



UNIVERSITÄT PADERBORN

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Department 3: Wirtschaftsinformatik

Simulation und Optimierung der Standort- und Kapazitätsauswahl in der Planung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten

Dissertation
zur Erlangung der Würde eines
DOKTORS DER WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN
(Dr. rer. pol.)
der Universität Paderborn

vorgelegt von

Kostja Siefen
Pohlweg 74
33098 Paderborn

Paderborn, Juli 2012

Erstprüferin: Prof. Dr. Leena Suhl
Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Johann-Friedrich Luy

Vorwort und Danksagung

An der Entstehung und dem erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit waren viele Menschen beteiligt. Zu Beginn meiner Promotionszeit habe ich häufig Danksagungen in wissenschaftlichen Arbeiten als pathetisch und überzogen empfunden. Ich habe gelernt, dass längerfristige wissenschaftliche Arbeit an aktuellen praxisnahen Themen nur funktioniert, wenn man auf eine politische, organisatorische und persönliche Unterstützung von Menschen zählen kann. Diese Seite gibt mir die Möglichkeit, meine Dankbarkeit gegenüber diesen Menschen zum Ausdruck zu bringen.

Meine Arbeit entstand im Rahmen einer Kooperation zwischen der International Graduate School *Dynamic Intelligent Systems*, dem Decision Support und Operations Research Lab (Universität Paderborn) und dem Forschungszentrum der Daimler AG in Ulm. Ich bin dankbar, dass mir die Gründer dieser Kooperation eine so abwechslungs- und lehrreiche Mischung aus praktischer und akademischer Arbeit ermöglicht haben.

Auf akademischer Seite geht mein größter Dank an meine Betreuerin *Prof. Dr. Leena Suhl* vom DS&OR Lab der Universität Paderborn. Sie hat sich fortwährend für mich eingesetzt und damit erst die Rahmenbedingungen für die Promotion geschaffen. Ihre positive Ausstrahlung und wohlwollend, konstruktive Art fördert eine überaus angenehme und kreative Arbeitsatmosphäre am gesamten Lehrstuhl.

Mein besonderer Dank auf Seiten der Daimler AG (Forschungszentrum Ulm) geht an *Joanna Schyroki*. Ihrem Einsatz verdanke ich die Überwindung vieler organisatorischer Hürden in vertrauensvoller Zusammenarbeit. Für die Unterstützung beim Aufsetzen meines Forschungsgebiets danke ich *Dr. Gerhard Jünemann* und *Dr. Thomas Sommer-Dittrich*. Im Rahmen einer internen Reorganisation wurde mein Team zwischenzeitlich einer neuen Direktion zugewiesen. Auch dort konnte ich mich auf die Unterstützung meines Abteilungsleiters *Prof. Dr.-Ing. Johann-Friedrich Luy* und meines Teamleiters *Dr. Andreas Schütte* verlassen. Ein großes Dankeschön geht an *Rainer Becker* (car2go) und *Stephanie Süß* (Daimler AG, Bereich Business Innovation) für die spannende Projektarbeit.

Einige Ideen dieser Arbeit sind im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten entstanden und durch anregende Diskussionen gereift. Mein Dank geht hier insbesondere an *Antje Tiefenbach* (Daimler AG) sowie *Simon Gurcke* und *Marius Merschformann* (DS&OR Lab) für ihre kreative Unterstützung.

Ich danke meiner Familie für die liebevolle Begleitung auf dem steinigen Weg der Promotion. Ich glaube nicht, dass ich ohne euch die schwierige Phase dieser Arbeit alleine hätte bewältigen können.

Paderborn im Juli 2012,
Kostja Siefen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Die Renaissance batterieelektrischer Mobilität	1
1.2	Ökonomische und technische Herausforderungen	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
1.4	Mathematische Notation	6
2	Planung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten	7
2.1	Betrachtungsgegenstand	7
2.1.1	Gewerbliche Fahrzeugflotten im Großstadtverkehr	8
2.1.2	Abgrenzung von Elektrofahrzeugen	9
2.1.3	Batterieelektrische Fahrzeuge im Flottenbetrieb	12
2.2	Ladeinfrastruktur zur Versorgung batterieelektrischer Flottenfahrzeuge . .	14
2.2.1	Rollen der beteiligten Unternehmen	14
2.2.2	Komponenten und Konzepte	16
2.2.3	Der Fahrzeugladeprozess	19
2.3	Aufgaben und Zielsetzungen des Flotten-Betreibers	21
2.3.1	Flottenmanagement	21
2.3.2	Besonderheiten einer batterieelektrischen Flotte	22
2.3.3	Kosten der Ladeinfrastruktur	25
2.3.4	Anforderungen für den operativen Betrieb	27
2.3.5	Bewertung der Versorgungs-Qualität	28
2.3.6	Optimale Auswahl potentieller Ladestandorte	31
2.4	Entscheidungsunterstützungssysteme	32
2.4.1	Daten und Berichte	33
2.4.2	Modelle	34
2.4.3	Methoden	34
2.5	Zusammenfassung der Planungsaufgabe	36
3	Stand der Technik	37
3.1	Verkehrsflussmodelle	38
3.1.1	Modellierung der Verkehrsnachfrage	39
3.1.2	Vorgehensmodelle zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage	41

3.2	Verhaltensmodelle für Fahrzeugbewegungen	43
3.2.1	Grundlegende Modelle	44
3.2.2	Komplexe Mobilitätsmodelle	45
3.3	Simulation spezieller Aspekte von Elektromobilität	48
3.4	Optimierungsmodelle der Standortplanung	49
3.4.1	Räumliche Distanzmaße	50
3.4.2	Diskrete räumliche Abdeckungsprobleme in der Standortplanung .	52
3.4.3	Flow Intercepting Facility Location Problems (FIFLP)	55
3.4.4	Anwendungen in der Versorgungsinfrastrukturplanung	58
3.4.5	Standortplanung unter Wettbewerb	62
3.5	Analyse-Kennzahlen zur Ergebnis-Bewertung	64
3.5.1	Quantifizierung der Versorgungsqualität	64
3.5.2	Proximitätsmaße für Lösungen	66
4	Handlungsbedarf & Ziele der Arbeit	69
4.1	Kritische Würdigung bestehender Ansätze	69
4.1.1	Simulations- und Mobilitätsmodelle	69
4.1.2	Optimierungsmodelle der Standortplanung	70
4.2	Anforderungen an ein Planungsmodell	71
4.2.1	Das Straßenverkehrsnetzwerk	72
4.2.2	Einflüsse der Ladeentscheidung	72
4.2.3	Eigenschaften der Ladestandorte	73
4.2.4	Kapazitätsbestimmung von Standorten	73
4.3	Architektur des Planungssystems	75
4.4	Ziele der Arbeit	76
5	Simulation der Versorgungssituation	79
5.1	Einordnung der Methodik	79
5.2	Komponenten und Prämissen des Simulationsmodells	81
5.2.1	Hypothesen	81
5.3	Ein Mobilitätsmodell für Mobilitätsdienstleister	83
5.3.1	Annahmen des Modells	84
5.3.2	Verteilungen	85
5.3.3	Pseudozufallszahlen beliebiger Verteilungen	89
5.3.4	Klassifikation von Gebieten	90
5.3.5	Erzeugen von Bewegungsszenarien	92

5.4	Formale Beschreibung der Modellkomponenten	95
5.5	Ablauf der Simulation	98
5.6	Ergebniskennzahlen	100
6	Kostenoptimale Bestimmung der Standortkapazitäten	103
6.1	Einordnung der Methodik	103
6.2	Preprocessing	104
6.2.1	Allokation des Versorgungsbereichs	104
6.2.2	Generierung der Zeitscheiben	106
6.2.3	Bestimmung hinzugewinnbarer Reichweiten	108
6.3	Formale Beschreibung	109
6.3.1	Sequenzen	109
6.3.2	Zeitscheiben und Kapazitätsstufen	110
6.4	Basismodell	111
6.4.1	Indexmengen	111
6.4.2	Parameter	111
6.4.3	Entscheidungsvariablen	112
6.4.4	Restriktionen	112
6.4.5	Zielfunktion	114
6.5	Erweiterungen des Basismodells	114
6.5.1	Start-Konfigurationen	114
6.5.2	Gebietskapazitäten	115
6.5.3	Fehlreichweiten	115
6.5.4	Verhaltenshypothesen der Fahrzeugnutzer	117
6.5.5	Kennzahlen der Versorgungsqualität	118
6.6	Bestimmung der Komplexitätsklasse	119
6.7	Lösungsmethodik	121
6.8	Methoden zur Laufzeitverbesserung	122
6.8.1	Explizite Eröffnung von Standorten	124
6.8.2	Explizite Verwendung von Standorten	125
6.8.3	Ganzzahlige Schlupfvariablen	126
6.8.4	Schranken für die Anzahl Ladevorgänge	126
6.8.5	Hinzugewonnene Reichweite begrenzen	127
6.8.6	SOS1 Menge für die Kapazitätssauswahl	128
6.8.7	SOS1 Menge für die Standortzuordnung	128
6.8.8	Einsatz semi-kontinuierlicher Variablen	129

6.9	Reduktion der Modellkomplexität	130
6.9.1	Identifikation obligatorischer Entscheidungen	130
6.9.2	Verringerung der zeitlichen Auflösung	132
6.9.3	Reduzierung von Sequenzelementen	133
7	Heuristische Lösungsmethodik	135
7.1	Einordnung der Methodik	135
7.2	Objektorientierte Modellierung	138
7.3	Ablaufbeschreibung	141
7.4	Preprocessing	142
7.4.1	Priorisierung potentieller Standorte	143
7.4.2	Kalibrierung der Gewichte	143
7.5	Verfahrensparameter	144
7.6	Strategien zur Konstruktion gültiger Startlösungen	147
7.6.1	Greedy Strategie	147
7.6.2	Greedy-Strategie mit Priorisierung	148
7.6.3	Minimale Restreichweiten	149
7.7	Strategien zur Reparatur ungültiger Lösungen	150
7.7.1	Reparatur auftretender Fehlreichweite	151
7.7.2	Reparatur von Kapazitätsüberschreitungen	154
7.8	Strategien zur Verbesserung gültiger Lösungen	156
7.8.1	Sukzessive Reduktion von Aktivitäten	157
7.8.2	Sukzessive Elimination von Standorten	157
7.8.3	Umverteilung der Ladevorgänge	158
8	Evaluation der Methoden	161
8.1	Testinstanzen	161
8.2	Systemumgebung	162
8.2.1	Anbindung der exakten Verfahren	162
8.3	Laufzeitverhalten exakter Lösungsverfahren	163
8.4	Laufzeitverhalten des heuristischen Verfahrens	166
8.4.1	Direkter Vergleich zwischen Solver und Heuristik	166
8.4.2	Übergabe einer heuristischen Startlösung	166
8.5	Effektivität der Reformulierungen	168
8.5.1	Auswirkungen auf die Lösung der LP-Relaxation	168

8.5.2 Direkter Vergleich	171
8.6 Vergleich mit Partial Set Covering	172
8.7 Laufzeitverhalten der Simulation	173
9 Fallstudie zur Umsetzung der Planungsmethode für ein Mobilitätskonzept	175
9.1 Umfeld und Zielsetzung	175
9.2 Bestimmung der Planungsparameter	176
9.2.1 Prämissen und Verhaltenshypothesen	176
9.2.2 Ableitung von Szenarien aus den Fahrzeugbewegungen	177
9.2.3 Entwicklung des Standort-Katalogs	179
9.3 Durchführung der Planung	183
9.3.1 Bewertung der manuellen Infrastrukturplanung	183
9.3.2 Festlegung der Standorte und Konfigurationen	184
9.3.3 Sensitivität der Flottengröße	185
9.3.4 Zusammenfassung	186
10 Zusammenfassung und Ausblick	189
10.1 Zusammenfassung	189
10.2 Ausblick	190
Literatur- und Quellenverzeichnis	193
Stichwortverzeichnis	211

Abkürzungsverzeichnis

AFV	Alternative Fuel Vehicle
ANDP	Added Node Dispersion Problem
API	Application Programming Interface
BEV	Battery Electric Vehicle
BP	Binäres Programm
CAN	Controller Area Network
CFRLM	Capacitated Flow Refueling Location Model
DSM	Demand-Side Management
DSS	Decision Support System
EUS	Entscheidungsunterstützungssystem
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FCD	Floating Car Data
FCFLP	Fixed Charge Facility Location Problem
FCLM	Flow Covering Location Model
FCV	Fuel Cell Vehicle
FIFLP	Flow Intercepting Facility Location Problem
FIFO	First In First Out
FISIM	Flow Interception Spatial Interaction Model
FNP	Flächennutzungsplan
FRLM	Flow Refueling Location Model
FSM	Four Step Model
GFIM	Generalized Flow-Interception Location-Allocation Model
GIS	Geographical Information System
GPS	Global Positioning System
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IP	Integer Programming

IPM	Interior Point Method
KEP	Kurier-, Express-, Paketdienste
km	Kilometer
KPI	Key Performance Indicator
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LB	Lower Bound
LKW	Lastkraftwagen
LP	Linear Programming
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MAXCAP	Maximum Capture Location Problem
MCLP	Maximal Covering Location Problem
MCPSCP	Multiple Coverage Partial Set Covering Problem
MIP	Mixed Integer Programming
MIS	Management Information System
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NNB	Nichtnegativitätsbedingung
OOP	Objektorientierte Programmierung
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PDFD	Parking Duration Frequency Distribution
PHEV	Plugin Hybrid Electric Vehicle
PKW	Personenkraftwagen
PRNG	Pseudo-Random Number Generator
PSCP	Partial Set Covering Problem
PUP	Pickup Problem
RDMM	Random Direction Mobility Model
RFID	Radio-Frequency Identification
RHS	Right-Hand Side

RWM	Random Walk (Mobility) Model
RWMM	Random Waypoint Mobility Model
SCLP	Set Covering Location Problem
SCM	Supply Chain Management
SCP	Set Covering Problem
SOC	State of Charge
SOS1	Special Ordered Set of Type 1
SVS	Shared Vehicle System
TDRFD	Trip Distance Ratio Frequency Distribution
TOFD	Trip One-Way Frequency Distribution
TPWFD	Trips Per Weekday Frequency Distribution
TRFD	Trip Relation Frequency Distribution
TSFD	Trip Speed Frequency Distribution
TTFD	Trip Distance Frequency Distribution
TTRFD	Trip Time Ratio Frequency Distribution
UB	Upper Bound
UML	Unified Modelling Language
UTM	Universal Transverse Mercator
V2G	Vehicle-To-Grid
VANET	Vehicular Ad Hoc Network
WLP	Warehouse Location Problem
WWM	Weighted Waypoint Model

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau von Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen	10
2.2	Komponentenschema eines Fahrzeugbatteriesystems	11
2.3	Skizze der betrachteten Markttrollen	15
2.4	Konduktives und induktives Ladekonzept	17
2.5	Zusammenhangs-Schema von Ladedauer, -leistung und -zustand	18
2.6	Ablauf des Fahrzeugladeprozesses	19
2.7	Wirtschaftlichkeit eines Ladeplatzes	26
2.8	Approximative und exakte Bestimmung des Versorgungsbereichs	30
2.9	Parkflächen-Layout verschiedener Versorgungskonzepte	32
3.1	Verkehrsmodelle und Verkehrsdaten	39
3.2	Vier-Stufen-Modell der Verkehrsplanung	42
3.3	Grundlegende Bewegungsmodelle unabhängiger Objekte	44
3.4	Generische Architektur von Mobilitätsmodellen	46
4.1	Verfügbare Standorte in Abhängigkeit von der Parkposition	72
4.2	Durchschnittsbetrachtung der Standortkapazität	74
4.3	Architektur des Planungssystems	75
5.1	Ebenen einer Simulationsinstanz	82
5.2	Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Ladeentscheidung	84
5.3	Histogramm Trip Distance Frequency Distribution (Skizze)	86
5.4	Histogramm Trip Speed Frequency Distribution (Skizze)	86
5.5	Histogramm Trip Distance Ratio Frequency Distribution (Skizze)	87
5.6	Verhältnis zwischen Fahrstrecke und euklidischer Distanz	87
5.7	Histogramm Trip Relation Frequency Distribution (Skizze)	88
5.8	Histogramm Trip One-Way Frequency Distribution (Skizze)	88

5.9	Erzeugung von Pseudozufallszahlen mit dem Urnenmodell	90
5.10	Verkehrszellen und Verkehrsarten	91
5.11	Erzeugung potentieller Parkpositionen	93
5.12	Generierung eines Bewegungsszenarios	95
5.13	Kombinierte Zeitperioden der Simulation	96
5.14	Strukturdiagramm eines Simulationslaufs	99
6.1	Bestimmung der Versorgungspunkte mit Grenzlinien	105
6.2	Linearisierung	108
6.3	Schema einer Bewegungssequenz	109
6.4	Szenario mit 3 Fahrzeugen und 5 Standorten	110
6.5	Set Covering Reduktionsbeweis	120
6.6	Reduzierung der Anzahl Zeitscheiben bei Mindestkapazität	132
6.7	Verschmelzung von zwei Sequenzelementen	134
7.1	Klassenstruktur der Modellinstanzen	139
7.2	Klassenstruktur einer Modelllösung	139
7.3	Ablaufdiagramm des heuristischen Verfahrens	142
7.4	Ablaufdiagramm Reparaturzyklus	151
8.1	Zeitreihe der primalen und dualen Schranken	164
8.2	Vergleichszeitreihe zwischen Heuristik und Solver	167
8.3	Sensitivitätsanalyse PSCP	173
9.1	Illustration der Sequenz-Generierung aus Rohdaten	178
9.2	Standortkatalog via Partial Set Covering	179
9.3	Abdeckung von Parkvorgängen durch Ladestandorte	182
9.4	Mittlere realisierte Reichweite je Fahrzeug ($\hat{N} = 100$, Skizze)	183
9.5	Sensitivität der Versorgungsquote für unterschiedliche Flottengrößen	186

Tabellenverzeichnis

2.1	Kernaufgaben der verschiedenen Handlungsebenen	23
3.1	Unterschiedliche Auswahlsergebnisse eines Standort-Katalogs	66
7.1	Auswahlstrategien für Standortoptionen	145
7.2	Kennzahlen zur Priorisierung von Standorten	146
7.3	Reihenfolgestrategien bei der Entfernung von Aktivitäten	156
8.1	Kennzahlen der Testinstanzen	162
8.2	Systemumgebung der Evaluierung	163
8.3	Laufzeiten exakter Verfahren (Set 1)	165
8.4	Laufzeiten exakter Verfahren (Set 2)	165
8.5	Konfiguration der Heuristik	166
8.6	Übergabe heuristischer Startwerte (Gurobi)	169
8.7	Übergabe heuristischer Startwerte (CPLEX)	169
8.8	Lösung der LP-Relaxation (CPLEX)	170
8.9	Lösung der LP-Relaxation (Gurobi)	170
8.10	Veränderungen durch Reformulierungen	172

Algorithmenverzeichnis

1	LocationAssignment	107
2	TimeSlotReduction	133
3	TotalCosts	141
4	DetermineCapacityLevel	141
5	GreedyCharge	147
6	GreedyChargeWithRanking	148
7	MinMileage	149
8	RemainingRange	150
9	MissingRange	152
10	DropActions	155
11	EliminateLocations	157
12	DemandRedistribution	159
13	Flatten	159
14	Substitute	160

Einleitung und Motivation

Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Planung von Versorgungsstandorten für die Fahrzeuge einer Flotte von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Dieses Kapitel führt zunächst in die Thematik Elektromobilität ein und erläutert die Beweggründe für die Aufgabenstellung der Arbeit. Im Anschluss werden die Zielsetzung und die inhaltliche Gliederung der Arbeit beschrieben.

1.1 Die Renaissance batterieelektrischer Mobilität

Elektrofahrzeuge sind keine moderne Erfindung. Zur Zeit der Erfindung des Automobils waren Elektrofahrzeuge ebenso verbreitet wie Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor. Das erste batteriebetriebene Elektroauto wurde bereits 1886 in London vorgestellt. Um 1900 „gab es - vor allem in den USA - mehr Elektroautos als Autos mit Verbrennungsmotor“ ([NB89], S. 1). Aufgrund einer rasanten Verbesserung des Verbrennungsmotors, der günstigen Verfügbarkeit von Erdöl und der überlegenen Reichweite wurden Elektroautos jedoch schnell wieder verdrängt. Bis heute konnte „das Elektroauto zu keiner Zeit zum konkurrenzfähigen Funktionsäquivalent für das Benzinauto avancieren“ ([RW11], S. 37).

Mehrere Faktoren haben dazu beigetragen, dass Elektromobilität in den letzten Jahren einen neuen Aufschwung erfahren hat. Höhere Preise für Erdöl führen zu einer Steigerung der Betriebskosten durch Kraftstoff und erhöhen damit im Vergleich die Wirtschaftlichkeit alternativer Antriebe (vgl. [WFO10], S. 31). Die Verbrennung fossiler Kraftstoffe in Fahrzeugen führt zur Freisetzung von CO₂ und wirkt damit politischen Zielen des Klimaschutzes entgegen. In Deutschland werden durch den Straßenverkehr jährlich etwa 150 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen (vgl. [Umw10], S. 9); das entspricht

etwa 18% des gesamtdeutschen Ausstoßes von 865 Millionen Tonnen. Bei der Verwendung von Stromquellen aus erneuerbaren Energien können Elektrofahrzeuge nahezu emissionsfrei betrieben werden¹ und damit einen Beitrag zur Reduktion des Schadstoffausstoßes (CO₂, Lärm, Feinstaub) leisten (vgl. [Umw10], S. 54f).

Schließlich hat sich auch die Technik der Energiespeicher in den letzten 20 Jahren deutlich weiter entwickelt. Die Lithium-Ionen Batterietechnik hat Nickel-Cadmium bzw. Nickel-Methallhydrid Akkumulatoren verdrängt und bietet größere Energiedichten ohne Memory-Effekt mit hoher Zyklenstabilität bei hoher Entladetiefe (vgl. [Neu11], S. 2042f). Insbesondere für die Anwendung in batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen gibt es „keine andere Akkumulator-Technologie, welche einen annäherungsweise ähnlich guten Mix aus Energie, Leistung, Dynamik und Lebensdauer bietet“ ([WKL10], S. 18). Es wird erwartet, dass neue Technologien wie Lithium-Luft- oder Lithium-Schwefel-Akkumulatoren in naher Zukunft weitere Steigerungen der Energiedichte um den Faktor zwei bis fünf ermöglichen werden (vgl. [Neu11], S. 2042f).

Elektromobilität genießt in Deutschland eine wachsende politische Unterstützung. Die deutsche Bundesregierung hat 2011 ein eigenes Regierungsprogramm zur Förderung von Forschung & Entwicklung in den Bereichen Batterie- und Fahrzeugtechnik, Ladeinfrastruktur und Netzintegration veröffentlicht (vgl. [Deu], S. 18ff). Aktuell werden weitere politische Maßnahmen diskutiert, etwa eine Ausweitung der steuerlichen Begünstigungen², Privilegien bei der Nutzung von Fahrspuren und Parkraum sowie Subventionen auf den Kaufpreis. Der 2009 veröffentlichte *Nationale Entwicklungsplan Elektromobilität* sieht ein Ziel von einer Million zugelassenen Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 vor (vgl. [Deu09]).

Ein wachsender Markt für Elektrofahrzeuge führt auch zu neuen Herausforderungen bei den Zulieferbetrieben. Die Automobilindustrie ist heute bereits für deutsche Maschinenbauunternehmen die wichtigste direkte Abnehmerbranche (vgl. [SHH⁺11], S. 6). Insbesondere die Produktion der Kernkomponenten Batteriezelle und Elektromotor „stellt für den deutschen Maschinen- und Anlagenbauer ein erhebliches zusätzliches Geschäftspotenzial dar“ ([SHH⁺11], S. 40). Die Entwicklung der Elektromobilität führt also zur Entstehung neuer Wachstumsmärkte und bietet damit Chancen für die gesamte Volkswirtschaft.

¹ Elektrofahrzeuge fahren *lokal emissionsfrei*, d.h. der Elektromotor verursacht im Betrieb keinen CO₂-Ausstoß. Berücksichtigt man zusätzlich die Emissionen bei der Stromerzeugung, kann die CO₂-Bilanz im Vergleich zum Verbrennungsmotor deutlich schlechter sein (vgl. [Age10], S. 13).

² 2011 sind reine Elektrofahrzeuge für die ersten fünf Jahre vollständig von der Steuer befreit (§3d *KraftStG*), im Anschluss reduziert sich die anfallende Steuer um 50% (§9 *Abs. 5 KraftStG*).

1.2 Ökonomische und technische Herausforderungen

Die niedrigere Energiedichte führt durch bauartbedingte Volumen- und Gewichtsbeschränkungen batterieelektrischer Fahrzeuge zu einer deutlich reduzierten Reichweite als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bei gleichem Gewicht von Kraftstofftank und Fahrzeugbatterie wird trotz höherer Energieeffizienz nur ca. 15% der Reichweite von konventionellen Fahrzeugen erreicht (vgl. [Sch11], S. 196). Im Umkehrschluss muss also für die gleiche Distanz ca. 7x häufiger ein Versorgungspunkt aufgesucht werden.

Elektrische Energie kann im Gegensatz zu Benzin-, Diesel- oder Gaskraftstoffen durch das existierende Versorgungsnetz dezentral verteilt werden. Abhängig vom Kundenkreis lässt sich dabei die *private*, *gewerbliche* und *öffentliche* Ladeinfrastruktur unterscheiden (vgl. [Eng10], S. 3). Der überwiegende Teil deutscher Privatfahrzeuge wird auf eigenen Stellplätzen in Garagen oder an einem Haus abgestellt (vgl. [BDW09], S. 177). Diese Plätze lassen sich mit geringem Aufwand um eine Anschlussmöglichkeit (Steckdose) erweitern, so dass eine nächtliche Aufladung an einer haushaltsüblichen Steckdose erfolgen kann. Gewerbliche und öffentliche Infrastruktur steht einem größeren Nutzerkreis offen und bietet höhere Ladeleistungen bei verbrauchsabhängiger Abrechnung.

Aufgrund geringer Stückzahlen und hoher Batteriekosten liegen die Anschaffungskosten batteriebetriebener Elektrofahrzeuge auf absehbare Zeit deutlich über dem Niveau eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (vgl. [SSL11], S. 24). Im Gegensatz dazu können jedoch in den Betriebskosten erhebliche Einsparungen erzielt werden, da Energie- und Wartungskosten in deutlich geringerem Umfang anfallen (vgl. [TWJ10], S. 2). Mit Modellen wie dem Leasing der Fahrzeugbatterie (vgl. [WFO10], S. 163f) lässt sich das Investitionsrisiko bzgl. der Haltbarkeit auf einen Leasinggeber verlagern. Die Wirtschaftlichkeit eines batterieelektrischen Fahrzeugs im Vergleich zu einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor wird also grundsätzlich durch eine höhere Laufleistung gesteigert.

In Bezug auf die Entwicklung des Marktanteils elektrisch angetriebener Fahrzeuge in den nächsten Jahrzehnten existieren verschiedene Prognosen (vgl. [Pow10], [Bun10b] und [Pik11]). Die Akzeptanz dieser Fahrzeuge hängt neben ökonomischen Aspekten (vgl. [BDW09], S. 177) hauptsächlich von der Frage ab, wie schnell und flächendeckend Ladevorgänge möglich sind (vgl. [Bra08], S. 383). Investitionen in den Ausbau öffentlicher oder gewerblicher Ladeinfrastruktur unterliegen einer starken Wechselwirkung mit der Absatzentwicklung für batterieelektrische Fahrzeuge.

Dabei ist der Gesamtenergiebedarf für die Versorgung der Fahrzeuge im Vergleich zum Energiebedarf eines gesamten Landes vergleichsweise gering (vgl. [Bun10b], S. 5). Jedes Elektrofahrzeug stellt einen Speicher dar, dessen Füllgeschwindigkeit in Grenzen geregelt werden kann. Mit Konzepten zur Netzintegration (vgl. [LL11], S. 10ff) kann der Bedarf an Ladeleistung auf einer zeitlichen Ebene verteilt und damit der Betrieb von Energienetzen und Kraftwerken effizienter gestaltet werden.

Neben dem privaten Sektor sind bestimmte gewerbliche Flotten im innerstädtischen Straßenverkehr besonders als Pilotkunden für batterieelektrische Fahrzeuge geeignet (vgl. [SMS10a], S. 224f). Der wirtschaftliche Vorteil gegenüber konventionellen Antrieben entsteht, wenn die Fahrzeuge eine hohe Laufleistung erreichen und trotzdem genügend Zeit für die benötigten Aufladevorgänge bleibt. Sofern also batterieelektrische Fahrzeuge für den Anwendungsbereich geeignet sind, wird eine bedarfsgerechte Ladeinfrastruktur im Betriebsgebiet benötigt.

Um eine Ladeinfrastruktur bedarfsgerecht auslegen zu können, müssen die zu erwartenden ortsbezogenen Nachfragen antizipiert werden können. Neben Leistungsparametern wie Batteriekapazität und Ladeleistung sind insbesondere Bewegungs- und Parkaktivitäten der Fahrzeuge ausschlaggebend für die Festlegung von Ladestandorten und deren Kapazität. Diese Aufgabe wird im Rahmen der Arbeit untersucht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 formuliert die Aufgabenstellung dieser Arbeit. Nach der Abgrenzung des Betrachtungsgegenstandes werden relevante Begriffe definiert und die beteiligten Rollen und Prozesse beschrieben. Die einzelnen Aspekte der Planungsaufgabe werden hinsichtlich ihrer politischen, ökologischen und ökonomischen Einflüsse und Auswirkungen erläutert. Das Kapitel schließt mit einer komprimierten Zusammenfassung.

Im **Kapitel 3** wird ein umfassender Überblick über den wissenschaftlichen Stand der Technik gegeben. Für die beteiligten Bereiche werden relevante Ansätze aus der Literatur ausgearbeitet und in einer vereinheitlichten Notation dargestellt.

Kapitel 4 greift die Ergebnisse der Literaturrecherche auf und stellt sie den Anforderungen der Aufgabenstellung gegenüber. Auf Basis dieser Anforderungen werden Lücken identifiziert und der sich ergebende Forschungsbedarf abgeleitet. Das Kapitel

schließt mit einer zusammenfassenden Darstellung der Architektur des Planungssystems und den damit verbundenen Zielen dieser Arbeit.

Das **Kapitel 5** stellt den entwickelten Ansatz für die Simulation der Versorgung einer batterieelektrischen Fahrzeugflotte vor. Nach einer kurzen Einordnung der Methodik werden die Komponenten und Verhaltenshypothesen des Simulationsmodells aufgezeigt. Für die Generierung von Szenarien wird ein eigenes Mobilitätsmodell entwickelt und dessen algorithmische Funktionsweise ausgeführt. Das Kapitel schließt mit einer Aufstellung der Ergebniskennzahlen, die auf Basis der Simulation gewonnen werden.

Kapitel 6 stellt ein lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell zur kostenoptimalen Auswahl potentieller Versorgungsstandorte vor. Auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Bewegungsszenarien werden die Auswahl von Standorten und die Festlegung einer Betriebskapazität als Freiheitsgrad einer Optimierungsaufgabe formuliert. Nach der Formulierung praktischer Erweiterungen des Basismodells folgt eine Bestimmung der Komplexitätsklasse. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Lösungsmethodik und der sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Reduktion der Laufzeit exakter Lösungsverfahren.

Kapitel 7 stellt die entwickelte heuristische Lösungsmethodik für Instanzen des Optimierungsmodells vor. Nach einer kurzen Einordnung der Methodik wird zunächst eine alternative, objektorientierte Formulierung des Optimierungsmodells vorgestellt, mit der die Manipulation von Modelllösungen deutlich erleichtert wird. Die folgenden Abschnitte beschreiben im Detail die einzelnen Konstruktions-, Verbesserungs- und Reparaturstrategien des entwickelten Verfahrens.

In **Kapitel 8** werden verschiedene Aspekte der entwickelten Verfahren und Modelle evaluiert. Nach einer Analyse der Laufzeiteigenschaften exakter Verfahren wird das heuristische Verfahren im Vergleich untersucht. Für das entwickelte Optimierungsmodell wird die Effektivität alternativer Formulierungen geprüft und der Unterschied zu einem klassischen Ansatz vorgestellt.

Kapitel 9 zeigt die praktische Anwendung der beschriebenen Methoden im Rahmen einer Fallstudie. Das entwickelte System wird eingesetzt, um die Auslegung der Ladeinfrastruktur für einen urbanen Mobilitätsanbieter zu planen.

Kapitel 10 zieht ein Fazit unter die Arbeit und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Entwicklungen und aufkommende Forschungsfragen.

1.4 Mathematische Notation

Um das Verständnis und die Lesbarkeit der mathematischen Ausdrücke zu erhöhen, wird eine einheitliche Notation verwendet. Sie ermöglicht es insbesondere, den Typ eines Symbols zu erkennen, ohne auf die Definition zurückgreifen zu müssen.

Indexmengen werden durch kalligraphische Buchstaben $(\mathcal{L}, \mathcal{T})$ gekennzeichnet. Die Elemente dieser Mengen sind mit dem gleichen Buchstaben in Kleinschreibung bezeichnet ($t \in \mathcal{T}, (a, a') \in \mathcal{A} \times \mathcal{A}$). In parametrisierten Mengen sind die abhängigen Indizes hochgestellt. Dabei entspricht der kleine Buchstabe dem kalligraphischen Buchstaben der Obermenge (\mathcal{I}^v mit $v \in \mathcal{V}$). Um zwischen verschiedenen Mengen im Simulations- und Optimierungsmodell mit identischen Buchstaben zu unterscheiden, sind die Symbole im Simulationsmodell zusätzlich mit einem Dach ($\hat{\mathcal{L}}, \hat{X}$) versehen.

Modellparameter (exogene Konstanten) sind mit Großbuchstaben (A, I) bezeichnet. Indizes sind tiefgestellt und besitzen den gleichen Buchstaben wie die Elemente der zugehörigen Obermenge ($C_{l,k}$ mit $l \in \mathcal{L}$ und $k \in \mathcal{K}$). Existieren verschiedene Ausprägungen eines Parameters (z.B. obere und untere Schranken), wird zur Verdeutlichung eine hochgestellte Bezeichnung angefügt ($T^{\text{Min}}, T^{\text{Max}}$).

Modellvariablen sind mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Eventuelle Indizes sind tiefgestellt und besitzen den gleichen Buchstaben wie die Elemente der entsprechenden Obermenge ($k_{l,t}$ mit $l \in \mathcal{L}$ und $t \in \mathcal{T}$). Variablen mit kontinuierlichem Wertebereich besitzen dabei lateinische Buchstaben ($q_{s,i,l} \in \mathbb{R}$), binäre Variablen sind mit griechischen Buchstaben ($\sigma_{l,k} \in \{0,1\}$) bezeichnet. Sofern nicht anders angegeben, gilt für alle Variablen die Nichtnegativitätsbedingung (NNB).

Im Rahmen dieser Arbeit wird außerdem die Zahl Null als Element der natürlichen Zahlen ($\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$) betrachtet.

Planung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten

Dieses Kapitel beschreibt die Aufgabenstellung der Arbeit und erläutert theoretische und praktische Grundlagen für das weitere Verständnis. Nach der Abgrenzung des untersuchten Anwendungsbereichs werden grundlegende Begriffe definiert und technische Zusammenhänge aufgezeigt. Im Anschluss werden Charakteristika gewerblicher Flotten im Kontext batterieelektrischer Fahrzeuge beschrieben, der Begriff Ladeinfrastruktur definiert sowie dessen Komponenten, Funktionen und Kosten erläutert. Das Kapitel schließt mit den Grundlagen zu Entscheidungsunterstützungssystemen und einer Zusammenfassung der verschiedenen Bestandteile der Planungsaufgabe.

2.1 Betrachtungsgegenstand

Als Großstädte gelten in Deutschland nach der Auffassung des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung alle Städte mit über 100.000 Einwohnern (vgl. auch [Gab11a]). Im Folgenden wird der Begriff *Stadt* synonym verwendet. Der überwiegende Teil des städtischen Verkehrsaufkommens wird privaten Fahrzeugen für Ausbildungs-, Berufs-, Einkaufs- und Freizeitwecke zugerechnet (vgl. [Bun10a], S. 26). Die Bewegungen der Fahrzeuge motivieren sich hier aus der Überwindung einer Distanz zwischen Wohn- und Zielort zur Ausübung einer *Aktivität*. Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sind *gewerblich* betriebene Fahrzeugflotten, die zum Transport von Gütern oder Personen im Großstadtverkehr eingesetzt werden. Dort dient die Bewegung von Fahrzeugen grundsätzlich der Erfüllung von (*Kunden-*)*Aufträgen*.

2.1.1 Gewerbliche Fahrzeugflotten im großstädtischen Güter- und Personen-transportverkehr

Eine *Fahrzeugflotte* (nachfolgend immer verkürzt *Flotte* genannt) bezeichnet die Gesamtheit aller Fahrzeuge, welche von einem Unternehmen zur Erfüllung einer internen oder externen Dienstleistung in einem definierten Geschäftsgebiet eingesetzt werden. Eine *homogene Flottenstruktur* liegt vor, wenn die eingesetzten Fahrzeuge untereinander beliebig austauschbar sind, also nicht hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Funktionalität unterschieden werden müssen.

Der konsolidierte Transport zur Auslieferung von Gütern in Städten ist eine Ausprägung des *Straßengüterverkehrs* und wird als *urbaner Verteilerverkehr* bezeichnet (vgl. [HB08], S. 1). Hierbei wird ein Dienstleister von Kunden mit Transport und Auslieferung zu definierten Zielen beauftragt und muss den Auftrag in einer vorgegebenen Zeit, aber üblicherweise in der freien Wahl seiner Transportmittel, durchführen. Bekannte Beispiele für urbane Transportdienstleistungen sind KEP³- und Liefer-Dienste für Nahrung, Wäsche oder Einkäufe. Transportfahrten können sich dabei in Abhängigkeit von Güterstruktur und Auftragsvolumen stark unterscheiden. Während städtische Kurierdienste hauptsächlich spontane Aufträge mit wenigen Zielkunden ausführen, werden bei Paketdienstleistern größere Touren mit vielen Auslieferungen gefahren.

Auftragsbezogene Transportdienstleistungen von Personen im Stadtverkehr erfolgen durch Taxi- oder Mietwagen-Unternehmen. In Deutschland besaßen dafür im Jahr 2010 insgesamt 82.277 Fahrzeuge eine Genehmigung (vgl. [Deu10]). In Großstädten wie Berlin gibt es über 7.000 zugelassene Taxi-Fahrzeuge, in München und Hamburg ca. 3.000. Das vorherrschende Betriebskonzept ist der *Funkmietwagen*. Hierbei werden Kundenanfragen über eine Zentrale aufgenommen und Aufträge auf die verfügbaren Fahrzeuge disponiert. Im städtischen Verkehrsraum sind Haltepunkte an ausgewiesenen Plätzen vorhanden, dort können stehende Fahrzeuge von Kunden spontan beauftragt werden.

Eine weitere Ausprägung einer Flotte ist der Unterhalt eines Fuhrparks zur Leistungserbringung. Hierbei steht ein Pool von Fahrzeugen zur Verfügung, der vom Unternehmen selbst bewirtschaftet und für die Durchführung von Aufträgen verwendet wird. Im Vordergrund steht dabei nicht der Transport der Mitarbeiter, sondern die Bereithaltung von Kapazitäten für definierte Aufgaben. Beispiele hierfür sind Bereitschaftseinsätze im Kundenservice und innerbetriebliche Transportdienstleistungen.

³ Kurier-, Express-, und Paket-Dienste bieten Transportdienstleistungen für Güter an. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Reaktionszeit, der Transportdauer und den Transportwegen (vgl. [JH06], S. 8f).

Die Nutzung privater Fahrzeuge zur Deckung eines Mobilitätsbedarfs wird in der Verkehrsforschung als Motorisierter Individualverkehr (MIV) bezeichnet. Vorwiegend in urbanen, dichter besiedelten Gebieten existieren Unternehmen, die eine gewerbliche Fahrzeugflotte zur Deckung privater Mobilitätsbedarfe anbieten. Hierbei erwirbt der Kunde durch eine Mitgliedschaft das Recht zur Nutzung dieser Fahrzeuge und zahlt ein verbrauchsbezogenes Entgelt. Geschäftsmodelle dieser Art sind allgemein unter der Bezeichnung *Car Sharing* bekannt (vgl. hierzu [Loo09], S. 135ff).

Diese Arbeit legt einen besonderen Fokus auf die Flotte von *Mobilitätsanbietern* nach einem erweiterten Car Sharing Prinzip. Mobilitätsanbieter wie *car2go*⁴ oder *DriveNow*⁵ erweitern das klassische *stationsbasierte* Car Sharing (siehe [BT99], S. 239f) um die Möglichkeit, das Fahrzeug im gesamten Parkraum des definierten Geschäftsgebiets anzumieten und abzustellen. Die geographischen Positionen der freien Fahrzeuge stehen den Kunden in Echtzeit zur Verfügung und werden vom Anbieter nur in Ausnahmefällen verändert (*Relokation*). Zeitpunkt und Dauer der Miete sind nicht begrenzt, es ist keine Reservierung notwendig. Die Abrechnung der Mobilitätsdienstleistung erfolgt über ein Tarifsystem auf Basis von Mietdauer und zurückgelegter Distanz.

2.1.2 Abgrenzung von Elektrofahrzeugen

Der im Folgenden intensiv verwendete Begriff *Elektrofahrzeug* bezeichnet einen Personen- oder Lastkraftwagen, dessen Antriebsstrang⁶ durch die Kraft eines Elektromotors angetrieben wird. Die Abgrenzung erfolgt insbesondere zum *Verbrennungsmotor*, der heute beinahe alle Fahrzeuge im Straßenverkehr antreibt. Die elektrische Versorgung von Motor und Fahrzeugelektronik⁷ kann dabei aus verschiedenen Energiequellen erfolgen.

Mit fortschreitender Diversifikation der Antriebstechnologien bieten die Automobilhersteller heute Fahrzeuge an, bei denen verschiedene Energiequellen parallel zum Einsatz kommen. Diese *Hybrid-Fahrzeuge* enthalten mindestens zwei Energiewandler und

⁴ Daimler AG, siehe <http://www.car2go.com/>.

⁵ BMW AG, siehe <http://www.drive-now.com/>.

⁶ Der Begriff *Antriebsstrang* bezeichnet alle Fahrzeugkomponenten, die bei der Kraftübertragung vom Motor bis auf die Straße zum Einsatz kommen. Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind dies etwa Kupplung, Getriebe und Differential. Elektrofahrzeuge kommen mit einer deutlich reduzierten Anzahl an Komponenten aus (vgl. hierzu [WFO10], S. 137f).

⁷ Fahrzeuge enthalten in immer stärkerem Maße elektrische und elektronische Komponenten, etwa für Bedieneinheiten, Multimedia- und Sicherheitssysteme. Nach *Brabetz* hat dies „zu einem deutlichen Anstieg des elektrischen Anteils an der gesamten Energiebilanz eines Fahrzeugs geführt und ist damit sowohl ressourcen- wie auch emissionsrelevant“ (vgl. [Bra10], S. 1ff).

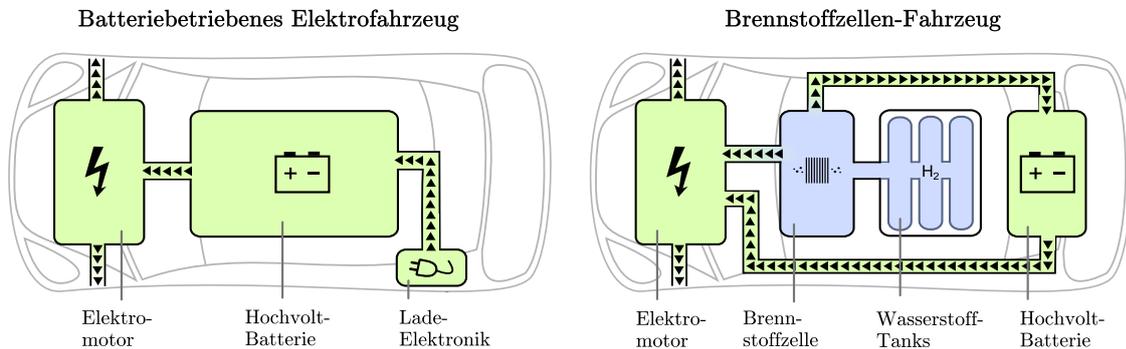


Abbildung 2.1: Aufbau von Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen (in Anlehnung an [Dai])

zwei Energiespeichersysteme. Hybrid-Fahrzeuge mit Lademöglichkeit, genannt Plugin Hybrid Electric Vehicle (PHEV), gewinnen zusätzliche Energie durch Verbrennung von Kraftstoff.⁸ „PHEV können den Übergang von konventionellen Verbrennungsmotoren zur Elektromobilität fördern, da Nutzer keine Einschränkung in der erzielbaren Reichweite erfahren“ ([SMH09], S. 13). Hybrid-Fahrzeuge sind kein Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit. Im Folgenden wird der Begriff *Elektrofahrzeug* synonym für *reine Elektrofahrzeuge* verwendet.

Elektrofahrzeuge beziehen ihre Energie aus einem fest installierten *Energieträger*. In der aktuellen Forschung dominieren zwei Technologien für die Bereitstellung elektrischer Energie im Fahrzeug (siehe Abbildung 2.1). Ein *batterieelektrisches Fahrzeug* bzw. *batteriebetriebenes Elektrofahrzeug*, engl. Battery Electric Vehicle (BEV), nutzt eine Hochvolt⁹-Batterie als singulären Energiespeicher für die gesamte vom Fahrzeug benötigte Energie. Der Antriebsstrang eines *Brennstoffzellen-Fahrzeugs*, engl. Fuel Cell Vehicle (FCV), wird mit Wasserstoff angetrieben. Hierbei entsteht elektrische Energie durch einen chemischen Prozess:

„Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die chemische Energie ohne die Umwandlung in Wärme und Kraft in elektrische Energie umwandeln. Die chemischen Abläufe entsprechen dabei einer Umkehrung der Wasserelektrolyse. Dabei reagieren die Gase Wasserstoff mit Sauerstoff unter Freigabe von Energie zu Wasser. Die freigesetzte Energie wird anschließend in einer Batterie zwischengespeichert, die den Elektromotor des Fahrzeugs speist“ ([WFO10], S. 61).

⁸ Elektrische Antriebskomponenten können auf verschiedenen Stufen in den Antriebsstrang eines Hybrid-Fahrzeugs integriert werden, für eine detaillierte Übersicht siehe [WFO10], S. 52ff.

⁹ Der Begriff *Hochvolt* bezeichnet nach BGI 8686 eine elektrische Spannung über 25 Volt bei Wechselstrom bzw. über 60 Volt bei Gleichstrom im Fahrzeugbereich (vgl. [DGU]).

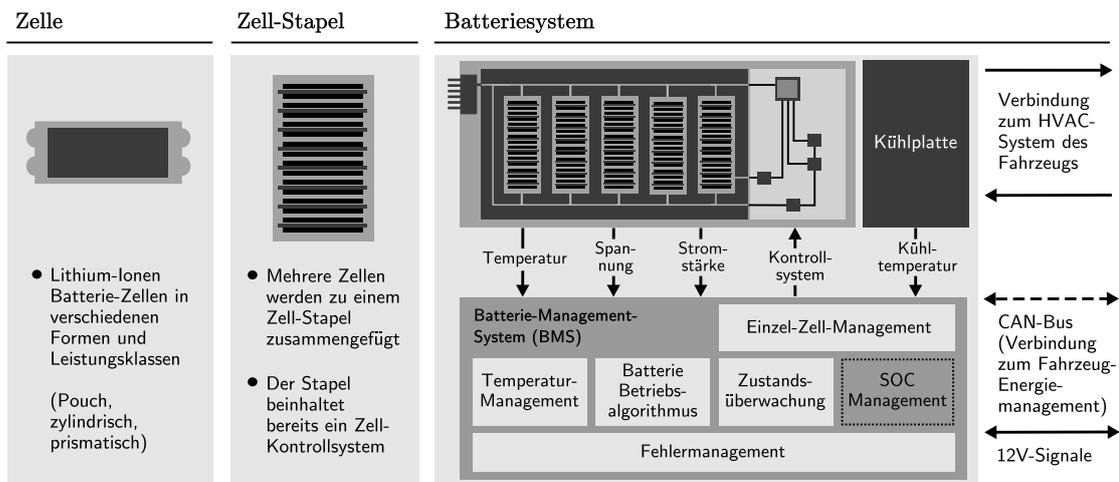


Abbildung 2.2: Komponentenschema eines Fahrzeugbatteriesystems
(Quelle: [SHH⁺11], S. 16)

Für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge fokussiert sich die Forschung momentan auf die technologische Weiterentwicklung von *Lithium-Ionen-Akkus* (vgl. [WFO10], S. 89ff). Die Batterie ist fest im Fahrzeug installiert und enthält neben den Speicherzellen weitere Komponenten für Ladung, Klimatisierung und Zellsteuerung. Abbildung 2.2 illustriert die Bestandteile integrierter *Batteriesysteme*. Konzepte, die einen Austausch des vollständigen Batteriesystems im Fahrzeug verfolgen¹⁰, sind kein expliziter Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

Für die Leistungsfähigkeit einer Batterie existieren verschiedene Kenngrößen. Die verfügbare Gesamtkapazität bei voller Ladung wird in Kilowattstunden (kWh) angegeben. Die *Energiedichte* (gravimetrisch $\frac{Wh}{kg}$ oder volumetrisch $\frac{Wh}{ccm}$) gibt an, wie viel Energie pro Massen- oder Volumeneinheit maximal gespeichert werden kann, während die *Leistungsdichte* ($\frac{W}{kg}$ oder $\frac{W}{ccm}$) angibt, welche Leistung pro Massen- oder Volumeneinheit maximal abgegeben werden kann. Neben der Energie- und Leistungsdichte entwickelt sich die Technologie in den Aspekten Sicherheit, Zyklenfestigkeit, Lebensdauer, Betriebstemperaturbereich, Wärmeabfuhr, Material- und Fertigungskosten sowie Umwelt- und Recyclingkonzepte (vgl. [Neu11], S. 2043). Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Preis einer Batterie in *EUR pro kWh* angegeben.

Lithium-Ionen-Batterien erreichen heute Energiedichten im Bereich 90-140 $\frac{Wh}{kg}$ (vgl. [Sta08], S. 241). Für den Einsatz im Fahrzeug entspricht das ungefähr 0,5-1 Kilome-

¹⁰ Das Konzept sogenannter *Batteriewechselstationen* beinhaltet den automatisierten Austausch einer vollständigen Batterieeinheit durch eine Mechanik am Fahrzeug. Die Batterien werden dabei an den Stationen gelagert und aufgeladen (vgl. hierzu [GNKW10] und [LDDS10], S. 4).

ter Reichweite pro Kilogramm Batteriegewicht (vgl. [WKL10], S. 14). Der Energiebedarf bzw. -verbrauch eines Fahrzeugs wird durch Simulationen oder Feldversuche ermittelt. Hierbei wird der variable und fixe Energiebedarf des Fahrzeugs sowie ein für das Einsatzgebiet charakteristischer *Fahrzyklus* (vgl. [NBW06], S. 352ff) herangezogen. *Pirker* stellt heraus, dass der Energiebedarf im Falle von Elektrofahrzeugen „um bis zu einem Faktor 2 schwanken kann, je nachdem, ob z.B. in der Betriebsstrategie die Rekuperation^[11] der Bremsenergie vorgesehen ist oder nicht“ ([Pir08], S. 319). Der ermittelte Verbrauch des Fahrzeugs wird für elektrische Energiespeicher in *kWh pro 100 km* angegeben.

Volumen und Masse eines Batteriesystems in einem Fahrzeug sind - abhängig von der Bauweise - begrenzt. Die *durchschnittlich realisierbare Reichweite* (im Folgenden kurz *Reichweite*) eines Fahrzeugs bezeichnet die zurücklegbare Fahrstrecke (in *km*) bei komplettem Verbrauch einer vollständig gefüllten Batterie. Sie ergibt sich aus der Batteriekapazität und dem ermittelten Energiebedarf pro Längeneinheit unter Berücksichtigung von Übertragungsverlusten¹² im Fahrzeug. Die *Restreichweite* bezeichnet analog die verbleibende maximal mögliche Fahrstrecke beim Verbrauch der gesamten verbleibenden Energie im Batteriespeicher.

2.1.3 Batterieelektrische Fahrzeuge im Flottenbetrieb

Der Einsatz von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen in einer Fahrzeugflotte unterliegt wirtschaftlichen, technologischen und unternehmenspolitischen Einflussfaktoren. Die Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen liegen aufgrund geringer Stückzahlen und hoher Batteriekosten auf absehbare Zeit deutlich über dem Niveau eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (vgl. [SSL11], S. 24). „Im Gegensatz zu den hohen Anschaffungskosten sind die Betriebskosten von Elektrofahrzeugen vergleichsweise günstig, da sowohl die Energiekosten aufgrund höherer Effizienz niedriger sind, als auch Ölwechsel und Wartung nicht bzw. in deutlich geringerem Umfang anfallen“ ([TWJ10], S. 2). Für die Kraftfahrzeugversicherung als Teil der Betriebskosten sind keine relevanten Unterschiede zu erwarten (vgl. [Rei11]).

¹¹ Rekuperation heißt die Rückgewinnung von kinetischer Energie durch Verwendung des Elektromotors als Generator. Dieses Konzept kommt auch in Hybrid-Fahrzeugen zum Einsatz (vgl. [Wil08a]).

¹² Übertragungsverluste entstehen nach *Brabetz* im Fahrzeug bei der „Energie-Generierung (Wandlung), Konvertierung, Speicherung und Verteilung“ (vgl. [Bra10], S. 2).

Schulz, Marker und *Schindler* unterscheiden die folgenden Flottencharakteristika und Zielsetzungen (vgl. [SMS10b], S. 2f):

- **Flottengröße.** Bei einer größeren Anzahl an Fahrzeugen können verschiedene Antriebstechnologien zum Einsatz kommen. Im Hinblick auf die begrenzte Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge kann das Fahrzeugportfolio so zusammengestellt werden, dass für jeden Reichweitenbedarf ein passendes Fahrzeug verfügbar ist.¹³
- **Aktionsradius.** Die jährliche *Fahrleistung* (in Kilometern) bestimmt maßgeblich die Wirtschaftlichkeit, da höhere Anschaffungskosten durch niedrigere variable Betriebskosten kompensiert werden müssen.
- **Bekanntheit der Routen.** Die Kenntnis bzw. Vorhersagbarkeit der Fahrzeugbewegungen erlaubt eine bessere Auswahl der Flottenfahrzeuge. Sind die zu erwartenden Reichweitenbedarfe schwer prognostizierbar, müssen ggf. Fahrzeuge mit höheren Reichweiten vorgehalten werden.
- **Standzeiten.** Im Gegensatz zu privat genutzten Fahrzeugen können für gewerbliche Flotten genauere Betriebszeiten bekannt sein, so dass die Ruhezeiten von Anfang an für einen Ladevorgang zur Verfügung stehen.
- **Fahrzeugeigenschaften.** In Abhängigkeit von der Verwendung der Flottenfahrzeuge ergeben sich bauliche Anforderungen an die Fahrzeugeigenschaften, z.B. in Bezug auf Ladefläche oder -volumen.
- **Strategische Ausrichtung.** Die strategische Ausrichtung einer Flotte beinhaltet die geplante Einsatzdauer der Fahrzeuge. Insbesondere die Investition in kostenintensive Spezialfahrzeuge bedingt eine deutlich höhere Betriebsdauer.
- **Politische Ziele.** Der Einsatz von Elektrofahrzeugen kann durch Gründe getrieben sein, die nicht grundsätzlich wirtschaftlicher Natur sind. Insbesondere ist der Einsatz lokal emissionsfreier Fahrzeuge geeignet, eine ökologische Ausrichtung in der Außenwirkung des Unternehmens zu unterstützen.

Weiterhin muss der Aspekt *Bereitschaft* berücksichtigt werden. Für entsprechende Anwendungsbereiche ist es unabdingbar, dass zu jeder Zeit eine minimale Restreichweite

¹³ Der Prozess der Auftragsdisposition beinhaltet für einige Anwendungsfälle eine vorherige *Routenplanung*. Bei der Integration batterieelektrischer Fahrzeuge in die Routenplanung werden die Eigenschaften der Fahrzeuge explizit berücksichtigt und geeignete Touren unter Berücksichtigung der realisierbaren Reichweiten zusammengestellt (vgl. hierzu [BBV08]).

bestimmter Fahrzeuge zur Verfügung steht. Dies entspricht im Falle batterieelektrischer Fahrzeuge einem minimal geforderten Ladefüllstand vor Beginn einer Fahrt bzw. einer definierten Energiereserve je Fahrzeug.

2.2 Ladeinfrastruktur zur Versorgung der batterieelektrischen Flottenfahrzeuge

In der Literatur existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen des Begriffes *Infrastruktur* (vgl. [GIJ91], S. 27f). Der Begriff *Ladeinfrastruktur* hat sich in den letzten Jahren etabliert (siehe [WKD09], [LDDS10] und [Bac11]). Eine einheitliche Definition, insbesondere in Abgrenzung zur Abrechnungs- und Energieversorgungsinfrastruktur, hat sich noch nicht durchgesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit bezeichnet Ladeinfrastruktur eine Gesamtheit von Ladestandorten, deren Ladeplätze allen Fahrzeugen einer batteriebetriebenen Elektrofahrzeugflotte uneingeschränkt und exklusiv zur Verfügung stehen. Der Begriff *Versorgungsinfrastruktur* wird synonym verwendet.

2.2.1 Rollen der beteiligten Unternehmen

Bei der Betrachtung von wirtschaftlichen Aspekten der Versorgungsinfrastruktur für eine batterieelektrische Fahrzeugflotte lassen sich für das zugrunde liegende Geschäftsmodell verschiedene *Rollen* abgrenzen. *Engel* unterscheidet beispielsweise die Rollen *Autofahrer*, *Autobesitzer*, *Messstellenbetreiber*, *Stromstellenbetreiber*, *Parkplatzbetreiber*, *Fahrstromversorger* und *Energieproduzent* (vgl. [Eng10], S. 5). Im Folgenden wird vereinfacht zwischen vier verschiedenen Rollen der beteiligten Parteien unterschieden (siehe Abbildung 2.3). Dieses Rollenkonzept ist auf viele Geschäftsmodelle übertragbar, von einer Industriepartnerschaft verschiedener Unternehmen bis zu einem Generalunternehmer, der alle Rollen in sich vereint.

Die Rolle „*Fahrzeug-Nutzer*“ beschreibt die operativen Tätigkeiten der Fahrer. Fahrzeug-Nutzer beladen, bewegen und entladen die Fahrzeuge. In Bezug auf die Versorgungsinfrastruktur ist es ihre Aufgabe, die Fahrzeuge an verfügbaren Ladeplätzen zu parken und die Verbindung zwischen Fahrzeug und Versorgungsnetz herzustellen oder zu trennen. Fahrzeug-Nutzer können grundsätzlich alle verfügbaren Fahrzeuge der Flotte nutzen.

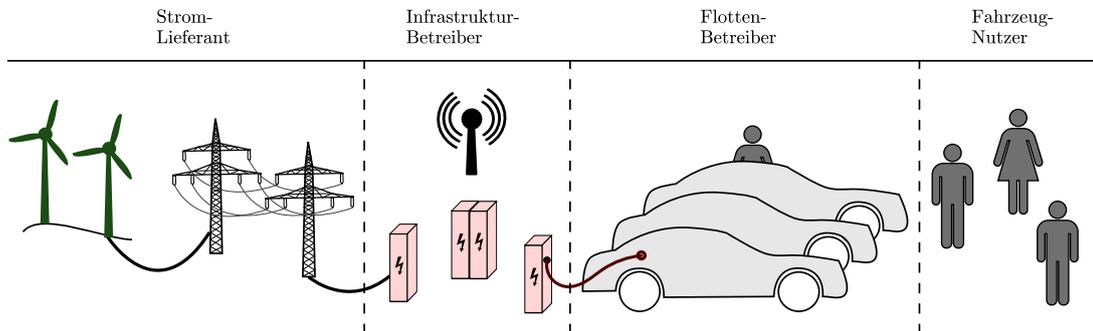


Abbildung 2.3: Skizze der betrachteten Marktrollen

Die Rolle „*Flotten-Betreiber*“ umfasst alle Aktivitäten für die bedarfsgerechte Bereitstellung der Fahrzeuge. Der Flotten-Betreiber trägt die Kosten für Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung der Fahrzeuge. Ihm obliegt das *Flottenmanagement*¹⁴ mit allen administrativen Aufgaben im operativen Betrieb. Diese sind - je nach Zweckbestimmung der Flotte - sehr unterschiedlich, z.B. Betreuung der Fahrzeug-Nutzer, Abrechnung, Controlling, Auftragsdisposition oder Tourenplanung. Der Flotten-Betreiber strebt eine hohe Versorgungs-Qualität seiner Fahrzeuge an (siehe Abschnitt 2.3.4).

Die Rolle „*Infrastruktur-Betreiber*“ beinhaltet alle Tätigkeiten und Dienstleistungen im Aufbau und Betrieb der Standorte einer Ladeinfrastruktur. Der Infrastruktur-Betreiber trägt die Kosten für die Bereitstellung der Parkflächen und die Installation der benötigten Technik. Im operativen Betrieb wird die Funktionsfähigkeit überwacht und ggf. die Höhe der bereitgestellten Energie geregelt. Für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur wird ein Dienst zur Zuordnung eines Ladeplatzes (*Dispatching*) betrieben.

Der Infrastruktur-Betreiber verfolgt primär ökonomische Ziele beim Aufbau und Betrieb (Gewinnmaximierung). Kosten entstehen durch die Erschließung der Ladeplätze, die Investitionen in die technischen Anlagen und deren Installation und Wartung (siehe Abschnitt 2.3.3). Einnahmen werden durch verbrauchsgenaue Abrechnung der bezogenen Leistung (Anteil am Strompreis) und durch Erhebung von Bereitstellungsgebühren erzielt. Die Gewinnmaximierung bedeutet also im Falle der Ladestandorte die Maximierung der Auslastung.

Die Rolle „*Energie-Lieferant*“ bezeichnet den Vertragspartner des Infrastruktur-Betreibers für die Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie am Anschlusspunkt

¹⁴ auch *Fuhrparkmanagement* genannt, vgl. [Ker03], S. 11.

der Ladeplätze. Hierbei kann es sich um ein Energieversorgungsunternehmen (EVU) handeln oder eine Vertriebsgesellschaft als Zwischenhändler. Der Energie-Lieferant bietet einen Strompreis pro Kilowattstunde (kWh) an.

2.2.2 Komponenten und Konzepte

Ladeplätze sind die zentralen Komponenten der Versorgungsinfrastruktur für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge. Ein Ladeplatz beinhaltet grundsätzlich die drei folgenden Bestandteile:

1. Eine *Parkfläche* für das Fahrzeug. Diese muss für alle zu erwartenden Fahrzeugmaße ausreichend dimensioniert sein und für die Flottenfahrzeuge zugänglich gemacht werden. Mit einer geeigneten Markierung oder Beschilderung wird sichergestellt, dass die vorgesehenen Fahrzeuge den Stellplatz optisch erkennen können und die Belegung durch flottenfremde Fahrzeuge vermieden wird.
2. Eine technische Installation zum Transfer elektrischer Energie in das Fahrzeug. Diese besitzt eine spezifische maximale Ladeleistung, die sich aus der Schnittstelle zum Fahrzeug und der verfügbaren Anschlussleistung ergibt.
3. Eine Kommunikations-Schnittstelle zwischen Fahrzeug-Telematik¹⁵ und technischer Installation. Wenn die übertragene elektrische Energie nicht nur gemessen, sondern auch einem Verbraucher zugeordnet werden soll, werden dafür eine Messvorrichtung und ein Kommunikationskanal zum Fahrzeug(-nutzer) benötigt. Diese Schnittstelle kann ebenfalls für die Übertragung von Diagnosedaten (Batteriefüllstand, Temperatur, Ladedauerprognose, etc.) verwendet werden. Bei kabelgebundener Ladung kann das Übertragungsmedium ebenfalls für diese Schnittstelle verwendet werden (vgl. [DGV10], S. 5).

Eine räumlich zusammenhängende Installation beliebig vieler Ladeplätze wird im Folgenden als *Ladestandort* bezeichnet. Die *Kapazität* eines Ladestandortes ist als die Anzahl verfügbarer Ladeplätze definiert. Häufig werden hierfür synonym die Begriffe Ladestation oder Stromtankstelle benutzt. Alle Ladeplätze eines Standortes werden am *Anschlusspunkt* mit dem Stromnetz verbunden. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen,

¹⁵ Der Begriff *Telematik* setzt sich aus den Worten „Telekommunikation“ und „Informatik“ zusammen. In Verbindung mit Fahrzeugen (*Verkehrstelematik*) bezeichnet der Begriff eine elektronische Einheit im Fahrzeug, welche netzwerkbasierend mit außenstehenden Diensten kommuniziert (vgl. [KBKPS09], S. 612f).

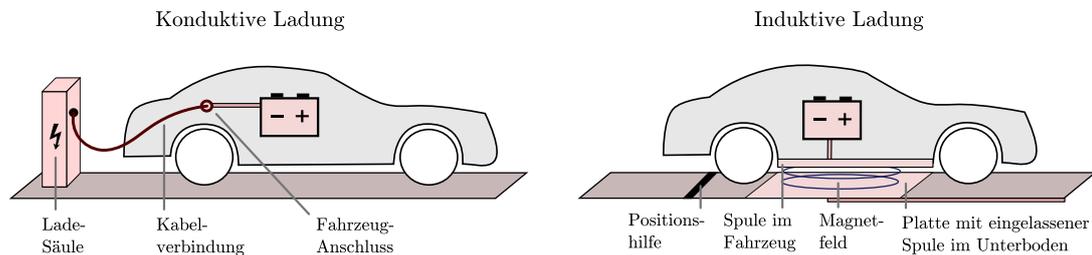


Abbildung 2.4: Konduktives und induktives Ladekonzept

dass der Bezug von Energie ausschließlich aus dem Stromnetz erfolgt und keine lokalen Energiezwischenspeicher betrieben werden (wie bspw. in [XL11]). Für jedes Fahrzeug steht eine a priori bekannte Ladeleistung - unabhängig von der Kapazitätsauslastung des Standortes - zur Verfügung.

Für den Energietransfer existieren *konduktive* (kabelgebundene) und *induktive* (kabellose) Konzepte (vgl. Abbildung 2.4). Im Rahmen dieser Arbeit müssen sie nicht explizit unterschieden werden, da sich ihre Charakteristik identisch beschreiben lässt. Unabhängig von der verwendeten Technik steht eine konstante Ladeleistung zur Verfügung, die ggf. um den erreichbaren Wirkungsgrad¹⁶ bereinigt werden muss. Die Steuerkomponenten der Batteriesysteme bleiben ebenfalls identisch, so dass es keine Veränderung der Ladekurve gibt. Nicht betrachtet wird hier ein theoretisches Konzept zur *dynamischen* induktiven Ladung während der Fahrt (vgl. [SKW11], S. 5).

Bei der *konduktiven Ladung* erfolgt der Anschluss des Fahrzeuges über ein Verbindungskabel¹⁷. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Leistungsparameter, Einsatzbereich und Bauform (vgl. [DGV10], S. 3). Das Verbindungskabel ist entweder fest mit der technischen Installation verbunden oder wird separat im Fahrzeug aufbewahrt. Länge und Leitungsquerschnitt der Kabeladern bestimmen das Gewicht und sind abgestimmt auf den Anwendungsbereich und die maximal zulässige Ladeleistung.

Je nach baulichen Gegebenheiten wird der Fahrzeuganschluss im Boden (*Ladesäule*) oder an einer Wand (*Wallbox*) installiert. Nach außen sichtbar sind nur die Anschlüsse (*Steckdosen*) und Bedienelemente. Innerhalb des Gehäuses befinden sich Komponenten zur Steuerung und Messung des Ladevorgangs. Über Netzwerkschnittstellen werden

¹⁶ Der Wirkungsgrad (in Prozent) beschreibt die Effizienz der Energieübertragung und gibt an, welcher Anteil der abgegebenen Energie nach der Übertragung beim Empfänger zugeführt wird (vgl. hierzu [SKW11], S. 4).

¹⁷ Steckverbinder für unterschiedliche Anforderungen sind auf europäischer Ebene in der Norm *IEC 62192* vereinheitlicht.

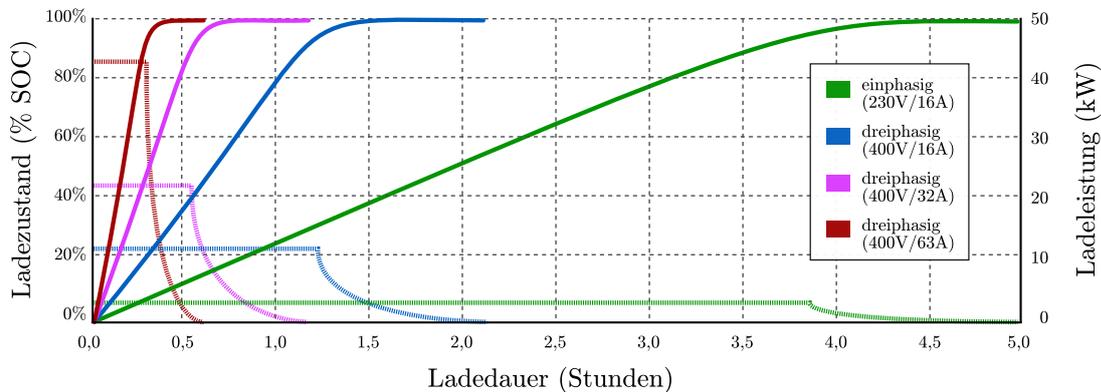


Abbildung 2.5: Schematischer Zusammenhang von Ladedauer, -leistung und -zustand mit verschiedenen Anschlussleistungen für eine 15 kWh Batterie (in Anlehnung an [DGV10], S. 2)

die Kommunikation mit dem Fahrzeug sowie ein Fernzugang für Wartungs- und Abrechnungszwecke realisiert.

Induktive Ladung bezeichnet die berührungslose Übertragung elektrischer Energie in das Fahrzeug während eines Parkvorgangs. Die stationäre Komponente (*Primärspule*) wird dabei unterhalb der Parkfläche installiert, das Gegenstück (*Sekundärspule*) befindet sich im Fahrzeugboden. Die Position beider Spulen bleibt während der Energieübertragung unverändert, das Prinzip ist dem eines Transformators ähnlich (vgl. [Hu09], S. 3). Für die Minimierung von Übertragungsverlusten ist eine exakte Positionierung des Fahrzeugs auf der Bodenplatte wichtig (*Positionierungstoleranzen*, vgl. [SKW11], S. 5). Den Vorteilen der induktiven Ladung in Bezug auf Komfort, Verschleiß und Wartungsaufwand stehen aktuell noch technologische und ökonomische Hindernisse gegenüber (vgl. [SKW11], S. 11).

Unabhängig von der Übertragungstechnologie wird jeder Ladestandort am Anschlusspunkt kabelgebunden mit dem Stromnetz verbunden. Die Stromnetze sind in verschiedene Spannungsebenen aufgeteilt (vgl. [FH05], S. 2f). Die Höchst- und Hochspannungsnetze dienen dem Transport von Strom über große Distanzen. In Städten wird die Verteilung über ein Mittelspannungsnetz vorgenommen und dann jeweils lokal in haushaltsübliche Niederspannungen transformiert. Ob der Anschlusspunkt eines Ladestandortes an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden kann, hängt von der insgesamt benötigten Anschlussleistung zu Spitzenzeiten ab (vgl. [Bra08], S. 383ff).

Die Auslegung der Stromnetze für die großflächige Integration von Elektrofahrzeugen ist ein eigener Themenkomplex (siehe etwa [SNB⁺10], [Bra09] oder [LL11]).

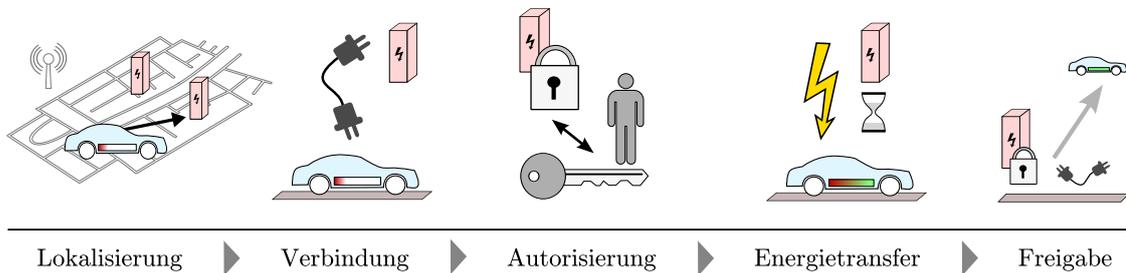


Abbildung 2.6: Ablauf des Fahrzeugladeprozesses

Bei Überschreitung einer kritischen Masse von Fahrzeugen und Verfügbarkeit einer zentralen Steuer-Instanz können Schwankungen im Stromnetz durch geregelte Ladung (*Lastmanagement*) bzw. Rückspeisung von Energie aus den Fahrzeugen gesteuert werden. Konzepte zur Rückspeisung elektrischer Energie aus dem Fahrzeug in das Stromnetz heißen *Vehicle-To-Grid*, näheres hierzu bei [DGV10] und [DKW10]. Im Rahmen dieser Arbeit werden derartige Fragestellungen nicht betrachtet, die ausreichende Verfügbarkeit elektrischer Energie am Anschlusspunkt kann für die betrachteten Flotten vorausgesetzt werden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich die verfügbare Leistung eines Ladeplatzes nicht in Abhängigkeit von der angeschlossenen Anzahl Fahrzeuge verändert. Die Standorte sind ausreichend dimensioniert, um die garantierte Ladeleistung für alle angeschlossenen Fahrzeuge zur Verfügung stellen zu können.

Für die verbrauchsgerechte Abrechnung des Ladestroms durch den Infrastruktur-Betreiber (Abschnitt 2.2.1) sind unterschiedliche Konzepte verfügbar (vgl. [Gro10], S. 2). Sie variieren in den benötigten Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Infrastruktur sowie den ggf. benötigten Rahmenverträgen. Im *Stationsbetrieb* wird die bezogene elektrische Energie direkt vor Ort berechnet. *Roaming* bezeichnet die wahlfreie Nutzung von Standorten verschiedener Anbieter (vgl. [FFGV10]). Die Entscheidung für das Betriebskonzept einer Fahrzeugflotte schließt die Wahl eines geeigneten Abrechnungsmodells mit ein.

2.2.3 Der Fahrzeugladeprozess

Die Interaktion von Elektrofahrzeugen mit der Versorgungsinfrastruktur kann je nach Einsatzbereich unterschiedlich umgesetzt sein. Abbildung 2.6 zeigt die Untergliederung des *Ladeprozesses* in die fünf Schritte *Lokalisierung*, *Verbindung*, *Autorisierung*, *Energietransfer* und *Freigabe*.

Der Prozess der *Lokalisierung* beschreibt die organisatorischen und technischen Abläufe zum Auffinden eines Ladeplatzes. Das Fahrzeug bewegt sich dabei von einem aktuellen Standort zu einem Ladestandort. Im Rahmen des Betriebskonzepts sind die Schritte zur Auswahl, Navigation und Reservierung festgelegt. Der Prozess kann durch technische Unterstützung stark automatisiert sein.

Die *Verbindung* von Fahrzeug und technischer Installation am Ladeplatz erfolgt durch den Fahrzeug-Nutzer. Durch manuelle oder (teil-)automatisierte Vorgänge wird die Übertragung von Energie ins Fahrzeug vorbereitet. Abhängig vom Betriebskonzept beinhaltet es die Positionierung, Abschaltung, Verriegelung und Verkabelung des Fahrzeugs.

Die *Autorisierung* umfasst Abläufe zur technischen Prüfung, Dokumentation und Authentifizierung des Abrechnungspartners. Bei stationärem Betrieb erfolgt die Zahlung der Leistung analog zum heutigen Tankstellenkonzept direkt vor Ort. Im Roaming-Fall ist eine elektronische Infrastruktur für die Abwicklung der Abrechnung über den jeweiligen Anbieter verantwortlich (vgl. [FFGV10]).

Der *Energietransfer*-Prozess beginnt mit der Bereitschaft des Fahrzeugs und beinhaltet neben der geregelten Übertragung des elektrischen Stroms eine verbrauchsexakte Zählung. Fortschritts- und Diagnose-Kennzahlen werden systemisch erfasst, gespeichert und zur Signalisierung des Zustands für Anbieter und Nutzer verwendet. Sicherheits-Mechanismen verhindern Gefahren wie Stromschlag, Kurzschluss oder Überlast. Die Dauer hängt vom Anfangsfüllstand und der realisierbaren Ladeleistung ab (siehe Abbildung 2.5).

Die *Freigabe* beinhaltet den kontrollierten Abschluss des Ladeprozesses durch einen Fahrzeug-Nutzer. Sie enthält die benötigten Schritte zur Entkoppelung von Fahrzeug und Installation, den Abschluss des Abrechnungsprozesses und eine mechanische Entriegelung.

Abhängig von der verfügbaren Standzeit des Fahrzeugs kann der Batteriefüllstand nach Abschluss des Ladeprozesses geringer als die Batteriekapazität sein (*Teilladung*). Ob eine Teilladung zulässig ist, also das Fahrzeug vorzeitig getrennt werden darf, wird von den Regelungen im Betriebskonzept bestimmt. Ein Ladeprozess, der mit 100% State of Charge (SOC) endet, heißt analog *Vollladung*. Die Forcierung bestimmter Ladestrategien hängt von der geforderten Flexibilität der Fahrzeug-Nutzer ab und kann auch die Batteriebensdauer beeinflussen (vgl. [Zha06]).

2.3 Aufgaben und Zielsetzungen des Flotten-Betreibers

Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist die Perspektive des *Flotten-Betreibers* in der initialen strategischen Planungsphase. Die Aufgaben eines Flotten-Betreibers werden in der Literatur unter der Bezeichnung *Fuhrpark-* oder *Flotten-Management* zusammengefasst. Sie umfassen die „systematische Planung, Ausgestaltung und Steuerung einer Fahrzeugflotte“ auf allen zeitlichen Ebenen und lassen sich in die Kategorien Analyse, Organisation und Verwaltung einteilen (vgl. [Zie10], S. 115). Damit verbunden ist im Falle von unternehmensinternen Personentransporten auch das *Betriebliche Mobilitätsmanagement* zur effizienten Nutzung von Fahrzeugen und Parkraum (vgl. [Kro10], S. 252).

2.3.1 Flottenmanagement

Die Planungsaufgaben lassen sich nach dem Zeithorizont ihrer Entscheidungen in drei Handlungsebenen (langfristig/strategisch, mittelfristig/taktisch und kurzfristig/-operativ) differenzieren. Strategisch erfolgt die Auswahl von Märkten und Servicevereinbarungen mit den Kunden, taktisch werden die Beschaffung und der Verkauf von Fahrzeugen entschieden und auf der operativen Ebene erfolgt die Zuordnung und Kontrolle von Aufträgen (vgl. [WHW05], S. 87).

Die *Größenbestimmung* und *-anpassung* einer Flotte (engl. *Fleet (Re-)Sizing*) erfolgt auf Basis einer mittelfristigen Bedarfsplanung (vgl. [Ker03], S. 13ff). Die Beschaffung und das Leasing von Flottenfahrzeugen sind Entscheidungen mit längerfristigen Auswirkungen. Bei ausreichender Verfügbarkeit ist die Erhöhung des Fahrzeugbestands meist schneller möglich als die Reduktion. Die verfügbare Fahrzeuganzahl hat Auswirkungen auf *Auslastung* und *Service-Qualität* (vgl. etwa [MRG⁺98], S. 274). Bei knappem Marktangebot kann die Erhöhung der Flottengröße auch umgekehrt zu höherer Nachfrage führen. Es ist daher vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig, in welchem Rhythmus und welcher Intensität die Größe der Flotte variiert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Planungsfragestellung nicht betrachtet, Anzahl und Typ der Flottenfahrzeuge sind exogen festgelegte Größen.

Eine Definition des Begriffs *Service-Qualität* im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Fahrzeugflotte lässt sich schwer vereinheitlichen. Aus der auftragsbezogenen Perspektive des Kunden erbringt der Flotten-Betreiber eine Dienstleistung. Nach *Bruhn* ist Dienstleistungsqualität die „Fähigkeit eines Anbieters, die Beschaffenheit einer primär intangiblen und der Kundenbeteiligung bedürftigen Leistung gemäß den Kundenerwartungen auf

einem bestimmten Anforderungsniveau zu erstellen. Sie bestimmt sich aus der Summe der Eigenschaften bzw. Merkmale der Dienstleistung, bestimmten Anforderungen gerecht zu werden.“ ([Bru08], S. 38). Handelt es sich bei der Dienstleistung um die Bereitstellung der Fahrzeuge misst Service-Qualität also die Diskrepanz zwischen dem zeit- bzw. mengenmäßigen Bedarf an Fahrzeugen und der tatsächlich realisierten oder realisierbaren Verfügbarkeit.

Die Wirtschaftlichkeit einer Flotte erhöht sich mit steigender *Kapazitätsauslastung* (kurz *Auslastung*) der Fahrzeuge. Dabei existieren unterschiedliche Kennzahlen für die Transportleistung in Abhängigkeit von der zeit- oder mengenmäßigen Wertschöpfung. Im Gütertransport werden zur Messung der Auslastung häufig die geleisteten *Tonnen-Kilometer*¹⁸ herangezogen. Bei Kurierdiensten lässt sich die Auslastung über den Anteil der Fahrzeit an der Gesamtarbeitszeit berechnen (vgl. [MRG⁺98], S. 267). Im Personentransport hängt die Definition einer Auslastung vom Abrechnungsmodell der Dienstleistung ab. Sie lässt sich in Abhängigkeit von der Beförderungsdauer, den zurückgelegten Distanzen und den erreichten Passagierzahlen im Verhältnis zur Fahrzeugkapazität bemessen.

Insbesondere im Gütertransport ist das Vorhalten von Transportkapazitäten „mit sehr hohen Fixkosten (z.B. Kapitalbindung, Steuern, Versicherung für Fahrzeuge, Löhne für Fahrer, etc.) verbunden, während die variablen Kosten trotz erhöhter Kraftstoffpreise und Maut immer noch relativ gering ausfallen. Deshalb haben die meisten Spediteure die Größe ihres Fuhrparks bis auf ein Niveau reduziert, das weit unterhalb der unteren Schranke für die variierende Nachfrage liegt. Auf diese Weise kann die Auslastung des eigenen Fuhrparks sichergestellt werden.“ ([KKS08], S. 158). Die verbleibende Nachfrage wird ggf. durch Beauftragung eines externen Partnerunternehmens befriedigt (vgl. hierzu [Chu05], S. 657f).

2.3.2 Besonderheiten einer batterieelektrischen Flotte

Der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen in einer Flotte stellt neue Anforderungen an die Planung. Anders als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren müssen zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden, damit sich ökonomische und ökologische Vorteile auch in der Praxis umsetzen lassen. Im Folgenden werden diese Aspekte erläutert und ihr

¹⁸ „Statistische Kennzahl für die Messung der Beförderungsleistung im Güterverkehr zu Lande, zu Wasser und in der Luft (Verkehrsleistung), errechnet als Produkt aus dem Gewicht der beförderten Güter und der Versandentfernung. 1 Tonnenkilometer (tkm) = Beförderung von Gütern im Gewicht von 1 t über 1 km.“ ([Gab11d]).

Strategische Ebene <i>Flotten-Aufbau</i>	Taktische Ebene <i>Flotten-Anpassung</i>	Operative Ebene <i>Flotten-Betrieb</i>
Festlegung Betriebskonzept - Geschäftsmodell - Nutzungsbedingungen	Anpassung Betriebskonzept - Preise - Nutzungsbedingungen	Kunden-Bedarf - Auftragszuordnung - Routen-Planung - Fahrzeug-Reservierung - Überwachung
Auswahl der Fahrzeuge - Hersteller / Typ - Anzahl	Anpassung der Flotte - Anzahl der Fahrzeuge	Fahrzeug-Service - Wartung & Reparatur - Reinigung - Relokation
Auswahl Lieferanten/Partner - Infrastruktur-Provider - Energie-Lieferant	Anpassung der Infrastruktur - Standort-Kapazitäten - Positionen der Standorte - Technische Leistung	
Absicherung Realisierbarkeit - Bedarfs-Deckung - Standort-Auswahl	Absicherung Realisierbarkeit - Bedarfs-Deckung - Standort-Auswahl	

Tabelle 2.1: Kernaufgaben der strategischen, taktischen und operativen Handlungsebene

Einfluss auf den Flotten-Betreiber ausgeführt. Tabelle 2.1 fasst die Planungsaufgaben der einzelnen Handlungsebenen zusammen.

Für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bedarf die Sicherstellung einer Versorgung mit Kraftstoff keiner besonderen Planung. Ein Netz aus Tankstellen ist flächendeckend verfügbar. Die Dauer eines Tankvorgangs beträgt nur wenige Minuten bis das Fahrzeug wieder seine maximale Restreichweite erreicht hat. Ein Ladevorgang kann je nach verfügbarer Anschlussleistung mehrere Stunden dauern (vgl. Abbildung 2.5). In dieser Zeit steht das Fahrzeug nicht für den Flotteneinsatz zur Verfügung, stellt keine Transportkapazität bereit und hat damit keine Auslastung.

Die *Service-Qualität* einer Flotte hängt im Falle batterieelektrischer Fahrzeuge zusätzlich von der *Versorgungs-Qualität* der Ladeinfrastruktur ab. Je mehr Ladeplätze auf den Routen der Fahrzeuge zur Verfügung stehen, umso mehr Reichweite kann das Fahrzeug insgesamt hinzugewinnen und zur Durchführung von Aufträgen nutzen. Für den Flotten-Betreiber ist es also wirtschaftlich wichtig, dass die Versorgungs-Qualität der Ladeinfrastruktur möglichst hoch ist.

Das *Rahmenbetriebskonzept* (im Folgenden kurz *Betriebskonzept*) einer Flotte beinhaltet die aus einem Geschäftsmodell abgeleiteten Prozesse und Regeln für den operativen

Betrieb der Fahrzeuge. Zu den organisatorischen Aspekten zählt die Definition von Zuständigkeiten und Schnittstellen zwischen den einzelnen Rollen. Komponenten des Konzepts werden nach Aufnahme des Betriebs im Bedarfsfall auf der taktischen Ebene angepasst. Im Falle von batterieelektrischen Fahrzeugen regelt es insbesondere die technisch-organisatorische Ausgestaltung der einzelnen Schritte des Ladeprozesses (siehe Abschnitt 2.2.3).

Maßgeblicher Bestandteil des Flotten-Aufbaus ist die Erarbeitung initialer Betriebskonzepte und deren Bewertung hinsichtlich Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Der Flotten-Betreiber muss die Versorgungssituation seiner Fahrzeuge bewerten können und auf dieser Basis einen geeigneten Infrastruktur-Betreiber auswählen (Abschnitt 2.3.5). Im Rahmen dieser Arbeit wird von der aktuellen Entwicklung ausgegangen, d.h. Ladestandorte sind selten und es ist keine flächendeckende Verfügbarkeit gegeben. Für den Flotten-Betreiber handelt es sich also nicht um ein reines Auswahlproblem. Er selbst erarbeitet in Zusammenarbeit mit einem Infrastruktur-Betreiber Vorschläge für den Auf-, Aus- oder Umbau von Ladestandorten (siehe Abschnitt 2.3.6).

Die einsatzgerechte *Fahrzeug-Auswahl* und die Festlegung einer Flottengröße ist eine klassische Aufgabe des Fuhrparkmanagements. Auf Basis eines antizipierten Bedarfs beginnt der Lebenszyklus eines Flotten-Fahrzeugs bei der Beschaffung und reicht über die Service-Prozesse bis zur Aussonderung (vgl. [Zie10], S. 115). Im Falle von Elektrofahrzeugen muss die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zusätzliche Aspekte berücksichtigen (Reichweite, Batterielebensdauer, Anschlüsse/Leistung).

Die Auswahl des *Energie-Lieferanten* erfolgt auf Basis ökologischer und ökonomischer Faktoren. Der lokalen Emissionsfreiheit im Betrieb von Elektrofahrzeugen steht die Emissionsbilanz durch Erzeugung, Verteilung und Ladung des elektrischen Stroms gegenüber (vgl. [Hel10], S. 573ff). Die *Ökobilanz* einer Flotte (exklusive der Fahrzeugherstellung) in $\frac{gCO_2}{km}$ ergibt sich aus dem gewählten Strom-Mix und den jeweiligen Fahrzeug-Verbrauchswerten. Im liberalisierten Strommarkt besteht grundsätzlich ortsunabhängig die Möglichkeit, einen Strom-Lieferanten mit einem festgelegten Mix aus Stromerzeugungsmethoden und einem vereinbarten Preis pro kWh zu wählen. Im Rahmen dieser Arbeit findet keine explizite Betrachtung eines variablen, tageszeitabhängigen Strompreises und dessen wirtschaftliche Implikationen auf Zeitpunkt und Dauer der Ladevorgänge statt (vgl. [NRS09], S. 362).

2.3.3 Kosten der Ladeinfrastruktur

Bereitstellung und Betrieb von Ladeinfrastruktur für die Flottenfahrzeuge ist für den Flotten-Betreiber - jenseits der Abrechnung der tatsächlich verbrauchten Energie - mit Kosten verbunden (vgl. [Nat11], S. 38). Die Verteilung dieser Kosten hängt individuell von den vertraglich geregelten Vereinbarungen zwischen Flotten-Betreiber und Infrastruktur-Betreiber ab. Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über zu berücksichtigende Kosten. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass *weiche Standortfaktoren* (vgl. [HN08], S. 15ff) bereits vorab in die Auswahl potentieller Standorte eingeflossen sind und nicht weiter berücksichtigt werden müssen. Zusätzliche monetäre und nicht-monetäre Aspekte werden von *Nguyen* beschrieben (vgl. [Ngu11]).

- **Erschließungskosten.** Die Erschließung von Ladeplätzen beinhaltet alle Leistungen, die vor der Installation der Ladetechnik ausgeführt werden müssen. Hierbei fallen primär *Planungs- und Baukosten* für die Bereitstellung der elektrischen Anschlüsse und der Errichtung und Markierung der Stellflächen an. Gegebenenfalls sind damit auch Kosten für Genehmigungen, Abnahmen oder die Bereitstellung der Datenverbindung verbunden.
- **Investitionen.** Die technische Installation jedes Ladeplatzes sowie zusätzliche Steuer- und Verteilungs-Komponenten bedingen Investitionen des Betreibers in die entsprechenden Güter.
- **Installationskosten.** Kosten für die Installation der technischen Einrichtungen fallen einmalig nach Erschließung und vor Inbetriebnahme an. Sie beinhalten Leistungen für Anschluss und Montage sowie Funktions- bzw. Abnahmeprüfungen der Ladeplätze.
- **Betriebskosten.** Die laufenden Betriebskosten eines Ladestandortes beinhalten beispielsweise Aufwendungen für Wartung, Nutzung der Datenverbindung und eine Stellplatzmiete (vgl. [SKW11], S. 6). Dazu zählen auch Versicherungen, Reinigungsarbeiten und routinemäßige Inspektionen.

Im betrachteten Rollenmodell (Abschnitt 2.2.1) trägt der Infrastruktur-Betreiber diese Kosten. Sie müssen für jeden potentiellen Ladestandort neu bestimmt werden und können mitunter große Unterschiede aufweisen. Insbesondere die Höhe der Erschließungskosten kann stark zwischen verschiedenen Standorten schwanken, da sie von der bereits

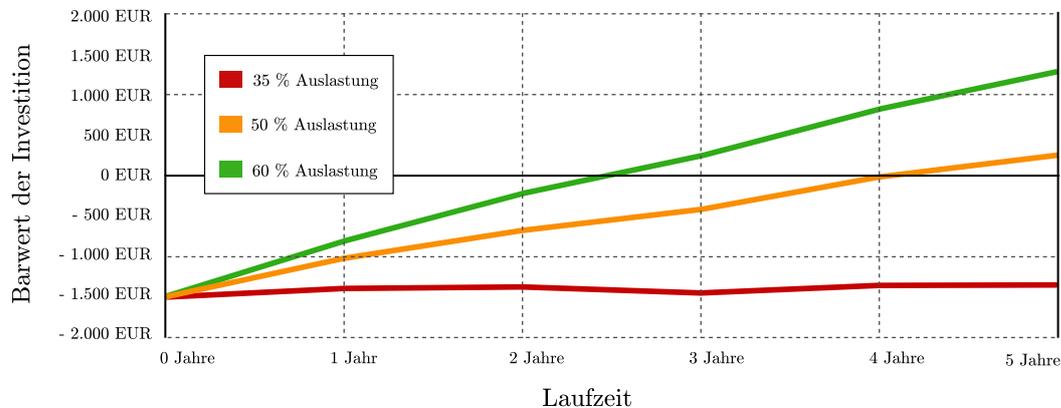


Abbildung 2.7: Wirtschaftlichkeit eines Ladeplatzes bei unterschiedlicher Auslastung¹⁹

verfügbaren Anbindung an das Stromnetz (vgl. [SMH09], S. 5) und den Baukosten für die Stellflächen abhängen.

Eine wichtige Annahme in diesem Zusammenhang ist die Unterstellung von *Exklusivität*. Soll ein Ladeplatz den Flottenfahrzeugen zur Verfügung stehen, wird er auch ausschließlich von ihnen benutzt. Sollen Ladestandorte ebenfalls von anderen Fahrzeugen genutzt werden können, sind dafür entweder stille Kapazitätsreserven einzuplanen oder die Bedarfe jener Fahrzeuge müssen in die Planung integriert werden.

Erzielt der Infrastruktur-Betreiber ausschließlich Erlöse über eine Marge am Strompreis, so ist das Betriebsergebnis eines Ladeplatzes nur ab einer minimal erzielten Auslastung positiv. Es „kann davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Betreiber ein hohes Interesse an der Auslastung ihrer Investitionen haben, da andernfalls die Kosten [...] nicht zurückverdient werden können“ ([DGV10], S. 6). Abbildung 2.7 illustriert den Kapitalwert einer Investition in einen Ladestandort für drei unterschiedliche Auslastungen. Im betrachteten Beispiel ist eine Auslastung von mindestens 50 % notwendig, um nach 4 Jahren Betriebszeit wenigstens die Kosten decken zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unterstellt, dass das exklusive Nutzungsrecht eines Ladestandortes für den Flotten-Betreiber mit Kosten verbunden ist, die für jeden Standort unterschiedlich sein können und zu unterschiedlichen Auszahlungen im Betriebszeitraum führen. Diese Betrachtung erlaubt die Abbildung verschiedener Geschäftsmodelle, von der Gesamtkostensicht eines Konsortiums bis zur Vermietung von Ladeplätzen durch externe Infrastruktur-Betreiber. Ein Ziel des Flotten-Betreibers ist *Kostenminimalität* für die exklusive Nutzung von Ladeinfrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge.

Die Stromkosten für die Versorgung der Fahrzeuge hängen direkt von der benötigten Fahrleistung ab und beeinflussen die Wirtschaftlichkeit der Flotte. Der Strompreis hat jedoch keine nennenswerte Bedeutung auf die Planung der Infrastruktur, da sein Einfluss auf die Standortentscheidungen in einem liberalisierten Strommarkt gering ist. Unterstellt wird weiterhin ein nicht relevanter Einfluss zeitabhängiger Veränderungen des Strompreises auf das Ladeverhalten gewerblicher Flottenfahrzeuge. Etwaige Preisvorteile können an allen Standorten genutzt werden.

2.3.4 Anforderungen für den operativen Betrieb

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Fahrzeugflotten darf die Service-Qualität grundsätzlich nicht bedeutend verringern. Die benötigten Fahrzeug-Bewegungen sollen durch eine bedarfsgerechte Auslegung der Ladeinfrastruktur so realisierbar sein, wie es auch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ermöglichen würden (*funktionale Äquivalenz*).

„Voraussetzung [...] ist die Kenntnis eines auf die Bedürfnisse der potentiellen Nutzer abgestimmten Anforderungsprofils für die elektrische Mobilität. Das heißt, dass ein Elektroauto aus der Sicht der Nutzer an dem Niveau des heutigen Mobilitätsverhaltens mit herkömmlichen Autos gemessen wird“ ([SMG08], S. 399).

Kostenminimalität und *Versorgungs-Qualität* sind grundsätzlich entgegengesetzte Zielsetzungen. Die Erhöhung der Versorgungsqualität erfolgt durch zusätzliche Standorte, die wiederum Kosten verursachen. *Realisierbarkeit* definiert dabei eine untere Grenze für die Versorgungs-Qualität, also die minimale Menge an Ladestandorten, so dass die Fahrzeug-Bewegungen überhaupt erst möglich werden. Darüber hinaus können weitere Anforderungen festgelegt werden, etwa geographische Abdeckungsquoten oder minimale durchschnittliche Wege zwischen Parkpositionen und Versorgungsstandorten (siehe Abschnitt 3.5.1).

In welchem Grad die Abhängigkeit von Ladeinfrastruktur die Bewegungen und Parkvorgänge der batterieelektrischen Flottenfahrzeuge beeinflussen darf, hängt vom jeweiligen Einsatzbereich ab.

¹⁹ Betrachtet wird ein einzelner Ladeplatz mit 10 Kilowatt (kW) Ladeleistung. Es fallen Installationskosten in Höhe von 1.500 EUR an, die Investition über 2.500 EUR wird linear über 5 Jahre abgeschrieben. Erlöse werden über einen Anteil von 0,3 ct. je kWh erzielt. Pro Jahr fallen zusätzliche Betriebskosten zwischen 300 und 500 EUR an.

Unabhängig von den spezifischen Eigenschaften einer Flotte teilt sich die Realisierbarkeit in mehrere Teilanforderungen ein:

- **Räumliche Nähe.** Der Einsatzbereich der Flotte bestimmt die geographischen Start- und Zielpositionen der Fahrzeuge. Im Aufladeprozess (vgl. Abschnitt 2.2.3) bestimmt die Gesamtdauer eines Parkvorgangs die hinzugewinnbare Reichweite durch den Energietransfer. Ladestandorte werden an Positionen benötigt, in deren Nähe Parkvorgänge vieler Flotten-Fahrzeuge mit langer Dauer vorkommen.
- **Kapazität.** Die benötigte Kapazität eines Standortes hängt von der maximal benötigten Anzahl zeitlich parallel zu versorgender Fahrzeuge ab. Eine Kapazitätseinheit am Ladeplatz wird nach Beendigung des Energietransfers erst wieder freigegeben, wenn das Fahrzeug bewegt wird. Es muss also sichergestellt werden, dass genügend Ladeplätze vorhanden sind, um alle zeitlich parallel ablaufenden Ladevorgänge in der Gesamtdauer des Parkvorgangs zu ermöglichen.
- **Leistung.** Die zu fahrenden Distanzen zwischen zwei Ladeprozessen bestimmen den fortlaufenden Reichweiten-Bedarf eines Fahrzeugs. Die Ladeleistung an den Standorten muss ausreichen, um in Abhängigkeit von der Parkdauer genügend Reichweite für die Deckung dieses Bedarfs zu ermöglichen.

Im operativen Betrieb ergeben sich zusätzliche Anforderungen, die in der Planungsphase bedacht werden sollten, aber nicht explizit abgebildet werden müssen. Darunter fällt die *Zugänglichkeit*: Fahrzeug-Nutzer müssen bei der Lokalisierung Zugangsbeschränkungen im nicht- oder teil-öffentlichen Bereich überwinden können und den Ladeplatz durch eine geeignete Beschilderung auffinden können. Der Aspekt *Ergonomie* betrifft die Benutzerfreundlichkeit des Ladeprozesses und den damit verbundenen Zeitaufwand. Die Anforderung der *Legalität* betrifft die Einhaltung rechtlicher Vorgaben im Aufbau und Betrieb von Ladestandorten, etwa bezüglich Genehmigungsverfahren, Eichpflicht, Datenschutz, Besteuerung und Barrierefreiheit (vgl. [Bac11] und [Gro10]). Unabhängig von der Lademöglichkeit existieren immer auch vielfältige Anforderungen an den Parkraum selbst (siehe [PWJZ09]).

2.3.5 Bewertung der Versorgungs-Qualität

Der Flotten-Betreiber strebt vor Aufnahme des Geschäftsbetriebs mit einem spezifischen Betriebskonzept an, dass die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur im operativen

Betrieb erfüllt werden können. Andernfalls können die Auswirkungen einer Unterversorgung der Fahrzeuge durch Wegfall oder Nichterfüllung von Aufträgen zu wirtschaftlichen Schäden führen. Zum Zeitpunkt der Planung liegen allerdings noch keine gemessenen Daten der Flotte vor. Es wird also ein geeignetes Verfahren benötigt, um abzuschätzen, ob die Fahrzeuge ihre Reichweitenbedarfe an den verfügbaren Ladestandorten befriedigen können.

Wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, ist ein Ziel der betrachteten Planung die Erfüllbarkeit der Aufträge im gleichen Maße wie durch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren. Der Planung liegen festgelegte Fahrzeug-Bewegungen zugrunde, die für Elektrofahrzeuge durch die bedarfsgerechte Verfügbarkeit von Ladestandorten ermöglicht werden. Zum Zeitpunkt der Planung sind die exakten zukünftigen Bewegungen und Parkvorgänge der Flotten-Fahrzeuge unbekannt. Mit Ausnahme einer Vollversorgung (genügend Ladestandorte an jeder Parkposition) kann ein Versorgungsengpass also niemals ganz ausgeschlossen werden.

Um die Versorgungssituation der Fahrzeuge trotzdem vorab bewerten und damit das Risiko einer Unterversorgung abschätzen zu können, werden Methoden zur *Prognose* und *Simulation* benötigt. Dort betrachtete Szenarien müssen möglichst repräsentativ für die zukünftigen Flottenaktivitäten sein, damit eine valide Aussage getroffen werden kann. Ein geeignetes *Simulationsmodell* muss also die Charakteristika der Flotte genau abbilden.

Zur Identifikation charakteristischer Eigenschaften einer Flotte werden Prämissen und Parameter benötigt, die empirisch aus erhobenen Daten ermittelt werden müssen. Als Datengrundlage können dem Flotten-Betreiber *Vergangenheitsdaten* der Fahrzeugbewegungen von mindestens einer existierenden Flotte über einen längeren Zeitraum dienen. Aus den geographischen und zeitlichen Daten über die Fahrzeugaktivitäten lassen sich Eingangsdaten für das Prognoseverfahren gewinnen.

Der *Reichweitenbedarf* eines Fahrzeugs ist eine endliche, alternierende Kette von *Parkvorgängen* und *Fahrzeugbewegungen*. Ein *Parkvorgang* beschreibt das Fahrzeug im Ruhezustand zwischen zwei Fahrzeugbewegungen, besitzt also eine geographische Position und eine Dauer. Eine *Fahrzeugbewegung* wird beschrieben durch eine Distanz und geographische Start- und Zielpositionen. Die tatsächliche Route des Fahrzeugs zwischen zwei Parkvorgängen ist nicht relevant.

Der *Versorgungsbereich* eines Ladestandortes spannt eine geographische Fläche auf, die eine bestimmte Menge an Parkpositionen abdeckt. Diesen Parkpositionen ist gemeinsam, dass der Abstand zum Versorgungsstandort für ein gewähltes Distanzmaß

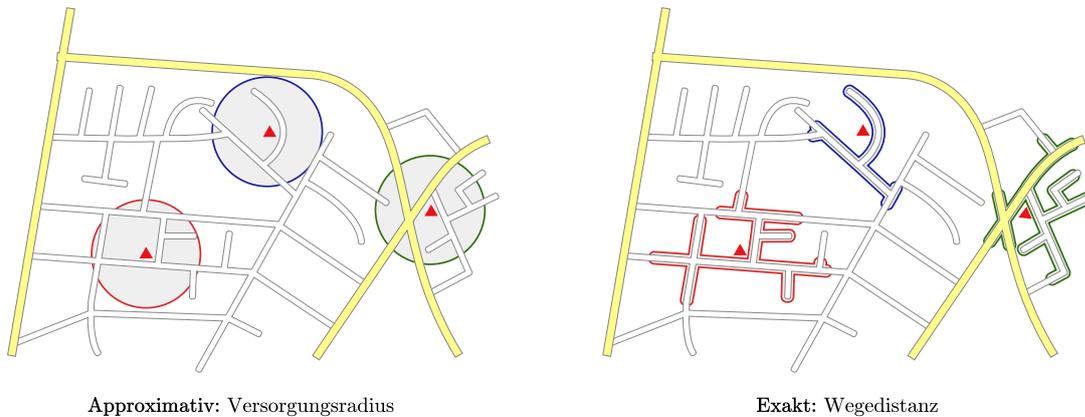


Abbildung 2.8: Approximative und exakte Bestimmung des Versorgungsbereichs

unterhalb eines definierten Grenzwertes liegt, so dass der Aufwand für die Verwendung des Standortes vertretbar ist. Für die operative Umsetzung des Betriebskonzepts muss sichergestellt werden, dass diese Annahme das erwartete oder forcierte Verhalten der Fahrzeug-Nutzer möglichst korrekt abbildet.

Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft den Unterschied zwischen exakter und approximativer Definition des Versorgungsbereichs eines Ladestandortes. Im exakten Fall muss für jede mögliche Parkposition eines Fahrzeugs die Distanz (Weg oder Zeit) zum Standort bestimmt werden, um die ggf. eingeschränkte Zugänglichkeit im Straßennetz abzubilden. Im approximativen Fall definiert eine einfache geometrische Form, etwa ein Kreis oder ein Rechteck, die Menge aller möglichen Fahrzeugpositionen²⁰. Zur Bestimmung der abgedeckten Flächen kann ein Geographical Information System (GIS) eingesetzt werden (vgl. [Kic99], S. 104f).

Das erwartete Verhalten der Fahrzeug-Nutzer bei der Lokalisierung eines Ladestandortes hängt von den Nutzungsbedingungen im Betriebskonzept ab. Die Verwendung von Ladestandorten kann für den Fahrzeug-Nutzer vorgeschrieben sein bzw. durch Bonus- oder Sanktionsmaßnahmen forciert werden. Das Verhalten ist also ein Systemparameter der Simulation, welches geeignet beschrieben werden muss. Es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeug-Nutzer am Endpunkt jeder Fahrt über das benötigte Wissen verfügen, in welchen Versorgungsbereichen sie sich ggf. befinden. Hier können technische Lösungen im Fahrzeug eingesetzt werden, die im Rahmen der Lokalisierung sowohl das Auffinden als auch das Reservieren eines Ladeplatzes ermöglichen.

²⁰ Geographische Beschaffenheiten können größere Umwege erfordern. Für ein Stadtgebiet lässt sich die reale Distanz z.B. über einen *Umwegfaktor* von der Luftlinie abschätzen (vgl. [BK83], S. 70).

Im Rahmen der Simulation werden Szenarien für die Reichweitenbedarfe der Flotten-Fahrzeuge über einen bestimmten Zeitraum betrachtet. Liegt ein Parkvorgang im Versorgungsbereich eines oder mehrerer Ladestandorte, kann das Fahrzeug diesen für die gesamte Dauer nutzen. Die zeitlich parallele Betrachtung aller Flottenfahrzeuge berücksichtigt die Kapazität des Standortes und weist Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Auslastung ab.

Die Reichweiten-Bedarfe der Flotten-Fahrzeuge können aufgrund fehlender Ladestandorte oder -zeiten teilweise unbefriedigt bleiben. Um die Unterdeckung dieser Bedarfe quantifizieren zu können, wird eine *Fehlreichweite* je Fahrzeug bestimmt. Sie entspricht der Gesamtsumme aller nicht realisierbaren (Teil-)Distanzen aufgrund unzureichender Versorgung. Eine Ladeinfrastruktur heißt *realisierbar*, wenn kein Fahrzeug eine Fehlreichweite aufweist.

2.3.6 Optimale Auswahl potentieller Ladestandorte

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine kooperative Beziehung zwischen Flotten-Betreiber und einem oder mehreren Infrastruktur-Betreibern betrachtet. Der Flotten-Betreiber bewertet nicht nur die Versorgungssituation einer vorgegebenen Ladeinfrastruktur, sondern erarbeitet selbst Vorschläge für den Auf- oder Umbau von Ladestandorten. Der Flotten-Betreiber muss dabei alle Kosten (siehe Abschnitt 2.3.3) betrachten, die für eine exklusive Nutzung der ausgewählten Ladeplätze anfallen.

Die Identifikation potentieller Standorte erfolgt im Rahmen der Vorplanung und ermittelt unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien einen *Standort-Katalog* für die weitere Planung. Der Katalog enthält *realisierbare Standorte*, die exklusiv für die Flottenfahrzeuge zur Verfügung gestellt werden können. Ein Standort besteht dabei aus einer Menge von *Ladeplätzen* (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Der Katalog enthält je Standort verschiedene Ausbaustufen, die sich hinsichtlich ihrer Kapazität unterscheiden. Als *Kapazität* einer Ausbaustufe ist dabei die Anzahl an Fahrzeugen definiert, die zeitlich parallel den Standort zur Energieübertragung nutzen können. Davon unabhängig sind die Anzahl technischer Installationen und die Menge sonstiger Parkflächen.

Abhängig von baulichen Gegebenheiten und den Anschlusspunkten am Fahrzeug sind verschiedene räumliche Anordnungen der Parkflächen möglich (vgl. [PWJZ09], S. 107ff). Die Verbindung zwischen Fahrzeug und Anschlusspunkt muss durch ein ausreichend

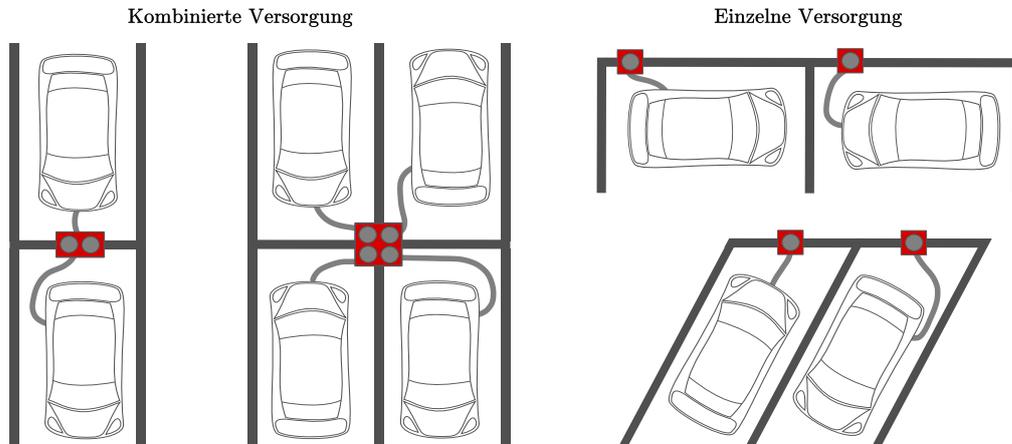


Abbildung 2.9: Parkflächen-Layout verschiedener Versorgungskonzepte

dimensioniertes Kabel möglich sein ohne dabei den Komfort beim Ein- oder Ausstieg oder die Beladung des Fahrzeugs zu behindern. Fahrzeuge besitzen keine einheitliche Position des Stromanschlusses, so dass eine bestimmte Parkrichtung vorteilhaft sein kann. Abbildung 2.9 zeigt verschiedene Layouts für die Parkflächen, die mit unterschiedlichen Kapazitäten und Erschließungskosten verbunden sind.

Um eine geforderte Versorgungs-Qualität zu erreichen, müssen Standort- und Kapazitäts-Entscheidungen getroffen werden. Die integrierte Betrachtung beider Aspekte ermöglicht eine kostenoptimale Entscheidung für das gesamte Betriebsgebiet der Flotte.

2.4 Entscheidungsunterstützungssysteme

Ein computergestütztes System, das den Anwender in den verschiedenen Phasen eines Planungs- und Entscheidungsprozesses begleitet und die hierfür benötigten Daten, Modelle und Methoden enthält, heißt Entscheidungsunterstützungssystem (EUS) bzw. Decision Support System (DSS). Diese Systeme, auch *Planungssysteme* genannt, besitzen als charakteristisches Merkmal eine „ausgeprägte Modell- und Methodenorientierung, durch die eine situationsspezifische Unterstützung des Managers im Sinne einer Assistenz gewährleistet wird.“ ([GGD08], S. 63). Sie grenzen sich ab zu den *Management Information Systemen (MIS)*, bei denen die automatisierte Generierung von Führungsinformationen ohne die Verwendung von Modellen oder speziellen Methoden im Vordergrund steht (vgl. [GGD08], S. 56). Die wissenschaftliche Beschäftigung mit EUS begann Anfang

der 1970er Jahre und hat sich seitdem zu einer eigenständigen akademischen Disziplin entwickelt (vgl. [Eom11], S. 49f).

EUS werden in komplexen Planungsaufgaben mit vielen Entscheidungsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen eingesetzt. Die Generierung gültiger Ergebnisse wird durch eine systemische Validierung abgesichert und reduziert die Möglichkeiten menschlicher Fehler. EUS sind zur Lösung semi- und unstrukturierter Problemstellungen geeignet, da sie einen Erkenntnis- und Erfahrungsgewinn durch verschiedene Methoden und Perspektiven fördern (vgl. [Hol08], S. 30f). Einsatzbereiche finden sich auf allen zeitlichen Handlungsebenen, von der Planung einer langjährigen Unternehmensstrategie bis zum operativen Einsatz in tagesaktuellen Entscheidungssituationen. Die Kompetenzen und das Urteilsvermögen der Entscheidungsträger werden nicht ersetzt, sondern durch ein zusätzliches Werkzeug ergänzt.

2.4.1 Daten und Berichte

Integraler Bestandteil eines EUS ist eine *Datenbank* (vgl. [GGD08], S. 70). Komplexe Planungsaufgaben benötigen eine Vielzahl verschiedener Daten, die aus mehreren Quellen in verschiedenen Formaten stammen können. Die Datenbank kapselt die Instanzen verschiedener *Datenmodelle*, welche die Struktur und Gültigkeitskriterien der benötigten Eingabedaten vorgeben.

Daten können an einem Speicherort in einem spezifischen Format vorliegen, das nicht ohne Weiteres zur Verwendung in der Planung geeignet ist (*Rohdaten*). Die Zwischenschicht zwischen Rohdaten und dem EUS lässt sich als *Data Warehouse* beschreiben (vgl. [MOA08]). Es enthält „die Bausteine, die für die Überführung der Inhalte aus den zumeist operativen Vorsystemen in die Informationsspeicher zuständig sind“ (vgl. [GGD08], S. 132). Daten müssen aus Quellen über geeignete Schnittstellen entnommen (*Extraction*), über Berechnungen zu neuen Daten gewandelt (*Transformation*), und schließlich in die Datenbank des Zielsystems geschrieben werden (*Loading*)²¹.

Die Aufbereitung von Ergebnisdaten zu Entscheidungsunterlagen erfolgt in einem EUS über *Berichte* (engl. *Reports*). Mit *Reportgeneratoren* auf Basis zielgruppengerechter Vorlagen werden tabellarische oder graphische Ergebnisse erzeugt (vgl. [GGD08], S. 70f).

²¹Die sukzessive Ausführung dieser Schritte wird in der Literatur als Akronym unter dem Namen *ETL*-Prozess zusammengefasst (vgl. [MOA08], S. 212).

2.4.2 Modelle

Entscheidungsunterstützungssysteme enthalten funktionale Komponenten zum Generieren, Ablegen, Verwalten und Auffinden von Modellen (vgl. [GGD08], S. 68). Den Begriff *Modell* definiert das *Gabler Wirtschaftslexikon* wie folgt:

„Auf der Basis von Funktions-, Struktur- oder Verhaltensähnlichkeiten bzw. -analogien zu einem Original werden Modelle zum Zwecke speziell solcher Problemlösungen benutzt, deren Durchführung am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre“ ([Gab11b]).

Im Kontext von EUS werden *Erklärungs- und Entscheidungsmodelle* der Planungsfragestellung betrachtet, welche die relevanten Entscheidungsgrößen (Freiheitsgrade) und Einflussfaktoren abbilden. Die hierbei verwendeten Formalismen zur Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes stammen aus der Disziplin *Operations Research* und werden zur Prognose, Simulation und Optimierung verwendet.

Mit Hilfe von *Simulationsmodellen* wird das Verhalten eines Systems unter stochastischen Einflüssen und Variation der Eingangsparameter untersucht. Während die kontinuierliche Simulation den Zustand eines Systems als reelle Funktion der Zeit beschreibt, arbeitet die diskrete Simulation ereignisgesteuert mit definierten Zustandsprüngen (vgl. [SM09], S. 285).

Entscheidungsmodelle mit einer *Zielfunktion* heißen *Optimierungsmodelle*. Gesucht wird dabei eine zulässige Lösung des Modells, die den bestmöglichen Wert für die Zielfunktion erreicht. Während deterministische Optimierungsmodelle von unveränderlichen Eingangsparametern ausgehen, berücksichtigen stochastische Optimierungsmodelle zusätzlich Unsicherheiten. Aufgrund wichtiger mathematischer Eigenschaften bei der Lösung des Modells werden vorwiegend *lineare* Optimierungsmodelle betrachtet, bei der Restriktionen und Zielfunktion linear von den Entscheidungsgrößen abhängen. Mehrkriterielle Optimierungsmodelle besitzen mehrere, ggf. konkurrierende Zielsetzungen, die nicht „adäquat in eine einzelne Zielfunktion integriert werden können“ (vgl. [SM09], S. 118f).

2.4.3 Methoden

Methoden im Sinne eines Entscheidungsunterstützungssystems sind algorithmische Verfahren, die auf Instanzen der enthaltenen Modelle angewendet werden. Sie reichen „von einfachen Konsolidierungs- und Aggregationsverfahren über anspruchsvolle finanzma-

thematische Berechnungen, Regressions-, Korrelations- und Zeitreihenanalysen bis hin zu den komplexen, linearen und nichtlinearen Optimierungs- und Simulationsverfahren“ ([GGD08], S. 69).

Prognoseverfahren lassen sich in *qualitative* und *quantitative* Verfahren unterteilen. Qualitative Verfahren heißen auch subjektive Verfahren, ihre Ergebnisse „sind in der Regel von den Urteilen eines oder mehrerer Experten abgeleitet“ (vgl. [SM09], S. 16). Quantitative Verfahren wie die Zeitreihen- oder Regressionsanalyse stammen aus der Statistik (vgl. [SM09], S. 17).

Simulationsverfahren ermöglichen die Ausführung und Evaluierung eines Simulationsmodells in einer *Simulationsumgebung*. Sie erlauben beispielsweise in einem EUS die Bewertung eines Planungsergebnisses unter stochastischen Einflüssen. Simulation und Optimierung werden auch gemeinsam in einem iterativen Kreislauf eingesetzt, dabei stellt das Simulationsmodell „als ‚Black Box‘ den für die Optimierung benötigten Zusammenhang zwischen den Entscheidungsvariablen (Input) und den Zielvariablen (Output) her“ ([SM09], S. 303).

Entscheidungsunterstützungssysteme bedienen sich für die Lösung linearer Optimierungsmodelle geeigneter Verfahren, die eine optimale Lösung in endlicher Zeit finden können (*Solver*). Für lineare Programme (*LP*) existieren Lösungsverfahren wie die *Simplex-Methode* oder *Innere-Punkte-Verfahren* (vgl. [SM09], S. 44f). Bei der *gemischt-ganzzahligen* Optimierung (*Mixed Integer Programming*) existieren zusätzlich Ganzzahligkeitsbedingungen für Variablen, dort kommen Verfahren wie *Branch & Bound* zum Einsatz. *Heuristische Verfahren* werden problemspezifisch eingesetzt, um schnell gute Lösungen - ohne Optimalitätsgarantie - für komplexe Modelle zu finden.

Zur Lösung linearer, gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme stehen heute auf dem Markt leistungsfähige, kommerzielle Software-Systeme (engl. *Optimization Engines* oder *MIP-Solver*) wie IBM ILOG CPLEX²², Gurobi Optimizer²³ oder MOPS²⁴ zur Verfügung. Diese Systeme können über Schnittstellen direkt an Entscheidungsunterstützungssysteme angebunden werden. Hierbei wird eine Modellinstanz zunächst erzeugt und an den Solver übergeben. Nach Abschluss des Lösungsprozesses werden die Werte der Entscheidungsvariablen ausgelesen und in die Datenbank zur weiteren Verwendung zurückgeschrieben.

²² siehe <http://www.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimization-studio/>.

²³ siehe <http://www.gurobi.com/>.

²⁴ siehe <http://www.mops-optimizer.com/>.

2.5 Zusammenfassung der Planungsaufgabe

Das zentrale Ziel der vorgestellten Planung ist die Absicherung der Realisierbarkeit eines Flotten-Betriebskonzepts. Der Flotten-Betreiber soll in die Lage versetzt werden, die Versorgungssituation der Fahrzeuge vor Inbetriebnahme der Ladeinfrastruktur zu simulieren. Mit Hilfe dieser virtuellen Inbetriebnahme sollen Parameter für das Betriebskonzept abgestimmt und in Kooperation mit dem Infrastruktur-Betreiber eine kostenoptimierte Auswahl der benötigten Ladestandorte vorgenommen werden können.

Als Grundlage für die Flottensimulation werden Daten und Methoden benötigt, mit denen sich die Fahrzeugbewegungen der Zukunft abschätzen lassen. Die spezifischen Charakteristika der Flotte müssen dafür zunächst formalisiert und erhoben werden, um repräsentative Szenarien erzeugen zu können (*Szenario-Generierung*). Obwohl jede Prognose mit einer Unsicherheit behaftet ist, soll eine möglichst hohe Validität des Ergebnisses angestrebt werden.

Eingangsparameter der Planung ist ein Katalog aller realisierbaren Ladestandorte und deren qualitative und quantitative Bewertung. Um hierbei Vorschläge für neue, noch nicht betrachtete Standorte machen zu können, muss ein geeignetes Verfahren deren Position ermitteln und das Potential ausweisen können.

Die Qualität eines Planungsergebnisses, z.B. Kosten, Versorgungs-Qualität, Standort-Auslastungen oder Kapazitäts-Reserven, muss durch den Flotten-Betreiber bewertet werden können (*Simulation*). Zu diesem Zweck werden geeignete Kennzahlen benötigt, die eine objektive Bewertung zulassen bzw. als Parameter für die verwendeten Methoden dienen können. Der Planer kann damit Mindestanforderungen an das Ergebnis definieren und verschiedene Lösungen vergleichen.

Während der Infrastruktur-Betreiber eine möglichst hohe Auslastung seiner Standorte bei minimalen Kosten anstrebt, hat der Flotten-Betreiber primär eine hohe Versorgungsqualität als Ziel. Die Sicherstellung einer festgelegten Versorgungs-Qualität bei gleichzeitiger kostenminimaler Auswahl von Standorten und Kapazitäten erfordert schließlich ein geeignetes mathematisches *Optimierungsverfahren*.

Stand der Technik

Gegenstand dieses Kapitels ist die Ausarbeitung des aktuellen wissenschaftlichen Standes in der Literatur. Der erste Teil befasst sich mit Verkehrs- und Verhaltensmodellen zur Beschreibung von Fahrzeugbewegungen. Im Anschluss wird für die optimierte Auswahl von Versorgungsstandorten eine geeignete Problemklasse diskreter Abdeckungsprobleme beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über Analyse-Kennzahlen zur Bewertung von Planungsergebnissen. Die im vorherigen Kapitel beschriebene Planungsaufgabe lässt sich in drei Teilaufgaben gliedern:

- **Szenario-Generierung.** Die Bewertung einer Ladeinfrastruktur erfordert die Auswertung beobachteter bzw. antizipierter Fahrzeugbewegungen über einen längeren Zeitraum. Ein *Bewegungsszenario* fasst dabei alle Park- und Fahrtaktivitäten einer Menge von Fahrzeugen in einem bestimmten Zeitraum zusammen. Zur Erzeugung valider Szenarien wird eine geeignete Methode benötigt.
- **Simulation der Versorgung.** Die Interaktion von Fahrzeugen mit Ladeinfrastruktur unterliegt verschiedenen Einflüssen. Auf Basis der Bewegungsszenarien, Fahrzeugparametern und Verhaltenshypothesen wird die Versorgung simuliert und ausgewertet. Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist eine geeignete Simulationsumgebung zur Bestimmung der Analyse-Kennzahlen erforderlich.
- **Kostenoptimale Standortauswahl.** Die Bewertung einer Ladeinfrastruktur basiert auf einer festgelegten Menge geographischer Standorte mit einer Kapazität verfügbarer Ladeplätze. Die exklusive Verfügbarkeit von Standorten für die Flottenfahrzeuge ist mit Kosten verbunden. Zur kostenminimalen Auswahl von Standorten bei gleichzeitiger Versorgungssicherheit wird ein geeignetes Optimierungsmodell benötigt.

Zur Aufgabe der Szenario-Generierung werden zunächst im Abschnitt 3.1 allgemeine Verkehrsflussmodelle erläutert und die Modellierung und Bestimmung von Verkehrsnachfrage beschrieben. Zur Ableitung von Fahrzeugbewegungen beschreibt Abschnitt 3.2 grundlegende und komplexere Verhaltensmodelle.

Abschnitt 3.3 erläutert Ansätze zur Simulation von Elektrofahrzeugen und -flotten. Neben der Simulation der Fahrzeugtechnik und der aggregierten Auswirkung auf das Energienetz werden Ansätze vorgestellt, die den Betrieb batterieelektrischer Fahrzeug in gewerblichen Flotten untersuchen.

Der Einsatz mathematischer Optimierungsmodelle zur Standortplanung wird in Abschnitt 3.4 ausgearbeitet. Nach einer Beschreibung relevanter Distanzmaße und deren Berechnung erfolgt die Beschreibung diskreter Abdeckungsprobleme. In der weiteren Betrachtung wird die spezielle Problemklasse der FIFLP vertieft, Anwendungen in der Planung von Versorgungsinfrastruktur ausgearbeitet und ein Ansatz aus der Planung unter Wettbewerb betrachtet.

Das Kapitel schließt mit einer Zusammenstellung relevanter Kennzahlen, die zum Vergleich verschiedener Modelllösungen und zur quantifizierten Bewertung von Versorgungsqualität in Simulations- und Optimierungsmodellen eingesetzt werden können.

Notation

Die Notationen der in diesem Kapitel vorgestellten Modelle sind in den Quellen sehr unterschiedlich. Zur Verbesserung der Lesbarkeit und der leichteren Erschließung von Zusammenhängen wurden die verwendeten Symbole für Mengen und Variablen weitestgehend vereinheitlicht. Die Summation erfolgt durchgängig über Mengenelemente anstelle von Zahlen-Indizes. Für alle Entscheidungsvariablen gilt, sofern nicht anders angegeben, eine Nichtnegativitätsbedingung (vgl. [SM09], S. 40).

3.1 Verkehrsflussmodelle

Verkehrsflussmodelle (im Folgenden kurz *Verkehrsmodelle*) sind strukturelle Abstraktionen realer Verkehrsnetze und erlauben die Analyse, Steuerung, Planung und Prognostizierung von Verkehrsströmen. Neben den hier betrachteten *Straßenverkehrsnetzen* gibt es zahlreiche Anwendungen für den Güterverkehr und den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Abbildung 3.1 illustriert das Zusammenspiel zwischen Modellen und empi-

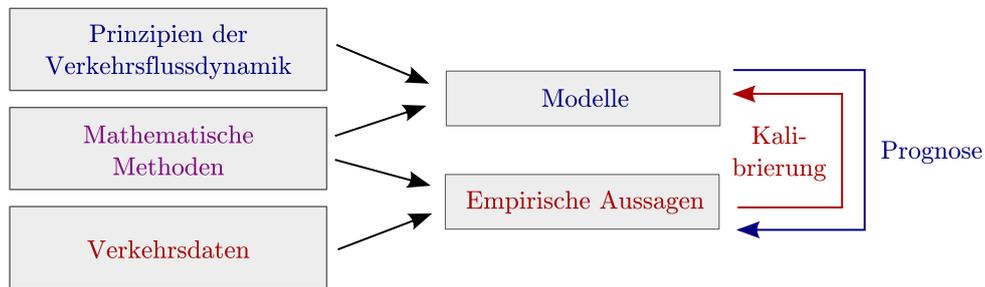


Abbildung 3.1: Verkehrsmodelle und Verkehrsdaten
(Quelle: [TK10], S. 1)

rischen Aussagen. „Die durch Simulationen gewonnenen Modellaussagen werden mit empirischen Daten verglichen. So werden die Modellparameter kalibriert. Ein kalibriertes Modell kann zur Verkehrsprognose und für weitere Anwendungen eingesetzt werden“ ([TK10], S. 1).

Verkehrsmodelle lassen sich nach *Eckey* und *Stock* hinsichtlich ihres *Aggregationsniveaus*, der *verwendeten statistischen Verfahren* und den eingesetzten *Modelltypen* klassifizieren (vgl. [ES00], S. 149ff). *Makroskopische Verkehrsmodelle* betrachten den Straßenverkehr großer Räume auf einem aggregierten Niveau, es werden etwa Gebiete zu *Verkehrszellen* zusammengefasst und Ströme zwischen den Zellen beschrieben. *Mikroskopische Verkehrsmodelle* bilden dagegen ein Netz mit einer hohen Detailtiefe ab und betrachten einzelne Straßen und Fahrzeuge. *Sequentielle Verkehrsmodelle* lösen schrittweise einzelne Unterprobleme, während *simultane Verkehrsmodelle* alle Werte der Freiheitsgrade gleichzeitig bestimmen.

3.1.1 Modellierung der Verkehrsnachfrage

Schiller ([Sch07], S. 48) definiert die *Verkehrsnachfrage* als die Anzahl von Subjekten oder Objekten einer verhaltenshomogenen Gruppe g , die eine Ortsveränderung $O_{g,i,j}$ von einer Quelle i zu einem Ziel j tätigen. Die Summe über alle Ortsveränderungen einer aktivitätenhomogenen Gruppe g an einer Quelle i ergibt das *Quellverkehrsaufkommen* $Q_{g,i}$, zu einem Ziel j das *Zielverkehrsaufkommen* $Z_{g,j}$. Das Quellverkehrsaufkommen $Q_{g,i}$ und das Zielverkehrsaufkommen $Z_{g,j}$ einer aktivitätenhomogenen Gruppe g lässt zwischen den Quellen i und den Zielen j wiederum den Verkehrsstrom $v_{g,i,j,k,r,t}$ mit einem Verkehrsmittel k über eine Route r zu einem Zeitpunkt t entstehen.

Ein Straßennetzwerk lässt sich als gerichteter Graph $G(Z, L)$ abstrahieren, wobei Z die Menge aller *Zentroiden* (Knoten) und L die Menge aller *Links* (Kanten) zwischen den Knoten enthält. Für einen definierten Zeitraum bezeichnet $x_{i,j}$ die *Gesamtflussmenge* aller Fahrten von Knoten $i \in Z$ zu $j \in Z$, sie lässt sich als simultane *Verkehrsnachfrage* auffassen. Da der betrachtete Zeitraum für alle Kanten identisch ist, lässt sich die absolute Nachfrage äquivalent als *Verkehrsflussrate* auffassen.

Die Menge $P_{i,j} \subseteq P$ bezeichnet die Teilmenge aller Pfade P zwischen den Knoten $i, j \in Z$. Ein Pfad $((a, b), (b, c), \dots, (x, y), (y, z)) \in P_{a,z}$ besteht aus einer endlichen Folge von Kanten, wobei die Folge am Quellknoten beginnt, jeder Startknoten dem Endknoten der vorherigen Kante entspricht, und die letzte Kante am Zielknoten endet. Der Wert $y_{p,i,j}$ bezeichnet die *Pfadflussmenge* von i nach j über den Pfad p . Der Indikator $\delta_{p,i,j} \in \{0, 1\}$ gibt an, ob der Pfad p über die Kante $(i, j) \in L$ verläuft.

Die Gesamtflussmenge $x_{i,j}$ zwischen den Knoten $i, j \in Z$ zerfällt vollständig in die Pfadflussmengen $y_{p,i,j}$ für alle $p \in P_{i,j}$, so dass gilt:

$$x_{i,j} = \sum_{p \in P_{i,j}} y_{p,i,j} \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.1)$$

Die *Kantenflussmenge* $z_{i,j}$ einer Kante $(i, j) \in L$ ergibt sich aus allen Pfadflussmengen, die über die Kante (i, j) verlaufen:

$$z_{i,j} = \sum_{p \in P} \delta_{p,i,j} \cdot y_{p,i,j} \quad \forall (i, j) \in L \quad (3.2)$$

Die quadratische $|Z| \times |Z|$ Matrix X mit den Element $x_{i,j}$ wird in der Literatur *Quell-Ziel-Matrix* bzw. *Origin-Destination Matrix (OD Matrix)* genannt. Das Schätzen dieser Matrix aus empirischen Daten und weiteren Annahmen über das Verhalten von Verkehrsteilnehmern ist Aufgabe der *Verkehrsnachfrageschätzung* (engl. *Trip Demand Estimation Problem*) (vgl. [CN88], S. 437f). Dabei werden gemessene Kantenflussmengen aus Verkehrszählungen verwendet, Annahmen über Wegekosten und Wahlverhalten der Fahrer herangezogen und schließlich die Verteilung der Gesamtnachfrage auf alle möglichen Pfade geschätzt.

Für eine präzisere Beschreibung der Verkehrsnachfrage muss die *Zeitabhängigkeit* und ihre Auswirkung auf die realen Kantenflussmengen verschiedener Zeitperioden betrachtet werden. OD-Matrizen und alle Pfad- und Kantenflussmengen erhalten eine zusätzliche Zeitdimension. Mittlerweile existieren Verfahren, die relativ präzise ohne zusätzliche

Annahmen über das Verhalten der Fahrer mehrperiodische OD-Matrizen aus Messdaten schätzen können (siehe etwa [CJL09]).

Verkehrsflussmengen werden in diesem Zusammenhang zeitlich aggregiert betrachtet. Sie ermöglichen Schlüsse auf die *Verkehrsdichte* von Kanten im Netzwerk und die Identifikation von Engpässen. Neu- und Ausbauprojekte von Straßen können bewertet werden, wenn die flussmengenabhängige Wegezeit durch veränderte Kapazitäten geringer wird und damit eine höhere Verkehrsnachfrage realisierbar wird.

3.1.2 Vorgehensmodelle zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage

Zur Ableitung quantifizierter Verkehrsnachfrage haben sich in der Literatur zwei verschiedene Ansätze entwickelt. *Wegebasierte Modelle (Trip Based Models)* betrachten Einwegfahrten zwischen geographischen Punkten, bei denen jeweils Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel und Verkehrswege geschätzt werden. *Aktivitätenbasierte Modelle (Activity Based Models)* gehen davon aus, dass eine Teilmenge individueller Aktivitäten zur Durchführung von Fahrten führt und diese insbesondere in einer bestimmten zeitlichen Reihenfolge betrachtet werden müssen.

Wegebasierte Modelle

In der Literatur hat sich für die Bestimmung der wegebasierten Verkehrsnachfrage das sequentielle *Vier-Stufen-Modell* (engl. Four Step Model (FSM)) etabliert (vgl. [McN00b], S. 52ff und [ES00], S. 176ff). Abbildung 3.2 illustriert die Umsetzung in einem Straßenverkehrsnetzwerk. Als erster Schritt wird im Rahmen der *Verkehrserzeugung* (engl. *Trip Generation*) für alle betrachteten Netzwerkpunkte eine absolute Quell- und Zielverkehrsmenge festgelegt. Mit Hilfe von *Verkehrserzeugungsmodellen* werden Einflussfaktoren auf das Verkehrsaufkommen beschrieben und auf das Netzwerk umgelegt. Diese Modelle können „in Steigerungsfaktorenmodelle (als Überschlagsmodelle), Regressionsmodelle und Modelle, welche mit verhaltensspezifischen Kennwerten arbeiten, unterteilt werden“ ([Sch07], S. 51).

Aus den aggregierten Quell- und Zielverkehrsmengen (den Randsummen der OD-Matrix) werden bei der *Verkehrsverteilung* (engl. *Trip Distribution*) einzelne Fahrten (engl. *Trips*) zwischen Netzwerkknoten generiert und ihre Häufigkeit bestimmt. Auf Basis von Annahmen über Wegekosten (z.B. Distanzen oder Reisezeit) werden die Fahrthäufigkeiten so aufgeteilt, dass sie konsistent mit den ein- und ausgehenden Verkehrsmengen der Knoten sind.

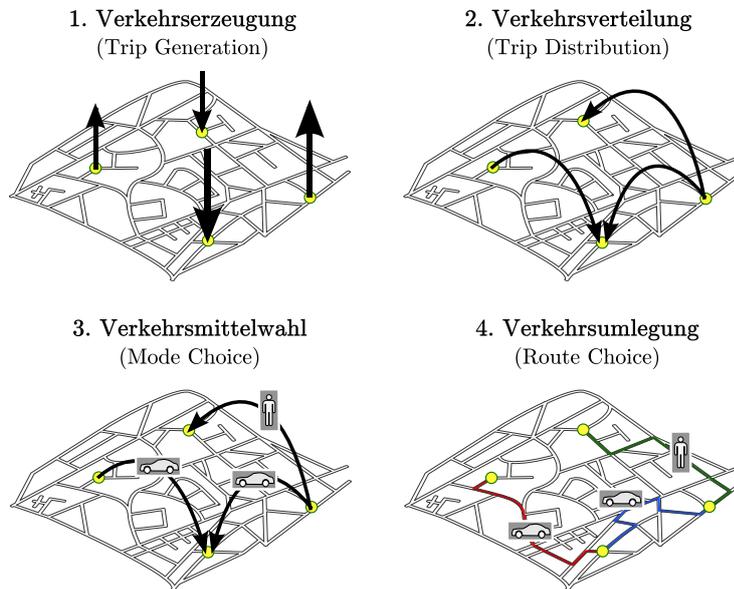


Abbildung 3.2: Vier-Stufen-Modell der Verkehrsplanung

Die *Verkehrsmittelwahl* (engl. *Mode Choice*) ist nur relevant, wenn sich die betrachteten Verkehrsströme auf mehrere Verkehrsmittel aufteilen. In die Modelle fließen Annahmen über das Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer ein, die von persönlichen Präferenzen und den Eigenschaften der Wegstrecke abhängen können (vgl. [ES00], S. 194f). Im Ergebnis entsteht eine separate OD-Matrix für jedes Verkehrsmittel.

Im letzten Schritt, der *Verkehrsumlegung* (engl. *Route Choice*), werden für jedes Verkehrsmittel und dessen Netzwerk die Gesamtflussmengen auf Pfadflussmengen aufgeteilt. Nach *Eckey* und *Stock* können dabei drei verschiedene Vorgehensweisen unterschieden werden ([ES00], S. 202):

1. Wahl der zeitminimalen Route ohne Beschränkungen,
2. Umlegung der Verkehrsströme auf die beste Route unter Berücksichtigung von Belastungen und Kapazitätsrestriktionen,
3. Wahl mehrerer Routen unter Beachtung belastungsbedingter Eigenschaften und Kapazitätsbeschränkungen der Wege.

Aktivitätenbasierte Modelle

Die Ableitung von Verkehrsbewegungen aus dem Bedürfnis zur Durchführung individueller Aktivitäten geht auf Arbeiten von *Chapin* ([Cha74]) und *Hägerstrand* ([Häg70])

zurück (vgl. [Fox95], S. 107). Im Gegensatz zu wegebasierten Modellen sind Verhaltensmuster die Ausgangsbasis für regelmäßige Sequenzen von Bewegungen, die von sozialen und ökonomischen Faktoren beeinflusst werden (vgl. [McN00a], S. 58f).

Recker, McNally und *Root* beschreiben die Formalisierung von beobachteten Verhaltensmustern in einem theoretischen Modell (vgl. [RMR86], S. 311). Aus den strukturellen Eigenschaften eines Haushalts und den verfügbaren Transportmöglichkeiten ergibt sich der Bedarf zur Durchführung geplanter und ungeplanter Aktivitäten. In einem Entscheidungsprozess entsteht aus den realisierbaren Optionen ein theoretisch beschreibbares Verhalten.

Ein typisches aktivitätenbasiertes Modell stammt von *Bowman* und *Ben-Akiva* (vgl. [BBA01], S. 4ff). Es basiert auf verschiedenen, regelmäßigen täglichen Abläufen von Haushaltsaktivitäten (*Activity Pattern*), die in bestimmten Zeiträumen stattfinden und eine unterschiedliche Dauer besitzen. Aus den Aktivitäten ergibt sich eine primäre (wichtige) Tour und beliebige sekundäre (zusätzliche) Touren. Diese verteilen sich auf unterschiedliche Arten der Verkehrsmittelnutzung (*Mode of Transport*), deren Verfügbarkeit für die betrachteten Personengruppen unterschiedlich sind.

Die aktivitätenbasierte Verkehrsnachfrageschätzung leitet also die Verkehrsnachfrage über regelmäßige Muster von Haushalten unter Einfluss räumlicher, sozialer und ökonomischer Einflussfaktoren ab.

3.2 Verhaltensmodelle für Fahrzeugbewegungen

Zur Nachbildung der Bewegungen von Objekten auf einer festgelegten Fläche existieren in der Literatur zahlreiche Modelle. Auf Basis von Verhaltensannahmen wird die Position eines Objekts von einer Startposition aus über einem Zeitintervall als stochastischer Prozess beschrieben. Die so ermittelten Bewegungen eines oder mehrerer Objekte erlauben Rückschlüsse auf die Interaktion der Objekte mit einem System in der lokalen Umgebung. Bewegungsmodelle, auch *Mobility Models* genannt, finden insbesondere Anwendung in der Untersuchung mobiler ad-hoc Netzwerke (MANETs) und deren Anwendung im Straßenverkehr. Im Folgenden werden existierende Ansätze zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von untereinander unabhängigen Objekten vorgestellt und im Kontext von Fahrzeugbewegungen in einem Straßennetz betrachtet.

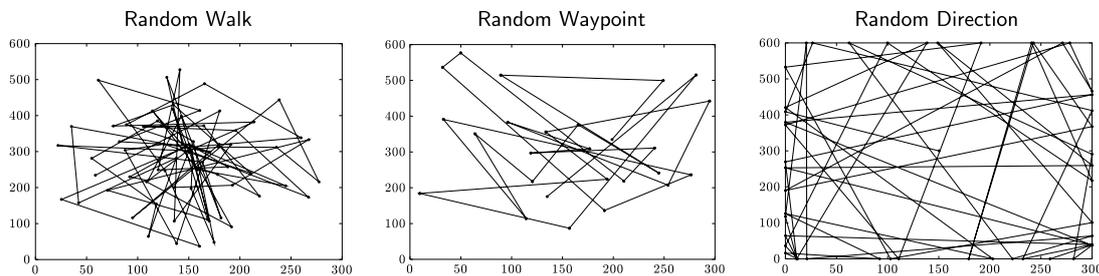


Abbildung 3.3: Grundlegende Bewegungsmodelle unabhängiger Objekte
 (Quelle: Zusammenstellung aus [CBD02])

3.2.1 Grundlegende Modelle

Eines der einfachsten und ältesten Modelle zur Beschreibung zufälliger Bewegungen ist das Random Walk (Mobility) Model (RWM), das bereits auf Arbeiten von Albert Einstein aus dem Jahr 1926 zurückgeht (vgl. [CBD02], S. 485). Ausgehend von einem Startpunkt werden die Parameter *Richtung* und *Geschwindigkeit* in bestimmten Abständen zufällig verändert, z.B. in konstanten Zeitintervallen oder beim Erreichen einer festgelegten Maximaldistanz. Die Zufallsauswahl findet unabhängig gleichverteilt statt und besitzt kein Gedächtnis. In der zweidimensionalen Variante des Modells und einer rechteckig begrenzten Fläche wird die Richtung beim Erreichen der Grenze gespiegelt. Die Bewegung endet beim Erreichen einer maximalen Distanz, durch Ablauf eines Zeitlimits oder bei Rückkehr zum Ausgangspunkt.

Das Modell von *Haas* (vgl. [Haa97], S. 565) basiert ebenfalls auf dem RWM, allerdings wird die Bewegung der Objekte auf einem Torus simuliert und die Höhe der Richtungsänderung pro Zeitschritt beschränkt. *Chiang* verwendet das RWM mit einer modifizierten Zufallsauswahl bei der Richtungsänderung (vgl. [Chi98], S. 20f). Auf Basis der letzten und der aktuellen Position wird die Wahrscheinlichkeit einer Richtungsänderung für jede Dimension vorgegeben.

Das Random Waypoint Mobility Model (RWMM) erweitert das RWM um Pausenzeiten zwischen den einzelnen Bewegungen (vgl. [CBD02], S. 486). *Johnson* und *Maltz* nutzen dieses Modell zur Simulation eines Routing-Protokolls in drahtlosen ad-hoc Netzwerken (vgl. [JM96], S. 169). Ein Objekt beginnt dabei an einer zufälligen Position im Ruhezustand. Nach einer festgelegten Pausenzeit wird zufällig ein neuer Ort und eine Bewegungsgeschwindigkeit $v \in [v^{Min}; v^{Max}]$ gewählt. Nach Erreichen des Ziels folgt wieder eine Pausenzeit und der Prozess beginnt von vorne. Die Weiterentwicklung des RWMM zum

Weighted Waypoint Model (WWM) berücksichtigt zusätzlich gewichtete Präferenzen für die Wahl der Zielorte, die vom aktuellen Standort und einer Zeitkomponente abhängen (vgl. [HMS⁺05]). Im WWM ist außerdem die Verteilung der Pausenzeiten eine a priori festgelegte Eigenschaft pro Standort.

Das RWMM tendiert zur Bildung von temporären Objektclustern in der Mitte des zulässigen Bereichs (vgl. [BRS03], S. 257). Das Random Direction Mobility Model (RDMM) wählt eine Vorgehensweise, bei der eine gleichmäßigere Verteilung der Objekte über die betrachtete Fläche erreicht wird (vgl. [CBD02], S. 487). Eine Zufallsauswahl von *Richtung* und *Geschwindigkeit* $v \in [v^{Min}; v^{Max}]$ führt zur Bewegung des Objekts bis zur Flächengrenze. Nach einer Pausenzeit beginnt der Vorgang von vorne, die Objekte ruhen also nur am Rand des zulässigen Bereichs.

Die vorgestellten Bewegungsmodelle erscheinen durch ihre simple Struktur für die präzise Abbildung komplexer Fahrzeugbewegungen ungeeignet. *Rojas*, *Branch* und *Armitage* zeigen jedoch beispielsweise für das RWMM, dass die Modelle durchaus das Bewegungsverhalten in Städten nachbilden können, wenn man für die Zufallsauswahl der Parameter eine geeignete Verteilung wählt (vgl. [RBA05]).

Insbesondere im Zusammenhang mit der Simulation mobiler ad hoc Netzwerke zwischen Fahrzeugen²⁵ existieren in der Literatur eine Vielzahl von mikroskopischen Simulationsmodellen für Fahrzeuge im Straßenverkehr. In Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzbereich werden sehr unterschiedliche Einflüsse betrachtet und entsprechend unbedeutende Aspekte meist ausgeblendet.

3.2.2 Komplexe Mobilitätsmodelle

Abbildung 3.4 zeigt die Architektur dieser Modelle nach *Härri*, *Filali* und *Bonnet* (vgl. [HFB09], S. 21). Mobilitätsmodelle bestehen hierbei aus einem Verfahren zur *Verkehrsgenerierung* und einem System von *Bewegungs-Beschränkungen* auf Basis einer topologischen Karte²⁶. Die Verkehrsgenerierung besteht wiederum aus einem Verfahren zur Erzeugung von Fahrzeugen mit individuellen Eigenschaften und einem Verhaltensmodell für die Auswahl der Wegstrecke. Die Autoren unterscheiden die folgenden Modelltypen:

²⁵ In der Literatur dominiert die Bezeichnung *Vehicular Ad Hoc Network (VANET)*.

²⁶ Eine *topologische Karte* vereinfacht im Gegensatz zu einer *topographischen Karte* die räumliche Struktur eines Netzwerkes ausschließlich auf die relevanten Elemente (vgl. [Kau10], S. 238).

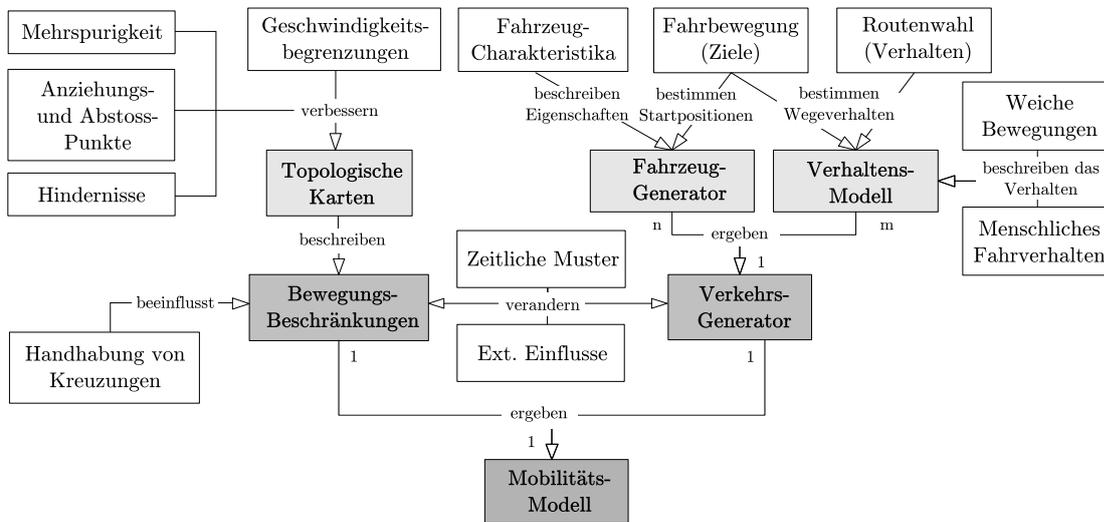


Abbildung 3.4: Generische Architektur von Mobilitätsmodellen
(Quelle: Übersetzung von [HFB09], S. 21)

- o **Synthetische Modelle.** Der Ansatz hinter synthetischen Mobilitätsmodellen ist zunächst das Verständnis einer Bewegung, die anschließende Entwicklung eines mathematischen Modells und der abschließende Versuch, dieses Verhalten zu reproduzieren (vgl. [HFB09], S. 22). *Fiore* unterscheidet dabei fünf verschiedene Arten (vgl. [Fio09]):

1. **Stochastische Modelle** bestehen ausschließlich aus zufällig erzeugten autonomen Bewegungsentscheidungen der Objekte.
2. **Verkehrsflussmodelle** bilden die Bewegungen von Fahrzeugen analog zu flusssdynamischen Verhaltensmustern ab.
3. **Fahrzeugfolgemodelle** betrachten Fahrzeuge im Verbund, bei dem sich ein Objekt vorrangig am vorherigen Fahrzeug orientiert.
4. **Warteschlangenmodelle** modellieren Straßen als First In First Out (FIFO)-Warteschlangen mit zu bedienenden Fahrzeugen.
5. **Verhaltensmodelle** unterstellen den Bewegungen von Fahrzeugen soziale Verhaltensregeln.

Die Parameter synthetischer Modelle werden häufig im Rahmen einer *Kalibrierung* so eingestellt, dass das a priori beobachtete Verhalten durch den Simulator möglichst exakt nachgebildet wird.

- o **Modelle auf Basis von Umfragen.** Bei der Verfügbarkeit genauer Statistiken über das makroskopische Verhalten von Fahrzeugnutzern kann ein Mobilitätsmodell

diese Informationen als allgemeingültige Verhaltenshypothesen nutzen. Gleichzeitig begrenzt die aggregierte Betrachtung der Statistiken die Möglichkeiten, das exakte individuelle Verhalten detailliert abzubilden (vgl. [HFB09], S. 22).

- **Modelle auf Basis von Aufzeichnungen.** Die Aufzeichnung von Fahrzeugbewegungen ermöglicht die Extrapolation von Mobilitätsmustern und deren Implementierung in ein Mobilitätsmodell. Neben der ausreichenden Verfügbarkeit dieser Daten muss die Übertragbarkeit der beobachteten Muster auf andere Fahrzeuge gewährleistet sein.
- **Modelle auf Basis von Verkehrssimulatoren.** Auf Basis synthetischer Modelle und als Ergebnis eines intensiven Validierungsprozesses existieren Verkehrssimulatoren, die eine exakte mikroskopische Betrachtung ermöglichen. Sofern geeignete Schnittstellen existieren, können die Bewegungsdaten der Objekte als Szenarien exportiert und als Eingabedaten für weitere Modelle verwendet werden.

Karnadi, Mo und *Lan* stellen einen typischen Ansatz zur Generierung von mikroskopischen Mobilitätsmodellen für reale Straßennetze vor (vgl. [KML07]). Dabei werden Gruppen von Fahrzeugen (Netzwerkknoten) auf dem zugrunde liegenden Graph des Verkehrsnetzes positioniert und ihre Bewegung zu einem gemeinsamen Ziel in einem bestimmten Zeitraum mit stochastischer Variation erzeugt. Hinzu kommen regelmäßige Linienfahrten durch Busse. Das generierte Bewegungsszenario wird in einem zweiten Schritt eingesetzt um die Performance von Routingprotokollen bei der Kommunikation zwischen den Netzwerkknoten zu messen.

Hunt und *Stefan* stellen ein Mobilitätsmodell für urbane Fahrzeugflotten vor, die tägliche Rundtouren fahren (vgl. [HS07]). Dabei wird das Geschäftsgebiet in verschiedene Kategorien eingeteilt und dort jeweils ein bestimmter Anteil der Gesamtnachfrage unterstellt. Zur Belieferung können drei Fahrzeugtypen unterschiedlicher Größe eingesetzt werden, die Zusammenstellung einer Tour erfolgt auf Basis einer Nutzenfunktion für jede Gebietskategorie. Die Autoren zeigen, dass ihr Ansatz nach einer Kalibrierung der Parameter sehr nahe an den realen Beobachtungen einer Flotte liegt.

Ciari stellt ein Mobilitätsmodell für die Nachfrageschätzung stationsbasierter Car Sharing Konzepte vor (vgl. [Cia10]). Dazu wird ein aktivitätenbasiertes Modell (siehe Abschnitt 3.1.2) um ein neues Transportmittel *Car Sharing Fahrzeug* erweitert. Die Fahrzeuge können an festgelegten Stationen durch Kunden angemietet werden und müssen dort nach Verwendung wieder abgestellt werden. Die Anzahl verfügbarer Fahrzeuge wird als unbegrenzt angenommen, der Weg zur Fahrzeugstation wird zu Fuß

zurückgelegt. Der Autor nutzt Methoden der agentenbasierten Simulation, um zu zeigen, welcher Anteil der Verkehrsnachfrage durch Car Sharing Fahrzeuge befriedigt werden kann.

3.3 Simulation spezieller Aspekte von Elektromobilität

Prognosen und Erwartungen der zukünftigen Entwicklung von Elektromobilität haben in den letzten Jahren zu den ersten simulationsbasierten Untersuchungen der Auswirkungen in verschiedenen Bereichen geführt. Die Methoden zur Beschreibung und Simulation von Verkehrsdynamik²⁷ betrachten das Verhalten von Fahrzeugen und das zeitabhängige Verkehrsaufkommen (vgl. [TK10], S. 2). Mit Ausnahme der reduzierten Emissionen ab einem bestimmten Marktanteil benötigen die vorhandenen Methoden allerdings keine explizite Berücksichtigung batterieelektrischer Fahrzeuge.

Die unterste Ebene der Simulation stellt die Abbildung der Funktionsweise des Fahrzeugs selbst dar. *Kral* und *Simic* stellen ein Gesamtfahrzeugmodell vor, das Untersuchungen unterschiedlicher Betriebsstrategien ermöglicht (vgl. [KS11], S. 28ff). Es erlaubt Aussagen über den Energiebedarf für unterschiedliche Fahrscenarien und Antriebskomponenten vor der Durchführung von Feldversuchen. Auch die Auslegung der Fahrzeugbatterie kann durch den Einsatz von Simulationsmodellen auf die spezifischen Anforderungen des Fahrzeugs optimiert werden (vgl. [GWL98], [SBM10]).

Ein großer Teil der Arbeiten beschäftigt sich mit der Untersuchung der Auswirkungen auf die Stromnetze. Obwohl der zusätzliche Energiebedarf im Vergleich gering ist, stellt die Veränderung der zeitlichen Nachfragestruktur neue Anforderungen an die Bereitstellung durch die Energieversorger (vgl. [Bra09], S. 371ff). Häufig steht dabei die Vision eines „Smart Grids“ im Vordergrund. Dabei sind Elektrofahrzeuge - neben anderen Verbrauchern - nicht nur Konsumenten in einem Verteilnetz, sondern können in ihrer Leistungsaufnahme gesteuert werden²⁸ und selbst wieder Energie in das Stromnetz abgeben²⁹ (vgl. [DKW10] und [WH11]). Die Nachfrage wird dabei über eine große Menge an Fahrzeugen aggregiert und als Tagesganglinie (Gesamtbedarf pro Stunde) betrachtet.

²⁷ Anwendungen dieser Methoden liegen in der Stauprognose und -prävention, Schätzung von Fahrzeiten und Treibstoffverbrauch sowie der Optimierung des Verkehrsflusses durch Veränderung der Signalisierung (siehe [TK10], S. 257ff).

²⁸ Diese Form der zentralen Regelung heißt *Lastmanagement*, engl. Demand-Side Management (DSM).

²⁹ In der Literatur dominiert für die zentral gesteuerte Aufnahme und Abgabe elektrischer Energie durch ein Elektrofahrzeuge die Bezeichnung Vehicle-To-Grid (V2G).

Stötzer, Naumann und *Styczynski* nutzen agentenbasierte Simulation zur Untersuchung der Auswirkung von Ladevorgängen auf Niederspannungsnetze (vgl. [SNS10]).

Barth und *Todd* stellen ein Simulationsmodell für ein Shared Vehicle System (SVS) (stationsbasiertes Car Sharing) unter expliziter Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen vor (vgl. [BT99]). Die Fahrzeuge bewegen sich ausschließlich zwischen den Stationen, das Aufkommen wird für jede Verbindung geschätzt und auf Stundenebene aggregiert. Nach dem Eintreffen von Kunden wird in einer FIFO-Warteschlange das nächste verfügbare Fahrzeug zugewiesen. Die Transitdauer berücksichtigt dabei einen Reibungsfaktor, der die Reisegeschwindigkeit zeitabhängig drosselt. Die Annahme einer permanenten Aufladung an den Stationen (unbegrenzte Kapazität) führt in der Auswertung zu einem dauerhaft hohen SOC-Wert der Fahrzeuge.

Eine simulationsbasierte Untersuchung von *Doll, Gutmann* und *Wietschel* analysiert das Einsatzpotential von batterieelektrischen Fahrzeugen in einer existierenden Car Sharing Flotte (vgl. [DGW11]). Auf Basis exakter Aufzeichnungen der Mietvorgänge eines Anbieters wird analysiert, welche Fahrzeuge unterschiedlicher Tarifklassen mit Verbrennungsmotor durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden können. Ein Fahrzeug gilt als ersetzbar, wenn die Fahrten so umverteilt werden können, dass über den gesamten Zeitraum nur Fahrten unterhalb der Reichweitenbegrenzung und mit ausreichend Standzeit für eine bestimmte Ladestrategie stattfinden. Eine ökonomische Analyse der einzelnen Szenarien trifft Annahmen über die Entwicklung von Kosten, Verbrauch und Lebensdauer und erlaubt eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Umstellung.

3.4 Optimierungsmodelle der Standortplanung

Die Verwendung quantitativer Modelle zur Optimierung betrieblicher Standortentscheidungen (engl. *Location Theory*) ist eine eigenständige Forschungsdisziplin im *Operations Research*. Anwendungsbereiche existieren branchenübergreifend im öffentlichen und privatwirtschaftlichen Sektor, die Literatur kennt eine Vielzahl von Modellformulierungen und Algorithmen (vgl. [ZFH09], S. 1). Die Entscheidungen zur räumlichen Anordnung von Standorten dienen der Befriedigung eines exogenen Bedarfs unter Berücksichtigung anwendungsspezifischer Kostenstrukturen. Üblicherweise enthält die Zielfunktion der Optimierung Wege- oder Zeitkosten zwischen den Standorten bzw. zwischen Standort und Nachfrage (vgl. [BC89], S. 646).

Nach *Zanjirani Farahani* und *Hekmatfar* geht die Standortplanung mit quantitativen Methoden formal auf Alfred Weber zurück, der sich 1909 zum ersten Mal mit der optimalen Positionierung eines Produktionsstandortes zur Minimierung der Gesamtdistanz zu mehreren Kunden beschäftigte (vgl. [ZFH09], S. 1). 1964 veröffentlichte *Hakimi* auf diesem Gebiet erste graphentheoretische Ansätze zur Lokalisierung von Vermittlungsstellen in Kommunikationsnetzwerken oder Polizeistationen auf Highways (vgl. [Hak64]). Seit den 1980ern etablierte sich dieses interdisziplinäre Forschungsfeld durch die Integration neuer Aspekte und der Berücksichtigung stochastischer Parameter (vgl. [SLH09], S. 142).

Standortplanungsmodelle lassen sich in *kontinuierliche* und *diskrete* Modelle unterscheiden (vgl. [DK97], S. 182). Diskrete Modelle bilden das Entscheidungsproblem auf einem Graphen mit a priori definierten diskreten Standortalternativen ab, die Entscheidungsvariable für den Betrieb eines Standortes ist binär. Kontinuierliche Modelle betrachten einen Standort als Punkt auf einer Ebene, so dass die Koordinaten der Standortpositionen selbst Entscheidungsgrößen sind. Bei *Brandeau* und *Chiu* findet sich eine Taxonomie zur Klassifikation der verschiedenen Modelltypen. Sie unterscheiden die Modelle nach *Zielfunktion*, *Entscheidungsvariablen* und *Systemparametern* wie topologische Struktur, verwendete Metrik, Wege- und Zeitkosten, Nachfragestruktur und eine festgelegte Anzahl von Standorten (vgl. [BC89], S. 649).

3.4.1 Räumliche Distanzmaße

Abhängig von der betrachteten Fragestellung ist ein geeignetes Maß zur Quantifizierung der *Distanz* zwischen Standort und Nachfrage zu wählen (vgl. [Zar09], S. 5ff). Im Falle realer Standorte lässt sich die Menge aller geographischen Positionen mathematisch als *metrischer Raum* auffassen. Der räumliche Abstand $d(X, Y) \geq 0$ zwischen zwei Standorten X und Y genügt damit den folgenden Eigenschaften (vgl. [Jän05], S. 415):

$$d(X, Y) = 0 \Leftrightarrow X = Y \quad \forall X, Y \quad (\text{Definitheit}) \quad (3.3)$$

$$d(X, Y) = d(Y, X) \quad \forall X, Y \quad (\text{Symmetrie}) \quad (3.4)$$

$$d(X, Z) \leq d(X, Y) + d(Y, Z) \quad \forall X, Y, Z \quad (\text{Dreiecksungleichung}) \quad (3.5)$$

Die *euklidische Distanz* („Luftlinie“) zwischen zwei Punkten $A = (x_1, y_1) \in \mathbb{R}^2$ und $B = (x_2, y_2) \in \mathbb{R}^2$ berechnet sich nach dem Satz von Pythagoras mit

$$d(A, B) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.6)$$

Die Position eines Standortes X lässt sich weltweit, etwa über das Global Positioning System (GPS), als Paar (Lat_X, Lon_X) mit dem Breitengrad $Lat_X \in [-90; 90]$ und dem Längengrad $Lon_X \in [-180; 180]$ beschreiben. Nimmt man für die Erde vereinfacht die Form einer Kugel an, gibt die *Orthodrome* die kürzeste direkte Verbindung zweier Punkte an (vgl. [AF09], S. 193f). Sie berechnet sich kugelgeometrisch bei einem Radius R mit

$$d(X, Y) = R \cdot \arccos(\cos(Lat_Y - Lat_X) \cdot \cos(Lat_X) \cdot \cos(Lat_Y) + \sin(Lat_X) \cdot \sin(Lat_Y)) \quad (3.7)$$

Die tatsächliche Form der Erde entspricht einem *Geoid*, der sich mathematisch über einen *Ellipsoid*³⁰ annähern lässt (vgl. [Gom09], S. 30f). Für Vermessungszwecke werden verschieden parametrisierte Ellipsoide herangezogen, das weltweit eingesetzte GPS benutzt *WGS84*. Der Abstand zweier Positionen X und Y berechnet sich mit dem mittleren Erdumfang $R \approx 6.371 \text{ km}$ nach der *Haversine* Formel (vgl. [Sin84]) mit

$$d(X, Y) = R \cdot c \quad (3.8)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3.9)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{|Lat_X - Lat_Y|}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{|Lon_X - Lon_Y|}{2}\right) \cdot \cos(Lat_X) \cdot \cos(Lat_Y) \quad (3.10)$$

Die oben genannten Formeln gehen von Punkten aus, die auf gleicher Höhe liegen. Nach *Earle* liegt der Messfehler bei der Verwendung des Kugelmodells statt des Ellipsoidmodells im Bereich von 0-5% (vgl. [Ear06], S. 491). Zur Verwendung der euklidischen Distanz müssen Koordinaten zunächst mit einigem Rechenaufwand von der Breiten-/Längengrad-Darstellung auf eine geeignete Ebene projiziert werden (etwa Universal Transverse Mercator (UTM), vgl. [Gom09], S. 46).

In Straßennetzen stellt die Luftlinie eine untere Grenze für die tatsächliche Fahr-distanz dar. *Berens* und *Körling* untersuchen, wie sich die reale Distanz einer direkten Route zwischen zwei geographischen Positionen in einem Straßennetz ausgehend von der Luftlinie annähern lässt (vgl. [BK83, BK85]). Ziel ist die Bestimmung eines *Umwegefaktors*, der für eine Referenzmenge von Routen den Fehler bei der Abschätzung minimiert. Es ergibt sich jeweils ein Wert von $\approx 1,3$. *Räppel* ([Räp84], S. 151 zitiert nach [Kic99], S. 104) geht für Fußwegentfernungen von einem Umwegefaktor von 1,2 aus.

³⁰Der Körper eines Ellipsoiden entsteht bei der Rotation einer Ellipse um ihre kleine Achse.

3.4.2 Diskrete räumliche Abdeckungsprobleme in der Standortplanung

Die Familie der *Medianprobleme* ist eine der meist untersuchten Problemklassen mit einer Vielzahl von Anwendungen (vgl. [MS11], S. 39). Gegeben ist eine Anzahl von N Kunden. Das *P-Median Problem* sucht nach der optimalen Position von genau P Standorten, so dass die Gesamtsumme aller Distanzen zwischen jedem Kunden und seinem nächstgelegenen Standort minimal ist. Mit anderen Worten soll der durchschnittliche Abstand zwischen Kunden und ihrem nächstgelegenen Standort durch Eröffnung von genau P Standorten minimiert werden. Im kontinuierlichen Fall entspricht diese Fragestellung mit $P = 1$ dem ungewichteten *Weber-Problem* auf der Ebene (vgl. [EM11], S. 9). Die Ausdrücke (3.11) bis (3.15) zeigen die erste linear-ganzzahlige Formulierung, die auf *ReVelle* und *Swain* zurückgeht (vgl. [RS70]).

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i \cdot d_{i,j} \cdot x_{i,j} \quad (3.11)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^N x_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1 \dots N \quad (3.12)$$

$$x_{i,j} \leq y_j \quad \forall i = 1 \dots N, j = 1 \dots N \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = P \quad (3.14)$$

$$x_{i,j}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1 \dots N, j = 1 \dots N \quad (3.15)$$

Zentren-Probleme suchen ebenfalls nach der optimalen Position von genau P Standorten. Im Unterschied zu Median-Problemen wird im *P-Zentren Problem* die Summe der *maximalen* Abstände zwischen N Kunden und P Standorten minimiert. Im kontinuierlichen Fall mit einer euklidischen Metrik entspricht die Frage für $P = 1$ der Suche nach dem Zentrum eines Kreises mit minimalem Radius, der N gegebene Punkte einschließt (vgl. [Dre11], S. 63).

Die genannten Problemklassen entscheiden explizit über die Eröffnung von Standorten, implizit findet jedoch auch immer eine Zuweisung eines Kunden zu einem Standort statt. Probleme, die simultan über die Verwendung eines Standortes und die Allokation von Nachfrage entscheiden, heißen *Location-Allocation Modelle*. Sie berücksichtigen eine komplexere Struktur hinter den Standortentscheidungen und integrieren verschiedene Zielgrößen und Wechselwirkungen (vgl. [Bad99], S. 238f).

Das Set Covering Location Problem (SCLP) (vgl. [TR72], S. 137f) betrachtet ein Netzwerk mit Nachfrageknoten \mathcal{C} und eine Menge möglicher Standorte \mathcal{L} . Ein Nachfrageknoten $c \in \mathcal{C}$ gilt als abgedeckt, wenn die maximale Distanz $D_{c,l}$ zu einem Standort $l \in \mathcal{L}$ geringer als ein festgelegter Grenzwert S ist, die Menge möglicher Abdeckungsstandorte ist $\mathcal{N}^c = \{l \in \mathcal{L} \mid D_{c,l} \leq S\}$. Die Variable $x_l \in \{0,1\}$ gibt an, ob Standort $l \in \mathcal{L}$ eröffnet werden soll. Gesucht ist eine minimale Menge von Standorten, um alle Nachfrageknoten abzudecken. Die Ausdrücke (3.16) bis (3.18) beschreiben eine Formulierung dieses Problems als Binäres Programm (BP).

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} x_l \quad (3.16)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{N}^c} x_l \geq 1 \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.17)$$

$$x_l \in \{0,1\} \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.18)$$

Church und *ReVelle* formulieren das Maximal Covering Location Problem (MCLP) als Variante des SCLP (vgl. [CR74]). Gegeben ist zusätzlich eine konstante Anzahl abgedeckter Nachfrage $A_c > 0$ pro Nachfrageknoten $c \in \mathcal{C}$. Die Variable $y_c \in \{0,1\}$ gibt an, ob die gesamte Nachfrage eines Knotens $c \in \mathcal{C}$ von mindestens einem Standort abgedeckt wird. Gesucht ist eine Auswahl von genau P Standorten, so dass die Anzahl der insgesamt abgedeckten Nachfrage maximal wird. Die Ausdrücke (3.19) bis (3.22) beschreiben das Problem als BP.

$$\max \sum_{c \in \mathcal{C}} A_c \cdot y_c \quad (3.19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} x_l = P \quad (3.20)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{N}^c} x_l \geq y_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.21)$$

$$x_l, y_c \in \{0,1\} \quad \forall c \in \mathcal{C}, l \in \mathcal{L} \quad (3.22)$$

Das SCLP ist ohne speziellen Bezug auf Standorte unter dem Namen Set Covering Problem (SCP) bekannt. *Daskin* und *Owen* verallgemeinern das SCP um den Aspekt der *partiellen Abdeckung* zum Partial Set Covering Problem (PSCP) (vgl. [DO99], S. 221). Ein zusätzlicher Parameter legt den Mindestanteil abgedeckter Standorte in einer gültigen Lösung fest. *Annen* erweitert diesen Ansatz weiter zum Multiple Coverage Partial Set Covering Problem (MCPSCP) (vgl. [Ann03], S. 9f). Dabei erhält jeder Nachfragepunkt

zusätzlich einen geforderten Überdeckungsgrad, d.h. eine Mindestanzahl zusätzlicher Überdeckungen durch Standorte.

Die Erweiterung des SCLP um Fixkosten und Kapazitätsbeschränkungen je Standort sowie Allokationskosten (z.B. Transportkosten) für die Zuweisung von Nachfrage zu Standorten führt zur Problemklasse der Warehouse Location Probleme (WLP)³¹. Die einfachste Formulierung heißt auch *Simple Plant Location Problem* (vgl. [KP83], S. 38f). Gegeben sind eine Menge \mathcal{L} von Standorten und eine Menge \mathcal{C} von Kunden. Der Parameter D_c bezeichnet den Bedarf von Kunde $c \in \mathcal{C}$. Für Produktion und Transport einer Einheit zwischen Standort $l \in \mathcal{L}$ und Kunde $c \in \mathcal{C}$ fallen Kosten $C_{l,c}$ an. Die Kapazität eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ wird durch eine Maximalmenge K_l beschränkt (3.25), seine Betriebsfixkosten sind F_l . Freiheitsgrade sind die Eröffnung eines Standortes y_l sowie die Transportmengen $x_{l,c}$. Jede Nachfrage muss vollständig befriedigt werden (3.24):

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{c \in \mathcal{C}} C_{l,c} \cdot x_{l,c} + \sum_{l \in \mathcal{L}} F_l \cdot y_l \quad (3.23)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}} x_{l,c} = D_c \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.24)$$

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} x_{l,c} \leq K_l \cdot y_l \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.25)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.26)$$

Nach *Bagherpoor et al.* lassen sich Warehouse Location Probleme neben der Unterscheidung in *diskret* und *kontinuierlich* nach den folgenden Eigenschaften unterscheiden (vgl. [BPH⁺09], S. 296):

- **Installationskosten.** Bei der Eröffnung eines Standortes können liefermengenunabhängige Fixkosten anfallen.
- **Anzahl Standorte.** Die Anzahl zu eröffnender Standorte kann als Parameter (*exogen*) vorgegeben sein oder als Freiheitsgrad der Optimierung (*endogen*) bestimmt werden.
- **Anzahl Produkte.** Die Nachfrage kann für eine Menge an Gütern in einzelnen Mengeneinheiten vorgegeben sein oder auf eine einzelne aggregierte Gesamtnachfrage je Kunde beschränkt sein (*Ein-Produkt-Modell*).

³¹Die Bezeichnung dieser Problemklasse variiert in der Literatur. Neben dem Namen *Warehouse Location Problem* existieren identische Modelle mit den Bezeichnungen *Plant Location Problem* (vgl. [CL97], S. 412) und *Fixed Charge Facility Location Problem* (vgl. [Noz01], S. 281).

- **Anzahl Perioden.** Die zeitliche Betrachtung kann über mehrere Zeiträume (*mehrfachperiodisch*) erfolgen oder auf einen einzelnen Zeitraum (*einperiodisch*) beschränkt sein.
- **Standort-Kapazität.** Die Liefer- oder Produktionsmenge eines Standortes kann begrenzt (*kapazitiert*) sein oder unbegrenzt (*unkapazitiert*) zur Verfügung stehen.
- **Kunden-Lieferant-Restriktionen.** Der Bedarf eines Kunden kann von verschiedenen Standorten oder ausschließlich in vollem Umfang durch einen einzelnen Standort befriedigt werden dürfen. Umgekehrt kann die maximale Anzahl zugeordneter Kunden je Standort beschränkt sein.

3.4.3 Flow Intercepting Facility Location Problems (FIFLP)

1981 veröffentlicht *Hodgson* ein Modell zur optimalen Positionierung von Standorten auf den Wegen zwischen Wohnorten und Arbeitsstätten mit einer Anwendung auf Kindergärten in den Bezirken der kanadischen Stadt Edmonton (vgl. [Hod81]). Seine Zielfunktion lautet

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N OD_{i,j} \cdot T_{i,j,k} \cdot \lambda_{i,j,k} \quad (3.27)$$

Der Wert $OD_{i,j}$ bezeichnet dabei die Anzahl von Fahrten zwischen den Positionen i und j . Die Konstante $T_{i,j,k}$ enthält die Dauer des Umweges auf dem Weg von i nach j bei der Verwendung von Standort k . Die binäre Variable $\lambda_{i,j,k}$ nimmt genau dann den Wert 1 an, wenn der Standort k alle Fahrten von i nach j abdeckt. *Hodgson* bemerkt kritisch, dass seine Modellformulierung strukturell identisch zu einem P -Median Problem ist und keine Aspekte, wie maximale Standortkapazitäten oder empirisch ermittelte Kundenpräferenzen, berücksichtigen kann.

Nach *Boccia et al.* begründet *Hodgson* mit seiner Arbeit eine neue Klasse von Optimierungsproblemen, genannt Flow Intercepting Facility Location Problem (FIFLP)³² (vgl. [BSS09], S. 36). Ziel des Modells ist nicht mehr die Zuweisung von Nachfrage zu Angebotspunkten, sondern das optimale „Abgreifen“ (engl. *Interception*) von Nachfrageströmen durch Positionierung von Standorten. Diesen Modellen liegt die Annahme eines *deterministischen Kundenverhaltens* nach dem ökonomischen Prinzip zugrunde.

³²Die Bezeichnungen *Flow-Intercepting*, *Flow-Capturing* und *Flow-Covering* werden häufig synonym verwendet.

Hodgson (vgl. [Hod90]) generalisiert seine Idee unter dem Namen Flow Covering Location Model (FCLM). Unabhängig davon formulieren *Berman, Larson* und *Fouska* 1992 ein identisches Modell für die Positionierung von genau P Standorten auf den Knoten eines Graphen $G(\mathcal{L}, \mathcal{E})$ mit der Knotenmenge \mathcal{L} und der Kantenmenge $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{L} \times \mathcal{L}$ (vgl. [BLF92]). Als Nachfrage wird eine Menge \mathcal{W} von Pfaden über die Kanten des Graphen verwendet (siehe Abschnitt 3.1.1), ein Pfad $w \in \mathcal{W} \subseteq \mathcal{E}$ führt über alle Kanten $e \in w$. Im Folgenden sei $\mathcal{L}^w = \{l \in \mathcal{L} \mid \exists (i, j) \in w : i = l \vee j = l\}$ die Menge aller Knoten eines Pfades. Die Flussmenge je Pfad $w \in \mathcal{W}$ ist mit F_w gegeben. Ziel ist die Maximierung der abgedeckten Flüsse durch Auswahl von P Standorten, wobei die Abdeckung je Pfad nur einfach gezählt wird, auch wenn mehrere Standorte auf dem Pfad liegen. Die Ausdrücke (3.28) bis (3.31) beschreiben das FCLM als BP.

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} F_w \cdot y_w \quad (3.28)$$

$$\text{s.t. } \sum_{l \in \mathcal{L}} x_l = P \quad (3.29)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^w} x_l \geq y_w \quad \forall w \in \mathcal{W} \quad (3.30)$$

$$x_l, y_w \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}, w \in \mathcal{W} \quad (3.31)$$

Dem Modell liegen insbesondere die Annahmen zugrunde, dass alle Standorte identische Eigenschaften besitzen, keine Kapazitätsbeschränkungen vorliegen und die Lokalisierung eines einzigen Standortes für die Versorgung des gesamten Pfades genügt. Wie man sehen kann, sind die linear-ganzzahligen Modellformulierungen von MCLP und FCLM strukturell identisch, daher können auch dieselben Lösungsverfahren herangezogen werden.

Berman, Bertsimas und *Larson* erweitern das FCLM und integrieren ein alternatives Kundenverhalten in drei verschiedenen Modellen (vgl. [BBL95]). Im ersten Modell $P1$, genannt „*delta coverage*“, wird eine maximal zulässige Distanz Δ zwischen Pfad und Standort betrachtet. Ein Standort kann einen Pfad nur noch dann abdecken, wenn der Umweg nicht größer als 2Δ beträgt. In Modell $P2$, genannt „*maximize market size*“, hängt der erwartete Anteil erreichbarer Kunden eines Standortes proportional von der Distanz zum Pfad ab. Ziel ist die maximale Anzahl erwarteter Kunden. Modell $P3$ („*minimize expected inconvenience*“) minimiert schließlich die Summe der benötigten Umwege aller Kunden. In allen Modellen ist die Anzahl der Standorte exogen vorgegeben. *Berman* entwickelt das Modell $P2$ weiter und erweitert es um eine detailliertere Betrachtung begrenzter Service-Kapazität und stochastischer Wartezeit (vgl. [Ber95]).

Insbesondere die Integration der Wartezeit in die Berechnung des Umweges erhöht die Komplexität des Problems, wenn mehr als ein Standort ausgewählt werden muss.

Averbakh und *Berman* stellen eine Variation des FCLM vor, bei dem die erwartete abgegriffene Nachfrage von der Anzahl der Standorte auf einem Pfad abhängt (vgl. [AB96]). Die Autoren unterstellen den Zusammenhang, dass sich die Nachfrage mit zunehmender Anzahl Standorte auf einem Weg erhöht, jedoch mit jedem zusätzlichen Standort weniger stark ansteigt. Die erwartete Nachfrage ist eine konkave Funktion der Standortanzahl auf einem Pfad. Betrachtet werden zwei verschiedene Problemstellungen: Modell 1 minimiert die benötigte Anzahl Standorte für eine minimal geforderte Nachfrageabdeckung B_w je Pfad $w \in \mathcal{W}$. Modell 2 maximiert die erreichbare Nachfrageabdeckung bei gegebener Obergrenze für die erlaubte Anzahl von Standorten. Die Ausdrücke (3.32) bis (3.34) beschreiben eine kompakte Formulierung von M1 als linear-ganzzahliges Programm. Die Konstante $A_{l,w} \in \{0, 1\}$ gibt an, ob der Knoten $l \in \mathcal{L}$ im Pfad $w \in \mathcal{W}$ enthalten ist. Die ganzzahlige Variable x_l bezeichnet die Anzahl der Standorte an Knoten $l \in \mathcal{L}$:

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} x_l \tag{3.32}$$

$$\text{s.t. } \sum_{l \in \mathcal{L}} A_{l,w} \cdot x_l \geq B_w \quad \forall w \in \mathcal{W} \tag{3.33}$$

$$x_l \in \mathbb{N} \quad \forall l \in \mathcal{L} \tag{3.34}$$

Zeng, *Hodgson* und *Castillo* entwickeln die Idee des FIFLP weiter im Hinblick auf eine detailliertere lokale Betrachtung der Nachfrage (vgl. [ZHC09]). Sie generalisieren die Problemstellung weiter zum Pickup Problem (PUP). Pfade besitzen zusätzlich eine quantitativ bewertete Präferenz auf jedem Wegknoten. Hiermit lässt sich präziser ausdrücken, wo genau auf seinem Weg der Kunde den Bedarf nach einem verfügbaren Standort entwickelt³³. Aus den Präferenzwerten je Knoten ergibt sich für jeden Pfad eine eigene *Nutzenfunktion*. Die Konstante F_w bezeichnet die Flussmenge eines Pfades $w \in \mathcal{W}$, der Wert $B_{w,l}$ den Nutzen, der durch das Abdecken einer Flusseinheit im Pfad $w \in \mathcal{W}$ durch einen Standort am Knoten $l \in \mathcal{L}$ entsteht. Die Variable $y_l \in \{0, 1\}$ gibt an, ob ein Standort am Knoten $l \in \mathcal{L}$ betrieben wird, die Buchhaltervariable $x_{w,l} \in \{0, 1\}$ zeigt an, ob der Standort $l \in \mathcal{L}$ im Pfad $w \in \mathcal{W}$ enthalten ist. Zur Bestimmung des Gesamtnutzens wird je Pfad $w \in \mathcal{W}$ nur der Standort mit dem höchsten Nutzenwert herangezogen, ein

³³ Beispielfhaft werden die Pendler-Szenarien „Video“ (Standort liegt an einer beliebigen Stelle auf dem Weg), „Kaffee“ (Standort soll so früh wie möglich auf dem Weg liegen), „Pizza“ (Standort soll so spät wie möglich auf dem Weg liegen, da Abkühlung bis zum Ziel) und „Hamburger“ (Standort soll zu einer gewohnten Uhrzeit auf dem Weg liegen) betrachtet.

zusätzlicher Standort bringt keinen zusätzlichen Nutzen mehr. Die Ausdrücke (3.35) bis (3.40) beschreiben eine Formulierung des PUP als BP.

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{l \in \mathcal{L}^w} F_w \cdot B_{w,l} \cdot x_{w,l} \quad (3.35)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{L}^w} x_{w,l} \leq 1 \quad \forall w \in \mathcal{W} \quad (3.36)$$

$$x_{w,l} \leq y_l \quad \forall w \in \mathcal{W}, l \in \mathcal{L}^w \quad (3.37)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} y_l = P \quad (3.38)$$

$$x_{w,l} \in \{0, 1\} \quad \forall w \in \mathcal{W}, l \in \mathcal{L}^w \quad (3.39)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.40)$$

Zeng, Castillo und Hodgson formulieren schließlich das Generalized Flow-Interception Location-Allocation Model (GFIM) und erweitern damit das FCLM um die Berücksichtigung der genauen Position, an welcher ein Pfad durch einen Standort unterbrochen wird (vgl. [ZCH10]). Für alle Pfade $w \in \mathcal{W}$ gibt eine neue Entscheidungsvariable $x_{w,l}$ an, an welchem Knoten $l \in \mathcal{L}$ der Pfad genau unterbrochen wird und welcher quantitative Nutzen $G_{w,l}$ damit zur Zielfunktion beigetragen wird. Die Menge \mathcal{N}^w bezeichnet die a priori bestimmte Teilmenge aller Standorte, die den Pfad $w \in \mathcal{W}$ potentiell unterbrechen können. Die Ausdrücke (3.41) bis (3.46) beschreiben eine Formulierung des GFIM als BP:

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{l \in \mathcal{N}^w} G_{w,l} \cdot x_{w,l} \quad (3.41)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in \mathcal{N}^w} x_{w,l} \leq 1 \quad \forall w \in \mathcal{W} \quad (3.42)$$

$$x_{w,l} \leq y_l \quad \forall w \in \mathcal{W}, l \in \mathcal{N}^w \quad (3.43)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} y_l = P \quad (3.44)$$

$$x_{w,l} \in \{0, 1\} \quad \forall w \in \mathcal{W}, l \in \mathcal{N}^w \quad (3.45)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.46)$$

3.4.4 Anwendungen in der Versorgungsinfrastrukturplanung

In der Literatur existieren verschiedene Anwendungen von Standortplanungsmodellen für die optimierte Positionierung von Fahrzeugversorgungsstandorten. Betrachtet werden

hierbei Betankungsvorgänge von Alternative Fuel Vehicles (AFVs) mit Biodiesel, Gas, Wasserstoff oder Strom. Die wichtigsten Modelle dieser Art werden im Folgenden vorgestellt.

Shukla, Pekny und *Venkatasubramanian* verwenden eine leicht modifizierte Variante des FCLM zur Bestimmung einer abdeckungsmaximalen Auswahl von Tankstellen für alternative Kraftstoffe (vgl. [SPV11]). Dabei fordern sie in der Modellformulierung keine exakte Anzahl an Standorten, sondern begrenzen nur die maximale Anzahl m auf Basis eines verfügbaren Budgets. Im Rahmen einer Fallstudie wird dabei das Straßennetz von Alexandria (Virginia, USA) herangezogen. Zunächst werden OD-Matrizen und die dazugehörigen Pfade erzeugt, es entsteht ein Netzwerk mit 2.476 Knoten und 114.942 verschiedenen Pfaden. Durch Variation von m und der Lösung des Modells mit CPLEX 10.0 wird das Verhältnis zwischen der Anzahl Standorte und dem Anteil abgedeckter Pfade untersucht.

Wang verwendet eine modifizierte Variante des Fixed Charge Facility Location Problem (FCFLP) zur kostenoptimalen Positionierung von Ladestandorten für Elektro-Scooter (vgl. [Wan07]). Exogene Parameter sind die Flottengröße, die Standortkapazität und deren Fixkosten, die Ladedauer je Distanzeinheit und der Energieverbrauch. Als Nachfrage wird nur eine konstante Gesamtladedauer für alle Fahrzeuge angenommen ohne die exakte Bewegung des Fahrzeugs zu betrachten. Ermittelt wird eine gesamtkostenoptimale Auswahl von Standorten für verschiedene Flottengrößen und Standortkapazitäten, so dass die geforderte minimale Gesamtladedauer erreicht wird. *Wang* entwickelt seinen Ansatz in einem Simulator weiter, der zusätzlich *OD-Matrizen* eines betrachteten Zeitraums berücksichtigt (vgl. [Wan08b]). Auf Basis dieser Daten und einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Verhalten der Scooter an Zielpunkten (Anfahren, Abfahren, Vorbeifahren) wird die benötigte Service-Kapazität der Standorte mit den Kennzahlen *Durchsatz*, *Wartezeit*, und *Auslastung* ermittelt.

Wang integriert schließlich die Betrachtung festgelegter Touren in sein Modell (vgl. [Wan08a]). Für den Anwendungsfall von Batteriewechselstationen wird eine optimierte Auswahl von Standorten zur Realisierbarkeit der vorgegebenen Touren getroffen. *Wang* und *Lin* formulieren ein analoges Modell zur Planung von Schnellladestationen auf Basis vorgegebener Touren (vgl. [WL09]). Sie betrachten eine Menge M von Fahrzeugen und eine Menge N potentieller Standorte. Die Kanten des Netzwerks $(i, j) \in A$ mit $i, j \in N$ besitzen eine Distanz $d_{i,j}$. Der Parameter $\delta_{i,j,m}$ gibt an, ob die Kante $(i, j) \in A$ auf der Tour von Fahrzeug $m \in M$ liegt. Die Variable $B_{i,m}$ bezeichnet den Batteriefüllstand und $R_{i,m}$ die Lademenge. Die Entscheidungsvariable $X_i \in \{0, 1\}$ gibt

an, ob ein Standort am Knoten $i \in N$ betrieben wird. Die Binärvariable $Y_{i,m} \in \{0,1\}$ bezeichnet die Verwendung eines Standortes am Knoten i durch Fahrzeug $m \in M$. Die Kapazität eines Standortes wird nicht berücksichtigt. Die Ausdrücke (3.47) bis (3.52) zeigen die Formulierung des Modells.

$$\min \sum_{i \in N} c_i \cdot X_i \quad (3.47)$$

$$\text{s.t. } B_{i,m} = (B_{j,m} + R_{j,m}) - d_{j,i} \cdot \delta_{j,i,m} \quad \forall (j,i) \in A, m \in M \quad (3.48)$$

$$R_{i,m} \leq \beta - B_{i,m} \quad \forall i \in N, m \in M \quad (3.49)$$

$$\sum_{m \in M} Y_{i,m} \leq L \cdot X_i \quad \forall i \in N \quad (3.50)$$

$$Y_{i,m}, X_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, m \in M \quad (3.51)$$

$$B_{i,m}, R_{i,m} \geq 0 \quad \forall i \in N, m \in M \quad (3.52)$$

Wang und *Wang* formulieren dieses Modell als bikriterielles Problem und betrachten in der zweiten Zielfunktion einen exogenen Abdeckungsfaktor je Standort (vgl. [WW10]). Unter der Annahme unbegrenzter Kapazität wird die Abwägung zwischen Realisierbarkeit der Touren und Abdeckung der Bevölkerung abgebildet.

Als letzte Erweiterung integriert *Wang* die Berücksichtigung der Standzeiten bei der Aufladung (vgl. [Wan11]). Eine Aufladerate β gibt zusätzliche Reichweite an, die innerhalb einer Minute aufgeladen werden kann. Alle Fahrzeuge besitzen eine Batteriekapazität γ , die nicht überschritten werden darf. Die Kosten pro Standort i berechnen sich als Vielfaches c_i von der Anzahl Ladeplätze X_i , deren Anzahl nach oben durch u_i beschränkt ist.

Kuby und *Lim* formulieren das Flow Refueling Location Model (FRLM) als Erweiterung des FCLM (vgl. [KL05]). Sie stellen dabei zusätzlich einen Algorithmus vor, der für jeden Pfad $w \in \mathcal{W}$ a priori die Menge aller sinnvollen Kombinationen von Versorgungsstandorten zur Realisierung der benötigten Gesamtdistanz bestimmt. Für einen Pfad mit n Knoten kann es theoretisch bis zu 2^n mögliche Standortkombinationen geben. Diese Anzahl wird jedoch drastisch reduziert, da mit einer Technik zur Reduktion dominanter Spalten (vgl. [TR73], S. 150ff) nur Kombinationen minimaler Größe übrig bleiben. Das Optimierungsmodell maximiert weiterhin die abgedeckte Nachfrage, muss jedoch zusätzlich für jeden Pfad eine gültige Versorgungskombination sicherstellen. *Upchurch* und *Kuby* (vgl. [UK10]) vergleichen das FRLM mit dem P -Median Problem für verschiedene Netzwerke und Fahrzeugreichweiten. Sie empfehlen das FRLM insbesondere

für Netzwerke mit größeren Kantendistanzen und betonen dessen Lösungsstabilität bei der Erhöhung der Standortanzahl P .

Kuby und *Lim* erweitern diesen Ansatz um den Gedanken, auch Standorte auf Kanten des Graphen zu erlauben, um eine höhere Nachfrage abdecken zu können (vgl. [KL07]). Dabei verwenden sie weiterhin das FRLM, bestimmen jedoch a priori mit drei unterschiedlichen Methoden zusätzliche potentielle Standorte auf Kanten des Graphen. Der Ansatz „Mid-Path Segments“ bestimmt Standorte, die genau auf der Mitte einer Kante zwischen zwei Knoten liegen und zur Reduzierung der insgesamt benötigten Standorte auf einem Pfad führen. Die anderen beiden Methoden lösen intern ein Added Node Dispersion Problem (ANDP) (vgl. [KLU05]). Hierbei wird die Menge von Kanten in einem Graphen in neue Teilabschnitte zerteilt und entweder die minimale Teilabschnittslänge maximiert oder die maximale Teilabschnittslänge minimiert. Im Ergebnis entstehen durch diese Methoden neue potentielle Standorte, die im globalen Optimum eine höhere Nachfrage abdecken können. Das Verfahren approximiert dabei den kontinuierlichen Fall, bei dem jeder Punkt auf einem Knoten oder Kanten eines Graphen ein potentieller Standort sein kann.

Upchurch, *Kuby* und *Lim* (vgl. [UKL09]) erweitern das FRLM um die Berücksichtigung von Kapazitäten zum Capacitated Flow Refueling Location Model (CFRLM). Dabei wird die Gesamtkapazität C für alle Standorte als identisch angenommen, sie begrenzt die maximale Füllmenge der abgedeckten Flüsse. Betrachtet wird ein Graph $G(\mathcal{L}, \mathcal{E})$ mit Knoten $l \in \mathcal{L}$ und Kanten $(i, j) \in \mathcal{E} \subseteq \mathcal{L} \times \mathcal{L}$. Für jeden Pfad $w \in \mathcal{W}$ existieren dabei erlaubte Versorgungskombinationen $h \in \mathcal{H}^w \subset \wp(\mathcal{L})$. Der Parameter F_w gibt die Flussmenge von Pfad $w \in \mathcal{W}$ an, E_w bezeichnet die mittlere Füllmenge je Standort. Der Parameter $G_{w,h,l} \in \{0, 1\}$ gibt an, ob der Standort $l \in \mathcal{L}$ auf dem Pfad $w \in \mathcal{W}$ bei Versorgungskombination $h \in \mathcal{H}^w$ verwendet wird. Die Entscheidungsvariable $y_{w,h} \in \{0, 1\}$ bestimmt, ob Versorgungskombination $h \in \mathcal{H}^w$ auf Pfad $w \in \mathcal{W}$ verwendet wird. $x_l \in \mathbb{N}$ gibt die Anzahl installierter Standorte am Knoten $l \in \mathcal{L}$ an.

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}^w} F_w \cdot y_{w,h} \quad (3.53)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}^w} E_w \cdot G_{w,h,l} \cdot F_w \cdot y_{w,h} \leq C \cdot x_l \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (3.54)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}} x_l = P \quad (3.55)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{H}^w} y_{w,h} \leq 1 \quad \forall w \in \mathcal{W} \quad (3.56)$$

Das Modell lässt sich ebenfalls einsetzen, um die maximal realisierbare Distanz D_w über alle Pfade $w \in \mathcal{W}$ zu maximieren. Die Zielfunktion lautet dann

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{h \in \mathcal{H}^w} F_w \cdot D_w \cdot y_{w,h} \quad (3.57)$$

3.4.5 Standortplanung unter Wettbewerb

Die bislang betrachteten Modelle in der Standortplanung besitzen zwei Prämissen: Zunächst existieren im betrachteten Netzwerk keine vorhandenen Standorte, insbesondere keine Wettbewerber, die Nachfrage binden. Zweitens gehen sie davon aus, dass sich die Nachfrage nicht durch den Aufbau von Standorten verändert. Die Standortplanung unter Wettbewerb (engl. *Competitive Facility Location*) berücksichtigt diese Wirkzusammenhänge und integriert *Marktbedingungen* in die Modelle. Im Rahmen dieser Arbeit interessiert Wettbewerb nur indirekt: Ausgewählte Ansätze aus diesem Themenkomplex helfen bei der Identifikation neuer Ladestandorte, die einen vorhandenen Standort-Katalog bestmöglich erweitern.

Nach *Smith, Laporte* und *Harper* (vgl. [SLH09], S. 141) geht die Standortplanung unter Wettbewerb auf *Hotelling* ([Hot29]) zurück, der das Marktgleichgewicht konkurrierender Firmen mit Preisdifferenzen untersucht. *Drezner* benennt zwei mögliche Strategien für die Standortauswahl, abhängig von der Marktsituation (vgl. [Dre82], S. 485). Ist bereits ein Standort vorhanden (*Leader*), wird nach der besten Position für einen neuen Standort (*Follower*) gesucht, der die maximale Kaufkraft der Nachfragepunkte abdeckt³⁴. Umgekehrt sucht der Leader nach dem ersten Standort mit maximaler Kaufkraft, so dass kein Follower-Standort eine bessere Marktposition erreichen kann³⁵. *Hakimi* integriert die Fragestellung nach den besten Follower-Standorten in die diskrete Standortplanung (vgl. [Hak83]). Für gegebene p Standorte im Netzwerk wird die optimale Position von r neuen Standorten gesucht, so dass die meiste Nachfrage zu den neuen Standorten wechselt.

Eiselt und *Laporte* (vgl. [EL97], S. 218f) unterscheiden Modelle hierbei nach der räumlichen Marktdarstellung (Linie, Ebene, Netzwerk), Anzahl und Zielsetzungen der Wettbewerber sowie deren Preispolitik. *Statische Modelle* gehen davon aus,

³⁴ Dieses „Spiel“ wird als *Duopoly* bezeichnet.

³⁵ Die Identifikation des besten ersten Marktstandortes entspricht dem Problem der Suche nach dem *Stackelberg-Equilibrium*. Die Strategie des Stackelberg-Leaders muss dabei für jede Reaktion eines Stackelberg-Followers optimal bleiben. Der Follower kann alle Leader-Entscheidungen in seine Auswahl einbeziehen, der Leader ist sich darüber a priori bewusst (vgl. [EL97], S. 219).

dass diese Verhaltensannahmen über den gesamten Zeitraum unverändert bleiben (vgl. [Pla01], S. 462). Die nacheinander ablaufende Positionierung von Standorten in einem Wettbewerbsumfeld (engl. *Sequential Location Problems*) benötigt Annahmen über das Verhalten der Nachfrage (*Kundenverhalten*) in Bezug auf die Wahl des bevorzugten Standortes. *Elastische Nachfrage* liegt vor, wenn der Bedarf nicht konstant bleibt, sondern vom verfügbaren Angebot abhängt. Schließlich kann die *Attraktivität* oder *Nützlichkeit* eines Standortes unterschiedlich bestimmt werden, insbesondere die *Substituierbarkeit* kann von zusätzlichen Merkmalen abseits der Position eines Standortes abhängen (vgl. [Pla01], S. 463f).

ReVelle formuliert das Maximum Capture Location Problem (MAXCAP) zur Auswahl der besten Follower-Standorte (vgl. [ReV86], S. 345) in einem Graphen $G(\mathcal{C}, \mathcal{E})$. Die Knoten $c \in \mathcal{C}$ mit einer Nachfragemenge A_c werden von einer Menge von Standorten $l \in \mathcal{L}$ abgedeckt. $D_{c,l}$ gibt die Distanz zwischen Knoten $c \in \mathcal{C}$ und Standort $l \in \mathcal{L}$ an, S_c bezeichnet die Distanz eines Knotens $c \in \mathcal{C}$ zu seinem nächstgelegenen Standort. $\mathcal{L}^O \subseteq \mathcal{L}$ ist die Menge aller bereits vorhandenen Standorte, $\mathcal{L}^N \subseteq \mathcal{L}$ bezeichnet analog die Menge der verfügbaren Standorte, die eröffnet werden können. Für jeden Knoten wird die Menge $\mathcal{N}^c = \{l \in \mathcal{L}^N \mid D_{c,l} \leq S_c\}$ bestimmt, also die Menge verfügbarer Standorte, die einen geringeren Abstand zu Knoten $c \in \mathcal{C}$ aufweisen als jeder vorhandene Standort. Schließlich definiert die Menge $\mathcal{K}^c = \{l \in \mathcal{L}^N \cup \mathcal{L}^O \mid D_{c,l} = S_c\}$ die Menge aller Standorte, die von Knoten $c \in \mathcal{C}$ genau so weit entfernt sind wie der kürzeste erreichbare Standort. Die Variable $x_l \in \{0, 1\}$ gibt an, ob Standort $l \in \mathcal{L}^N$ eröffnet wird. Für jeden Knoten gibt $y_c \in \{0, 1\}$ an, dass der Knoten vollständig von einem neuen Standort versorgt wird. Der Indikator z_c zeigt an, dass ein Knoten zur Hälfte von einem neuen Standort versorgt wird, da ein vorhandener Standort mit gleichem Abstand zum Kunden existiert. Die Ausdrücke (3.58) bis (3.63) zeigen die Formulierung als lineares, gemischt-ganzzahliges Programm.

$$\max \sum_{c \in \mathcal{C}} A_c \cdot y_c + \sum_{c \in \mathcal{C}} \frac{A_c}{2} \cdot z_c \quad (3.58)$$

$$\text{s.t. } y_c \leq \sum_{l \in \mathcal{N}^c} x_l \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.59)$$

$$z_c \leq \sum_{l \in \mathcal{K}^c} x_l \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.60)$$

$$z_c + y_c \leq 1 \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.61)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^O \cup \mathcal{L}^N} x_l = P \quad (3.62)$$

$$x_c, y_c, z_c \in \{0, 1\} \quad \forall c \in \mathcal{C} \quad (3.63)$$

Berman und *Krass* integrieren den MAXCAP-Ansatz in die FIFLP-Problemlasse (vgl. [BK98]) und formulieren das Flow Interception Spatial Interaction Model (FISIM). Sie definieren die Nutzenfunktion

$$U_{w,l} = \frac{A_l^\alpha}{D_{w,l}^\beta}$$

je Abdeckung von Pfad $w \in \mathcal{W}$ durch Standort $l \in \mathcal{L}$. Diese Form der Nutzenfunktion geht auf *Huff* ([Huf62]) zurück, der Nutzen ist proportional zu einem Attraktivitätswert A_l und invers proportional zur Distanz $D_{w,l}$ bei gegebenen Präferenzniveaus $\alpha, \beta > 0$. Die Menge $\mathcal{L}^N \subseteq \mathcal{L}$ bezeichnet die möglichen neuen Standorte und $\mathcal{L}^O = \mathcal{L} \setminus \mathcal{L}^N$ die vorhandenen Mitbewerber.

$$\max \sum_{w \in \mathcal{W}} \left(\frac{\sum_{l \in \mathcal{L}^N} F_w \cdot U_{w,l} \cdot x_l}{\sum_{l \in \mathcal{L}^N} U_{w,l} \cdot x_l + \sum_{l \in \mathcal{L}^O} U_{w,l}} \right) \quad (3.64)$$

$$\text{s.t. } \sum_{l \in \mathcal{L}^N} x_l = P \quad (3.65)$$

$$x_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{L}^N \quad (3.66)$$

3.5 Analyse-Kennzahlen zur Ergebnis-Bewertung

Zur Bewertung und zum Vergleich von Ergebnissen eines Simulations- oder Optimierungsmodells auf einer quantitativen Ebene werden spezifische Kennzahlen herangezogen. Die folgende Aufstellung beschreibt vorhandene Kennzahlen und ihre Berechnung aus der Literatur.

3.5.1 Quantifizierung der Versorgungsqualität

Der subjektive Begriff der *Versorgungsqualität* kann aus verschiedenen Perspektiven betrachtet werden und unterschiedliche Aspekte einbeziehen. In der Literatur existiert eine Fülle von Kennzahlen³⁶, um Lösungen einer Standortplanung quantitativ zu bewerten. Sie können als Zielfunktion das Optimalitätskriterium eines Modells definieren oder als Restriktion eine Mindestanforderung an eine Modelllösung vorgeben.

³⁶ Der Begriff der Kennzahl wird synonym auch als *Maßzahl*, *Kennziffer*, *Index* oder *Key Performance Indicator (KPI)* bezeichnet.

Die Formeln der nachfolgenden Kennzahlen sind bereits in eine einheitliche Notation überführt. Es ist eine Menge \mathcal{P} von Parkpositionen und eine Menge \mathcal{L} von verfügbaren Versorgungsstandorten festgelegt. $D_{p,l}$ bezeichnet die Distanz des *kürzesten* Weges zwischen Parkposition $p \in \mathcal{P}$ und Standort $l \in \mathcal{L}$. Analog bezeichnet $D_{l,l'}$ die kürzeste Distanz zwischen Standort $l \in \mathcal{L}$ und Standort $l' \in \mathcal{L}$. K_l bezeichnet die verfügbare Anzahl Ladeplätze (Kapazität) des Standortes $l \in \mathcal{L}$. In diskreten Zeitperioden $t \in \mathcal{T}$ mit Dauer T_t bezeichnet $u_{l,t}$ die Anzahl belegter Ladeplätze je Standort $l \in \mathcal{L}$.

Die Zielfunktion des P-Median Problems (vgl. [RS70] bzw. Abschnitt 3.4.2) ist die *durchschnittliche Distanz des kürzesten Weges* zwischen einem Kunden und seinem räumlich nächstgelegenen Standort. Sei $y_{p,l} \in \{0,1\}$ genau dann 1, wenn der Standort $l \in \mathcal{L}$ am nächsten an Parkposition $p \in \mathcal{P}$ liegt. Dann berechnet sich der Wert der Kennzahl mit

$$D^{\text{Avg}} = \frac{1}{|\mathcal{P}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{p \in \mathcal{P}} y_{p,l} \cdot D_{p,l} \quad (3.67)$$

Das MCLP (vgl. [CR74] bzw. Abschnitt 3.4.2) maximiert die Abdeckung einer a priori festgelegten Anzahl von Standorten. Ein Standort kann dabei Nachfragepunkte abdecken, wenn die Distanz einen bestimmten Schwellwert D^{Max} nicht überschreitet. Kennzahl ist der *Anteil abgedeckter Nachfragepunkte*. Sei $\mathcal{L}^p = \{l \in \mathcal{L} \mid d_{l,p} \leq D^{\text{Max}}\}$ die Menge aller Standorte, die eine Parkposition $p \in \mathcal{P}$ abdecken können. Dann bestimmt sich der Anteil abgedeckter Parkpositionen mit

$$0 \leq \frac{\sum_{p \in \mathcal{P}} \min(|\mathcal{L}^p|, 1)}{|\mathcal{P}|} \leq 1 \quad (3.68)$$

Ausdruck (3.68) erfasst alle Parkpositionen, die in *mindestens* einem Versorgungsbereich liegen. Das PSCP (siehe Abschnitt 3.4.2) beschränkt die Mindestanzahl abgedeckter Punkte. Unter Berücksichtigung aller erreichbaren Standorte und deren Kapazität lässt sich diese Kennzahl als *durchschnittlich erreichbare Anzahl Ladeplätze* über alle Parkpositionen bestimmen.

$$0 \leq \frac{\sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{l \in \mathcal{L}^p} (y_{p,l} \cdot K_l)}{|\mathcal{P}|} \leq |\mathcal{L}| \quad (3.69)$$

Betrachtet man die Zielfunktion des P-Median Problems nur für die Standorte, so berechnet sich die *durchschnittliche minimale Distanz zwischen Versorgungsstandorten* als Indikator für die Dichte des Versorgungsnetzes:

$$0 \leq \frac{\sum_{l \in \mathcal{L}} \min_{l' \in \mathcal{L} \setminus \{l\}} D_{l,l'}}{|\mathcal{L}|} \leq \max_{(l,l') \in \mathcal{L} \times \mathcal{L}} d_{l,l'} \quad (3.70)$$

Die *durchschnittliche Auslastung aller Standorte* dient als Kennzahl oder Zielgröße in vielfältigen Planungsproblemen (vgl. bspw. [Lar75]) oder [WW89], S. 1609). Sie berechnet sich als zeitlich gewichteter Mittelwert über das Verhältnis zwischen Belastung und Kapazität je Standort:

$$0 \leq \frac{1}{|\mathcal{L}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} u_{l,t} \cdot T_t}{\sum_{t \in \mathcal{T}} T_t} \leq 1 \quad (3.71)$$

Die mittlere Auslastung ist nur begrenzt als Indikator für eine Über- oder Unterbelastung der Standorte verwendbar. Sie sinkt mit steigender Standortanzahl und führt zu Leerlaufzeiten (vgl. [Ber74], S. 328). Die Auslastung lässt sich analysieren durch

- den *durchschnittlichen Leerlaufanteil*

$$0 \leq \frac{1}{|\mathcal{L}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} (1 - \min(u_{l,t}, 1)) \cdot T_t}{\sum_{t \in \mathcal{T}} T_t} \leq 1, \quad (3.72)$$

- den *durchschnittlichen Zeitanteil mindestens eines verfügbaren Ladeplatzes*

$$0 \leq \frac{1}{|\mathcal{L}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} \min(K_l - u_{l,t}, 1) \cdot T_t}{\sum_{t \in \mathcal{T}} T_t} \leq 1, \text{ und} \quad (3.73)$$

- den *durchschnittlichen Volllastanteil*

$$0 \leq \frac{1}{|\mathcal{L}|} \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} (1 - \min(K_l - u_{l,t}, 1)) \cdot T_t}{\sum_{t \in \mathcal{T}} T_t} \leq 1. \quad (3.74)$$

3.5.2 Proximitätsmaße für Lösungen

Neben dem Vergleich der im vorherigen Abschnitt genannten Kennzahlen lässt sich die *Ähnlichkeit* von Lösungen vergleichen, die auf dem gleichen Standort-Katalog basieren. Tabelle 3.1 zeigt beispielhaft drei unterschiedliche Lösungen, bei denen für 10 Standorte unterschiedliche Kapazitäten festgelegt wurden.

Standort	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\sum
Lösung 1	0	2	2	4	0	1	4	2	3	0	18
Lösung 2	0	0	2	2	0	1	4	2	1	1	13
Lösung 3	2	0	0	2	4	2	2	0	3	1	16

Tabelle 3.1: Unterschiedliche Auswahlergebnisse eines Standort-Katalogs

In der Statistik, insbesondere im Bereich der Clusteranalyse, sind viele Maße bekannt, mit denen die Ähnlichkeit bzw. Distanz zwischen Objekten quantifiziert werden kann (vgl. [Bro98], S. 671ff). Seien L_1 und L_2 zwei Lösungsobjekte mit den gleichen Standorten $l \in \mathcal{L}$ und den jeweiligen Kapazitäten als Ausprägung K_l^1 bzw. K_l^2 . Dann berechnet sich

- die *Block-Distanz* (Summe der absoluten Differenzen) mit

$$D^B = \sum_{l \in \mathcal{L}} |K_l^1 - K_l^2|, \quad (3.75)$$

- die *euklidische Distanz* mit

$$D^E = \sqrt{\sum_{l \in \mathcal{L}} (K_l^1 - K_l^2)^2}, \quad (3.76)$$

- die *Chi-Quadrat-Distanz* mit

$$\chi^2 = \sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{(K_l^1 - K_l^2)^2}{K_l^1}, \quad (3.77)$$

- und der *empirische Pearson-Korrelationskoeffizient* mit

$$-1 \leq \frac{\sum_{l \in \mathcal{L}} (K_l^1 - \bar{K}^1)(K_l^2 - \bar{K}^2)}{\sqrt{\sum_{l \in \mathcal{L}} (K_l^1 - \bar{K}^1)^2} \sqrt{\sum_{l \in \mathcal{L}} (K_l^2 - \bar{K}^2)^2}} \leq 1. \quad (3.78)$$

Die Unterschiede zwischen Lösungen lassen sich mit diesen Maßzahlen entweder paarweise oder in Bezug auf eine gemeinsame Referenzlösung beschreiben.

Handlungsbedarf & Ziele der Arbeit

Im Folgenden wird der in Kapitel 3 ausgearbeitete Stand der Forschung bezüglich seiner Anwendbarkeit auf die beschriebenen Anforderungen untersucht. Nach einer kritischen Würdigung der bestehenden Ansätze werden im zweiten Abschnitt die neuen Aspekte der zu entwickelnden Planungsmodelle beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Architektur des Planungssystems und der zu leistenden Arbeit.

4.1 Kritische Würdigung bestehender Ansätze

Das Anwendungsfeld Elektromobilität ist in der Literatur in Bezug auf den Einsatz quantitativer Methoden wie Simulation und Optimierung noch lange nicht erschlossen. Einige Ansätze aus anderen Bereichen können übertragen und an die spezifische Problemstellung angepasst werden. Im Folgenden werden die vorhandenen Ansätze kurz zusammengefasst und ihre Grenzen hinsichtlich der Aufgabenstellung dieser Arbeit aufgezeigt.

4.1.1 Simulations- und Mobilitätsmodelle

In der Forschung haben sich in den letzten 50 Jahren vielfältige Modelle zur Beschreibung und Prognose von Verkehrsströmen entwickelt. Dabei orientieren sich die Modelle am Motorisierten Individualverkehr (MIV), der den überwiegenden Teil privater Fahrzeugbewegungen ausmacht. Der Einsatz dieser Modelle zur Beschreibung von Fahrzeugbewegungen *gewerblicher* Flotten erscheint aus mehreren Gründen ungeeignet. Die Größe einer Flotte im Vergleich zum gesamten Verkehrsaufkommen ist sehr klein, so

dass Beobachtungen auf stark aggregierten Daten kaum das reale Verhalten der einzelnen Flotte abbilden können. Weiterhin gehen die beschriebenen Verkehrsmodelle von sehr regelmäßigen Bewegungen auf Tages- oder Wochenebene aus. Diese Eigenschaft weisen gewerbliche Flotten mit Ausnahme von festen Touren oder einem Linienbetrieb aber nur selten auf.

Für stationsbasierte Car Sharing Konzepte existieren in der Literatur erste Simulationsmodelle, die den Einsatz von Elektrofahrzeugen berücksichtigen. In den vorgestellten Arbeiten werden Bewegungen der Fahrzeuge für einen bestimmten Zeitraum betrachtet, die entweder aus Verteilungen generiert oder anhand realer Daten gemessen wurden. Dabei wird implizit angenommen, dass für die Fahrzeuge an allen Stationen eine unbeschränkte Anzahl von Ladeplätzen verfügbar ist und die Fahrzeuge diese auch nach jeder Fahrt nutzen. Keiner der vorgestellten Ansätze berücksichtigt explizit die Entscheidung über den Betrieb bzw. die Bestimmung einer Kapazität der Ladeplätze. Die Parkpositionen der Fahrzeuge bleiben auf die Stationen beschränkt.

Die Simulations- und Mobilitätsmodelle zur Untersuchung von mobilen ad-hoc Netzwerken (MANETs) bzw. deren Ausprägung mit Fahrzeugen (VANETs) fokussieren sich auf die Untersuchung von Netzwerkprotokollen und deren Funktionsweise bei verschiedenen Fahrzeugdichten und Bewegungsmustern. Dabei interessiert insbesondere die genaue Route aller Fahrzeuge, da die Kommunikation im Netzwerk maßgeblich von den einzelnen Distanzen zwischen den Fahrzeugen abhängt.

In der Literatur existiert - nach bestem Wissen - kein Simulationsansatz, der die Interaktion der Fahrzeugnutzer mit der verfügbaren Ladeinfrastruktur explizit abbildet. Dazu gehört neben der Ladeentscheidung in Abhängigkeit vom Füllstand des Fahrzeugs auch die Berücksichtigung der Distanz zwischen Fahrzeug und verfügbaren Standorten in der Umgebung. Eine Simulation der Versorgungssituation basiert auf Annahmen über die Bewegungen der Fahrzeuge. Die Literatur kennt - ebenfalls nach bestem Wissen - noch kein Mobilitätsmodell, mit dem sich die Bewegungen der Flottenfahrzeuge eines modernen Mobilitätsdienstleisters (vgl. Abschnitt 2.1.1) beschreiben lässt.

4.1.2 Optimierungsmodelle der Standortplanung

Die Planung von Standorten zur Deckung lokaler Nachfrage unter Verwendung mathematischer Optimierungsmodelle ist ein weit erforschtes Feld mit einer Vielzahl praktischer Anwendungen. Hauptsächlich werden dabei zwei unterschiedliche Problemstellungen

betrachtet: Entweder wird eine kostenminimale Lösung zur Erreichung einer geforderten Abdeckung oder eine abdeckungsoptimale Lösung für ein festgelegtes Budget gesucht.

Die klassischen Modelle der Standortplanung gehen von einer örtlich begrenzten Nachfrage aus, deren Befriedigung durch einen Anbieter mit - typischerweise distanz-abhängigen - Kosten verbunden ist. Die Problemklasse der FIFLP erweitert diesen Ansatz um die Berücksichtigung einer mobilen Nachfrage, d.h. die Befriedigung kann auf beliebigen Punkten des Weges eines Objekts erfolgen. Übertragen auf die Planung von Ladeinfrastruktur bleiben dabei viele Aspekte unberücksichtigt. Das nachgefragte Gut (Energie) verbraucht sich im Laufe der Zeit und muss daher abhängig von den Wegedistanzen ausreichend oft bezogen werden. FIFLP berücksichtigen keine Standortkapazitäten und keinen zeitabhängigen Konsum (Ladedauer).

Die vorgestellten Ansätze zur Planung von Versorgungsinfrastruktur beziehen den Aspekt der mobilen Nachfrage ein und betrachten jeweils eine Menge a priori bestimmter Fahrzeugbewegungen auf einem Graphen. Das FRLM und seine Erweiterungen ermitteln jeweils alle zulässigen Standortkombinationen zur Versorgung eines Fahrzeuges und wählen genau eine Kombination aus. Dieser Ansatz ist für das vorliegende Planungsproblem nicht praktikabel, da die Menge der möglichen Ladekombinationen enorm groß und deren Enumeration sehr aufwändig ist. In den vorgestellten Arbeiten von *Wang et al.* ([Wan07, Wan08b, Wan08a, WL09, WW10, Wan11]) bleiben Standorte mit unterschiedlichen Ladeleistungen, eine exakte Kapazitätsbestimmung und diskrete Kapazitätsstufen mit unterschiedlichen Kosten unberücksichtigt.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass - nach bestem Wissen - kein Optimierungsmodell aus der Literatur alle Anforderungen aus Abschnitt 4.2 abdecken kann.

4.2 Anforderungen an ein Planungsmodell

Die folgenden Abschnitte fassen alle Aspekte zusammen, die von einem Modell zur Simulation bzw. Optimierung berücksichtigt werden müssen. Die Modellierung kann im jeweiligen Formalismus unterschiedlich erfolgen.

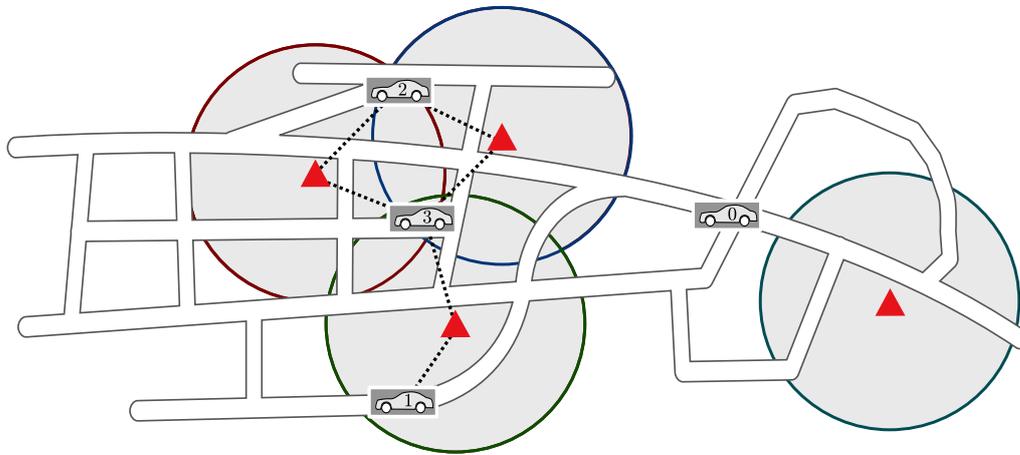


Abbildung 4.1: Verfügbare Standorte in Abhängigkeit von der Parkposition

4.2.1 Das Straßenverkehrsnetzwerk

Die in der Literatur vorherrschende Abbildung der Verkehrsnachfrage als Pfadflussmengen auf einem Graph (siehe Abschnitt 3.1.1) erscheint für die vorliegende Fragestellung ungeeignet. Die Bewegung eines Fahrzeugs zwischen zwei Parkvorgängen muss im allgemeinen Fall keinesfalls der kürzesten Strecke zwischen den Koordinaten entsprechen. Es handelt sich um zusammenhängende Fahrten beliebiger Länge, bei denen das Fahrzeug nicht notwendigerweise zum Ausgangspunkt zurückkehrt. Für die Modellierung als Graph bedeutet dies, dass jede einzelne Fahrzeugbewegung zwischen zwei Knoten als separater Pfad auf einer separaten Kante abgebildet werden muss.

Der Energiebedarf von Fahrzeugen im Stadtverkehr kann als konstanter Durchschnittswert je Fahrzeug angenommen werden. Da die tatsächliche Route für das Planungsergebnis irrelevant ist, genügt eine Berücksichtigung der insgesamt zurückgelegten Distanz sowie der dazwischen liegenden Parkposition und -dauer.

4.2.2 Einflüsse der Ladeentscheidung

Die Nähe zu einem Versorgungsstandort und der aktuelle SOC des Fahrzeugs bestimmen die Wahrscheinlichkeit einer Ladeentscheidung, wenn der Fahrzeugnutzer nicht zur Nutzung eines Ladeplatzes bei jedem Parkvorgang verpflichtet ist (*Free Floating*). Dabei können unterschiedliche Verhaltenshypothesen, insbesondere das Verhalten in den SOC-Randbereichen, herangezogen werden. Die Kapazität der Batterie kann zwischen den

Flottenfahrzeugen unterschiedlich sein. Ein Simulationsmodell muss das Verhalten der Fahrzeugnutzer entsprechend abbilden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Nutzer eines Fahrzeugs die Versorgungsstandorte in seiner Nähe kennt und die jeweilige Distanz bestimmen kann. Die Versorgungsbereiche von Ladestandorten können sich gegenseitig überlagern, so dass die in Betracht kommenden Standorte von jeder Parkposition aus neu bestimmt werden müssen (siehe Abbildung 4.1). Der Versorgungsbereich eines Standortes kann dadurch insbesondere nicht als einzelner Knoten in einem Graph abgebildet werden.

4.2.3 Eigenschaften der Ladestandorte

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, unterscheiden sich Ladestandorte hinsichtlich ihrer Erschließungs-, Investitions-, Installations- und Betriebskosten. Diese Kosten verändern sich insbesondere nicht linear in Abhängigkeit von der zu installierenden Anzahl Ladepätze. Für den Flottenbetreiber ergibt sich daraus ein spezifischer Preis für die exklusive Bereitstellung einer bestimmten Kapazität. Während die Kapazität eines Standortes ein exogener Parameter der Simulation ist, muss ein mathematisches Optimierungsmodell die Entscheidung für eine diskrete Kapazitätsstufe explizit abbilden.

Die maximale Ladeleistung eines Ladeplatzes kann zwischen Standorten unterschiedlich sein. Ebenso können Fahrzeuge ggf. nur eine begrenzte Leistung beim Energietransfer abrufen, obwohl der Standort eine höhere Leistung ermöglicht (z.B. Schnellladung). Insofern ergibt sich jeweils zwischen Fahrzeug und Versorgungsstandort eine spezifische Ladedauer in Abhängigkeit von der realisierbaren Ladeleistung.

4.2.4 Kapazitätsbestimmung von Standorten

Viele der vorgestellten Ansätze (P -Median, MCLP, FCLM, GFIM) vernachlässigen die explizite Berücksichtigung von standortspezifischen Kapazitäten. Hinsichtlich der Auslastung wird also unterstellt, dass selbst die maximal mögliche Nachfrage gedeckt werden kann oder das Bereitstellen zusätzlicher Kapazitäten mit geringen Kosten verbunden ist. In den Modellen, die Fixkosten je Standort berücksichtigen, lassen sich über diesen Kostenblock nur implizit die Kosten für die Bereitstellung der maximal benötigten Kapazität abbilden.

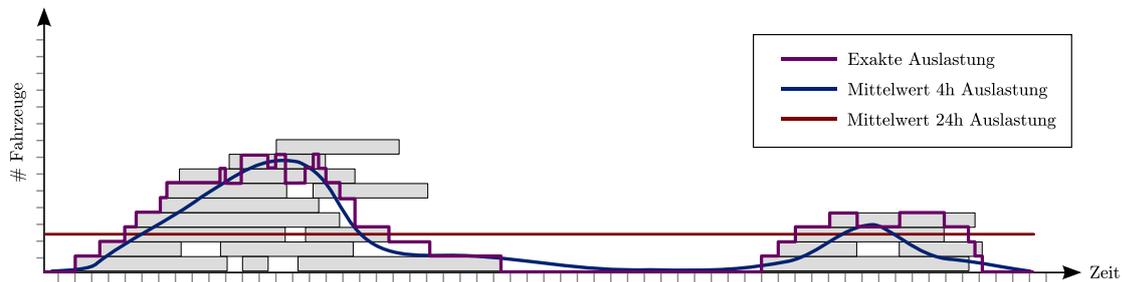


Abbildung 4.2: Durchschnittsbetrachtung der Standortkapazität

Ansätze wie [Wan08b] ermittelt die Standortkapazitäten nachgelagert durch Simulation. Die Standortentscheidungen aus der Optimierung werden hierbei fixiert und zunächst unbegrenzte Kapazität angenommen. Im Rahmen der Simulation ergibt sich dann auf Basis der betrachteten Nachfrage sowie den unterstellten Service-, Warte- und Bedienzeiten der Standorte ein minimaler Bedarfswert für die Kapazität, der für die beobachtete Auslastung zulässig ist. Es besteht die Möglichkeit, dass der tatsächliche Kapazitätsbedarf nicht mit den vorgegebenen Fixkosten realisierbar ist oder dass eine Versorgung durch andere Standorte kostengünstiger wäre.

Für die explizite Berücksichtigung von Standortkapazitäten im Optimierungsmodell existieren vorwiegend *durchschnittsorientierte* Konzepte. Im kapazitierten WLP erfolgt eine Begrenzung der maximalen *Liefermenge* für alle Kunden, d.h. Kapazität ist keine Beschränkung der Auslastung, sondern einer verfügbaren Gütermenge. Im CFRLM wird für alle Standorte eine maximale Anzahl abdeckbarer Pfadflüsse festgelegt. Die Pfadflussmengen entsprechen den Bewegungen in einem definierten Zeitraum, also handelt es sich auch hier um eine Begrenzung der *durchschnittlichen Kundenanzahl* in der betrachteten Zeitperiode.

Abbildung 4.2 zeigt, dass die Betrachtung einer durchschnittlichen Kapazität den tatsächlichen Bedarf zu Spitzenzeiten deutlich unterschätzen kann. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Standorte durch die Parkvorgänge der Flottenfahrzeuge zeitlich stark unterschiedlich ausgelastet werden. Ein Simulations- und Optimierungsmodell muss sicherstellen, dass bei zeitlich paralleler Nutzung von Standorten genügend Ladeplätze vorhanden sind bzw. Fahrzeuge ansonsten abgewiesen werden. Hierbei gilt insbesondere, dass ein Ladeplatz für die gesamte Parkdauer belegt ist, unabhängig davon, ob die Standzeit für eine Vollladung ausreichend ist.

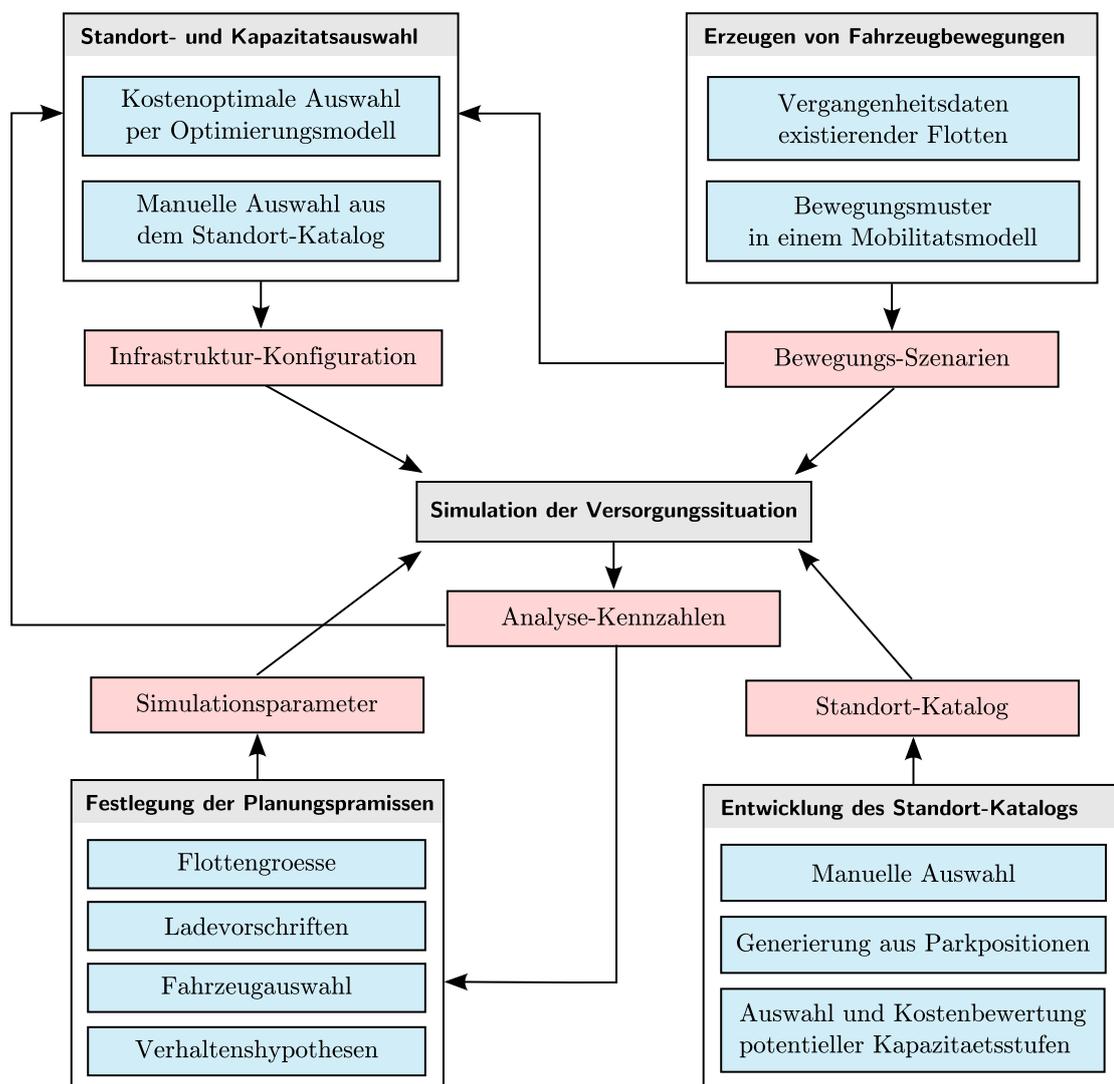


Abbildung 4.3: Architektur des Planungssystems

4.3 Architektur des Planungssystems

Abbildung 4.3 zeigt den Zusammenhang der verschiedenen Planungsschritte. Im Rahmen der *Entwicklung des Standort-Katalogs* werden potentielle Ladestandorte identifiziert und die Auswahl und Kostenbewertung der realisierbaren Kapazitätstufen vorgenommen. Die Identifikation von Standorten kann manuell durch einen Planer erfolgen oder in einem ersten Schritt automatisiert aus bekannten Parkpositionen der Fahrzeuge abgeleitet werden. Die *Festlegung der Planungsprämissen* beinhaltet die Festlegung

von Betriebsparametern der Flotte, die als exogene Parameter in das Simulations- und Optimierungsmodell einfließen. Neben der Festlegung einer Flottengröße und die Auswahl konkreter Fahrzeuge werden die Regeln für die Fahrzeug-Nutzer sowie deren Verhaltenshypothesen festgelegt.

Die *Erzeugung von Fahrzeugbewegungen* beinhaltet die Generierung von Bewegungsszenarien beliebiger zeitlicher Länge auf Basis von Erfahrungswerten und Erwartungen. Als Datenquelle dienen aufgezeichnete Fahrzeugbewegungen aus der Vergangenheit bzw. ein flottenspezifisches Mobilitätsmodell zur abstrakten Beschreibung von Bewegungsmustern. Im Rahmen der *Standort- und Kapazitätsauswahl* wird für jeden Eintrag im Standort-Katalog entschieden, ob und in welcher Kapazitätsstufe der Ladestandort für die Versorgung der Flotte zur Verfügung stehen soll. Verschiedene *Infrastruktur-Konfigurationen* können dann durch die *Simulation der Versorgungssituation* bewertet und anhand verschiedener Kennzahlen miteinander verglichen werden.

4.4 Ziele der Arbeit

Die im Abschnitt 4.2 beschriebenen Anforderungen sind bisher in keinem Ansatz aus der Literatur vollständig umgesetzt. Auf Basis der identifizierten Forschungslücken ergeben sich für die Unterstützung der vorgestellten Planungsaufgabe durch ein Entscheidungsunterstützungssystem für diese Arbeit die folgenden Ziele:

Entwicklung des Simulationsmodells

Zur Bewertung der Versorgungssituation einer batterieelektrischen Fahrzeugflotte muss ein neues Simulationsmodell entwickelt und in einer computerbasierten Simulationsumgebung umgesetzt werden. Ausgehend von den Bewegungen der Flottenfahrzeuge erfolgt eine Abbildung der Interaktion der Fahrzeugnutzer mit der Ladeinfrastruktur auf Basis parametrisierter Verhaltenshypothesen. Ein Simulationslauf betrachtet eine festgelegte Infrastruktur-Konfiguration, d.h. eine Auswahl von Versorgungsstandorten mit einer jeweiligen Betriebskapazität. Durch die mikroskopische Betrachtung jedes Fahrzeugs soll im Ergebnis eine exakte Bestimmung von Analysekenzahlen für Fahrzeug und Standorte ermöglicht werden.

Bestimmung kostenoptimaler Infrastruktur-Konfigurationen

Die Infrastruktur-Konfiguration ist ein exogener Parameter in der Bewertung einer Versorgungssituation für das Simulationsmodell und verursacht Kosten für den Flottenbetreiber (siehe Abschnitt 2.3.3). Zur kostenoptimalen Auswahl von Standorten und Kapazitäten aus einem Standortkatalog soll ein Optimierungsmodell entwickelt werden, das alle genannten Anforderungen implementiert. Insbesondere muss eine gültige Infrastruktur-Konfiguration festgelegten Mindestanforderungen in Bezug auf die Versorgungsqualität entsprechen.

Lösung des Optimierungsmodells für praktische Problemgrößen

Die Auswahl einer kostenoptimalen Infrastruktur-Konfiguration ist bei einer großen Menge potentieller Standorte und Kapazitätsstufen eine Aufgabe mit hoher kombinatorischer Komplexität. Für die sukzessive Optimierung vieler Szenarien muss eine planungstaugliche Laufzeit erreicht werden. Ein Lösungsverfahren muss also in der Lage sein, gute Lösungen in kurzer Zeit zu finden.

Simulation der Versorgungssituation

Dieses Kapitel beschreibt ein Simulationsmodell zur Evaluierung der Versorgungssituation einer batterieelektrischen Flotte. Nach der Einordnung der Methodik wird zunächst ein eigenes Mobilitätsmodell für Mobilitätsanbieter beschrieben und dessen Parameter und Verteilungen erläutert. Der nächste Abschnitt beschreibt die Verhaltenshypothesen innerhalb des Simulationsmodells. Das Kapitel schließt mit einer Aufstellung der Ergebniskennzahlen und deren Interpretation.

5.1 Einordnung der Methodik

Simulation bezeichnet das Nachbilden von Geschehen aus der Wirklichkeit, wobei zielgerichtet Experimente an einem abstrahierten *Simulationsmodell* durchgeführt werden (vgl. [Gab11c]). Die Methoden stammen ursprünglich aus dem technischen Bereich und sind mittlerweile durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer zu einem wichtigen Teilgebiet des Operations Research geworden (vgl. [DD05], S. 223). Nach *Domschke* und *Drexl* ist Simulation besonders nützlich, wenn verfügbare analytische Methoden ungeeignet sind und die Beobachtung eines realen Systems zu komplex, zu teuer, zu gefährlich oder mit irreversiblen Konsequenzen verbunden ist (vgl. [DD05], S. 223).

Jeder Simulation liegt ein physisches oder abstraktes (mathematisches) *Simulationsmodell* zugrunde (vgl. [Ben96], S. 2ff). Mathematische Simulationsmodelle bilden die Objekte und Wechselwirkungen des betrachteten Systems vollständig in einem mathematischen Formalismus ab. *Deterministische Simulationsmodelle* definieren Zustandsübergänge der Objekte auf Basis fester Regeln, während in *stochastischen Simulationsmodellen* die Zustandsübergänge als Zufallsexperiment mit festgelegten Wahrschein-

lichkeitsverteilungen abgebildet werden (vgl. [Law06], S. 6). Im Gegensatz zu *statischen* Simulationsmodellen bilden *dynamische* Simulationsmodelle die Veränderung des System über einen betrachteten Zeithorizont ab (vgl. [Law06], S. 5). Außerdem lassen sich noch die folgenden Typen von Simulation abgrenzen:

- **Kontinuierliche Simulation.** Differenzierungsmerkmal der kontinuierlichen Simulation ist die Beschreibung von Zuständen als kontinuierliche Funktion der Zeit. Die Wechselwirkungen werden dabei über funktionale Abhängigkeiten zwischen den Variablen, z. B. als Differentialgleichungen, beschrieben. Eine bekannte Form der kontinuierlichen Simulation ist das von Jay W. Forrester entwickelte *System Dynamics* (vgl. hierzu [Ric11]).
- **Monte-Carlo Simulation.** Die „Monte Carlo“ Simulation ist aufgrund von Analogien zum Roulette-Spiel nach dem Spielcasino der Stadt Monte Carlo benannt. Diese Form der Simulation bezeichnet das „Nachspielen eines Zufallsvorganges mit Zufallszahlen“ und wird „in Fällen eingesetzt, in denen aus einer Input-Verteilung eine Output-Verteilung generiert wird“ ([SM09], S. 14f).
- **Diskrete Simulation.** Im Gegensatz zur kontinuierlichen Simulation wird Zeit in der diskreten Simulation nicht als kontinuierliche Größe abgebildet, sondern in diskrete Zeitschritte zerteilt. Zustandsübergänge erfolgen über definierte Ereignisse, daher wird diese Form der Simulation vollständig als *diskrete, ereignisorientierte Simulation* bezeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine diskrete, ereignisorientierte Simulation entwickelt. Nach *Law* besteht diese aus den folgenden Komponenten (vgl. [Law06], S. 9f):

- **Zustandsvariablen.** Eine Menge von Variablen, die den Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt vollständig beschreiben.
- **Simulationsuhr.** Eine Variable, die den aktuellen Wert der simulierten Zeit enthält.
- **Ereignis-Liste.** Eine Liste mit den Zeitpunkten aller als nächstes auftretenden Ereignisse.
- **Statistische Zähler.** Eine Menge von Variablen, die statistische Werte des Systems zur Laufzeit enthalten.
- **Initialisierung.** Ein Unterprogramm, das den Zustand des Systems zu Beginn der Simulation festlegt.

- **Zeitgeber.** Ein Unterprogramm, das das nächste Ereignis aus der Liste auswählt und die Simulations-Uhr entsprechend aktualisiert.
- **Ereignis-Routinen.** Aktivitäts-Routinen für jedes Ereignis, die beim Auftreten ausgeführt werden.
- **Funktions-Bibliothek.** Eine Menge von Unterprogrammen, mit denen zufällige Beobachtungen auf Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt werden.
- **Report-Generator.** Ein Unterprogramm, das die Ergebnisse der Simulation nach Abschluss bestimmt und zur Laufzeit Schätzungen berechnet.
- **Hauptprogramm.** Das Hauptprogramm ruft die einzelnen Komponenten des Simulators auf (Initialisierung, Zeitgeber, Ereignis-Routinen, ...) und startet nach Abschluss den Report-Generator.

5.2 Komponenten und Prämissen des Simulationsmodells

Das *Bewegungs-Szenario* enthält die Fahrt- und Parkaktivitäten der Flottenfahrzeuge über einen Zeitraum bestimmter Länge. Die Aktivitäten der Fahrzeuge werden dabei unabhängig von der Versorgungsinfrastruktur betrachtet, d.h. die Restriktionen der Antriebstechnologie bzgl. der Fahrzeugreichweite bleiben hierbei zunächst unbeachtet. Zur Erzeugung von Bewegungs-Szenarien auf Basis flottenspezifischer Parameter wird ein *Mobilitätsmodell* (vgl. Abschnitt 3.4) eingesetzt.

Die Flottenfahrzeuge können Ladeinfrastruktur nutzen, wenn sich die Parkposition im definierten Versorgungsbereich eines oder mehrerer Standorte befindet. Zweite Komponente einer Simulationsinstanz ist dementsprechend eine vorgegebene *Infrastruktur-Konfiguration*. Diese besteht aus einer Auswahl von Standorten aus dem Standort-Katalog, für die jeweils eine bestimmte Kapazität und ein Versorgungsbereich festgelegt sind (siehe Abbildung 5.1).

5.2.1 Hypothesen

Die Simulation der Versorgungssituation muss eine Annahme über das zu erwartende Verhalten der Fahrzeugnutzer treffen. Ein Ladeprozess (vgl. Abschnitt 2.2.3) ist für die Nutzer immer mit zusätzlichem Aufwand verbunden, so dass es einen exogenen Anreiz geben muss, der vom Betriebskonzept der Flotte bestimmt wird. Die beiden zentralen

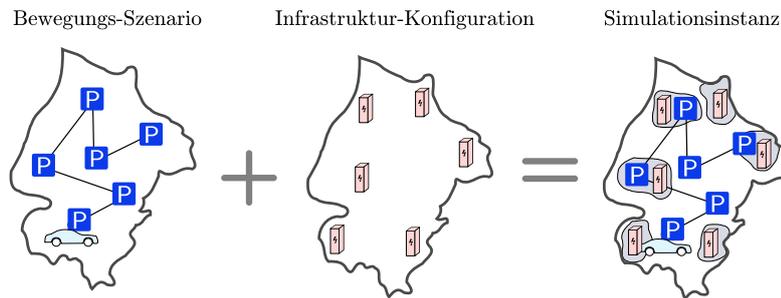


Abbildung 5.1: Ebenen einer Simulationsinstanz

Einflussfaktoren sind dabei der Versorgungsbereich eines Standortes und der Füllstand (SOC) des Fahrzeugs am Ende einer Fahrt.

Im vorliegenden Simulationsmodell wird die Akzeptanz eines Standortes über einen umliegenden Versorgungsbereich abgebildet. Es wird angenommen, dass die Nutzer einen Standort ablehnen, wenn sich das Fahrzeug nicht zum Ende der Fahrt in seinem Versorgungsbereich befindet. Als Ergebnis von Belohnungs- oder Sanktionsmaßnahmen bzw. Vorschriften ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Ladeentscheidung in Abhängigkeit vom SOC. Eine Ladeentscheidung kann vorliegen, ohne dass sich das Fahrzeug im Versorgungsbereich eines oder mehrerer Standorte befindet.

Abbildung 5.2 beschreibt mögliche Verteilungen der Ladewahrscheinlichkeit. Es wird davon ausgegangen, dass die Bereitschaft zu einem Ladevorgang mit sinkendem SOC steigt. Ein Schwellwert UB legt eine Untergrenze des SOC fest, ab der eine Ladeentscheidung als obligatorisch angenommen werden kann. Analog definiert ein Schwellwert LB eine Obergrenze des SOC, oberhalb derer keine Ladeentscheidung mehr getroffen wird. Die empirische Ermittlung dieser Verteilung erfolgt aus Beobachtungen oder Befragungen der Nutzer.

Befinden sich mehrere Standorte in Reichweite eines Fahrzeugs, sind verschiedene Auswahlstrategien der Fahrzeugnutzer möglich. Wenn davon ausgegangen werden kann, dass den Fahrzeug-Nutzern technische Mittel für die Abfrage der verfügbaren Ladeplätze in Echtzeit zur Verfügung stehen, kann die Auswahl eines vollständig ausgelasteten Standortes vermieden werden. Neben der *Zufallswahl* ist eine *distanzminimale* oder *auslastungsminimale* Standortauswahlstrategie denkbar.

Fahrzeugbewegungen werden ausgelöst durch die Erfüllung eines Auftrags oder die Durchführung einer bestimmten Aktivität. Eine zentrale Annahme im Rahmen der Simulation ist die *Bewegungsunabhängigkeit* von der Ladeinfrastruktur. Die Fahrzeuge

verändern ihre Bewegung grundsätzlich nicht, um einen Ladestandort aufzusuchen. Befindet sich ein Fahrzeug am Ende einer Fahrt im Versorgungsbereich eines Standortes, wird Zeit und Distanz zwischen Parkposition und Standort als vernachlässigbar klein angenommen.

Die Bewegungen der Flottenfahrzeuge werden weiterhin als untereinander unabhängig betrachtet, d.h. es findet *keine Koordination* zwischen den Fahrzeugen bei der Interaktion mit der Ladeinfrastruktur statt. Die begrenzte Kapazität eines Standortes kann also beispielsweise dazu führen, dass ein Fahrzeug einen Ladeplatz belegt und damit zu einem späteren Zeitpunkt keine freie Kapazität mehr für ein weiteres eintreffendes Fahrzeug mit niedrigerem SOC zur Verfügung steht.

Die benötigte Zeit für eine Vollladung des Fahrzeugs kann länger oder kürzer sein als die Dauer des Parkvorgangs. Im ersten Fall tritt das Fahrzeug seine nächste Fahrt mit einer Teilladung an und hat eine dementsprechend verringerte Restreichweite. Im zweiten Fall wird der Ladeplatz über die gesamte Parkdauer belegt, auch wenn der Energietransfer bereits abgeschlossen ist. Ein implizites „Umparken“ beim Abschluss des Energietransfers wird also nicht angenommen.

Für alle Ladestandorte wird eine unbegrenzte Verfügbarkeit der gesamten Kapazität im betrachteten Zeitraum angenommen, d.h. es gibt *keine Öffnungszeiten*. In der Praxis sind Standorte denkbar, die für die Fahrzeuge in bestimmten Zeitintervallen nicht oder nur mit reduzierter Kapazität zur Verfügung stehen. Dieser Fall wird im Rahmen der folgenden Betrachtung ausgeblendet, könnte aber mit wenig Aufwand in die Evaluation der verfügbaren Ladeoptionen bei Ankunft eines Fahrzeuges integriert werden.

5.3 Ein Mobilitätsmodell für Mobilitätsdienstleister

Grundlage der Planungsmethode ist ein *Bewegungsszenario* aller betrachteten Fahrzeuge über einen bestimmten Zeitraum, aus denen sich der genaue Reichweitenbedarf je Fahrzeug ergibt. Da jede Flotte ganz unterschiedliche Bewegungsmuster haben kann, wird im Folgenden ein Mobilitätsmodell zur Beschreibung der Flottencharakteristika eines Mobilitätsanbieters vorgestellt. Auf Basis der im Modell hinterlegten Verteilungen und zusätzlicher Parameter können Bewegungsszenarien für beliebige Gebiete und Flottengrößen generiert werden. Grundlage des Mobilitätsmodells ist eine Klassifikation der betrachteten Gebiete. Abschnitt 5.3.4 beschreibt mögliche Einteilungen, die eine Beschreibung der Bewegungsmuster ermöglichen.

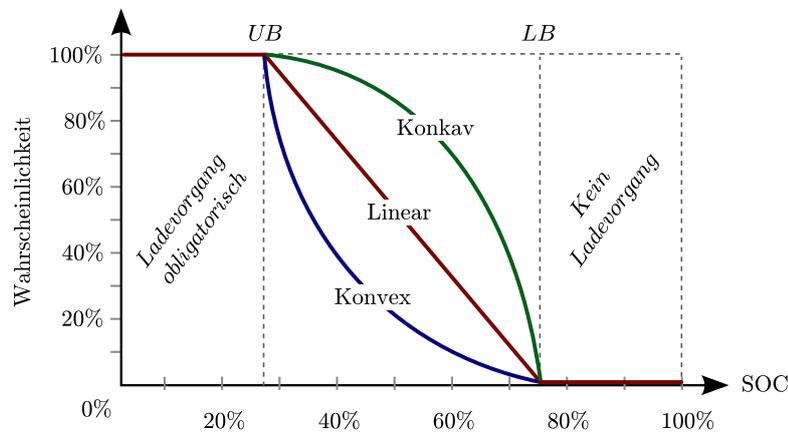


Abbildung 5.2: Verteilung der Wahrscheinlichkeiten einer Ladeentscheidung in Abhängigkeit vom SOC

5.3.1 Annahmen des Modells

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, die dem vorgestellten Mobilitätsmodell zugrunde liegen. Vor dem Einsatz des Modells für derartige Fahrzeugflotten muss geprüft werden, ob die beschriebenen Annahmen den Beobachtungen im realen Flottenbetrieb entsprechen.

Unabhängigkeit der Fahrzeugbewegungen

Die Bewegungen der Fahrzeuge durch den Fahrzeugnutzer erfolgen unabhängig voneinander, d.h. eine Fahrt ist ausschließlich über ihren Start- und Zielort charakterisiert und hängt nicht von der Bewegung eines anderen Fahrzeugs ab. Dies betrifft sowohl die Abstimmung der Fahrzeuge untereinander als auch die Unabhängigkeit von aufeinander folgenden Fahrten.

Gleichverteiltes Fahraufkommen

Die absolute Anzahl der durchgeführten Fahrten ist über alle Flottenfahrzeuge gleichverteilt. Dies betrifft nicht notwendigerweise auch die in Summe zurückgelegten Fahrtdistanzen über den betrachteten Zeitraum.

Regelmäßigkeit der Verteilungen

Die im Folgenden beschriebenen Häufigkeitsverteilungen beziehen sich auf die Gesamtheit aller Fahrten bzw. auf bestimmte Zeiträume und Wochentage. Für die Generierung des

Szenarios gilt die Annahme, dass sich die Häufigkeiten in getrennten Zeiträumen und für alle Fahrzeuge regelmäßig so verhalten wie in der Verteilung beschrieben.

Zeitliche Unabhängigkeit von Einwegfahrten

Die Häufigkeit von Einwegfahrten bzw. Rundtouren wird nur in Abhängigkeit von der Gebietskategorie betrachtet. Insbesondere Zeitpunkt und Distanz der Fahrt hat keinen Einfluss auf die Häufigkeit.

5.3.2 Verteilungen

Das Mobilitätsmodell basiert auf diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die das Verhalten der Fahrzeuge beschreiben. Die Schätzung dieser Verteilungen kann auf Basis von Floating Car Data (FCD) erfolgen. Dabei werden Bewegungen und Parkvorgänge von Flottenfahrzeugen via GPS über einen bestimmten Zeitraum aufgezeichnet (vgl. [PJZJ11], S. 194).

TDFD - Trip Distance Frequency Distribution

Die Trip Distance Frequency Distribution (TDFD) ist eine der zentralen Parameter des Mobilitätsmodells. Auf Basis dieser diskretisierten Häufigkeitsverteilung der von den Flottenfahrzeugen zurückgelegten Einzeldistanzen generiert das Mobilitätsmodell die einzelnen Fahrten. In Abhängigkeit vom Anwendungsfall kann diese Verteilung sehr unterschiedliche Formen annehmen.

Als *Fahrt* wird dabei die insgesamt zurückgelegte Distanz zwischen zwei Punkten aufgefasst, an denen überhaupt ein Ladevorgang stattfinden kann. Zwischenstopps von kurzer Dauer oder an ungeeigneten Orten werden ggf. ignoriert und zu größeren Fahrten zusammengefasst.

Die TDFD ergibt sich empirisch aus der Häufigkeitsverteilung der (gerundeten) Gesamtdistanzen aller Fahrten. Die Simulation betrachtet eine endliche Menge diskreter Ausprägungen, wobei diese auch durch Diskretisierung eines Intervalls aus der Standortnormalverteilung oder der logarithmischen Normalverteilung gewonnen werden können. Enthält die TDFD Ausprägungen, die bei einem bestimmten Verbrauch über der Kapazität der Batterie liegen, können ungültige Sequenzelemente entstehen.

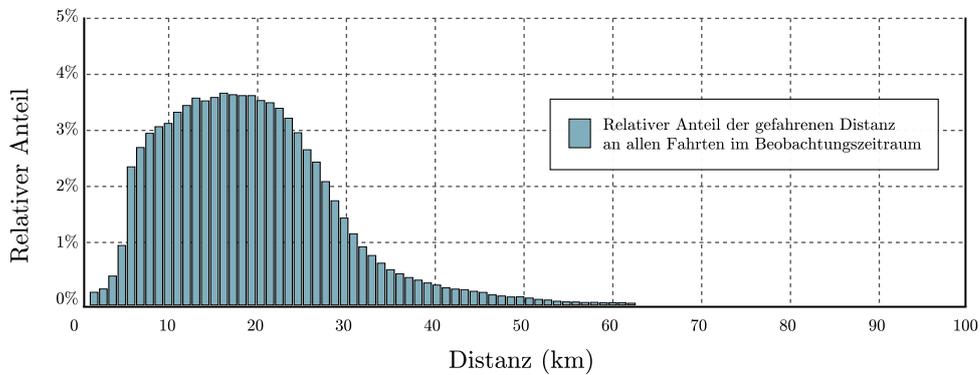


Abbildung 5.3: Histogramm Trip Distance Frequency Distribution (Skizze)

TSFD - Trip Speed Frequency Distribution

Die Trip Speed Frequency Distribution (TSFD) beschreibt die Verteilung des Verhältnisses zwischen Distanz und Dauer einer Fahrt (Durchschnittsgeschwindigkeit). Da sich das Fahrzeug zwischen den Parkpositionen nicht notwendigerweise immer in Bewegung befinden muss, können auch sehr geringe Geschwindigkeiten auftreten. Üblicherweise werden die Ausprägungen im Stadtverkehr durch häufige Haltevorgänge und die erlaubte Höchstgeschwindigkeit begrenzt.

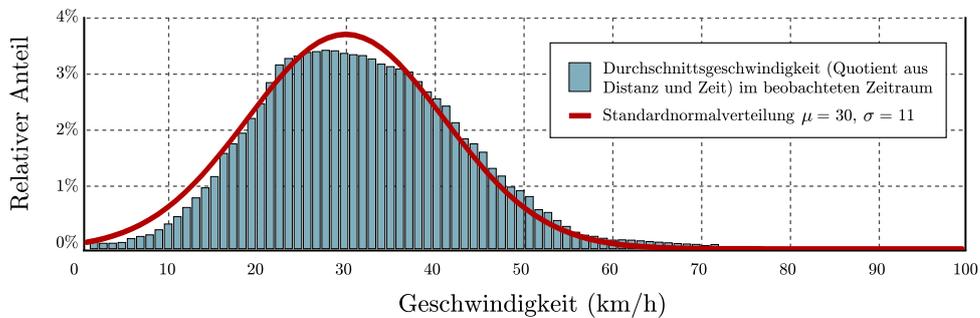


Abbildung 5.4: Histogramm Trip Speed Frequency Distribution (Skizze)

TDRFD - Trip Distance Ratio Frequency Distribution

Die Trip Distance Ratio Frequency Distribution (TDRFD) beschreibt das Verhältnis zwischen der tatsächlich zurückgelegten Fahrstrecke eines Flottenfahrzeugs und der euklidischen Distanz zwischen Start- und Zielpunkt. Aus dieser Verteilung geht deutlich präziser als bei einem Umwegfaktor (siehe Abschnitt 3.4.1) hervor, ob sich Fahrzeuge auf einem direkten Weg zwischen den Parkpositionen bewegen oder deutlich größere Touren zurücklegen.

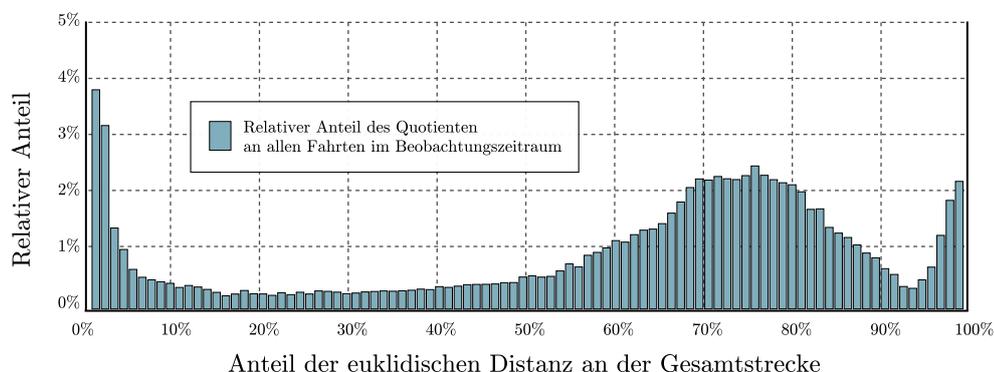


Abbildung 5.5: Histogramm Trip Distance Ratio Frequency Distribution (Skizze)

Abbildung 5.6 illustriert einen typischen Unterschied zwischen euklidischer und realer Distanz. Da die Luftlinie immer eine untere Schranke für die reale Distanz ist, wird der Quotient niemals den Wert 1 übersteigen. Für Stadtgebiete bewegt sich die Verteilung üblicherweise um einen mittleren Umwegfaktor (vgl. [BK83, BK85]) und streut stark an den Rändern.

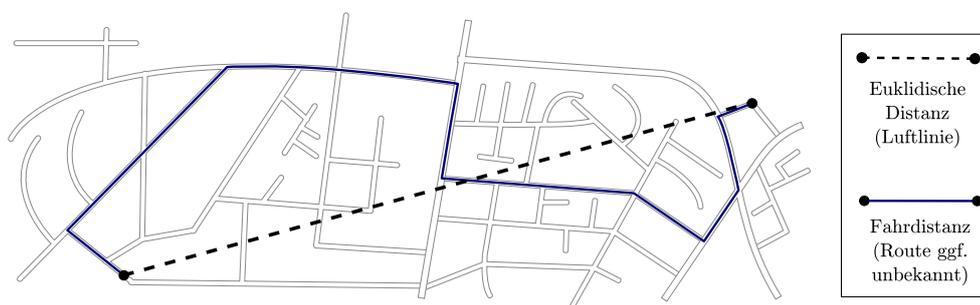


Abbildung 5.6: Verhältnis zwischen Fahrstrecke und euklidischer Distanz

TRFD - Trip Relation Frequency Distribution

Die Trip Relation Frequency Distribution (TRFD) beschreibt die Bewegungsmuster der Flottenfahrzeuge (relative Häufigkeiten der Fahrten) in Abhängigkeit vom Startzeitpunkt und den Kategorien von Start- und Zielgebiet. Die Zeitpunkte werden dabei z.B. auf Stundenebene aggregiert. Sei \mathcal{C} die Menge aller Gebietskategorien, dann besitzt die Verteilung genau $i = 24 \cdot |\mathcal{C}|^2$ Ausprägungen. Pro Zeitabschnitt t enthält $M_{c,c',t}$ den Anteil der Fahrten von Gebietskategorie $c \in \mathcal{C}$ in Gebietskategorie $c' \in \mathcal{C}$. Es gilt

$$0 \leq M_{c,c',t} \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{c' \in \mathcal{C}} M_{c,c',t} = 1.$$

Abbildung 5.7 illustriert die Verteilung für 3 Gebietskategorien und vier Zeitabschnitte.

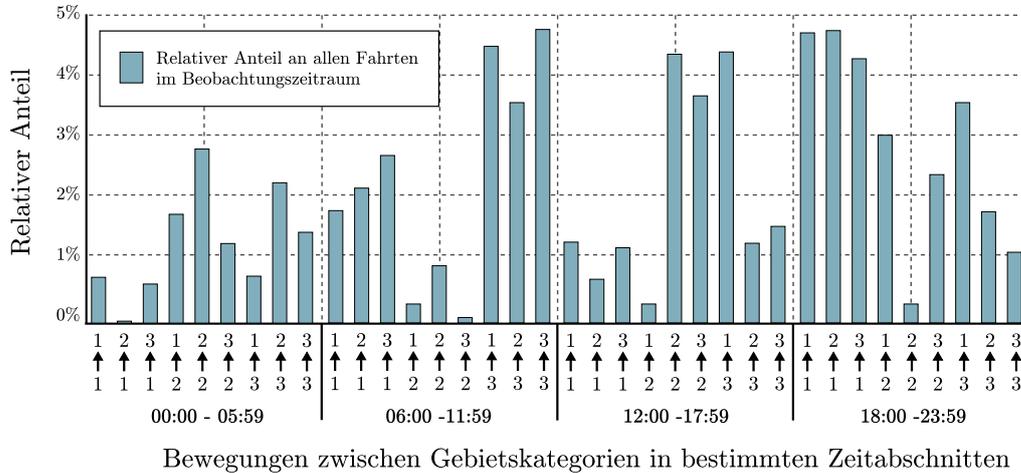


Abbildung 5.7: Histogramm Trip Relation Frequency Distribution (Skizze)

TOFD - Trip One-Way Frequency Distribution

Die Trip One-Way Frequency Distribution (TOFD) beschreibt die relative Häufigkeit von Einwegfahrten in Abhängigkeit von der Kategorie des Startgebietes. Eine Einwegfahrt endet grundsätzlich in einem anderen Gebiet (beliebiger Kategorie), während bei einer Rundtour Start- und Zielgebiet identisch sind. Sei \mathcal{C} die Menge aller Gebietskategorien, dann besitzt die Verteilung genau $i = 2 \cdot |\mathcal{C}|$ Ausprägungen.

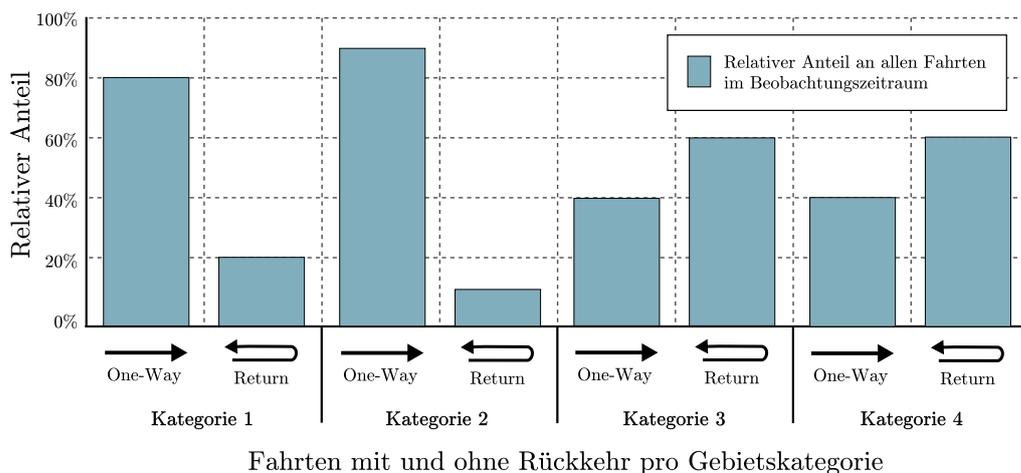


Abbildung 5.8: Histogramm Trip One-Way Frequency Distribution (Skizze)

Die Größe der Gebiete sollte nicht zu groß gewählt werden, damit Einwegfahrten nicht irrtümlich als Rundtour klassifiziert werden.

PDFD - Parking Duration Frequency Distribution

Die Parking Duration Frequency Distribution (PDFD) beschreibt die Verteilung von Standzeiten je Gebietskategorie und Ankunftszeitpunkt (auf Stundenebene).

TPWDFD - Trips Per Weekday Frequency Distribution

Die Trips Per Weekday Frequency Distribution (TPWFD) gibt die Verteilung des Fahraufkommens einer Woche auf die jeweiligen Wochentage an und besitzt damit genau sieben Ausprägungen.

5.3.3 Pseudozufallszahlen beliebiger Verteilungen

Zur Erzeugung eines Bewegungs-Szenarios auf Basis des Mobilitätsmodells müssen iterativ Zufallszahlen erzeugt werden, die den vorgegebenen Verteilungen genügen. Entwicklungsbibliotheken wie das .NET Framework stellen üblicherweise Funktionen bereit, mit denen gleichverteilte (Pseudo-)Zufallszahlen in einem beliebigen Intervall generiert werden können (vgl. [Ell10], S. 296). *Liebl* benennt 5 wesentliche Eigenschaften, die ein guter Pseudo-Random Number Generator (PRNG) - typischerweise im Intervall $[0, 1]$ - erfüllen muss (vgl. [Lie95], S. 26f):

- **Unabhängigkeit.** Die erzeugten Zufallszahlen müssen paarweise unabhängig sein, d.h. es lässt sich keine *serielle Autokorrelation* nachweisen.
- **Gleichverteilung.** Die erzeugten Zufallszahlen müssen sich gleichmäßig im Intervall verteilen, d.h. die Dichtefunktion nimmt einen nahezu konstanten Wert an.
- **Besetzungsdichte.** Die endliche Anzahl der Ausprägungen des Generators muss ausreichen, um das Intervall hinreichend dicht abzudecken.
- **Effizienz.** Die Erzeugung der Zufallszahlen soll möglichst schnell erfolgen und dabei wenig Speicher verbrauchen.
- **Reproduzierbarkeit.** Der Generator soll bei der Verwendung eines Startwertes immer eine identische Folge von Pseudozufallszahlen erzeugen.

Ein solcher Pseudozufallszahlengenerator kann als Grundlage für die Erzeugung anders verteilter Zufallszahlen eingesetzt werden, da „praktisch jede beliebige Verteilung aus

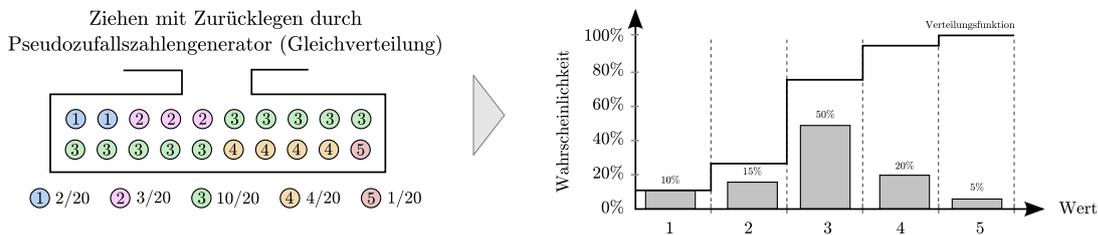


Abbildung 5.9: Erzeugung von Pseudozufallszahlen mit dem Urnenmodell

einer Gleichverteilung im Intervall $[0,1]$ erzeugbar ist“ ([Lie95], S. 25). Dabei kann eine *Wahrscheinlichkeitstransformation* über die Umkehrfunktion der kumulierten Verteilungsfunktion (Inversionsmethode) durchgeführt werden (vgl. [Lie95], S. 36). Nach *Liebl* ist es in einigen Fällen effizienter, auf die Inversionsmethode zu verzichten und stattdessen ein Experiment nachzubilden, welches bei gleichverteilter Eingangsgröße eine Ausgangsgröße mit der gesuchten Verteilung erzeugt (vgl. [Lie95], S. 44).

Die Verwendung des *Urnenmodells* ermöglicht den Aufbau solcher Zufallsexperimente. Es garantiert nach *Sachs* die „Realisierbarkeit einer reinen Zufallsstichprobe“ und ist bei „endlicher oder unendlicher Grundgesamtheit beliebig oft wiederholbar“ ([Sac04], S. 97). Abbildung 5.9 illustriert den Versuchsaufbau. Für jede diskrete Ausprägung der Zielverteilung wird eine Anzahl von Kugeln mit gleicher Eigenschaft in die Urne gelegt, so dass die relative Häufigkeit in der Urne der Wahrscheinlichkeit in der Zielverteilung entspricht.

Durch Ziehen mit Zurücklegen bei gleichverteilter Wahrscheinlichkeit aller Kugeln entsteht die gewünschte Zielverteilung durch Zählung der Häufigkeiten der verschiedenen Kugeleigenschaften. Die Anzahl der Kugeln muss geeignet gewählt werden, so dass die Häufigkeiten mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Für $i = 1 \dots n$ Ausprägungen mit den Häufigkeiten $H_i = \frac{a_i}{b_i}$ (a_i und b_i teilerfremd) und $\sum_i H_i = 1$ ist als Kugelanzahl das kleinste gemeinsame Vielfache aller b_i hinreichend.

5.3.4 Klassifikation von Gebieten

In der Verkehrs- und Stadtplanung existieren verschiedene Ansätze zur Kategorisierung von Gebieten, die jeweils in Abhängigkeit vom Anwendungsfall eingesetzt werden. Neben makroskopischen Einteilungen in Kreise, Gemeinden oder Stadtteile werden für Stadtgebiete einheitliche verkehrsräumliche Einheiten - genannt *Verkehrszellen* - sowie damit verbundene *Verkehrsvorgänge* definiert (siehe Abbildung 5.10). Die Einteilung wird

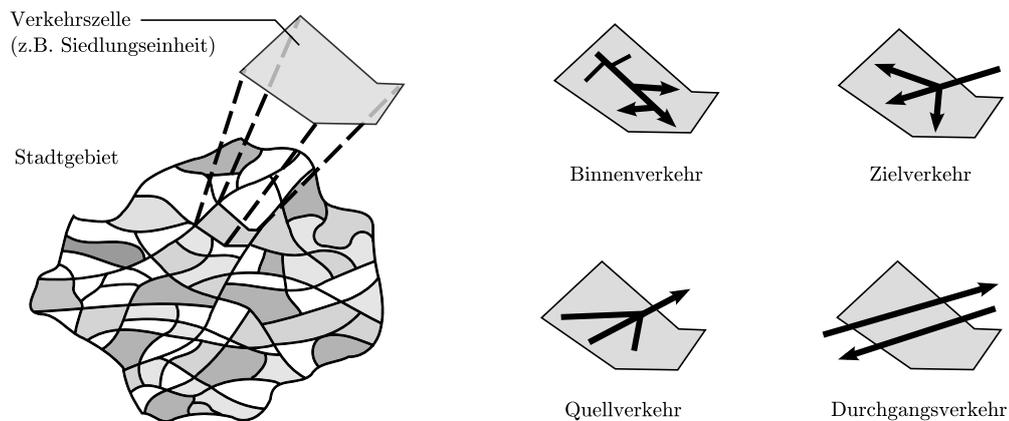


Abbildung 5.10: Verkehrszellen und Verkehrsvorgänge
(Quelle: [Str11], S. 278)

vorgenommen, um Struktur- und Verkehrsdaten für die Bereiche ausweisen zu können und dient zur aggregierten Darstellung von Verkehrsangebot und -nachfrage. Verkehrszellen sind die kleinsten Einheiten und können weiter zu Verkehrsvierteln und Verkehrsgebieten zusammengefasst werden (vgl. [Mik74], S. 18).

Eine weitere Gebietseinteilung für urbane Flächen stellt der gesetzlich vorgeschriebene Flächennutzungsplan (FNP) dar. Eine Gemeinde legt darin eine „zusammenfassende räumliche Planung auf der örtlichen Ebene“ fest und regelt „die an den voraussichtlichen Bedürfnissen der Gemeinde orientierte Art der Bodennutzung“ ([KB05], S. 180). Der zweite Abschnitt des deutschen Baugesetzbuchs regelt die erforderlichen Inhalte, insbesondere die Art der auszuweisenden Flächen (vgl. §5 *BauGB* - Stand Juli 2011). In der Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (*BauNVO*) werden dabei unter anderem die folgenden Gebietstypen unterschieden und ggf. weiter unterteilt (vgl. §1ff. *BauNVO* 93) :

- Wohngebiete (z.B. Kleinsiedlungen, Dorfgebiete, etc.)
- Mischgebiete (Wohnen und nicht wesentlich störender Gewerbebetrieb)
- Gewerbegebiete
- Industriegebiete
- Sondergebiete (z.B. Einkaufszentren, Hochschulen, Kliniken, etc.)

Ein Flächennutzungsplan erlaubt also die Klassifikation aller Flächen einer Gemeinde hinsichtlich ihrer gesetzlich geregelten baulichen Bestimmung. Er wird auch in anderen europäischen Ländern wie Frankreich (*plan local d'urbanisme*) und Großbritannien (*land-*

use plan) (vgl. [OEC10], S. 98ff) oder den vereinigten Staaten von Amerika (vgl. [Fab85], S. xxiii) angewandt.

Das entwickelte Mobilitätsmodell unterteilt den betrachteten Verkehrsraum abstrakt in einzelne Gebiete, die vorab definiert und einer *Kategorie* zugeordnet werden. Damit wird jede geographische Parkposition eines Fahrzeugs genau einem Gebiet mit einer spezifischen Gebietskategorie zugeordnet. Ebenso lassen sich die Bewegungen der Fahrzeuge zwischen Gebieten verschiedener oder gleicher Kategorien beschreiben. Die Abstraktion auf Gebietskategorien kann validiert werden, indem eine Regelmäßigkeit der aggregierten Verkehrsflüsse in verschiedenen Zeiträumen gezeigt wird.

Das Ereignis einer Fahrt und besonders dessen Zweck lassen sich nicht direkt aus der Beobachtung von Fahrzeugbewegungen ableiten. Die Abstraktion auf Gebietskategorien erlaubt die Ableitung von Verteilungen (siehe Abschnitt 5.3.2) aus verschiedenen Beobachtungszeiträumen und -gebieten, wenn die Bewegungen der Flottenfahrzeuge nicht regelmäßig zwischen bestimmten Gebieten, aber regelmäßig zwischen bestimmten Gebietskategorien stattfinden.

Eine sinnvolle Auswahl von Gebieten und Kategorien als Parameter für das Mobilitätsmodell kann für jede Flotte verschieden sein. Die Einteilung dient dazu, charakteristische Muster der Fahrzeugpositionen und -bewegungen zu beschreiben. Daher muss jede Einteilung zunächst auf Basis verfügbarer Daten auf *Validität* untersucht werden. Ein valides Mobilitätsmodell erzeugt Fahrzeugbewegungen, die statistisch möglichst nahe an den realen Beobachtungen liegen.

Die Durchführung einer *Gebietskategorisierung* ist also eine eigene Aufgabe, deren Ergebnis für verschiedene Flotten sehr unterschiedlich sein kann. Die Herausforderung besteht in der Wahl einer geeigneten Einteilung, in der sich tatsächlich spezifische Bewegungsmuster nachweisen lassen.

5.3.5 Erzeugen von Bewegungsszenarien

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Vorgehensweise bei der Generierung beliebiger Bewegungsszenarien. Als Eingabedaten dienen die Gebiete, Belegungen für alle Verteilungen und die nachfolgend beschriebenen Parameter. Ein Gebiet ist definiert durch seinen Namen, seine Kategorie und ein Polygon³⁷ zur Beschreibung der Fläche.

³⁷Ein Polygon im zweidimensionalen Raum ist eine paarweise unterschiedliche, geordnete Menge von mindestens drei Eckpunkten, deren Verbindung die Grenzen einer Fläche beschreiben.

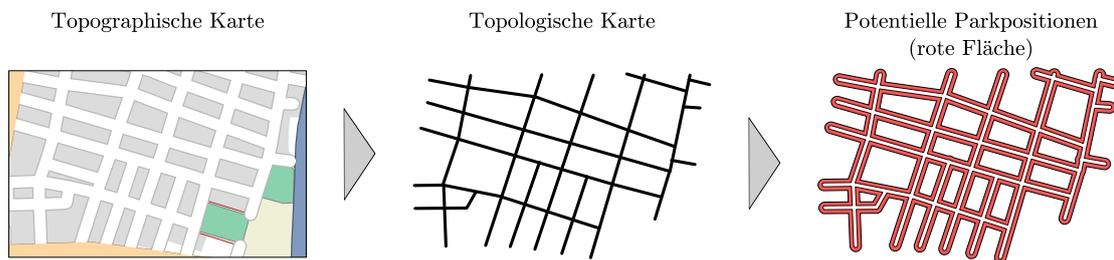


Abbildung 5.11: Erzeugung potentieller Parkpositionen aus einer topographischen Karte

Parameter

V	Gesamtanzahl Fahrzeuge im zu erzeugenden Szenario
T^{Start}	Startzeitpunkt des Szenarios
T^{End}	Endzeitpunkt des Szenarios
M	Gesamtanzahl der im Szenario zu erzeugenden Fahrzeugbewegungen
\mathcal{C}	Menge aller Gebietskategorien
\mathcal{A}^c	Menge aller Gebiete je Kategorie $c \in \mathcal{C}$

Gültige Parkpositionen in einem Gebiet

Die flächenmäßigen Grenzen eines Gebietes geben keinen Aufschluss über die tatsächlich möglichen Parkpositionen. In Stadtgebieten liegen potentielle Parkmöglichkeiten in der Regel auf oder sehr nahe an Straßen. Abbildung 5.11 illustriert, wie eine Punktmenge auf Basis der topologischen Karte des Straßennetzes als Menge aller möglichen Parkpositionen herangezogen werden kann. Die Parkpositionen innerhalb dieser Fläche werden als gleichverteilt angenommen.

Initiale Verteilung der Fahrzeuge

Zu Beginn eines Bewegungsszenarios muss eine initiale geographische Verteilung der Fahrzeuge auf Parkpositionen der Gebiete erfolgen. Die Verteilung der Flottenfahrzeuge auf die Gebietskategorien lässt sich auf Basis der TRFD bestimmen. Hierbei werden die Fahrzeuge auf Gebietstypen verteilt, in denen zu Beginn des Zeithorizonts mehr aus- als ein- fahrende Fahrzeuge vorkommen. Für jede Gebietskategorie $c \in \mathcal{C}$ wird im ersten Zeitraum des Tages t die Differenz zwischen ein- und ausgehenden Fahrten bestimmt:

$$D_c = \sum_{c' \in \mathcal{C}} (M_{c',c,t} - M_{c,c',t})$$

Auf alle Gebietskategorien $c \in \mathcal{C}$ mit negativem Saldo ($D_c < 0$) entfällt ein jeweiliger Anteil der Flottenfahrzeuge:

$$R_c = \begin{cases} 0 & \text{wenn } D_c > 0, \\ \frac{|D_c|}{\sum_{c \in \mathcal{C}} |D_c|} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Gesamtanzahl Fahrzeuge V wird auf Basis dieses Anteils auf Parkpositionen in den jeweiligen Gebieten (V_a mit $a \in \mathcal{A}^c$ und $\sum_{a \in \mathcal{A}} V_a = V$) verteilt. Die Gewichtung erfolgt auf Basis der Gebietsgröße S_a :

$$V_a = \left\lceil \frac{S_a \cdot R_c \cdot V}{\left(\sum_{a' \in \mathcal{A}^c} S_{a'}\right)} \right\rceil \quad \forall c \in \mathcal{C}, a \in \mathcal{A}^c$$

Ablauf der Generierung von Fahrzeugbewegungen

Da sich die Flottenfahrzeuge eines Mobilitätsanbieters grundsätzlich unabhängig voneinander bewegen, kann die Generierung der Fahrten für jedes Fahrzeug einzeln erfolgen. Ausgangspunkt ist jeweils die im vorherigen Schritt ermittelte initiale Parkposition des Fahrzeugs in einem der Gebiete. Abbildung 5.12 zeigt den Ablauf, in jedem Schritt ist die der Zufallsauswahl zugrunde liegende Verteilung angegeben.

Zunächst wird die Anzahl I_v aller Fahrten pro Fahrzeug $v \in \mathcal{V}$ mit $I_v \approx \frac{M}{V}$ festgelegt. Diese Gesamtanzahl wird anschließend auf Basis der TPWFD auf alle Werktage im betrachteten Zeitraum verteilt. Dadurch ergibt sich für jeden Tag $d \in \mathcal{D}$ eine festgelegte Anzahl von M_d Fahrzeugbewegungen.

Die Generierung der tagesspezifischen Fahrten erfolgt chronologisch. Ausgehend von der aktuellen Position des Fahrzeugs wird zunächst anhand der TOFD ermittelt, ob das Fahrzeug am Ende der Tour zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt oder in ein anderes Gebiet wechselt. Für Einwegfahrten wird anhand der TRFD festgelegt, in welchem Gebietstyp sich das Fahrzeug als nächstes bewegen wird. Mit der TTFD wird die reale Distanz der nächsten Fahrt bestimmt, die TRFD liefert die entsprechende Luftlinie.

Die Luftlinie spannt einen Radius um die Startposition. Als Kandidaten für das Zielgebiet kommen alle Gebiete der gewählten Kategorie in Frage, deren Grenzen möglichst nahe an diesem Radiuskreis liegen. Bei mehreren Kandidaten erfolgt die Auswahl gleichverteilt, ansonsten wird das Gebiet mit dem geringsten Abstand zum Radiuskreis gewählt. Die konkrete Parkposition im ermittelten Zielgebiet wird gleichverteilt aus der

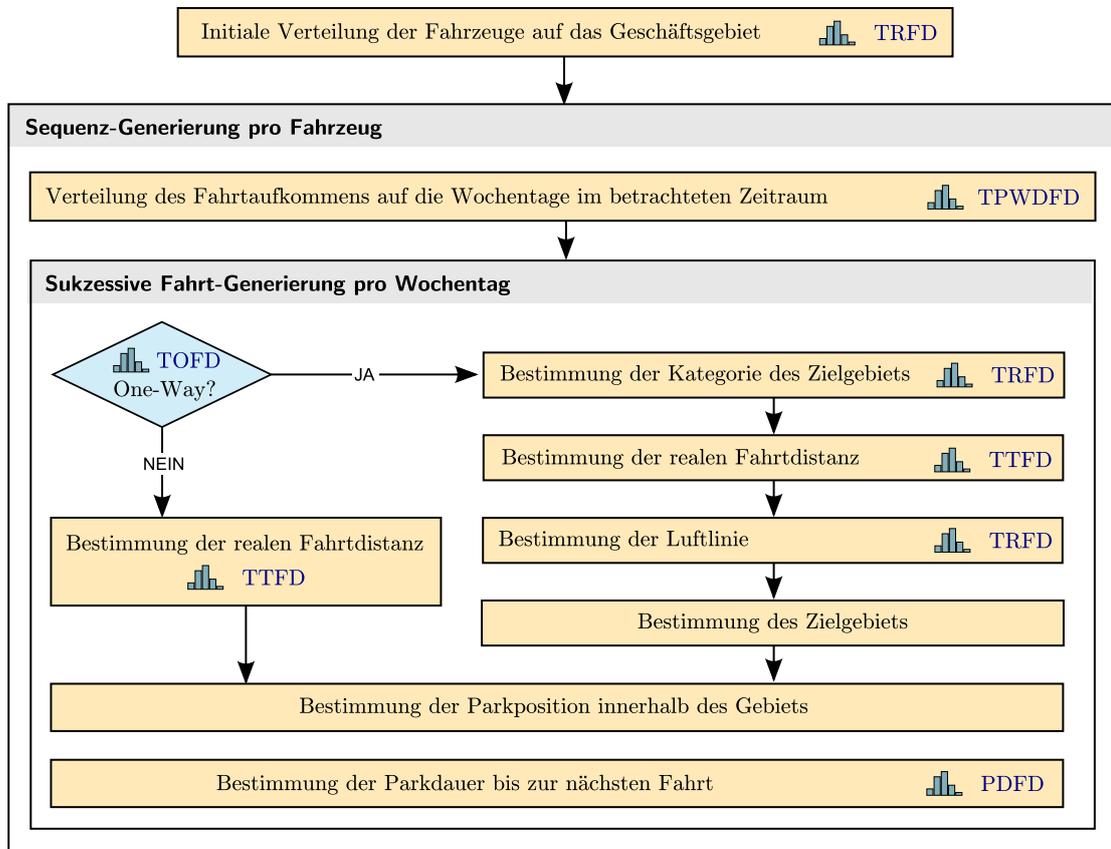


Abbildung 5.12: Generierung eines Bewegungsszenarios

Menge möglicher Punkte (siehe Abbildung 5.11) bestimmt. Schließlich wird durch die PDFD eine Parkdauer festgelegt und die nächste Fahrt generiert.

Die Generierung neuer Fahrten endet, wenn die festgelegte Anzahl erreicht ist. Es besteht auch die Möglichkeit, dass bei der Zufallsauswahl zu wenige Fahrten für den Tag erzeugt wurden. Die fehlende Anzahl wird dann auf den nächsten Tag übertragen, so dass sich Differenzen im Laufe der Tage ausgleichen.

5.4 Formale Beschreibung der Modellkomponenten

Im Folgenden werden die Mengen, Parameter und Variablen des Simulationsmodells erläutert. Es gilt die in Abschnitt 1.4 beschriebene Notation.

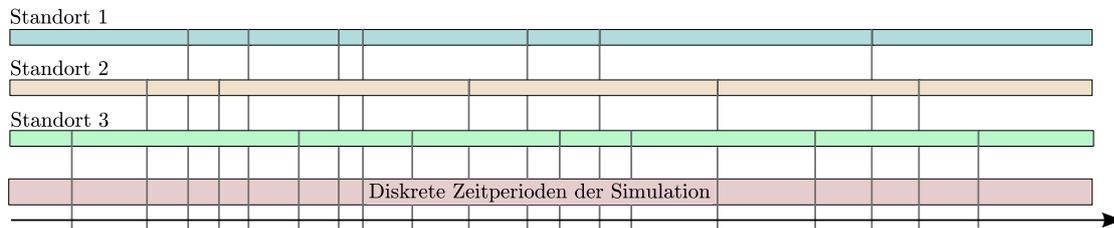


Abbildung 5.13: Kombinierte Zeitperioden der Simulation

Die Zeitscheiben jedes Standortes beschreiben einen Zeitraum mit unveränderlicher Auslastung und werden für jeden Standort a priori bestimmt (siehe Abschnitt 6.2.2). Zu Beginn und Ende jeder Zeitscheibe kann ein Fahrzeug eintreffen oder den Standort verlassen. Abbildung 5.13 illustriert die Kombination der Zeitperioden jedes Standortes zu einer Gesamtmenge diskreter Perioden für die Simulation. Da sich alle Fahrzeuge die Kapazität eines Standortes teilen, werden die möglichen Ankunftszeitpunkte chronologisch evaluiert.

Mengen

$\hat{\mathcal{L}}$	Menge aller verfügbaren Standorte im betrachteten Gebiet
$\hat{\mathcal{V}}$	Menge aller betrachteten Fahrzeuge
$\hat{\mathcal{T}}$	Menge aller diskreten Zeitscheiben (siehe auch Abbildung 5.13)
$\hat{\mathcal{L}}^{v,i}$	Menge aller verfügbaren Versorgungsstandorte an der Parkposition von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ vor Beginn von Fahrt $i \in \{1 \dots \hat{I}^v\}$ bzw. am Ende von Fahrt $i - 1$.
$\hat{\mathcal{T}}^{v,i,l}$	Menge aller Zeitscheiben, die von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ bei Verwendung des Standortes $l \in \hat{\mathcal{T}}$ nach der Fahrt $i - 1$ belegt werden. Die Zeitscheiben sind chronologisch geordnet und lassen sich entsprechend aufzählen. $t + 1$ bezeichnet hier den direkten Nachfolger von Zeitscheibe t . Der Startzeitpunkt des Nachfolgers $t + 1$ entspricht also dem Endzeitpunkt der Zeitscheibe t .

Parameter

\hat{N}	Anzahl der durchzuführenden Simulationsläufe
\hat{I}^v	Anzahl der Fahrten von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ im betrachteten Zeitraum
M_v	Kapazität der Batterie von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ (in kWh)

S_v	Standortauswahlstrategie der Nutzer von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ ($S_v \in \{Random, MinDistance, MinUtilization\}$)
A_v	Indikator, ob die Nutzer von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ ausgelastete Standorte vermeiden können
D_t^*	Dauer von Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^*$ (in Stunden)
S_t^*	Startzeitpunkt von Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^*$ (in Stunden relativ zum Beginn des gesamten Zeithorizonts)
$K_{l,n}^*$	Kapazität von Standort $l \in \mathcal{L}^*$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$
$D_{v,i}$	Distanz der Fahrt $i \in \hat{I}^v$ von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$
$T_{v,i,t}^{\text{Start}}$	Binärer Parameter, der genau dann den Wert 1 besitzt, wenn die Fahrt $i \in \hat{I}^v$ von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ zu Beginn von Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^*$ beginnt
$T_{v,i,t}^{\text{Ende}}$	Binärer Parameter, der genau dann den Wert 1 besitzt, wenn die Fahrt $i \in \hat{I}^v$ von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ am Ende von Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^*$ endet
$U_{v,n}^0$	Füllstand der Fahrzeugbatterie von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ zu Beginn von Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ in Prozent ($0 \leq U_{v,n}^0 \leq 1$)

Funktionsparameter

$C^{l,n}(u, h)$	$C : ([0, 1], \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ - Ladekurvenfunktion, die den relativen Füllstand der Fahrzeugbatterie bei einem Anfangsfüllstand von $0 \leq u \leq 1$ nach h Zeiteinheiten (Stunden) am Standort $l \in \hat{\mathcal{L}}$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ angibt
$B^n(u)$	$B : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ - Funktion, welche die Wahrscheinlichkeit einer Ladeentscheidung in Abhängigkeit vom Füllstand u eines Fahrzeugs im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ angibt
$F^{v,n}(c)$	$F : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ - Verteilungsfunktion des Verbrauchs in $\frac{\text{kWh}}{\text{km}}$ des Fahrzeugs $v \in \hat{\mathcal{V}}$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$

Variablen

$u_{v,t,n}$	Füllstand der Fahrzeugbatterie von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ zu Beginn von Zeitscheibe $t \in \hat{\mathcal{T}}$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ in Prozent ($0 \leq u_{v,t,n} \leq 1$)
$\tau_{v,i,l,n}$	Binärer Indikator, dass Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ am Ende von Fahrt $i - 1$ den Standort $l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}$ verwendet
$\omega_{v,i,l,n}$	Binärer Indikator, dass Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ am Ende von Fahrt $i - 1$ den Standort $l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}$ aufgrund vollständiger Auslastung nicht verwenden konnte
$k_{l,t,n}$	Absolute Anzahl belegter Ladeplätze im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ an Standort $l \in \hat{\mathcal{L}}$ in Zeitscheibe $t \in \hat{\mathcal{T}}$
$f_{v,i,n}$	Fehlreichweite von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ am Ende von Fahrt $i \in \hat{I}^v$ im Simulationslauf $n \in \{1 \dots \hat{N}\}$ in Kilometern

5.5 Ablauf der Simulation

Ein Durchlauf der Simulation läuft in einer Schleife chronologisch über alle Zeitscheiben. In jeder Iteration werden die Füllstände (SOC) der Fahrzeuge fortgeschrieben, wenn sich das Fahrzeug in Bewegung befindet oder einen Ladeplatz nutzt. Das Bewegungsszenario bestimmt, in welcher Zeitscheibe die Fahrzeuge jeweils ihre Fahrt an einer bestimmten Position beenden oder eine neue Fahrt beginnen.

Ankunft und Ladevorgang

Am Ende einer Fahrt $i \in \{1 \dots \hat{I}^v\}$ von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ evaluiert die Simulation eine mögliche Ladeentscheidung. Auf Basis einer Zufallsauswahl mit Wahrscheinlichkeit $B^n(u_{v,t,n})$ wird festgelegt, ob das Fahrzeug grundsätzlich einen Standort aufsuchen wird. Nur im Fall einer positiven Entscheidung wird ein möglicher Standort $l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}$ ausgewählt. Die Auswahl des Standortes erfolgt auf Basis der Strategie S_v und vermeidet vollständig ausgelastete Standorte, wenn $A_v = 1$ gilt. Falls durch die Auswahlstrategie kein freier Ladeplatz gefunden wird, wird $\omega_{v,i,l,n} = 1$ gesetzt und der Ladefüllstand $u_{v,t,n}$ für alle Zeitscheiben unverändert fortgeschrieben.

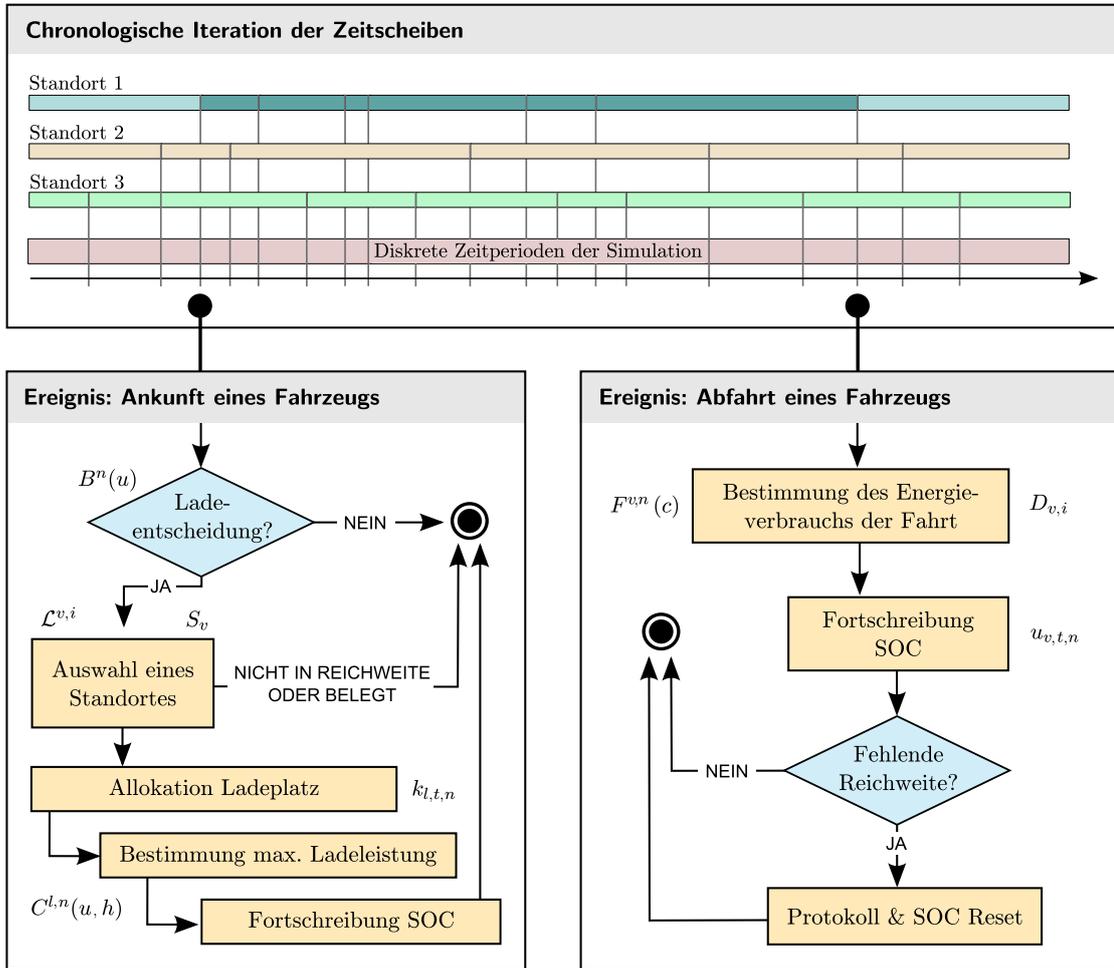


Abbildung 5.14: Strukturdiagramm eines Simulationslaufs

Konnte ein Ladeplatz $l \in \hat{\mathcal{L}}$ ermittelt werden, wird $\tau_{v,i,l,n} = 1$ gesetzt und $k_{l,t,n}$ für alle Zeitscheiben $t \in \hat{\mathcal{T}}^{v,i,l}$ aktualisiert. Schließlich wird der Füllstand des Fahrzeugs

$$C^{l,n} \left(u_{v,t,n}, \sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}^{v,i,l}} D_{t*} \right)$$

am Ende der Standzeit in den Variablen $u_{v,t,n}$ fortgeschrieben.

Abfahrt und nächste Fahrt

Zu Beginn einer neuen Fahrt $i \in \{1 \dots \hat{I}^v\}$ von Fahrzeug $v \in \hat{\mathcal{V}}$ wird der Gesamtenergieverbrauch $F^{v,n}(D_{v,i})$ ermittelt. Der verbleibende Füllstand wird über alle Zeitscheiben in den Variablen $u_{v,t,n}$ fortgeschrieben.

Es besteht die Möglichkeit, dass der Gesamtenergiebedarf höher ausfällt als die zur Verfügung stehende Restenergie in der Fahrzeugbatterie. In diesem Fall wird die Fehlreichweite bestimmt und in $f_{v,i,n}$ gespeichert. Der Füllstand des Fahrzeugs bei der Ankunft am nächsten Zielort wird auf Null gesetzt.

5.6 Ergebniskennzahlen

Das Ergebnis der Simulation ermöglicht eine quantitative Analyse der Versorgungssituation. Auf Basis einer Menge berechneter Kennzahlen können Aussagen über den Grad der erreichten Flottenversorgung getroffen und verschiedene Simulationsläufe miteinander verglichen werden. Die Variation einzelner Eingangsparameter erlaubt eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Ergebniskennzahlen. In Abhängigkeit von den Ausprägungen kann weiterer Handlungsbedarf identifiziert werden, etwa eine Anpassung des Betriebskonzepts, der technologischen Parameter oder die Veränderung von Standorten und Kapazitäten.

Im Folgenden werden Kennzahlen definiert, die als Indikatoren für die Auslastung der Standorte bzw. der Versorgungssituation der Standorte verwendet werden können. Die Kennzahlen sind aggregiert (gewichtete, arithmetische Mittelwerte) und können alternativ zur detaillierteren Analyse auch pro Fahrzeug und Standort einzeln berechnet werden.

Kennzahlen der Fahrzeuge

Aus dem Batteriefüllstand (SOC) der Fahrzeuge über die Zeit lassen sich verschiedene Kennzahlen berechnen, die Aufschluss über die Versorgungsqualität geben. Ein Fahrzeug gilt als optimal versorgt, wenn es sich bei jedem Parkvorgang im Versorgungsbereich eines Ladestandortes befindet, dort stets ausreichend Kapazität für alle Fahrzeuge zur Verfügung steht und die Standzeit immer für eine Vollladung ausreicht.

Die Kennzahl $\bar{S}_{v,n}$ gibt den pro Fahrzeug ermittelten durchschnittlichen Batteriefüllstand im Simulationslauf n an:

$$\bar{S}_{v,n} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}} (D_t^* \cdot (u_{v,t-1,n} + u_{v,t,n}))}{\sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}} D_t^*} \quad \forall v \in \hat{\mathcal{V}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.1)$$

Die Mittelwertbetrachtung von $\bar{S}_{v,n}$ erstreckt sich über den gesamten Zeitraum und bezieht alle Batteriefüllstände ein, unabhängig ob sie während einer Fahrt, eines Park- oder eines Ladevorgangs gemessen wurden. Die Kennzahl $\bar{D}_{v,n}$ schränkt den Beobachtungszeitraum auf den Abfahrtszeitpunkt ein und bestimmt den mittleren Ladefüllstand, der unmittelbar vor Fahrtantritt vorlag.

$$\bar{D}_{v,n} = \frac{\sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}} \sum_{i \in \hat{\mathcal{I}}^v} (T_{v,i,t}^{\text{Start}} \cdot u_{v,t,n})}{|\hat{\mathcal{I}}^v|} \quad \forall v \in \hat{\mathcal{V}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.2)$$

Analog gibt die Kennzahl $\bar{E}_{v,n}$ den durchschnittlichen Füllstand bei *Ankunft* des Fahrzeuges an:

$$\bar{E}_{v,n} = \frac{\sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}} \sum_{i \in \hat{\mathcal{I}}^v} (T_{v,i,t}^{\text{End}} \cdot u_{v,t,n})}{|\hat{\mathcal{I}}^v|} \quad \forall v \in \hat{\mathcal{V}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.3)$$

Die Häufigkeit von Ladevorgängen hängt pro Fahrzeug von den Fahrdistanzen und den verfügbaren Ladestandorten an den Parkpositionen ab. Der Indikator $\bar{R}_{v,n}$ gibt das Verhältnis zwischen Park- und Ladevorgängen an. Aus ihm lässt sich ablesen, nach welcher Anzahl Fahrten ein Fahrzeug im Durchschnitt einen Ladeplatz verwendet:

$$\bar{R}_{v,n} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}^v} \sum_{l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}} (\tau_{v,i,l,n})}{|\hat{\mathcal{I}}^v|} \quad \forall v \in \hat{\mathcal{V}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.4)$$

Ein Ladeplatz gilt im vorliegenden Modell für die gesamte Parkdauer als belegt, auch wenn der Energieträger bereits vor dem nächsten Abfahrtszeitpunkt vollständig aufgeladen ist. Die Kennzahl $\bar{C}_{v,n}$ gibt an, welcher Anteil der Zeit aller Ladevorgänge aufgrund vollständiger Aufladung nicht für den Energietransfer verwendet wurde:

$$\bar{C}_{v,n} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}^v} \sum_{l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}} \sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}^{v,i,l}} (D_t^* \cdot \tau_{v,i,l,n})}{\sum_{i \in \mathcal{I}^v} \sum_{l \in \hat{\mathcal{L}}^{v,i}} \sum_{t \in \hat{\mathcal{T}}^{v,i,l}} (D_t^* \cdot \tau_{v,i,l,n})} \quad \forall v \in \hat{\mathcal{V}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.5)$$

Kennzahlen der Standorte

Der Auslastungsgrad eines Standortes gibt das Verhältnis zwischen belegten und insgesamt verfügbaren Ladeplätzen an. Er kann über den betrachteten Zeitraum in Abhängig-

keit von der Nachfrage stark schwanken. Für Flotten-Betreiber oder Infrastruktur-Provider können sich aus der Auslastung indirekt Kosten ergeben, wenn eine nutzungsabhängige Vergütung der Stellplätze erfolgt, etwa in bewirtschaftetem Parkraum (vgl. [PWJZ09], S. 364ff). Die Kennzahl $\bar{U}_{l,n}$ beschreibt den zeitlich gewichteten mittleren Auslastungsgrad eines Standortes l im Simulationslauf n :

$$\bar{U}_{l,n} = \left(\frac{1}{\sum_{t \in \hat{T}} D_t^*} \right) \cdot \sum_{t \in \hat{T}} \left(\frac{k_{l,t,n}}{K_{l,n}} \cdot D_t^* \right) \quad \forall l \in \hat{\mathcal{L}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.6)$$

Der durchschnittliche Auslastungsgrad erlaubt keinen Rückschluss auf die Auslastung zu Spitzenzeiten. Die Kennzahl $\bar{A}_{l,n}$ gibt an, zu welchem Anteil der Gesamtzeit alle Ladeplätze eines Standortes belegt waren. Sie dient primär als Indikator für fehlende Kapazitätsreserven.

$$\bar{A}_{l,n} = 1 - \left(\frac{1}{\sum_{t \in \hat{T}} D_t^*} \right) \cdot \sum_{t \in \hat{T}} (\max(1, K_l - k_{l,t}) \cdot D_t^*) \quad \forall l \in \hat{\mathcal{L}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.7)$$

Bei voller Auslastung eines Standortes kann es im Durchlauf der Simulation vorkommen, dass Fahrzeuge abgewiesen werden. Pro Standort wird die Häufigkeit dieses Ereignisses gespeichert, so dass ein Indikator berechnet werden kann. Die Kennzahl $\bar{O}_{l,n}$ gibt an, welcher Anteil die Anzahl abgewiesener Fahrzeuge an allen Fahrzeugen hat:

$$\bar{O}_{l,n} = \frac{\sum_{v \in \hat{\mathcal{V}}} \sum_{i \in \{1 \dots \hat{I}_v\}} \omega_{v,i,l,n}}{\sum_{v \in \hat{\mathcal{V}}} \sum_{i \in \{1 \dots \hat{I}_v\}} (\omega_{v,i,l,n} + \tau_{v,i,l,n})} \quad \forall l \in \hat{\mathcal{L}}, n \in \{1 \dots \hat{N}\} \quad (5.8)$$

Kostenoptimale Bestimmung der Standortkapazitäten

In diesem Kapitel wird auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Bewegungsszenarien die Auswahl von Standorten und die Festlegung einer Betriebskapazität als lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell formuliert. Neben der Formulierung praktischer Erweiterungen folgt eine Bestimmung der Komplexitätsklasse. Das Kapitel schließt mit einer Beschreibung der Lösungsmethodik, der sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Reduktion der Laufzeitkomplexität und einer alternativen, objektorientierten Modellierung zur weiteren Verwendung in einem Lösungsverfahren. Auszüge dieses Kapitels sind in [SSK11] beschrieben.

6.1 Einordnung der Methodik

Die Modellierung des vorgestellten Entscheidungsproblems erfolgt als *lineares, gemischt-ganzzahliges* Optimierungsmodell (MIP). Ein Optimierungsmodell heißt *linear*, wenn die Zielfunktion und alle Restriktionen nur aus *Linearkombinationen* der Entscheidungsvariablen bestehen (vgl. [SM09], S. 8). Der Wertebereich der Entscheidungsvariablen eines linearen Programms (LP) besteht immer aus einer Teilmenge der reellen Zahlen \mathbb{R} . Ein lineares Programm heißt *ganzzahlig* (IP), wenn der Wertebereich der Entscheidungsvariablen aus einer Teilmenge der ganzen Zahlen \mathbb{Z} besteht.

LPs können mit exakten Verfahren (*LP-Solvern*) wie dem *Simplex-Algorithmus* (vgl. [SM09], S. 46ff) oder *Innere-Punkte-Verfahren* (IPM, vgl. [KW97], S. 84ff) gelöst werden.

Sobald der Wertebereich der Variablen teilweise ganzzahlig ist, sind neue Verfahren (*MIP-Solver*) nötig, die intern weiterhin LP-Solver nutzen (vgl. [KW97], S. 86). Abschnitt 6.7 beschreibt die Techniken des Branch & Bound zur Lösung von MIP-Modellen.

6.2 Preprocessing

Das vorgestellte Optimierungsmodell greift auf verschiedene Modellierungstechniken zur exakten Abbildung des Entscheidungsproblems zurück. Die Parameter des Modells müssen dafür teilweise vor der Generierung von Modellinstanzen aus den Eingangsdaten berechnet werden. In diesem Abschnitt wird die Bestimmung der Versorgungsbereiche, die Generierung der Zeitscheiben und die Berechnung hinzugewinnbarer Reichweite in Abhängigkeit von der Parkdauer beschrieben.

6.2.1 Allokation des Versorgungsbereichs

Die Allokation von Parkvorgängen zu potentiellen Ladestandorten im Preprocessing bestimmt für jedes Fahrzeug und jede Parkposition die Menge potentiell benutzbarer Versorgungsstandorte. L bezeichnet die Menge aller potentiellen Standorte, P die Menge aller Parkpositionen. Im ersten Schritt wird die symmetrische Distanzmatrix $D = (d_{l,p})$ befüllt, der Parameter $d_{l,p}$ bezeichnet die kürzeste Distanz zwischen Standort $l \in L$ und Parkposition $p \in P$. Gesucht ist für jede Parkposition $p \in P$ die Menge $O^p \subseteq L$ aller potentiellen Versorgungsstandorte.

Der *Versorgungsbereich* eines Ladestandortes $l \in L$ (vgl. Abschnitt 2.3.5) beschreibt in Abhängigkeit von den geographischen Gegebenheiten eine zulässige Menge von Koordinaten, die in unmittelbarer Nähe des Standortes liegen. Auf Basis einer Annahme über eine maximal zumutbare Wegstrecke d^{Max} zwischen Fahrzeug und Ladeplatz kann für jede Parkposition entschieden werden, ob sie im Versorgungsbereich eines oder mehrerer Ladestandorte liegt. Parkvorgänge jenseits dieses Bereichs werden nicht abgedeckt, es findet kein implizites Umparken statt.

$$O^p = \{l \in L \mid d_{l,p} \leq d^{Max}\} \quad \forall p \in P \quad (6.1)$$

Zur exakten Bestimmung der Wegedistanzen wird für jedes Paar $(l, p) \in L \times P$ ein Algorithmus benötigt, der die kürzeste Route zwischen Fahrzeug und Ladestandort

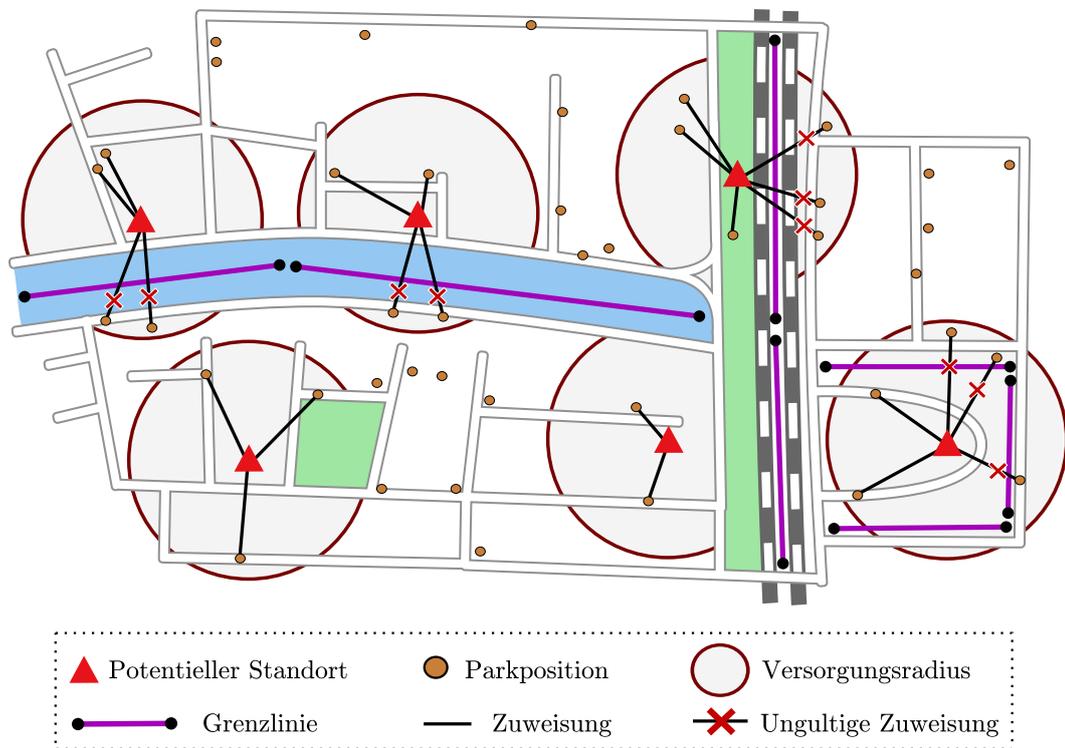


Abbildung 6.1: Bestimmung der Versorgungspunkte mit Grenzlinien

ermittelt und ihre Gesamtdistanz bestimmt. Obwohl die Distanzmatrix nur einmal berechnet werden muss, benötigt dieser Schritt für praktische Problemgrößen eine sehr lange Laufzeit³⁸.

Für Verkehrsnetze lässt sich der *Versorgungsbereich* durch einen kreisförmigen *Versorgungsradius* approximieren (vgl. [HPS09], S. 6). Der Abstand zwischen Fahrzeug und Standort berechnet sich dann über die euklidische Distanz unter Einbeziehung eines approximativen *Umwegfaktors* (vgl. [BK83, BK85]). Zur exakteren Bestimmung des Abstandes zwischen zwei GPS-Koordinaten sind trigonometrische Berechnungen notwendig (siehe Abschnitt 3.4.1), die deutlich schneller als eine Routenplanung ausgeführt werden können.

Zur Beschleunigung der Distanzberechnung für ein gegebenes d^{Max} wird die Menge der potentiellen Paare $(l, p) \in L \times P$ zunächst gefiltert. Dabei werden nur Koordinaten betrachtet, deren Wertebereiche innerhalb des Versorgungsradius liegen *könnten*. Der

³⁸ Beispiel: Für 20.000 Parkpositionen und 200 potentielle Standorte sind 4 Millionen Berechnungen nötig. Kann ein schneller Algorithmus nur 1.000 kürzeste Routen pro Sekunde berechnen, dauert die vollständige Generierung einer Distanzmatrix über eine Stunde.

Abstand zwischen zwei Breitengraden, d.h. die Länge eines Grades, lässt sich über den mittleren Erdradius 6.371 km bestimmen mit

$$d_{Lat} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 6371 \text{ km}}{2 \cdot 180 \text{ Grad}} \approx 111 \left[\frac{\text{km}}{\text{Grad}} \right] \quad (6.2)$$

Der Abstand zwischen zwei Längengraden d_{Lon} verringert sich vom Äquator zu den Polen (vgl. [Stü00], S. 18f) und lässt sich für einen gegebenen Längengrad Lat_x mit der Formel $d_{Lon} = d_{Lat} \cdot \cos(Lat_x)$ approximieren. Für eine gegebene Standortkoordinate (X_{Lat}, X_{Lon}) und eine maximale Distanz d^{Max} (in Kilometern) müssen nur Koordinaten (Y_{Lat}, Y_{Lon}) betrachtet werden, die folgende Eigenschaft erfüllen:

$$|X_{Lat} - Y_{Lat}| \leq \left(\frac{d^{Max}}{d_{Lat}} \right) \wedge |X_{Lon} - Y_{Lon}| \leq \left(\frac{d^{Max}}{d_{Lat} \cdot \cos(X_{Lat})} \right) \quad (6.3)$$

Die Approximation des Versorgungsbereichs eines Ladestandortes durch einen Versorgungsradius kann fehlerhafte Ergebnisse produzieren, wenn der tatsächliche Weg für das Fahrzeug durch bauliche oder geographische Gegebenheiten³⁹ wesentlich länger ist. Durch das manuelle Einfügen von *Grenzlínen* lassen sich diese Fehler deutlich reduzieren. Eine direkte Linie zwischen Standort und Parkposition ist nur dann zulässig, wenn sie keine gemeinsamen Punkte mit einer Grenzlínie besitzt. Schnittpunkte von Liniensegmenten lassen sich algorithmisch effizient bestimmen (vgl. [Kle05], S. 64ff). Abbildung 6.1 illustriert die Zuweisung von Fahrzeugpositionen zu potentiellen Versorgungsstandorten unter Berücksichtigung definierter Grenzlínen. Die prozedurale Vorgehensweise beschreibt der Algorithmus *LocationAssignment*.

6.2.2 Generierung der Zeitscheiben

Die Kapazitätsbestimmung eines Ladestandortes soll im entwickelten Modell exakt abgebildet werden (siehe Abschnitt 4.2.4). Der Betrieb eines Standortes ermöglicht dessen Nutzung als Folge einer Ladeentscheidung, die Auslastung hängt von der simultan festgelegten Kapazitätsstufe ab. Das vorliegende Modell ist ein *zeitdiskretes Modell* (vgl. [Sür06], S. 3), d.h. der gesamte Zeitraum des Bewegungsszenarios wird in diskrete Zeitscheiben unterteilt.

³⁹ Beispiele sind Schnellstraßen, Tunnel, Einbahnstraßen, Bahngleise, Kanäle, Flüsse & Gewässer.

Algorithmus 1: LocationAssignment

Eingabe : Koordinaten potentieller Standorte \mathcal{L} , Koordinaten der Parkpositionen \mathcal{P} ,
Grenzl原因 \mathcal{G} , Maximaldistanz (in *km*) d^{Max}

Ausgabe: Potentielle Versorgungsstandorte \mathcal{L}^p je Parkposition $p \in \mathcal{P}$

```

1: { Konstanten festlegen }
2:  $d_{Lat} \leftarrow 111$  [km]
3:  $R \leftarrow 6.371$  [km]
4: forall  $l = (L_{Lat}, L_{Lon}) \in \mathcal{L}$  do
5:    $d_{Lon} \leftarrow d_{Lat} \cdot \cos(L_{Lat})$ 
6:    $\mathcal{P}' \leftarrow \left\{ (P_{Lat}, P_{Lon}) \in \mathcal{P} \mid |L_{Lat} - P_{Lat}| \leq \left( \frac{d^{Max}}{d_{Lat}} \right) \wedge |L_{Lon} - P_{Lon}| \leq \left( \frac{d^{Max}}{d_{Lon}} \right) \right\}$ 
7:   forall  $p = (P_{Lat}, P_{Lon}) \in \mathcal{P}'$  do
8:     { Distanz nach dem Kugelmodell berechnen }
9:      $h \leftarrow \sin(L_{Lat}) \cdot \sin(P_{Lat}) + \cos(L_{Lat}) \cdot \cos(P_{Lat}) \cdot \cos(P_{Lon} - L_{Lon})$ 
10:     $d_{l,p} \leftarrow \arccos(h) \cdot R$ 
11:    if  $d_{l,p} \leq d^{Max}$  then  $\mathcal{L}^p \leftarrow \mathcal{L}^p \cup \{l\}$ 
12:    { Auf Kreuzungen mit Grenzl原因en prüfen }
13:    forall  $((X_{Lat}, X_{Lon}), (Y_{Lat}, Y_{Lon})) \in \mathcal{G}$  do
14:      if  $((X_{Lat}, X_{Lon}), (Y_{Lat}, Y_{Lon})) \not\propto ((L_{Lat}, L_{Lon}), (P_{Lat}, P_{Lon}))$  then
15:         $\mathcal{L}^p \leftarrow \mathcal{L}^p \setminus \{l\}$ 
16: Ausgabe  $\mathcal{L}^p$ 

```

Die zeitliche Betrachtung der Auslastung kann für jeden Standort separat erfolgen. Dementsprechend ergibt sich für jeden Standort eine eigene Menge von Zeitscheiben, die jeweils einen zusammenhängenden Zeitraum abbilden, in dem die Kapazitätsauslastung unverändert bleibt. Die maximale Auslastung in jeder Zeitscheibe ergibt sich aus der maximal möglichen Anzahl zeitlich paralleler Ladevorgänge im entsprechenden Zeitraum. Zeiträume, in denen sich kein Fahrzeug in der Nähe eines Standortes befindet, können als einzelne Platzhalter-Zeitscheibe abgebildet werden. Die Übergänge zwischen den Zeitscheiben entsprechen einem oder mehreren Ereignissen (siehe Abbildung 5.14).

Zur Erzeugung der Zeitscheiben wird die Menge aller Ankunfts- und Abfahrtsereignisse von allen Fahrzeugen ausgewählt, deren Position sich innerhalb des betrachteten Versorgungsbereichs befindet. Die ausgewählten Ereigniszeitpunkte werden anschließend chronologisch sortiert und die Zwischenräume als separate Zeitscheiben erzeugt. Zur

Reduktion der Zeitscheibenanzahl können zusätzlich Ereignisse, die zeitlich sehr nah beieinander liegen, zu einem einzigen Ereigniszeitpunkt verschmolzen werden.

6.2.3 Bestimmung hinzugewinnbarer Reichweiten

Die verfügbare Ladeleistung für den Energietransfer hängt von den technischen Restriktionen des Fahrzeugs und der maximal verfügbaren elektrischen Leistung am Ladeplatz ab (siehe Abbildung 2.5). Wenn Fahrzeug und Ladeplatz hinsichtlich der Anschlussmöglichkeit kompatibel sind, wird die maximale Ladeleistung vor dem Energietransfer ausgehandelt⁴⁰.

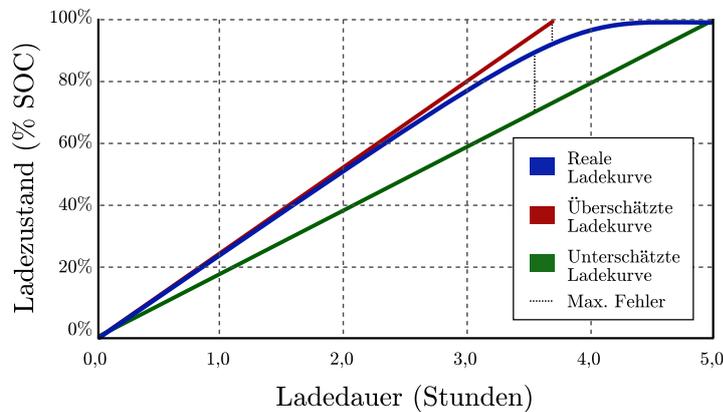


Abbildung 6.2: Linearisierung

Abbildung 6.2 illustriert den realen Verlauf einer Ladekurve und den Fehler bei vollständiger Über- oder Unterschätzung durch eine lineare Funktion. Im Allgemeinen lässt sich die Ladekurve von Elektrofahrzeugen durch Regressionsmethoden mit einem kleinen durchschnittlichen Fehler linear approximieren. Die Linearisierung ermöglicht die Bestimmung der maximal übertragbaren Energie pro Zeiteinheit unabhängig vom Anfangsfüllstand des Fahrzeugs.

Der durchschnittliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs in einem betrachteten Fahrzyklus (vgl. [NBW06], S. 352ff) bestimmt, welche Distanz im Mittel mit einem bestimmten Energieverbrauch zurückgelegt werden kann. Auf Basis der jeweils maximalen Werte für Ladeleistung und -dauer ergibt sich eine maximal mögliche Reichweite (Distanz), die durch die hinzugewonnene Energie zurückgelegt werden kann. Die Reichweite eines

⁴⁰ Das Ladekabel lässt sich beispielsweise im Falle konduktiver Ladung über einen integrierten Widerstand auf eine bestimmte Maximalleistung kodieren, die auch den Querschnitt des Kabels bestimmt.

Fahrzeugs nach einem Ladevorgang wird zusätzlich nach oben durch die Batteriekapazität begrenzt.

6.3 Formale Beschreibung

Das vorliegende Planungsproblem wird als lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell formuliert. Konstanten werden durch Großbuchstaben, Indextmengen durch kaligraphische Buchstaben und Variablen durch kleine Buchstaben bezeichnet. Binärvariablen werden mit griechischen Kleinbuchstaben bezeichnet.

Im ersten Schritt wird das Basismodell definiert. Es folgen Erweiterungen um Startkonfigurationen, Gebietskapazitäten, Service-Grad-Anforderungen und Auslastungsbeschränkungen.

6.3.1 Sequenzen

Als Modellparameter ist eine beliebig große Menge von Bewegungs-Sequenzen gegeben, die jeweils für ein einzelnes Fahrzeug stehen. Diese Sequenzen sind Ketten aus Fahrzeug-Parkzeiten mit den dazwischen zurückgelegten Distanzen. Für die Parkzeiten sind jeweils Anfangs- und Endzeitpunkt sowie die genaue Position auf der Karte bekannt. Als Eingabeparameter für das Optimierungsmodell ist eine Menge \mathcal{L} an potentiellen Standorten gegeben.



Abbildung 6.3: Schema einer Bewegungssequenz

Jede Sequenz $s \in \mathcal{S}$ enthält eine beliebige Anzahl Sequenzelemente, deren Nummern in der Menge $\mathcal{I}^s = \{1 \dots I_s\}$ hinterlegt sind. Alle potentiellen Standorte in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ sind in der Menge $\mathcal{L}^{s,i}$ enthalten.

Das Konzept der Sequenzen abstrahiert die Fahrzeugbewegungen, so dass auch ein Fahrzeug durch mehrere Sequenzen beschrieben werden kann. Bilanziert wird jeweils die Restreichweite nach jedem Sequenzelement, so dass eine genaue Betrachtung des Verbrauchs entfallen kann. Wie viel Reichweite hinzugewonnen werden kann, kann sich

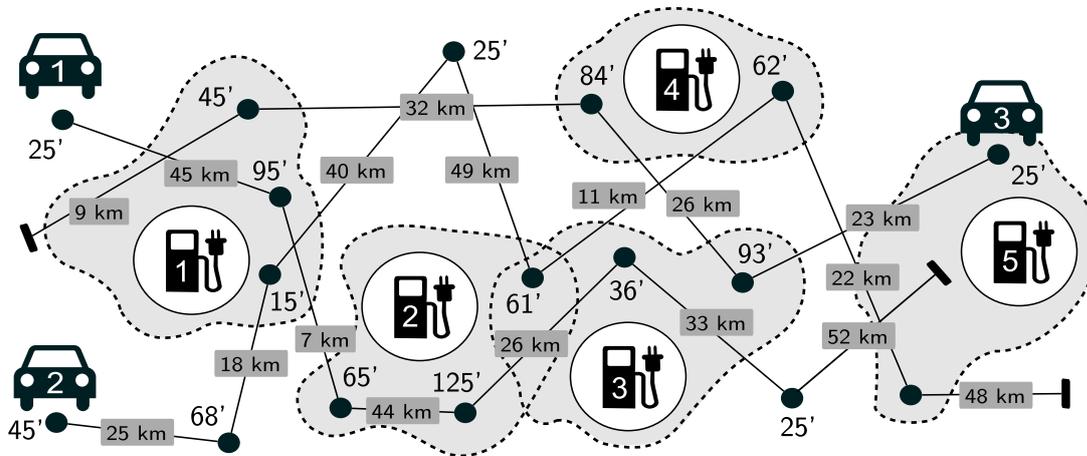


Abbildung 6.4: Szenario mit 3 Fahrzeugen und 5 Standorten

je nach gewähltem Standort unterscheiden. Jede Sequenz beginnt mit einer vorgegebenen Restreichweite $X_s^0 \geq 0$. Die Kapazität des Energieträgers ist nach oben mit M_s beschränkt.

Im Gegensatz zum vorgestellten Simulationsmodell wird im Optimierungsmodell ein konstanter (mittlerer) Energieverbrauchsfaktor des Fahrzeugs je Distanzeinheit angenommen. Die Bilanzierung über die verbleibende Reichweite ist äquivalent zu einer Formulierung auf Basis des SOC (vgl. z.B. [Wan08a], S. 193f).

6.3.2 Zeitscheiben und Kapazitätsstufen

Die Kapazität eines Versorgungsstandortes ist die maximale Anzahl Fahrzeuge, die am Standort parallel versorgt werden können. Der gesamte Planungshorizont ist in Zeitintervalle unterschiedlicher Länge eingeteilt (siehe Abschnitt 6.2.2), genannt Zeitscheiben. Je Standort $l \in \mathcal{L}$ und Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^l$ enthält die Menge $C^{l,t}$ alle Sequenzelemente (s, i) , die diese Zeitscheibe potentiell belegen können. Pro Sequenzelement werden immer unabhängig von der verfügbaren Restreichweite alle Zeitscheiben am ausgewählten Standort belegt, auch wenn dort nur wenig Reichweite hinzugewonnen wird.

Jeder Standort $l \in \mathcal{L}$ kann in höchstens einer Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ betrieben werden, welche jeweils eine maximalen Anzahl parallel versorgbarer Fahrzeuge $K_{l,k}$ festlegt.

6.4 Basismodell

Das Basismodell beschreibt die vorgestellte Optimierungsaufgabe in einem linearen, gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodell. Abschnitt 6.5 enthält modulare Erweiterungen des Basismodells zur Integration ausgewählter Praxisanforderungen.

6.4.1 Indexmengen

\mathcal{S}	Menge aller Sequenzen
\mathcal{I}^s	Menge aller Sequenznummern von Sequenz $s \in \mathcal{S}$, d.h. $\mathcal{I}^s = \{1, \dots, I_s\}$
\mathcal{L}	Menge aller potentiellen Standorte
$\mathcal{L}^{s,i} \subseteq \mathcal{L}$	Menge aller Standorte, bei denen in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ Reichweite hinzugewonnen werden kann
\mathcal{T}^l	Menge aller Zeitscheiben, die am Standort $l \in \mathcal{L}$ belegt werden können. $\mathcal{T} = \bigcup_{l \in \mathcal{L}} \mathcal{T}^l$, $\mathcal{T}^l \cap \mathcal{T}^{l'} = \emptyset \forall (l, l') \in \mathcal{L}^2, l \neq l'$
$\mathcal{T}^{s,i,l}$	Menge aller Zeitscheiben, die bei Verwendung von Standort $l \in \mathcal{L}$ in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ belegt werden $\mathcal{T}^{s,i,l} = \{t \in \mathcal{T}^l \mid (s, i) \in \mathcal{C}^{l,t}\}$, $\mathcal{T}^{s,i,l} \cap \mathcal{T}^{s,i',l} = \emptyset \forall i \neq i'$
$\mathcal{C}^{l,t}$	Menge aller Sequenz-Elemente (s, i) , die in Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^l$ liegen. Das heißt, wenn in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ Reichweite hinzugewonnen wird, wird dort in Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^l$ eine Kapazitätseinheit benötigt. $(s, i) \in \mathcal{C}^{l,t} \Leftrightarrow t \in \mathcal{T}^{s,i,l}$
\mathcal{K}^l	Menge aller Kapazitätsstufen, in denen der potentielle Standort $l \in \mathcal{L}$ betrieben werden kann

6.4.2 Parameter

$M_s \geq 0$	Maximale Reichweite, d.h. maximale Speicherkapazität - ausgedrückt in Kilometern je Sequenz $s \in \mathcal{S}$
$I_s \geq 1$	Höchste Sequenznummer von Sequenz $s \in \mathcal{S}$. Es gilt $I_s = \mathcal{I}^s $.
$X_s^0 \geq 0$	Anfängliche verbleibende Restreichweite zu Beginn der Sequenz $s \in \mathcal{S}$

$R_{s,i,l} \geq 0$	Maximale Reichweite, die in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Element $i \in \mathcal{I}^s$ am potentiellen Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ hinzugewonnen werden kann
$D_{s,i} \geq 0$	Distanz, d.h. Verlust an verbleibender Reichweite zwischen Element i und $i + 1$ in Sequenz $s \in \mathcal{S}$
$K_{l,k} \geq 0$	Verfügbare Kapazität, wenn Standort $l \in \mathcal{L}$ in Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ betrieben wird
$C_{l,k} \geq 0$	Kostenkennzahl für den Betrieb von Standort $l \in \mathcal{L}$ in Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$

6.4.3 Entscheidungsvariablen

$q_{s,i,l}$	Reichweite, die in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ bei Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ hinzugewonnen wird $q_{s,i,l} \leq R_{s,i,l}$ und $q_{s,i,l} \leq M_s$
$\tau_{s,i,l}$	Binärvariable, die angibt, ob in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am potentiellen Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ Reichweite hinzugewonnen wird $\tau_{s,i,l} \in \{0, 1\}$, $\tau_{s,i,l} = 0 \Rightarrow q_{s,i,l} = 0$
$x_{s,i}$	Verbleibende Restreichweite nach Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ $0 \leq x_{s,i} \leq M_s$
$\sigma_{l,k}$	Binärvariable, die genau dann 1 ist, wenn der Standort $l \in \mathcal{L}$ mit der Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ betrieben werden soll $\sigma_{l,k} \in \{0, 1\}$

6.4.4 Restriktionen

Je Sequenz $s \in \mathcal{S}$ ist eine anfängliche Restreichweite X_s^0 gegeben. Diese kann am ersten Standort erhöht werden.

$$x_{s,1} = X_s^0 + \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,1}} q_{s,1,l} \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (6.4)$$

Die Bilanzgleichung schreibt die Restreichweite abzüglich Verbrauch und hinzugewonnener Reichweite über die Sequenz fort:

$$x_{s,i+1} = x_{s,i} - D_{s,i} + \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} q_{s,i+1,l} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \setminus \{I_s\} \quad (6.5)$$

Die Restreichweite muss immer für die danach zurück zu legende Distanz ausreichen und darf niemals die Kapazität des Energieträgers überschreiten:

$$D_{s,i} \leq x_{s,i} \leq M_s \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.6)$$

Die Binärvariable $\tau_{s,i,l}$ ist genau dann 1, wenn in der Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ Reichweite hinzugewonnen wird. Die hinzugewinnbare Reichweite ist von oben durch den Parameter $R_{s,i,l}$ beschränkt. Im Falle einer langen Standzeit begrenzt die verfügbare Maximalkapazität M_s des Energieträgers ebenfalls die maximal hinzugewinnbare Reichweite. Beide Sachverhalte lassen sich als kombinierte Restriktion abbilden, um für den Koeffizienten der Binärvariablen einen „so großen Wert wie nötig, aber einen so kleinen Wert wie möglich, zu wählen“ ([SM09], S. 101).

$$q_{s,i,l} \leq \tau_{s,i,l} \cdot \min(R_{s,i,l}, M_s) \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.7)$$

Ein Ladevorgang kann nur an maximal einem verfügbaren Standort ausgeführt werden:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \leq 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.8)$$

Pro Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}^l$ und potentielltem Standort $l \in \mathcal{L}$ wird eine Kapazitätseinheit für jedes Fahrzeug benötigt, welches dort Reichweite hinzugewinnt. Die verfügbare Kapazität muss in allen Zeitscheiben ausreichen.

$$\sum_{(s,i) \in \mathcal{C}^{l,t}} \tau_{s,i,l} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} \cdot K_{l,k} \quad \forall l \in \mathcal{L}, t \in \mathcal{T}^l \quad (6.9)$$

Jeder potentielle Standort kann mit maximal einer Kapazitätsstufe betrieben werden:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} \leq 1 \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.10)$$

6.4.5 Zielfunktion

Minimiert werden die Kosten aller Standorte $l \in \mathcal{L}$, die in einer bestimmten Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ betrieben werden.

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}^l} C_{l,k} \cdot \sigma_{l,k} \quad (6.11)$$

6.5 Erweiterungen des Basismodells

Das vorgestellte Basismodell bildet die grundlegenden Anforderungen der Optimierungsaufgabe ab. Im Rahmen von praktischen Anforderungen müssen weitere Aspekte in der Planung berücksichtigt werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben modulare Erweiterungen des Basismodells zur Integration der zusätzlichen Aspekte. Die Erweiterungen können grundsätzlich unabhängig voneinander in beliebiger Kombination eingesetzt werden.

6.5.1 Start-Konfigurationen

Das Basismodell wird um die explizite Berücksichtigung einer bestehenden Infrastruktur-Konfiguration erweitert. Fixiert wird dabei der verbindliche Betrieb eines Standortes in einer bestimmten Kapazitätsstufe oder die Bereithaltung einer minimalen Standortkapazität.

Parameter

S^0 Menge von Tupeln $(l, k) \in \mathcal{L} \times \mathcal{K}^l$, die einen verbindlichen Betrieb von Standort $l \in \mathcal{L}$ in Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ anzeigen

$K_l^{Min} \in \mathbb{Z}^+$ Vorgeschriebene Mindestkapazität von Standort $l \in \mathcal{L}$.

Restriktionen

Im Falle einer fixierten Kapazitätsstufe wird die zugehörige Entscheidungsvariable fixiert:

$$\sigma_{l,k} = 1 \quad \forall (l, k) \in S^0 \quad (6.12)$$

Die Vorgabe einer minimalen Standortkapazität beschränkt die Standorte auf Kapazitätsstufen, die diese Vorgabe erfüllen:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{k,l} \cdot K_{k,l} \geq K_l^{Min} \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.13)$$

$$\sigma_{l,k} = 0 \quad \forall l \in \mathcal{L}, k \in \{k' \in \mathcal{K}^l \mid K_{k',l} \leq K_l^{Min}\} \quad (6.14)$$

6.5.2 Gebietskapazitäten

Im Rahmen der Planungsvorgaben kann gefordert sein, dass eine Menge potentieller Standorte in Summe eine Mindestkapazität bereitstellt.

Indexmengen

\mathcal{G} Menge aller Gebiete

$\mathcal{L}^g \subseteq \mathcal{L}$ Menge aller Standorte $l \in \mathcal{L}$, die in Gebiet $g \in \mathcal{G}$ liegen

Parameter

$K_g^{Min} \in \mathbb{Z}^+$ Minimale Gesamtkapazität aller Standorte in Gebiet $g \in \mathcal{G}$

Restriktionen

Die Mindestkapazität eines Gebietes muss von allen dort vorhandenen Standorten zur Verfügung gestellt werden:

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^g} \sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} \cdot K_{l,k} \geq K_g^{Min} \quad \forall g \in \mathcal{G} \quad (6.15)$$

6.5.3 Fehlreichweiten

Das Basismodell bewirkt mit den Restriktionen (6.5) und (6.6) eine Unlösbarkeit, wenn der Betrieb aller verfügbaren Standorte nicht ausreicht, um die Reichweitenbedarfe vollständig zu befriedigen. In diesem Fall ist keine Aussage über den Grad der Unlösbarkeit einer Probleminstanz möglich.

Insbesondere in praktischen Probleminstanzen kann es bei der Verwendung realer Fahrzeugbewegungen zu einer hohen Sensivität gegenüber Ausreißern kommen. Sobald

ein einzelnes Fahrzeug seine Reichweite mit wenigen Fahrten vollständig aufbraucht, wird die Verfügbarkeit eines Standortes in diesem Bereich der Sequenz erzwungen.

Die Zulassung von *Fehlreichweiten* ermöglicht eine Lösung beider Probleme. Falls die verbleibende Restreichweite in einer Sequenz unter den Wert Null sinken muss, wird die faktisch unrealisierbare Distanz in einer Variablen zwischengespeichert und der Füllstand damit am nächsten Sequenzelement auf Null gesetzt. Die Variablen der Fehlreichweite werden in der Zielfunktion mit Strafkosten versehen, so dass das Auftreten einer Fehlreichweite im Sinne einer optimalen Lösung niemals vorteilhaft ist.

Entscheidungsvariablen

$y_{s,i} \in \mathbb{R}^+$ Fehlende Reichweite in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Position $i \in \mathcal{I}^s$

Parameter

C^P Strafkostensatz für auftretende Fehlreichweite pro Distanzeinheit

P Quote der maximalen Fehlreichweite im Verhältnis zu den Gesamtdistanzen ($0 \leq P \leq 1$)

Zielfunktion

$$\min \left(\sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}^l} C_{l,k} \cdot \sigma_{l,k} \right) + \left(C^P \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} y_{s,i} \right) \quad (6.16)$$

ersetzt
(6.11)

Restriktionen

Die gesamte Fehlreichweite wird durch eine Quote P begrenzt:

$$P \cdot \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} \left(\sum_{i \in \mathcal{I}^s} D_{s,i} \right) - X_s^0 \right) \geq \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} y_{s,i} \right) \quad (6.17)$$

Die verbleibende Restreichweite darf im Gegensatz zu Restriktion (6.6) geringer als die nächste Distanz $D_{s,i}$ sein:

$$0 \leq x_{s,i} \leq M_s \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.18)$$

ersetzt
(6.6)

$$x_{s,i} + y_{s,i} \geq D_{s,i} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.19)$$

Die Bilanzgleichung wird um die Zählvariable für Fehlreichweite erweitert:

$$x_{s,i+1} = x_{s,i} - D_{s,i} + \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} q_{s,i+1,l} + y_{s,i-1} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \setminus \{I_s\} \quad (6.20)$$

ersetzt
(6.5)

6.5.4 Verhaltenshypothesen der Fahrzeugnutzer

Die Zuordnung eines Fahrzeuges zu einem Standort kann im Basismodell immer erfolgen, wenn es sich in einem Versorgungsbereich befindet und die verfügbare Kapazität von Ladeplätzen nicht überschritten wird. Anders als im Simulationsmodell erfolgt die Zuordnung nicht in einer stochastischen Abhängigkeit vom aktuellen SOC des Fahrzeugs. Die folgende Modellerweiterung integriert zwei Verhaltenshypothesen, in denen zusätzlich Ober- und Untergrenzen des SOC für die Ladeentscheidung berücksichtigt werden.

Die erste Hypothese folgt der Beobachtung, dass Fahrzeugnutzer bei einem hohen Ladefüllstand keine Motivation zur Nutzung eines Ladeplatzes besitzen. Dies ist der Fall, wenn das Betriebskonzept keinen obligatorischen Ladevorgang vorschreibt und kein anderweitiges Anreizsystem existiert. Für die Planung bedeutet dies eine prozentuale Obergrenze $0 \leq U_s^{SOC} \leq 1$ pro Sequenz $s \in \mathcal{S}$, die den maximalen Füllstand angibt, bei dem ein Fahrzeug noch einem Standort aufsuchen wird.

Kritischer ist das Verhalten der Fahrzeugnutzer bei Unterschreitung eines minimalen Ladefüllstandes. Wenn es für diesen Fall keine Regeln im Betriebskonzept des Flottenbetreibers gibt, wird ein Fahrzeugnutzer tendenziell am Ende seiner Fahrt den Mehraufwand für einen Ladeprozess scheuen. Die Vorschrift, bei Unterschreitung eines definierten Ladefüllstandes zwingend einen Ladevorgang einzuleiten, lässt sich als Restriktion in das Modell integrieren. Eine prozentuale Untergrenze $0 \leq L_s^{SOC} \leq 1$ gibt pro Sequenz $s \in \mathcal{S}$ einen minimalen Ladefüllstand an, der in einer gültigen Lösung die Zuordnung zu einem verfügbaren Standort erzwingt.

Parameter

U_s^{SOC}	Prozentualer Anteil des Ladefüllstands je Sequenz $s \in \mathcal{S}$, bei dessen Überschreitung keine Zuordnung zu einem Standort mehr vorgenommen wird
L_s^{SOC}	Prozentualer Anteil des Ladefüllstands je Sequenz $s \in \mathcal{S}$, bei dessen Unterschreitung eine Zuordnung zu einem Standort erzwungen wird

Restriktionen

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \geq \frac{(M_s \cdot L_s^{SOC}) - x_{s,i-1} + D_{s,i-1}}{M_s} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.21)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \leq \frac{x_{s,i-1} - D_{s,i-1} - (M_s \cdot U_s^{SOC})}{M_s} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.22)$$

6.5.5 Kennzahlen der Versorgungsqualität

Zur Quantifizierung von Versorgungsqualität wurden in Kapitel 3 verschiedene Kennzahlen aus Modellen in der Literatur vorgestellt (vgl. Abschnitt 3.5.1). Eine Auswahl dieser Kennzahlen lässt sich als Restriktionen in das Basismodell integrieren. In einer optimalen Lösung muss dann zusätzlich ein festgelegter Schwellwert der Abdeckungszahl eingehalten werden.

Parameter

T^{Gesamt}	Gesamtdauer des betrachteten Zeitraums in Stunden
T_t^{Slot}	Dauer von Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ in Stunden
U_l^{Max}	Maximal zulässige mittlere Auslastung von Standort $l \in \mathcal{L}$
C^{Rel}	Minimaler Anteil von Parkpositionen (Sequenzelementen), bei denen sich das Fahrzeug in wenigstens einem Versorgungsbereich befinden muss ($0 \leq C^{Rel} \leq 1$)
D^{Max}	Schwellwert für die durchschnittlich kürzeste Distanz zwischen den Parkpositionen und dem nächstgelegenen verfügbaren Standort
$D_{s,i,l}^{Min}$	Kürzeste Distanz zwischen dem Standort $l \in \mathcal{L}$ und der Parkposition in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Position $i \in \mathcal{I}^s$

Entscheidungsvariablen

$d_{s,i}$	Kürzeste Distanz zu einem geöffneten Standort in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Position $i \in \mathcal{I}^s$
-----------	--

Restriktionen

$$d_{s,i} \leq \left(\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{k,l} \right) \cdot D_{s,i,l}^{\text{Min}} + \left(1 - \sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{k,l} \right) \cdot \max_{l' \in \mathcal{L}} D_{s,i,l'}^{\text{Min}} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L} \quad (6.23)$$

$$\frac{1}{|\{(s,i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s\}|} \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} d_{s,i} \leq D^{\text{Max}} \quad (6.24)$$

$$\frac{1}{|\{(s,i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s\}|} \cdot \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} \min(1, |\mathcal{L}^{s,i}|) \geq C^{\text{Rel}} \quad (6.25)$$

$$\frac{\sum_{t \in \mathcal{T}^l} T_t^{\text{Slot}} \cdot \left(\sum_{(s,i) \in C^{l,t}} \tau_{s,i,l} \right)}{T^{\text{Gesamt}}} \leq U^{\text{Max}} \cdot \left(\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} \cdot K_{l,k} \right) \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.26)$$

Zielfunktion

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{k \in \mathcal{K}^l} C_{l,k} \cdot \sigma_{l,k} - \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} d_{s,i}$$

6.6 Bestimmung der Komplexitätsklasse

Die *Berechenbarkeit* eines Entscheidungsproblems durch einen Algorithmus ist Voraussetzung zur Bestimmung optimaler Lösungen. Für berechenbare Probleme liefert die *Komplexitätstheorie* der theoretischen Informatik weitere Werkzeuge zur Bewertung des Laufzeitverhaltens. *Hromkovič* benennt als Hauptziele der Komplexitätstheorie die Bestimmung der Berechnungskomplexitäten, der Spezifikation von Komplexitätsklassen und die Vergleiche von Algorithmen hinsichtlich ihrer Effizienz (vgl. [Hro11], S. 207).

Der Speicherplatzbedarf und die Laufzeit eines Algorithmus hängen von der Größe der Eingabe und dem verwendeten Rechner ab. Bei der Bestimmung der Komplexität wird ein abstraktes Modell des Computers mit festgelegten Kosten für atomare Operationen ohne Speichergrenzen verwendet, um eine Vergleichbarkeit verschiedener Algorithmen zu ermöglichen. Üblich ist die Verwendung der *Landauschen Symbole* (auch *Groß-O-Notation* genannt), dort wird die Laufzeit oder der Speicherbedarf eines Algorithmus unter Vernachlässigung konstanter Terme in Abhängigkeit von der Eingabegröße

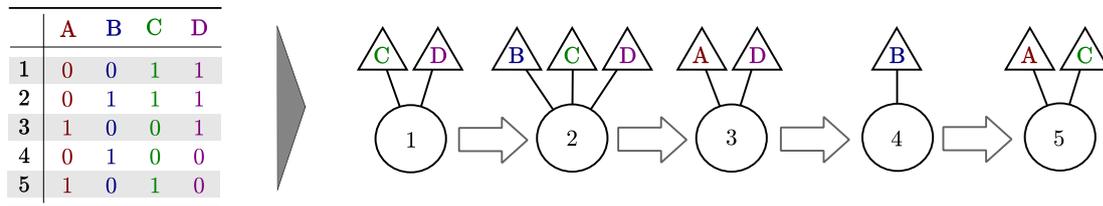


Abbildung 6.5: Set Covering Reduktionsbeweis

ausgedrückt (vgl. [Heu03], S. 19f). Auf Basis dieser Komplexitätskennzahlen können verschiedene Algorithmen zur Lösung eines Problems quantitativ verglichen werden.

Die Unterscheidung in „praktisch lösbar“ und „praktisch unlösbar“ Probleme ermöglicht eine Aussage über die Laufzeit des Algorithmus für größere Eingaben (vgl. [Hro11], S. 259f). Algorithmen in der Komplexitätsklasse \mathcal{P} benötigen eine Laufzeit, die polynomiell von der Eingabegröße abhängt. Für Algorithmen in der Komplexitätsklasse \mathcal{NP} wächst die Laufzeit (sub-)exponentiell mit der Eingabegröße. Im Allgemeinen sind \mathcal{NP} -schwere Probleme praktisch nur für kleine Eingabegrößen optimal lösbar.

Um zu zeigen, dass ein Algorithmus \mathcal{NP} -schwer ist, kann ein *Reduktionsbeweis* geführt werden. Hier wird eine Transformationsvorschrift angegeben, mit der sich ein \mathcal{NP} -schweres Problem $P1$ in ein anderes Problem $P2$ überführen lässt. Jeder Lösungsalgorithmus für $P2$ ist damit in der Lage, jede Probleminstanz von $P1$ zu lösen. Damit ist die Lösung von $P2$ mindestens so schwer wie die Lösung von $P1$, also ist $P2$ ebenfalls \mathcal{NP} -schwer.

Reduktionsbeweis auf das Set Covering Problem (SCP)

Das SCP ist ein bekanntes \mathcal{NP} -schweres Problem (vgl. [Gol10], S. 114f). Gegeben ist eine 0/1-Matrix $A = (a_{i,j})$ mit m Zeilen und n Spalten. Durch die Auswahl einer Teilmenge von Spalten sollen alle Zeilen abgedeckt werden. Eine Zeile i gilt als abgedeckt, wenn für mindestens eine ausgewählte Spalte j $a_{i,j} = 1$ gilt. Die Anzahl ausgewählter Spalten soll minimal sein, d.h. es existiert keine Teilmenge mit weniger Elementen, die ebenfalls alle Zeilen abdeckt. \mathcal{NP} -schwer ist dabei bereits die Entscheidung, ob für ein gegebenes $k \leq n$ alle Zeilen mit einer k -elementigen Teilmenge der Spalten abgedeckt werden können.

Die allgemeine Formulierung des SCP als ganzzahliges Programm lautet

$$\min \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.27)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j \geq 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (6.28)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad (6.29)$$

Im Folgenden wird beschrieben, wie sich eine beliebige *Set Covering* Instanz in das Basismodell transformieren lässt. Setze $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, n\}$, also wird für jede Spalte j ein potentieller Standort erzeugt. Erzeuge genau eine Sequenz s , die (in beliebiger Reihenfolge) genau ein Sequenzelement für jede Zeile i enthält ($I^s = \{1, 2, \dots, m\}$).

Setze $X_s^0 = 0$, $M_s = 1$ sowie $D_{s,i} = 1$ für alle $i \in I^s$. Auf diese Weise wird erzwungen, dass genau ein Standort (eine Spalte) pro Sequenz-Element ausgewählt werden muss, um eine gültige Reichweitenbilanz zu erzeugen. Die Menge der verfügbaren Standorte $\mathcal{L}^{s,i}$ je Sequenzelement wird schließlich mit den virtuellen Standorten für alle Spalten befüllt, welche die aktuelle Zeile abdecken können ($\mathcal{L}^{s,i} = \{1 \leq i \leq n \mid a_{i,j} = 1\}$). Pro Standort existiert genau eine Kapazitätsstufe mit $C_{l,k} = 1$.

Jede optimale Lösung des Basismodells ist somit eine optimale Lösung der *Set Covering*-Instanz, da genau ein Standort (Spalte) pro Sequenz-Element (Zeile) ausgewählt wird und die Anzahl der Standorte minimal ist. Also kann auch jeder Lösungsalgorithmus für das Basismodell jede gegebene *Set Covering*-Instanz optimal lösen. Damit ist auch jeder Lösungsalgorithmus für das Basismodell \mathcal{NP} -schwer.

6.7 Lösungsmethodik

Zur Lösung gemischt-ganzzahliger Modelle verwenden moderne Solver als zentrale Komponente die Techniken des *Branch & Bound* (vgl. [CBD09], S. 361). Das Verfahren enumeriert den Lösungsraum in einer Baumstruktur und reduziert den Suchaufwand durch geschicktes Abschneiden von Teilbäumen. Diese Strategie der impliziten Enumeration geht zurück auf *Land* und *Doig* (siehe [LD60]), einen ersten Algorithmus für beliebige Probleminstanzen stellte *Dakin* vor (siehe [Dak65]).

LP-basiertes Branch & Bound verwendet die *LP-Relaxation*⁴¹ eines Problems zur Bestimmung einer dualen Schranke für den optimalen Zielfunktionswert. Das Verfahren verzweigt an jedem Schritt an regelbasiert ausgesuchten Entscheidungsvariablen, bei denen die Ganzzahligkeitsbedingung verletzt ist (vgl. [SM09], S. 151ff). Im Gegensatz zur vollständigen Enumeration des Lösungsraums trifft Branch & Bound zur Laufzeit heuristische Entscheidungen, die das globale Laufzeitverhalten durch Vernachlässigung irrelevanter Suchbereiche deutlich beeinflussen können. Die wichtigsten Entscheidungen sind:

- **Variablenauswahl.** In jeder Iteration des Verfahrens muss eine Entscheidungsvariable ausgewählt werden, deren Wert bei der Lösung der LP-Relaxation keinen ganzzahligen Wert angenommen hat. Zur Erreichung der Ganzzahligkeit wird das Entscheidungsproblem in zwei Teilprobleme aufgeteilt (*Branching*) und die Variable in diesen Teilproblemen auf den nächsten oberen bzw. unteren ganzzahligen Wert fixiert. Die Lösung der LP-Relaxation der neuen Teilprobleme erzeugt neue untere Schranken für den Zielfunktionswert der optimale Lösung (*Bounding*).
- **Knotenauswahl.** Durch das Branching entstehen permanent neue Teilprobleme, die in einer Liste abgelegt werden. Das Verfahren entscheidet in jeder Iteration, welches Teilproblem (Knoten) im nächsten Schritt bearbeitet wird.

Im nächsten Abschnitt werden Techniken beschrieben, bei denen durch Veränderungen der Modellformulierung und Manipulation der Parameter des Lösungsverfahrens bessere Laufzeiten⁴² erreicht werden können.

6.8 Methoden zur Laufzeitverbesserung

Um das Laufzeitverhalten des Branch&Bound zu verbessern, existieren verschiedene Techniken. Neben dem problemspezifischen Tuning von Verfahrensparametern ist die Wahl einer guten *Formulierung* essentiell für die Performance (vgl. [Wol98], S. 15). Hierbei kann sowohl die Geschwindigkeit des LP-Solvers erhöht werden, als auch ein effektiveres Branching auf dem Weg zum ganzzahligen Optimum erreicht werden. Für das

⁴¹ Die *LP-Relaxation* einer gemischt-ganzzahligen Problem Instanz entsteht durch Wegfall der Ganzzahligkeitsbedingung auf allen Variablen

⁴² Eine bessere Laufzeit kann sowohl durch das schnellere Finden einer optimalen Lösung als auch durch eine Beschleunigung des Beweises der Optimalität erreicht werden.

vorliegende Modell werden im Folgenden verschiedene Techniken vorgestellt und auf das Basismodell angewendet. Weitere Details werden von *Gurcke* beschrieben (vgl. [Gur10]).

Valid Inequalities. Das Einfügen zusätzlicher gültiger Ungleichungen als Restriktionen kann positive Auswirkungen auf die Laufzeit des Branch&Bound haben, wenn der LP-Lösungsraum verkleinert wird. Alle modernen Solver-Implementierungen enthalten Verfahren, mit denen die optimale Lösung der LP-Relaxation durch Hinzufügen neuer Valid Inequalities (meist *Cuts* genannt) möglichst nahe an das Optimum der ganzzahligen Formulierung gebracht werden soll. Mit Hilfe spezieller Techniken können generische Cuts automatisch abgeleitet werden (siehe [Cor07]). Es kann aber auch vorteilhaft sein, ein Modell a priori um *problemspezifische Cuts* zu erweitern.

Special Ordered Sets. Ein Special Ordered Set of Type 1 (SOS1) ist eine geordnete Menge von Entscheidungsvariablen, von denen maximal eine Variable einen Wert ungleich Null annehmen darf (vgl. [KW97], S. 194 und [LP79], S. 224). Das SOS1-Konzept geht zurück auf *Beale* und *Tomlin* (vgl. [BT70]) und wird heute in allen modernen Solver-Implementierungen unterstützt. Durch die explizite Definition dieser Mengen kann eine Modellierung als Restriktion entfallen. Im Rahmen des Branch&Bound Prozesses muss anstatt aller n Variablen eines SOS1 nur *eine* allgemeine ganzzahlige Variable mit einer oberen Schranke von n betrachtet werden (vgl. [KW97], S. 196). Die Elemente y_i eines SOS1 erhalten zusätzlich ein Gewicht $w_i \geq 0$, die aufsteigende Sortierung der Gewichtswerte induziert eine Ordnung auf den Variablen. Nach *Kallrath* sollten SOS1-Mengen nur eingesetzt werden, wenn eine natürliche Ordnung (z.B. Zeitperioden oder Kapazitätsstufen) auf den Variablen definiert werden kann (vgl. [KW97], S. 196).

Semikontinuierliche Variablen. Eine kontinuierliche Variable $x \in \mathbb{R}^+$ heißt *semikontinuierlich*, wenn sie entweder den Wert 0 annehmen darf oder in einem definierten Intervall liegt. Es gilt also

$$x = 0 \vee l \leq x \leq u \text{ mit } l \in \mathbb{R}^{\geq 0}, u \in \mathbb{R}^{\geq 0} \cup \{+\infty\} \text{ und } l \leq u$$

Durch die explizite Deklaration einer semikontinuierlichen Variable kann die Laufzeit verbessert werden, da die Hilfsmodellierung mit einer Binärvariablen und zwei Restriktionen entfällt (vgl. [AD92], S. 427f). Der Branch & Bound Algorithmus kann für das Branching auf der Variablen direkt die Fälle $x = 0$ bzw. $x \geq l$ und $x \leq u$ unterscheiden.

Typischer Anwendungsbereich von semikontinuierlichen Variablen sind Transportprobleme, bei denen entweder keine Einheit oder mehr als eine festgelegte Mindestanzahl transportiert werden darf (vgl. [KW97], S. 41).

Ganzzahlige Schlupfvariablen. Modelle können Restriktionen enthalten, bei denen alle Variablen, Koeffizienten und Right-Hand Side (RHS)-Werte ganzzahlig sind. Es gilt

$$\sum_i a_i x_i \leq b \text{ mit } a_i, x_i, b \in \mathbb{N}$$

Williams (vgl. [Wil08b], S. 189) beschreibt dazu die folgende Idee von *Mitra* (siehe [Mit73]). Jeder der Restriktionen kann um eine Schlupfvariable u erweitert werden, die explizit als ganzzahlig deklariert wird:

$$\left(\sum_i a_i x_i \right) + u = b \text{ mit } a_i, x_i, b, u \in \mathbb{N}$$

Die Ganzzahligkeit der Variable u bewirkt ein Branching auf der Variable. Im Falle $u = b$ wirkt die Restriktion damit als Schnittebene, da in der Lösung der LP-Relaxation alle anderen Optionen auf den Wert 0 fixiert werden (vgl. [Wil08b], S. 189). Es kann also vorteilhaft sein, die Branching-Priorität von u explizit zu erhöhen.

6.8.1 Explizite Eröffnung von Standorten

Die Eröffnung eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ ist im Basismodell über die Auswahl einer Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ modelliert. Durch die explizite Modellierung einer Indikatorvariablen ω_l für die Wahl einer beliebigen Kapazitätsstufe entsteht eine zusätzliche Entscheidungsvariable je Standort. Diese wird ergänzend als obere Schranke für die Zuweisungsentscheidung $\tau_{s,i,l}$ und die maximal zugewinnbare Restreichweite $q_{s,i,l}$ eingesetzt.

Als zusätzliche Einstellung kann die Erhöhung der Branching-Priorität von ω_l im Branch & Bound Prozess vorgenommen werden, da die grundsätzliche Standortentscheidung hierarchisch die Auswahl einer Kapazitätsstufe beeinflusst (vgl. [Wil08b], S. 189).

Parameter

F_l Fixkosten der Eröffnung von Standort $l \in \mathcal{L}$ mit $F_l = \min_{k \in \mathcal{K}^l} C_{l,k}$

Entscheidungsvariablen

$\omega_l \in \{0, 1\}$ Binärvariable als Indikator für die Eröffnung von Standort $l \in \mathcal{L}$

Restriktionen

$$\tau_{s,i,l} \leq \omega_l \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.30)$$

$$q_{s,i,l} \leq \omega_l \cdot \min(R_{s,i,l}, M_s) \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.31)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} = \omega_l \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.32)$$

ersetzt
(6.10)

Zielfunktion

$$\min \sum_{l \in \mathcal{L}} \left(\omega_l \cdot F_l + \left(\sum_{k \in \mathcal{K}^l} (C_{l,k} - F_l) \cdot \sigma_{l,k} \right) \right)$$

6.8.2 Explizite Verwendung von Standorten

Pro Sequenzelement $(s, i) \in \mathcal{S} \times \mathcal{I}$ steht eine Menge von Ladestandorten $\mathcal{L}^{s,i}$ zur Verfügung. Die Auswahl eines dieser Standorte hängt von der verbleibenden Restreichweite des Fahrzeugs, von der verfügbaren Ladeleistung und der Anzahl Ladeplätze ab. Analog zu Abschnitt 6.8.1 wird die Modellinstanz um die explizite Modellierung der Ladeentscheidung ergänzt.

Entscheidungsvariablen

$\delta_{s,i} \in \{0, 1\}$ Binärvariable als expliziter Indikator für die Verwendung eines Ladestandortes in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Element $i \in \mathcal{I}^s$

Restriktionen

$$\tau_{s,i,l} \leq \delta_{s,i} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.33)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} = \delta_{s,i} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.34)$$

ersetzt
(6.8)

6.8.3 Ganzzahlige Schlupfvariablen

Die zu Beginn von Abschnitt 6.8 beschriebene Modellierungstechnik mit *ganzzahligen Schlupfvariablen* kann für zwei Restriktionen des Modells angewendet werden. Sowohl bei der Zuordnung eines Standortes als auch der Wahl einer Kapazitätsstufe darf maximal eine oder keine Handlungsalternative ausgewählt werden. Die Variablen sind jeweils binär, eine zusätzliche Schlupfvariable nimmt also genau dann den Wert 1 an, wenn keine Option ausgewählt wurde:

Entscheidungsvariablen

$$\mu_{s,i} \in \{0, 1\} \quad (6.8)\text{-Schlupfvariable für } s \in \mathcal{S} \text{ und } i \in \mathcal{I}^s$$

$$\rho_l \in \{0, 1\} \quad (6.10)\text{-Schlupfvariable für } l \in \mathcal{L}$$

Restriktionen

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} + \mu_{s,i} = 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \quad (6.35)$$

ersetzt
(6.8)

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} + \rho_l = 1 \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.36)$$

ersetzt
(6.10)

6.8.4 Schranken für die Anzahl Ladevorgänge

Im Laufe einer Sequenz kann an jedem Sequenzelement Reichweite an maximal einem Standort hinzugewonnen werden. Die maximale Anzahl Ladevorgänge ist damit von oben durch den Parameter I_s begrenzt. Die minimale Anzahl benötigter Ladevorgänge kann auf Basis der Reichweitenbedarfe pro Sequenz nach unten abgeschätzt werden. Sei A_s die minimale Anzahl von Ladevorgängen, dann gilt:

$$A_s = \left\lceil \frac{\left(\sum_{i \in \mathcal{I}^s \setminus \{I_s\}} D_{s,i} \right) - X_s^0}{M_s} \right\rceil$$

Aufgrund der jeweils beschränkten Lademengen $R_{s,i,l}$ kann die tatsächliche Mindestanzahl allerdings deutlich größer sein. Unterstellt man die Verfügbarkeit aller Standorte mit unbegrenzter Kapazität, lässt sich eine bessere untere Schranke je Sequenz $s \in \mathcal{S}$ durch Lösen einer reduzierten Formulierung des Basismodells pro Sequenz bestimmen.

Eine untere Schranke für A_s ergibt sich als optimale Lösung des folgenden Modells :

$$\text{Min } A_s = \sum_{i \in \mathcal{I}^s} \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \quad (6.37)$$

$$\text{u.d.N. } x_{s,1} = X_s^0 + \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,1}} q_{s,1,l} \quad (6.38)$$

$$x_{s,i+1} = x_{s,i} - D_{s,i} + \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} q_{s,1,l} \quad \forall i \in \mathcal{I}^s \setminus \{I_s\} \quad (6.39)$$

$$D_{s,i} \leq x_{s,i} \leq M_s \quad \forall i \in \mathcal{I}^s \quad (6.40)$$

$$q_{s,i,l} \leq R_{s,i,l} \cdot \tau_{s,i,l} \quad \forall i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.41)$$

$$\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}^s \quad (6.42)$$

Der jeweils optimale Zielfunktionswert lässt sich dann als zusätzlicher Parameter in das Modell integrieren, um die minimale und maximale Anzahl Ladevorgänge zu beschränken:

Parameter

$A_s \in \mathbb{N}$ Minimale Anzahl benötigter Ladevorgänge in Sequenz $s \in \mathcal{S}$

Restriktionen

$$A_s \leq \left(\sum_{i \in \mathcal{I}^s} \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \right) \leq I_s \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (6.43)$$

6.8.5 Hinzugewonnene Reichweite begrenzen

Die Variablen $q_{s,i,l}$ werden im Basismodell beschränkt durch $0 \leq q_{s,i,l} \leq \min(M_s, R_{s,i,l})$. Mit Hilfe von validen Ungleichungen kann der Wertebereich noch weiter eingeschränkt werden. In Abhängigkeit von der anfänglichen Restreichweite und der Batteriekapazität kann die obere Schranke reduziert werden, da nicht mehr Reichweite hinzugewonnen werden kann als durch die Fahrdistanzen verbraucht wird (6.44).

Eine obere Schranke lässt sich außerdem für jedes Sequenzelement in Abhängigkeit von der Batteriekapazität und der Restreichweite ausdrücken (6.45). Schließlich kann die Summe aller $q_{s,i,l}$ Variablen noch explizit nach unten über die Summe aller Fahrdistanzen abzüglich der anfänglichen Restreichweite beschränkt werden (6.46).

Restriktionen

$$q_{s,i,l} \leq M_s - X_s^0 + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}^s \\ j < i}} D_{s,j} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \{j \in \mathcal{I}^s : (\sum_{k=1}^j D_{s,i}) \leq X_s^0\}, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.44)$$

$$q_{s,i+1,l} \leq M_s - x_{s,i} + D_{s,i} \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s \setminus \{I_s\}, l \in \mathcal{L}^{s,i+1} \quad (6.45)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}^s} \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} q_{s,i,l} \geq \sum_{i \in \mathcal{I}^s} D_{s,i} - X_s^0 \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (6.46)$$

6.8.6 SOS1 Menge für die Kapazitätssauswahl

Wie in Restriktion 6.10 beschrieben, kann pro Standort eine Kapazitätsstufe ausgewählt werden, die jeweils mit einer bestimmten Kapazität und einem Kostenwert verbunden ist. Pro Standort $l \in \mathcal{L}$ und den verfügbaren Kapazitätsstufen $k \in \mathcal{K}^l$ darf also maximal eine der Binärvariablen $\sigma_{l,k}$ den Wert 1 annehmen. Durch Hinzufügen einer Nullkapazitätsstufe k_0 mit $K_{l,k_0} = 0$ und $C_{l,k_0} = 0$ kann Restriktion 6.10 in eine Gleichung umgeschrieben werden und benötigt als SOS1-Variable keine Ganzzahligkeitsbedingung mehr.

Entscheidungsvariablen

$\sigma_{l,k}$ Binärvariable, die genau dann 1 ist, wenn der Standort $l \in \mathcal{L}$ mit der Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^l$ betrieben werden soll

$$\sigma_{l,k} \in \mathbb{R} \text{ und } \text{SOS1}_l = \{(\sigma_{l,k}, C_{l,k}) \mid k \in \mathcal{K}^l\}$$

Restriktionen

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} = 1 \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (6.47)$$

ersetzt
(6.10)

6.8.7 SOS1 Menge für die Standortzuordnung

In jeder Sequenz $s \in \mathcal{S}$ steht pro Sequenz-Element $i \in \mathcal{I}^s$ eine Menge von potentiellen Versorgungsstandorten $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ zur Verfügung. Dabei darf in einer gültigen Lösung nicht mehr als ein Standort ausgewählt werden (Restriktion 6.8). Damit können sowohl die binäre Zuordnung $\tau_{s,i,l}$ als auch die Variable $s_{s,i,l}$ für die hinzugewonnene Reichweite nur bei maximal einem Standort $l \in \mathcal{L}$ größer als Null sein. Als Gewicht einer Variablen dient

die Differenz zwischen Reichweitenkapazität und hinzugewinnbarer Reichweite, damit *mehr* Reichweite einem *niedrigeren* Gewicht entspricht.

Entscheidungsvariablen

$q_{s,i,l}$ Reichweite, die in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ bei Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ hinzugewonnen wird

$$q_{s,i,l} \leq \min(R_{s,i,l}, M_s),$$

$$SOS1_{s,i} = \{(q_{s,i,l}, M_s - \min(R_{s,i,l}, M_s) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s\}$$

$\tau_{s,i,l}$ Binärvariable, die angibt, ob in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Sequenznummer $i \in \mathcal{I}^s$ am potentiellen Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ Reichweite hinzugewonnen wird

$$\tau_{s,i,l} \in \{0, 1\}, \tau_{s,i,l} = 0 \Rightarrow q_{s,i,l} = 0,$$

$$SOS1_{s,i} = \{(\tau_{s,i,l}, M_s - \min(R_{s,i,l}, M_s) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s\}$$

Bei der Verwendung der SOS1-Mengen können die redundanten Restriktionen 6.10 und 6.8 entfallen.

6.8.8 Einsatz semi-kontinuierlicher Variablen

Die Variablen $q_{s,i,l}$ beschreiben die absolut hinzugewonnene Reichweite in Sequenz $s \in \mathcal{S}$ an Element $i \in \mathcal{I}^s$ bei Standort $l \in \mathcal{L}$. Im Sinne einer optimalen Lösung wird ein Fahrzeug immer die maximal mögliche Reichweite hinzugewinnen, entweder (zeitlich) begrenzt durch $R_{s,i,l}$ oder durch die Kapazität des Energieträgers M_s .

Aufgrund der Restriktionen 6.4 und 6.5 kann die verbleibende Restreichweite zu Beginn eines Sequenzelements (s, i) nicht höher sein als die Differenz zwischen der Kapazität M_s und der zuletzt zurückgelegten Distanz $D_{s,i-1}$. Es ist möglich, dass ein Ladevorgang aufgrund seiner Beschränkung durch $R_{s,i,l}$ diese Differenz nicht vollständig auffüllen kann, also lässt sich über $q_{s,i,l}$ folgende Aussage treffen:

$$q_{s,i,l} = 0 \vee \min(R_{s,i,l}, D_{s,i-1}) \leq q_{s,i,l} \leq \min(R_{s,i,l}, M_s) \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.48)$$

Am ersten Sequenzelement lässt sich diese Bedingung durch die gegebene initiale Restreichweite X_s^0 wie folgt formulieren:

$$q_{s,1,l} = 0 \vee q_{s,1,l} = \min(R_{s,1,l}, M_s - X_s^0) \quad \forall s \in \mathcal{S}, l \in \mathcal{L}^{s,1} \quad (6.49)$$

Damit lässt sich $q_{s,i,l}$ als semikontinuierliche Variable mit den genannten Schranken definieren. Der Sachverhalt lässt sich analog in zusätzlichen Restriktionen abbilden:

Restriktionen

$$q_{s,i,l} \geq \tau_{s,i,l} \cdot \min(R_{s,i,l}, D_{s,i-1}) \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i} \quad (6.50)$$

$$q_{s,1,l} = \tau_{s,1,l} \cdot \min(R_{s,1,l}, M_s - X_s^0) \quad \forall s \in \mathcal{S}, l \in \mathcal{L}^{s,1} \quad (6.51)$$

6.9 Reduktion der Modellkomplexität

Im Folgenden werden Techniken vorgestellt, mit denen die Größe einer Modellinstanz (Variablen und Restriktionen) reduziert werden kann. Die Änderungen verkleinern in der Regel den gemischt-ganzzahligen Lösungsraum, so dass es ggf. zu einer optimalen Lösung mit höheren Kosten als im Ursprungsproblem kommen kann.

6.9.1 Identifikation obligatorischer Entscheidungen

Die explizite Einschränkung von Entscheidungen verkleinert den Lösungsraum und reduziert die Laufzeit exakter Lösungsverfahren (vgl. Abschnitt 6.8). In Abhängigkeit von den konkreten Instanzparametern lassen sich Teilentscheidungen bzw. Teilmengen von Entscheidungen a priori auf einen bestimmten Wertebereich festlegen.

Obligatorisches Laden

Die obligatorische Verwendung eines Standortes ergibt sich z.B. aus der Notwendigkeit, innerhalb einer Sequenz zwei aufeinander folgende Fahrten durchzuführen, die insgesamt über der maximalen Reichweite des Fahrzeugs liegen.

$$D_{s,i} + D_{s,i-1} > M_s \Rightarrow \left(\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \right) = 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \{2 \dots I_s\} \quad (6.52)$$

Diese Beobachtung lässt sich für beliebige Teilstrecken einer Sequenz mit der Länge $k \in \mathbb{N}$ und $k \geq 2$ verallgemeinern. Existiert eine Teilsequenz der Länge k mit einer

Gesamtdistanz größer als die maximale Fahrzeugreichweite, so muss in dieser Teilsequenz mindestens ein Ladevorgang stattfinden.

$$\left(\sum_{j=i-k+1}^i D_{s,j} \right) > M_s \Rightarrow \left\lceil \frac{\sum_{j=i-k+1}^i D_{s,j}}{M_s} \right\rceil \leq \left(\sum_{j=i-k+2}^i \sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \right) \leq k - 1$$

$$\forall s \in \mathcal{S}, i \in \{k \dots I_s\} \quad (6.53)$$

Der Lösungsraum wird besonders dann eingeschränkt, wenn sowohl k als auch die Menge der potentiellen Standorte je Sequenz-Element klein sind. Für feste $s \in \mathcal{S}$ und $i \in \mathcal{I}^s$ interessieren also *k-minimale Teilsequenzen*. Zusammen mit Restriktion 6.9 folgt aus $\tau_{s,i,l} = 1$ immer auch $\sum_k \sigma_{l,k} = 1$.

Obligatorischer Betrieb eines Standortes

Das Basismodell erlaubt dem Lösungsverfahren grundsätzlich eine freie Standortentscheidung, d.h. eine Auswahl aus den verfügbaren Kapazitätsstufen wird nicht erzwungen. Für entsprechende Szenarien ist es jedoch möglich, dass es ohne den Betrieb bestimmter Standorte keine gültige Lösung (ohne Fehlreichweiten) geben kann. Lässt sich also im Preprocessing ermitteln, dass der Betrieb einer Teilmenge der Standorte (unabhängig voneinander) obligatorisch ist, kann dieser Freiheitsgrad für die Lösung des Modells vorab per Restriktion eingeschränkt werden.

Eine hinreichende Bedingung für den obligatorischen Betrieb eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ ist die Unlösbarkeit des Modells bei der Erzwungung von $\sigma_{l,k} = 0$ für alle $k \in \mathcal{K}^l$, wenn das Modell ansonsten lösbar ist. Die Fixierung von $\sigma_{l,k} = 0$ für alle $k \in \mathcal{K}^l$ bewirkt über Restriktion (6.9), dass $\tau_{s,i,l} = 0$ für alle $s \in \mathcal{S}$, $i \in \mathcal{I}^s$ und $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ gelten muss. Aufgrund von Restriktion (6.7) bewirkt dies auch $q_{s,i,l} = 0$. Die Lösbarkeit hängt dabei nicht von der Ganzzahligkeit bestimmter Variablen ab. Es genügt also, die Unlösbarkeit der LP-Relaxation zu prüfen.

Ist nicht nur der Betrieb eines Standortes, sondern auch eine Mindestkapazität für die Lösbarkeit des Modells erforderlich, so kann die Fixierung aufsteigend über alle Kapazitätsstufen erfolgen. Sobald die Lösbarkeit gegeben ist, kann die Auswahl der verbleibenden Kapazitätsstufen als Restriktion eingefügt werden. In diesem Fall muss jedoch jeweils die ganzzahlige Unlösbarkeit geprüft werden.

6.9.2 Verringerung der zeitlichen Auflösung

Die Formulierung des Basismodells erlaubt eine präzise Abbildung der zeitlichen Struktur an jedem Standort. Jedes Ereignis, d.h. jede potentielle An- und Abfahrt eines Fahrzeugs führt zu einer neuen Zeitscheibe. Dies ermöglicht die genaue Bestimmung einer Kapazitätsstufe und die exakte Berechnung der Auslastung. Jede Zeitscheibe führt jedoch zu einem zusätzlichen Element der Menge \mathcal{T}^l und damit zur Erzeugung einer weiteren Restriktion (6.9).

Reduktion bei Mindestkapazität ≥ 2

Die minimale Kapazität eines Standortes $k_l^{Min} = \min_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}$ liegt in praktischen Probleminstanzen häufig bei mehreren Ladeplätzen. Eine exakte Bestimmung der Auslastung ist nicht nötig, wenn diese für eine Zeitscheibe niemals oberhalb der Mindestkapazität liegen kann. Für die Lösung des Modells macht es de facto keinen Unterschied, wenn die Parkzeiten der Fahrzeuge am Standort virtuell verlängert werden. Für die Berechnung der exakten Auslastung kann die gefundene Lösung im Anschluss mit der Originalinstanz evaluiert werden.

Algorithmus 2 beschreibt die Reduzierung der Zeitscheiben durch Verlängerung der Standzeiten. Dabei wird die korrekte Betrachtung der Kapazitätsauslastung sichergestellt. In allen anderen Fällen kann es vorkommen, dass die Zusammenfassung (Verschmelzung) von chronologisch aufeinander folgenden Zeitscheiben zu einer *Gleichzeitigkeit* von Ladevorgängen führt, die vorher zeitlich getrennt waren.

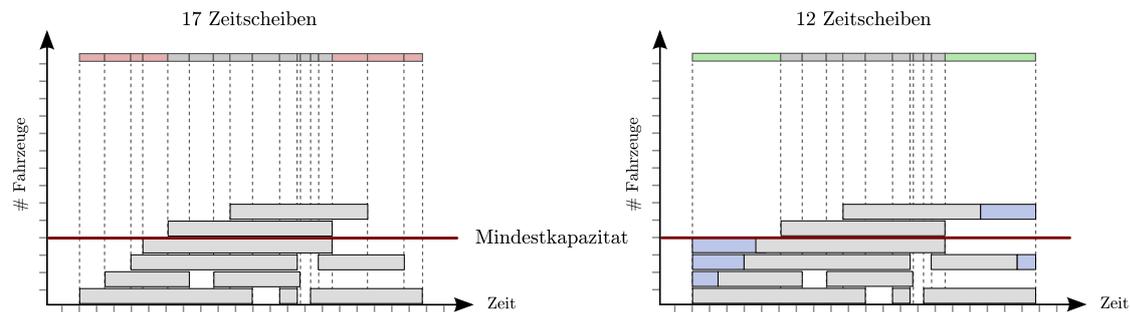


Abbildung 6.6: Reduzierung der Anzahl Zeitscheiben eines Standortes bei Mindestkapazität

Algorithmus 2: TimeSlotReduction**Eingabe :** Standorte \mathcal{L} , Zeitscheiben \mathcal{T}^l , Zuweisungen $\mathcal{C}^{l,t}$

```

1: forall  $l \in \mathcal{L}$  do
2:    $k^{Min} \leftarrow \min_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}$ 
3:   forall  $t \in \mathcal{T}^l$  do
4:     if  $(|\mathcal{C}^{l,t}| \leq k^{Min} - 1)$  then
5:        $\mathcal{C}^{Next} \leftarrow \{(s, i) \in \mathcal{C}^{l,t+1} \mid (s, i) \notin \mathcal{C}^{l,t}\}$ 
6:       if  $(|\mathcal{C}^{l,t}| + |\mathcal{C}^{Next}| \leq k^{Min})$  then
7:         forall  $(s, i) \in \mathcal{C}^{Next}$  do  $\mathcal{C}^{l,t} \leftarrow \mathcal{C}^{l,t} \cup \{(s, i)\}$ 
8:          $\mathcal{C}^{l,t+1} \leftarrow \emptyset$ 
9:          $\mathcal{T}^l \leftarrow \mathcal{T}^l \setminus \{t+1\}$ 
10:       $\mathcal{C}^{Prev} \leftarrow \{(s, i) \in \mathcal{C}^{l,t-1} \mid (s, i) \notin \mathcal{C}^{l,t}\}$ 
11:      if  $(|\mathcal{C}^{l,t}| + |\mathcal{C}^{Prev}| \leq k^{Min})$  then
12:        forall  $(s, i) \in \mathcal{C}^{Prev}$  do  $\mathcal{C}^{l,t} \leftarrow \mathcal{C}^{l,t} \cup \{(s, i)\}$ 
13:         $\mathcal{C}^{l,t-1} \leftarrow \emptyset$ 
14:         $\mathcal{T}^l \leftarrow \mathcal{T}^l \setminus \{t-1\}$ 

```

6.9.3 Reduzierung von Sequenzelementen

Jedes Sequenzelement (s, i) mit $s \in \mathcal{S}$ und $i \in \mathcal{I}^s$ bedingt die Erzeugung von zusätzlichen Variablen und Restriktionen für das Modell. Pro Standort $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ werden die Variablen $q_{s,i,l}$ und $\tau_{s,i,l}$ sowie eine Restriktion (6.7) generiert, außerdem entsteht jeweils eine Bilanzvariable $x_{s,i}$, eine Bilanzgleichung (6.5) und eine Auswahlbegrenzung (6.8). Für ein Sequenzelement mit $L = |\mathcal{L}^{s,i}|$ Standorten entstehen also insgesamt $2L + 1$ Variablen und $L + 3$ Restriktionen.

Das einfache Entfernen eines Sequenzelements (s, i) entfernt eine Parkposition und eine zurückgelegte Distanz aus dem Bewegungsszenario. Neben der Verfälschung des Szenarios besteht die Möglichkeit, dass die Lösung des modifizierten Optimierungsmodells durch den Wegfall von Fahrdistanzen für das ursprüngliche Modell nicht mehr zulässig ist. Die Zulässigkeit kann auch verloren gehen, wenn eine Ladeoption des entfernten Sequenzelements unbedingt für die Gültigkeit benötigt wird.

Als Alternative zum Entfernen können aufeinander folgende Sequenzelemente zusammengefasst werden (siehe Abbildung 6.7). Eine Verschmelzung von zwei Sequenzelementen führt in der Sequenz nur zu einem Wegfall einer möglichen Standortnutzung, die

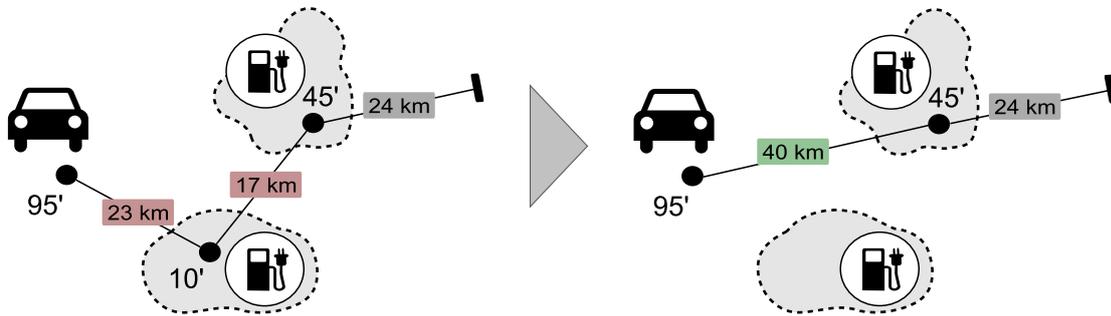


Abbildung 6.7: Verschmelzung von zwei Sequenzelementen

zurückgelegten Distanzen innerhalb der Sequenz verändern sich nicht. Damit bleibt auch die Zulässigkeit der Lösung des modifizierten Modells erhalten. Bei der Verschmelzung von zwei Sequenzelementen (s, i) und $(s, i + 1)$ wird vor der Entfernung von $(s, i + 1)$ folgende Transformation durchgeführt:

$$D_{s,i} := D_{s,i} + D_{s,i+1} \quad (6.54)$$

$$D_{s,i+1} := 0 \quad (6.55)$$

$$\mathcal{L}^{s,i+1} := \emptyset \quad (6.56)$$

Mindestquote für hinzugewinnbare Reichweite

Die Standzeit eines Fahrzeugs kann in einem Bewegungsszenario grundsätzlich beliebig kurz sein. Abhängig von den Leistungsparametern des Ladestandortes (siehe Abschnitt 6.2.3) ergibt sich daraus ggf. eine sehr geringe Energiemenge für den Parameter, die in diesem Zeitraum übertragen werden kann ($R_{s,i,l}$).

In Abhängigkeit von der Batteriekapazität M_s kann eine Mindestquote Q_s^{Min} für die hinzugewinnbare Reichweite je Sequenz $s \in \mathcal{S}$ festgelegt werden ($0 \leq Q_s^{Min} \leq 1$). Ein Ladevorgang kommt dann nur in Betracht, wenn dort mindestens ein bestimmter Anteil des Energieträgers aufgefüllt werden kann. Ein Sequenzelement (s, i) wird dann mit seinem Vorgänger verschmolzen, wenn

$$R_{s,i,l} \leq Q_s^{Min} \cdot M_s \quad \forall l \in \mathcal{L}^{s,i}$$

gilt.

Heuristische Lösungsmethodik

Im Rahmen dieses Kapitels wird ein heuristisches Verfahren zur Lösung von Instanzen des vorgestellten Optimierungsmodells beschrieben. Nach einem Überblick über den Gesamttablauf werden die Konstruktions-, Reparatur- und Verbesserungsstrategien im Detail vorgestellt. Das Verfahren soll das Lösen praktischer Instanzgrößen ermöglichen, die mit exakten Verfahren nicht mehr in akzeptabler Zeit lösbar sind. Die Evaluierung der Methode erfolgt in Kapitel 8.

Das Verfahren arbeitet mit einer objektorientierten Formulierung des Optimierungsmodells, die in Abschnitt 7.2 beschrieben ist. Es funktioniert auf Instanzen des Basismodells und berücksichtigt auch die Erweiterung um gebietsspezifische Mindestkapazitäten und die Berücksichtigung einer existierenden Infrastruktur. *Merschformann* beschreibt die technischen Details zur Umsetzung (vgl. [Mer10]).

7.1 Einordnung der Methodik

Lösungsverfahren für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme suchen nach einer *zulässigen Lösung* mit einem *optimalen Zielfunktionswert*. Exakte Verfahren wie *Branch-and-Bound* finden eine solche Lösung mittels geschickter Iteration durch den Lösungsbaum (vgl. [SM09], S. 151ff). Im Laufe des Verfahrens nähern sich zwei Schranken für den Zielfunktionswert an (vgl. [Wol98], S. 24): Als *primale Schranke* wird der beste bis dato bekannte Zielfunktionswert einer zulässigen Lösung bezeichnet. Die *duale Schranke* nähert sich dem optimalen Zielfunktionswert von der anderen Seite und ist

anfänglich durch den Zielfunktionswert der *LP-Relaxation*⁴³ gegeben. Am Ende des Lösungsverfahrens fallen primale und duale Schranke im Optimum zusammen.

Das Wort *Heuristik* stammt ursprünglich von dem griechischen Verb *heurískein* (εὐρίσκειν) ab und bedeutet „finden“ oder „entdecken“. Für den Begriff „Heuristisches Lösungsverfahren“ existiert in der wissenschaftlichen Literatur keine einheitliche Definition. *Streim* z.B. zitiert viele verschiedene Definitionen des Begriffs und stellt fest, dass „in der Literatur über die intensionalen Merkmale eines heuristischen Lösungsverfahrens keine einheitlichen Vorstellungen herrschen“ ([Str75], S. 144). *Zimmermann* nennt auf Basis der Überlegungen von *Streim* die folgenden Eigenschaften heuristischer Verfahren (vgl. [Zim05], S. 273f):

- **Ausschluss potentieller Lösungen.** Heuristische Lösungsverfahren reduzieren den Lösungsaufwand, indem nur ein Ausschnitt des gesamten Lösungsraums abgesucht wird. Das Verfahren gibt keine Garantie, dass das Optimum im durchsuchten Bereich liegt.
- **Nicht-willkürliche Suchprozesse.** Der Suchprozess durch den Lösungsraum erfolgt strukturiert nach festgelegten Regeln.
- **Fehlende Lösungsgarantie.** Die beweisbare Konvergenz gegen eine bestimmte Lösung ist bei heuristischen Verfahren grundsätzlich nicht gegeben.
- **Subjektive Stoppregeln.** Aufgrund der vorherigen Eigenschaft terminiert ein heuristisches Verfahren nicht automatisch. *Stoppregeln* beenden die Suche durch den Lösungsraum wenn bestimmte Bedingungen erreicht sind. Beispiele hierfür sind Zeitvorgaben, etwa für die Gesamtlaufzeit oder die Dauer seit der letzten gefundenen besten Lösung.
- **Steuerungsmöglichkeiten.** Die Effizienz heuristischer Verfahren hängt von der gegebenen Problemstruktur und -größe ab. Durch alternative Verfahren kann die Vorgehensweise zur Laufzeit automatisch oder manuell angepasst werden.

An die Qualität einer Heuristik lassen sich verschiedene Anforderungen stellen. *Silver*, *Victor*, *Vidal* und *de Werra* (vgl. [SVVW80], S. 155) benennen hierzu vier

⁴³Die LP-Relaxation eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblems ergibt sich durch Wegfall der Ganzzahligkeitsbedingung für alle Variablen. Die Lösung der LP-Relaxation ist stets eine duale Schranke für das Optimum des ursprünglichen Problems (vgl. [Wol98], S. 25). Ist das ursprüngliche Problem unlösbar, so ist auch die LP-Relaxation unlösbar (vgl. [Wol98], S. 26).

Eigenschaften, die von *Zimmermann* um zwei weitere Eigenschaften erweitert werden (vgl. [Zim05], S. 285). Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Laufzeit.** Lösungen sollen mit realistischem Rechenaufwand gefunden werden.
- **Optimalität.** Die Lösung soll im Durchschnitt in der Nähe des Optimums liegen.
- **Tendenz.** Die Chance einer schlechten Lösung soll möglichst gering sein.
- **Intuitivität.** Die Heuristik soll von einem Benutzer leicht zu verstehen sein.
- **Speicherplatz.** Der benötigte Speicherplatz soll möglichst gering sein.
- **Abstraktion.** Die Heuristik soll ein abstraktes Vorgehen implementieren, so dass sie breit anwendbar ist und bei Änderung von Daten- oder Modellstruktur in ihrer „Güte“ möglichst unverändert bleibt.

Eine *primale Heuristik* verbessert kontinuierlich die primale Schranke. Durch gesteuerte Ausführung der jeweiligen Suchstrategien werden sukzessive bessere zulässige Lösungen im Sinne der Zielfunktion ermittelt. Ähnlich wie bei anderen Lösungsverfahren lässt sich die Vorgehensweise einer primalen Heuristik in zwei unterschiedliche Teilschritte einteilen (vgl. [SM09], S. 140):

- **Eröffnungs- oder Konstruktionsverfahren.** Um eine Lösung des gegebenen Problems verbessern zu können, muss zunächst mindestens eine gültige Lösung des Systems ermittelt werden. Für manche Probleme ist die Angabe einer (meist trivialen) Startlösung sehr einfach, bei anderen ist das grundsätzliche Finden einer zulässigen Lösung bereits schwierig.
- **Verbesserungsverfahren.** Auf Basis einer oder mehrerer zulässiger Lösungen werden durch Ausführung von Verbesserungsstrategien weitere zulässige Lösungen gefunden, die einen besseren Zielfunktionswert erreichen. Je nach Verfahren sind auch temporäre Verschlechterungen des Zielfunktionswerts oder Unzulässigkeiten akzeptabel.

Zur übergeordneten Steuerung heuristischer Suchstrategien kommen *Metaheuristiken* zum Einsatz (vgl. [SM09], S. 13f). Als wichtigste Verfahren dieser Art gelten genetische Algorithmen ([SGK05]), Tabu Search ([GL01], [GP05]), Simulated Annealing ([AKM05]) und Verfahren der Schwarmintelligenz ([MM05]). Verfahren zur Auswahl geeigneter Heuristiken für ein Problem werden auch als *Hyperheuristiken* bezeichnet (vgl. [BK05], S. 14).

7.2 Objektorientierte Modellierung

Das vorgestellte heuristische Verfahren wurde in einer objektorientierten Programmiersprache entwickelt. Die Objektorientierte Programmierung (OOP) zeichnet sich als Methodik vor allem durch die besonderen Konzepte der Datenabstraktion und -kapselung aus. Diesen Programmiersprachen „liegt die Idee zugrunde, die Trennung zwischen Daten und Prozeduren/Funktionen aufzuheben“ ([BEG06], S. 9). Zur grafischen Darstellung der Struktur objektorientierter Programme wurde die Unified Modelling Language (UML) entwickelt. Nach *Clausing* besitzt OOP die folgenden zentralen Merkmale (vgl. [Cla11], S. 285):

- **Objekte.** Datenkapselung erfolgt in (nach außen) verborgenen Feldern als Attribute, die nur über Methoden gelesen oder geändert werden können. Jedes Objekt ist Instanz einer Klasse.
- **Klassen.** Die Zusammenfassung von Objekten mit gleichen Attributen und Methoden erfolgt in Klassen, die eigenständige Datentypen sind.
- **Vererbung.** Klassen können voneinander erben und übernehmen Attribute und Methoden. Damit lässt sich ein Objekt immer auch als Objekt einer seiner Oberklassen verwenden. Objekte können vererbte Methoden überschreiben.

Die mathematische Formulierung des vorgestellten Optimierungsmodells eignet sich nur begrenzt für die algorithmische Modifikation in objektorientierten Programmiersprachen. Für den effizienten Zugriff auf Instanzen des Optimierungsmodells und die interaktive Modifikation einer Modelllösung wird ein *Objektmodell* eingesetzt, das als einheitliche Schnittstelle zwischen Algorithmen und Modellinstanzen bzw. -lösungen dient.

Abbildung 7.1 illustriert die Struktur der Klassen zur Abbildung einer Modellinstanz. Eine Instanz (*Instance*) referenziert die Objekte der potentiellen Standorte (*Locations*), Gebiete (*Areas*) und Sequenzen (*Sequences*). Ein Standort (*Location*) besitzt eine Menge chronologisch angeordneter Zeitscheiben (*TimeSlots*) für die Kapazitätsbetrachtung. Eine Sequenz (*Sequence*) referenziert eine sequentielle Liste von Sequenzelementen (*SequenceElements*), die jeweils eine Parkposition und -dauer sowie die nachfolgend zurückgelegte Fahrdistanz abbilden. Pro Sequenzelement ist eine Menge von Optionen (*Options*) definiert, die jeweils einen Standort, die dort in Abhängigkeit von der Standzeit hinzugewinnbare Reichweite (*MaxMileage*) sowie die dabei belegten Zeitscheiben kapselt.

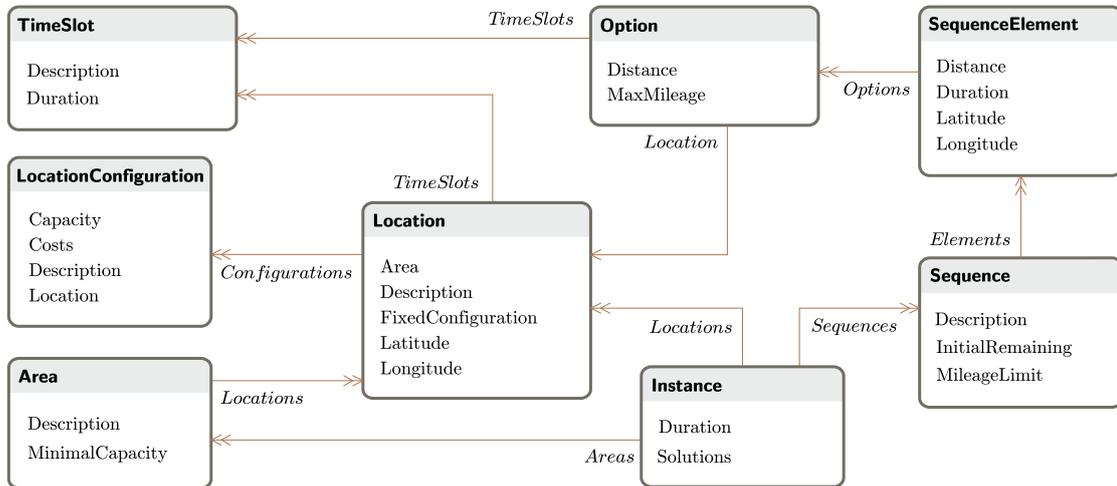


Abbildung 7.1: Klassenstruktur der Modellinstanzen

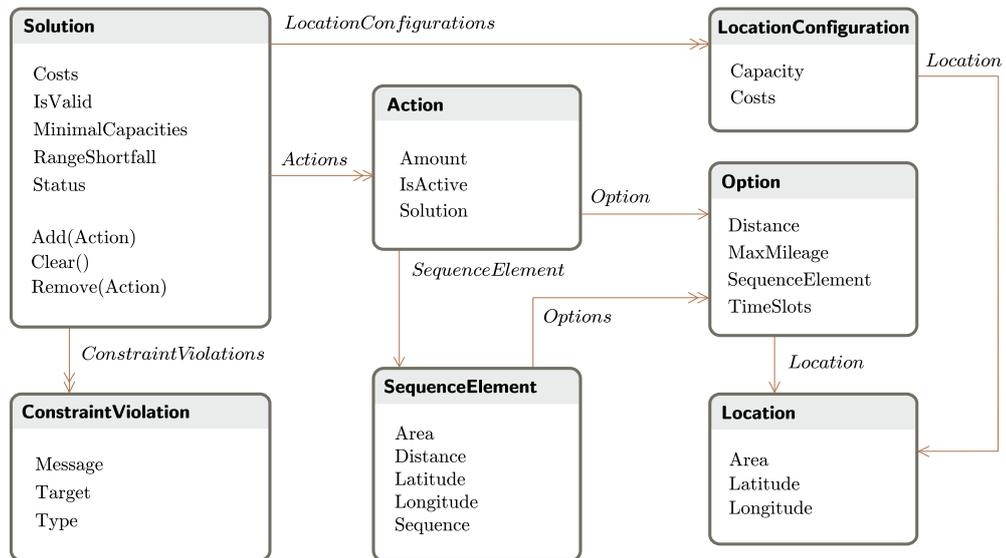


Abbildung 7.2: Klassenstruktur einer Modelllösung

Die Manipulation einer Lösung (*Solution*) im Objektmodell erfolgt durch das Hinzufügen und Entfernen von Aktivitäten (*Actions*). Eine Aktivität stellt die Verwendung einer Versorgungsoption (*Option*) dar, d.h. die Benutzung eines Standortes durch ein Fahrzeug. Eine Lösung entspricht damit einer endlichen Menge $\mathcal{A} \subseteq \mathcal{S} \times \mathcal{I} \times \mathcal{L}$ von ausgewählten Versorgungsoptionen. Die Gültigkeit der Lösung hängt nun davon ab, ob die Auswahl der Optionen pro Sequenz den gesamten Reichweitenbedarf eines Fahrzeugs decken kann. Ansonsten wird je Sequenz die Fehlreichweite (*RangeShortfall*) bestimmt.

Aus den Leistungsparametern von Fahrzeug und Standort wird a priori die maximal hinzugewinnbare Reichweite (*MaxMileage*) bestimmt. Sie entspricht im mathematischen Modell dem Parameter $R_{s,i,l}$ und gibt die Anzahl Distanzeinheiten (z.B. km) an, die das Fahrzeug ohne eine Kapazitätsbegrenzung des Energieträgers in der zur Verfügung stehenden Standzeit maximal an Reichweite hinzugewinnen könnte. Im Laufe einer Sequenz kann ein Fahrzeug jedoch immer nur Restreichweite bis zur Kapazitätsgrenze M_s hinzugewinnen.

Die Bilanzierung der verbleibenden Restreichweite $x_{s,i}$ je Sequenz $s \in \mathcal{S}$ und Position $i \in \mathcal{I}^s$ erfolgt automatisch. Dabei wird für jedes Sequenzelement im Falle eines Ladevorgangs ($\tau_{s,i,l} = 1$ für ein $l \in \mathcal{L}^{s,i}$) die maximal hinzugewinnbare Reichweite in Abhängigkeit von der vorherigen Restreichweite und der Batteriekapazität bestimmt:

$$q_{s,i,l} = \min(R_{s,i,l}, M_s - x_{s,i-1} + D_{s,i-1}) \quad \forall s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i}, \tau_{s,i,l} = 1$$

Aus der zeitlichen Betrachtung jedes Standortes ergibt sich eine benötigte Minimalkapazität. Die Auswahl der Optionen

$$\mathcal{A} = \{(s, i, l) \in \mathcal{S} \times \mathcal{I} \times \mathcal{L} \mid i \in \mathcal{I}^s \wedge l \in \mathcal{L}^{s,i} \wedge \tau_{s,i,l} = 1\}$$

bestimmt implizit die Kapazitätsstufe (*LocationConfiguration*) jedes Standortes in der Lösung. Gewählt wird die kostenmäßig günstigste Kapazitätsstufe C^{Min} , die mindestens die benötigte Kapazität

$$K_l^{Min} = \max_{t \in \mathcal{T}} \left\{ \sum_{(s,i) \in C^{l,t}} \tau_{s,i,l} \right\}$$

bereitstellt (siehe Algorithmus 4). Die Gesamtkosten bestimmen sich aus der Summe der Kosten der benötigten Kapazitätsstufe aller Standorte (Algorithmus 3). Eine Lösung im Objektmodell ist eindeutig beschrieben durch die Liste der Fahrzeugaktivitäten.

Die Auflösung der transitiven Abhängigkeiten (Belegung der Variablen) aus dem mathematischen Modell erfolgt automatisch bei jeder Modifikation.

Algorithmus 3: TotalCosts

Eingabe : Aktivitätenmenge \mathcal{A}

Ausgabe: Gesamtkosten $c \in \mathbb{R}$

```

1:  $c^{Total} \leftarrow 0$ 
2: forall  $l \in \mathcal{L}$  do
3:    $k \leftarrow \text{DetermineCapacityLevel}(\mathcal{A}, l)$ 
4:    $c^{Total} \leftarrow c^{Total} + C_{l,k}$ 
5: return  $c^{Total}$ 

```

Algorithmus 4: DetermineCapacityLevel

Eingabe : Aktivitätenmenge \mathcal{A} , Standort $l^* \in \mathcal{L}$

Ausgabe: Kapazitätsstufe $k \in \mathcal{K}^{l^*}$

```

1:  $A' \leftarrow \{(s, i, l) \in \mathcal{A} \mid l^* = l\}$ 
2: forall  $t \in \mathcal{T}$  do
3:    $c_t \leftarrow 0$ 
4:   forall  $(s, i, l) \in A'$  do
5:     if  $(s, i) \in \mathcal{C}^{l^*, t}$  then  $c_t \leftarrow c_t + 1$ 
6:  $c^{Max} \leftarrow \max_{t \in \mathcal{T}} c_t$ 
7: if  $\exists k \in \mathcal{K}^{l^*} : K_{l^*, k} \geq c^{Max}$  then Output „Kapazitätsbedarf zu hoch“
8: else return  $\min_{k \rightarrow C_{l^*, k}} \{k \in \mathcal{K}^{l^*} \mid K_{l^*, k} \geq c^{Max}\}$ 

```

7.3 Ablaufbeschreibung

Abbildung 7.3 illustriert den Ablauf des heuristischen Verfahrens. Die entwickelte primale Heuristik ist zunächst in eine *Kontroll-* und eine *Ausführungsschicht* unterteilt. Die Kontrollschicht übergibt Eingabedaten und Parameter, steuert die asynchrone Ausführung der Suchstrategien und stellt die Rückgabe der gefundenen Lösungen an den aufrufenden Programmteil sicher. Die Ausführungsschicht implementiert die sukzessive Abarbeitung der verschiedenen Konstruktions- und Verbesserungsstrategien. In einem kontinuierlichen Zyklus wird dabei außerdem bei Bedarf eine Routine zur *Reparatur*

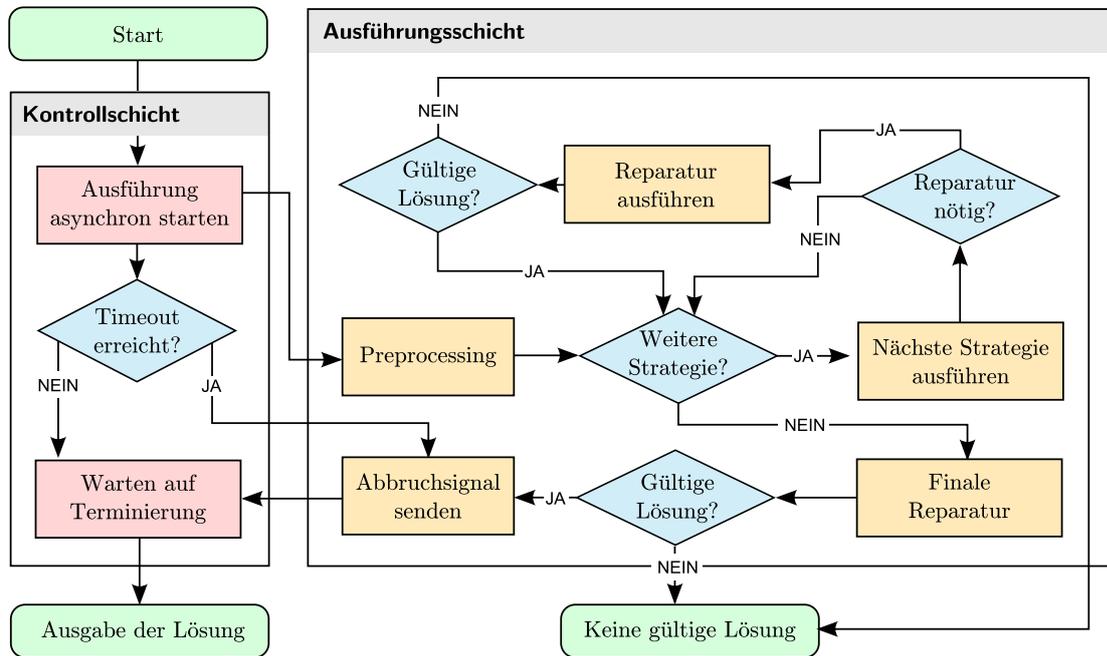


Abbildung 7.3: Ablaufdiagramm des heuristischen Verfahrens

gestartet, bei der eine ungültige Lösung durch Anwendung von Reparaturstrategien in eine gültige Lösung überführt werden kann.

Abbildung 7.3 zeigt den strukturellen Ablauf der vorgestellten Methode. Das heuristische Verfahren kann flexibel mit einer beliebig langen Liste von Einzelstrategien gestartet werden, die chronologisch ausgeführt werden. Eine Suchstrategie wird einzeln konfiguriert, d.h. sie kann auch zu mehreren Zeitpunkten mit unterschiedlichen Einstellungen ausgeführt werden. Die Verbesserungsstrategien benötigen zu Beginn eine gültige Lösung, so dass zuvor immer eine Konstruktions- bzw. Reparaturstrategie ausgeführt werden muss.

7.4 Preprocessing

Vor dem Ablauf der verschiedenen Strategien zur Konstruktion und Verbesserung erfolgt eine einmalige Initialisierung - das *Preprocessing*. Auf Basis der eingestellten Verfahrensparameter werden spezifische Werte für die gegebene Instanz berechnet, die später von den verschiedenen Verfahren verwendet werden.

7.4.1 Priorisierung potentieller Standorte

Zielfunktion der Optimierung ist eine Gesamtkostenkennzahl für die Bereitstellung der Ladestandorte mit einer bestimmten Kapazität. Die heuristischen Verfahren versuchen, mit unterschiedlichen Strategien eine Reduktion der benötigten Standorte durch Umverteilung der Nachfrage zu erreichen. Zur Bestimmung einer effektiven Suchreihenfolge muss eine Ordnung auf den Standorten definiert werden, die als Priorisierung herangezogen werden kann.

Tabelle 7.2 zeigt die verwendeten Kennzahlen, aus denen ein kombinierter Attraktivitätswert (*Ranking*) berechnet werden kann. Dazu werden alle n Ausprägungen $x_{l,j}$ mit $l \in \mathcal{L}$ und $j = 1 \dots n$ zunächst auf eine 0-1 Skala normiert. Für die proportionalen Kenngrößen (höher = besser) bestimmen sich die normierten Werte mit

$$x_{l,j} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } \left(\max_{l' \in \mathcal{L}} f(l') - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l') \right) = 0 \\ \frac{f(l) - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l')}{\max_{l' \in \mathcal{L}} f(l') - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l')} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Entsprechend berechnen sich die umgekehrt proportionalen Werte mit

$$x_{l,j} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } \left(\max_{l' \in \mathcal{L}} f(l') - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l') \right) = 0 \\ 1 - \frac{f(l) - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l')}{\max_{l' \in \mathcal{L}} f(l') - \min_{l' \in \mathcal{L}} f(l')} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Kriterien $j = 1 \dots n$ werden jeweils mit einem Wert w_j gewichtet, wobei $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ gilt. Das Ranking je Standort $l \in \mathcal{L}$ wird bestimmt als gewichtetes arithmetisches Mittel R_l der Ausprägungen mit

$$R_l = \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} \cdot \sum_{j=1}^n w_j \cdot x_{l,j}.$$

7.4.2 Kalibrierung der Gewichte

Die Belegung der Gewichte für das Ranking der Standorte bestimmt die aggregierten Prioritätswerte der potentiellen Standorte. Durch ein Preprocessing der Instanz können

die Gewichtungen auch vorab automatisch festgelegt werden. Die folgende Berechnungslogik hat sich etwa für die verwendeten Testinstanzen bewährt:

$$w_{FixedLocation} = 5 \quad (7.1)$$

$$w_{MinCosts} = \frac{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{MinCosts}(l) - \min_{l \in \mathcal{L}} f_{MinCosts}(l)}{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{MinCosts}(l)} \cdot 4 \quad (7.2)$$

$$w_{MaxCapacity} = \frac{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{MaxCapacity}(l) - \min_{l \in \mathcal{L}} f_{MaxCapacity}(l)}{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{MaxCapacity}(l)} \cdot 2 \quad (7.3)$$

$$w_{OccurencePerElements} = \frac{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{OccurencePerElements}(l) - \min_{l \in \mathcal{L}} f_{OccurencePerElements}(l)}{\max_{l \in \mathcal{L}} f_{OccurencePerElements}(l)} \cdot 2 \quad (7.4)$$

Ein Kriterium wird umso stärker gewichtet, je höher die Spannweite der Parameterwerte ist. In diesem Fall werden nur vier Ausprägungen berücksichtigt ($w_l = 0$ für alle anderen Kriterien). Die Gewichtung steigt hier mit höherer Spannweite der Ausprägungen des Kriteriums.

7.5 Verfahrensparameter

Die vorgestellten Suchverfahren treffen lokal Entscheidungen über die Nutzung potentieller Standorte. Analog zum vorgestellten Simulationsmodell wird für jedes Sequenzelement zunächst bestimmt, *ob* ein Standort verwendet werden soll. In der Regel befindet sich das Fahrzeug in mehr als einem Versorgungsbereich und muss sich dann für genau eine *Standortoption* entscheiden.

Auswahl von Standortoptionen

Tabelle 7.1 zeigt die Auswahlstrategien, wenn mehrere Standortoptionen verfügbar sind. Jeder Strategie definiert eine Funktion $f : (s, i, l) \rightarrow \mathbb{R}$, die einen Ordnungswert je Aktivität $(s, i, l) \in \mathcal{A}$ bestimmt. Die Standortoptionen $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ werden absteigend nach dem Ordnungswert sortiert und in dieser Reihenfolge evaluiert.

Ausprägung	Beschreibung
MaxMileage ↑ (mehr = besser)	Ausgewählt wird immer die Option mit der maximal hinzugewinnbaren Reichweite. $f(s, i, l) = R_{s,i,l}$ Diese Strategie kann nur bei der Betrachtung unterschiedlicher Ladeleistungen sinnvoll eingesetzt werden.
MaxCapacity ↑ (mehr = besser)	Den Vorzug erhält eine Standortoption mit möglichst hoher Maximalkapazität. $f(s, i, l) = \max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}.$ Diese Strategie kann nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn Standorte unterschiedliche Kapazitätsstufen bereitstellen.
MaxCapacityEstimated ↑ (mehr = besser)	Auswahlkriterium ist ein geschätzter Maximalkapazitätswert unter Berücksichtigung von Startkonfiguration und Auslastungsbeschränkung. $f(s, i, l) = \begin{cases} K_{l,k} \cdot U_l^{Max} & \text{wenn } \exists k \in \mathcal{K}^l : (l, k) \in \mathcal{S}^0, \\ \left(\max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \right) \cdot U_l^{Max} & \text{sonst.} \end{cases}$
MinCosts ↓ (weniger = besser)	Die Auswahl einer Option erfolgt anhand der minimalen Kosten des jeweiligen Standortes. $f(s, i, l) = \min_{k \in \mathcal{K}^l} C_{l,k}$
IsPartOfArea ↑ (mehr = besser)	Bevorzugt werden Optionen, die in einem Gebiet mit einer vorgegebenen Mindestkapazität liegen. Die Funktion $f(s, i, l) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \exists g \in \mathcal{G} : l \in \mathcal{L}^g \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$ erzwingt die Auswahl einer solchen Option, wenn vorhanden.
MostFrequent ↑ (mehr = besser)	Ausgewählt wird die Option, deren Standort über alle Sequenzelemente am häufigsten vorkommt. $f(s, i, l) = \{(s', i') \mid s' \in \mathcal{S} \vee i' \in \mathcal{I}^{s'} \vee l \in \mathcal{L}^{s', i'}\} $
MostSequences ↑ (mehr = besser)	Ausgewählt wird die Option mit der höchsten absoluten Anzahl Sequenzen, in denen der Standort mindestens einmal als Option vorkommt. $f(s, i, l) = \{s' \in \mathcal{S} \mid \exists i' \in \mathcal{I}^{s'} : l \in \mathcal{L}^{s', i'}\} $
AverageMileage ↑ (mehr = besser)	Die Auswahl einer Option erfolgt auf Basis der durchschnittlich hinzugewinnbaren Reichweite des betreffenden Standortes. $f(s, i, l) = \frac{ \{\sum_{s' \in \mathcal{S}} \sum_{i' \in \mathcal{I}^{s'}} R_{s', i', l}\} }{ \{(s', i') \mid s' \in \mathcal{S} \vee i' \in \mathcal{I}^{s'} \vee l \in \mathcal{L}^{s', i'}\} }$
BestFit ↓ (weniger = besser)	Ausgewählt wird die Option, bei der die hinzugewinnbare Reichweite möglichst genau der Kapazität des Energieträgers entspricht. $f(s, i, l) = R_{s,i,l} - M_s $

Tabelle 7.1: Auswahlstrategien für Standortoptionen

Kennzahl	Beschreibung
MaxCapacity ↑ (mehr = besser)	Die höchste Kapazität $f(l) = \max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}$ eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ gibt an, wie viele Fahrzeuge maximal zeitgleich versorgt werden können.
MaxCapacityEstimated ↑ (mehr = besser)	Die geschätzte Maximalkapazität eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ $f(l) = \begin{cases} K_{l,k} \cdot U_l^{Max} & \text{wenn } \exists k \in \mathcal{K}^l : (l, k) \in \mathcal{S}^0, \\ \left(\max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \right) \cdot U_l^{Max} & \text{sonst.} \end{cases}$ berücksichtigt zusätzlich festgelegte Startkonfigurationen und eine maximal zulässige Auslastung.
MinCosts ↓ (weniger = besser)	Die Kosten für die Eröffnung eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ in der kleinstmöglichen Kapazitätsstufe $f(l) = \min_{k \in \mathcal{K}} C_{l,k}$ sind ein Indikator für die Kosten der Inbetriebnahme.
OccurrencePerElements ↑ (mehr = besser)	Die absolute Häufigkeit der möglichen Verwendungen eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ gibt mit $f(l) = \{(s, i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i}\} $ an, wie oft sich insgesamt ein beliebiges Fahrzeug im gesamten Bewegungsszenario im Versorgungsbereich des Standortes befindet.
OccurrencePerSequences ↑ (mehr = besser)	Die absolute Häufigkeit der Anzahl Sequenzen, in denen ein Standort $l \in \mathcal{L}$ vorkommt gibt mit $f(l) = \{s \mid s \in \mathcal{S} \wedge \exists i \in \mathcal{I}^s : l \in \mathcal{L}^{s,i}\} $ an, wie viele Fahrzeuge insgesamt mindestens einmal von einem Standort versorgt werden können.
AverageMileage ↑ (mehr = besser)	Die durchschnittlich bei Verwendung eines Standortes $l \in \mathcal{L}$ hinzuge-winnbare Reichweite $f(l) = \frac{ \{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} R_{s,i,l}\} }{ \{(s, i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i}\} }$ ist ein Indikator für die Leistungsfähigkeit eines Standortes und die verfügbare Ladezeit der Fahrzeuge im Versorgungsbereich.
AverageOvercharge ↓ (weniger = besser)	Die durchschnittlich bei Verwendung eines Standort $l \in \mathcal{L}$ aufgrund der Batteriekapazität nicht verwendbare Reichweite $f(l) = \frac{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} \max(R_{s,i,l} - M_s, 0)}{ \{(s, i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i}\} }$ ist ein Indikator für zu lange Standzeiten im Verhältnis zur verfügbaren Ladeleistung.
AverageUndercharge ↓ (weniger = besser)	Die durchschnittlich bei Verwendung eines Standort $l \in \mathcal{L}$ hinzugewinn-bare Reichweite unterhalb der Batteriekapazität $f(l) = \frac{\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{I}^s} \max(M_s - R_{s,i,l}, 0)}{ \{(s, i) \mid s \in \mathcal{S}, i \in \mathcal{I}^s, l \in \mathcal{L}^{s,i}\} }$ ist ein Indikator für zu geringe Standzeiten im Verhältnis zur verfügbaren Ladeleistung.
FixedLocation ↑ (mehr = besser)	Im Falle einer fixierten Konfiguration eines Standorts $l \in \mathcal{L}$ liefert $f(l) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \exists k \in \mathcal{K}^l : (l, k) \in \mathcal{S}^0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$ einen Indikator für auf jeden Fall verfügbare Kapazität.

Tabelle 7.2: Kennzahlen zur Priorisierung von Standorten

Priorisierung von Standorten

Das in Abschnitt 7.4.1 beschriebene Ranking aller Standorte $l \in \mathcal{L}$ kann unter Einbeziehung vieler Indikatoren berechnet werden. Tabelle 7.2 zeigt mögliche Kriterien und deren Berechnung. Das Ranking eines Standortes wird a priori bestimmt und bleibt während der Ausführung einer Strategie unverändert.

7.6 Strategien zur Konstruktion gültiger Startlösungen

Die vorgestellten Konstruktionsverfahren erzeugen jeweils eine Startlösung mit unterschiedlichen Strategien. Falls die Lösung nach vollständiger Ausführung der Strategie noch keine Zulässigkeit erreicht hat, erfolgt eine zusätzliche Ausführung der Reparaturstrategien (siehe Abbildung 7.3).

7.6.1 Greedy Strategie

Die trivialste Startlösung für das vorliegende Modell lässt sich generieren, indem alle Standorte in der maximalen Kapazitätsstufe eröffnet werden. Alle Fahrzeuge nutzen hier bei jedem Parkvorgang einen Standort, in dessen Versorgungsbereich sie sich befinden, auf Basis einer Auswahlstrategie aus Tabelle 7.1. Die Vorgehensweise kann schnelle Startlösungen erzeugen, die Lösungen werden allerdings mit hohen Kosten verbunden

Algorithmus 5: GreedyCharge

Eingabe : Sequenzen \mathcal{S} , Auswahlfunktion $O : (s, i, l) \rightarrow \mathbb{R}$

Ausgabe: Aktivitätenmenge \mathcal{A}

```
1:  $\mathcal{A} \leftarrow \emptyset$ 
2: forall  $s \in \mathcal{S}$  do
3:   for  $i = 1 \dots I_s$  do
4:      $A_i \leftarrow \{(s', i', l') \mid s = s', i = i', l' \in \mathcal{L}^{s,i}\}$ 
5:     {Option mit dem höchsten Ordnungswert auswählen}
6:      $(s', i', l') \leftarrow a \in A_i : \forall a' \in A_i : O(a') \leq O(a)$ 
7:      $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup (s', i', l')$ 
8: return  $\mathcal{A}$ 
```

sein. Die *GreedyCharge* Vorgehensweise ist ein wichtiger Baustein für eine heuristische Suche, da durch viele nicht benötigte Standortnutzungen ein großer Spielraum für die Umverteilung von Nachfrage in nachfolgenden Verbesserungsstrategien entsteht.

Der Algorithmus *GreedyCharge* gewährleistet die Gültigkeit der Restriktionen (6.4) und (6.5). Sofern die Instanz hinsichtlich der Reichweitenbedarfe aller Fahrzeuge lösbar ist, garantiert die Auswahlstrategie *MaxMileage* auch ein Gültigkeit von Restriktion (6.6). Restriktion (6.9) kann verletzt sein, wenn die höchste Kapazitätsstufe eines Standortes nicht ausreicht, um die gesamte Anzahl paralleler Ladevorgänge zu ermöglichen. In diesem Fall wird anschließend über die Reparaturstrategien eine Umverteilung auf andere Standorte evaluiert.

7.6.2 Greedy-Strategie mit Priorisierung

Die Greedy-Strategie aus Abschnitt 7.6.1 wählt für jede Parkposition eine Versorgungsoption nach einer lokalen Auswahlstrategie aus. Als Variante dieser Vorgehensweise kann alternativ eine Auswahl der Versorgungsoption auf Basis des Rankings eines Standortes genutzt werden. Algorithmus *GreedyChargeWithRanking* zeigt die Vorgehensweise, bei der primär höher eingeschätzte Standorte über alle Sequenzelemente ausgelastet werden. Analog zur *GreedyCharge*-Vorgehensweise kann eine Unzulässigkeit der Sequenz entstehen, wenn Reichweitenbedarfe nicht durch die ausgewählten Standorte mit hohem Ranking befriedigt werden können. Es kann also vorkommen, dass der Reparaturzyklus zusätzlich Verletzungen von Restriktion (6.6) bearbeiten muss.

Algorithmus 6: GreedyChargeWithRanking

Eingabe : Sequenzen \mathcal{S} , Ordnungsfunktion $R : \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}$

Ausgabe: Aktivitätenmenge \mathcal{A}

```

1:  $\mathcal{A} \leftarrow \emptyset$ 
2: forall  $s \in \mathcal{S}$  do
3:   for  $i = 1 \dots I_s$  do
4:      $A_i \leftarrow \{(s', i', l') \mid s = s', i = i', l' \in \mathcal{L}^{s,i}\}$ 
5:      $\{Option\ anhand\ des\ höchsten\ Standort-Rankings\ auswählen\}$ 
6:      $(s', i', l') \leftarrow a \in A_i : \forall l'' \in \mathcal{L}^{s,i} : R(l'') \leq R(l')$ 
7:      $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup (s', i', l')$ 
8: return  $\mathcal{A}$ 

```

Algorithmus 7: MinMileage**Eingabe :** Sequenzen \mathcal{S} , Auswahlfunktion $O : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$ **Ausgabe:** Aktivitätenmenge \mathcal{A}

```

1: forall  $s \in \mathcal{S}$  do
2:   for  $i = 1 \dots I_s$  do
3:     { Verbleibende Reichweite für die nächste Distanz zu gering? }
4:     if  $D_{s,i} > \text{RemainingRange}(s, i, \mathcal{A})$  then
5:        $A_i \leftarrow \{(s', i', l') \mid s = s', i = i', l \in \mathcal{L}^{s,i}\}$ 
6:       { Option anhand der Auswahlfunktion auswählen }
7:        $(s', i', l') \leftarrow a \in A_i : \forall a' \in A_i : O(a') \leq O(a)$ 
8:        $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup (s', i', l')$ 
9:     { Reichweite immer noch zu gering? }
10:    if  $\text{RemainingRange}(s, i + 1, \mathcal{A}) < 0$  then
11:       $j \leftarrow i$ 
12:      { Ladeoption in den vorherigen Sequenzelementen suchen }
13:      while  $(j \geq 1) \wedge (\text{RemainingRange}(s, i, \mathcal{A}) < 0)$  do
14:        { Noch kein Ladevorgang am aktuellen Sequenzelement? }
15:        if  $\{(s', i', l') \in \mathcal{A} \mid s' = s \vee i' = j\} = \emptyset$  then
16:           $A_j \leftarrow \{(s', i', l') \mid s = s', i = j, l \in \mathcal{L}^{s,j}\}$ 
17:          { Option anhand der Auswahlfunktion auswählen }
18:           $(s', i', l') \leftarrow a \in A_j : \forall a' \in A_j : O(a') \leq O(a)$ 
19:           $\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup (s', i', l')$ 
20: return  $\mathcal{A}$ 

```

7.6.3 Minimale Restreichweiten

Im Rahmen der Greedy-Strategien wird versucht, ein Fahrzeug auf Basis einer Auswahlstrategie so häufig wie möglich zu laden. Zur Konstruktion einer Startlösung lässt sich auch der umgekehrte Fall betrachten. Dabei wird jede Sequenz abgearbeitet und so selten wie möglich ein Ladevorgang ausgeführt. Die Reichweite des Fahrzeugs ohne einen Ladevorgang wird dabei so weit wie möglich ausgenutzt bevor der nächste Standort aufgesucht wird. Der Algorithmus *MinMileage* zeigt die iterative Vorgehensweise. Als Auswahlfunktion kann das Ranking der Standorte oder eine Strategie aus Tabelle 7.1 verwendet werden.

Der Hilfsalgorithmus *RemainingRange* gibt die verbleibende Restreichweite am Ende eines Sequenzelements (vor dem nächsten Parkvorgang) zurück.

Algorithmus 8: RemainingRange

Eingabe : Sequenz $s \in \mathcal{S}$, Sequenzelement-Nr. $I \in I^s$, Aktivitätenmenge \mathcal{A}

Ausgabe: Verbleibende Restreichweite nach Sequenz-Element (s, I)

```

1:  $x_{s,0} \leftarrow X_s^0$ 
2: for  $i = 1 \dots I$  do
3:    $x_{s,i} \leftarrow x_{s,i-1} - D_{s,i-1}$ 
4:   if  $\exists l \in \mathcal{L}^{s,i} : (s, i, l) \in \mathcal{A}$  then
5:      $q_{s,i,l} \leftarrow \min(R_{s,i,l}, M_s - x_{s,i-1})$ 
6:      $x_{s,i} \leftarrow x_{s,i} + q_{s,i,l}$ 
7: return  $x_{s,I} - D_{s,I}$ 

```

7.7 Strategien zur Reparatur ungültiger Lösungen

Das *Reparieren* einer unzulässigen Lösung erfolgt durch die iterative Ausführung verschiedener Reparaturstrategien mit dem Ziel, die Zulässigkeit der Lösung herzustellen (*Reparaturzyklus*). Abbildung 7.4 illustriert diese Vorgehensweise. Im Objektmodell einer Instanz des Basismodells können drei unterschiedliche Typen von Verletzungen auftreten:

- **SequenceUnderflow.** Die Sequenz wird an einer Stelle durch zu wenig verfügbare Reichweite ungültig, d.h. es existiert ein Sequenzelement (s, i) mit $x_{s,i} < D_{s,i}$.
- **NoLocationConfiguration.** Ein Standort $l \in \mathcal{L}$ kann den Kapazitätsbedarf mit keiner Konfiguration befriedigen, d.h.

$$\exists t \in \mathcal{T}^l : \left(\sum_{(s,i) \in \mathcal{C}^{l,t}} \tau_{s,i,l} \right) > \max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}$$

- **MultipleActions.** Die Lösung enthält mehr als eine Aktivität für ein Sequenzelement, d.h. es gilt

$$\exists (s, i) \in \mathcal{S} \times \mathbb{N} : \left(\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} \right) > 1$$

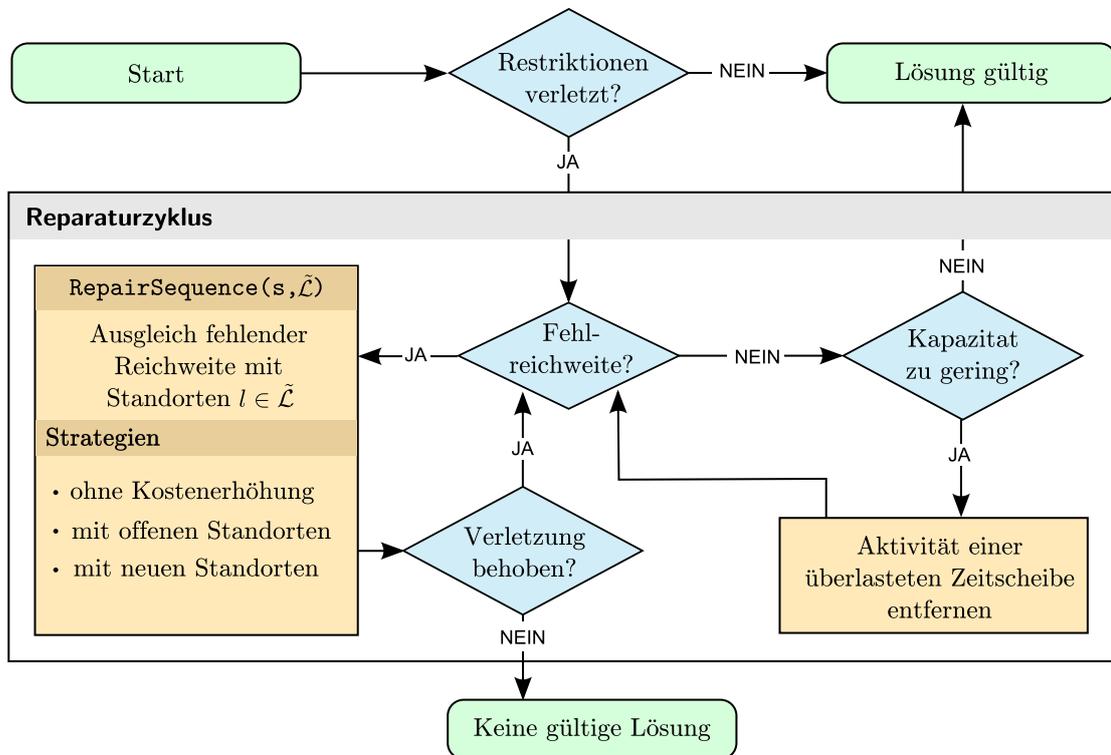


Abbildung 7.4: Ablaufdiagramm Reparaturzyklus

Keines der Konstruktions- oder Verbesserungsverfahren fügt der Lösung mehr als eine Aktivität pro Sequenzelement hinzu. Die Reparatur von *MultipleActions*-Verletzungen ist also innerhalb der vorgestellten Verfahren nicht notwendig. Die folgenden beiden Abschnitte beschreiben die Strategien für die Behebung der weiteren Verletzungen.

Sequenzvalidierung

Die Gültigkeit einer Sequenz wird geprüft, indem auf Basis der Aktivitäten eine Fehlreichweite bestimmt wird. Algorithmus 9 zeigt die Bestimmung der Fehlreichweite. Entsprechend gilt eine Sequenz $s \in \mathcal{S}$ als gültig, wenn $MissingRange(s, I_s) = 0$ gilt.

7.7.1 Reparatur auftretender Fehlreichweite

Falls die Ladevorgänge einer Lösung nicht ausreichen, um alle gefahrenen Distanzen einer Sequenz zu ermöglichen, wird die Restreichweite an einem oder mehreren Sequenzelemen-

Algorithmus 9: MissingRange

Eingabe : Sequenz $s \in \mathcal{S}$, Sequenzelement-Nr. $I \in I^s$

Ausgabe: Summe der fehlenden Reichweite R bis Sequenz-Element I

```

1:  $x_{s,0} \leftarrow X_s^0$ 
2:  $R \leftarrow 0$ 
3: for  $i = 1 \dots I$  do
4:    $x_{s,i} \leftarrow x_{s,i-1} - D_{s,i-1}$ 
5:   if  $\exists (s, l) \in \mathcal{S} \times \mathcal{L} : \tau_{s,i,l} = 1$  then
6:      $q_{s,i,l} \leftarrow \min(R_{s,i,l}, M_s - x_{s,i-1})$ 
7:      $x_{s,i} \leftarrow x_{s,i} + q_{s,i,l}$ 
8:   if  $x_{s,i} < D_{s,i}$  then
9:      $R \leftarrow R - x_{s,i} + D_{s,i}$ 
10:     $x_{s,i} \leftarrow D_{s,i}$ 
11: return  $R$ 

```

ten negativ. In diesem Fall existiert genau ein Element, an dem die Unterdeckung das erste Mal auftritt. Pro Sequenz $s \in \mathcal{S}$ lässt sich dieses Element (s, i_s^{Low}) ermitteln mit

$$i_s^{Low} = \min\{i \in \mathcal{I}^s \mid x_{s,i} - D_{s,i} < 0\} \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (7.5)$$

Die Fehlreichweite kann nur vermieden werden, wenn zusätzliche Ladevorgänge an einem oder mehreren vorherigen Sequenzelementen durchgeführt werden bzw. vorhandene Ladevorgänge auf andere Standorte verschoben werden. Je nach Suchstrategie werden durch die Reparatur zusätzliche Standorte oder höhere Kapazitätsstufen benötigt. Das Verfahren evaluiert also Kombination der folgenden beiden Vorgänge:

- **Zusätzliche Aktivitäten.** Für alle Sequenzelemente (s, i) einer Sequenz $s \in \mathcal{S}$ mit $i \in \mathcal{I}^s$ und $i \leq i_s^{Low}$, an denen $\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} = 0$ gilt, kann eine Aktivität (s, i, l) aus allen $l \in \mathcal{L}^{s,i}$ hinzugefügt werden.
- **Alternative Aktivitäten.** Für alle Sequenzelemente (s, i) einer Sequenz $s \in \mathcal{S}$ mit $i \in \mathcal{I}^s$ und $i \leq i_s^{Low}$, an denen $\sum_{l \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l} = 1$ gilt, kann die vorhandene Aktivität (s, i, l) durch eine alternative Aktivität $(s, i, l') \in A'_{s,i,l'}$ ersetzt werden.

Ausgleich ohne Kostenerhöhung

Der Ausgleich von Fehlreichweite ohne eine Erhöhung des Zielfunktionswertes ist möglich, wenn das Fahrzeug an einem oder mehreren vorherigen Sequenzelementen vorhandene Standorte nutzen kann und hierbei keine höhere Kapazitätsstufe benötigt wird. Die Menge der möglichen zusätzlichen Aktivitäten A_s^+ bestimmt sich in diesem Fall mit

$$A_s^+ = \left\{ (s, i, l) \mid i \in \mathcal{I}^s \wedge i \leq i_s^{Low} \wedge l \in \mathcal{L}^{s,i} \wedge \sum_{l' \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l'} = 0 \right. \\ \left. \wedge \forall t \in \mathcal{T}^{s,i,l} : \sum_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \cdot \sigma_{l,k} \geq \left(\sum_{(s',i') \in \mathcal{C}^{l,t}} \sum_{l' \in \mathcal{L}^{s',i'}} \tau_{s',i',l'} \right) + 1 \right\} \quad (7.6)$$

Für alle Elemente $(s, i, l) \in A_s^+$ kann sukzessive unter Berücksichtigung von Restriktion (6.8) die Variable $\tau_{s,i,l} = 1$ gesetzt werden ohne dass sich der Zielfunktionswert erhöht oder eine Kapazitätsrestriktion verletzt wird. Für vorhandene Aktivitäten (s, i, l) kann die Menge alternativer Aktivitäten $A'_{s,i,l}$ analog bestimmt werden:

$$A'_{s,i,l} = \left\{ (s', i', l') \mid (s', i') = (s, i) \wedge l' \neq l \wedge l' \in \mathcal{L}^{s,i} \wedge R_{s',i',l'} \geq R_{s,i,l} \right. \\ \left. \wedge \forall t \in \mathcal{T}^{s,i,l} : \sum_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \cdot \sigma_{l,k} \geq \left(\sum_{(s',i') \in \mathcal{C}^{l,t}} \sum_{l' \in \mathcal{L}^{s',i'}} \tau_{s',i',l'} \right) + 1 \right\} \quad (7.7)$$

Es kommen für eine Reparatur der Sequenz nur alternative Aktivitäten in Frage, bei denen die hinzugewinnbare Reichweite $R_{s,i,l}$ mindestens so hoch ist wie in der ursprünglichen Aktivität.

Ausgleich mit bereits genutzten Standorten

Der Ausgleich einer Fehlreichweite mit ausschließlich bereits genutzten Standorten kann den Zielfunktionswert erhöhen, wenn eine höhere Kapazitätsstufe benötigt wird. Die Menge der möglichen zusätzlichen Aktivitäten A_s^+ bestimmt sich in diesem Fall mit

$$A_s^+ = \left\{ (s, i, l) \mid i \in \mathcal{I}^s \wedge i \leq i_s^{Low} \wedge l \in \mathcal{L}^{s,i} \wedge \sum_{l' \in \mathcal{L}^{s,i}} \tau_{s,i,l'} = 0 \wedge \sum_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \sigma_{l,k} \geq 1 \right. \\ \left. \wedge \forall t \in \mathcal{T}^{s,i,l} : \left(\max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \right) \geq \left(\sum_{(s',i') \in \mathcal{C}^{l,t}} \sum_{l' \in \mathcal{L}^{s',i'}} \tau_{s',i',l'} \right) + 1 \right\} \quad (7.8)$$

Für vorhandene Aktivitäten (s, i, l) wird die Menge alternativer Aktivitäten $A'_{s,i,l}$ analog bestimmt mit:

$$A'_{s,i,l} = \left\{ (s', i', l') \mid (s', i') = (s, i) \wedge l' \neq l \wedge l' \in \mathcal{L}^{s,i} \wedge R_{s',i',l'} \geq R_{s,i,l} \wedge \sum_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \sigma_{l,k} \geq 1 \right. \\ \left. \wedge \forall t \in \mathcal{T}^{s',i',l'} : \left(\max_{k \in \mathcal{K}^{l'}} K_{l',k} \right) \geq \left(\sum_{((s'',i'') \in \mathcal{C}^{l',t})} \sum_{(l'' \in \mathcal{L}^{s'',i''})} \tau_{s'',i'',l''} \right) + 1 \right\} \quad (7.9)$$

Ausgleich mit zusätzlichen Standorten

Wenn eine Fehlreichweite nicht mit den beiden vorherigen Strategien behoben werden konnte, können zur Herstellung der Zulässigkeit nur zusätzliche Versorgungsstandorte verwendet werden. In diesem Fall können alle Kombinationen von vorhandenen und zusätzlichen Aktivitäten betrachtet werden.

Um die Erhöhung des Zielfunktionswerts zu begrenzen, wird dem Verfahren eine Liste zusätzlich erlaubter Standorte $\tilde{\mathcal{L}} \subseteq \mathcal{L}$ übergeben. Die Liste wird sukzessive erweitert und ein neuer Durchlauf gestartet bis eine Zulässigkeit hergestellt ist oder endgültig keine gültige Lösung gefunden werden kann. Diese Strategie wird auch von Algorithmus 12 genutzt, um die Verlagerung von Nachfrage auf neue Standorte zu prüfen.

7.7.2 Reparatur von Kapazitätsüberschreitungen

Die Verletzung von Restriktion 6.9 für einen verwendeten Standort $l \in \mathcal{L}$ entsteht im Objektmodell durch eine Überschreitung der maximal möglichen Standortkapazität $K^{Max} = \max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k}$. Die Menge der überlasteten Zeitscheiben wird bestimmt mit

$$V^l = \left\{ t \in \mathcal{T}^l \mid \sum_{(s,i) \in \mathcal{C}^{l,t}} \tau_{s,i,l} > \max_{k \in \mathcal{K}^l} K_{l,k} \right\} \quad (7.10)$$

Aus der Menge V^l lässt sich schließlich eine Teilmenge von Aktivitäten $\mathcal{A}^l \subseteq \mathcal{A}$ bestimmen, die an mindestens einer Überlastung beteiligt sind:

$$\mathcal{A}^l = \left\{ (s, i, l) \in \mathcal{A} \mid \left(\mathcal{T}^{s,i,l} \cap V^l \right) \neq \emptyset \right\} \quad (7.11)$$

Die Entfernung aller Aktivitäten $a \in \mathcal{A}^l$ führt zu $V^l = \emptyset$ und beseitigt damit die Verletzung von Restriktion (6.9) für den Standort $l \in \mathcal{L}$. Dabei kann jedoch eine Fehlreichweite in den betroffenen Sequenzen $s \in \{s \in \mathcal{S} \mid \exists (s', i', l') \in \mathcal{A}^l : l = l'\}$ entstehen.

Auswahlstrategien für Aktivitäten

Die Auswahlreihenfolge von Aktivitäten $a \in \mathcal{A}^l$ bestimmt, ab wann die Unzulässigkeit aufgehoben ist und in welchem Umfang daraus neue Fehlreichweiten in den Sequenzen auftreten. Die Funktion

$$T(s, i, l) = |\{\mathcal{T}^{s, i, l} \cap V^l\}|$$

gibt an, wie viele überlastete Zeitscheiben von einer Aktivität verwendet werden. Die Entfernung der Aktivitäten kann iterativ erfolgen, indem immer ein Element $(s, i, l) \in \mathcal{A}^l$ ausgewählt wird, für das der Wert $T(s, i, l)$ am größten ist.

Vermeidung unendlicher Zyklen

Im Reparaturzyklus kann eine Endlosschleife entstehen, wenn sich Verletzung von Restriktionen durch bestimmte Reparaturstrategien gegenseitig bedingen. Dieser Fall wird vermieden, indem die Reparaturstrategien von Fehlreichweiten niemals eine neue Verletzung von Kapazitätsgrenzen zulassen.

Algorithmus 10: DropActions

Eingabe : Aktivitäten \mathcal{A} , Sequenzen \mathcal{S} , Ordnungsfunktion $O : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$

Ausgabe: Modifizierte Aktivitätenmenge \mathcal{A}'

```

1: forall  $s \in \mathcal{S}$  do
2:    $A_s \leftarrow \{(s', i, l) \in \mathcal{A} \mid s = s'\}$ 
3:   while  $A_s \neq \emptyset$  do
4:     {Aktivität mit einem kleinsten absoluten Ordnungswert auswählen}
5:      $(s', i', l') \leftarrow a \in A_s : \forall a' \in A_s : O(a') \geq O(a)$ 
6:      $\tau_{s', i', l'} \leftarrow 0$ 
7:     if  $\text{MissingRange}(s, I_s) > 0$  then
8:        $\tau_{s', i', l'} \leftarrow 1$ 
9:        $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}' \cup \{(s', i', l')\}$ 
10:     $A_s \leftarrow A_s \setminus \{(s', i', l')\}$ 
11: return  $\mathcal{A}'$ 

```

Ausprägung des Parameters	Beschreibung
NoOrder	Die Reihenfolge der Aktivitäten wird exakt in der übergebenen Reihenfolge abgearbeitet.
ExpensiveLocationsFirst	Entfernt wird in jedem Schritt die nächste Aktivität, bei der die minimalen Kosten für die Eröffnung des verwendeten Standortes $l \in \mathcal{L}$ $O(l) = \min_{k \in \mathcal{K}} C_{l,k}$ unter allen Aktivitäten maximal sind.
LeastLiveFrequentFirst	Entfernt wird in jedem Schritt die nächste Aktivität, bei der die Anzahl der Vorkommnisse des Standortes $l \in \mathcal{L}$ in allen Aktivitäten $O(l) = \{(s, i) \mid s \in \mathcal{S} \vee i \in \mathcal{I}^s \vee l \in \mathcal{L}^{s,i} \vee \tau_{s,i,l} = 1\} $ minimal ist.
MostLiveFrequentFirst	Analog zu LeastLiveFrequentFirst wird die nächste Aktivität abgearbeitet, bei der die Anzahl der Vorkommnisse des betroffenen Standortes maximal ist.
LeastFrequentLocationsFirst	Entfernt wird in jedem Schritt die nächste Aktivität, bei der die maximal mögliche Anzahl Zuordnungen zu einem Standort $l \in \mathcal{L}$ $O(l) = \{(s, i, l) \mid s \in \mathcal{S} \vee s \in \mathcal{I}^s \vee l \in \mathcal{L}^{s,i}\} $ minimal ist.
MinimalMileageFirst	Entfernt wird in jedem Schritt die nächste Aktivität, bei der ein Fahrzeug die insgesamt geringste Reichweite ($R_{s,i,l}$) hinzugewinnen kann.
MostTimeFirst	Entfernt wird in jedem Schritt die nächste Aktivität, bei der ein Fahrzeug die insgesamt höchste Standzeit $\sum_{t \in \mathcal{T}^{s,i,l}} T_t^{Slot}$ besitzt.

Tabelle 7.3: Reihenfolgestrategien bei der Entfernung von Aktivitäten

7.8 Strategien zur Verbesserung gültiger Lösungen

Im Folgenden werden drei Verbesserungsstrategien vorgestellt, die ausgehend von der zulässigen Startlösung nach einer neuen Lösung mit einem geringeren Zielfunktionswert suchen.

7.8.1 Sukzessive Reduktion von Aktivitäten

Die Verwendung eines Ladestandortes durch ein Fahrzeug wird im Objektmodell als einzelne Aktivität $a = (s, i, l) \in A$ abgebildet (vgl. Abschnitt 7.2). Die *DropActions*-Strategie entfernt aus einer gültigen Lösung sukzessive Aktivitäten, um die Gesamtkosten so weit wie möglich zu reduzieren. In jedem Schritt wird regelbasiert eine neue Aktivität aus der Lösung ausgewählt (siehe Tabelle 7.3) und geprüft, ob durch das Entfernen die Zulässigkeit der Lösung verloren geht. Die Sortierung der Aktivität erfolgt einmal zu Beginn und wird im Laufe des Verfahrens nicht mehr geändert. Im Falle einer Unzulässigkeit wird die zuletzt entfernte Aktivität wieder zur Lösung hinzugefügt und mit der nächsten Aktivität fortgefahren.

Algorithmus 11: EliminateLocations

Eingabe : Aktivitäten \mathcal{A} , Sequenzen \mathcal{S} , Rankingfunktion $R : \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{R}$

Ausgabe: Modifizierte Aktivitätenmenge \mathcal{A}'

```

1:  $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}$ 
2:  $L \leftarrow \{l \in \mathcal{L} \mid \exists (s', i', l') \in \mathcal{A} : l' = l\}$ 
3: while  $L \neq \emptyset$  do
4:   {Standort mit dem höchsten Rankingwert auswählen}
5:    $l \leftarrow l' \in L : \forall l'' \in L : R(l') \geq R(l'')$ 
6:    $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}' \setminus \{(s', i', l') \in \mathcal{A} \mid l' = l\}$ 
7:   foreach  $s \in \mathcal{S}$  do
8:     if  $\text{MissingRange}(s, I_s) > 0$  then
9:        $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}' \cup \{(s', i', l') \in \mathcal{A} \mid l' = l\}$ 
10:     $L \leftarrow L \setminus \{l\}$ 
11: return  $\mathcal{A}'$ 

```

7.8.2 Sukzessive Elimination von Standorten

Ein Standort $l \in \mathcal{L}$ wird in einer gültigen Lösung des Optimierungsmodells genau in einer Kapazitätsstufe betrieben, wenn mindestens ein Ladevorgang an diesem Standort ausgeführt wird:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}^l} \sigma_{l,k} = 1 \Leftrightarrow \exists (s, i) \in \mathcal{S} \times \mathbb{N} : (s \in \mathcal{S} \wedge i \in \mathcal{I}^s \wedge \tau_{s,i,l} = 1) \quad \forall l \in \mathcal{L} \quad (7.12)$$

Wird ein Standort $l' \in \mathcal{L}$ aus einer gültigen Lösung entfernt, d.h. wird $\tau_{s,i,l'} = 0$ für alle $s \in \mathcal{S}$ und $i \in \mathcal{I}^s$ gesetzt, dann *kann* die Gültigkeit nach Anpassung der q -Variablen und x -Variablen durch Verletzung von Restriktion (6.6) verloren gehen. Enthält eine Lösung mehr Standorte, als im Optimum für die Versorgung der Fahrzeuge nötig ist, *kann* das Entfernen eines Standortes ohne Konsequenzen für die Gültigkeit bleiben. Der Algorithmus *EliminateLocations* nutzt diese Eigenschaft und versucht, Standorte sukzessive unter Beibehaltung der Gültigkeit zu entfernen. Dabei wird die Reihenfolge durch den a priori berechneten Rankingwert (siehe Abschnitt 7.4.1) der Standorte bestimmt.

7.8.3 Umverteilung der Ladevorgänge

Kann ein Standort nicht ohne Verletzung weiterer Restriktionen aus einer gültigen Lösung entfernt werden, gibt es zwei weitere Möglichkeiten der Umverteilung, um eine Verbesserung des Zielfunktionswertes zu erreichen:

- **Kapazitätsreduktion.** Durch Umverteilung der Ladevorgänge auf andere Standorte können Lastspitzen an Standorten reduziert werden. Nach Festlegung einer Zielkapazität wird versucht, die Aktivitäten an einem Standort soweit zu reduzieren, dass die Auslastung für die niedrigere Kapazitätsstufe gültig wird.
- **Standortverschiebung.** Als verschärfte Version der Kapazitätsreduktion kann eine vollständige Verlagerung der Ladevorgänge eines Standortes auf andere Standorte evaluiert werden. Dabei können vorhandene Standorte ausgelastet oder auch neue Standorte eröffnet werden, wenn ein Kostenvorteil entsteht.

Der Algorithmus *DemandRedistribution* zeigt die wechselseitige Umsetzung der beiden Strategien. In jedem Durchlauf wird zunächst eine Verminderung der Kapazitätsstufe aller aktiven Standorte mit dem Algorithmus *Flatten* versucht. Anschließend wird mit dem Algorithmus *Substitute* sukzessive evaluiert, ob aus der modifizierten Lösung ein aktiver Standort vollständig entfernt werden kann. Die Schleife endet, wenn in einem vollständigen Durchlauf keine weitere Verbesserung des Zielfunktionswerts mehr erzielt werden konnte.

Algorithmus 12: DemandRedistribution**Eingabe :** Aktivitäten \mathcal{A} , Anz. Standortalternativen K **Ausgabe:** Modifizierte Aktivitätenmenge \mathcal{A}'

```

1:  $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}$ 
2:  $c \leftarrow \infty$ 
3: while  $c > \text{TotalCosts}(\mathcal{A}')$  do
4:    $c \leftarrow \text{TotalCosts}(\mathcal{A}')$ 
5:   foreach  $l \in \{l \in \mathcal{L} \mid \exists (s', i', l') \in \mathcal{A}' : l' = l\}$  do
6:      $\mathcal{A}' \leftarrow \text{Flatten}(\mathcal{A}', l)$ 
7:     foreach  $l \in \{l \in \mathcal{L} \mid \exists (s', i', l') \in \mathcal{A}' : l' = l\}$  do
8:        $\mathcal{A}'' \leftarrow \text{Substitute}(\mathcal{A}', l, K)$ 
9:       if  $\text{TotalCosts}(\mathcal{A}'') < \text{TotalCosts}(\mathcal{A}')$  then
10:         $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}''$ 
11:        break
12: return  $\mathcal{A}'$ 

```

Algorithmus 13: Flatten**Eingabe :** Aktivitäten \mathcal{A} , Standort $l \in \mathcal{L}$ **Ausgabe:** Modifizierte Aktivitätenmenge \mathcal{A}'

```

1:  $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}$ 
2:  $k \leftarrow \text{DetermineCapacityLevel}(\mathcal{A}, l)$ 
3:  $\{\text{Nächste niedrigere Kapazitätsstufe auswählen}\}$ 
4:  $k^* \leftarrow \max_{k \rightarrow K_{l,k}} \{k' \in \mathcal{K}^l \mid K_{l,k'} \leq K_{l,k}\}$ 
5:  $\{\text{An der Überlastung beteiligte Aktivitäten } (\mathcal{A}^*) \text{ ermitteln}\}$ 
6:  $\mathcal{A}^* \leftarrow \emptyset$ 
7: foreach  $t \in \mathcal{T}^l$  do
8:    $\mathcal{A}^t \leftarrow \{(s, i, l) \in \mathcal{A} \mid t \in \mathcal{T}^{s,i,l}\}$ 
9:   if  $(|\mathcal{A}^t| > k^*)$  then  $\mathcal{A}^* \leftarrow \mathcal{A}^* \cup \mathcal{A}^t$ 
10: foreach  $(s, i, l) \in \mathcal{A}^*$  do
11:    $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}' \setminus \{(s, i, l)\}$ 
12:    $\mathcal{A}' \leftarrow \text{RepairSequence}(\mathcal{A}', s, \mathcal{L})$ 
13:  $\{\text{Veränderung nur bei Verbesserung}\}$ 
14: if  $\text{TotalCosts}(\mathcal{A}) > \text{TotalCosts}(\mathcal{A}')$  then return  $\mathcal{A}'$ 
15: else return  $\mathcal{A}$ 

```

Algorithmus 14: Substitute

Eingabe : Aktivitäten \mathcal{A} , Standort $l \in \mathcal{L}$, Anz. Standortalternativen K

Ausgabe: Modifizierte Aktivitätenmenge \mathcal{A}'

```

1:  $\mathcal{A}' \leftarrow \mathcal{A}$ 
2:  $\mathcal{A}^* \leftarrow \{(s', i', l') \in \mathcal{A} \mid l = l'\}$ 
3: {Über nicht verwendete Standorte iterieren}
4:  $\mathcal{L}' \leftarrow \{l \in \mathcal{L} \mid \exists (s', i', l') \in \mathcal{A} : l' = l\}$ 
5: foreach  $\mathcal{L}^* \in \{\bar{\mathcal{L}} \mid \bar{\mathcal{L}} \subseteq \mathcal{L}' \wedge |\mathcal{L}'| = K\}$  do
6:    $\mathcal{A}'' \leftarrow \mathcal{A}' \setminus \mathcal{A}^*$ 
7:   foreach  $s \in \mathcal{S}$  do
8:     if  $\text{MissingRange}(s, I_s) > 0$  then  $\mathcal{A}'' \leftarrow \text{RepairSequence}(\mathcal{A}'', s, (\mathcal{L} \setminus \mathcal{L}') \cup \mathcal{L}^*)$ 
9: {Veränderte Aktivitätenmenge zurückgeben, wenn Lösung gültig ist}
10: foreach  $s \in \mathcal{S}$  do
11:   if  $\text{MissingRange}(s, I_s) > 0$  then return  $\mathcal{A}$ 
12: return  $\mathcal{A}''$ 

```

Evaluation der Methoden

Im Rahmen dieses Kapitels werden die entwickelten Methoden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit ausgewertet. Nach der Vorstellung der Testinstanzen und der verwendeten Systemumgebung wird das Laufzeitverhalten exakter Lösungsverfahren untersucht. Anschließend werden die Lösungen der entwickelten heuristischen Methodik mit den exakten Verfahren verglichen. Das Kapitel schließt mit einer Untersuchung der Beschleunigung exakter Verfahren durch heuristische Startwerte und die Verwendung von Modellreformulierungen.

8.1 Testinstanzen

Für die verschiedenen Auswertungen der Evaluierung wurden Testinstanzen mit Praxisdaten verwendet. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl Fahrzeuge (20-150), der zeitlichen Dauer des Szenarios (4-12 Wochen) und drei verschiedener Größenordnungen des Standort-Katalogs hinsichtlich der Anzahl Standorte und Konfigurationen (S,M,L). Aus Gründen der Vertraulichkeit wird auf die Nennung von weiteren Details zur Erhebung der Flottendaten verzichtet. Tabelle 8.1 enthält die Kennzahlen.

Zur Einordnung der Größe für ein exaktes Verfahren sind zusätzlich die Anzahl der Binärvariablen $\sigma_{l,k}$ und $\tau_{s,i,l}$, der kontinuierlichen Variablen $x_{s,i}$ und $q_{s,i,l}$ sowie die Zahl der Restriktionen und Nicht-Null-Elemente in der Matrix des Basismodells enthalten. Dabei kann die Anzahl der Binärvariablen deutlich geringer sein als die Anzahl Sequenzelemente, da nicht an jeder Parkposition eines Fahrzeugs ein Standort zur Verfügung steht. Die durchschnittliche Anzahl der Zeitscheiben ist ein Indikator für die durchschnittliche Anzahl der An- und Abfahrten im Versorgungsbereich eines Standortes.

Bezeichnung	# Sequenzen	# Sequenzelemente	# Potentielle Standorte	# Konfigurationen	∅ Zeitscheiben / Standort	Zeithorizont (Tage)	# Kont. Variablen	# Bin. Variablen	# Restriktionen	# Nicht-Null-Elemente
S-04W-020V	20	1.765	39	39	46	28	2.617	921	6.250	13.669
S-04W-040V	40	3.680	43	43	81	28	5.386	1.779	12.686	27.848
S-08W-020V	20	3.478	42	42	87	56	5.293	1.857	12.772	27.851
S-08W-040V	40	7.158	44	44	161	56	10.698	3.584	25.600	56.522
S-12W-020V	20	5.308	43	43	124	84	7.971	2.706	18.838	41.061
S-12W-040V	40	10.934	45	45	258	84	16.731	5.842	41.176	91.095
M-04W-050V	50	4.653	88	176	85	28	8.353	3.912	24.252	59.942
M-04W-100V	100	9.256	91	182	186	28	17.676	8.639	54.880	145.989
M-08W-050V	50	9.052	93	186	177	56	17.252	8.386	51.791	129.638
M-08W-100V	100	18.561	94	188	364	56	35.640	17.267	110.122	291.752
M-12W-050V	50	13.822	94	188	273	84	26.636	13.002	80.307	202.159
M-12W-100V	100	28.186	96	192	540	84	54.082	26.088	166.761	442.535
L-04W-075V	75	7.038	142	426	106	28	14.472	7.904	46.268	130.658
L-04W-150V	150	13.675	147	441	212	28	29.165	15.975	97.821	298.130
L-08W-075V	75	13.851	146	438	216	56	29.556	16.143	96.039	272.638
L-08W-150V	150	27.786	165	495	444	56	64.350	37.059	221.567	688.383
L-12W-075V	75	20.941	147	441	324	84	44.737	24.237	145.186	413.361
L-12W-150V	150	42.415	155	465	647	84	92.503	50.553	311.338	943.397

Tabelle 8.1: Kennzahlen der Testinstanzen

8.2 Systemumgebung

Alle Auswertungen dieser Arbeit wurden zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit einer identischen Hardware- und Softwarekonfiguration durchgeführt. Tabelle 8.2 enthält die Parameter der Systemumgebung.

8.2.1 Anbindung der exakten Verfahren

Die Anbindung der exakten Lösungsverfahren erfolgte aus dem objektorientierten Modell (siehe Abschnitt 7.2) über eine Zwischenschicht direkt mit dem Application Programming Interface (API) der Hersteller. Die Laufzeit der Modellgenerierung war durch eine effiziente Implementierung sehr gering (< 30 Sekunden), so dass diese im Rahmen der Evaluierung vernachlässigt werden kann.

Betriebssystem	Windows 7 Professional - Service Pack 1 (64 Bit)
Prozessor	Intel® Core® 2 Quad CPU Q9550 @ 2,83 GHz
Arbeitsspeicher	8,0 GB (7,84 GB verwendbar)
Laufzeitumgebung	Visual Studio 2008/2010 Microsoft .NET Framework 3.5 / 4.0
Solver	IBM ILOG CPLEX 12.2 Gurobi Optimizer 4.6

Tabelle 8.2: Systemumgebung der Evaluierung

8.3 Laufzeitverhalten exakter Lösungsverfahren

Die in Tabelle 8.1 beschriebenen Testinstanzen wurden mit zwei verschiedenen Solvern hinsichtlich ihrer Laufzeit evaluiert. Zum Einsatz kam die in Tabelle 8.2 beschriebene Systemumgebung mit einem Zeitlimit von *4 Stunden* pro Instanz. *Set 1* und *Set 2* beinhalten Instanzen mit identischen Eigenschaften, die jedoch unterschiedliche Fahrzeugbewegungen enthalten.

Die Güte einer Lösung kann bereits im laufenden Verfahren durch Bestimmung des *Duality Gaps* gemessen werden (vgl. [SM09], S. 159). Dabei wird der Abstand zwischen dem Zielfunktionswert der besten bekannten ganzzahligen Lösung (primale Schranke) und dem Zielfunktionswert der besten bekannten relaxierten Lösung (duale Schranke) gemessen. Dieser Abstand wird üblicherweise als *relativer Gap* angegeben, d.h. im Verhältnis zur dualen Schranke. Für Minimierungsprobleme mit der oberen, primalen Schranke UB und der unteren, dualen Schranke LB gilt (vgl. [PW06], S. 92):

$$Rel. \text{ Gap} = \frac{Best \text{ } UB - Best \text{ } LB}{Best \text{ } LB} \cdot 100 \quad (8.1)$$

Das Duality Gap lässt sich also erst angeben, wenn sowohl eine obere als auch untere Schranke bestimmt werden konnte.

Die Tabellen 8.3 und 8.4 enthalten die gemessenen Ergebnisse je Testset. Pro Solver und Instanz ist jeweils das Duality Gap nach Ablauf des Zeitlimits sowie die bis dahin beste bestimmte obere (UB) und untere (LB) Schranke angegeben. t_{LB} und t_{UB} geben jeweils an, nach welcher Dauer der beste Wert bestimmt wurde. Die Färbung der Tabellen stellt einen Vergleich zwischen den Solvern dar. Identische Ergebnisse sind **gelb** markiert,

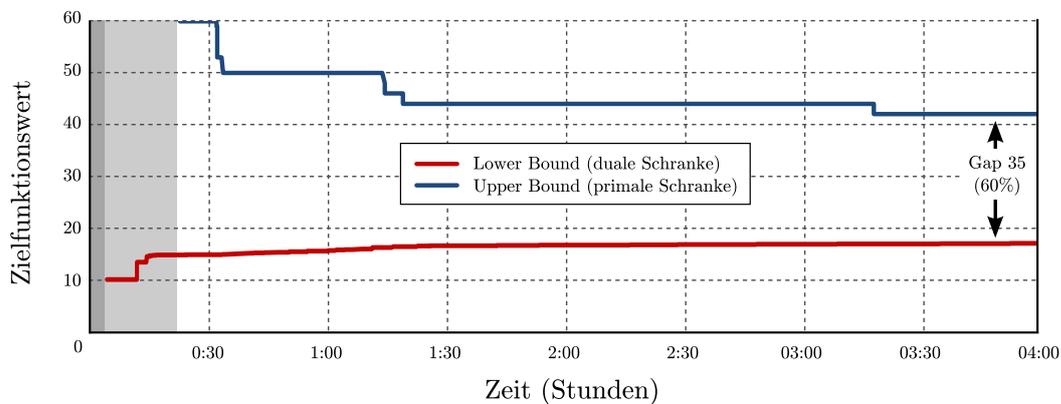


Abbildung 8.1: Zeitreihe der primalen und dualen Schranken

bessere grün und schlechtere rot. Eine unendliche obere Schranke (∞) bedeutet, dass bis zum Erreichen des Zeitlimits keine ganzzahlige Lösung gefunden werden konnte.

Für beide Testsets ergibt sich ein homogenes Bild hinsichtlich der Laufzeiteigenschaften. Die kleinen Instanzen mit 20-40 Fahrzeugen und ca. 40 potentiellen Standorten können innerhalb weniger Minuten exakt gelöst werden. Für alle mittleren und großen Instanzen kann bereits innerhalb der Zeitgrenze kein ganzzahliges Optimum mehr gefunden werden. Bei den mittleren Instanzen endet ein Durchlauf im Durchschnitt mit einem relativen Gap von 50 % (Gurobi) bzw. 56 % (CPLEX).

Abbildung 8.1 illustriert den zeitlichen Verlauf der Entwicklung von primaler und dualer Schranke für die Instanz M-08W-100V mit CPLEX. In den ersten Minuten (dunkelgrauer Bereich) wird die erste nicht-ganzzahlige Lösung bestimmt. Danach dauert es ca. 20 Minuten bis eine erste ganzzahlige Lösung gefunden werden kann (hellgrauer Bereich). Die untere Schranke steigt über den Zeitverlauf nur sehr schwach an. Nach einer Laufzeit von 4 Stunden endet der Lösungsprozess mit einem relativen Gap von 60%.

Bei den großen Testinstanzen mit praxistauglichen Problemgrößen kommen beide Solver an ihre Grenzen. CPLEX kann im Set 2 sogar für die Instanzen mit 150 Fahrzeugen innerhalb des Zeitlimits keine einzige ganzzahlige Lösung finden.

Als Nebenbeobachtung lässt sich die Performance der beiden Solver vergleichen. Gurobi dominiert dabei im Hinblick auf das Gap immer die CPLEX Lösung. Selbst wenn beide Solver eine optimale Lösung bestimmen konnten, war die Laufzeit von Gurobi insgesamt stets geringer.

Instanz	CPLEX					Gurobi				
	Gap	UB	t_{UB}	LB	t_{LB}	Gap	UB	t_{UB}	LB	t_{LB}
S-04W-020V	0,00 %	24	0:00:12	24	0:01:19	0,00 %	24	0:00:05	24	0:00:35
S-04W-040V	0,00 %	26	0:12:38	26	0:12:38	0,00 %	26	0:02:10	26	0:02:38
S-08W-020V	0,00 %	32	0:00:08	32	0:02:10	0,00 %	32	0:00:04	32	0:01:09
S-08W-040V	0,00 %	42	0:00:29	42	0:00:38	0,00 %	42	0:00:25	42	0:00:29
S-12W-020V	0,00 %	38	0:01:23	38	0:15:12	0,00 %	38	0:02:57	38	0:03:45
M-04W-050V	40,91 %	22	0:15:38	13	4:00:00	35,00 %	20	1:27:08	13	0:31:30
M-04W-100V	61,76 %	34	0:52:26	13	4:00:00	46,43 %	28	0:42:42	15	2:03:31
M-08W-050V	55,88 %	34	1:37:04	15	4:00:00	50,00 %	32	0:05:50	16	1:01:55
M-08W-100V	59,52 %	42	3:18:36	17	3:57:51	47,37 %	38	0:45:48	20	3:40:26
M-12W-050V	64,29 %	42	1:19:38	15	4:00:00	60,53 %	38	0:09:05	15	1:41:04
M-12W-100V	64,58 %	48	3:29:34	17	3:57:44	63,04 %	46	2:23:10	17	2:08:38
L-04W-075V	56,67 %	30	1:32:42	13	4:00:00	53,57 %	28	0:45:56	13	0:41:13
L-04W-150V	95,94 %	320	3:49:46	13	3:51:26	90,98 %	122	1:31:54	11	1:28:13
L-08W-075V	56,67 %	30	1:32:06	13	3:59:29	53,57 %	28	0:45:57	13	0:41:16
L-08W-150V	95,94 %	320	3:37:25	13	3:39:06	90,98 %	122	1:31:45	11	1:28:03
L-12W-075V	56,67 %	30	1:32:14	13	3:59:25	53,57 %	28	0:45:47	13	0:41:07
L-12W-150V	95,94 %	320	3:48:00	13	3:49:40	90,98 %	122	1:32:17	11	1:28:36

Tabelle 8.3: Laufzeiten exakter Verfahren (Set 1)

Instanz	CPLEX					Gurobi				
	Gap	UB	t_{UB}	LB	t_{LB}	Gap	UB	t_{UB}	LB	t_{LB}
S-04W-020V	0,00%	24	0:00:10	24	0:00:34	0,00%	24	0:00:04	24	0:00:17
S-04W-040V	0,00%	38	0:00:06	38	0:00:06	0,00%	38	0:00:07	38	0:00:05
S-08W-020V	0,00%	24	0:00:11	24	0:03:38	0,00%	24	0:00:11	24	0:01:13
S-08W-040V	0,00%	44	0:00:11	44	0:01:17	0,00%	44	0:00:06	44	0:01:15
S-12W-020V	0,00%	38	0:00:05	38	0:00:59	0,00%	38	0:00:08	38	0:00:26
M-04W-050V	34,62%	26	0:14:03	17	4:00:00	34,62%	26	0:03:28	17	1:48:40
M-04W-100V	56,67%	30	3:46:43	13	4:00:00	50,00%	28	1:16:49	14	1:35:16
M-08W-050V	46,67%	30	0:16:19	16	4:00:00	42,86%	28	0:04:11	16	1:18:19
M-08W-100V	65,22%	46	2:18:03	16	4:00:00	50,00%	40	2:53:18	20	3:04:07
M-12W-050V	57,89%	38	2:12:10	16	3:59:30	52,78%	36	0:07:27	17	2:01:00
M-12W-100V	62,07%	58	0:49:05	22	4:00:00	52,00%	50	3:50:59	24	3:03:28
L-04W-075V	62,50%	32	3:24:45	12	3:59:19	53,33%	30	0:06:31	14	1:03:10
L-04W-150V	∞	∞	0:00:00	13	3:58:46	90,20%	102	1:51:16	10	1:51:16
L-08W-075V	62,50%	32	3:25:02	12	3:59:37	53,33%	30	0:06:32	14	1:03:17
L-08W-150V	∞	∞	0:00:00	13	3:52:15	90,20%	102	1:51:17	10	1:51:17
L-12W-075V	62,50%	32	3:24:50	12	3:59:29	53,33%	30	0:06:33	14	1:03:25
L-12W-150V	∞	∞	0:00:00	13	3:57:15	90,20%	102	1:51:23	10	1:51:23

Tabelle 8.4: Laufzeiten exakter Verfahren (Set 2)

Strategie 1	RankedFullFillUp (Gewichtung siehe Abschnitt 7.4.2)
Strategie 2	EliminateLocations (Gewichtung siehe Abschnitt 7.4.2)
Strategie 3	DropActions (Auswahlstrategie LeastFrequentLocationsFirst)
Strategie 4	DemandRedistribution ($K = 2$)

Tabelle 8.5: Konfiguration der Heuristik

8.4 Laufzeitverhalten des heuristischen Verfahrens

Im folgenden Abschnitt wird die entwickelte heuristische Methodik mit den exakten Verfahren verglichen. Tabelle 8.5 zeigt die verwendete Konfiguration der Heuristik.

8.4.1 Direkter Vergleich zwischen Solver und Heuristik

Abbildung 8.2 zeigt den zeitlich parallelen Verlauf der Lösungsprozesse für vier unterschiedliche Testinstanzen. Rote Punkte beschreiben unzulässige heuristische Lösungen. Die grüne Linie verbindet alle gültigen Lösungen der Heuristik. Der graue Bereich markiert den Bereich zwischen primaler (blauer) und dualer (dunkelroter) Schranke des exakten Verfahrens. Die Zeitachse ist logarithmisch skaliert.

Mit Ausnahme der kleinen Instanzen kann das exakte Verfahren keine Instanzen innerhalb von 4 Stunden optimal lösen. In den Instanzen S-04W-020V und M-04W-050V findet die Heuristik sehr schnell eine zulässige Lösung, die durch das exakte Verfahren zu einem späteren Zeitpunkt noch leicht verbessert werden kann. Für die Instanzen M-12W-100V und L-12W-150V findet das heuristische Verfahren in kürzerer Zeit eine bessere gültige Lösung als das exakte Verfahren innerhalb des gesamten Zeitlimits.

8.4.2 Übergabe einer heuristischen Startlösung

Zur Beschleunigung des Prozesses können die exakten Lösungsverfahren mit einer zulässigen Startlösung initialisiert werden. Die Tabellen 8.6 und 8.7 vergleichen das Ergebnis nach einer Laufzeit von 4 Stunden mit und ohne Übergabe einer a priori ermittelten Startlösung. Eine bessere obere oder untere Schranke ist grün hinterlegt, analog ist eine schlechtere Schranke rot dargestellt. Identische Schranken sind gelb markiert.

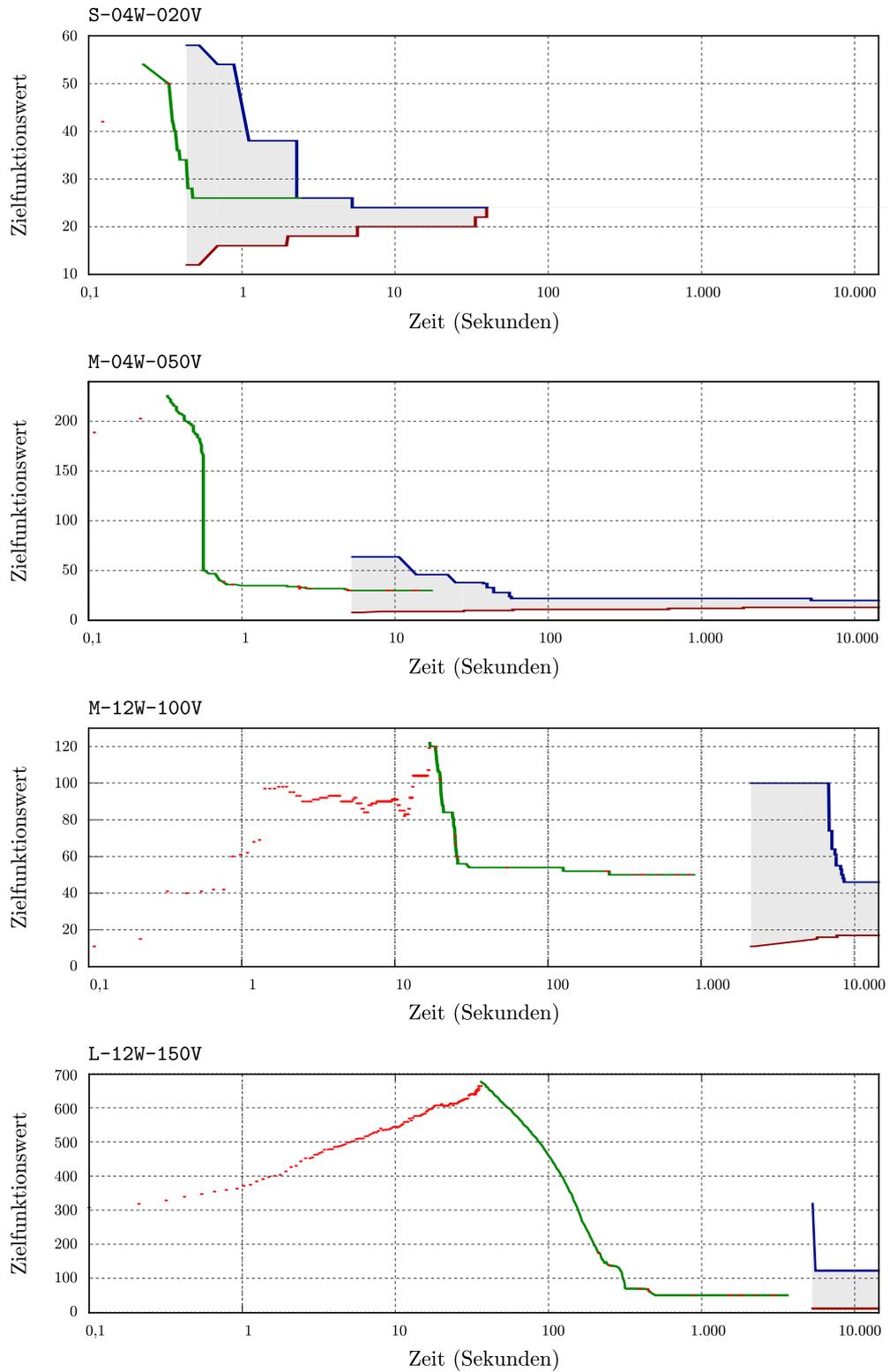


Abbildung 8.2: Vergleichszeitreihe zwischen der Heuristik und dem Solver Gurobi

Für die kleinen Instanzen ergibt sich - für beide Solver - in der Analyse kein messbarer Vorteil durch die Übergabe einer heuristische Startlösung. Insbesondere bei Gurobi wird die Gesamtdauer sogar teilweise noch geringfügig erhöht. Da die Instanzen alle optimal gelöst werden können, ergeben sich identische obere und untere Schranken.

Für die mittleren und großen Instanzen lässt sich bei CPLEX fast durchgängig eine Beschleunigung beobachten. Während die untere Schranke identisch bleibt, kann der Solver ohne Startlösung innerhalb des Zeitrahmens keinen besseren Zielfunktionswert als die heuristische Lösung bestimmen. Bei Gurobi ergibt sich kein so klares Bild wie bei CPLEX. Für die drei größten Instanzen wird durch die heuristische Startlösung eine bessere obere Schranke erreicht. In vier Fällen erreicht der Solver jedoch ohne Startlösung eine bessere obere Schranke.

8.5 Effektivität der Reformulierungen

Eine Analyse der vorgestellten Ansätze aus Abschnitt 6.8 für alle Testinstanzen soll zeigen, welche Ansätze die Laufzeit der exakten Verfahren verbessern. In Abschnitt 8.5.1 werden zunächst die Auswirkungen auf Zielfunktionswert und Lösungsdauer der LP-Relaxation untersucht. In Abschnitt 8.5.2 wird die Lösungsgüte der reformulierten Testinstanzen nach einer Laufzeit von bis zu 4 Stunden im Vergleich zum Basismodell bewertet.

8.5.1 Auswirkungen auf die Lösung der LP-Relaxation

Zu Beginn des Branch & Bound und in jedem Knoten muss die LP-Relaxation des ursprünglichen Modells mit einem LP-Solver gelöst werden. Der erste Lösungsprozess muss das relaxierte Problem vollständig lösen, je nach Methode kann für jeden Knoten ein schnellerer Warmstart verwendet werden. Die Tabellen 8.8 und 8.9 zeigen die Laufzeit ausgewählter großer Instanzen bei Anwendung der in Abschnitt 6.8 beschriebenen Modellreformulierungen. Die farblichen Hervorhebungen zeigen, ob das Ergebnis **besser**, **schlechter** oder **identisch** im Vergleich zur Lösung des Basismodells ist.

Ausschließlich die explizite Modellierung der Standortöffnung mit Binärvariablen (Abschnitt 6.8.1) führt zu einer Verbesserung der dualen Schranke. Ebenfalls wird nur in diesem Fall eine deutliche Reduzierung der Laufzeit des LP-Solvers erreicht. In allen anderen Fällen lässt sich keine deutliche Aussage treffen. Die Reformulierungen führen in

Instanz	Heuristik		Heuristik + Solver				Nur Solver			
	Dauer	ZF	UB	t _{UB}	LB	t _{LB}	UB	t _{UB}	LB	t _{LB}
S-04W-020V	0:00:05	30	24	0:00:15	24	0:03:13	24	0:00:03	24	0:03:05
S-04W-040V	0:00:21	30	26	0:05:03	26	0:13:33	26	0:08:23	26	0:08:49
S-08W-020V	0:00:45	34	32	0:01:23	32	0:11:22	32	0:00:37	32	0:14:18
S-08W-040V	0:01:05	46	42	0:00:24	42	0:03:49	42	0:00:18	42	0:03:08
S-12W-020V	0:00:27	46	38	0:07:44	38	0:37:20	38	0:01:18	38	0:18:10
M-04W-050V	0:04:00	24	20	0:00:49	13	2:42:32	20	0:04:16	13	1:55:36
M-04W-100V	0:12:45	34	34	0:00:01	14	1:12:48	30	0:11:49	14	1:28:34
M-08W-050V	0:10:39	32	32	0:00:01	15	0:58:52	32	0:06:01	15	1:27:22
M-08W-100V	0:25:00	44	44	0:00:05	18	2:24:29	40	0:41:21	18	1:55:01
M-12W-050V	0:24:47	42	34	0:12:17	16	3:59:17	36	0:17:39	15	1:33:27
M-12W-100V	1:00:01	46	46	0:00:08	18	3:56:09	42	2:32:59	19	3:59:19
L-04W-075V	0:10:34	30	28	0:07:17	13	2:31:12	28	0:07:21	13	2:46:49
L-04W-150V	0:48:27	34	34	0:00:04	13	2:12:22	34	2:18:39	12	0:29:47
L-08W-075V	0:47:56	40	40	0:00:04	15	3:14:38	38	2:32:08	14	0:11:25
L-08W-150V	1:00:01	46	46	0:00:10	11	1:30:52	121	1:35:34	11	1:31:53
L-12W-075V	1:00:01	48	42	3:25:39	15	1:24:13	46	1:09:57	15	1:05:15
L-12W-150V	1:00:01	52	52	0:00:17	11	3:07:38	115	3:12:58	11	3:12:58

Tabelle 8.6: Übergabe heuristischer Startwerte (Gurobi)

Instanz	Heuristik		Heuristik + Solver				Nur Solver			
	Dauer	ZF	UB	t _{UB}	LB	t _{LB}	UB	t _{UB}	LB	t _{LB}
S-04W-020V	0:00:11	30	24	0:01:16	24	0:03:57	24	0:00:06	24	0:05:00
S-04W-040V	0:00:20	30	26	0:07:01	26	0:11:35	26	0:04:33	26	0:12:04
S-08W-020V	0:00:46	34	32	0:00:19	32	0:03:31	32	0:01:57	32	0:04:40
S-08W-040V	0:01:03	46	42	0:00:25	42	0:00:33	42	0:01:02	42	0:01:03
S-12W-020V	0:00:28	46	38	0:31:43	38	0:32:19	38	0:33:52	38	0:34:30
M-04W-050V	0:03:52	24	22	0:32:57	13	3:59:57	22	1:17:57	13	3:59:57
M-04W-100V	0:12:58	34	32	1:25:42	12	3:58:28	34	3:37:22	13	3:58:57
M-08W-050V	0:10:28	32	32	0:00:15	15	3:59:43	36	0:44:23	15	3:59:54
M-08W-100V	0:24:46	44	44	0:04:12	17	3:58:07	46	1:16:44	17	3:59:46
M-12W-050V	0:24:46	42	42	0:00:39	14	3:58:10	40	0:31:06	14	3:58:46
M-12W-100V	1:00:01	46	46	0:02:35	16	3:52:19	58	1:27:55	16	3:55:46
L-04W-075V	0:10:20	30	30	0:00:20	13	3:59:45	34	3:41:44	13	3:59:24
L-04W-150V	0:46:43	34	34	0:03:18	12	0:12:33	56	2:04:09	12	1:35:41
L-08W-075V	0:48:36	40	40	0:02:33	14	3:56:41	52	3:40:29	14	3:48:31
L-08W-150V	1:00:01	46	46	0:40:52	13	3:20:45	320	3:19:34	13	3:21:14
L-12W-075V	1:00:01	48	48	0:06:52	14	3:37:49	54	2:00:16	14	3:51:14
L-12W-150V	1:00:01	52	52	1:42:30	11	1:42:30	-	-	-	-

Tabelle 8.7: Übergabe heuristischer Startwerte (CPLEX)

Variante	L-04W-075V		L-04W-150V		L-08W-075V		L-08W-150V		L-12W-075V	
	ZF	Dauer								
Basis	8,47	0:00:20	8,80	0:03:17	9,92	0:02:31	10,11	0:41:00	10,60	0:06:53
Ref. 6.8.1	10,02	0:00:06	10,94	0:01:36	12,17	0:00:47	12,44	0:27:00	12,89	0:01:44
Ref. 6.8.2	8,47	0:00:14	8,80	0:03:09	9,92	0:03:05	10,11	0:40:47	10,60	0:06:13
Ref. 6.8.3	8,47	0:00:16	8,80	0:04:04	9,92	0:02:39	10,11	0:38:00	10,60	0:05:52
Ref. 6.8.4	8,47	0:00:18	8,80	0:04:15	9,92	0:03:43	10,11	1:54:16	10,60	0:08:44
Ref. 6.8.5	8,47	0:00:10	8,80	0:02:53	9,92	0:01:56	10,11	0:11:05	10,60	0:03:43
Ref. 6.8.6	8,47	0:00:19	8,80	0:03:40	9,92	0:02:50	10,11	0:47:58	10,60	0:05:09
Ref. 6.8.7	8,47	0:00:16	8,80	0:02:45	9,92	0:03:11	10,11	0:41:02	10,60	0:06:00
Ref. 6.8.8	8,47	0:00:14	8,80	0:02:32	9,92	0:02:35	10,11	0:59:11	10,60	0:06:27

Tabelle 8.8: Lösung der LP-Relaxation (CPLEX)

Variante	L-04W-075V		L-04W-150V		L-08W-075V		L-08W-150V		L-12W-075V	
	ZF	Dauer								
Basis	8,47	0:00:14	8,80	0:07:41	9,92	0:03:09	10,11	1:22:28	10,60	0:07:50
Ref. 6.8.1	10,02	0:00:05	10,94	0:01:33	12,17	0:00:22	12,44	0:20:42	12,89	0:00:42
Ref. 6.8.2	8,47	0:00:19	8,80	0:08:03	9,92	0:03:23	10,11	1:24:50	10,60	0:07:46
Ref. 6.8.3	8,47	0:00:16	8,80	0:07:55	9,92	0:03:33	10,11	1:23:06	10,60	0:06:39
Ref. 6.8.4	8,47	0:00:17	8,80	0:07:13	9,92	0:02:48	10,11	1:21:43	10,60	0:09:00
Ref. 6.8.5	8,47	0:00:16	8,80	0:07:54	9,92	0:03:42	10,11	1:21:50	10,60	0:09:56
Ref. 6.8.6	8,47	0:00:17	8,80	0:07:44	9,92	0:03:41	10,11	1:23:12	10,60	0:10:52
Ref. 6.8.7	8,47	0:00:16	8,80	0:07:41	9,92	0:03:11	10,11	1:20:26	10,60	0:08:45
Ref. 6.8.8	8,47	0:00:22	8,80	0:10:59	9,92	0:05:11	10,11	2:10:27	10,60	0:12:02

Tabelle 8.9: Lösung der LP-Relaxation (Gurobi)

Abhängigkeit von Solver und Instanz zu keinen signifikanten Verbesserungen von Laufzeit oder gefundener Schranke. Die Reformulierung 6.8.5 (Begrenzung hinzugewinnbarer Reichweite) führt nur bei CPLEX zu keiner besseren Schranke, allerdings wird die Laufzeit des LP-Solvers deutlich reduziert. Als Nebenergebnis kann festgestellt werden, dass der LP-Solver von CPLEX den optimalen Zielfunktionswert meist schneller als Gurobi ermitteln konnte.

8.5.2 Direkter Vergleich

Zum direkten Vergleich aller Reformulierungen \mathcal{R} mit dem Basismodell wurden die Solver $\mathcal{S} = \{\text{CPLEX}, \text{Gurobi}\}$ für jede Variante mit einem Zeitlimit von 4 Stunden gestartet. Nach Ablauf der Zeit wurden die erreichten Schranken jeder Lösung für Reformulierung $r \in \mathcal{R}$ mit Solver $s \in \mathcal{S}$ sowie die dafür benötigten Laufzeiten verglichen.

Konstanten

$UB_{s,r}$	Beste untere (duale) Schranke für Reformulierung r mit Solver s .
$LB_{s,r}$	Beste obere (primale) Schranke für Reformulierung r mit Solver s .
$t_{s,r}^{UB}$	Dauer des Lösungsvorgangs bis zum Finden von $UB_{s,r}$.
$t_{s,r}^{LB}$	Dauer des Lösungsvorgangs bis zum Finden von $LB_{s,r}$.
ε	Toleranzwert (in Sekunden). Laufzeiten werden als identisch betrachtet, wenn sie sich nicht um mehr als ε Sekunden unterscheiden.

Eine Reformulierung r_1 heißt *besser* als eine Reformulierung r_2 , wenn mindestens eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

$$UB_{s,r_1} < UB_{s,r_2} \quad (8.2)$$

$$UB_{s,r_1} = UB_{s,r_2} \wedge t_{s,r_1}^{UB} < t_{s,r_2}^{UB} - \varepsilon \quad (8.3)$$

$$UB_{s,r_1} = UB_{s,r_2} \wedge |t_{s,r_1}^{UB} - t_{s,r_2}^{UB}| \leq \varepsilon \wedge LB_{s,r_1} > LB_{s,r_2} \quad (8.4)$$

$$UB_{s,r_1} = UB_{s,r_2} \wedge |t_{s,r_1}^{UB} - t_{s,r_2}^{UB}| \leq \varepsilon \wedge LB_{s,r_1} = LB_{s,r_2} \wedge t_{s,r_1}^{LB} < t_{s,r_2}^{LB} - \varepsilon \quad (8.5)$$

Zwei Formulierungen gelten als gleichwertig, wenn gilt

$$UB_{s,r_1} = UB_{s,r_2} \wedge |t_{s,r_1}^{UB} - t_{s,r_2}^{UB}| \leq \varepsilon \wedge LB_{s,r_1} = LB_{s,r_2} \wedge |t_{s,r_1}^{LB} - t_{s,r_2}^{LB}| \leq \varepsilon \quad (8.6)$$

Variante	CPLEX						Gurobi					
Ref. 6.8.1	S1	M1	M2	L2	S2	L1	M1	L1	S2	S1	M2	L2
Ref. 6.8.2	S1	L2	S2	M1	M2	L1	S2	L1	L2	S1	M1	M2
Ref. 6.8.3	S1	L1	L2	S2	M1	M2	S2	L1	L2	S1	M1	M2
Ref. 6.8.4	M2	S2	S1	M1	L1	L2	M1	L1	L2	S2	S1	M2
Ref. 6.8.5	S1	S2	L2	M1	M2	L1	S2	M1	S1	M2	L1	L2
Ref. 6.8.6	M2	L2	S1	S2	M1	L1	S2	M1	L1	S1	M2	L2
Ref. 6.8.7	S1	S2	L2	M1	M2	L1	S2	M1	L1	L2	S1	M2
Ref. 6.8.8	L2	S1	S2	M1	M2	L1	M1	L1	S2	S1	M2	L2

Tabelle 8.10: Veränderungen durch Reformulierungen

Tabelle 8.10 zeigt die Veränderungen für die sechs Testinstanzen S1 (S-04W-020V), S2 (S-08W-040V), M1 (M-04W-050V), M2 (M-08W-100V), L1 (L-04W-075V) und L2 (L-08W-150V). Eine bessere Reformulierung als das Basismodell ist grün markiert, identische Ergebnisse im Sinne von Bedingung (8.6) sind gelb gefärbt. Rote Einträge zeigen an, dass keine der Bedingungen (8.2)-(8.6) erfüllt war. Für die Auswertung wurde $\epsilon = 10$ Sekunden gewählt.

Zusammenfassend lässt sich beobachten, dass keine Reformulierung für alle Instanzgrößen durchgängig bessere Laufzeiten oder Schranken liefert. Insbesondere die durch Reformulierung 6.8.1 verbesserte Root Relaxation führt über das Zeitlimit von 4 Stunden nicht gleichzeitig zu einer Verbesserung des Gesamtergebnisses.

8.6 Vergleich mit Partial Set Covering

Das *Partial Set Covering Problem* (PSCP) ist eine häufig eingesetzte Abstraktion für räumliche Abdeckungsprobleme in der Praxis (vgl. Abschnitt 3.4.2 und [Ann03]). Im Einsatz für Instanzen des vorgestellten Planungsproblems lässt sich mit dem PSCP eine minimal benötigte Anzahl Standorte bestimmen, die zur Abdeckung einer vorgegebenen Mindestquote von Parkvorgängen benötigt werden⁴⁴. Dabei müssen die Bewegungen der Fahrzeuge, die Kapazitätsbeschränkungen der Standorte, die unterschiedlichen Kosten und die Standzeit der Fahrzeuge vernachlässigt werden.

Abbildung 8.3 zeigt eine Sensitivitätsanalyse des PSCP für eine Praxisinstanz mit 40 Fahrzeugen und einer Dauer von 12 Wochen. Die Mindestabdeckungsquote (in Prozent

⁴⁴ Ein Parkvorgang gilt als abgedeckt, wenn sich mindestens ein Versorgungsstandort in maximal 250 Metern Abstand befindet. Jede Parkposition ist ein potentieller Standort.

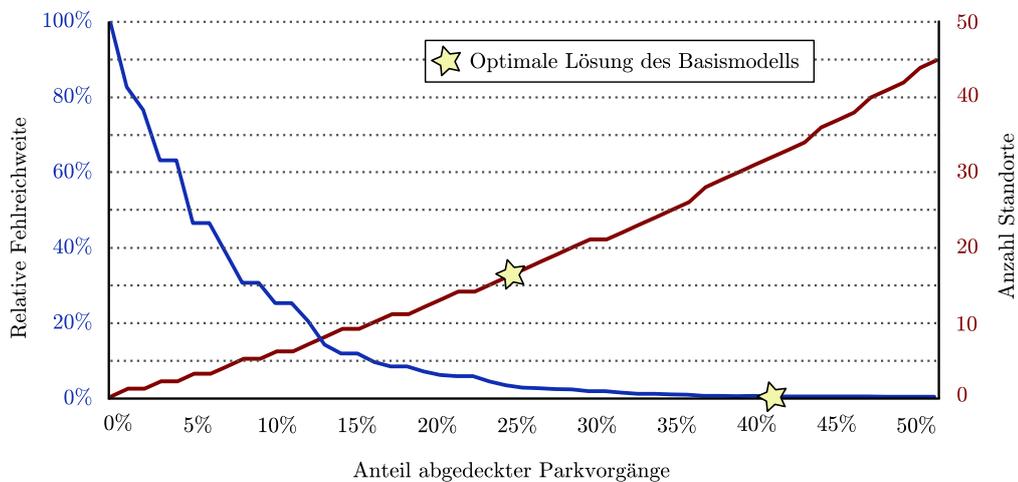


Abbildung 8.3: Sensitivitätsanalyse PSCP

auf der X-Achse) wurde von 0% bis 50% in Einzelschritten variiert und die optimale Lösung (minimal benötigte Anzahl Standorte) auf der rechten Y-Achse abgetragen. Das jeweilige Ergebnis wurde in das Basismodell mit Fehlreichweiten übertragen. Dabei wurden die Standorte mit unbegrenzter Kapazität fixiert und die gesamte Fehlreichweite auf der linken Y-Achse abgetragen. Die optimale Lösung des Basismodells (16 Standorte ohne Fehlreichweite) ist für beide Kennzahlen eingezeichnet.

Die Bestimmung der Fehlreichweite erlaubt auf diese Weise eine Evaluierung der Versorgungsqualität bei einer vorgegebenen minimalen Abdeckungsquote. Im vorliegenden Fall wird erst ab einer Abdeckungsquote von 42% die Fehlreichweite durch 32 Standorte vollständig eliminiert. Das Basismodell benötigt - selbst bei Vernachlässigung der unterschiedlichen Kosten und Kapazitäten - durch die explizite Berücksichtigung der Fahrzeugbewegungen nur die Hälfte der Standorte, um diese Versorgungsqualität zu erreichen.

8.7 Laufzeitverhalten der Simulation

Die Laufzeit der entwickelten Simulationsumgebung ist so gering, dass eine detaillierte Betrachtung entfallen kann. Für alle Testinstanzen lassen sich die Simulationsläufe innerhalb weniger Sekunden durchführen. Sowohl die Generierung der Zufallszahlen als auch die Dauer der mathematischen Operationen sind keine zeitkritischen Faktoren. Der Bedarf an Arbeitsspeicher für die Funktionen und Variablen ist ebenfalls für heutige Computersysteme unproblematisch.

Fallstudie zur Umsetzung der Planungsmethode für ein Mobilitätskonzept

Die folgende Fallstudie beschreibt die Umsetzung des vorgestellten Planungssystems (vgl. Abschnitt 4.3) für einen gewerblichen Anbieter von Mobilitätsdienstleistungen. Die entwickelten Methoden wurden in einem realen Planungsprojekt eingesetzt, um die Praktikabilität zu demonstrieren. Die Vorgehensweise ist im Folgenden zusammenfassend dokumentiert, aus Gründen der Vertraulichkeit wird auf die Nennung absoluter Zahlen verzichtet.

9.1 Umfeld und Zielsetzung

Ausgangspunkt der Betrachtung ist die Flotte eines Mobilitätsanbieters nach einem erweiterten Car Sharing Prinzip (vgl. Abschnitt 2.1.1) in zwei Großstädten. Der Anbieter besitzt einen homogenen Bestand technisch identischer Fahrzeuge mit gleichen Leistungs- und Verbrauchswerten. Die Kunden des Anbieters können freie Fahrzeuge jederzeit und überall im Geschäftsgebiet anmieten ohne sich vorher auf Kilometerleistung, Aktionsradius oder Nutzungsdauer festlegen zu müssen. Die Abrechnung erfolgt nach einem festgelegten Kostensatz in Abhängigkeit von Mietdauer und zurückgelegter Gesamtdistanz. Der Nutzer identifiziert sich am Fahrzeug gegenüber dem Anbieter mit einem Identifikationsmerkmal (RFID) am Führerschein. Das Unternehmen stellt sicher, dass die Fahrzeuge bedarfsgerecht gereinigt, gewartet und betankt werden.

Zum Planungszeitpunkt hatte der Mobilitätsanbieter bereits langjährig Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor im Einsatz und wollte nun zusätzlich batterieelektrische Fahrzeuge einsetzen. Im designierten Geschäftsgebiet existierte allerdings keinerlei öffentliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Der Anbieter musste somit die Bereitstellung neuer, exklusiv verfügbarer Ladestandorte für seine Fahrzeuge ebenfalls selbst planen und umsetzen. Neben der Eröffnung unternehmenspolitisch motivierter Ladestandorte kamen grundsätzlich neue potentielle Standorte im gesamten Geschäftsgebiet in Frage. Der Anbieter verfügte bereits über einen manuell erstellten Plan, hatte jedoch keine Möglichkeit, diesen hinsichtlich der erreichbaren Versorgungsqualität zu bewerten.

Ziel der Studie war eine fundierte Empfehlung über die Auslegung der Ladeinfrastruktur im Planungsgebiet hinsichtlich Standortpositionen und Betriebskapazitäten. Neben der Absicherung der Realisierbarkeit des neuen Konzepts mit Elektrofahrzeugen sollte eine kostenminimierte Versorgungsqualität (vgl. Abschnitt 3.5.1) erreicht werden. Die aus der Planung abgeleiteten Kosten für Aufbau und Betrieb der Versorgungsstandorte führten nachgelagert zu einer Neubewertung der Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde schließlich die Sensitivität der Ladeinfrastrukturkosten in Abhängigkeit von der Flottengröße bestimmt. Als Nebenbeobachtung konnte außerdem die Auswirkung eines alternativen Betriebskonzepts quantifiziert werden, bei dem die Fahrzeuge bei jedem Parkvorgang an einem Ladeplatz abgestellt werden müssen.

9.2 Bestimmung der Planungsparameter

Vor dem Einsatz der entwickelten Simulations- und Optimierungsmethoden wurden die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorbereitungsschritte durchgeführt. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Festlegung der Prämissen, die Ermittlung der Bewegungsszenarien sowie die Entwicklung eines Standort-Katalogs.

9.2.1 Prämissen und Verhaltenshypothesen

Im Rahmen der Simulation muss zur Abbildung der Interaktion von Fahrzeugnutzern und Ladeinfrastruktur eine Verhaltenshypothese aufgestellt werden. Zunächst war eine realistische Annahme über die Ladeabsicht in Abhängigkeit vom Füllstand des Fahrzeugs zu treffen (vgl. Abbildung 5.2). Weiterhin musste eine zumutbare Entfernung zwischen

Fahrtziel und Ladestandort festgelegt werden, um den Versorgungsbereich der Standorte (vgl. Abbildung 2.8) zu definieren.

Ähnlich wie in der Bestimmung von Einzugsbereichen öffentlicher Verkehrsmittel (vgl. [Rei12], S. 444) wurde von einer mittleren Fußgeschwindigkeit von 4 km/h ausgegangen. Bei einem Umwegefaktor von 1,3 (siehe Abschnitt 3.4.1) dürfen zwischen Fahrtziel und Ladestandort maximal 250 Meter Luftlinie liegen, um das Ziel in weniger als 5 Minuten erreichen zu können. Bei Annahme einer Gleichverteilung liegt damit der durchschnittliche Weg zum Ladestandort bei ca. 2,3 Minuten.

Für die Wahrscheinlichkeit einer Ladeentscheidung in Abhängigkeit vom SOC des Fahrzeugs wurde folgendes Verhalten unterstellt: Bei einem SOC unter 30% wird der Nutzer auf jeden Fall einen Ladestandort aufsuchen, wenn sich das Fahrzeug im Versorgungsbereich eines Standortes befindet. Ansonsten wird ein Ladestandort mit der Wahrscheinlichkeit umgekehrt proportional zum Ladefüllstand aufgesucht:

$$P(\text{Ladeentscheidung}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } SOC \leq 0,3, \\ \frac{1-SOC}{0,7} & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Anzahl der Flottenfahrzeuge ist ein exogener Parameter der vorgestellten Methoden. Im Rahmen der Untersuchung wurden unterschiedliche Flottengrößen betrachtet, um die Skalierung der Ladeinfrastruktur in Abhängigkeit von der Fahrzeuganzahl zu analysieren. Ausgehend von der ursprünglichen Fahrzeuganzahl wurden jeweils Szenarien mit einem BEV-Anteil von 10%, 25%, 50%, 75% und 100% betrachtet.

Der Mobilitätsanbieter betreibt eine vollständig homogene Flotte und möchte dieses Konzept für die einzusetzenden Elektrofahrzeuge beibehalten. Für die realisierbare Gesamtreichweite aller Fahrzeuge wurde ein Wert von 120 km angesetzt. Die mittels linearer Regression ermittelte Ladekurve (vgl. Abschnitt 6.2.3) ergab eine mittlere Ladeleistung von 18 Kilometern zusätzlicher Reichweite pro voller Stunde am Ladeplatz. Dieser Wert wurde einheitlich für alle Ladestandorte und Fahrzeuge angenommen.

9.2.2 Ableitung von Szenarien aus den Fahrzeugbewegungen

Im Vorfeld der Studie sind alle Fahrzeugbewegungen über viele Monate hinweg aufgezeichnet worden. Dabei spielten die tatsächlichen Routen der Fahrzeuge keine Rolle, da

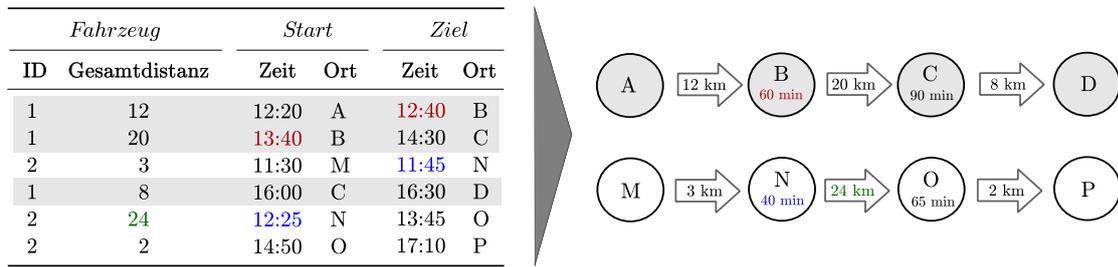


Abbildung 9.1: Illustration der Sequenz-Generierung aus Rohdaten

ein Aufladen der Fahrzeugbatterien nur am Start- oder Zielort in Frage kommt. Aufgezeichnet wurden Ort und Dauer der Parkvorgänge sowie die zurückgelegte Gesamtdistanz zwischen zwei Parkvorgängen. Für jedes Fahrzeug ergab sich dabei eine Sequenz aus abwechselnden Park- und Mietvorgängen (vgl. Abschnitt 6.3.1).

Die vorliegenden Rohdaten wurden zunächst nach Fahrzeug-ID gruppiert und jeweils nach dem Zeitpunkt der Abfahrt aufsteigend sortiert. Der Zielort eines Datensatzes entspricht dabei immer dem Startort des nachfolgenden Datensatzes und ist somit auch gleichzeitig Parkposition. Die Parkdauer ergab sich aus der Differenz zwischen Ziel- und Abfahrtszeit der beiden Datensätze (vgl. Abbildung 9.1). Etwa 2 % der aufgezeichneten Fahrten wurden aus den Quelldaten entfernt, da sie eine Gesamtdistanz aufwiesen, welche die Kapazität eines Elektrofahrzeugs ohne zwischenzeitlichen Ladevorgang überschritt.

Zur Klassifizierung wurde der Flächennutzungsplan des Geschäftsgebiets⁴⁵ sowie zusätzlich Bereiche mit flotteneigenen Parkplätzen herangezogen. Somit konnte jede Parkposition genau einem Gebiet und damit einer Gebietskategorie zugeordnet werden. Auf Basis dieser Flächenklassifizierung bestimmen sich die Häufigkeitsverteilungen für das Mobilitätsmodell (vgl. Abschnitt 5.3.2). Die Verteilungen wiesen eine durchgängig signifikante paarweise Ähnlichkeit über mehrere getrennte Zeiträume auf.

Auf Basis der so ermittelten diskreten Häufigkeitsverteilungen und den in Abschnitt 9.2.1 beschriebenen Prämissen konnten nach der in Abschnitt 5.3.5 beschriebenen Methode jeweils 9 Bewegungsszenarien über einen Zeitraum von 12 Wochen pro untersuchter Flottengröße generiert werden. Weiterhin wurde jeweils eine ausgewählte Teilmenge der Vergangenheitsdaten als weiteres Szenario berücksichtigt. Für die vier betrachteten Flottengrößen entstanden somit insgesamt 50 Szenarien.

⁴⁵ Alle relevanten Bereiche mit Parkmöglichkeit wurden nach der Gebietseinteilung des Plans in die Kategorien *Wohngebiet*, *Gewerbefläche*, *Mischfläche*, *Industriegebiet*, *Gemeinbedarfsfläche*, *Sonderbaufläche* und *Grünfläche* eingeteilt.



Abbildung 9.2: Standortkatalog via Partial Set Covering (Skizze)
(95% Abdeckung, 12 potentielle Standorte)

9.2.3 Entwicklung des Standort-Katalogs

Im vorliegenden Fall waren einige wenige designierte Standorte benannt worden, an denen aus strategischen Überlegungen heraus in jedem Fall Ladeplätze installiert werden sollten. Der Mobilitätsanbieter musste also für das restliche Gebiet neue potentielle Standorte identifizieren und hinsichtlich ihrer Kosten bewerten (lassen), bevor ein Optimierungssystem eine kostenminimale Auswahl treffen konnte.

Die Auswahl dieser potentiellen Standorte orientierte sich an den in der Vergangenheit beobachteten Parkpositionen der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 2.3.4). Je mehr Parkvorgänge im Versorgungsbereich eines Standortes liegen, umso häufiger können die Flottenfahrzeuge bei ausreichend verfügbarer Kapazität versorgt werden. Als Nebeneffekt fördert eine hohe Abdeckung über den Zeitverlauf auch eine höhere Auslastung eines Standortes. Für die vorliegenden Quelldaten konnte davon ausgegangen werden, dass der zur Verfügung stehenden Parkraum für alle Fahrzeuge erschöpfend enthalten war.

Für den Mobilitätsanbieter kam grundsätzlich jede Parkposition der Flottenfahrzeuge auch als potentieller Ladestandort in Frage. Für das betrachtete Stadtgebiet war davon auszugehen, dass ein Parkplatz direkt oder in unmittelbarer Nähe zu einem Ladestandort ausgebaut werden konnte. Der automatisch erzeugte Standortkatalog wurde vor Durchführung einer Optimierung manuell geprüft und geringfügig nachbearbeitet, um

die Umsetzbarkeit der Standortvorschläge, insbesondere im Hinblick auf die verfügbaren Kapazitäten, zu gewährleisten.

Ausgehend von den aufgezeichneten Parkvorgängen sollte eine möglichst kleine Anzahl von Standorten ausgewählt werden, um eine festgelegte Abdeckung aller Parkpositionen zu erreichen. Die Kostenbewertung der Standorte durch den Infrastruktur-Provider und der sich daraus ergebende Kostensatz für die exklusive Bereitstellung wurden im ersten Schritt vernachlässigt. Dieser Sachverhalt lässt sich als Optimierungsmodell formulieren und ist in der Literatur unter dem Namen PSCP bekannt (vgl. [DO99], S. 221). Erweitert um das Gebot und Verbot einer Standorteröffnung ist eine Formulierung dieses Sachverhalts als binäres Programm möglich. Abbildung 9.2 illustriert eine Lösung, bei der eine gegebene Menge von Parkpositionen zu 95% abgedeckt wird, wobei mindestens 12 Standorte benötigt werden. Das verwendete Optimierungsmodell ist im Folgenden dokumentiert.

Mengen

\mathcal{P}	Menge aller Punkte (Koordinaten der Parkpositionen) $\mathcal{P} = \mathcal{P}^F \cup \mathcal{P}^D, \mathcal{P}^F \cap \mathcal{P}^D = \emptyset$
$\mathcal{P}^F \subseteq \mathcal{P}$	Menge aller Positionen, an denen ein Standort eröffnet wird
$\mathcal{P}^D \subseteq \mathcal{P}$	Menge aller Positionen, an denen kein Standort eröffnet werden darf
$\mathcal{C}^p \subseteq \mathcal{P}$	Menge aller Punkte, von denen der Punkt $p \in \mathcal{P}$ abgedeckt werden kann $\mathcal{C}^p = \{p' \in \mathcal{P} \mid d_{p,p'} \leq D\}$

Parameter

$d_{i,j}$	Distanz zwischen einer Position $i \in \mathcal{P}$ und $j \in \mathcal{P}$
D	Maximale Distanz zwischen Fahrzeugposition und Ladestandort
w_i	Gewichtswert, der pro Parkposition für die Berechnung der absoluten Abdeckung verwendet wird (z.B. für die Berücksichtigung der Parkdauer)
C	Minimal geforderte Abdeckung in Prozent ($0 \leq C \leq 1$)

Variablen

x_p	Auswahlentscheidung von Punkt $p \in \mathcal{P}$
y_p	Indikatorvariable für die fehlende Abdeckung von Punkt $p \in \mathcal{P}$ durch mindestens einen Standort

MIP Formulierung

$$\min \sum_{p \in \mathcal{P}} x_p \quad (9.1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{p \in \mathcal{P}} (w_p \cdot y_p) \leq C \cdot \sum_{p \in \mathcal{P}} w_p \quad (9.2)$$

$$\sum_{p' \in \mathcal{C}^p} x_{p'} \geq 1 - y_p \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.3)$$

$$x_p = 1 \quad \forall p \in \mathcal{P}^F \quad (9.4)$$

$$x_p = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P}^D \quad (9.5)$$

$$x_p, y_p \in \{0, 1\} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (9.6)$$

Abdeckung von Parkvorgängen durch Ladestandorte

Mit dem zuvor beschriebenen Optimierungsmodell ließ sich ein minimaler Standort-Katalog für zwei unterschiedliche Städte bestimmen, der jeweils alle beobachteten Parkpositionen abdecken konnte. Mit einer Messreihe über alle möglichen Gesamtkapazitäten wurde der Zusammenhang zwischen Standortanzahl und dem sich daraus ergebenden maximalen Anteil abgedeckter Parkpositionen ermittelt. Vernachlässigt wurden hierbei die Kapazitäten der Standorte und die gefahrenen Distanzen der Fahrzeuge. Zur Quantifizierung der Abdeckung wurden einmal der relative Anteil an allen Parkvorgängen (Vorgänge in Versorgungsbereichen) und einmal der relative Anteil an der Gesamtparkdauer aller Fahrzeuge (Parkminuten in Versorgungsbereichen) angesetzt.

Abbildung 9.3 zeigt die Ergebnisse der Optimierungsläufe. Dargestellt sind jeweils der Anteil abgedeckter Parkvorgänge und der dafür minimal benötigte Anteil aller potentiellen Standorte. Der Verlauf der Messreihe ist für beide Städte trotz unterschiedlicher Zeiträume sehr ähnlich. Deutlich ist erkennbar, dass die letzten 5 Prozent der Parkpositionen zu einer fast doppelt so hohen Anzahl benötigter Standorte führen. Es handelt sich dabei um Ausreißer, d.h. sehr seltene Parkpositionen an abgelegenen Orten.

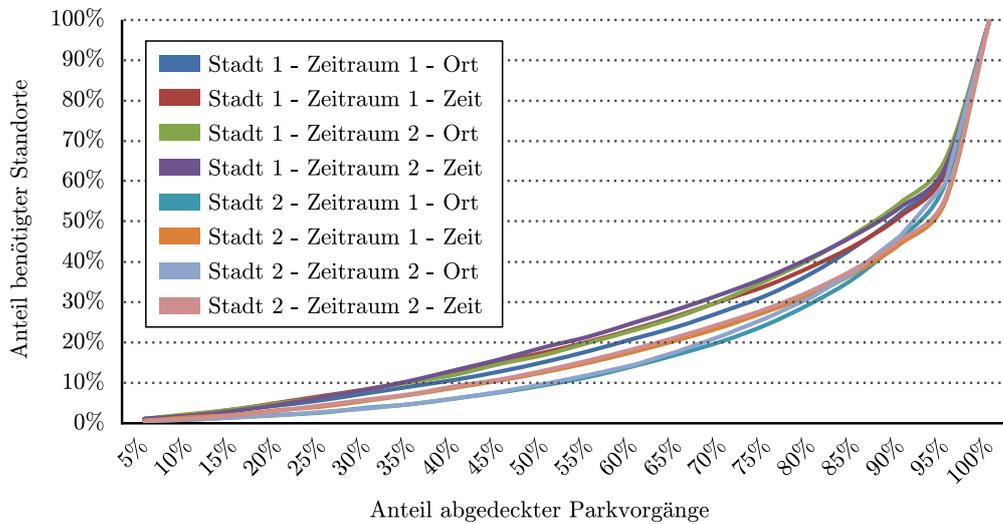


Abbildung 9.3: Abdeckung von Parkvorgängen durch Ladestandorte
(2 Städte, 2 Zeiträume, Berechnung über Anzahl und Dauer)

Im Ergebnis wurde für die folgende Planung ein Standortkatalog entwickelt, der **95%** aller Parkvorgänge abdecken konnte.

Bewertung der Standorte

Im nächsten Schritt erfolgte eine Kostenbewertung aller potentiellen Ladestandorte. Dafür wurden zunächst gültige Ausbaustufen festgelegt, die für jeden Standort in Betracht gezogen werden konnten. Aus den Bewegungsdaten ließ sich für jeden Standort bestimmen, welche Anzahl von Fahrzeugen sich maximal zeitlich parallel im Versorgungsbereich befand. Aus strategischen Überlegungen heraus wurde teilweise auch eine höhere Maximalkapazität betrachtet, wenn davon ausgegangen werden konnte, dass eine Auslastung der Ladeplätze im operativen Betrieb erreicht werden konnte.

Die Kostenplanung jeder Kapazitätsstufe muss unterschiedliche Aspekte berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Auf Basis der benötigten elektrischen Anschlussleistung konnten die Erschließungskosten jeder Kapazitätsstufe kalkuliert werden. Mit Methoden der Investitionsplanung wurde aus den Investitions-, Installations- und antizipierten Betriebskosten eine laufzeitabhängige Kostenkennzahl bestimmt (vgl. Abschnitt 2.3.3), die einen quantitativen Vergleich der Kapazitätsstufen aller Standorte ermöglichte. Die Kennzahl quantifizierte den jeweiligen Kostenaufwand des Flotten-Betreibers und besaß damit den Charakter eines Preises für die exklusive Nutzung einer Standortkapazität durch die batterieelektrischen Fahrzeuge.

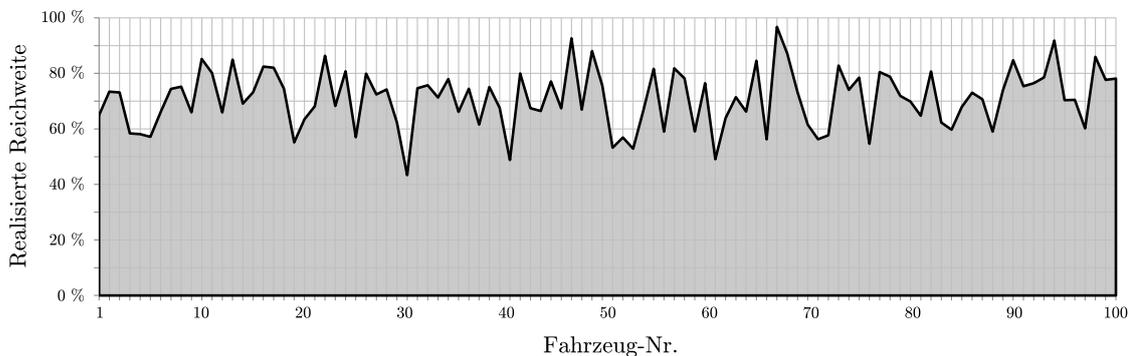


Abbildung 9.4: Mittlere realisierte Reichweite je Fahrzeug ($\hat{N} = 100$, Skizze)

9.3 Durchführung der Planung

Die im vorherigen Abschnitt vorbereiteten Daten konnten nun als Eingangsparameter für die Simulations- und Optimierungsmethoden verwendet werden. Zunächst wurde die im Vorfeld manuell erstellte Infrastruktur-Konfiguration analysiert und mit Hilfe der Simulation eine quantitative Bewertung der Versorgungsqualität durchgeführt. Anschließend wurde das Optimierungsverfahren eingesetzt, um für alle Szenarien eine kostenminimale Infrastruktur-Konfiguration zu bestimmen. Mit Hilfe der Simulation wurde das Optimierungsergebnis validiert und ggf. deren Parameter für eine Neuoptimierung angepasst. Die Zusammenstellung aller Ergebnisse entsprach einer Sensitivitätsanalyse der Flottengröße in Bezug auf die kostenminimalen Infrastrukturkapazitäten.

9.3.1 Bewertung der manuellen Infrastrukturplanung

Zur Bewertung durch die Simulation wurde zunächst eine manuell erstellte Auswahl von 20 Ladestandorten auf dem erzeugten Standortkatalog herangezogen. Dieser Infrastruktur-Konfiguration lag die Idee zugrunde, die bereits vorhandenen Fahrzeugparkplätze teilweise um Ladestandorte mit zwei Ladeplätzen zu erweitern. Neue Ladestandorte außerhalb der exklusiven Parkflächen wurden dabei nicht in Betracht gezogen.

Für jedes der 40 Szenarien wurden insgesamt $\hat{N} = 100$ Simulationsläufe durchgeführt. Ein einzelner Durchlauf benötigt sehr wenig Zeit, so dass die gesamte Berechnung innerhalb von wenigen Minuten bereits abgeschlossen war. Abbildung 9.4 zeigt einen

Gesamtdurchlauf mit $|\hat{\mathcal{V}}| = 100$ Fahrzeugen. Auf der Y-Achse ist jeweils die relative mittlere realisierbare Reichweite

$$D_v = \frac{1}{|\hat{I}^v| \cdot |\hat{N}|} \left(\sum_{n \in \hat{N}} \sum_{i \in \hat{I}^v} f_{v,i,n} \right)$$

jedes Fahrzeugs $v \in \hat{\mathcal{V}}$ abgetragen. In der Abbildung lässt sich deutlich erkennen, dass ca. ein Drittel aller gefahrenen Kilometer als Fehlreichweite nicht mit der Ladeinfrastruktur realisierbar waren.

Im Zuge der Betrachtung war auch anhand der Kennzahl $\bar{R}_{v,n}$ festzustellen, dass durchschnittlich weniger als 8% der Parkvorgänge mit einem Ladevorgang verbunden waren. Gleichzeitig war die Auslastung der vorhandenen Standorte ($\bar{U}_{l,n}$) mit durchschnittlich 20% sehr niedrig. Die Auswertung von $\bar{O}_{v,n}$ ergab, dass nur an sehr wenigen zentralen Standorten Fahrzeuge aufgrund belegter Ladeplätze abgewiesen wurden und grundsätzlich beinahe alle Ladeentscheidungen erfolgreich waren.

Die Beobachtungen aus allen Simulationsläufen wurden wie folgt interpretiert: Fahrzeuge stehen überwiegend außerhalb von Versorgungsbereichen. Die vorhandenen Standorte werden zu selten genutzt und sichern nicht den Reichweitenbedarf der Flotte. Es war zu untersuchen, auf welche Art und Weise zusätzliche bzw. alternative Standorte zu einer höheren Versorgungsqualität führen konnten und wie sich die Gesamtkosten im Vergleich entwickeln würden.

9.3.2 Festlegung der Standorte und Konfigurationen

Für jedes Bewegungsszenario konnte mit den beschriebenen Prämissen eine einzelne Instanz des Basismodells (vgl. Abschnitt 6.4) generiert werden. Zusätzlich wurden die obligatorischen Standorte als Startkonfiguration (vgl. Abschnitt 6.5.1) hinzugefügt. Die verfügbaren exakten Lösungsverfahren konnten die erzeugten Instanzgrößen⁴⁶ nicht mehr optimal lösen. Mit dem heuristischen Verfahren (vgl. Kapitel 7) ließen sich schnell gute Lösungen für alle Instanzgrößen bestimmen, die durch kein exaktes Verfahren weiter verbessert werden konnten. Im Vergleich zur manuellen Planung war zur Vermeidung von Fehlreichweiten für $|\hat{\mathcal{V}}| = 100$ im Optimierungsmodell eine ca. 60% höhere Anzahl an Ladeplätzen nötig.

⁴⁶ Die Größen der Instanzen waren vergleichbar mit der Testinstanzen aus Abschnitt 8.1. Das Laufzeitverhalten war analog zur Beobachtung aus Tabelle 8.3.

Die erzeugten Lösungen wurden wiederum in der Simulationsumgebung bewertet. Hierbei wurde insbesondere geprüft, ob sich die im Optimierungsmodell bewiesene Möglichkeit der vollständigen Fahrzeugversorgung auch unter Berücksichtigung des stochastischen Nutzerverhaltens als empirisch korrekt darstellt (*Robustheit*). Erwartungsgemäß ergab sich, dass die Auslastung der Standorte im Simulationslauf etwas geringer ausfiel und eine Fehlreichweite von wenigen Prozentpunkten entstand. Die Ergebniskennzahl $\bar{O}_{l,n}$ erlaubte eine leichte Identifikation von Ladestandorten, die zu Spitzenzeiten von vielen Fahrzeugen in der Nähe nicht mehr genutzt werden konnten. In einem erneuten Optimierungslauf erwies sich daher eine manuell erzwungene Erhöhung der betroffenen Standortkapazitäten als hilfreich.

Das endgültige Planungsergebnis entstand als Wechselspiel zwischen Optimierung und Simulation. Eine Lösung des Optimierungsmodells mit einer mittleren Auslastungsbeschränkung von 75% und einer zulässigen Fehlreichweite von bis zu 5% erwies sich nach wenigen manuellen Erhöhungen der Standortkapazitäten auch in der Simulation als robust.

9.3.3 Sensitivität der Flottengröße

Aus den Berechnungen ließ sich schließlich eine minimale „Versorgungsquote“ für jedes Szenario ableiten. Sie entsprach dem beobachteten Verhältnis zwischen Fahrzeug- und Ladeplatzanzahl mit einer akzeptablen Fehlreichweite von max. 5 %.

Abbild 9.5 illustriert ein Ergebnis der Sensitivitätsanalyse. Gegenübergestellt sind das Betriebskonzept *Free Floating* (Parkvorgänge ohne Ladevorgang möglich) sowie *Nur Ladeplatz*. Im zweiten Konzept muss ein Fahrzeug immer einen Ladeplatz benutzen, d.h. die Infrastruktur-Konfiguration muss so gewählt sein, dass jede Parkposition von mindestens einem Ladestandort abgedeckt wird und die Standortkapazitäten ausreichend dimensioniert sind. Für die jeweils 10 Szenarien der betrachteten BEV-Anteile wurde die festgelegte Anzahl benötigter Ladeplätze⁴⁷ im Verhältnis zur Flottengröße abgetragen. Die Abbildung zeigt im Vergleich die Ergebnisse für eine zweite, unabhängig analysierte Stadt, die eine interessante Ähnlichkeit aufweisen.

Es lässt sich erkennen, dass diese Versorgungsquote für Szenarien mit gleicher Flottengröße nur eine geringe Varianz aufweist. Im Falle des Betriebskonzepts *Nur Ladeplatz* ist die benötigte Gesamtkapazität bereits bei wenigen Fahrzeugen enorm

⁴⁷Die Anzahl der Ladeplätze entspricht der Gesamtkapazität über alle Standorte.

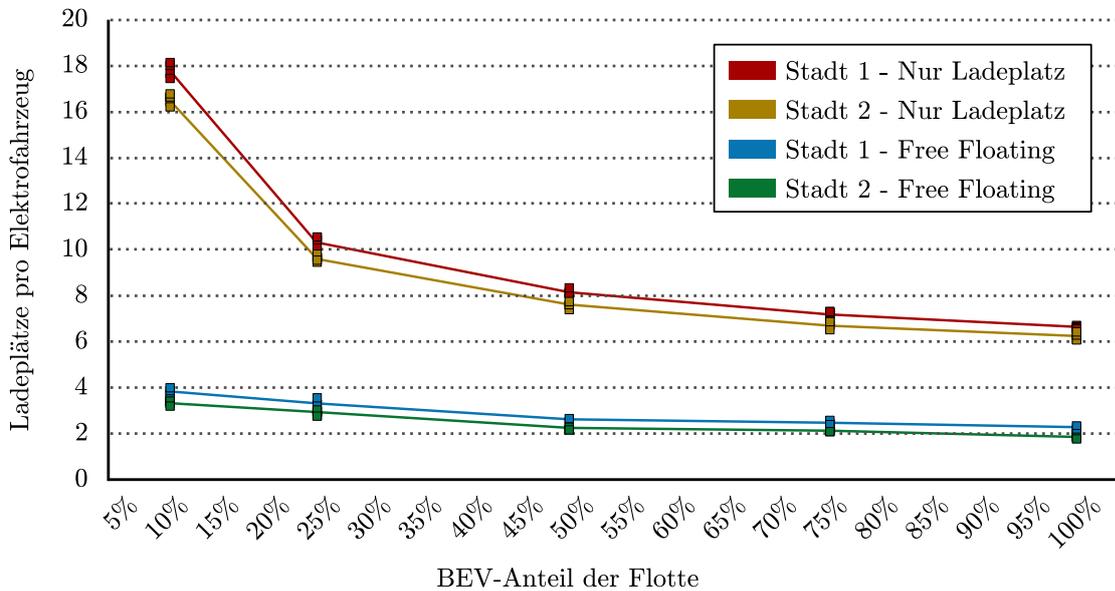


Abbildung 9.5: Sensitivität der Versorgungsquote für unterschiedliche Flottengrößen

hoch, da das gesamte Geschäftsgebiet flächendeckend versorgt sein muss. Diese Art der Versorgung erwies sich als wirtschaftlich untragbar. Im Betriebskonzept *Free Floating* skaliert die Anzahl der Ladeplätze fast linear mit der Anzahl Fahrzeuge und ergibt eine Quote von 1:2 bis 1:4.

Mit der Sensitivitätsanalyse konnte weiterhin die Kostenentwicklung analysiert werden. Obwohl die benötigten Ladeplätze im Betriebskonzept *Free Floating* fast linear skalieren, fand diese Erhöhung bei höheren BEV-Anteilen fast ausschließlich durch Kapazitätserweiterungen der anfänglich eröffneten Standorte statt.

9.3.4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der entwickelten Methoden konnte der gesamte Planungsprozess für ein neues Geschäftsgebiet unterstützt werden. Der Einsatz einer modifizierten Variante des PSCP erlaubte eine erste Identifikation potentiell abdeckungsstarker Standorte, die durch eine manuelle Feinplanung an die Realität angepasst wurde. Auf Basis des lokalen Flächennutzungsplans wurden Bewegungsmuster der Fahrzeuge identifiziert und neue Bewegungsszenarien erzeugt. Durch das heuristische Verfahren konnten kostenminimierte Lösungen bei der Auswahl der Infrastruktur-Konfiguration gefunden werden.

Schließlich ermöglichte die Simulation eine umfangreiche Bewertung jedes Szenarios unter stochastischen Einflüssen. Abschließend konnten durch den Vergleich aller Szenarioergebnisse verschiedene Sensitivitätsanalysen in Bezug auf die Skalierung des Geschäftsmodells bei Vergrößerung der Flotte durchgeführt werden. Auf Basis dieser Untersuchungen entschied sich der Mobilitätsanbieter, die Planung zu realisieren. Der Geschäftsbetrieb mit dem Betriebskonzept *Free Floating* wurde etwa ein halbes Jahr später aufgenommen.

Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung neuer Simulations- und Optimierungsmodelle für die Planungsfragestellungen zur Auslegung von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeugflotten. Anhand der Aufgabenstellung werden zunächst die vorhandenen Ansätze aus der Literatur beschrieben und der Forschungsbedarf aufgezeigt. Während die Laufzeitkomplexität des Simulationsmodells gering ist, ist das Optimierungsmodell mit praxisnahen Instanzen nicht mehr optimal lösbar. Zur schnelleren Generierung guter Lösungen wird daher eine eigene heuristische Lösungsmethodik vorgestellt, die deutliche Verbesserungen in der Laufzeit ermöglicht. Eine Fallstudie illustriert die erfolgreiche Anwendung der Methoden in einem realen Projekt.

Das erarbeitete Simulationsmodell ermöglicht eine detaillierte Analyse und Bewertung der Auswirkungen verschiedener Handlungsalternativen. Es erlaubt die Variation der Flottengröße, der Fahrzeugtypen, der Batteriekapazität, der Infrastruktur-Konfiguration und der Laderegeln im Betriebskonzept. Grundlage der Simulation sind Bewegungsszenarien, welche die zeitliche und räumliche Bewegung der Flottenfahrzeuge beschreiben. Die Verhaltenshypothesen der Fahrzeug-Nutzer bilden eine zweite Ebene, die getrennt von den Fahrzeugbewegungen variiert werden kann. Das entwickelte Mobilitätsmodell kann mit beliebigen Verteilungen kalibriert werden und ermöglicht die Generierung von Szenarien für beliebige Geschäftsgebiete. Durch die chronologisch exakte Betrachtung wird der Zustand von Fahrzeug und Standort zu jedem Zeitpunkt genau bestimmt. Auf Basis der Ergebniskennzahlen liefert die Simulation umfangreiche Daten zur Auslastung der Standorte und zur Versorgungsqualität der Fahrzeuge.

Die Menge potentieller Standorte kann deutlich größer sein als die tatsächlich benötigte Anzahl. Das entwickelte Optimierungsmodell ermöglicht die Auswahl von Versorgungsstandorten und die Festlegung einer Betriebskapazität zur Sicherstellung einer geforderten Service-Qualität auf Basis verschiedener Kennzahlen. Die Optimierung kann im Rahmen einer Greenfield-Planung eingesetzt werden oder eine bereits existierende Infrastruktur-Konfiguration berücksichtigen. Zur Analyse und Bewertung fehlender Versorgungsstandorte und zur Elimination von Ausreißern im Szenario kann eine Fehlreichweite für die Flottenfahrzeuge erlaubt werden.

Das Optimierungsmodell ist \mathcal{NP} -schwer. Die Evaluierung zeigt bereits für das Basismodell eine hohe Laufzeitkomplexität, so dass Reformulierungs- und Modellreduktionsansätze zur Steigerung der Performance vorgestellt werden. Für mittlere und große Probleminstanzen gelangen exakte Lösungsverfahren an ihre Grenzen, so dass ein eigenes heuristisches Verfahren entwickelt wurde. Die erfolgreichsten Suchstrategien der Heuristik basieren auf einer vorab bestimmten Priorisierung der Standorte, die verschiedene, unterschiedlich gewichtete, Faktoren berücksichtigt. Die Evaluierung zeigt, dass schließlich auch für große Instanzen in vergleichsweise kurzer Zeit sehr gute Lösungen gefunden werden können.

10.2 Ausblick

Die kombinatorische Komplexität des vorgestellten Optimierungsmodells stellt Herausforderungen an geeignete Lösungsverfahren. Die Lösungszeiten moderner Solver können durch die vorgestellten alternativen Formulierungen nur marginal reduziert werden. Das entwickelte heuristische Verfahren ermöglicht es, mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand gute Lösungen zu finden. Die Abschätzung der Güte des Ergebnisses ist durch eine schwache untere Schranke noch sehr grob, so dass an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf besteht.

Eine praktisch interessante Erweiterung für die betrachtete Aufgabenstellung liegt in der integrierten Fahrzeugauswahl. Die Simulation & Optimierung basiert in dieser Arbeit auf Flotten, die *ausschließlich* aus batterieelektrischen Fahrzeugen bestehen und sich nur in der Kapazität des Energieträgers unterscheiden. Auf Basis der Fahrzeugkosten könnte eine integrierte Entscheidung der Fahrzeugauswahl für jede Sequenz erfolgen und dabei auch Fahrzeuge mit anderen Antriebstechnologien berücksichtigen.

Die Konfiguration des heuristischen Verfahrens erfolgt im Rahmen dieser Arbeit auf Basis von Erfahrungswerten bekannter Probleminstanzen. Die vorgestellten Strategien haben sich *empirisch* bewährt, sind jedoch sicherlich nicht erschöpfend. Die modulare Architektur der Methode würde in einer nächsten Entwicklungsstufe eine Steuerung durch eine Metaheuristik erlauben. Möglicherweise kann auf diese Weise die Lösungsqualität weiter gesteigert werden.

Schließlich sollten die unterstellten Prämissen, Verteilungen und Verhaltenshypothesen weiter kritisch hinterfragt werden, wenn neue Erfahrungswerte mit batterieelektrischen Flotten vorliegen. Dadurch wird insbesondere eine gründlichere Validierung des Simulationsmodells möglich. Die modulare Struktur der vorgestellten Modelle erlaubt eine flexible Integration neuer Aspekte bei veränderten Rahmenbedingungen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [AB96] AVERBAKH, Igor ; BERMAN, Oded: Locating flow-capturing units on a network with multi-counting and diminishing returns to scale. In: *European Journal of Operational Research* 91 (1996), Nr. 3, S. 495–506
- [AD92] ASHFORD, R. W. ; DANIEL, R. C.: Some Lessons in Solving Practical Integer Programs. In: *The Journal of the Operational Research Society* 43 (1992), Nr. 5, S. 425–433
- [AF09] AGRICOLA, Ilka ; FRIEDRICH, Thomas: *Elementargeometrie*. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2009)
- [Age10] AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN E.V. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien und Elektromobilität: Finanzielle Hürden zur Markteinführung bis 2020*. Berlin, 2010 (Renews Spezial - Ausgabe 33)
- [AKM05] AARTS, Emile ; KORST, Jan ; MICHIELS, Wil: Simulated Annealing. In: BURKE, Edmund K. (Hrsg.) ; KENDALL, Graham (Hrsg.): *Search Methodologies*. Springer US, Boston and MA (2005), S. 187–210
- [Ann03] ANNEN, Oliver: *Das Partial Set Covering Problem und Erweiterungen: Modellierung und Lösungsverfahren*. Duisburg, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2003
- [Bac11] BACHMANN, Peter: Ladeinfrastruktur für E-Mobile: Juristische Kollisionen vermeiden. In: *Energy 2.0* (2011), Nr. 01, 42–44. <http://www.energy20.net/PDF/E20211700>
- [Bad99] BADRI, Masood A.: Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem. In: *International Journal of Production Economics* 62 (1999), Nr. 3, S. 237–248
- [BBA01] BOWMAN, John L. ; BEN-AKIVA, Moshe E.: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 35 (2001), Nr. 1, S. 1–28
- [BBL95] BERMAN, Oded ; BERTSIMAS, Dimitris ; LARSON, Richard C.: Locating Discretionary Service Facilities, II: Maximizing Market Size, Minimizing Inconvenience. In: *Operations Research* 43 (1995), Nr. 4, S. 623–632
- [BBV08] BALDACCI, Roberto ; BATTARRA, Maria ; VIGO, Daniele: Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. In: GOLDEN, Bruce (Hrsg.) ; RAGHAVAN, S. (Hrsg.) ; WASIL, Edward (Hrsg.): *Operations Research/Computer Science Interfaces*. Springer US, Boston and MA (2008), S. 3–27

- [BC89] BRANDEAU, Margaret L. ; CHIU, Samuel S.: An Overview of Representative Problems in Location Research. In: *Management Science* 35 (1989), Nr. 6, S. 645–674
- [BDW09] BIERE, David ; DALLINGER, David ; WIETSCHER, Martin: Ökonomische Analyse der Erstnutzer von Elektrofahrzeugen. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 33 (2009), Nr. 2, S. 173–181
- [BEG06] BRAUN, Robert ; ESSWEIN, Werner ; GREIFFENBERG, Steffen: *Einführung in die Programmierung: Grundlagen, Java, UML*. Springer, Berlin and New York (2006)
- [Ben96] BENNETT, Brian S.: *Simulation fundamentals*. 2nd edition. Prentice Hall, London [u.a.] (1996)
- [Ber74] BERLIN, G.: Mathematical analysis of emergency ambulance location. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 8 (1974), Nr. 6, S. 323–328
- [Ber95] BERMAN, Oded: The maximizing market size discretionary facility location problem with congestion. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 29 (1995), Nr. 1, S. 39–46
- [BK83] BERENS, W. ; KÖRLING, Franz-Josef: Das Schätzen von realen Entfernungen bei der Warenverteilungsplanung mit gebietspaarspezifischen Umwegfaktoren. In: *OR Spectrum* 5 (1983), Nr. 2, S. 67–75
- [BK85] BERENS, Wolfgang ; KÖRLING, Franz-Josef: Estimating road distances by mathematical functions. In: *European Journal of Operational Research* 21 (1985), Nr. 1, S. 54–56
- [BK98] BERMAN, Oded ; KRASS, Dmitry: Flow intercepting spatial interaction model: a new approach to optimal location of competitive facilities. In: *Location Science* 6 (1998), Nr. 1-4, S. 41–65
- [BK05] BURKE, Edmund K. (Hrsg.) ; KENDALL, Graham (Hrsg.): *Search Methodologies*. Springer US, Boston and MA (2005)
- [BLF92] BERMAN, Oded ; LARSON, Richard C. ; FOUSKA, Nikoletta: Optimal Location of Discretionary Service Facilities. In: *Transportation Science* 26 (1992), Nr. 3, S. 201
- [BPH⁺09] BAGHERPOOR, Zeinab ; PARHIZI, Shaghayegh ; HOSEININIA, Mahtab ; HEIDARI, Nooshin ; YAGHIN, Reza G.: Warehouse Location Problem. In: ZANJIRANI FARAHANI, Reza (Hrsg.) ; HEKMATFAR, Masoud (Hrsg.): *Facility Location*. Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg (2009), S. 295–314
- [Bra08] BRAUNER, G.: Infrastrukturen der Elektromobilität. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 125 (2008), Nr. 11, S. 382–386
- [Bra09] BRAUNER, G.: Energiebereitstellung für die Elektromobilität. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 126 (2009), Nr. 10, S. 371–374
- [Bra10] BRABETZ, Ludwig: Energieeffiziente Bordnetzarchitekturen. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)

- [Bro98] BROSIUS, Felix: *SPSS 8.0: Professionelle Statistik unter Windows*. MITP-Verlag, Bonn (1998)
- [BRS03] BETTSTETTER, C. ; RESTA, G. ; SANTI, P.: The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks: Mobile Computing, *IEEE Transactions on*. In: *Mobile Computing, IEEE Transactions on* 2 (2003), Nr. 3, S. 257–269
- [Bru08] BRUHN, Manfred: *Qualitätsmanagement für Dienstleistungen: Grundlagen, Konzepte, Methoden*. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin (2008)
- [BSS09] BOCCIA, Maurizio ; SFORZA, Antonio ; STERLE, Claudio: Flow Intercepting Facility Location: Problems, Models and Heuristics. In: *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 8 (2009), Nr. 1, S. 35–79
- [BT70] BEALE, E. M. L. ; TOMLIN, J. A.: Special facilities in a general mathematical programming system for non-convex problems using ordered sets of variables. In: LAWRENCE, J. (Hrsg.): *OR '69: Proceedings of the 5th International Conference on Operational research*. Tavistock, London (1970), S. 447–454
- [BT99] BARTH, Matthew ; TODD, Michael: Simulation model performance analysis of a multiple station shared vehicle system. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 7 (1999), Nr. 4, S. 237–259
- [Bun10a] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht*. <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/>. Version: Februar 2010
- [Bun10b] BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE E.V. (Hrsg.): *Elektromobilität und Erneuerbare Energien*. Berlin, 2010 (BEE-Position)
- [CBD02] CAMP, Tracy ; BOLENG, Jeff ; DAVIES, Vanessa: A survey of mobility models for ad hoc network research. In: *Wireless Communications and Mobile Computing* 2 (2002), Nr. 5, S. 483–502
- [CBD09] CHEN, Der-San ; BATSON, Robert G. ; DANG, Yu: *Applied Integer Programming*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken and NJ and USA (2009)
- [Cha74] CHAPIN, F. S.: *Human activity patterns in the city: Things people do in time and in space*. Wiley, New York (1974)
- [Chi98] CHIANG, Ching-Chuan: *Wireless Network Multicasting*. Los Angeles, University of California, Dissertation, 1998
- [Chu05] CHU, Ching-Wu: A heuristic algorithm for the truckload and less-than-truckload problem. In: *European Journal of Operational Research* 165 (2005), Nr. 3, S. 657–667

- [Cia10] CIARI, Francesco: Estimation of Car-Sharing Demand Using an Activity-Based Microsimulation Approach: Model Discussion and Preliminary Results. In: *10th Swiss Transport Research Conference* (2010)
- [CJL09] CHO, Hsun-Jung ; JOU, Yow-Jen ; LAN, Chien-Lun: Time Dependent Origin-destination Estimation from Traffic Count without Prior Information. In: *Networks and Spatial Economics* 9 (2009), Nr. 2, S. 145–170
- [CL97] CRAINIC, Theodor G. ; LAPORTE, Gilbert: Planning models for freight transportation. In: *European Journal of Operational Research* 97 (1997), Nr. 3, S. 409–438
- [Cla11] CLAUSING, Achim: *Programmiersprachen: Konzepte, Strukturen und Implementierung in Java*. Spektrum, Akad. Verl, Heidelberg (2011)
- [CN88] CASCETTA, Ennio ; NGUYEN, Sang: A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 22 (1988), Nr. 6, S. 437–455
- [Cor07] CORNUÉJOLS, Gérard: Valid inequalities for mixed integer linear programs. In: *Mathematical Programming* 112 (2007), Nr. 1, S. 3–44
- [CR74] CHURCH, Richard ; REVELLE, Charles S.: The Maximal Covering Location Problem. In: *Papers in Regional Science* 32 (1974), Nr. 1, S. 101–118
- [Dai] DAIMLER COMMUNICATIONS: *Mercedes-Benz Concept BlueZERO: Dreifacher Beleg für die Alltagstauglichkeit emissionsfreier Fahrzeuge: Fotonummer 08A1437*. <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-1162448-49-1162558-1-1-0-0-0-1-12637-854934-0-3842-0-0-0-0-0.html>
- [Dak65] DAKIN, R. J.: A tree-search algorithm for mixed integer programming problems. In: *The Computer Journal* 8 (1965), Nr. 3, S. 250–255
- [DD05] DOMSCHKE, Wolfgang ; DREXL, Andreas: *Einführung in Operations Research*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer, Berlin [u.a.] (2005)
- [Deu] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (HRSG.): *Regierungsprogramm Elektromobilität*. http://www.bmbf.de/pubRD/programm_elektromobilitaet.pdf
- [Deu09] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung*. Berlin, 2009
- [Deu10] DEUTSCHER TAXI- UND MIETWAGENVERBAND E.V. (BZP) ; DEUTSCHER TAXI- UND MIETWAGENVERBAND E.V. (BZP) (Hrsg.): *Geschäftsbericht 2009/2010*. Frankfurt am Main, 2010
- [DGU] DGUV - DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG: *Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen: BGI/GUV-I 8686*

- [DGV10] DIEFENBACH, Ingo ; GAUL, Armin ; VOIT, Stephan: Intelligente Einbindung von E-Fahrzeugen in die Netze und daraus abgeleitete Anforderungen an die V2G Kommunikation. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [DGW11] DOLL, Claus ; GUTMANN, Martin ; WIETSCHHEL, Martin ; FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): *Integration von Elektrofahrzeugen in Carsharing-Flotten: Simulation anhand realer Fahrprofile*. Karlsruhe, 05 / 2011
- [DK97] DOMSCHKE, Wolfgang ; KRISPIN, Gabriela: Location and layout planning. In: *OR Spectrum* 19 (1997), Nr. 3, S. 181–194
- [DKW10] DALLINGER, David ; KRAMPE, Daniel ; WIETSCHHEL, Martin ; FRAUNHOFER ISI (Hrsg.): *Vehicle-to-grid regulation based on a dynamic simulation of mobility behavior*. 2010 (Working Paper Sustainability and Innovation No. S 4/2010)
- [DO99] DASKIN, Mark S. ; OWEN, Susan H.: Two New Location Covering Problems: The Partial P-Center Problem and the Partial Set Covering Problem. In: *Geographical Analysis* 31 (1999), Nr. 3, S. 217–235
- [Dre82] DREZNER, Z.: Competitive location strategies for two facilities. In: *Regional Science and Urban Economics* 12 (1982), Nr. 4, S. 485–493
- [Dre11] DREZNER, Zvi: Continuous Center Problems. In: EISELT, H. A. (Hrsg.) ; MARIANOV, Vladimir (Hrsg.): *Foundations of Location Analysis* Bd. 155. Springer US, Boston and MA (2011), S. 63–78
- [Ear06] EARLE, Michael A.: Sphere to Spheroid Comparisons. In: *Journal of Navigation* 59 (2006), Nr. 3
- [EL97] EISELT, H.A ; LAPORTE, Gilbert: Sequential location problems. In: *European Journal of Operational Research* 96 (1997), Nr. 2, S. 217–231
- [Ell10] ELLER, Frank: *Visual C# 2010: Grundlagen, Programmier Techniken, Datenbanken*. Addison-Wesley, 2010
- [EM11] EISELT, H. A. ; MARIANOV, Vladimir: Pioneering Developments in Location Analysis. In: EISELT, H. A. (Hrsg.) ; MARIANOV, Vladimir (Hrsg.): *Foundations of Location Analysis* Bd. 155. Springer US, Boston and MA (2011), S. 3–22
- [Eng10] ENGEL, Tomi: Mess- und Abrechnungskonzepte für den Elektro-Auto-Kraftstoff. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [Eom11] EOM, Sean: The Intellectual Structure of Decision Support Systems Research (1991–2004). In: SCHUFF, David (Hrsg.) ; PARADICE, David (Hrsg.) ; BURSTEIN, Frada (Hrsg.) ; POWER, Daniel J. (Hrsg.) ; SHARDA, Ramesh (Hrsg.): *Decision Support* Bd. 14. Springer, New York and NY (2011), S. 49–68

- [ES00] ECKEY, Hans-Friedrich ; STOCK, Wilfried: *Verkehrsökonomie: Eine empirisch orientierte Einführung in die Verkehrswissenschaften*. Gabler Verlag, Wiesbaden (2000)
- [Fab85] FABOS, J. G.: *Land use planning: From global to local challenge*. Chapman and Hall, New York (1985)
- [FFGV10] FEST, Claus ; FRANZ, Oliver ; GAUL, Armin ; VOIT, Stephan: E-Roaming: Konzepte und Standards für interoperable E-Mobility. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [FH05] FLOSDORFF, René ; HILGARTH, Günther: *Elektrische Energieverteilung*. Teubner, 2005
- [Fio09] FIORE, Marco: Vehicular Mobility Models. In: OLARIU, Stephan (Hrsg.) ; WEIGLE, Michele C. (Hrsg.): *Vehicular Networks: From Theory to Practice*. CRC Press, 2009
- [Fox95] FOX, Michael: Transport planning and the human activity approach. In: *Journal of Transport Geography* 3 (1995), Nr. 2, S. 105–116
- [Gab11a] GABLER VERLAG ; GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: Großstadt*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9851/grossstadt-v7.html>. Version: 2011
- [Gab11b] GABLER VERLAG ; GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: Modell*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/495/modell-v8.html>. Version: 2011
- [Gab11c] GABLER VERLAG ; GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: Simulation*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55029/simulation-v7.html>. Version: 2011
- [Gab11d] GABLER VERLAG ; GABLER VERLAG (Hrsg.): *Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort: Tonnenkilometer*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/84091/tonnenkilometer-tkm-v4.html>. Version: 2011
- [GGD08] GLUCHOWSKI, Peter ; GABRIEL, Roland ; DITTMAR, Carsten: *Management Support Systeme und Business Intelligence: Computergestützte Informationssysteme für Fach- und Führungskräfte*. 2. Auflage. Springer, Berlin and Heidelberg (2008)
- [GIJ91] GATZWEILER, Hans-Peter ; IRMEN, Eleonore ; JANICH, Helmut: *Regionale Infrastrukturausstattung*. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn (1991)
- [GL01] GLOVER, Fred ; LAGUNA, Manuel: *Tabu search*. 4th edition. Kluwer Acad. Publ., Boston and Mass. [u.a.] (2001)

- [GNKW10] GOHLA-NEUDECKER, Bodo ; KUHN, Philipp ; WAGNER, Ulrich: Nachhaltige Mobilität: Energiewirtschaftlich optimierte Bereitstellung von erneuerbarer Energie für Elektroautos. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [Gol10] GOLDBREICH, Oded: *P, NP, and NP-completeness: The basics of computational complexity*. Cambridge University Press, New York (2010)
- [Gom09] GOMARASCA, Mario A.: *Basics of Geomatics*. Springer Netherlands, Dordrecht (2009)
- [GP05] GENDREAU, Michel ; POTVIN, Jean-Yves: Tabu Search. In: BURKE, Edmund K. (Hrsg.) ; KENDALL, Graham (Hrsg.): *Search Methodologies*. Springer US, Boston and MA (2005), S. 165–186
- [Gro10] GROTTKER, Ulrich: Vertrauenswürdige Tankstromrechnung - Eichrecht und Elektromobilität. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [Gur10] GURCKE, Simon: *Evaluierung von Methoden zur Laufzeitverbesserung exakter Lösungsverfahren für ein Optimierungsmodell zur Planung von Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeug-Flotten*. Bachelor-Arbeit, Universität Paderborn, 28. Dezember 2010
- [GWL98] GU, W.B ; WANG, C.Y ; LIAW, B.Y: The use of computer simulation in the evaluation of electric vehicle batteries. In: *Journal of Power Sources* 75 (1998), Nr. 1, S. 151–161. – ISSN 03787753
- [Haa97] HAAS, Z.J: A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks. In: *Proceedings of ICUPC 97 - 6th International Conference on Universal Personal Communications*, IEEE, 1997, S. 562–566
- [Häg70] HÄGERSTRAND, T.: What about people in regional science? In: *Papers in Regional Science* 24 (1970), Nr. 1, S. 6–21
- [Hak64] HAKIMI, S. L.: Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. In: *Operations Research* 12 (1964), Nr. 3, S. 450–459
- [Hak83] HAKIMI, S.Louis: On locating new facilities in a competitive environment. In: *European Journal of Operational Research* 12 (1983), Nr. 1, S. 29–35
- [HB08] HOEPKE, E. ; BRÄHLER, H.: Einführung in die Nutzfahrzeugtechnik. In: HOEPKE, Erich (Hrsg.) ; BREUER, Stefan (Hrsg.): *Nutzfahrzeugtechnik*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2008), S. 1–33
- [Hel10] HELMERS, E.: Bewertung der Umwelteffizienz moderner Autoantriebe – auf dem Weg vom Diesel-Pkw-Boom zu Elektroautos. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 22 (2010), Nr. 5, S. 564–578

- [Heu03] HEUN, Volker: *Grundlegende Algorithmen: Einführung in den Entwurf und die Analyse effizienter Algorithmen*. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Friedr. Vieweg & Sohl Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2003)
- [HFB09] HARRI, Jerome ; FILALI, Fethi ; BONNET, Christian: Mobility models for vehicular ad hoc networks: a survey and taxonomy. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 11 (2009), Nr. 4, S. 19–41
- [HMS⁺05] HSU, Wei-jen ; MERCHANT, Kashyap ; SHU, Haw-wei ; HSU, Chih-hsin ; HELMY, Ahmed: Weighted waypoint mobility model and its impact on ad hoc networks. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 9 (2005), Nr. 1, S. 59
- [HN08] HAAS, Hans-Dieter ; NEUMAIR, Simon-Martin: *Wirtschaftsgeographie*. 2. Auflage. Wiss. Buchges., Darmstadt (2008)
- [Hod81] HODGSON, John M.: The location of public facilities intermediate to the journey to work. In: *European Journal of Operational Research* 6 (1981), Nr. 2, S. 199–204
- [Hod90] HODGSON, M. J.: A Flow-Capturing Location-Allocation Model. In: *Geographical Analysis* 22 (1990), Nr. 3, S. 270–279
- [Hol08] HOLSAPPLE, Clyde W.: Decisions and Knowledge. In: BURSTEIN, Frada (Hrsg.) ; HOLSAPPLE, Clyde W. (Hrsg.): *Handbook on Decision Support Systems 1*. Springer, Berlin and Heidelberg (2008), S. 21–54
- [Hot29] HOTELLING, Harold: Stability in Competition. In: *The Economic Journal* 39 (1929), Nr. 153, S. 41–57
- [HPS09] HOCHWIMMER, Barbara ; PRINZ, Thomas ; STROBL, Josef ; INSTITUT FÜR GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE (Hrsg.): *Potenzialmodelle für zentrale Einrichtungen in Wien*. Salzburg, September 2009
- [Hro11] HROMKOVIČ, Juraj: *Theoretische Informatik: Formale Sprachen, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kommunikation und Kryptographie*. 4., aktualisierte Auflage. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2011)
- [HS07] HUNT, J. ; STEFAN, K.: Tour-based microsimulation of urban commercial movements. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (2007), Nr. 9, S. 981–1013
- [Hu09] HU, Aiguo P.: *Wireless/Contactless power supply: Inductively coupled resonant converter solutions*. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken (2009)
- [Huf62] HUFF, D. L.: Determining of intra-urban trade areas. In: *Real Estate Research Programs, UCLA* (1962)
- [Jän05] JÄNICH, Klaus (Hrsg.): *Mathematik 1*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (2005)

- [JH06] JODIN, Dirk ; HOMPEL, Michael t.: *Sortier- Und Verteilsysteme: Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung*. Springer Verlag, 2006 (VDI Buch)
- [JM96] JOHNSON, David B. ; MALTZ, David A.: Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In: IMIELINSKI, Tomasz (Hrsg.) ; KORTH, Henry F. (Hrsg.): *Mobile Computing*. Springer, Boston and MA (1996), S. 153–181
- [Kau10] KAUPPERT, Michael: *Erfahrung und Erzählung: Zur Topologie des Wissens*. 2., korrigierte Auflage. VS Verl. für Sozialwiss., Wiesbaden (2010)
- [KB05] KORDA, Martin ; BISCHOF, Wolfgang: *Städtebau: Technische Grundlagen*. 5. Auflage. Teubner, Stuttgart and Leipzig and Wiesbaden (2005)
- [KBKPS09] KLEINE-BESTEN, Thomas ; KERSKEN, Ulrich ; PÖCHMÜLLER, Werner ; SCHEPERS, Heiner: Navigation und Telematik. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; WOLF, Gabriele (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2009), S. 599–624
- [Ker03] KERLER, Siegfried: *Fuhrpark- und Flottenmanagement*. 1. Auflage. Vogel, München (2003)
- [Kic99] KICKNER, Susanne: GIS als Instrument zur Infrastrukturbewertung am Beispiel ÖPNV. In: KILCHENMANN, André (Hrsg.) ; RAUMER, Hans-Georg Schwarz-von (Hrsg.): *GIS in der Stadtentwicklung*. Springer, Berlin (1999), S. 101–123
- [KKS08] KOPFER, Herbert ; KOPFER, Heiko W. ; STACHE, Ulrich: Strategien für die Auftragsdisposition in Speditionsunternehmen. In: BORTFELDT, A. (Hrsg.) ; HOMBERGER, J. (Hrsg.) ; KOPFER, H. (Hrsg.) ; PANKRATZ, G. (Hrsg.) ; STRANGMEIER, R. (Hrsg.): *Intelligente Entscheidungsunterstützung - Aktuelle Herausforderungen und Lösungsansätze*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2008)
- [KL05] KUBY, Michael ; LIM, Seow: The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 39 (2005), Nr. 2, S. 125–145
- [KL07] KUBY, Michael ; LIM, Seow: Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs. In: *Networks and Spatial Economics* 7 (2007), Nr. 2, S. 129–152
- [Kle05] KLEIN, Rolf: *Algorithmische Geometrie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (2005)
- [KLU05] KUBY, Michael ; LIM, Seow ; UPCHURCH, Christopher: Dispersion of Nodes Added to a Network. In: *Geographical Analysis* 37 (2005), Nr. 4, S. 383–409
- [KML07] KARNADI, Feliz K. ; MO, Zhi H. ; LAN, Kun-chan: Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET. In: *2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, IEEE, 2007, S. 2506–2511

- [KP83] KRARUP, Jakob ; PRUZAN, Peter M.: The simple plant location problem: Survey and synthesis. In: *European Journal of Operational Research* 12 (1983), Nr. 1, S. 36–81
- [Kro10] KRONDORFER, Karin: Betriebliches Mobilitätsmanagement als Instrument zur nachhaltig orientierten Gestaltung des Personenverkehrs in Unternehmen. In: PRAMMER, Heinz K. (Hrsg.): *Corporate Sustainability*. Gabler, Wiesbaden (2010), S. 247–266
- [KS11] KRAL, Ch ; SIMIC, D.: Simulation von Elektrofahrzeugen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 128 (2011), Nr. 1-2, S. 28–35
- [KW97] KALLRATH, Josef ; WILSON, John M.: *Business optimisation using mathematical programming*. Macmillan, London (1997)
- [Lar75] LARSON, Richard C.: Approximating the Performance of Urban Emergency Service Systems. In: *Operations Research* 23 (1975), Nr. 5, S. 845–868
- [Law06] LAW, Averill M.: *Simulation modeling and analysis*. 4th edition. McGraw-Hill, Boston (2006)
- [LD60] LAND, A H. ; DOIG, A. G.: An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. In: *Econometrica* 28 (1960), Nr. 3, S. 497–520
- [LDDS10] LUNZ, Benedikt ; DE DONCKER, Rik W. ; SAUER, Dirk U.: Analyse von Ladeinfrastrukturkonzepten für Elektromobilität. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [Lie95] LIEBL, Franz: *Simulation: Problemorientierte Einführung*. 2. Auflage. Oldenbourg, München and Wien (1995)
- [LL11] LEITINGER, C. ; LITZLBAUER, M.: Netzintegration und Ladestrategien der Elektromobilität. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 128 (2011), Nr. 1-2, S. 10–15
- [Loo09] LOOSE, Willi: Carsharing als stadtverträgliche Mobilität. In: CHRIST, Wolfgang (Hrsg.): *Access for All*. Birkhäuser, Basel (2009), S. 134–143
- [LP79] LAND, A. ; POWELL, S.: Computer Codes for Problems of Integer Programming. In: *Annals of Discrete Mathematics*. Elsevier, 1979, S. 221–269
- [McN00a] McNALLY, Michael G.: The Activity-Based Approach. In: HENSHER, David A. (Hrsg.) ; BUTTON, Kenneth (Hrsg.): *Handbook of transport modelling*. Pergamon, New York (2000), S. 53–69
- [McN00b] McNALLY, Michael G.: The Four-Step Model. In: HENSHER, David A. (Hrsg.) ; BUTTON, Kenneth (Hrsg.): *Handbook of transport modelling*. Pergamon, New York (2000), S. 35–52

- [Mer10] MERSCHFORMANN, Marius: *Konzeption und Implementierung einer primalen Heuristik zur Lösung eines Optimierungsmodells in der Ladeinfrastrukturplanung für E-Fahrzeug-Flotten*. Bachelor-Arbeit, Universität Paderborn, 12. Dezember 2010
- [Mik74] MIKUS, Werner: *Verkehrszellen*. Schöningh, Paderborn (1974)
- [Mit73] MITRA, G.: Investigation of some branch and bound strategies for the solution of mixed integer linear programs. In: *Mathematical Programming* 4 (1973), Nr. 1, S. 155–170. – ISSN 0025–5610
- [MM05] MERKLE, Daniel ; MIDDENDORF, Martin: Swarm Intelligence. In: BURKE, Edmund K. (Hrsg.) ; KENDALL, Graham (Hrsg.): *Search Methodologies*. Springer US, Boston and MA (2005), S. 401–435
- [MOA08] MEREDITH, Rob ; O'DONNELL, Peter ; ARNOTT, David: Databases and Data Warehouses for Decision Support. In: BURSTEIN, Frada (Hrsg.) ; HOLSAPPLE, Clyde W. (Hrsg.): *Handbook on Decision Support Systems 1*. Springer, Berlin and Heidelberg (2008), S. 207–230
- [MRG⁺98] MEYER, R. ; REICK, C. H. ; GEHLEN, B. ; HILTY, L. M. ; DEECKE, H. ; PAGE, B.: Modellierung eines Stadtkurierdienstes im Hinblick auf ökologische Effizienz und soziale Verträglichkeit. In: HAASIS, H.-D (Hrsg.) ; RANZE, K.C (Hrsg.): *Umweltinformatik '98*. Metropolis-Verl., Marburg (1998), S. 266–279
- [MS11] MARIANOV, Vladimir ; SERRA, Daniel: Median Problems in Networks. In: EISELT, H. A. (Hrsg.) ; MARIANOV, Vladimir (Hrsg.): *Foundations of Location Analysis* Bd. 155. Springer US, Boston and MA (2011), S. 39–59
- [Nat11] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT (NPE) ; GEMEINSAME GESCHÄFTSSTELLE ELEKTROMOBILITÄT DER BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität*. Berlin, 05/2011
- [NB89] NAUNIN, Dietrich ; BARTZ, Wilfried J.: *Elektrische Strassenfahrzeuge: Technik, Entwicklungsstand und Einsatzbereiche*. Expert Verlag, 1989
- [NBW06] NEUDORFER, H. ; BINDER, A. ; WICKER, N.: Analyse von unterschiedlichen Fahrzyklen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 123 (2006), Nr. 7-8, S. 352–360
- [Neu11] NEUMANN, Gerold: Lithium-Akkumulatoren: Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 83 (2011), Nr. 11, S. 2042–2050
- [Ngu11] NGUYEN, Do Xuan V.: *Konzeptioneller Entwurf eines ganzheitlichen Planungsprozesses für den Aufbau von Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeug-Flotten*. Diplomarbeit, Universität Paderborn, 31. März 2011
- [Noz01] NOZICK, L.: The fixed charge facility location problem with coverage restrictions. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37 (2001), Nr. 4, S. 281–296

- [NRS09] NESTLE, David ; RINGELSTEIN, Jan ; SELZAM, Patrick: Integration dezentraler und erneuerbarer Energien durch variable Strompreise im liberalisierten Energiemarkt. In: *UmweltWirtschaftsForum* 17 (2009), Nr. 4, S. 361–365
- [OEC10] OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (Hrsg.): *Trends in urbanisation and urban policies in OECD countries: What Lessons for China?* OECD, Paris (2010)
- [Pik11] PIKE RESEARCH (Hrsg.): *Global Forecasts for Light-Duty Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles: 2011-2017*. Boulder, 2011
- [Pir08] PIRKER, F.: Energieeffizienz in der Mobilität – von Liter pro 100 km zu kWh pro 100 km. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 125 (2008), Nr. 9, S. 319
- [PJZJ11] PAN, Shuliang ; JIANG, Bo ; ZOU, Nan ; JIA, Lei: Average travel speed estimation using multi-type floating car data. In: *2011 IEEE International Conference on Information and Automation*, IEEE, 2011, S. 192–197
- [Pla01] PLASTRIA, Frank: Static competitive facility location: An overview of optimisation approaches. In: *European Journal of Operational Research* 129 (2001), Nr. 3, S. 461–470
- [Pow10] POWER, J. D. (Hrsg.): *Drive Green 2020: More Hope than Reality*. J.D. Power and Associates, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010
- [PW06] POCHE, Yves ; WOLSEY, Laurence A.: *Production Planning by Mixed Integer Programming* (Springer-11649 /Dig. Serial]
- [PWJZ09] PECH, Anton ; WARMUTH, Günter ; JENS, Klaus ; ZEININGER, Johannes: *Baukonstruktionen*. Bd. 18: *Parkhäuser - Garagen: Grundlagen, Betrieb, Planung*. Springer, Wien (2009)
- [Räp84] RÄPPEL, Michael: *Wohnqualität in Städten : Ein Verfahren zur Bewertung der Gebieteignung für Wohnen in städtischen Teilräumen*. Dortmund, Universität Dortmund, Dissertation, 1984
- [RBA05] ROJAS, Andres ; BRANCH, Philip ; ARMITAGE, Grenville: Experimental validation of the random waypoint mobility model through a real world mobility trace for large geographical areas. In: *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems - MSWiM '05*, ACM Press, 2005, S. 174
- [Rei11] REINKEMEYER, Carsten: Hochvoltfahrzeuge aus Sicht der Kraftfahrzeugversicherung. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Fahrzeugsicherheit - Fokus Elektromobilität* Bd. 2144. VDI-Verlag, Düsseldorf (2011), S. 77–84
- [Rei12] REINHARDT, Winfried: Angebotsplanung im ÖPNV. In: REINHARDT, Winfried (Hrsg.): *Öffentlicher Personennahverkehr*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden (2012), S. 437–484

- [ReV86] REVELLE, Charles S.: The maximum capture or 'Sphere of influence' location problem: Hotelling revisited on a network. In: *Journal of Regional Science* 26 (1986), Nr. 2, S. 343–358
- [Ric11] RICHARDSON, George P.: Reflections on the foundations of system dynamics. In: *System Dynamics Review* (2011)
- [RMR86] RECKER, W. W. ; McNALLY, M. G. ; ROOT, G. S.: A model of complex travel behavior: Part I - Theoretical development. In: *Transportation Research Part A: General* 20 (1986), Nr. 4, S. 307–318
- [RS70] REVELLE, Charles S. ; SWAIN, Ralph W.: Central Facilities Location. In: *Geographical Analysis* 2 (1970), Nr. 1, S. 30–42
- [RW11] RAMMLER, Stephan (Hrsg.) ; WEIDER, Marc (Hrsg.): *Mobilität und Gesellschaft. Bd. 5: Das Elektroauto: Bilder für eine zukünftige Mobilität*. Lit Verlag, 2011
- [Sac04] SACHS, Lothar: *Angewandte Statistik*. 11. Auflage. Springer, Berlin [u.a.] (2004)
- [SBM10] SCHWAN, T. ; BÄKER, B. ; MORAWIETZ, L.: Entwurf einer Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie auf Basis einer Fahrzeug-Bordnetzsimulation. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Innovative Fahrzeugantriebe 2010*. VDI Verlag, Düsseldorf (2010) (VDI-Berichte), S. 115–126
- [Sch07] SCHILLER, Christian: *Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007
- [Sch11] SCHREINER, Klaus: Hybrid- und Elektrofahrzeuge. In: SCHREINER, Klaus (Hrsg.): *Basiswissen Verbrennungsmotor*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011), S. 194–199
- [SGK05] SASTRY, Kumara ; GOLDBERG, David ; KENDALL, Graham: Genetic Algorithms. In: BURKE, Edmund K. (Hrsg.) ; KENDALL, Graham (Hrsg.): *Search Methodologies*. Springer US, Boston and MA (2005), S. 97–125
- [SHH⁺11] SCHLICK, Thomas ; HERTEL, Guid ; HAGEMANN, Bernhard ; MAISER, Eric ; KRAMER, Michael: *Zukunftsfeld Elektromobilität: Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. 05 / 2011
- [Sin84] SINNOTT, R. W.: Virtues of the Haversine. In: *Sky and Telescope* 2 (1984), Nr. 68, S. 159
- [SKW11] SCHRAVEN, Sebastian ; KLEY, Fabian ; WIETSCHEL, Martin: Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* (2011)
- [SLH09] SMITH, H. K. ; LAPORTE, G. ; HARPER, P. R.: Locational analysis: highlights of growth to maturity. In: *Journal of the Operational Research Society* 60 (2009), Nr. 1, S. 140–148

- [SM09] SUHL, Leena ; MELLOULI, Taieb: *Optimierungssysteme: Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. 2. Auflage. Springer, Berlin and Heidelberg (2009)
- [SMG08] SAMMER, G. ; METH, D. ; GRUBER, Ch J.: Elektromobilität – Die Sicht der Nutzer. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 125 (2008), Nr. 11, S. 393–400
- [SMH09] SCHÜRMAN, Gregor ; MADLENER, Reinhard ; HACKBARTH, André: *Plug-in Hybridfahrzeuge: Marktentwicklung, Marktchancen und ökonomisch interessante Fragestellungen*. IEWT 2009 (6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien)
- [SMS10a] SCHULZ, Alexandra ; MARKER, Stefanie ; SCHINDLER, Volker: Elektrifizierung von Fahrzeugflotten - Chancen für den Einstieg in die Elektromobilität. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Innovative Fahrzeugantriebe 2010*. VDI Verlag, Düsseldorf (2010) (VDI-Berichte), S. 215–226
- [SMS10b] SCHULZ, Alexandra ; MARKER, Stefanie ; SCHINDLER, Volker: Entering the electric mobility market: an analysis of commercial vehicle fleets. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [SNB⁺10] SOURKOUNIS, Constantinos ; NI, Binchang ; BROY, Alexander ; ROST, Holger ; JORDAN, Uwe: Integration von Ladestationen für Elektromobilität in Niederspannungsversorgungsnetze. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [SNS10] STÖTZER, Martin ; NAUMANN, André ; STYCZYNSKI, Zbigniew A.: Untersuchung der Versorgungssicherheit von elektrischen Netzen mit einem hohen Elektrofahrzeuganteil mit agentenbasierter Simulation. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [SPV11] SHUKLA, Aviral ; PEKNY, Joseph ; VENKATASUBRAMANIAN, Venkat: An optimization framework for cost effective design of refueling station infrastructure for alternative fuel vehicles. In: *Computers & Chemical Engineering* (2011)
- [SSK11] SIEFEN, Kostja ; SUHL, Leena ; KOBERSTEIN, Achim: A New Model Approach on Cost-Optimal Charging Infrastructure for Electric-Drive Vehicle Fleets. In: HU, Bo (Hrsg.) ; MORASCH, Karl (Hrsg.) ; PICKL, Stefan (Hrsg.) ; SIEGLE, Markus (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2010*. Springer, Berlin and Heidelberg (2011), S. 233–238
- [SSL11] SAMMER, Gerd ; STARK, Juliana ; LINK, Christoph: Einflussfaktoren auf die Nachfrage nach Elektroautos. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 128 (2011), Nr. 1-2, S. 22–27
- [Sta08] STAN, Cornel: *Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. 2. Auflage. Springer, Berlin (2008)

- [Str75] STREIM, Hannes: Heuristische Lösungsverfahren. Versuch einer Begriffsklärung. In: *Zeitschrift für Operations Research* 19 (1975), Nr. 5, S. 143–162
- [Str11] STREICH, Bernd: *Stadtplanung in der Wissensgesellschaft*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2011)
- [Stü00] STÜWE, Kurt: *Einführung in die Geodynamik der Lithosphäre: Quantitative Behandlung geowissenschaftlicher Probleme*. Springer, 2000
- [Sür06] SÜRIE, Christopher: Zeitkontinuität in zeitdiskreten Modellen - Neue Ansätze für die Produktionsplanung in der Prozessindustrie. In: HAASIS, Hans-Dietrich (Hrsg.) ; KOPFER, Herbert (Hrsg.) ; SCHÖNBERGER, Jörn (Hrsg.): *Operations Research Proceedings*. Springer, Berlin and Heidelberg (2006), S. 3–8
- [SVVW80] SILVER, Edward A. ; VICTOR, R. ; VIDAL, V. ; WERRA, Dominique de: A tutorial on heuristic methods. In: *European Journal of Operational Research* 5 (1980), Nr. 3, S. 153–162
- [TK10] TREIBER, Martin ; KESTING, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer, Berlin and Heidelberg (2010)
- [TR72] TOREGAS, Constantine ; REVELLE, Charles S.: Optimal Location under Time or Distance Constraints. In: *Papers in Regional Science* 28 (1972), Nr. 1, S. 133–144
- [TR73] TOREGAS, Constantine ; REVELLE, Charles S.: Binary Logic Solutions to a Class of Location Problem. In: *Geographical Analysis* 5 (1973), Nr. 2, S. 145–155
- [TWJ10] THOMAS, Isabel ; WEIDLICH, Anke ; JOHNS, Martin: IT-Gestützte Geschäftsprozesse in zukünftigen E-Mobility Szenarien. In: *VDE Kongress 2010 - E-Mobility*. VDE VERLAG, Berlin (2010)
- [UK10] UPCHURCH, Christopher ; KUBY, Michael: Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations. In: *Journal of Transport Geography* 18 (2010), Nr. 6, S. 750–758
- [UKL09] UPCHURCH, Christopher ; KUBY, Michael ; LIM, Seow: A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations. In: *Geographical Analysis* 41 (2009), Nr. 1, S. 85–106
- [Umw10] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland*. Dessau-Roßlau, 2010 http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3773
- [Wan07] WANG, Ying-Wei: An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12 (2007), Nr. 3, S. 231–237

- [Wan08a] WANG, Ying-Wei: Locating battery exchange stations to serve tourism transport: A note. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 13 (2008), Nr. 3, S. 193–197
- [Wan08b] WANG, Ying-Wei: Simulation of service capacity an electric scooter refueling system. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 13 (2008), Nr. 2, S. 126–132
- [Wan11] WANG, Ying-Wei: Locating Flow-Recharging Stations at Tourist Destinations to Serve Recreational Travelers. In: *International Journal of Sustainable Transportation* 5 (2011), Nr. 3, S. 153–171
- [WFO10] WALLENTOWITZ, Henning ; FREIALDENHOVEN, Arndt ; OLSCHESKI, Ingo: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2010)
- [WH11] WILLE-HAUSSMANN, Bernhard: *Einsatz der symbolischen Modellreduktion zur Untersuchung der Betriebsführung im 'Smart Grid'*, FernUniversität in Hagen, Dissertation, Januar 2011
- [WHW05] WU, Peiling ; HARTMAN, Joseph C. ; WILSON, George R.: An Integrated Model and Solution Approach for Fleet Sizing with Heterogeneous Assets. In: *Transportation Science* 39 (2005), Nr. 1, S. 87–103
- [Wil08a] WILDE, Andreas: *Eine modulare Funktionsarchitektur für adaptives und vorausschauendes Energiemanagement in Hybridfahrzeugen*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2008
- [Wil08b] WILLIAMS, Hilary P.: *Model building in mathematical programming*. 4th edition. Wiley, Chichester [u.a.] (2008)
- [WKD09] WIETSCHEL, M. ; KLEY, F. ; DALLINGER, D.: Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. In: *ZfAW - Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft* 12 (2009), Nr. 3, S. 33–41
- [WKLB10] WINTER, Martin ; KUNZE, Miriam ; LEX-BALDUCCI, Alexandra: Elektromobil in die Zukunft. In: *forschung* 35 (2010), Nr. 2, S. 14–18
- [WL09] WANG, Ying-Wei ; LIN, Chuah-Chih: Locating road-vehicle refueling stations. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (2009), Nr. 5, S. 821–829
- [Wol98] WOLSEY, Laurence A.: *Integer programming*. Wiley, New York and NY (1998) (A Wiley-Interscience publication)
- [WW89] WU, Szu-Yung D. ; WYSK, Richard A.: An application of discrete-event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing. In: *International Journal of Production Research* 27 (1989), Nr. 9, S. 1603–1623

- [WW10] WANG, Ying-Wei ; WANG, Chuan-Ren: Locating passenger vehicle refueling stations. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (2010), Nr. 5, S. 791–801
- [XL11] XIE, Wei-Dong ; LUAN, Wei: Modeling and simulation of public EV charging station with power storage system. In: *International Conference on Electric Information and Control Engineering*, IEEE, 2011, S. 2346–2350
- [Zar09] ZARINBAL, Marzie: Distance Functions in Location Problems. In: ZANJIRANI FARAHANI, Reza (Hrsg.) ; HEKMATFAR, Masoud (Hrsg.): *Facility Location*. Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg (2009), S. 5–17
- [ZCH10] ZENG, Weiping ; CASTILLO, Ignacio ; HODGSON, M. J.: A Generalized Model for Locating Facilities on a Network with Flow-Based Demand. In: *Networks and Spatial Economics* 10 (2010), Nr. 4, S. 579–611
- [ZFH09] ZANJIRANI FARAHANI, Reza (Hrsg.) ; HEKMATFAR, Masoud (Hrsg.): *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg (2009)
- [Zha06] ZHANG, Sheng S.: The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery. In: *Journal of Power Sources* 161 (2006), Nr. 2, S. 1385–1391. – ISSN 03787753
- [ZHC09] ZENG, Weiping ; HODGSON, M. J. ; CASTILLO, Ignacio: The Pickup Problem: Consumers' Locational Preferences in Flow Interception. In: *Geographical Analysis* 41 (2009), Nr. 1, S. 107–126
- [Zie10] ZIERINGER, Peter: Innovative Problemlösungen für das Fuhrparkmanagement. In: STENNER, Frank (Hrsg.): *Handbuch Automobilbanken*. Springer, Berlin and Heidelberg (2010), S. 113–126
- [Zim05] ZIMMERMANN, Hans-Jürgen: *Operations Research: Methoden und Modelle ; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker*. Vieweg, Wiesbaden (2005)

Stichwortverzeichnis

A

Aktivität	138
Antriebsstrang	9
Auslastung (Flotte)	22
Auslastung (Standort)	72

B

Batteriesystem	10
Betriebskonzept	23
Betriebskosten	25
Bewegungsszenario	37, 92
Branch&Bound	121
Brennstoffzelle	10

C

Car Sharing	8
-------------------	---

D

Data Warehouse	33
Datenbank	33
Diskrete Simulation	80
Distanzmaß	50
Duopoly	62

E

Elektrofahrzeug	9
Energie-Lieferant	15
Energiedichte	11
Energieträger	10
Energietransfer	20
Eröffnungsverfahren	137
Erschließungskosten	25
Exklusivität	26

F

Fahrzeugflotte	8
Fahrzeugladeprozess	19
Fehlreichweite	31, 115
Flächennutzungsplan	91
Fleet Sizing	21
Flotten-Betreiber	14
Flottenmanagement	21
Fuhrpark	8

G

Gebietsklassifikation	90
Grenzlinie	106

H

Heuristik	136
Hybrid-Fahrzeug	9

I

Infrastruktur-Betreiber	15
Installationskosten	25

K

Kantenflussmenge	40
Komplexitätsklasse	119

L

Lösungsverfahren	35
Ladeinfrastruktur	14
Laden	
induktiv	18
konduktiv	17
Ladeplatz	16

Lastmanagement	19	Simulationsmodell	79
Leistungsdichte	11	Solver	35
Lokalisierung	20	SOS Branching	123
M		Standort-Katalog	31
Marktrollen	14	Straßennetzwerk	39
Median-Problem	52	Stromnetz	18
Mobilitätsmodell	44	System Dynamics	80
Modell	34	T	
Monte-Carlo Simulation	80	Teilladung	20
N		Testinstanz	161
Netzintegration	18	V	
O		Valid Inequality	123
Objektmodell	138	Vehicle-to-Grid	19
OD-Matrix	40	Verhaltenshypothesen	117
P		Verkehrserzeugung	41
Parkflächenlayout	31	Verkehrsflussmodell	38
Pfadflussmenge	40	Verkehrsmittelwahl	41
Prognoseverfahren	35	Verkehrsnachfrage	39
R		Verkehrsumlegung	42
Realisierbarkeit	27	Verkehrsverteilung	41
Reichweitenbedarf	29	Verkehrszelle	91
Reparaturzyklus	150	Versorgungsbereich	29, 105
Roaming	19	Versorgungsqualität	64
S		Verteilerverkehr	8
Schlupfvariablen	124	W	
Semikontinuität	123	Wallbox	17
Service-Qualität	21, 23	Warehouse Location Problem	54
Simulation	79	Z	
		Zeitscheibe	106
		Zentren-Problem	52

