neben der grafischen Überprüfung werden zudem nach einem Simulationsdurchlauf die Prozesse durch automatische Berechnungen verifiziert. Folgende Bedingungen sind dabei zu erfüllen:

- Alle Standzeiten auf einem Stellplatz müssen innerhalb der Aufenthaltszeiten im Depot liegen.
- Alle Ladezeiten müssen innerhalb der Standzeit auf einem Stellplatz liegen.
- Alle Servicezeiten müssen außerhalb der Standzeiten auf einem Stellplatz liegen.
- Alle Fahrzeiten müssen außerhalb der Aufenthaltszeiten im Depot liegen.
- Ein Umlauf ist jeweils nur einem Fahrzeug zugewiesen.

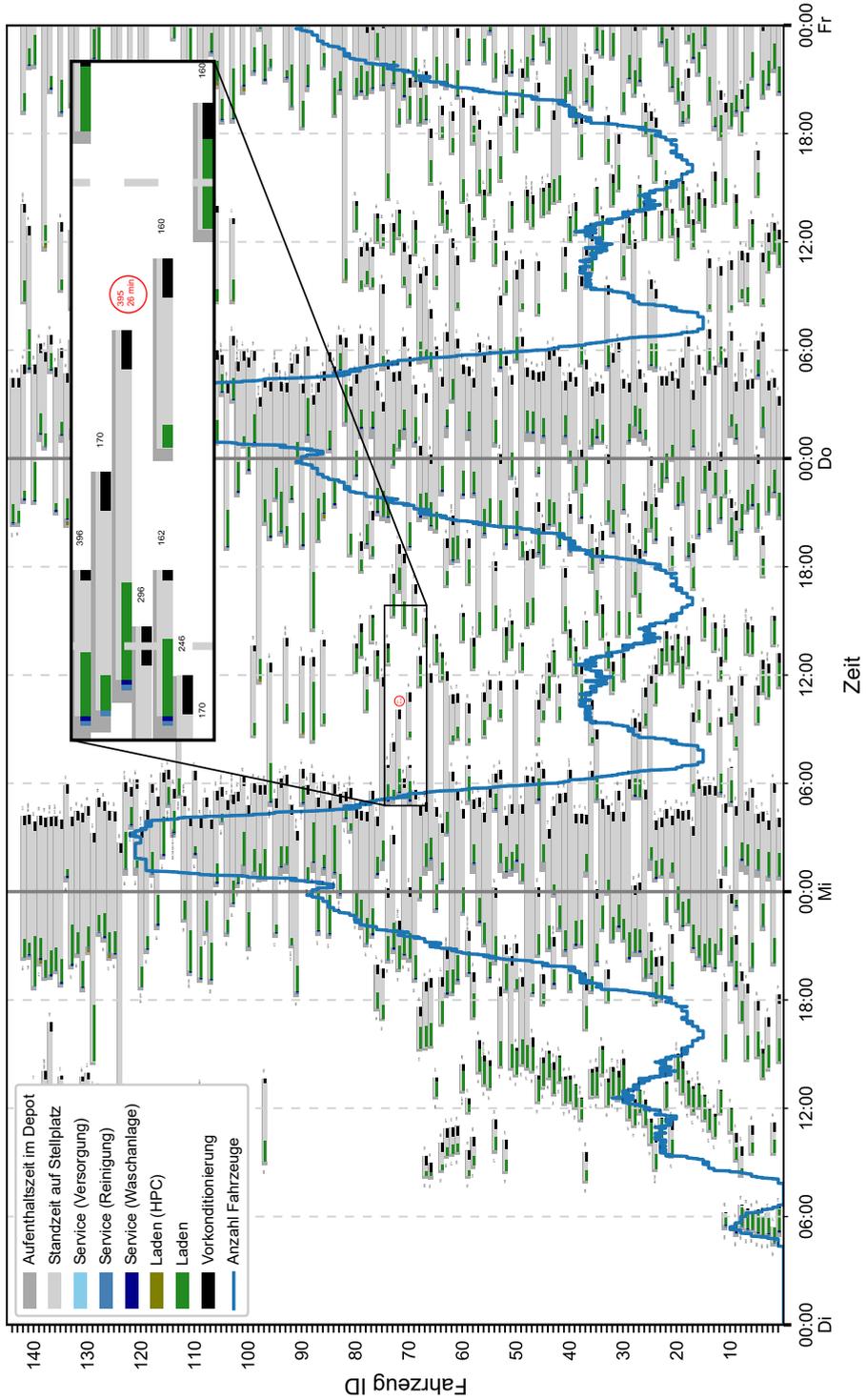


Abb. 6.4: Standzeiten und Prozessübersicht aller Fahrzeuge eines Depots (fiktives Beispiel)

6.2.3 Stau im Betriebsablauf

Während einer Simulation kann es vorkommen, dass sich Fahrzeuge im Depot stauen, da sie im Betriebsablauf gehindert werden. Dies ist der Fall, wenn die nächste, anzufahrende Fläche belegt ist. Die Gründe hierfür sind entweder zu geringe Flächenkapazitäten oder zu lange Prozesszeiten. Um die Stautenstehung nachzuvollziehen wird die Historie der Fahrzeuge und Flächen ausgewertet. In Abb. 6.5 ist beispielhaft die Verteilung der Stauzeiten aller Fahrzeuge dargestellt. Mit Hilfe weiterer Kennzahlen (in Abb. 6.5 oben rechts) kann ermittelt werden, ob der auftretende Stau vertretbar ist oder Änderungen am Depotlayout notwendig sind, um den Stau zu verringern. Weiterhin kann die Auslastung einzelner Flächen bestimmt werden, um den Stau zeitlich einzuordnen, wie in einem Beispiel in Abb. 6.6 an dem Ausschlag zwischen 01:00 und 02:00 Uhr zu sehen.

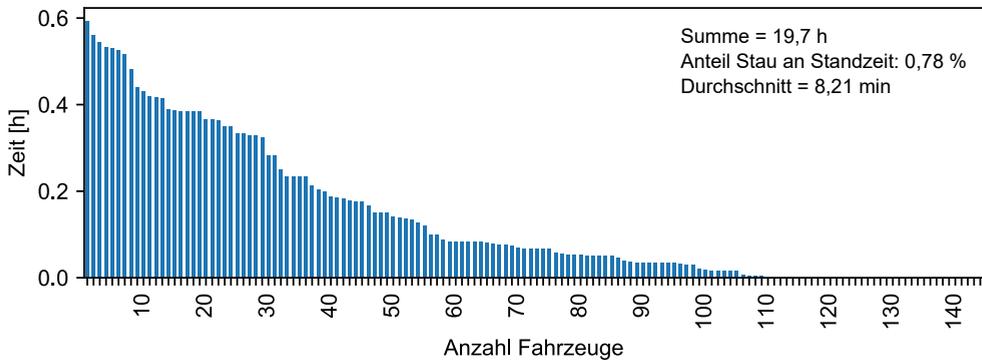


Abb. 6.5: Verteilung von Stauzeiten der Fahrzeuge (fiktives Beispiel)

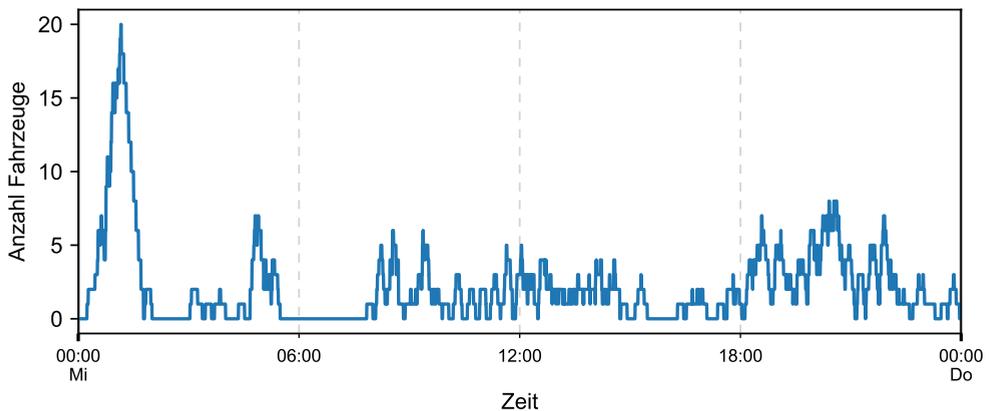


Abb. 6.6: Anzahl der Fahrzeuge auf Stauffläche (fiktives Beispiel)

6.2.4 Bedarf und Auslastung von Fahrzeugen und Infrastruktur

Der Bedarf an Fahrzeugen ergibt sich durch die Anzahl an erzeugten und genutzten Fahrzeugobjekten. Sobald bei einem Simulationsdurchlauf keine Abfahrtsverspätungen auftreten, kann eine plausible Anzahl der eingesetzten Fahrzeugtypen ausgegeben werden, wie beispielhaft in Abb. 6.7 dargestellt. Weiterhin können Informationen zu einzelnen Fahrzeugen ermittelt werden, z. B. zugewiesene Umläufe, Einsatzzeiten und -reichweite.

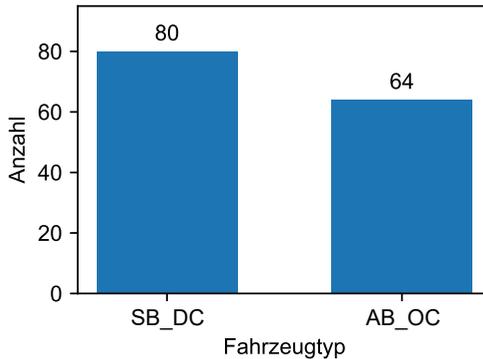


Abb. 6.7: Fahrzeugbedarf (fiktives Beispiel)

Im Modell wird die Konfiguration der Ladeinfrastrukturen und die Verteilung der zugehörigen Ladeschnittstellen durch das Depotlayout und dem dazugehörigen Template festgelegt. Es besteht die Möglichkeit eine Ladeinfrastruktur mit mehreren Ladepunkten auszustatten und auf unterschiedliche Stellplätze zu verteilen.²³³ Durch die Mehrfachnutzung einer Ladeinfrastruktur mit mehreren Ladepunkten erhofft man sich eine Einsparung von Ladetechnik und damit Kosten, allerdings kann im Modell wie in der Realität nur ein Ladepunkt gleichzeitig genutzt werden. Die Auslastung der Ladeinfrastrukturen kann nach der Simulation berechnet und ausgegeben werden, wie beispielhaft für eine Ladeinfrastruktur in Abb. 6.8 dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei einem Ladeprozess die eingestellte Ladeleistung (hier 150 kW) erreicht wird. Ebenfalls ist die erforderliche Leistung der Vorkonditionierung (hier 20 kW) dargestellt. Wie in Abschnitt 5.2.5 definiert, ist die Ladeleistung während des Ladevorgangs nicht konstant. Dies ist in Abb. 6.9 an der Reduzierung der Ladeleistung am Ende eines Ladevorgangs zu erkennen.

Alle Stellplätze des Depotlayouts werden ebenfalls über ein Template vorgegeben. Zur Ermittlung sinnvoller Konfigurationen der Abstellfläche kann das Optimierungsverfahren in Abschnitt 5.5 genutzt werden.

²³³Siehe Abb. 2.7.

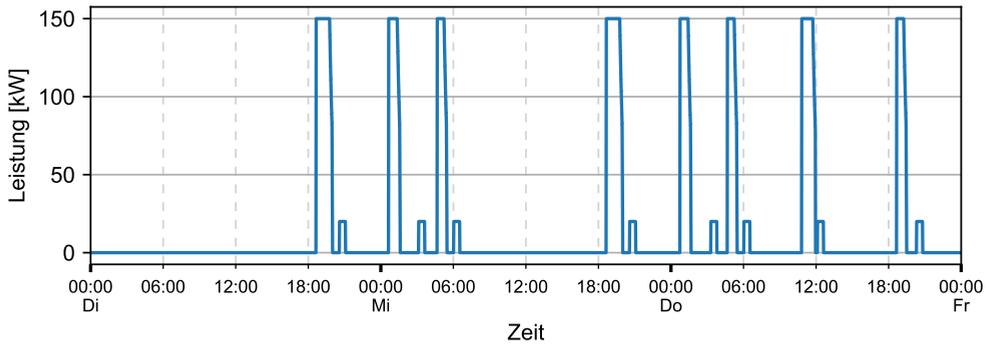


Abb. 6.8: Auslastung einer Ladeinfrastruktur mit einer maximalen Ladeleistung von 150 kW (fiktives Beispiel)

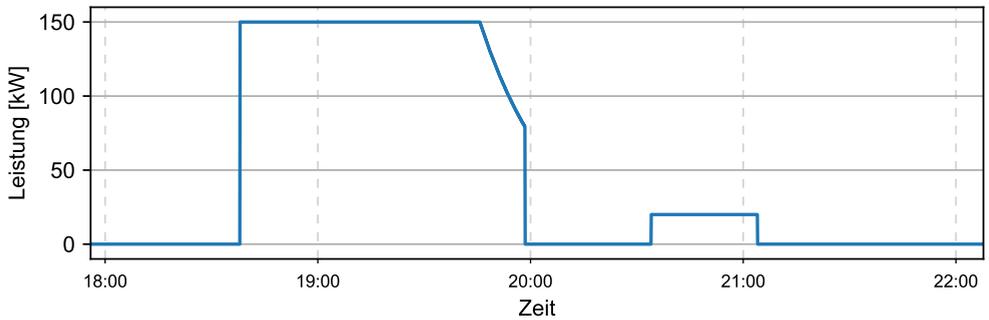


Abb. 6.9: Verlauf der Leistung einer Ladeinfrastruktur mit einem Ladeprozess mit maximal 150 kW und mit einem Prozess zur Vorkonditionierung mit 20 kW (fiktives Beispiel)

Weiterhin kann am Ende einer Simulation die Auslastung aller Stellplätze berechnet und im Depotlayout farblich angezeigt werden, wie in Abb. 6.10 zu sehen. Die Auslastung gibt an wie oft ein Stellplatz pro Tag genutzt wird und wird als Prozentwert bei jedem Stellplatz und in einer separaten Tabelle angezeigt. Diese Auswertung ist hilfreich, um wenig ausgelastete Stellplätze zu lokalisieren und Abstell- und Dispositionsstrategien nachzuvollziehen. Es kann vorkommen, dass Stellplätze während eines Simulationsdurchlaufs überhaupt nicht genutzt werden, wie beispielsweise in Abb. 6.10 (oben rechts) die Parkreihen 15 - 16. Diese können im weiteren Verlauf eingespart werden oder als Puffer dienen. Weiterhin zeigt Abb. 6.10, dass die Stellplätze mit Schrägabstellung in Doppelreihe den Stellplätzen im Block bevorzugt werden, was auf die gewählte Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart* zurückzuführen ist.²³⁴

²³⁴Siehe Bewertungskriterien *BufferPark* und *BufferDispatch* in Unterabschnitt 5.3.2.

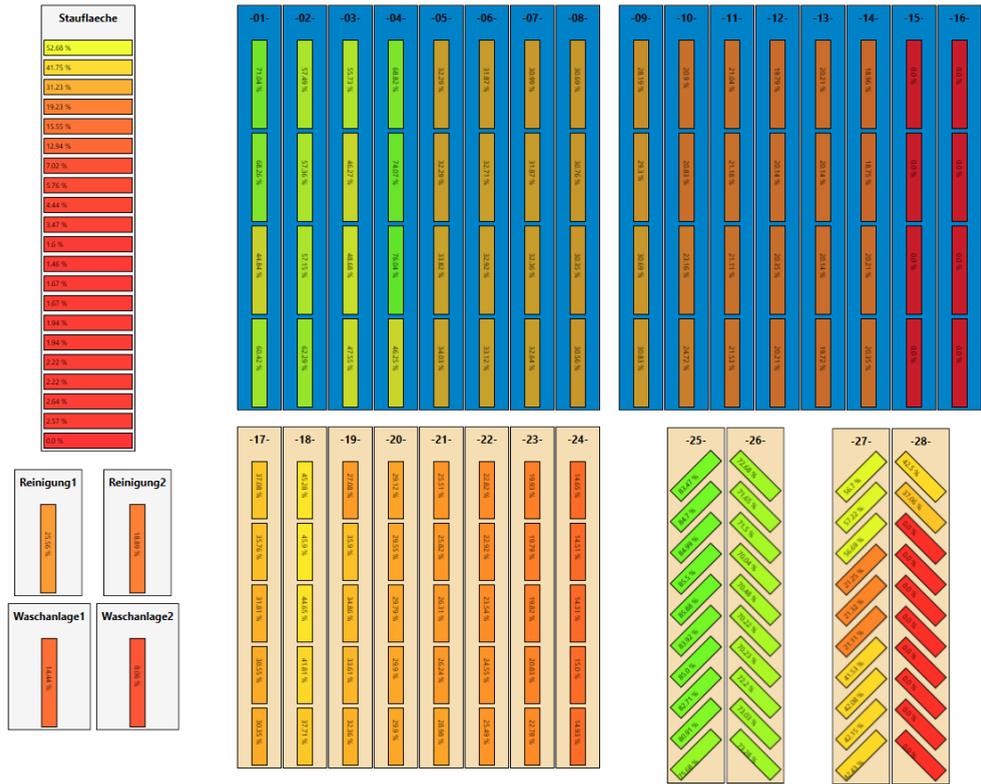


Abb. 6.10: Auslastung von Stellplätzen in Prozent und als Farbverlauf. Rot: geringe Auslastung, Grün: hohe Auslastung (fiktives Beispiel)

6.2.5 Zeitpunkte der Disposition

Die Disposition eines Fahrzeugs auf einen Umlauf findet üblicherweise eine bestimmte Zeit vor dem geplanten Abfahrzeitpunkt statt und ist im Modell frei wählbar.²³⁵ In den folgenden beiden Grafiken Abb. 6.11 und Abb. 6.12 sind die von dem Modell umgesetzten Zeitpunkte der Disposition dargestellt.

In diesem Beispiel ist der Vorlaufzeitpunkt der Disposition auf 60 min eingestellt. Es ist zu sehen, dass dies auch bei dem Großteil (ca. 72%) eingehalten wird. Allerdings kann es vorkommen, dass zum Vorlaufzeitpunkt kein geeignetes Fahrzeug zur Verfügung steht. Somit können auch Werte unterhalb des Vorlaufzeitpunkts auftreten. Ein Wert zum Abfahrtszeitpunkt gilt im Modell noch als akzeptabel, darunter treten Abfahrtsverspätungen auf.

²³⁵Siehe Unterabschnitt 5.3.1.

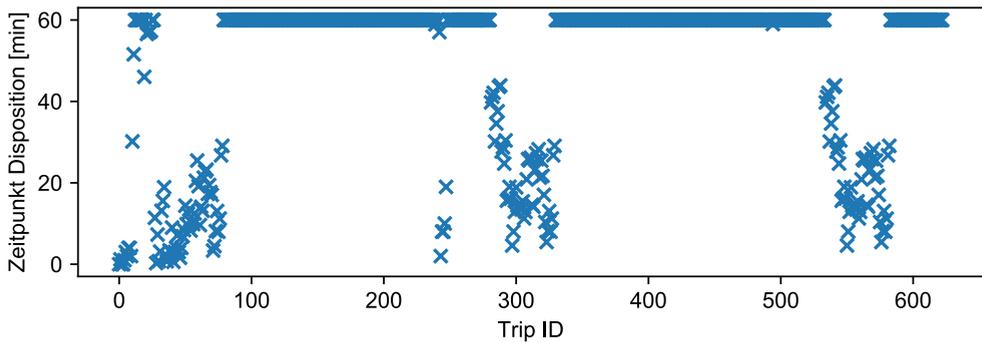


Abb. 6.11: Zeitpunkte der Disposition (fiktives Beispiel)

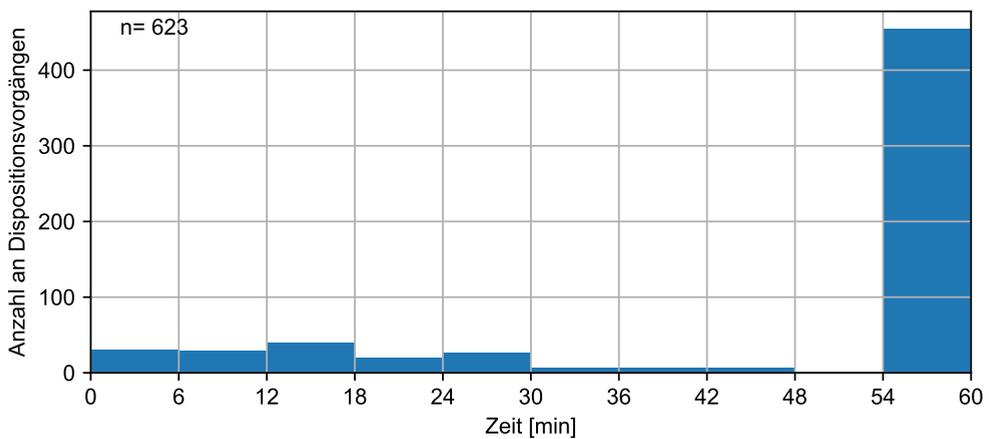


Abb. 6.12: Verteilung der Zeitpunkte der Disposition (fiktives Beispiel)

6.2.6 Verteilung der Ladeflexibilität

Wie bereits in Abb. 6.4 zu sehen, stehen Fahrzeuge nach Abschluss des Ladevorgangs noch eine gewisse Zeit auf einem Stellplatz. Diese Zeit bis zur Abfahrt definiert die Ladeflexibilität²³⁶ des Fahrzeugs. Ein kleiner Wert bedeutet, dass der Ladevorgang wenig zeitlich variiert werden kann. Bei großen Werten besteht die Möglichkeit den Ladevorgang zu unterteilen und zwischen Ankunft- und Abfahrtszeit vom Stellplatz zu verteilen.

In Abb. 6.13 ist die Verteilung der Ladeflexibilität von Fahrzeugen in einem Depot beispielhaft dargestellt. Eine Ballung geringer Ladeflexibilitäten deutet darauf hin, dass zwar das Depotlayout mit entsprechender Ladeinfrastruktur effizient ausgelegt ist, allerdings wenig Spielraum für ein Lade- und Lastmanagement besteht und ggf.

²³⁶Siehe Gleichung 5.5.

Lastspitzen nicht vermeidbar sind. Zudem erhöht sich das Risiko, dass Ladevorgänge nicht rechtzeitig abgeschlossen werden können, falls unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Ausfall der Ladeinfrastruktur) auftreten. Dagegen bietet eine Häufung hoher Ladeflexibilitäten grundsätzlich eine große Sicherheit, dass Fahrzeuge den Ladevorgang beenden können. Allerdings bedeutet dies auch, dass Fahrzeuge lange ungenutzt stehen. Daher sollte bei der Bewertung eines E-Depot darauf geachtet werden, dass eine ausgewogene Verteilung der Ladeflexibilität gegeben ist.

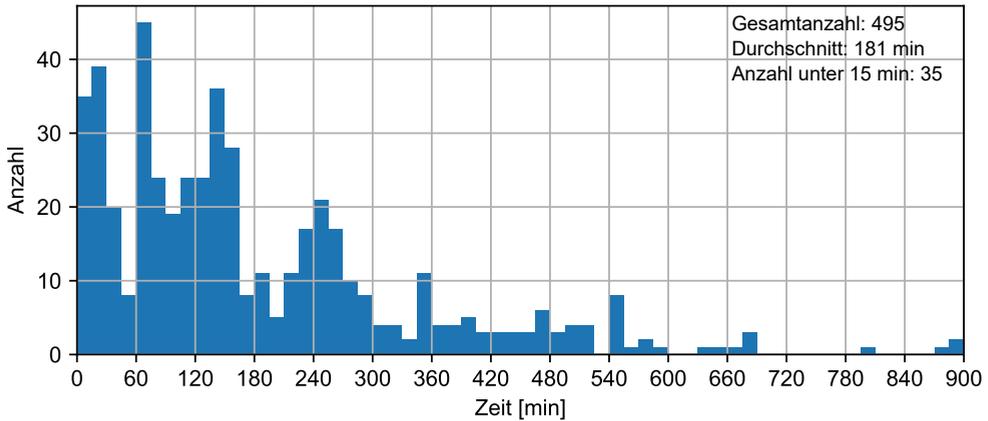


Abb. 6.13: Verteilung der Ladeflexibilität bei Fahrzeugen im Depot (fiktives Beispiel)

6.2.7 Lastprofile und Netzanschluss

Am Ende einer Simulation kann das Lastprofil eines E-Depots ausgegeben werden, um auftretende Lastspitzen zu identifizieren und den erforderlichen Netzanschluss zu bestimmen. Zusätzlich kann durch die Anwendung des entwickelten Lade- und Lastmanagement-Algorithmus *Smart*²³⁷ das veränderte Lastprofil mit anderen Lade- und Lastmanagementstrategien gegenübergestellt werden.²³⁸ Solch ein Vergleich ist in Abb. 6.14 beispielhaft dargestellt. In Hellgrau ist das Lastprofil einer E-Busflotte ohne Lade- und Lastmanagement (nicht gesteuert) wiedergegeben, in Dunkelgrau das berechnete Profil bei einem Einsatz des Lade- und Lastmanagements *Smart*. Weiterhin ist das vorgegebene Limit der Gesamtladeleistung von 2.700 kW²³⁹ für das Lade- und Lastmanagement eingezeichnet sowie ein typischer Preisverlauf am Day-Ahead-Spotmarkt über drei Tage. Es ist zu erkennen, dass die Lastspitze ohne Lade- und Lastmanagement durch den Algorithmus auf das Limit der Gesamtladeleistung

²³⁷Siehe Abschnitt 2.1.2.

²³⁸Siehe Abb. 4.8.

²³⁹Das Limit wurde exemplarisch auf den Wert der maximalen Ladeleistung für das Lade- und Lastmanagement Nicht gesteuert am Nachmittag festgelegt.

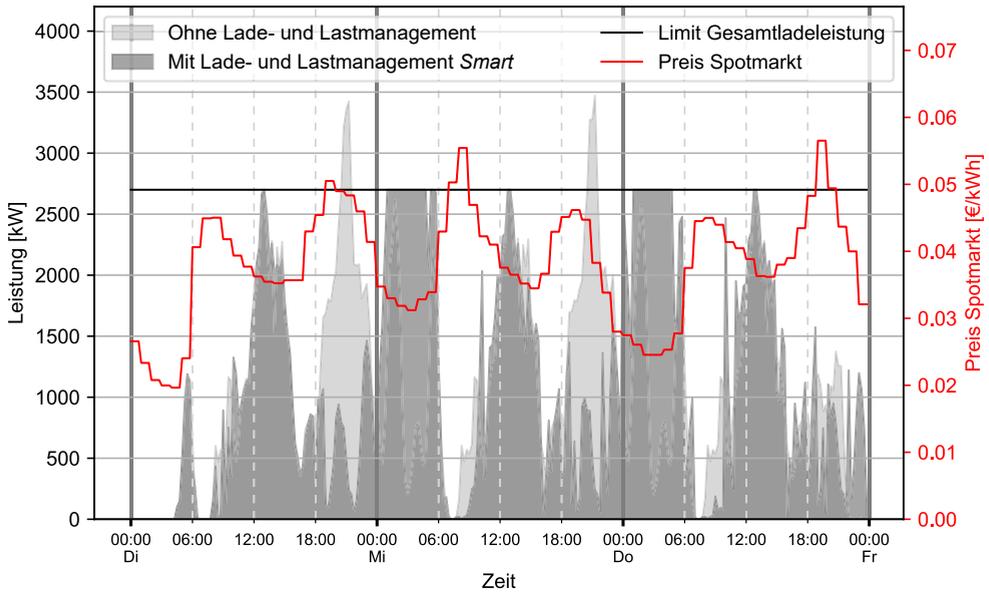


Abb. 6.14: Vergleich der Lastprofile mit und ohne Lade- und Lastmanagement (fiktives Beispiel)

reduziert und gleichzeitig in günstigere Zeitintervalle verschoben wird. Die auftretende Lastspitze am Nachmittag lässt sich nicht weiter abflachen, da diese Ladevorgänge aufgrund der kurzen Standzeit der Fahrzeuge eine geringe Ladeflexibilität haben.

Zur Beurteilung des Lade- und Lastmanagements sind weitere Kennwerte in Tabelle 6.2 für einen Simulationstag aufgelistet. Diese Kennwerte geben Aufschluss über den voraussichtlichen Leistungs- und Energiebedarf und mit welchen Kosteneinsparungen beim Strompreis zu rechnen sind. Es sind die beeinflussbaren Bestandteile des Strompreises Energiebeschaffung und Netzentgelt²⁴⁰ aufgezeigt.

In diesem Beispiel konnte die Lastspitze auf das vorgegebene Limit der Gesamtladeleistung um 22,19 % reduziert werden. Der Energiebedarf in dem Zeitintervall sollte nahezu gleich sein, da der Lade- und Lastmanagement-Algorithmus die Ladevorgänge lediglich zeitlich verteilt. Die geringen Abweichungen von $-0,17\%$ liegen an der Auswahl des Zeitintervalls, da der Algorithmus Ladevorgänge über die Intervallgrenze von 0:00 Uhr verschieben kann. Bei der Berechnung der Kosten für die Energiebeschaffung wurde angenommen, dass ohne den Einsatz eines Lade- und Lastmanagements auch ein konstanter Preis für die Energiebeschaffung angesetzt werden kann. Durch die

²⁴⁰Siehe Abschnitt 2.1.2.

Ausnutzung günstiger Zeitintervalle laut Preis am Day-Ahead Spotmarkt ergibt sich hier eine theoretische Kostenersparnis von 17,79%. Mit der Reduzierung der Lastspitze verringert sich das Netzentgelt um 14,93%. Weiterhin kann die Benutzungsdauer, als Richtwert für die Gleichmäßigkeit des Lastprofils bzw. Auslastung des Netzanschlusses, um 28,4% gesteigert werden.

Tabelle 6.2: Kennwerte im Intervall Mi 0:00 Uhr - Do 0:00 Uhr (fiktives Beispiel)

		Nicht gesteuert	Smart	Veränderung
Lastspitze	kW	3.470	2.700	-22,19 %
Energie	kWh/Tag	31.906	31.852	-0,17 %
Energiebeschaffung ²⁴¹	€/Tag	1.382	1.136	-17,79 %
Netzentgelt ²⁴²	€/Tag	948	806	-14,93 %
Tagesbenutzungsdauer	h/Tag	9,19	11,8	28,40 %

²⁴¹Nicht gesteuert: durchschnittlicher Preis in Deutschland 2019 nach Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 284) mit 4,33 Cent/kWh, Smart: Day-Ahead Spotpreis am 04.06.2019.

²⁴²Siehe Preise für Umspannung Hoch-/Mittelspannung in Tabelle A.2.

7 Fallstudie: Simulationsbasierte Planung und Evaluation eines E-Depots

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell an einem realen Beispiel zur Planung und Evaluation eines Depots für elektrische Stadtbusse angewandt. Zunächst werden für die Fallstudie die Ausgangssituation des Busbetreibers und die damit zusammenhängenden Rahmenbedingungen dargelegt. Es folgt die Konzeptionierung eines E-Depots, das als Basisszenario für die anschließenden Simulationsexperimente dient. Nach der Vorstellung und Interpretation der Ergebnisse werden Folgerungen für das reale System diskutiert. Das Kapitel schließt mit einer Variation ausgewählter Parameter ab, um den Einfluss und mögliche Potenziale darzulegen.

7.1 Ausgangssituation und Rahmenbedingungen

Das reale Busnetz, das von dem E-Depot bedient werden soll, besteht aus 39 Linien inklusive 9 Nachtlinien. Es wurde ein Bustyp und eine Ladestrategie je Linie festgelegt. Auf 25 Linien fahren Standard-Busse mit 12 m (SB) und einer Auflademöglichkeit im Depot, auf den anderen 14 Linien mit dichteren Taktzeiten und höherem Fahrgastaufkommen werden Gelenkbusse mit 18 m (AB) eingesetzt. Diese werden überwiegend an Endhaltestellen geladen, aber zusätzlich auch im Depot. Mit Hilfe des gegenwärtig gültigen Diesel-Umlaufplans wurde mittels der Flottensimulation von eFLIPS²⁴³ ein E-Bus gerechter Umlaufplan berechnet. Insgesamt besteht der Umlaufplan aus 433 Umläufen, 243 mit SB und 190 mit AB. Die Umlauflängen sind in Abb. 7.1 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Umlauflängen der SB durch deren kritische Reichweite von 130 km begrenzt sind. In Abb. 7.2 ist zusätzlich der SoC der E-Busse bei Ankunft ins Depot dargestellt. SB kommen gehäuft zwischen 12:00 Uhr und 14:30 Uhr sowie zwischen 18:30 Uhr und 22:00 Uhr mit geringem SoC an. AB besitzen bei Ankunft weitgehend einen hohen SoC und haben dementsprechend einen geringeren Energiebedarf als SB.

Weiterhin ist der Geländeplan des zukünftigen E-Depots mit den zur Verfügung stehenden Flächen bekannt, die in Abb. 7.3 dargestellt sind. Wie zu erwarten bean-

²⁴³Nicht Teil dieser Arbeit, siehe Abschnitt 3.4.

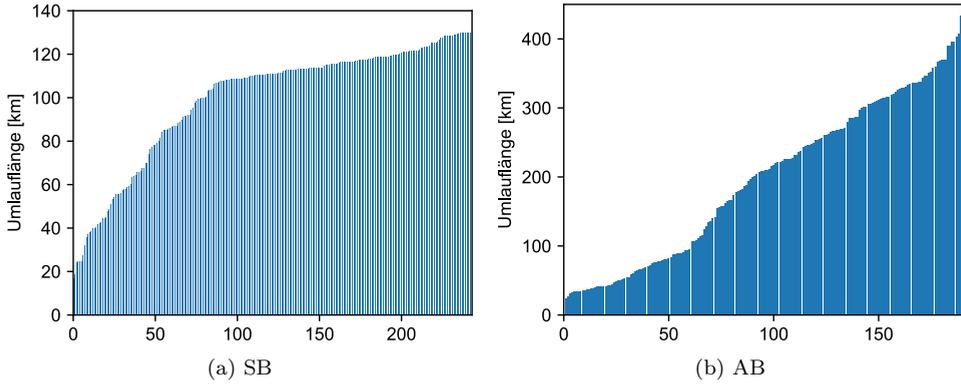


Abb. 7.1: Längen der einzelnen Umläufe für SB und AB

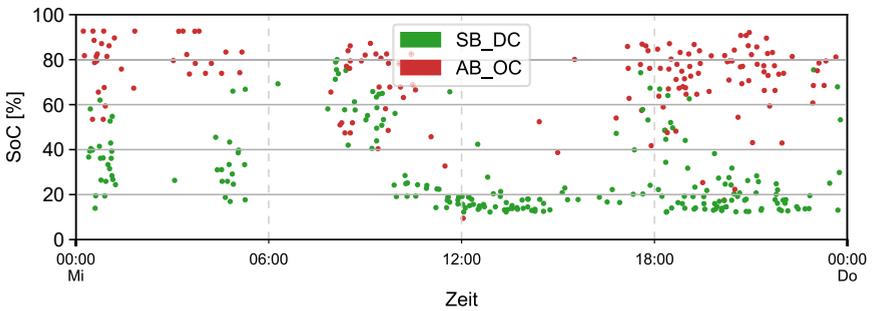


Abb. 7.2: SoC der E-Busse bei Ankunft im Depot

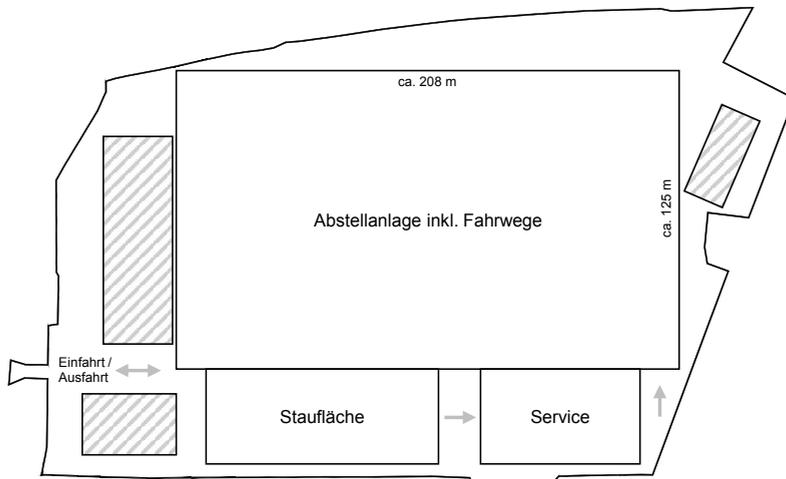


Abb. 7.3: Geländeplan mit Flächen

spricht die Fläche der Abstellanlage mit ca. 26.000 m² den meisten Platz. Die zwei Fahrzeugtypen sollen zudem nicht gemischt abgestellt werden. Neben der Abstellanlage befinden sich die Flächen für die ankommenden Fahrzeuge und für den Service. Die restlichen gestreiften Flächen sind für Gebäude und andere Tätigkeiten vorgehalten und für diese Studie nicht weiter relevant.

Für die Fallstudie werden zwei Varianten eines E-Depots untersucht, die in Abb. 7.4 in Rot und Blau dargestellt sind.²⁴⁴.

Merkmal	Optionen			
Netzanschluss-ebene	Niederspannung	Mittelspannung	Hochspannung	Max. 10 MVA für Ladeprozesse
Fahrzeugtyp	12 m Standard-Bus	18 m Gelenkbus	Doppeldeckerbus	12 m Standard-Bus (SB) mit Lade-strategie Laden im Depot (DC): $E_{bus, bat}^{nom} = 300 \text{ kWh}$, $SoC_{min} = 10 \%$, $SoC_{max} = 90 \%$, $SoH_{bus, bat} = 80 \%$ 18 m Gelenkbus (AB) mit Lade-strategie Gelegenheitsladen (OC): $E_{bus, bat}^{nom} = 174 \text{ kWh}$, $SoC_{min} = 5 \%$, $SoC_{max} = 95 \%$, $SoH_{bus, bat} = 85 \%$
Ladeschnittstelle	Manuell	Automatisch		Eine Ladeschnittstelle pro Abstellplatz, getrennte Abstellung von SB und AB, Ladewirkungsgrad $\eta_{ch} = 95 \%$
Lade- und Lastmanagement	Nicht gesteuert	Gesteuert	Smart	Aufladung der Batterien direkt nach Ankunft an Ladeschnittstelle, Vorkonditionierung: 30 min vor Abfahrt mit 20 kW Mit Algorithmus zur preisorientierten Ladeplanung mit variabler Leistungsgrenze, Vorkonditionierung: 30 min vor Abfahrt mit 20 kW
Ladeort	Abstellanlage	Servicehalle	Staufläche	Ladeinfrastruktur auf Überdachung der Abstellanlage
Reinigung / Versorgung	Abstellanlage	Servicehalle		Service vor dem Ladeprozess, Servicezeiten 18:00 – 06:00 Uhr, Dauer Innenreinigung/Versorgung (alle 24 h): 4 min, Dauer Außenreinigung (alle 3 Tage): 4 min
Abstellordnung	Blockabstellung (L)	Schrägabstellung Einzelreihe (DSR)	Schrägabstellung Doppelreihe (DDR)	Ermittlung der Abstellordnung mit genetischem Algorithmus aus Abschnitt 5.5.
Abstell- und Dispositionsstrategie	Gleichmäßig (Even)	Reihenweise (First)	Smart	Vorlaufzeit Disposition: 1 h

Abb. 7.4: Untersuchte Varianten eines E-Depots (rot, blau) mit Simulationsparametern und Rahmenbedingungen

Die beiden Varianten unterscheiden sich durch den Einsatz eines Lade- und Lastmanagements, um dessen Einfluss auf den erforderlichen Netzanschluss zu analysieren. Zusätzlich sind in Abb. 7.4 zu jedem Merkmal und jeder Variantenoption die zugrundeliegenden Simulationsparameter beschrieben. An dem vorgesehenen Standort des zukünftigen E-Depots kann ein Netzanschluss in Mittelspannungsebene realisiert werden mit einer maximalen Anschlussleistung von 10 MVA für die Ladeprozesse der E-Busse. Die Fahrzeug- und Batterieparameter der beiden Fahrzeugtypen sind aus der bereits bestehenden E-Flotte des Busbetreibers übernommen. Weiterhin ist für jeden Stellplatz der Abstellanlagen für SB und AB eine manuelle Ladeschnittstelle vorzusehen. Die betrieblichen Parameter der Reinigung/Versorgung in der Servicehalle sind größtenteils aus dem bisherigen Depotbetrieb des Busbetreibers abgeleitet, wie z. B.

²⁴⁴Vgl. Abb. 4.8.

die Einschränkung der Servicezeiten und die Dauer der Reinigungsarbeiten. Zur Auslegung des Depotlayouts sind alle Abstellordnungen möglich und sollen durch den entwickelten genetischen Algorithmus²⁴⁵ ermittelt werden. Aufgrund der Größe des E-Depots wird ein Depotmanagement eingesetzt, daher wird die Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart*²⁴⁶ für beide Varianten festgelegt.

7.2 Auslegung des Depotlayouts

Mit der zuvor beschriebenen Ausgangssituation und den geltenden Rahmenbedingungen kann schrittweise ein Konzept für das E-Depot entwickelt werden. Zunächst wird mit dem Simulationsmodell der minimale Fahrzeug- und Stellplatzbedarf als Grundlage für ein Depotlayout ermittelt. Hierfür werden die Fahrzeuge lediglich im Depot aufgeladen und es gibt keinerlei Einschränkungen im Betriebsablauf oder beim Abstellen. Es wurde angenommen, dass für jedes Fahrzeug jederzeit ein Stellplatz und ein Ladepunkt mit einer Leistung von 150 kW zur Verfügung steht. Für diesen Fall ergibt sich nach der Simulation ein Minimum von 255 Fahrzeugen (103 SB, 152 AB), die zur Erfüllung des zugrundelegenden Umlaufplans benötigt werden. Das Minimum an Stellplätzen ergibt sich aus der maximalen Anzahl an Fahrzeugen im Depot mit insgesamt 223 (87 SB, 136 AB), wie Abb. 7.5 zeigt. Die restlichen 32 Busse bedienen zu diesem Zeitpunkt Umläufe.

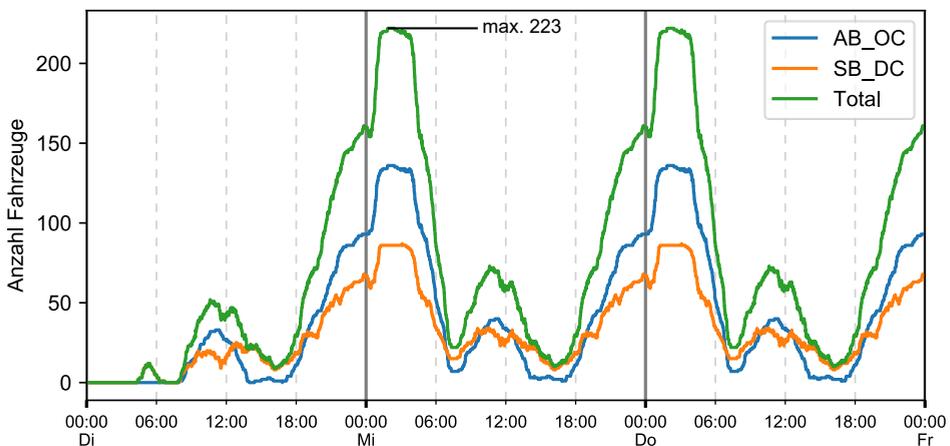


Abb. 7.5: Anzahl der Fahrzeuge im Depot

²⁴⁵Siehe Abschnitt 5.5.

²⁴⁶Siehe Abschnitt 5.3.

Im nächsten Schritt wird das entwickelte Modell zur Konfiguration der Abstellflächen²⁴⁷ angewandt. Die Abstellanlage wird aufgrund der nicht gemischten Abstellung in zwei Flächen unterteilt. Für SB stehen 47 m x 208 m und für AB 86 m x 208 m zur Verfügung; ein 8 m langer Streifen dient als gemeinsamer Fahrweg. Weiterhin wird aufgrund der Komplexitätsreduktion und der Performancesteigerung zu diesem Planungsstadium noch mit vereinfachten Annahmen im Betriebsablauf simuliert, d. h. es wird ausschließlich der Ladeprozess berücksichtigt. Prozesse für beispielsweise Reinigung, Rangieren oder Mindeststandzeiten werden ignoriert, da diese auf der Abstellanlage eine untergeordnete Rolle spielen. Die Parameter des genetischen Algorithmus²⁴⁸ wurden durch Testdurchläufe bestimmt und sind in Tabelle A.8 im Anhang aufgelistet. Die geometrischen Parameter der Abstellfläche und der Abstellordnungen sind ebenso im Anhang in Abb. A.2 und Tabelle A.9 enthalten.

Für die SB-Abstellanlage ergibt sich der Zielfunktionsraum in Abb. 7.6. Es zeigt die unzulässigen (x) und zulässigen (•) Konfigurationen nach 1.000 Generationen.²⁴⁹

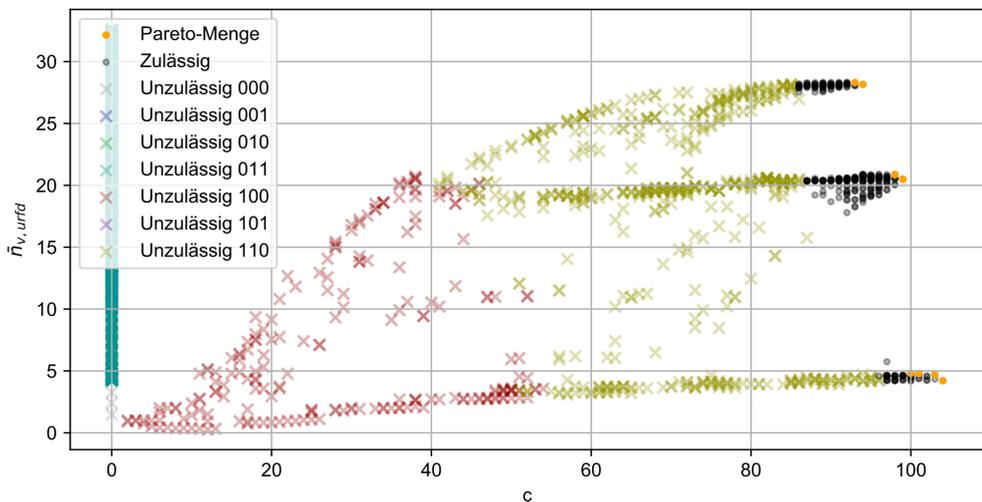


Abb. 7.6: Zielfunktionsraum (SB) mit den Zielfunktionen $f_1(\vec{x}) = c(\vec{x})$ (Stellplatzkapazität) und $f_2(\vec{x}) = \bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$ (Flexibilitätskennzahl)

Es gibt drei Bedingungen, die eine Konfiguration zulässig machen: i) Flächenbedarfsprüfung wurde bestanden ($0 < c(x) \leq c_{max_e}$), ii) keine Verspätungen bei Abfahrt

²⁴⁷Siehe Abschnitt 5.5.

²⁴⁸Siehe line 24.

²⁴⁹Die Simulation wurde auf einem PC mit 32 CPU-Kernen mit einer Grundtaktfrequenz von 3,69 GHz durchgeführt und dauerte insgesamt 37,7 min. Es wurden 441 zulässige und 8.872 unzulässige Konfigurationen gefunden.

($g_{delay}(x) = 0$) und iii) kein Stau bei Abstellung ($h_{congestion}(x) = 0$).²⁵⁰ Abb. 7.6 zeigt, dass die Konfigurationen bei $0 < c < 50$ wegen Verspätungen und Stau unzulässig sind. Bei $50 < c < 85$ verhindert nur noch auftretender Stau bei Abstellung, dass die Konfigurationen zulässig sind. Bei höheren c verfolgt der Algorithmus drei unterschiedliche und zulässige Konfigurationsarten. Die dominierenden Konfigurationen (Pareto-Menge) sind in orange hervorgehoben. Es wurden vier Konfigurationen in der pareto-optimalen Menge identifiziert, die eine sinnvolle, homogene Aufteilung der Abstellfläche besitzen. Diese sind in Abb. 7.7 mit den dazugehörigen Zielfunktionswerten in Tabelle 7.1 dargestellt.

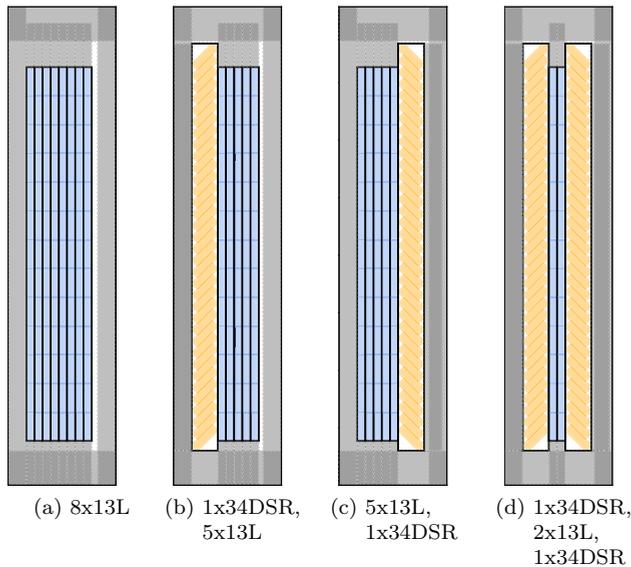


Abb. 7.7: Ausgewählte Konfigurationen in der pareto-optimalen Menge (SB)

Tabelle 7.1: Zielfunktionswerte der ausgewählten Konfigurationen (SB)

Abb.	Konfiguration	c	$\bar{n}_{v,urfd}$
7.7a	8x13L	104	4,2
7.7b	1x34DSR, 5x13L	99	20,5
7.7c	5x13L, 1x34DSR	99	20,5
7.7d	1x34DSR, 2x13L, 1x34DSR	94	28,2

Die Konfiguration Abb. 7.7a hat mit 104 Stellplätzen die größtmögliche Kapazität, allerdings durch die langen Reihen nur einen geringen Wert für $\bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$. Abb. 7.7b

²⁵⁰Bei den unzulässigen Konfigurationen wird nochmal unterschieden, je nachdem, welche der drei Bedingungen erfüllt (1) wird oder nicht (0).

und 7.7c verknüpfen die flächengünstige Blockabstellung mit einer flexiblen Schrägabstellung in Einzelreihe. Insbesondere ist der Fahrweg auf der linken bzw. rechten Seite vorteilhaft bei Schrägabstellung. Abb. 7.7d ist die flexibelste Lösung, allerdings nur mit einer Stellplatzkapazität von 94. Zwei weitere aussichtsreiche, zulässige Konfigurationen, die zwar durch andere Konfigurationen dominiert werden und somit nicht in der pareto-optimalen Menge liegen, sind 16x6L ($c=96$, $\bar{n}_{v,urfd}=6,6$) und 10x6L, 1x34DSR ($c=94$, $\bar{n}_{v,urfd}=21,4$), die im Anhang in Abb. A.3 zu finden sind.

Mit der gleichen Vorgehensweise werden Konfigurationen für die Abstellfläche der AB ermittelt. Die Simulationsparameter wurden aufgrund der größeren Fläche angepasst.²⁵¹ Der Zielfunktionsraum nach 1.500 Generationen ist in Abb. 7.8 dargestellt.²⁵²

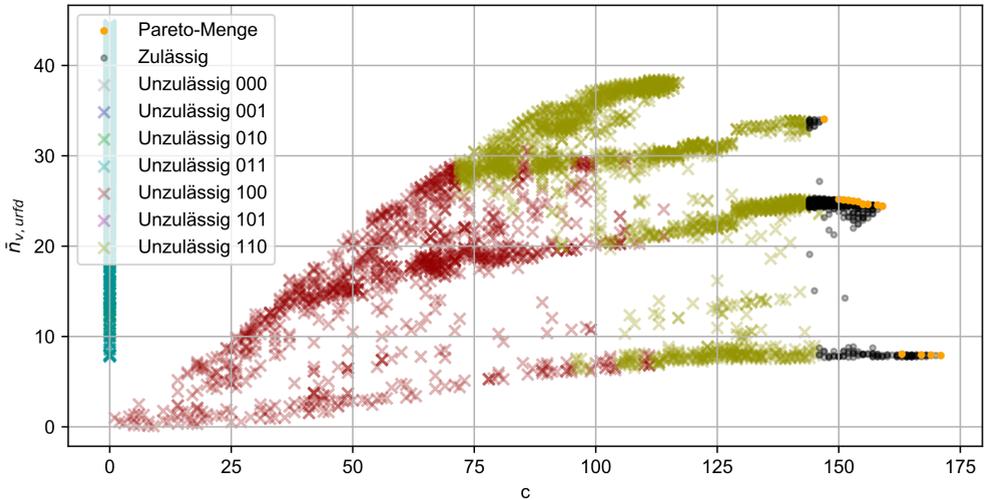


Abb. 7.8: Zielfunktionsraum (AB) mit den Zielfunktionen $f_1(\vec{x}) = c(\vec{x})$ (Stellplatzkapazität) und $f_2(\vec{x}) = \bar{n}_{v,urfd}(\vec{x})$ (Flexibilitätskennzahl)

Erst ab $c > 136$ werden zulässige Lösungen gefunden. Wie bei SB verfolgt der Algorithmus drei unterschiedliche Konfigurationsarten. Die vier aussichtsreichsten Konfigurationen der pareto-optimalen Menge wurden identifiziert und sind in Abb. 7.9 zu sehen mit den dazugehörigen Zielfunktionswerten in Tabelle 7.2. Durch den Einsatz der Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart*²⁵³, ist der Betrieb ohne Stau und Ver-

²⁵¹Siehe Tabelle A.8.

²⁵²Die Simulation wurde auf einem PC mit 32 CPU-Kernen mit einer Grundtaktfrequenz von 3,69 GHz durchgeführt und dauerte insgesamt 82,3min. Es wurden 3.335 zulässige und 45.017 unzulässige Konfigurationen gefunden.

²⁵³Siehe Abschnitt 5.3.

spätungen mit einer großen Blockabstellung möglich (siehe Abb. 7.9a). Jedoch hat diese Lösung - wie erwartet - eine geringere Flexibilität als die Konfigurationen Abb. 7.9b, Abb. 7.9c und Abb. 7.9d. Zwei weitere aussichtsreiche und zulässige Konfigurationen sind 38x4L ($c=152$, $\bar{n}_{v,urfd}=13,7$) und 1x33DSR, 28x4L ($c=145$, $\bar{n}_{v,urfd}=27,6$) und in Abb. A.4 abgebildet.

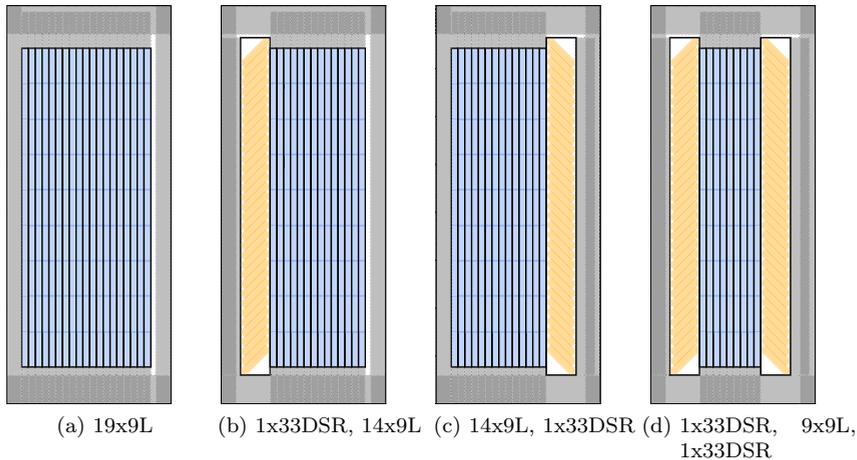


Abb. 7.9: Ausgewählte Konfigurationen in der pareto-optimalen Menge (AB)

Tabelle 7.2: Zielfunktionswerte der ausgewählten Konfigurationen (AB)

Abb.	Konfiguration	c	$\bar{n}_{v,urfd}$
7.9a	19x9L	171	7,9
7.9b	1x33DSR, 14x9L	159	24,4
7.9c	14x9L, 1x33DSR	159	24,4
7.9d	1x33DSR, 9x9L, 1x33DSR	147	34,0

Aufgrund der höheren Flexibilitätskennzahl bei ausreichender Stellplatzkapazität wurden die Konfigurationen in Abb. 7.7d und 7.9d für die Abstellanlage ausgewählt.

Im nächsten Schritt wird für diese Konfiguration der Abstellanlage die notwendige Servicekapazität bestimmt. Es ist darauf zu achten, dass die Anzahl an wartenden Fahrzeugen vor dem Service so gering wie möglich gehalten wird, da der Platz der Staufläche begrenzt ist. Auf der zur Verfügung stehenden Fläche von ca. 50 m x 100 m können maximal entweder 1x24DDR oder 10x3L errichtet werden. Zudem sollte der Service bestmöglich ausgenutzt werden. In Tabelle 7.3 sind die Ergebnisse der Simulation für verschiedene Servicekapazitäten aufgelistet.

Mit geringeren Servicekapazitäten erreicht man zwar eine hohe Auslastung, allerdings

Tabelle 7.3: Ergebnisse bei unterschiedlichen Servicekapazitäten

Servicekapazität (tägl. Innenreinigung)	Auslastung	Stellplatzbedarf Staufläche	Stauzeit
2	69,2 %	47	357,9 h
3	46,1 %	38	57,0 h
4	34,6 %	31	21,9 h
5	27,7 %	26	10,8 h
6	23,1 %	24	5,3 h
7	19,8 %	24	2,0 h

ist der Stellplatzbedarf der Staufläche größer und die Gesamtzeit der stauenden Fahrzeuge länger. Aufgrund der besseren Zugänglichkeit, wird die Abstellordnung DDR bevorzugt. Somit sind sechs Serviceplätze für die tägliche Innenreinigung für diese Fallstudie ausreichend. Da nur alle drei Tage eine Außenreinigung vorzusehen ist, werden zwei Waschanlagen angesetzt.

Aus diesen Erkenntnissen resultiert das Depotlayout in Abb. 7.10. Die Abstellfläche hat einen Flächenbedarf von $107,9 \text{ m}^2/\text{Bus}$. Da ein Ladepunkt pro Stellplatz angenommen wurde, sind auf der Abstellanlage 241 Ladepunkte vorzusehen. Die Ladetechnik kann auf den beiden Überdachungen installiert werden.

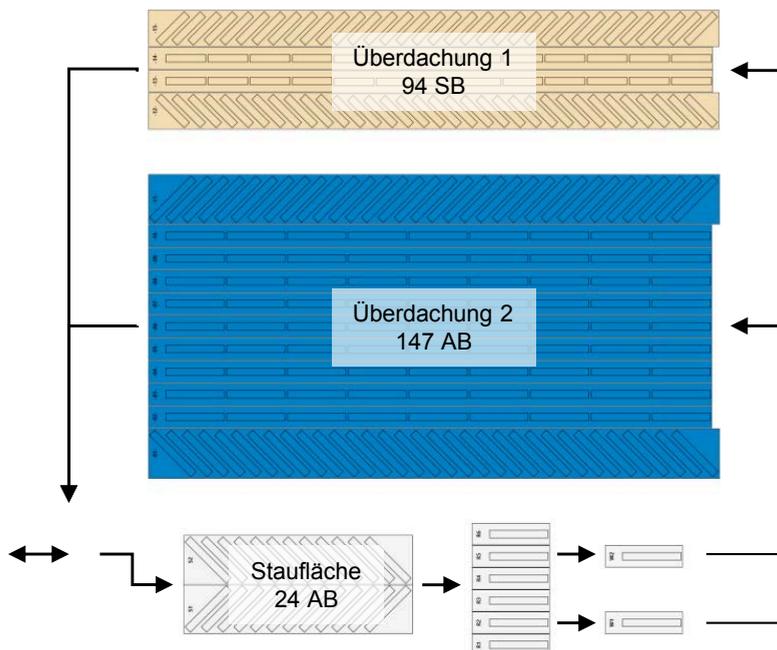


Abb. 7.10: Depotlayout

7.3 Evaluierung des E-Depots

Im nächsten Schritt wird das Konzept des E-Depots anhand von Indikatoren²⁵⁴ evaluiert, um anschließend Rückschlüsse auf das Realsystem zu ziehen. Zunächst werden die Standzeiten und Prozesse im Depot anhand der Übersicht in Abb. 7.11 analysiert und bewertet.

Zur Erfüllung des Umlaufplans werden insgesamt 258 Busse benötigt, 106 SB²⁵⁵ und 152 AB. Aus der Übersicht wird ersichtlich, dass AB (oberhalb) sich überwiegend zwischen ca. 18:00 und 06:00 Uhr im Depot befinden. SB (unterhalb) müssen aufgrund ihrer geringen Reichweite und ohne Auflademöglichkeit während des Betriebs einen weiteren Aufenthalt im Depot am Mittag zum Laden einplanen. Die durchschnittliche Aufenthaltszeit im Depot aller Busse beträgt 4,64 h. Die meisten SB laden mittags die Batterien schnellstmöglich voll und verlassen anschließend umgehend das Depot. Die wenigen AB am Mittag laden zwar auch nach, rücken aber erst nach bis zu 5 h wieder aus. Zwischen ca. 18:00 und 06:00 Uhr stehen beide Fahrzeugtypen wesentlich länger als für den Ladeprozess notwendig. Aus diesen Erkenntnissen kann geschlossen werden, dass die Ladeleistung von 150 kW für SB mittags zwingend notwendig ist, die Leistung für AB allerdings reduziert werden kann. Hierfür wurden mehrere Simulationsdurchläufe durchgeführt und die Ladeleistung stetig verringert. Eine Ladeleistung von 75 kW für die AB gilt als ausreichend, geringere Werte führen zu einem Fahrzeugmehrabbedarf oder Abfahrtsverspätungen. In den folgenden Simulationsergebnissen ist der neue Wert der Ladeleistung berücksichtigt.²⁵⁶

Die Vorkonditionierung des Fahrgastinnenraums vor Abfahrt ist in Abb. 7.11 mit schwarzen Balken dargestellt. Die Dauer von 30 min wird bei 76,3 % der Fälle eingehalten. Eine geringere Dauer kommt vor, wenn die Zeit zwischen Fahrzeugdisposition und Abfahrt kleiner als 30 min war, wie Abb. 7.12 zeigt. Die verkürzte Vorkonditionierung tritt hauptsächlich bei den Aufenthalten am Nachmittag auf, da Fahrzeuge schnellstmöglich das Depot wieder verlassen müssen und der Prozess, falls notwendig, dann abgebrochen wird.

Wie in Abb. 7.4 definiert, kommen die Busse nur zwischen 18:00 und 06:00 Uhr zum Service. Die Auslastung der sechs Serviceplätze (tägl. Innenreinigung/Versorgung) ist in Abb. 7.13 dargestellt. Eine hohe Auslastung tritt auf, wenn Busse gehäuft im Depot ankommen und sich auf der Staufläche ansammeln. Diese Korrelation ist in Abb. 7.14 zu sehen, insbesondere für den Zeitraum 01:00 bis 02:00 Uhr. Dieser Peak ist auch

²⁵⁴Siehe Abschnitt 6.2.

²⁵⁵Der Mehrbedarf von 3 SB zum vorher ermittelten Minimum ergibt sich durch die Einschränkungen des Betriebsablaufs.

²⁵⁶Weitere Variationen der Ladeleistung, wie z. B. eine inhomogene Verteilung, werden im folgenden Abschnitt 7.4 diskutiert.

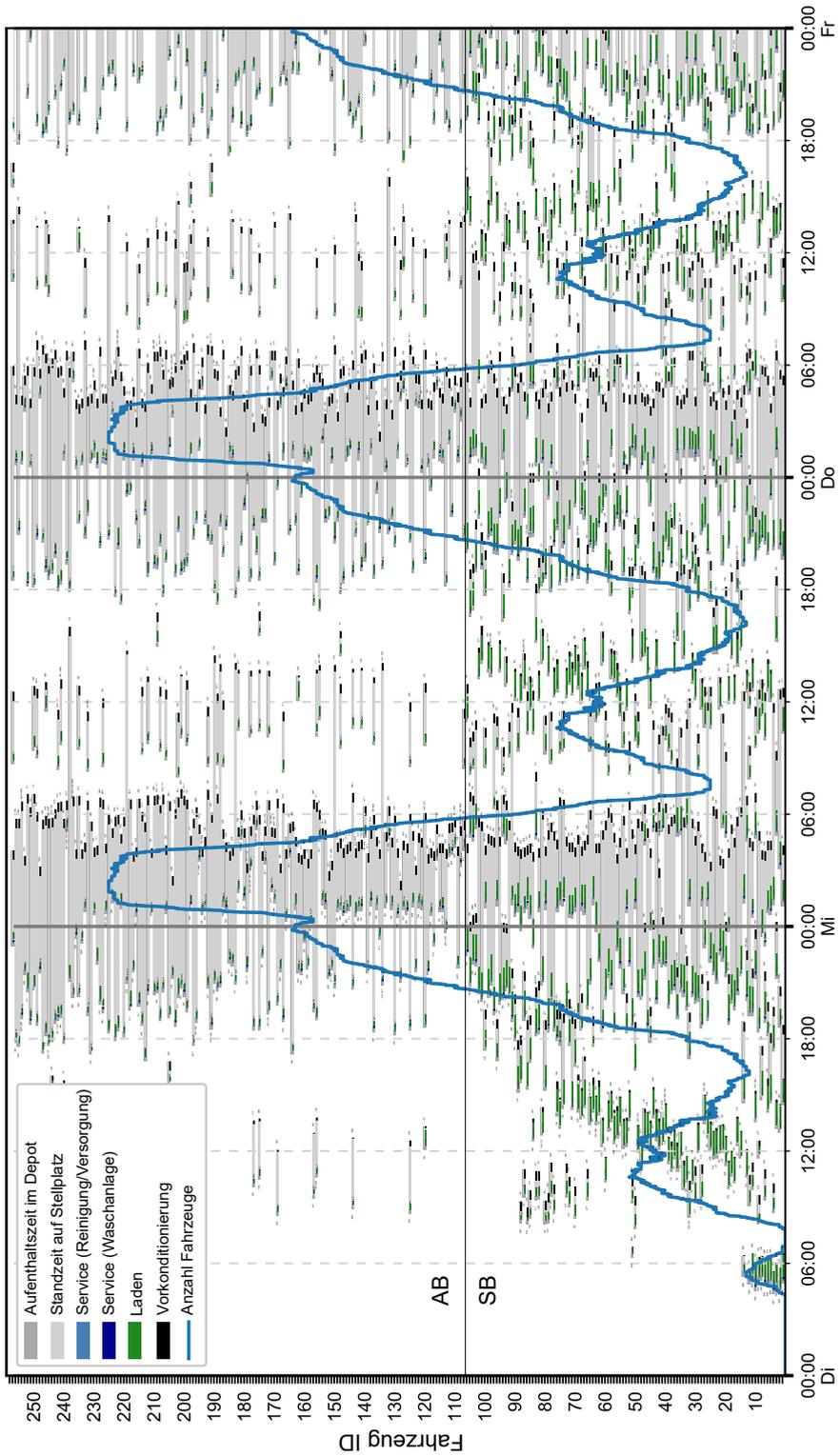


Abb. 7.11: Standzeiten und Prozessübersicht aller Fahrzeuge des E-Depots

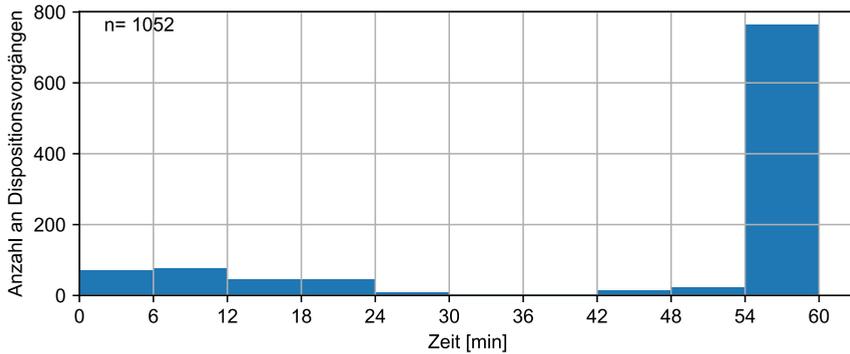


Abb. 7.12: Verteilung der Zeitpunkte der Disposition mit vorgegebener Vorlaufzeit von 60 min

verantwortlich für die erforderliche Stellplatzkapazität der Staufläche.²⁵⁷ Im weiteren Betriebsablauf im Depot tritt kein Stau mehr auf, im Durchschnitt muss jeder Bus 3,3 min pro Depotaufenthalt warten.

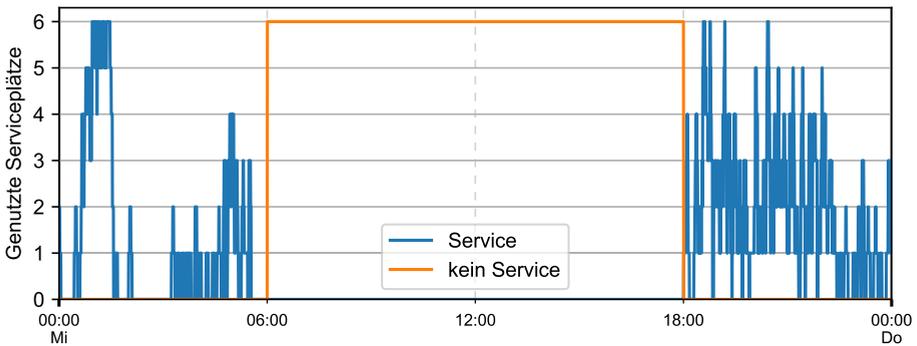


Abb. 7.13: Auslastung des Service (tägl. Innenreinigung/Versorgung)

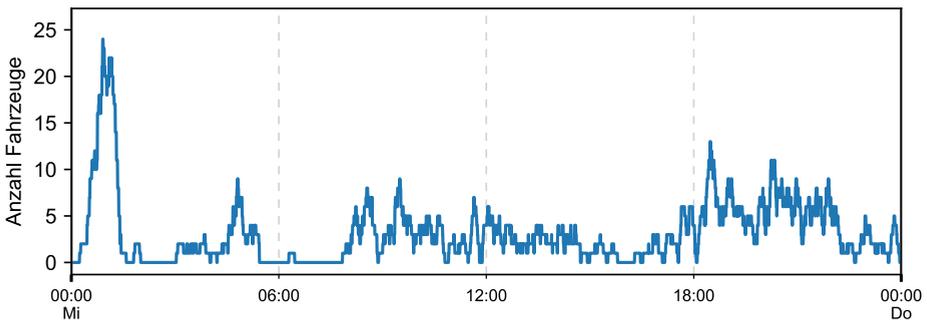


Abb. 7.14: Anzahl der Fahrzeuge auf Staufläche des E-Depots

²⁵⁷Vgl. Tabelle 7.3.

Die Auslastung aller Stellplätze pro Tag ist in Abb. 7.15 illustriert. Die Plätze in Schrägabstellung werden öfters genutzt als die in Blockabstellung. Dies ist auf die Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart* zurückzuführen.²⁵⁸ Dieser Effekt kann durch die Animation nachvollzogen werden. Busse parken zunächst auf den Stellplätzen in Schrägabstellung und nutzen anschließend erst die Plätze in der Blockabstellung. Bei der Disposition ist dies umgekehrt. Falls möglich werden zuerst Busse in Blockabstellung disponiert. Weiterhin ist zu sehen, dass alle Stellplätze der Abstellanlage der AB genutzt werden. Bei den Stellplätzen der SB bleiben in Reihe -15- (in Abb. 7.15 oben rechts) zwei ungenutzt.

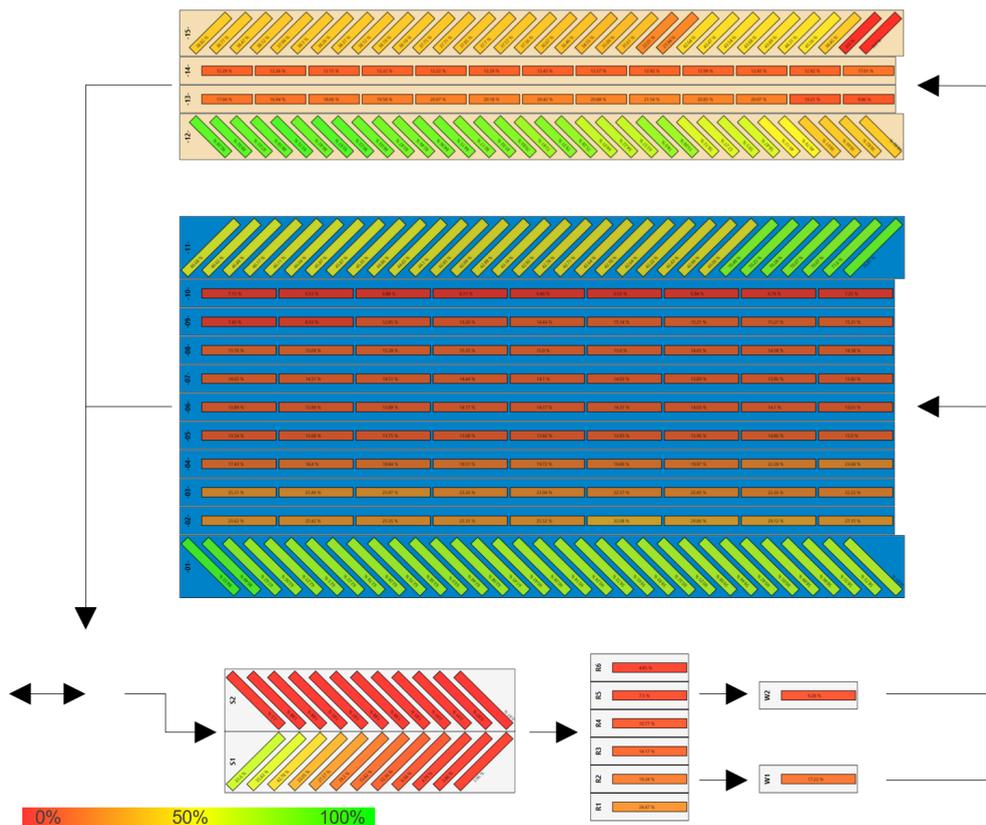


Abb. 7.15: Auslastung der Stellplätze pro Tag in Prozent als Farbverlauf. Rot: geringe Auslastung, Grün: hohe Auslastung

Die Busse sind hauptsächlich abends und nachts länger an einer Ladeinfrastruktur angeschlossen als für den Ladeprozess notwendig. Diese Ladeflexibilität ist in Abb. 7.16 dargestellt. Im Durchschnitt beträgt die Flexibilität 191 min. Diese Ladeflexibilität wird im nächsten Schritt genutzt, um Ladeprozesse zu verschieben.

²⁵⁸Siehe Bewertungskriterien *BufferPark* und *BufferDispatch* in Unterabschnitt 5.3.2.

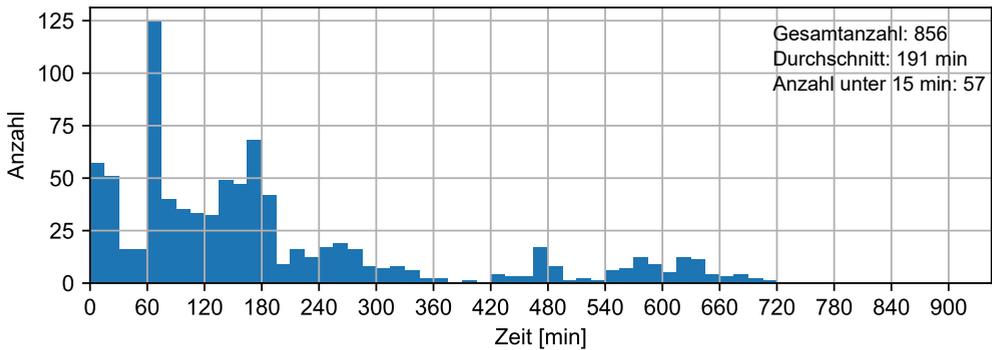


Abb. 7.16: Verteilung der Ladeflexibilität bei Fahrzeugen im E-Depot

In Abb. 7.17 sind die Lastprofile der Flotte bei nicht gesteuertem Laden und mit einem Lade- und Lastmanagement abgebildet. Der Lade- und Lastmanagement-Algorithmus *Smart*²⁵⁹ kann die Lastspitze um bis zu 26,63 % senken mit einer zusätzlichen Verschiebung der Ladeprozesse in günstigere Zeitintervalle (Preis am Spotmarkt). Eine weitere Senkung der Gesamtladeleistung ist nicht mehr möglich, da die unflexiblen Ladeprozesse am Nachmittag kaum verändert werden können. Aufgrund des Preistals zwischen 00:00 und 06:00 Uhr werden die Ladevorgänge größtenteils bis zur Abfahrt verzögert.

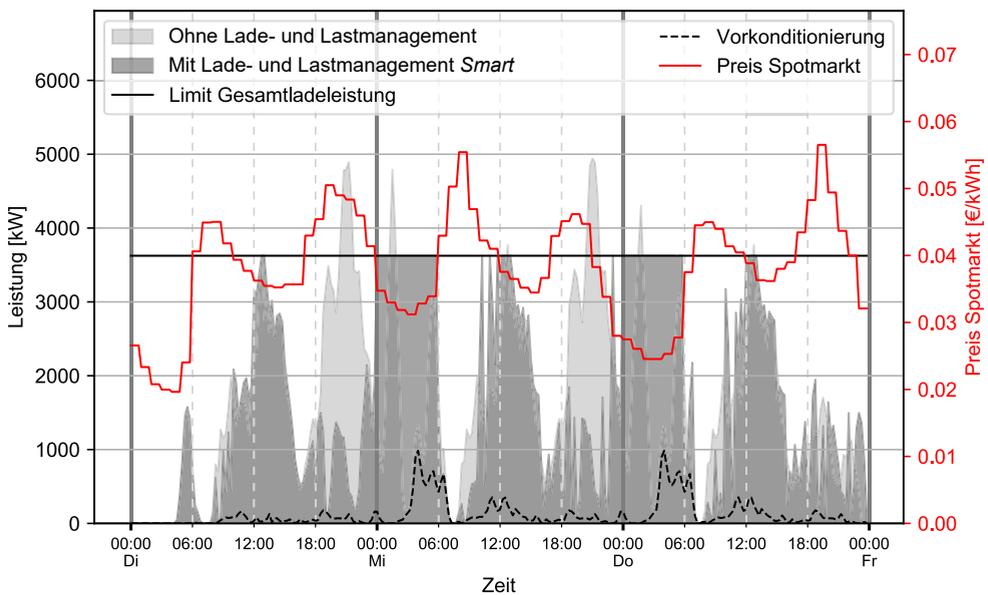


Abb. 7.17: Vergleich der Lastprofile mit und ohne Lade- und Lastmanagement

²⁵⁹Siehe Abb. 5.15.

Zwischen 04:00 und 06:30 Uhr sind zudem mehrere Prozesse zur Vorkonditionierung vorgesehen. Diese sind nicht verschiebbar, da sie abhängig von den Abfahrtszeiten sind. Das Maximum der erforderlichen Leistung der Vorkonditionierung beträgt 1.000 kW.

In Tabelle 7.4 sind weitere berechnete Kennwerte für den auslegungsrelevanten Wochentag aufgelistet. Die Energiebeschaffung könnte bei dem angenommenen Preisverlauf um 16,78 % reduziert werden und das Netzentgelt aufgrund der geringeren Lastspitze um 17,38 %. Das ausgeglicheneres Lastprofil nach dem Lade- und Lastmanagement führt zu einer deutlichen Erhöhung der Benutzungsdauer.

Tabelle 7.4: Kennwerte im Intervall Mi. 0:00 Uhr - Do. 0:00 Uhr

		Nicht gesteuert	Smart	Veränderung
Lastspitze	kW	4.941	3.625	-26,63 %
Energie	kWh/Tag	47.389	47.690	0,64 %
Energiebeschaffung ²⁶⁰	€/Tag	2.051	1.707	-16,78 %
Netzentgelt ²⁶¹	€/Tag	1.369	1.131	-17,38 %
Tagesbenutzungsdauer	h/Tag	9,59	13,16	37,23 %

7.4 Parametervariation

Bis jetzt wurden zwei unterschiedliche Ladeleistungen für die Abstellanlage berücksichtigt, 147 x 75 kW für AB und 94 x 150 kW für SB. Insgesamt müssten für dieses Setup Module mit einer Leistung von 25.125 kW für die Ladeinfrastrukturen bereitgestellt werden. Eine gleichmäßige Verringerung der maximalen Ladeleistungen würde für diese Fallstudie einen Fahrzeugmehrbedarf oder Abfahrtsverspätungen bedeuten. Durch die Prozessanalyse wurde allerdings deutlich, dass insbesondere mittags eine höhere Ladeleistung erforderlich ist als nachts. Im Folgenden wird daher untersucht, inwieweit die erforderlichen Leistungsmodul durch eine inhomogene Aufteilung der maximalen Ladeleistung auf den Stellplätzen reduziert werden können.

Aus Abb. 7.15 ist bekannt, dass die Stellplätze in Einzelreihe öfters genutzt werden als die Stellplätze in Blockabstellung. Insbesondere mittags werden ausschließlich Stellplätze in Einzelreihe benutzt. Daher wird die Ladeleistung für die Stellplätze in Einzelreihe beibehalten und für die Blockabstellung sukzessive reduziert, wie in Tabelle 7.5 aufgelistet. Die Ladeleistung kann bei AB auf 20 kW und für SB auf 30 kW

²⁶⁰Nicht gesteuert: durchschnittlicher Preis in Deutschland 2019 nach Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 284) mit 4,33 Cent/kWh, Smart: Day-Ahead Spotpreis am 04.06.2019.

²⁶¹Siehe Preise für Umspannung Hoch-/Mittelspannung in Tabelle A.2.

Tabelle 7.5: Ergebnisse bei inhomogener Verteilung der maximalen Ladeleistung

	AB		SB		Total
	DSR	L	DSR	L	
Ladepunkte	66	81	68	26	241
Leistung	75 kW	75 kW	150 kW	150 kW	25.125 kW
	⋮	50 kW	⋮	100 kW	21.800 kW
	⋮	25 kW	⋮	50 kW	18.475 kW
	75 kW	20 kW	150 kW	30 kW	17.550 kW

gesenkt werden. Somit verringert sich die Gesamtleistung der Module um ca. 30 % im Vergleich zu einer homogenen Aufteilung.

Wie in Abschnitt 7.3 erläutert, ist der Service der Flaschenhals im Betriebsablauf und kann einen Stau verursachen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit die E-Busse direkt am Stellplatz täglich Innen zu reinigen und Betriebsmittel aufzufüllen. Hierdurch verkleinert sich in dieser Fallstudie die Staufläche von 24 auf 7 Stellplätze (siehe Abb. 7.18) und der Fahrzeugbedarf reduziert sich um 3 SB, da die E-Busse direkt nach Ankunft im Depot auf einen geeigneten Platz der Abstellanlage abgestellt werden können. Zusätzlich ist der Service gleichmäßiger ausgelastet, wie Abb. 7.19 zeigt.

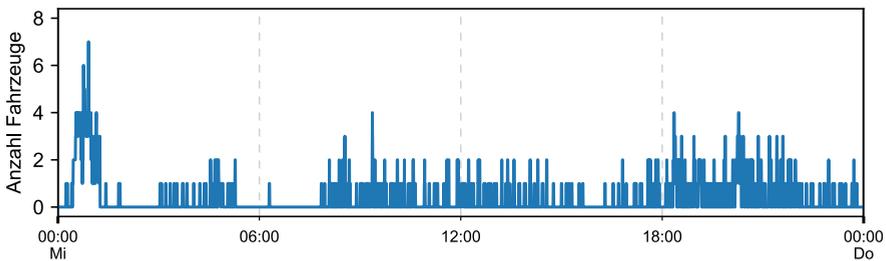


Abb. 7.18: Anzahl der Fahrzeuge auf Staufläche des E-Depots

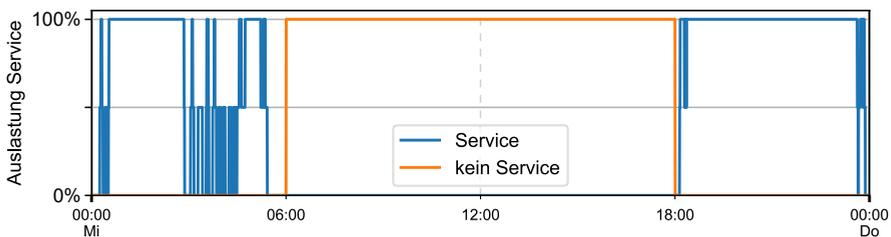


Abb. 7.19: Auslastung des Service (tägl. Innenreinigung/Versorgung)

Das Lade- und Lastmanagement *Smart* wurde in Abb. 7.17 nur mit einem exemplarischen Preissignal durchgeführt. Im Folgenden werden drei unterschiedliche Preiskurven des Spotmarkts (Day-Ahead Auktion) herangezogen und mit dem durchschnittlichen Strombeschaffungspreis in Deutschland 2019²⁶² verglichen. In Abb. 7.20 sind die ausgewählten Preiskurven dargestellt, die sich hauptsächlich in der Volatilität unterscheiden. Zwischen 0:00 und 06:00 Uhr sind die Preise deutlich billiger als der Durchschnittswert von 4,33 Cent/kWh. Tagsüber sind insbesondere im Hauptlastzeitfenster 18:00 bis 20:00 Uhr höhere Preise zu erwarten. Die Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Preiskurven sind in Tabelle 7.6 aufgelistet. Für alle ausgewählten Preiskurven sind die Strombeschaffungskosten geringer als der Durchschnittswert (Ersparnis von bis zu 26%), was hauptsächlich auf die Verschiebung von Ladevorgängen in günstigere Zeitintervalle in der Nacht zurückzuführen ist.

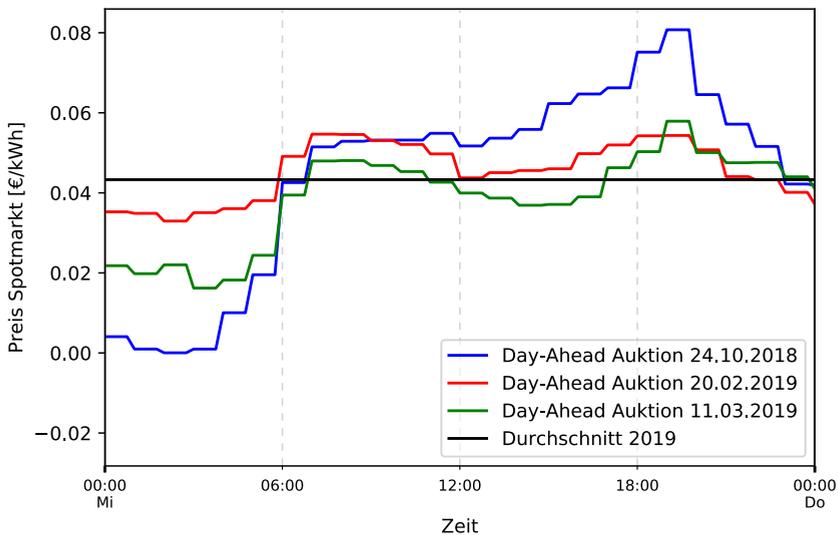


Abb. 7.20: Unterschiedliche Preiskurven

Tabelle 7.6: Kosten der Strombeschaffung für verschiedene Preiskurven im Intervall Mi 0:00 Uhr - Do 0:00 Uhr

Datum	Kosten
24.10.2018	3,30 Cent/kWh
20.02.2019	4,17 Cent/kWh
11.03.2019	3,21 Cent/kWh
Ø 2019	4,33 Cent/kWh

²⁶²Vgl. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt (2020, S. 284).

8 Diskussion

In diesem Kapitel werden die zuvor erlangten Ergebnisse in Bezug zu den Forschungsfragen der Arbeit diskutiert. Zusätzlich werden Limitationen der entwickelten Methodik aufgezeigt.

8.1 Ergebnisdiskussion in Bezug zu den Forschungsfragen dieser Arbeit

Auswirkungen der Einführung von E-Bussen auf den Depotbetrieb

In der Fallstudie wurden die zwei Ladestrategien Gelegenheitsladen und Laden im Depot mit den Fahrzeugtypen AB bzw. SB untersucht. Aufgrund unterschiedlicher Einsatz- und Lademöglichkeiten, Batteriekapazitäten und Reichweiten haben die Busstypen voneinander abweichende Energiebedarfe²⁶³ und Standzeiten²⁶⁴ im Depot. Im Vergleich mit Dieselbussen ist die durchschnittliche Standzeit aller elektrischen Busse mit 4,64 h²⁶⁵ geringer als die durchschnittliche Standzeit der untersuchten konventionellen Dieselbusse mit 7,2–8,3 h²⁶⁶. Dies ist hauptsächlich auf die zusätzlichen kurzen Depotaufenthalte am Nachmittag der SB zurückzuführen, was wiederum eine Vorgabe aus dem Umlaufplan ist. Die unterschiedlichen Energiebedarfe und Standzeiten beeinflussen einen Depotbetrieb und ein Depotlayout maßgeblich. Umgekehrt kann nur durch einen effizienten Depotbetrieb der Fahrzeug- und Infrastrukturbedarf so gering wie möglich gehalten werden. Somit besteht eine enge Wechselwirkung zwischen dem Depotbetrieb mit der Umlaufplanung und der Ladestrategie(n) und müssen daher bei der Planung eines E-Depots gemeinsam betrachtet werden, was durch die integrative Entwicklung des Simulations- und Planungstools eFLIPS²⁶⁷ umgesetzt wurde.

Die Ladeprozesse können auf verschiedene Möglichkeiten in den Betriebsablauf integriert werden.²⁶⁸ Die Abstellanlage bietet sich aufgrund der längeren Standzeiten für

²⁶³Siehe Abb. 7.2.

²⁶⁴Siehe Abb. 7.11.

²⁶⁵Siehe S. 114.

²⁶⁶Siehe Unterabschnitt 4.2.1.

²⁶⁷Siehe Abschnitt 3.4.

²⁶⁸Siehe Abb. 4.7.

die Implementierung der Ladeinfrastruktur an. Falls die Blockabstellung als flächengünstigste Abstellordnung vorgesehen wird, sind IT-Systeme für das Abstellen und Disponieren vorzusehen, da ansonsten das Handling mit unterschiedlichen Ladezuständen und die Verhinderung von Blockaden bei größeren Flotten nicht beherrschbar wäre. Dies wird in der Fallstudie deutlich durch die Anzahl von zu treffenden Entscheidungen zur Stellplatzzuweisung und Disposition von jeweils 433 Mal pro Tag. Zudem bietet eine IT-Unterstützung die Möglichkeit agil auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren, wie z. B. der Ausfall der Ladeinfrastruktur oder die Blockade durch ein defektes Fahrzeug.

Der Service, insbesondere die Innenreinigung und Versorgung mit Betriebsmitteln, kann bei zu geringer Kapazität zu einem Flaschenhals im Betriebsablauf im Depot werden, was wiederum die potentielle Ladezeit verkürzt.²⁶⁹ Entweder ist die Servicekapazität entsprechend großzügig auszulegen, um die Kapazität der Staufläche zu begrenzen und um die gesamte Stauzeit zu verringern. Oder der Betriebsablauf wird angepasst, um eine gleichmäßige Auslastung zu erreichen. Dies kann durch einen mobilen Service am Abstellplatz geschehen, wie in Abschnitt 7.4 gezeigt, oder Fahrzeuge stellen sich nach Ankunft direkt auf einen Abstellplatz und werden sukzessive in den Service gebracht. Für beide Varianten sind allerdings zur Steuerung der Abläufe und Zuweisung von freien Stellplätzen IT-Systeme (z. B. DMS²⁷⁰) erforderlich.

Abbildung relevanter Elemente und Funktionen eines E-Depots

Die relevanten Merkmale und Optionen eines E-Depots charakterisieren dieses maßgeblich und wurden als morphologischer Kasten²⁷¹ dargestellt. Diese Merkmale und Optionen wurden im entwickelten Simulationsmodell durch Modellelemente und Modellfunktionen umgesetzt. Dieser modulare Ansatz ermöglicht eine individuelle Konfiguration eines E-Depots und somit eine Abbildung einer Vielzahl von Planungsszenarien. Weiterhin besteht durch die Modellstruktur²⁷² mit den Elementen und Funktionen, wie Flächen, Prozessen, Ressourcen und Fahrzeugtypen eine einfache Erweiterbarkeit des Modells, um weitere Szenarien zu simulieren. Solch ein Szenario könnte zum Beispiel ein Mischbetrieb von konventionellen und elektrischen Bussen oder sogar wasserstoffbetriebenen Bussen sein.

Für das Simulationsmodell wurden Steuerungsalgorithmen für das Abstellen und Disponieren der Fahrzeuge und Optimierungsalgorithmen für das Lade- und Lastmanagement zur Auslegung des Netzanschlusses und für die Konfiguration der Abstellflächen

²⁶⁹Siehe Tabelle 7.3.

²⁷⁰Siehe Unterabschnitt 2.2.2.

²⁷¹Siehe Abb. 4.8.

²⁷²Siehe Abb. 5.1.

zur Festlegung geeigneter Abstellordnungen entwickelt. Somit können die relevantesten Planungsaspekte eines E-Depots effizient ausgelegt werden.

Für die Planung, Analyse und Evaluation von E-Depots wurden eine Visualisierung implementiert und quantitative Indikatoren ermittelt, um die Nachvollziehbarkeit und Plausibilität der Simulationsergebnisse zu gewährleisten und die Leistungsfähigkeit eines E-Depots zu beurteilen.²⁷³ Somit besteht die Möglichkeit die Auswirkung verschiedener Varianten eines E-Depots mit unterschiedlichen Parametern zu bestimmen.

Erstellung einer Planungsgrundlage für E-Depots

Mit der Fallstudie wurde gezeigt, wie eine Planungsgrundlage für ein E-Depot auf Basis einer realen Ausgangssituation eines Betreibers schrittweise systematisch erarbeitet werden kann. Die Planungsgrundlage besteht aus einem möglichen Depotlayout, Fahrzeug-, Stellplatz- und Ladeinfrastrukturbedarfs als Mengengerüst sowie Lastprofile zur Auslegung des Netzanschlusses.

Die größte Fläche des Depotlayouts beansprucht die ausgelegte Abstellanlage mit einem Flächenbedarf von $107,9 \text{ m}^2/\text{Bus}$.²⁷⁴ Durch die Kombination unterschiedlicher Abstellordnungen liegt der Flächenbedarf zwischen den Werten der gezeigten Beispielen für 100 SB mit homogener Abstellordnung, L: $86,9 \text{ m}^2/\text{Bus}$, DSR: $148,4 \text{ m}^2/\text{Bus}$ und DSR: $123,8 \text{ m}^2/\text{Bus}$.²⁷⁵ Somit konnte durch die gemischte Abstellordnung ein Kompromiss zwischen Stellplatzkapazität und Flexibilitätsgrad beim Abstellen und Disponieren der Fahrzeuge gefunden werden.

Eine bedeutende Planungsunterstützung ist die Möglichkeit die Auslastung von Stellplätzen zu ermitteln.²⁷⁶ Mit diesen Informationen lassen sich Abstell- und Dispositionsstrategien nachvollziehen und noch wichtiger Depotlayouts auf den Betriebsablauf abstimmen.

Die Lastspitze des Lastprofils der Fallstudie wurde mit dem Lade- und Lastmanagement *Smart* um 26,6 % gegenüber nicht gesteuertem Laden reduziert. Die Studie zum E-Depot in Hamburg Alsterdorf, wo zwar nur die Hälfte der E-Busse im Vergleich zu der Fallstudie in dieser Arbeit betrachtet wurden, ergab ein vergleichbares Potential zur Minderung der Lastspitze von 24–27 %²⁷⁷. Ein weiterer Vorteil mit der Einführung eines Lade- und Lastmanagements ist die Möglichkeit zeit- und lastvariable

²⁷³Siehe Abschnitt 5.6 und Abschnitt 6.2.

²⁷⁴Siehe S. 113.

²⁷⁵Siehe Abb. 2.10 und Abb. 2.11.

²⁷⁶Siehe Unterabschnitt 6.2.4.

²⁷⁷Siehe S. 34.

Stromtarife einzusetzen, um Energiebeschaffungskosten zu senken, was die Variation unterschiedlicher Strompreiskurven zeigte.²⁷⁸

8.2 Limitationen

Aufgrund des breiten Themenspektrums zur Planung eines E-Depots wurden bei der Entwicklung der Methodik Abwägungen bezüglich des Detaillierungsgrades getroffen. Hieraus ergeben sich Limitationen, die Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können und im Folgenden erläutert werden.

Mit der entwickelten Methodik können eine Vielzahl an Konfigurationen eines E-Depots simuliert und bewertet werden.²⁷⁹ Zudem stehen für zwei relevante Planungsaspekte, wie der Auslegung des Netzanschlusses und der Abstellanlage, Optimierungsoptionen zur Verfügung. Es ist allerdings nicht möglich die optimale Konfiguration zu ermitteln, d. h. als eigenständiges Optimierungsproblem, um z. B. Größe und Kapazität der benötigten Service- und Stauflächen zu bestimmen oder das E-Depot nach wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen auszulegen.

Für das Lade- und Lastmanagement wurde ein heuristischer Algorithmus²⁸⁰ entwickelt. Heuristische Ansätze können zwar schnell hinreichend gute Lösungen finden, sie sind allerdings keine Garantie für eine optimale Lösung. Somit ist es durchaus möglich, dass andere Verfahren für ein Lade- und Lastmanagement weitere Lösungen mit einer noch niedrigeren Gesamtleistungsgrenze finden. In der Fallstudie sind jedoch die unflexiblen Ladeprozesse am Nachmittag ausschlaggebend für die Gesamtleistungsgrenze.²⁸¹ Daher wird davon ausgegangen, dass kaum eine weitere Reduzierung möglich ist. Bei anderen Fallstudien ist allerdings hierauf zu achten. Das absolute Minimum für den Netzanschluss ist nicht planungsrelevant, da zusätzlich Sicherheiten zu berücksichtigen sind, um sich nicht für andere zukünftige Szenarien zu beschränken.

Der entwickelte genetische Algorithmus zur Auslegung eines Depotlayouts²⁸² findet zahlreiche zulässige Lösungen und dementsprechend ist die pareto-optimale Menge groß. Diese Lösungen müssen gesondert betrachtet und bewertet werden, da zwischen Stellplatzkapazität und Flexibilitätsgrad abzuwägen ist. Weiterhin benötigt der Algorithmus die Vorgabe einer rechteckigen Fläche²⁸³, was die Anwendbarkeit in der

²⁷⁸Siehe Abschnitt 7.4.

²⁷⁹Siehe Abb. 4.8.

²⁸⁰Siehe Abschnitt 5.4.

²⁸¹Siehe S. 118.

²⁸²Siehe Abschnitt 5.5.

²⁸³Siehe S. 84.

Praxis einschränkt. Die Parameter des genetischen Algorithmus wurden experimentell bestimmt. Durch die Anwendung von Methoden zur Ermittlung der Parameter (z. B. Parameter Tuning) kann die Performance des Algorithmus verbessert werden.

Die Abstell- und Dispositionsstrategie *Smart*²⁸⁴ beinhaltet im Kern ein Scoring-Modell. Hierfür wurden die Gewichtungen der Bewertungskriterien mit einem paarweisen Vergleich ermittelt. Eine Änderung der Gewichtungen könnte zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, was zu überprüfen ist.

Durch die Vorgabe der Ankunftszeiten und Ladezustände der ankommenden Fahrzeuge in einem statischen Umlaufplan²⁸⁵ ist die Simulation deterministisch. Jedoch können sich diese Daten betriebsbedingt oder durch Wettereinflüsse ändern und somit Auswirkungen auf den Depotbetrieb haben. Diese stochastischen Einflussgrößen wurden noch nicht berücksichtigt, die Auswirkungen können allerdings mit dem Modell untersucht werden.

²⁸⁴Siehe Abschnitt 5.3.

²⁸⁵Siehe Unterabschnitt 5.2.1.

9 Fazit

9.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Verkehrsunternehmen befinden sich aktuell im Spannungsfeld einer zügigen Einführung von elektrischen Stadtbussen zur Erreichung von umwelt- und klimapolitischen Zielen, der gleichzeitigen Realisierung von notwendiger Infrastruktur und der Umstellung von Betriebsprozessen. Hinzu kommt, dass Unsicherheiten bezüglich geeigneter Technologieoptionen bestehen und die Auswirkungen dieser Technologien auf einen Depotbetrieb unklar sind. Angesichts der Tatsache, dass die Planung von Depots für elektrische Busse bis jetzt nur punktuell methodisch unterstützt wurde, war das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methodik zur Planung und Evaluation von elektrischen Depots, um Busbetreiber im Planungsprozess zu unterstützen und eine zügige Realisierung zu ermöglichen.

In Kapitel 3 wurden aus diesem Ziel folgende Forschungsfragen abgeleitet:

- Welche grundsätzlichen Auswirkungen hat die Elektrifizierung von Stadtbussen auf den Betrieb von Depots?
- Wie können relevante Elemente und Funktionen eines elektrischen Busdepots abgebildet werden, um Betreiber bei der Planung zu unterstützen?
- Wie können Konzepte für elektrische Busdepots entwickelt und evaluiert werden, sodass sie als Planungsgrundlage genutzt werden können?

Diese Forschungsfragen wurden im Laufe der Arbeit durch Analyse des Depotbetriebs (Kapitel 4), die Abbildung der dynamischen Zusammenhänge in einem diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells (Kapitel 5) und dessen Anwendung in einer Fallstudie (Kapitel 7) beantwortet und werden im Folgenden zusammengefasst erläutert.

Zunächst wurden in Kapitel 4 aus den Betreiberanforderungen und dem ermittelten Forschungsbedarf die Anforderungen an das Modell definiert. Weiterhin wurde das System Stadtbusdepot analysiert und relevante Merkmale und Wirkungszusammenhänge eines Depotbetriebs ermittelt. Es wurden Betriebsabläufe bei Busbetreibern identifiziert und Integrationsmöglichkeiten der erforderlichen Ladeinfrastruktur

aufgezeigt. Das Ergebnis der Systemanalyse war ein nicht ausführbares Konzeptmodell, das durch einen modularen Ansatz eine individuelle Konfiguration eines elektrischen Busdepots ermöglicht und somit eine Vielzahl von Planungsszenarien abbilden kann.

Dieses Konzeptmodell bildet die Grundlage für die Modellentwicklung in Kapitel 5. Der Kern des Modells besteht aus der Steuerung des Betriebsablaufs eines elektrischen Depots, in dem ankommende Fahrzeuge aufgrund von Service- und Energiebedarf an der sofortigen Zuweisung zu einem neuen Umlauf gehindert werden. Je nach Status und vorgesehenen Abläufen wird das Fahrzeug nacheinander auf verschiedenen Flächen abgestellt, um Prozesse (z. B. Laden und Reinigen) durchzuführen, die wiederum kapazitätsbeschränkte Ressourcen (z. B. Ladeinfrastruktur und Mitarbeiter) benötigen. Ein wichtiger Bestandteil des Modells sind die Steuerungs- und Optimierungsalgorithmen für das Abstellen und Disponieren der Fahrzeuge zur effizienten Nutzung einer Abstellanlage, für das Lade- und Lastmanagement zur Auslegung des Netzanschlusses und für die Konfiguration der Abstellflächen zur Festlegung geeigneter Abstellordnungen. Zusätzlich ist eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt worden, um das Simulationsmodell bedienbar zu machen, Layouts von Depots zu konfigurieren und den Simulationsverlauf nachzuvollziehen.

In Kapitel 6 wurden die angewandten Methoden zur Verifikation und Validierung vorgestellt. Hauptbestandteil ist das Monitoring von Zustandsgrößen und Variablen zur Ermittlung quantitativer Indikatoren, um die Nachvollziehbarkeit und Plausibilität der Simulationsergebnisse zu gewährleisten und die Leistungsfähigkeit eines elektrischen Depots zu beurteilen.

Die Anwendung der Methodik zur Planung und Evaluation eines elektrischen Busdepots wurde anhand eines realen Fallbeispiels in Kapitel 7 demonstriert. Für ein Busnetz aus 39 Linien wurde schrittweise eine Planungsgrundlage für das zukünftige elektrische Busdepot erarbeitet. Auf 25 Linien sollen 12m Standard-Busse mit einer Auflademöglichkeit im Depot fahren. Auf den anderen 14 Linien mit dichteren Taktzeiten und höherem Fahrgastaufkommen sollen 18m Gelenkbusse eingesetzt werden, die überwiegend an Endhaltestellen laden, aber auch zusätzlich im Depot. Zunächst wurde das Depotlayout simulationsbasiert ausgelegt und das Mengengerüst für den Fahrzeug-, Stellplatz- und Ladeinfrastrukturbedarf bestimmt. Das Depotlayout besteht aus einer Abstellanlage, Serviceplätzen und einer Staufläche für ankommende Busse. Die Abstellanlage hat für beide Bustypen einen Flächenbedarf von $107,9\text{m}^2/\text{Bus}$ und ist eine Kombination aus Blockabstellung und Schrägabstellung in Einzelreihe. Durch die gemischte Abstellordnung konnte ein Kompromiss zwischen Stellplatzkapazität und Flexibilitätsgrad gefunden werden. Die Servicekapazität und

die Anzahl an Stellplätzen der Staufläche bedingen sich gegenseitig. Anhand der Serviceauslastung und der Stautenstehung wurden für die Fallstudie 6 Serviceplätze und 24 Stellplätze auf der Staufläche vorgesehen. Zur Erfüllung des Umlaufplans werden insgesamt 258 elektrische Busse benötigt, 106 Standard-Busse und 152 Gelenkbusse. Im Depot benötigen die Standard-Busse 94 Abstellplätze mit je einem Ladepunkt und einer Ladeleistung von 150 kW, die Gelenkbusse 147 Abstellplätze mit je 75 kW. Mit dem Einsatz eines Lade- und Lastmanagements konnte die Lastspitze des Lastprofils im Vergleich zum nicht gesteuertem Laden um 26,6 % gesenkt werden. Darüber hinaus konnte die Ladeflexibilität aufgrund längerer Standzeiten der Busse genutzt werden, um Ladeprozesse zwischen 18:00 und 00:00 Uhr in üblicherweise günstigere Zeitintervalle zwischen 00:00 und 06:00 Uhr zu verschieben. Weiterhin wurde durch eine Parametervariation gezeigt, dass durch eine inhomogene Aufteilung der statischen Ladeleistung der Ladeinfrastrukturen die Summe der benötigten Leistungsmodule um ca. 30 % gesenkt werden kann. Ebenso bieten mobile Servicekonzepte Einsparpotentiale bei der Anzahl an Stellplätzen der Staufläche und des Fahrzeugsbedarfs durch einen effizienteren Depotbetrieb.

In Kapitel 8 wurden die erlangten Ergebnisse in Bezug zu den Forschungsfragen der Arbeit diskutiert. Daraus ergaben sich Schlussfolgerungen für die Planung und Realisierung von elektrischen Busdepots, die folgend zusammengefasst werden:

- Es besteht eine enge Wechselwirkung zwischen dem Depotbetrieb mit der Umlaufplanung und der Ladestrategie(n). Daher muss die Festlegung der Ladestrategie und die Umlaufplanung Hand in Hand mit der Planung eines elektrischen Depots erfolgen.
- Der Service, insbesondere die Innenreinigung und Versorgung mit Betriebsmitteln, kann bei zu geringer Kapazität zu einem Flaschenhals im Betriebsablauf im Depot werden. Eine Änderung des Betriebsablaufs mit mobiler Reinigung am Abstellplatz bietet Vorteile, allerdings ist der Koordinierungsaufwand höher.
- Die Ladestrategien Gelegenheitsladen und Laden im Depot ergänzen sich bezüglich des Leistungs- und Energiebedarfs im Depot und sind u. a. sinnvoll bei begrenzter Netzanschlussmöglichkeit.
- Durch Einführung eines Lade- und Lastmanagements können die Kosten verringert werden, insbesondere durch die Reduzierung des erforderlichen Netzanschlusses.
- Die meist unflexiblen Ladevorgänge während des Tages im Depot bestimmen den minimal erforderlichen Netzanschluss.
- Eine gemischte Abstellordnung aus Blockabstellung und Schrägabstellung ist ein sinnvoller Kompromiss aus Stellplatzkapazität und Flexibilitätsgrad beim Abstellen und Disponieren der Fahrzeuge.

- Abstell- und Dispositionsstrategien, die den Status von Fahrzeugen, Ladeinfrastrukturen und Stellplätzen berücksichtigen, sind besonders für die Blockabstellung mit langen Reihen sinnvoll und sollten bei einem Depotmanagement berücksichtigt werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Ziel der Arbeit mit der Entwicklung einer Methodik zur Planung und Evaluation von Depot für elektrische Busse erreicht und die drei Forschungsfragen beantwortet wurden. Um eine zukunftssichere Planungsgrundlage zu schaffen sind detaillierte, individuelle Untersuchungen von möglichen Szenarien für ein elektrisches Depot notwendig. Hierfür ist die entwickelte Methodik dieser Arbeit eine hilfreiche Planungsunterstützung für Flottenbetreiber. Darüber hinaus kann die Methodik auch für andere ähnliche Anwendungsfälle, z. B. in der Logistik oder im Wirtschaftsverkehr genutzt werden.

9.2 Ausblick

Die entwickelte Methodik bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Vertiefung und Erweiterung der Forschungsarbeiten, auf die Wichtigsten wird im Folgenden eingegangen.

Die Option eine Vielzahl an Konfigurationen eines elektrischen Depots zu analysieren, deckt zwar zahlreiche Planungsszenarien ab, allerdings erschwert es die Festlegung auf ein optimales Depotkonzept. In diesem Zusammenhang wäre es lohnenswert zu untersuchen, ob es möglich ist, ein Depot anhand von wirtschaftlichen Kennzahlen (z. B. *Total Cost of Ownership*) gesamtheitlich zu optimieren. Hierin besteht die Herausforderung die relevanten Depotelemente monetär zu quantifizieren.

Weiterhin können die Indikatoren mit Daten zu bestehenden elektrischen Depots verglichen werden. Dies wurde aufgrund nicht zugänglicher Daten und dem Umstand, dass größere elektrische Depots in Deutschland erst am Entstehen sind, nicht durchgeführt.

Stochastische Einflüsse, wie z. B. Verspätungen ankommender Fahrzeuge oder Temperaturschwankungen wurden in der Arbeit nicht berücksichtigt. Somit stellt sich die Frage, welchen Einfluss diese auf einen Depotbetrieb haben können. Eine Erweiterung des diskreten, ereignisorientierten Simulationsmodells mit Zufallsvariablen ist prinzipiell möglich.

Die heuristischen Algorithmen für die Abstell- und Dispositionsstrategien, das Lade- und Lastmanagement und die Konfiguration der Abstellflächen können weiterentwickelt werden, um deren Leistungsfähigkeit zu erhöhen und deren Funktionsumfang

zu erweitern. Heuristische Ansätze können zwar schnell hinreichend gute Lösungen finden, sie sind allerdings keine Garantie für eine optimale Lösung. Hier wäre es denkbar, die entwickelten Algorithmen durch exakte Optimierungsverfahren zu ersetzen oder deren Güte zu beurteilen.

Literaturverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien e.V.** (2021). *Funktionsweise der Stromversorgung*. Zugriff am 03.02.2021 unter <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/funktionsweise-der-stromversorgung>
- Ahmad, F., Saad Alam, M., Saad Alsaidan, I. & Shariff, S. M.** (2020). Battery swapping station for electric vehicles: opportunities and challenges. *IET Smart Grid*, 3 (3), 280–286. doi:10.1049/iet-stg.2019.0059
- Amin, A., Ismail, K. & Hapid, A.** (2018). Implementation of a LiFePO₄ battery charger for cell balancing application. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 9, 81–88. doi:10.14203/j.mev.2018.v9.81-88
- Amjad, M., Ahmad, A., Rehmani, M. H. & Umer, T.** (2018). A review of EVs charging: From the perspective of energy optimization, optimization approaches, and charging techniques. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 386–417. doi:10.1016/j.trd.2018.03.006
- Anemüller, S.** (2020). Hinter den Kulissen: Wie E-Mobilität die Betriebshöfe verändert - das Beispiel der KVB. *Der Nahverkehr, Elektrobus-Spezial 2020*.
- ASIM Fachgruppe 4.5.6.** (1997). Leitfaden für Simulationsbenutzer in der Produktion und Logistik. In *ASIM-Mitteilungen*.
- Baudach, J., Voll, R., Eufinger, L., Meier, F., Sender, J., Goedicke, I. & Thaller, C.** (2013). Modellentwicklung. In U. Clausen & C. Geiger (Hrsg.), *Verkehrs- und Transportlogistik* (S. 327–403). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-540-34299-1_21
- Bauer, H.** (2020). Kostensenkung durch aktives Management der Ladevorgänge. *Der Nahverkehr, Elektrobus-Spezial 2020*.
- Bloomberg New Energy Finance.** (2018). *Electric buses in cities: Driving towards cleaner air and lower CO₂* (tech. Bericht). Zugriff am 07.08.2020 unter <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>
- Bloomberg New Energy Finance.** (2019). *Electric Transport Revolution Set To Spread Rapidly Into Light and Medium Commercial Vehicle Market*. Zugriff am 25.03.2021 unter <https://about.bnef.com/blog/electric-transport-revolution-set-spread-rapidly-light-medium-commercial-vehicle-market/>
- Bober, B.** (2020). *Entwicklung und Implementation eines Algorithmus zur intelligenten Disposition von elektrischen Busflotten* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Boev, P., Lauth, E. & Göhlich, D.** (2020). *Whitepaper: Betriebshöfe der Zukunft: Hauptaspekte bei der Umstellung auf Elektrofahrzeuge* (tech. Bericht). Zugriff am 01.03.2021 unter <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/solutions/emobility/smartdepot.html>

- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.** (2019a). *Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung* (2. Aufl.; tech. Bericht). Zugriff am 29.10.2020 unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.** (2019b). *Nationales Luftreinhalteprogramm der Bundesrepublik Deutschland* (tech. Bericht). Zugriff am 29.03.2021 unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/luftreinhalteprogramm_bericht_bf.pdf
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.** (2019). *Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende. Die Energie der Zukunft. Berichtsjahr 2017*. Zugriff am 17.09.2020 unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.html>
- Bundesnetzagentur** (Hrsg.). (2018). *EEG in Zahlen 2018*. Zugriff am 08.10.2020 unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEGinZahlen_2018_BF.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen & Bundeskartellamt** (Hrsg.). (2020). *Monitoringbericht 2019* (tech. Bericht). Zugriff am 23.09.2020 unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/Monitoring/monitoring-node.html
- Bundestag.** (2019). *Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften*.
- Burmeister, J.** (2021). Große Förderung und viele Aufträge: Übersicht über bestellte und gelieferte E-Busse in Deutschland. *Der Nahverkehr, Elektrobus-Spezial 2021*.
- C40 Cities.** (2020). *Green and Healthy Streets: Fossil-Fuel-Free Streets Declaration - Planned Actions to Deliver Commitments*. Zugriff am 22.10.2020 unter <https://www.c40.org/other/green-and-healthy-streets>
- Chen, J. H. & Hesse, D.** (2021 (noch nicht veröffentlicht)). *Abschlussbericht der Berliner Verkehrsbetriebe für das Themenfeld 4 Bus- und Wirtschaftsverkehr des Forschungscampus Mobility2Grid* (tech. Bericht).
- Clairand, J.-M., Guerra-Terán, P., Serrano-Guerrero, X., González-Rodríguez, M. & Escrivá-Escrivá, G.** (2019). Electric Vehicles for Public Transportation in Power Systems: A Review of Methodologies. *Energies*, 12 (16), 3114. doi:10.3390/en12163114
- COS GmbH.** (2020). *Betriebshofmanagement*. Zugriff am 05.03.2020 unter <https://www.cosonline.de/cosware-von-a-bis-z/betriebshofmanagement>
- Czuchra, W.** (2010). *UML in logistischen Prozessen: Graphische Sprache zur Modellierung der Systeme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8348-9698-8
- Detzler, S. K.** (2017). *Lademanagement für Elektrofahrzeuge*. KIT Scientific Publishing. doi:10.5445/KSP/1000057827
- Dietmannsberger, M., Meyer, M., Schumann, M. & Schulz, D.** (2016).

- Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg* (tech. Bericht). Zugriff am 21.01.2021 unter <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2017/3156/>
- Dietmannsberger, M., Schumann, M., Meyer, M. & Schulz, D.** (2017). Modelling the Electrification of Bus Depots using Real Data: Consequences for the Distribution Grid and Operational Requirements. In *Proc. 1st E-Mobility Power System Integration Symposium*.
- Dorn, R., Schwartz, R. & Steurich, B.** (2013). Batteriemanagementsystem. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 177–187). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-30653-2_14
- Europäische Kommission.** (2019). *Der europäische Grüne Deal*. Zugriff am 29.10.2020 unter https://ec.europa.eu/info/files/communication-european-green-deal_en
- Europäisches Parlament.** (2019). *Clean-Vehicle-Richtlinie: CVD*. Zugriff am 29.10.2020 unter https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/clean-vehicles-directive_en
- Feldhusen, J., Grote, K.-H., Nagarajah, A., Pahl, G., Beitz†, W. & Wartzack, S.** (2013). Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses. In J. Feldhusen & K.-H. Grote (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre* (S. 291–409). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-29569-0_6
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.** (2020). *Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland im März 2020*. Zugriff am 10.09.2020 unter https://energy-charts.de/price_de.htm?auction=1h&year=2020&month=3
- Gallet, M., Massier, T. & Zehe, D.** (2019). Developing a Large-Scale Microscopic Model of Electric Public Bus Operation and Charging. In *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. doi:10.1109/VPPC46532.2019.8952361
- Garau, M., Hampson, G., Devlin, N., Mazzanti, N. A. & Profico, A.** (2018). Applying a Multicriteria Decision Analysis (MCDA) Approach to Elicit Stakeholders' Preferences in Italy: The Case of Obinutuzumab for Rituximab-Refractory Indolent Non-Hodgkin Lymphoma (iNHL). *PharmacoEconomics - open*, 2, 153–163. doi:10.1007/s41669-017-0048-x
- Giesen, C.** (2020). Umstellung von Busflotten von Diesel- auf E-Antrieb: Chancen und Herausforderungen am Beispiel von Wiesbaden. *Der Nahverkehr, Elektrobus-Spezial 2020*.
- Göhlich, D., Fay, T.-A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A. & Zhang, X.** (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4, e15. doi:10.1017/dsj.2018.10
- Göhlich, D., Lauth, E., Boev, P., Jaeger, F. A., Laske, A., Vogelsang, M., ... Raab, A. F.** (2021). Elektrifizierung des urbanen Bus- und Entsorgungverkehrs: Potenziale, Herausforderungen und Umsetzung. In D. Göhlich & A. F. Raab (Hrsg.), *Mobility2Grid - Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende*. Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-62629-0_4
- Göhlich, D. & Raab, A. F.** (Hrsg.). (2021). *Mobility2Grid - Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende*. Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-62629-0

- Grundig, C.-G.** (2018). *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen* (6., neu bearbeitete Auflage Aufl.). München: Hanser. doi:10.3139/9783446454019
- Haahr, J. o., Lusby, R. & Wagenaar, J.** (2015). A Comparison of Optimization Methods for Solving the Depot Matching and Parking Problem. *SSRN Electronic Journal*. doi:10.2139/ssrn.2675797
- Häll, C. H., Ceder, A. A., Ekström, J. & Quttineh, N.-H.** (2019). Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 23 (3), 216–230. doi:10.1080/15472450.2018.1488131
- Hamburger Hochbahn AG.** (2020). *Busbetriebshof Alsterdorf*. Zugriff am 03.09.2020 unter https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Naechster_Halt/Ausbau_und_Projekte/neuer_betriebshof_alsterdorf
- Hamdi-Dhaoui, K., Labadie, N. & Yalaoui, A.** (2012). Algorithms for the two dimensional bin packing problem with partial conflicts. *RAIRO - Operations Research*, 46 (1), 41–62. doi:10.1051/ro/2012007
- Hamdouni, M., Desaulniers, G., Marcotte, O., Soumis, F. & van Putten, M.** (2006). Dispatching Buses in a Depot Using Block Patterns. *Transportation Science*, 40 (3), 364–377. doi:10.1287/trsc.1050.0139
- Hamdouni, M., Desaulniers, G. & Soumis, F.** (2007). Parking buses in a depot using block patterns: A Benders decomposition approach for minimizing type mismatches. *Computers & Operations Research*, 34 (11), 3362–3379. doi:10.1016/j.cor.2006.02.002
- Heliox.** (2018). *Heliox's Fast Charging infrastructure powers the WORLD's largest implementation of electric buses*. Zugriff am 04.09.2020 unter <https://www.heliox.nl/news/helioxs-fast-charging-infrastructure-powers-the-worlds-largest-implementation-of-electric-buses>
- Hesse, D. & Weber, M.** (2020). #BerlinSteigtUm – Strategie zum Umstieg auf E-Mobilität: Die Elektrifizierung der Busflotte der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). *Der Nahverkehr*, 6.
- Heuell, P.** (2014). Smart Meter im intelligenten Markt. In C. Aichele & O. D. Doleski (Hrsg.), *Smart Market* (S. 529–551). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-02778-0_20
- Hoimoja, H., Rufer, A., Dziechciaruk, G. & Vezzini, A.** (2012). An ultrafast EV charging station demonstrator. In *Proc. International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. doi:10.1109/SPEEDAM.2012.6264617
- Houbbadi, A., Trigui, R., Pelissier, S., Redondo-Iglesias, E. & Bouton, T.** (2019). Optimal Scheduling to Manage an Electric Bus Fleet Overnight Charging. *Energies*, 12. doi:10.3390/en12142727
- How, D. N. T., Hannan, M. A., Hossain Lipu, M. S. & Ker, P. J.** (2019). State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Using Model-Based and Data-Driven Methods: A Review. *IEEE Access*, 7, 136116–136136. doi:10.1109/ACCESS.2019.2942213
- Hower, W.** (2019). *Informatik-Bausteine: Eine komprimierte Einführung* (1. Aufl.). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-01280-9
- Hu, J., Morais, H., Sousa, T. & Lind, M.** (2016). Electric vehicle fleet

- management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1207–1226. doi:10.1016/j.rser.2015.12.014
- IVU Traffic Technologies AG.** (2020). *IVU.suite für Elektrobusse*. Zugriff am 05.03.2020 unter https://www.ivu.de/fileadmin/ivu/pdf/aktuelles/broschueren/IVU_suite_fuer_Elektrobusse_DE.pdf
- Jaeger, F., Cremer, A., Hoffmann, A. & Held, M.** (2020). *Accelerating bus fleet electrification: Key aspects for overnight and opportunity charging* (tech. Bericht). Zugriff am 09.09.2020 unter <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7793277a-b2c6-4c01-b2ff-4ef00f4d5718/version:1589453097/white-paper-accelerating-bus-fleet-electrification.pdf>
- Jahic, A., Eskander, M. & Schulz, D.** (2019a). Bus Depot Simulator: Steady-State Python and DigSilent Co-simulation for Large-Scale Electric Bus Depots. In *NEIS 2019; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems* (S. 1–7).
- Jahic, A., Eskander, M. & Schulz, D.** (2019b). Charging Schedule for Load Peak Minimization on Large-Scale Electric Bus Depots. *Applied Sciences*, 9. doi:10.3390/app9091748
- Jahic, A., Eskander, M. & Schulz, D.** (2019c). Preemptive vs. non-preemptive charging schedule for large-scale electric bus depots. In *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)* (S. 1–5). IEEE. doi:10.1109/ISGTEurope.2019.8905633
- Jefferies, D.** (2021 (noch nicht veröffentlicht)). *Auslegung, Simulation und Optimierung elektrifizierter Stadtbussysteme* (Dissertation). Technische Universität Berlin.
- Jefferies, D. & Göhlich, D.** (2018). Integrated TCO Assessment of Bus Network Electrification Considering Rescheduling and Delays. In *Proc. International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS31)*.
- Jefferies, D. & Göhlich, D.** (2020). A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimisation. *World Electric Vehicle Journal*, 11 (3), 56. doi:10.3390/wevj11030056
- Johnson, D. S.** (1973). *Near-optimal bin packing algorithms* (Dissertation). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Kämpf, M.** (2009). *Software-Framework zur Simulationsbasierten Optimierung mit Anwendung auf Produktions- und Lagerhaltungssysteme* (1. Aufl.). Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Kasikci, I.** (2018). *Planung von Elektroanlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-56427-1
- Konstantin, P.** (2017). *Praxisbuch Energiewirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-49823-1
- Kossov, J. & Müller, A.** (2020). Das Osnabrücker E-Gefühl: Die Stadtwerke Osnabrück auf dem Weg zur größten E-Gelenkbusflotte Deutschlands. *Der Nahverkehr, Elektrobus-Spezial 2020*.
- Kramer, O.** (2017). *Genetic Algorithm Essentials* (Bd. 679). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-52156-5

- Krug, W. & Rose, O.** (2011). Optimierung. In L. März, W. Krug, O. Rose & G. Weigert (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik* (S. 21–28). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-14536-0_3
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Klawonn, F., Moewes, C. & Steinbrecher, M.** (2015a). Einleitung. In W. Bibel, R. Kruse & B. Nebel (Hrsg.), *Computational Intelligence* (S. 157–186). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-10904-2_10
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Klawonn, F., Moewes, C. & Steinbrecher, M.** (2015b). Grundlegende evolutionäre Algorithmen. In W. Bibel, R. Kruse & B. Nebel (Hrsg.), *Computational Intelligence* (S. 219–267). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-10904-2_12
- Kruse, R., Borgelt, C., Braune, C., Klawonn, F., Moewes, C. & Steinbrecher, M.** (2015c). Spezielle Anwendungen und Techniken. In W. Bibel, R. Kruse & B. Nebel (Hrsg.), *Computational Intelligence* (S. 269–286). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-10904-2_13
- Kuhn, A. & Wenzel, S.** (2008). Modellierung logistischer Systeme. In D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier & K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik* (S. 35–94). Springer. doi:10.1007/978-3-540-72929-7_2
- Kunith, A. W.** (2017). *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-19347-8
- Lajunen, A.** (2018). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of Cleaner Production*, 172, 56–67. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.066
- Lamp, P.** (2013). Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 393–415). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-30653-2_32
- Lauber, A., Sax, E. & Wiedemann, M.** (2018). Autonomous driving in public transportation depots. *ATZ worldwide*, 6, 68–71. doi:10.1007/s38311-018-0051-6
- Lauth, E., Boev, P., Göhlich, D., Ihlenburg, S., Hampel, S., Heinekamp, J. F., ... Straube, Frank, Richter, Thomas** (2021 (noch nicht veröffentlicht)). *Forschungscampus Mobility2Grid Energiewende und Elektromobilität in vernetzten und urbanen Arealen Abschlussbericht Themenfeld 4: Bus- und Wirtschaftsverkehr* (tech. Bericht).
- Lauth, E., Mundt, P. & Göhlich, D.** (2019). Simulation-based Planning of Depots for Electric Bus Fleets considering Operations and Charging Management. In *Proc. 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*. doi:10.1109/ICITE.2019.8880250
- Leuthner, S.** (2013). Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In R. Korthauer (Hrsg.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* (S. 13–19). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-30653-2_2
- Lünsdorf, O. & Scherfke, S.** (2018). *SimPy: Discrete event simulation for Python*. Zugriff am 06.08.2019 unter <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/>
- Marttunen, M., Lienert, J. & Belton, V.** (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263, 1–17. doi:10.1016/j.ejor.2017.04.041

- März, L.** (2019). Einsatzmöglichkeiten von Simulation und Optimierung in der Planung der Automobilindustrie. In G. Mayer, C. Pöge & S. Spieckermann (Hrsg.), *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie* (S. 365–377). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-59388-2_25
- März, L. & Weigert, G.** (2011). Simulationsgestützte Optimierung. In L. März, W. Krug, O. Rose & G. Weigert (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik* (S. 3–12). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-14536-0_1
- Mathieu, L.** (2018). *Electric buses arrive on time: Marketplace, economic, technology, environmental and policy perspectives for fully electric buses in the EU* (tech. Bericht). Zugriff am 26.06.2020 unter <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Electric%20buses%20arrive%20on%20time.pdf>
- Meishner, F., Satvat, B. & Sauer, D. U.** (2017). Battery Electric Buses in European Cities: Economic Comparison of Different Technological Concepts Based on Actual Demonstrations. In *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (S. 1–6). IEEE. doi:10.1109/VPPC.2017.8331012
- Meissner, A.** (2019). Depotmanagement der initperdis gewährleistet reibungslosen E-Bus-Einsatz. *Verkehr und Technik*, 12, 457–458.
- Messaoudi, B. & Oulamara, A.** (2019). Electric Bus Scheduling and Optimal Charging. In C. Paternina-Arboleda & S. Voß (Hrsg.), *Computational Logistics* (Bd. 11756). doi:10.1007/978-3-030-31140-7_15
- Mitnetz Strom.** (2019). *Technische Anschlussbedingungen MS-Netz TAB Mittelspannung*. Zugriff am 07.08.2020 unter https://www.mitnetz-strom.de/Media/docs/default-source/datei-ablage/tab-ms_tr_5-pub01-9100-00_mitnetz_strom.pdf?sfvrsn=a3eaa5f9_13
- Müller, T.** (2018). Welche Anforderungen stellen E-Busse an Betriebshöfe? *Der Nahverkehr, Sonderheft Elektrobusse 2018*.
- Mundt, P.** (2020). *Simulationsbasierte Optimierung der Parkflächenkonfiguration und Disposition in Depots für Elektrobusse* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Muth, F.** (2019). Runde Sache im Gleisdreieck: Neubau eines E-Busbetriebshofs für die Hamburger Hochbahn AG im Stadtteil Alsterdorf. *Der Nahverkehr*, 7+8.
- Next Kraftwerke.** (2020). *Besser vernetzt: Marktchancen im Virtuellen Kraftwerk – für Stromerzeuger, Stromverbraucher und Stromspeicher*. Zugriff am 02.05.2020 unter <https://www.next-kraftwerke.de/wp-content/uploads/next-kraftwerke.pdf>
- Niederhausen, H. & Burkert, A.** (2014). *Elektrischer Strom*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8348-2493-6
- PSI Transcom GmbH.** (2020). *PSIebus. Depot- und Lademanagement für Elektrobusse*. Zugriff am 09.09.2020 unter https://www.psi.de/fileadmin/files/media/PSI_Transcom/DE_Flyer_PSIebus.pdf
- PSI Transcom GmbH.** (2021). *VDV463: Intelligenter Datenaustausch zwischen Depot- und Lademanagement*. Zugriff am 15.04.2021 unter <https://www.psitrans.de/loesungen/psiebus/vdv463/>
- Raab, A. F., Lauth, E., Heinekamp, J. F., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2019). Optimizing Charging Schedules for Electric Bus Fleets Through Service-Centric

- Virtual Power Plant Operations. In *Proc. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. doi:10.1109/ITEC.2019.8790510
- Raab, A. F., Lauth, E., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2017). Implementation Schemes for Electrified Bus Fleets at Intra-Urban Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. In *Proc. International Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS30)*.
- Raab, A. F., Lauth, E., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2019). Implementation Schemes for Electric Bus Fleets at Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. *World Electric Vehicle Journal*, 10 (5). doi:10.3390/wevj10010005
- Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S.** (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-35282-2
- Regionetz GmbH.** (2019). *TAB Mittelspannung: Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz der Regionetz GmbH*. Zugriff am 07.08.2020 unter https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/TAB/TAB_Mittelspannung_Technische_Anschlussbedingungen_f%C3%BCr_den_Anschluss_an_das_Mittelspannungsnetz.pdf
- Rinaldi, M., Parisi, F., Laskaris, G., D'Ariano, A. & Viti, F.** (2018). Optimal dispatching of electric and hybrid buses subject to scheduling and charging constraints. In *Proc. 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. doi:10.1109/ITSC.2018.8569706
- Robles Mogollon, D.** (2018). *Methodische Entwicklung und Implementation eines Lademanagements für elektrische Busflotten* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Rose, O. & März, L.** (2011). Simulation. In L. März, W. Krug, O. Rose & G. Weigert (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik* (S. 13–19). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-14536-0_2
- Sassone, A., Shin, D., Bocca, A., Macii, A., Macii, E. & Poncino, M.** (2014). Modeling of the charging behavior of li-ion batteries based on manufacturer's data. In J. R. Cavallaro, T. Zhang, A. K. Jones & H. Li (Hrsg.), *Proc. of the 24th edition of the great lakes symposium on VLSI - GLSVLSI '14*. doi:10.1145/2591513.2591592
- Schenk, M., Wirth, S. & Müller, E.** (2014). *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb* (2. Aufl.). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-642-05459-4
- Schiffer, H.-W.** (2019). *Energiemarkt Deutschland*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-23024-1
- Schmidt-Curreli, J., Knebel, A. & Lawrenz, L.** (2016). *Energiewendatlas Deutschland 2030* (tech. Bericht). Zugriff am 21.05.2021 unter https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/971.EWAtlas2017_Mai17_web.pdf
- Schneider, C.** (2019). *Planung von Elektrobustlinien und ihrer Infrastruktur: Technisches Handbuch Elektrobus* (tech. Bericht). Zugriff am 20.04.2021 unter https://www.traffiq.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Vergaben/2019/traffiq_Technisches_Handbuch_Buendel_A_2019_06_28.pdf
- Schnieder, L.** (2015). *Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr*. Berlin,

- Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-46456-4
- Scholz, G.** (2016). *IT systems in public transport: Information technology for transport operators and authorities*. Heidelberg: Dpunkt.verlag.
- Stromnetz Berlin.** (2020). *Preisblatt der Stromnetz Berlin GmbH: Entgelte für den Netzzugang*. Zugriff am 09.09.2020 unter <https://www.stromnetz.berlin/globalassets/dokumente/entgelte/zugang/entgelte-01.01.2020/nne-b-2020-01.07.2020-31.12.2020.pdf>
- Stromnetz Hamburg.** (2018). *Maximale Anschlusskapazitäten*. Zugriff am 9.7.2018 unter <https://www.stromnetz.hamburg/netzanschluss/netzanschlussanfrage/>
- Tar, B. & Fayed, A.** (2016). An overview of the fundamentals of battery chargers. In *Proc. IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. doi:10.1109/MWSCAS.2016.7870048
- Tomaszewska, A., Chu, Z., Feng, X., O’Kane, S., Liu, X., Chen, J., ... Wu, B.** (2019). Lithium-ion battery fast charging: A review. *eTransportation*, 1, 100011. doi:10.1016/j.etrans.2019.100011
- Tost, M.** (2021 (noch nicht veröffentlicht)). *Abschlussbericht der Berliner Stadtreinigung für das Themenfeld 4 Bus- und Wirtschaftsverkehr des Forschungscampus Mobility2Grid* (tech. Bericht).
- Trapeze Switzerland GmbH.** (2017). *Lösungen für Betriebshof- und Flottenmanagement*. Zugriff am 05.03.2020 unter https://www.trapezegroup.de/pdf_docs/trapeze-broschuere-betriebshof-und-flottenmanagement-pitstop-08-2017.pdf
- Umweltbundesamt.** (2019). *Trendtabellen Treibhausgase 1990-2017*. Zugriff am 22.07.2019 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>
- Umweltbundesamt.** (2020). *Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück - Große Minderungen im Energiesektor, Anstieg im Gebäudesektor und Verkehr*. Zugriff am 24.03.2021 unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>
- Umweltbundesamt.** (2021). *Emissionsentwicklung 1990 - 2019 für klassische Luftschadstoffe*. Zugriff am 22.07.2019 unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>
- United Nations.** (2015). *Paris Agreement*. Zugriff am 29.10.2020 unter https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2014). *VDV-Schrift 230: Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflur-Linienbusse*.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2015). *VDV-Schrift 825: Auswirkungen alternativer Technologien im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten*.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2016a). *VDV-Schrift 260: E-Bus – Infrastruktur/Ladestellen*.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2016b). *VDV-Schrift 822: Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen*.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2019). *VDV-Schrift 801: Fahr-*

- zeugreserve in Verkehrsunternehmen.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2020a). *E-Bus-Projekte in Deutschland*. Zugriff am 01.02.2021 unter <https://www.vdv.de/e-bus-projekt.aspx>
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen.** (2020b). *VDV-Schrift 825: Auswirkungen der "Clean Vehicles Directive" im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten*.
- Verein deutscher Ingenieure.** (2014). *VDI-Richtlinie 3633 - Blatt1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen*.
- Verein deutscher Ingenieure.** (2020). *VDI-Richtlinie 3633 - Blatt12: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen*.
- Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH.** (2020). *VABdepot Betriebshof Management*. Zugriff am 05.03.2020 unter https://www.vaberlin.de/fileadmin/media/Downloads_18_DE/VABdepot_Betriebshof_Management.pdf
- Wang, G., Xie, X., Zhang, F., Liu, Y. & Zhang, D.** (2018). bCharge: Data-Driven Real-Time Charging Scheduling for Large-Scale Electric Bus Fleets. In *Proc. 39th IEEE Real-Time Systems Symposium*. doi:10.1109/RTSS.2018.00015
- Wäscher, G., Haußner, H. & Schumann, H.** (2007). An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183 (3), 1109–1130. doi:10.1016/j.ejor.2005.12.047
- Wei, Z., Li, Y., Zhang, Y. & Cai, L.** (2018). Intelligent Parking Garage EV Charging Scheduling Considering Battery Charging Characteristic. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (3), 2806–2816. doi:10.1109/TIE.2017.2740834
- Wenzel, S.** (2018). Simulation logistischer Systeme. In H. Tempelmeier (Hrsg.), *Modellierung logistischer Systeme* (S. 1–34). Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-57771-4_1
- Westnetz.** (2019). *Technische Anschlussbedingungen Mittelspannung*. Zugriff am 22.07.2020 unter <https://iam.westnetz.de/fuer-bauherren/ihr-weg-zum-netzanschluss/mittelspannung>
- Winter, T.** (1999). *Online and Real-Time Dispatching Problems* (Dissertation). Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Zangemeister, C.** (2014). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen: Teilw. zugl.: Berlin, Univ., Diss., 1970* (5., erw. Aufl.). Norderstedt: Books on Demand.
- ZeEUS.** (2017). *eBus Report 2: An updated overview of electric buses in Europe* (tech. Bericht). Zugriff am 07.08.2020 unter <https://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-ebus-report-2.pdf>

Anhang

A.1 Eigene Veröffentlichungen

- Boev, P., Lauth, E. & Göhlich, D.** (2020). *Whitepaper: Betriebshöfe der Zukunft: Hauptaspekte bei der Umstellung auf Elektrofahrzeuge* (tech. Bericht). Zugriff am 01.03.2021 unter <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/solutions/emobility/smartdepot.html>
- Göhlich, D., Fay, T.-A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A. & Zhang, X.** (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4, e15. doi:10.1017/dsj.2018.10
- Göhlich, D., Hinrichs, F. C., Hilwerling, B., Heinekamp, J. F., Bognar, K., Kaiser, F. & Lauth, E.** (2021). Verwertung, Transfer und zukünftige Herausforderungen. In D. Göhlich & A. F. Raab (Hrsg.), *Mobility2Grid - Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende*. Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-62629-0_9
- Göhlich, D., Lauth, E., Boev, P., Jaeger, F. A., Laske, A., Vogelsang, M., ... Raab, A. F.** (2021). Elektrifizierung des urbanen Bus- und Entsorgungsverkehrs: Potenziale, Herausforderungen und Umsetzung. In D. Göhlich & A. F. Raab (Hrsg.), *Mobility2Grid - Sektorenübergreifende Energie- und Verkehrswende*. Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-62629-0_4
- Karohs, K., Göhlich, D. & Lauth, E.** (2018). Research Campus Mobility2Grid: From Lab to Reality. In *Proc. 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium*.
- Lauth, E., Boev, P., Göhlich, D., Ihlenburg, S., Hampel, S., Heinekamp, J. F., ... Straube, Frank, Richter, Thomas** (2021 (noch nicht veröffentlicht)). *Forschungscampus Mobility2Grid Energiewende und Elektromobilität in vernetzten und urbanen Arealen Abschlussbericht Themenfeld 4: Bus- und Wirtschaftsverkehr* (tech. Bericht).
- Lauth, E., Mundt, P. & Göhlich, D.** (2019). Simulation-based Planning of Depots for Electric Bus Fleets considering Operations and Charging Management. In *Proc. 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering*. doi:10.1109/ICITE.2019.8880250
- Lauth, E., Raab, A. F., Teske, P., Göhlich, D. & Strunz, K.** (2018). Smart Grid Integration of Electric Buses: Implementation of a Uni- and Bidirectional Charging Infrastructure. In *Proc. International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS31)*.
- Raab, A. F., Lauth, E., Heinekamp, J. F., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2019). Optimizing Charging Schedules for Electric Bus Fleets Through Service-Centric

- Virtual Power Plant Operations. In *Proc. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. doi:10.1109/ITEC.2019.8790510
- Raab, A. F., Lauth, E., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2017). Implementation Schemes for Electrified Bus Fleets at Intra-Urban Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. In *Proc. International Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS30)*.
- Raab, A. F., Lauth, E., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2019). Implementation Schemes for Electric Bus Fleets at Depots with Optimized Energy Procurements in Virtual Power Plant Operations. *World Electric Vehicle Journal*, 10 (5). doi:10.3390/wevj10010005
- Raab, A. F., Teske, P., Lauth, E., Heinekamp, J. F., Strunz, K. & Göhlich, D.** (2019). Operational Integration of Electric Bus Fleets, Charging Process Analysis, and Field Test Results. In *Proc. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. doi:10.1109/SEST.2019.8849021

A.2 Betreute Abschlussarbeiten

Studierende haben mit deren Abschlussarbeiten maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Die Abschlussarbeiten entstanden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung. Im Folgenden sind die betreuten Abschlussarbeiten aufgelistet, die teilweise in die Dissertation eingeflossen sind.

- Bober, B.** (2020). *Entwicklung und Implementation eines Algorithmus zur intelligenten Disposition von elektrischen Busflotten* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Homann, N.** (2020). *Wirtschaftlicher Vergleich von Ladeinfrastrukturkonzepten für elektrische Flotten in Depots* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Katz, J.** (2018). *Ermittlung des realen Energieverbrauchs eines Plug-in-Hybrid* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Köppel, A.** (2019). *Infrastrukturbasierende Lösungselemente für den individuellen öffentlichen Nahverkehr und ihre Geschäftspotentiale* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Kücholl, C.** (2018). *Methodische Entwicklung und Bewertung von Ladeinfrastrukturkonzepten für eine elektrische Flotte der Berliner Feuerwehr* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Lapa Pereira, L.** (2018). *Methodische Entwicklung und Bewertung von Ladekonzepten für autonom und elektrisch betriebene Kleinbusse* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Mercan, A. & Tetik, S.** (2017). *Fahrprofilerhebung und Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs eines Mitsubishi Outlander PHEV im innerstädtischen Verkehr* (Projektarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Mundt, P.** (2020). *Simulationsbasierte Optimierung der Parkflächenkonfiguration und Disposition in Depots für Elektrobusse* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Pandiyan, K.** (2019). *Analysis of vehicle-to-grid solutions for an electric bus depot: Evaluation of the environmental externality with LCA modelling* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Robles Mogollon, D.** (2018). *Methodische Entwicklung und Implementation eines Lademanagements für elektrische Busflotten* (Bachelorarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.
- Ruf, M.** (2017). *Untersuchung und Evaluation der Schallimmissionen elektrifizierter Nutzfahrzeuge im öffentlichen Personennahverkehr* (Masterarbeit). Technische Universität Berlin, Berlin.

A.3 Netznutzungsentgelte

Tabelle A.1: Netzentgelte in 2020 für Benutzungsdauer < 2.500 h/a²⁸⁶

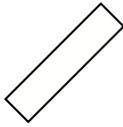
Benutzungsdauer < 2.500 h/a	Jahresleistungspreis		Arbeitspreis	
	[EUR/kW*a]		[ct/kWh]	
Entnahmespannungsebene:	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Hochspannung	2,41	2,80	3,01	3,49
Umspannung Hoch-/Mittelspannung	3,05	3,54	3,53	4,09
Mittelspannung	3,96	4,59	3,63	4,21
Umspannung Mittel-/Niederspannung	4,55	5,28	4,20	4,87
Niederspannung	5,78	6,70	5,07	5,88

Tabelle A.2: Netzentgelte in 2020 für Benutzungsdauer ≥ 2.500 h/a²⁸⁷

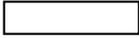
Benutzungsdauer ≥ 2.500 h/a	Jahresleistungspreis		Arbeitspreis	
	[EUR/kW*a]		[ct/kWh]	
Entnahmespannungsebene:	Netto	Brutto	Netto	Brutto
Hochspannung	60,50	70,18	0,68	0,79
Umspannung Hoch-/Mittelspannung	66,82	77,51	0,98	1,14
Mittelspannung	53,53	62,09	1,65	1,91
Umspannung Mittel-/Niederspannung	62,42	72,41	1,88	2,18
Niederspannung	69,87	81,05	2,50	2,90

²⁸⁶vgl. Stromnetz Berlin (2020, S. 1).²⁸⁷vgl. Stromnetz Berlin (2020, S. 1).

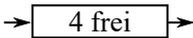
A.4 Legende Abstell- und Dispositionsstrategie



freier Schrägstellplatz



freier Blockstellplatz



4 freie aufeinanderfolgende Blockstellplätze mit Anfang und Ende des Blocks



3 Blockstellplätze mit je einem Fahrzeug des Typs SB



abzustellendes Fahrzeug des Typs AB



zu bewertende Stellplatzalternative Nr. 1



zu bewertende Fahrzeugalternative Nr. 1



150 kW

belegter Schrägstellplatz mit einer Ladeschnittstelle mit 150 kW maximaler Leistung



rfd: 2 h

Blockstellplatz mit Fahrzeug des Typs AB, das in 2 Stunden abfahrbereit sein wird

Abb. A.1: Legende Abstell- und Dispositionsstrategie²⁸⁸

²⁸⁸Mundt (2020, S. 25).

A.5 Paarweiser Vergleich

Tabelle A.3: Punktevergabe zur Beurteilung der Wichtigkeit zweier Kriterien K_1 und K_2

Wertung	Punkte	
	K_1	K_2
K_1 ist deutlich wichtiger als K_2	4	0
K_1 ist wichtiger als K_2	3	1
K_1 und K_2 sind gleich wichtig	2	2

Tabelle A.4: Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Abstimmung von Enrico Lauth

Kriterien	BufferPark	TypestackPark	RfdDiffParkPos	RfdDiffParkNeg	AvailablePower	EmptySlotsExitPark	Summe	Gewicht (gerundet)	Rang
BufferPark	2	4	4	4	4	4	22	0,3056	1
TypestackPark	0	2	4	1	4	2	13	0,1806	3
RfdDiffParkPos	0	0	2	2	4	0	8	0,1111	5
RfdDiffParkNeg	0	3	2	2	4	2	13	0,1806	3
AvailablePower	0	0	0	0	2	0	2	0,0278	6
EmptySlotsExitPark	0	2	4	2	4	2	14	0,1944	2
Summe							72	1	

Tabelle A.5: Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Abstellung von Patrick Mundt²⁸⁹

Kriterien	BufferPark	TypestackPark	RfdDiffParkPos	RfdDiffParkNeg	AvailablePower	EmptySlotsExitPark	Summe	Gewicht (gerundet)	Rang
BufferPark	2	4	4	4	4	4	22	0,3056	1
TypestackPark	0	2	4	0	4	3	13	0,1806	3
RfdDiffParkPos	0	0	2	2	4	0	8	0,1111	5
RfdDiffParkNeg	0	4	2	2	4	4	16	0,2222	2
AvailablePower	0	0	0	0	2	0	2	0,0278	6
EmptySlotsExitPark	0	1	4	0	4	2	11	0,1528	4
Summe							72	1	

Tabelle A.6: Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Disposition von Enrico Lauth

Kriterien	BufferDispatch	TypestackDispatch	RfdDiffDispatch	AvailablePower	EmptySlotsExitDispatch	Summe	Gewicht (gerundet)	Rang
BufferDispatch	2	2	2	2	2	10	0,20	4
TypestackDispatch	2	2	4	4	2	14	0,28	1
RfdDiffDispatch	2	0	2	4	3	11	0,22	2
AvailablePower	2	0	0	2	0	4	0,08	5
EmptySlotsExitDispatch	2	2	1	4	2	11	0,22	2
Summe						50	1	

²⁸⁹Mundt (2020, S. 38).

Tabelle A.7: Präferenzmatrix und Gewichtung für Kriterien bei Disposition von Patrick Mundt²⁹⁰

Kriterien	BufferDispatch	TypestackDispatch	RfdDiffDispatch	AvailablePower	EmptySlotsExitDispatch	Summe	Gewicht (gerundet)	Rang
BufferDispatch	2	0	0	4	4	10	0,20	3
TypestackDispatch	4	2	4	4	4	18	0,36	1
RfdDiffDispatch	4	0	2	4	4	14	0,28	2
AvailablePower	0	0	0	2	0	2	0,04	5
EmptySlotsExitDispatch	0	0	0	4	2	6	0,12	4
Summe						50	1	

²⁹⁰Mundt (2020, S. 39).

A.6 Parameter und Ergebnisse des genetischen Algorithmus zur Konfiguration der Abstellflächen

Tabelle A.8: Parameter des genetisches Algorithmus

Bez.	Wert		Kurzbeschreibung
	SB	AB	
G	1000	1500	Anzahl Generationen
N	50	80	Populationsgröße
p_{cx}	0,5		Wahrscheinlichkeit für Rekombination
p_{mut}	0,5		Wahrscheinlichkeit für Mutation
$p_{mut,n}$	$\frac{1}{3}$		Wahrscheinlichkeit für Mutation von n
$p_{mut,c}$	$\frac{1}{3}$		Wahrscheinlichkeit für Mutation von c_i
$p_{mut,t}$	$\frac{1}{3}$		Wahrscheinlichkeit für Mutation von t_i
σ_n	2		Standardabweichung für normalverteilte Mutation von n
σ_c	2		Standardabweichung für normalverteilte Mutation von c_i
p_{split}	0,4		Wahrscheinlichkeit für Mutation von t_i mit eventueller Spaltung

Tabelle A.9: Geometrische Parameter der Abstellfläche und Abstellordnungen²⁹¹

Bez.	Wert		Kurzbeschreibung
	SB	AB	
a	47 m	86 m	Breite der Abstellfläche/Abstellordnung
b	208 m		Länge der Abstellfläche/Abstellordnung
n	3,55 m		Breite des Fahrzeugs mit Sicherheitsabstand
m	12,5 m	18,5 m	Länge des Fahrzeugs mit Sicherheitsabstand
$e_{a,B}$	8 m		Fahrweg am Rand der Abstellfläche (Breite)
$e_{b,B}$	8 m		Fahrweg am Rand der Abstellfläche (Länge)
$e_{b,l}$	19,25 m		Fahrweg am Rand der Abstellordnung L
$e_{a,dsr}$	8 m	10 m	Fahrweg am Rand der Abstellordnung DSR
$e_{a,ddr}$	8 m	10 m	Fahrweg am Rand der Abstellordnung DDR
α	45°		Winkel der Abstellordnungen DSR und DDR

²⁹¹Orientiert an Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2016b, S. 45 ff.).

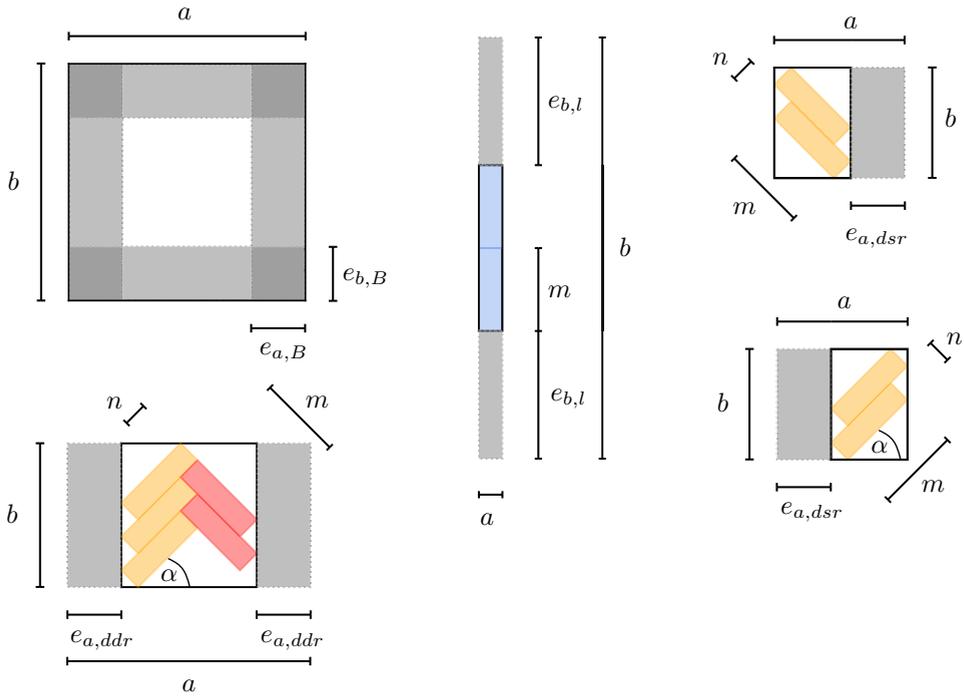


Abb. A.2: Geometrische Parameter der Abstellfläche und Abstellordnungen²⁹²

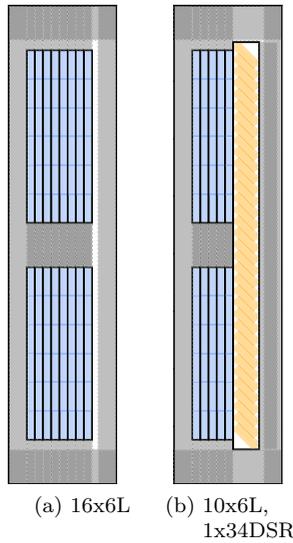


Abb. A.3: Weitere Konfigurationen für SB-Abstellanlage

²⁹²Nach Mundt (2020, S. 51 f.).

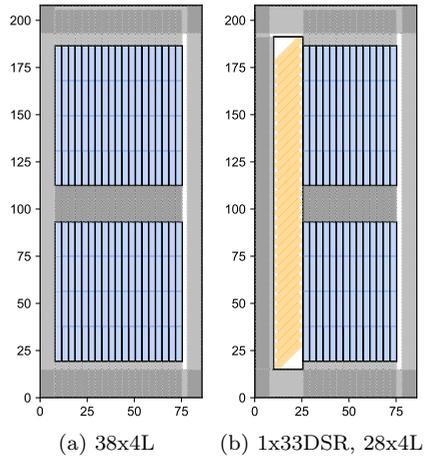


Abb. A.4: Weitere Konfigurationen für AB-Abstellanlage