

Aktives Ausgleichen von Bike-Sharing-Systemen

Jan Brinkmann

Aktives Ausgleichen von Bike-Sharing-Systemen

Jan Brinkmann
Institut für Wirtschaftsinformatik
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

Dieses Buch ist eine Übersetzung des Originals in Englisch “Active Balancing of Bike Sharing Systems” von Brinkmann, Jan, publiziert durch Springer Nature Switzerland AG in 2020. Die Übersetzung erfolgte mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung durch den Dienst DeepL.com). Eine anschließende Überarbeitung im Satzbetrieb erfolgte vor allem in inhaltlicher Hinsicht, so dass sich das Buch stilistisch anders lesen wird als eine herkömmliche Übersetzung. Springer Nature arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Produktion von Büchern und an den damit verbundenen Technologien zur Unterstützung der Autoren.

ISBN 978-3-031-16535-1 ISBN 978-3-031-16536-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-16536-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Axel Garbers

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen hat als neues städtisches Verkehrsmittel große Aufmerksamkeit erregt. Die Praxis hat gezeigt, dass Einzelfahrten von Fahrzeugen den Mobilitätsmustern der Menschen folgen, was zu zeitlichen und räumlichen Ungleichgewichten in Bezug auf die Verteilung von Fahrzeugen in der Stadt führt. In stationsbasierten Bike-Sharing-Systemen leiden die Kunden unter dem Fehlen von Fahrrädern bei einer möglichen Ausleihe und dem Fehlen von Fahrradständen bei einer Rückgabe. Stationslose Systeme haben den Anspruch, Flexibilität zu bieten, aber sie haben es nicht geschafft, das Ungleichgewicht der Fahrräder zu überwinden.

Systembetreiber sehen sich mit der Notwendigkeit konfrontiert, Fahrräder über den Tag hinweg zwischen den Stadtgebieten umzuverteilen, was mit erheblichen Kosten verbunden ist. Die methodische Unterstützung der Fahrradlogistik hat sich auf statische Optimierungsmodelle konzentriert. Diese Modelle werden in der Regel mit Daten der historischen Fahrradnutzung gefüttert. Da sich Geschichte nicht wiederholt, können optimale Lösungen, die aus statischen Modellen gewonnen werden, aufgrund der Stochastik in Bezug auf die tatsächliche Fahrradnutzung nicht umgesetzt werden.

Jan Brinkmann konzentriert sich auf einen Steuerungsansatz, der dynamisch über zu lösende Fahrradungleichgewichte entscheidet. Er kombiniert die Steuerung mit einer Antizipation des zukünftigen Umverteilungsbedarfs durch eine Online-Simulation. Die Simulation berücksichtigt die Fahrzeit zum Erreichen der jeweiligen Station, die Be- und Entladezeit an dieser Station sowie die Vermeidung zukünftiger Ausfälle aufgrund von Veränderungen im Fahrradbestand.

Die Aussagekraft der Simulation hängt stark vom Simulationshorizont ab. Ein kurzer Horizont spiegelt möglicherweise nicht den Nutzen des Stationsbesuchs wider. Die Simulation über einen langen Horizont kann über Kundenausfälle Aufschluss bieten, die sich nicht mehr auf den jeweiligen Stationsbesuch beziehen. Jan Brinkmann kann nachweisen, dass ein geeigneter Simulationshorizont keineswegs feststeht, sondern von der jeweiligen Situation, d. h. von der Tageszeit, abhängt. Dazu entwickelt er einen approximativen Ansatz der dynamischen Programmierung, der heterogene Simulationshorizonte iterativ bestimmt.

Die obige Überlegung gilt nur für den Fall, dass nur ein Fahrzeug eingesetzt wird. Wenn eine Flotte von LKWs für die Fahrradverteilung eingesetzt wird, sind die dezentralen Entscheidungen der LKWs nicht mehr unabhängig voneinander. Da sie alle dem gleichen Entscheidungsmodell folgen, kann es passieren, dass anspruchsvolle Stationen versehentlich mehrfach angefahren werden. Jan Brinkmann schlägt verschiedene Ebenen der Koordination vor, die mit einem leicht wachsenden Bedarf an Informationsaustausch einhergehen. Die Fahrzeuge operieren unabhängig voneinander und treffen Entscheidungen für ihren eigenen Betrieb. Wie im Fall des Ein-Fahrzeug-Systems umfassen die Entscheidungen die Anzahl der Fahrräder, die an der aktuellen Station ein- oder ausgeladen werden sollen, und die Station, die als nächstes angefahren werden soll.

Die entwickelten Steuerungsansätze werden sorgfältig für reale Fälle von Bike-Sharing-Systemen validiert. Für alle betrachteten Fälle werden vielversprechende Ergebnisse erzielt. Insbesondere eignet sich der Ansatz am besten für Bike-Sharing-Systeme, die keine regelmäßige Struktur von Fahrradungleichgewichten aufgrund von Pendlerfahrten aufweisen. Regelmäßige Ströme von Wohngebieten zu Bürobezirken am Morgen und umgekehrte Ströme am späten Nachmittag lassen sich relativ leicht vorhersagen und entgegenwirken. Eine größere Herausforderung stellen komplexe Mobilitätsmuster dar, die aus einer Mischung von Arbeit, Einkaufen und Freizeitaktivitäten bestehen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass diese komplexen Interaktionen viel besser durch Kontrolle als durch statische Optimierung unterstützt werden können.

Jan Brinkmann leistet Pionierarbeit bei der Entwicklung von Online-Kontrollmodellen für die Umverteilungslogistik von Bike-Sharing-Systemen. Die Arbeit basiert auf einem soliden Verständnis von Bike-Sharing-Systemen, Geschäftsmodellen und damit verbundenen Aktivitäten. Der verfolgte Steuerungsansatz wurde sowohl von der Verkehrsforschungsgemeinschaft als auch von Kollegen aus dem Operations Research positiv aufgenommen. Dieses Buch fasst die Forschung der letzten Jahre zusammen, indem es eine umfassende Einführung in Steuerungsansätze für heutige und künftige Sharing-Systeme gibt.

Braunschweig, Deutschland
Januar 2019

Dirk C. Mattfeld

Zusammenfassung

Viele Städte leiden unter den Unannehmlichkeiten, die der motorisierte Individualverkehr mit sich bringt. Daher führen Stadtverwaltungen nachhaltige gemeinsame Mobilitätsdienste wie Bike-Sharing-Systeme (BSS) ein. In BSS können die Nutzer Fahrräder kurzfristig an Stationen ausleihen und zurückgeben. Die Datenanalyse zeigt, dass die Ausleih- und Rückgabeanfragen räumlich-zeitlichen Mustern folgen, wie z. B. der Pendlernutzung und Freizeitaktivitäten. Morgens ist die Nutzung durch Pendler vor allem durch Verleihanfragen in Wohngebieten und Rückgabeanfragen in Arbeitsgebieten gekennzeichnet. Dieses Verhalten kehrt sich im Laufe des Tages um. Die daraus resultierenden ungleichen Anfragen führen dazu, dass die Stationen leer oder voll werden. An leeren Stationen scheitern die Anfragen nach Leihfahrrädern. An vollen Stationen scheitern die Rückgabeanfragen.

Die Anbieter wirken diesen Unannehmlichkeiten durch einen Ausgleich entgegen. In dieser Arbeit konzentrieren wir uns auf die Sicht des Betriebsmanagements auf das Ausgleichen von BSS. Das heißt, der Anbieter plant die Transportfahrzeuge, die Fahrräder zwischen den Stationen transportieren, um die Anzahl der fehlgeschlagenen Anfragen zu minimieren. Da die Anfragen unsicher sind, besteht die Herausforderung darin, Stationen mit einem Mangel oder einem Überschuss an Fahrrädern zu identifizieren. Zu diesem Zweck führen wir Ansätze ein, die künftige Anfragen simulieren und die erwartete Menge an fehlgeschlagenen Anfragen annähern. Anschließend wird die Antizipation durch die Einbeziehung der Näherungswerte in den Entscheidungsprozess ermöglicht.

Wir evaluieren unsere Ansätze in Fallstudien, die auf realen Daten basieren. Die Ergebnisse zeigen, dass unsere Ansätze in der Lage sind, die Anzahl der fehlgeschlagenen Anfragen im Vergleich zu gängigen Benchmarks aus der Literatur deutlich zu reduzieren.

Braunschweig, Deutschland
Januar 2019

Jan Brinkmann

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|--------------------------|---|-----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| Teil I Grundlagen | | |
| 2 | Bike-Sharing-Systeme | 9 |
| 2.1 | Städtische Mobilität | 9 |
| 2.2 | Vorteile | 10 |
| 2.2.1 | Verringerung des Verkehrs | 10 |
| 2.2.2 | Verbesserung der Gesundheit | 11 |
| 2.2.3 | Steigerung der Attraktivität für Touristen | 12 |
| 2.3 | Funktionsweise | 12 |
| 2.3.1 | Stationslos | 12 |
| 2.3.2 | Stationsbasiert | 13 |
| 2.4 | Anfragemuster | 14 |
| 2.4.1 | Jahreszeiten und Wetter | 14 |
| 2.4.2 | Pendler | 15 |
| 2.4.3 | Freizeit und Touristen | 15 |
| 2.5 | Managementebenen | 16 |
| 2.5.1 | Strategisches Management | 17 |
| 2.5.2 | Taktisches Management | 19 |
| 2.5.3 | Operatives Management | 20 |
| 3 | Optimierungsprobleme | 23 |
| 3.1 | Routenplanung | 23 |
| 3.1.1 | Traveling-Salesman-Problem | 23 |
| 3.1.2 | Routenplanung für kapazitätsbeschränkte Fahrzeuge | 24 |
| 3.1.3 | Routenplanung mit Zeitfenstern | 24 |
| 3.1.4 | Pickup-and-Delivery-Problem | 25 |
| 3.1.5 | Inventory-Routing-Problem | 25 |

| | | |
|------------------------------|---|-----------|
| 3.2 | Inventory-Routing-Problem für BSS | 25 |
| 3.2.1 | Keine Anfragen | 31 |
| 3.2.2 | Anfragen | 32 |
| 4 | Dynamische Entscheidungsfindung | 35 |
| 4.1 | Markov-Entscheidungsprozesse | 36 |
| 4.2 | Approximative-Dynamische-Programmierung | 39 |
| 4.2.1 | Myopisch | 40 |
| 4.2.2 | Vorausschauend | 41 |
| 4.2.3 | Wertfunktionsapproximation | 42 |
| Teil II Anwendung | | |
| 5 | Das stochastisch-dynamische Multi-Vehicle Inventory-Routing-Problem für Bike-Sharing-Systeme | 49 |
| 5.1 | Beschreibung | 49 |
| 5.2 | Infrastruktur | 50 |
| 5.3 | Markov-Entscheidungsprozess | 51 |
| 5.4 | Beispiel | 53 |
| 5.5 | Herausforderungen | 55 |
| 6 | Vorausschauende Politiken | 57 |
| 6.1 | Beschreibung | 57 |
| 6.1.1 | Online-Simulationen | 58 |
| 6.1.2 | Offline-Simulationen | 58 |
| 6.2 | Definition | 59 |
| 6.2.1 | Simulation | 59 |
| 6.2.2 | Optimierung | 64 |
| 6.3 | Algorithmen | 72 |
| 6.3.1 | Vorausschauende Politik | 72 |
| 6.3.2 | Online-Simulationen | 75 |
| 6.3.3 | Offline-Simulationen | 75 |
| 6.3.4 | Matrix-Maximum-Algorithmus | 75 |
| 7 | Dynamische Vorausschauhorizonte | 77 |
| 7.1 | Beschreibung | 77 |
| 7.2 | Definition | 79 |
| 7.2.1 | Sequenzen von Vorausschauhorizonten | 80 |
| 7.2.2 | Approximation der Wertfunktion | 81 |
| 7.2.3 | Boltzmann-Exploration | 83 |
| 7.3 | Algorithmen | 86 |
| 7.3.1 | Wertfunktionsapproximation | 86 |
| 7.3.2 | Boltzmann-Exploration | 88 |

| | | |
|--|---|-----|
| 8 | Fallstudien | 89 |
| 8.1 | Daten aus der realen Welt | 89 |
| 8.1.1 | Vorverarbeitung der Daten | 89 |
| 8.1.2 | Resultierende Datensätze | 90 |
| 8.2 | Instanzen | 91 |
| 8.3 | Übergang | 92 |
| 8.4 | Benchmarks | 95 |
| 8.4.1 | Sicherheitspuffer-Verlagerungspolitik | 95 |
| 8.4.2 | Rollout-Algorithmen | 97 |
| 8.5 | Parametrisierung | 97 |
| 8.5.1 | Sicherheitspuffer-Verlagerungspolitik | 98 |
| 8.5.2 | Online-Simulationen | 98 |
| 8.5.3 | Statische Vorausschau-Politiken | 100 |
| 8.5.4 | Dynamische Vorausschau-Politiken | 101 |
| 8.5.5 | Rollout-Algorithmen | 101 |
| 8.6 | Ergebnisse | 104 |
| 8.6.1 | Der Wert der Koordination | 104 |
| 8.6.2 | Der Wert der Antizipation | 105 |
| 8.6.3 | Einzelne Ergebnisse | 106 |
| 8.7 | Analyse | 108 |
| 8.7.1 | Optimale Zuweisung | 108 |
| 8.7.2 | Lernkurven | 109 |
| 8.7.3 | Dynamische Vorausschauhorizonte | 111 |
| Teil III Schlussfolgerungen | | |
| 9 | Implikationen für das Management | 119 |
| 10 | Zukünftige Forschung | 121 |
| 10.1 | Modell | 121 |
| 10.2 | Methode | 124 |
| Anhang A | | 127 |
| Anhang B | | 135 |
| Literatur | | 173 |

Akronyme

| | |
|-----|---|
| ADP | Approximativen-Dynamischen-Programmierung |
| AV | Autonomes Fahrzeug |
| BSS | Bike-Sharing-System |
| DLA | Dynamische Vorausschau-Politik |
| DPS | dynamische Politikauswahl |
| IRP | Inventory-Routing-Problem |
| LA | Vorausschau-Politik |
| LUT | Nachschlagetabelle |
| MDP | Markov-Entscheidungsprozess |
| PTS | Öffentliches Verkehrssystem |
| SMS | Gemeinschaftlich genutzte Mobilitätsdienste |
| SLA | Statische Vorausschau-Politik |
| STR | Sicherheitspuffer-Verlagerungspolitik |
| VFA | Wertefunktionsapproximation |
| VRP | Vehicle-Routing-Problem |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 1.1 | Überblick über die Teile und Kapitel dieser Arbeit | 4 |
| Abb. 2.1 | Eine Station eines Bike-Sharing-Systems | 13 |
| Abb. 2.2 | Überblick über die Managementebenen | 17 |
| Abb. 4.1 | Ein dynamischer Entscheidungsprozess. (Angepasst, Meisel 2011) | 36 |
| Abb. 4.2 | Ein Markov-Entscheidungsprozess. (Angepasst, Ulmer et al. 2015) | 37 |
| Abb. 4.3 | Ein beispielhafter Entscheidungsbaum. (Angepasst, Ulmer 2017) | 38 |
| Abb. 4.4 | Simulationen eines Rollout-Algorithmus. (Angepasst, Ulmer et al. 2016) | 41 |
| Abb. 4.5 | Eine beispielhafte Trajektorie in einem Entscheidungsbaum | 43 |
| Abb. 4.6 | Eine Iteration der Approximationsphase einer VFA | 44 |
| Abb. 5.1 | Ein beispielhafter MDP des IPR_{BSS} . (Angepasst, Brinkmann et al. 2019b) | 53 |
| Abb. 6.1 | Überblick über eine Vorausschau-Politik. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019a) | 58 |
| Abb. 6.2 | Drei Bestandsentscheidungen und die daraus resultierenden Füllstände | 61 |
| Abb. 6.3 | Simulationen einer Online-Vorausschau | 62 |
| Abb. 6.4 | Beobachtete Füllstände und fehlgeschlagene Anfragen in einer beispielhaften Simulation | 65 |
| Abb. 6.5 | Beobachtete Leihanfragen in einer beispielhaften Simulation | 66 |
| Abb. 6.6 | Fehlgeschlagene Anfragen in einer beispielhaften Simulation. (Brinkmann et al. 2019a) | 67 |
| Abb. 6.7 | Beobachteter Füllstand und fehlgeschlagene Anfragen in einer Beispielsimulation. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019b) | 68 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 6.8 | Ein beispielhaftes Zuordnungsproblem. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019b) | 70 |
| Abb. 7.1 | Eine Iteration der Approximationsphase einer Wertfunktionsapproximation in Kombination mit einer dynamischen Vorausschau-Politik. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019a) | 78 |
| Abb. 7.2 | Wahrscheinlichkeiten zweier exemplarischer Werte im Verlauf einer Approximationsphase | 85 |
| Abb. 7.3 | Wahrscheinlichkeiten von drei Beispielwerten im Verlauf einer Approximationsphase | 85 |
| Abb. 8.1 | Zeitliche Verteilung der Fahrten. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019b) | 91 |
| Abb. 8.2 | Prozess zwischen zwei Entscheidungspunkten | 93 |
| Abb. 8.3 | Ablauf der Ereignisbearbeitung. (Angepasst, Brinkmann et al. 2019a) | 94 |
| Abb. 8.4 | Bestimmung der Sicherheitspuffer von STR | 98 |
| Abb. 8.5 | Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe von SLA_{on} : fehlgeschlagene Anfragen | 99 |
| Abb. 8.6 | Bestimmung der Anzahl der Simulationsläufe von SLA_{on} : Laufzeit | 99 |
| Abb. 8.7 | Bestimmung des Vorausschauhorizonts von SLA_{on} | 100 |
| Abb. 8.8 | Bestimmung des Vorausschauhorizonts von SLA_{off} | 101 |
| Abb. 8.9 | Simulationsläufe von Rollout-Algorithmen in Minneapolis: fehlgeschlagene Anfragen | 102 |
| Abb. 8.10 | Simulationsläufe von Rollout-Algorithmen in San Francisco: fehlgeschlagene Anfragen | 102 |
| Abb. 8.11 | Simulationsläufe von Rollout-Algorithmen in Minneapolis: Laufzeit | 103 |
| Abb. 8.12 | Simulationsläufe von Rollout-Algorithmen in San Francisco: Laufzeit | 103 |
| Abb. 8.13 | Der Wert der Koordination | 105 |
| Abb. 8.14 | Der Wert der Antizipation | 106 |
| Abb. 8.15 | Die Ergebnisse von Minneapolis | 107 |
| Abb. 8.16 | Die Ergebnisse von San Francisco | 107 |
| Abb. 8.17 | Verbesserungsraten der Heuristik gegenüber der optimalen Zuweisung | 109 |
| Abb. 8.18 | Fehlgeschlagene Anfragen in den ersten 500 Trajektorien einer Approximationsphase | 110 |
| Abb. 8.19 | Fehlgeschlagene Anfragen im Verlauf einer Approximationsphase | 110 |
| Abb. 8.20 | VFA-ermittelte Vorausschauhorizonte für ein Fahrzeug in Minneapolis und San Francisco | 111 |
| Abb. 8.21 | VFA-ermittelte Vorausschauhorizonte für vier Fahrzeuge in Minneapolis und San Francisco | 112 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 8.22 | A-priori-DLA Vorausschauhorizonte | 113 |
| Abb. 8.23 | Ex-Post-DLA Vorausschauhorizonte für ein Fahrzeug in Minneapolis und San Francisco | 113 |
| Abb. 8.24 | Ex-Post-DLA Vorausschauhorizonte für vier Fahrzeuge in Minneapolis und San Francisco | 114 |
| Abb. 8.25 | Die Ergebnisse von DLA mit manuell bestimmten Horizonten in Minneapolis | 115 |
| Abb. 8.26 | Die Ergebnisse von DLA mit manuell bestimmten Horizonten in San Francisco | 115 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----|
| Tab. 3.1 | Klassifizierung der Literatur zum Inventory-Routing für Bikeshaing-Systeme: keine Anfragen | 27 |
| Tab. 3.2 | Klassifizierung der Literatur zum Inventory-Routing für Bike-Sharing-Systeme: Anfragen | 29 |
| Tab. 4.1 | Überblick über die Kategorien der Approximativen Dynamischen-Programmierung | 40 |
| Tab. 5.1 | Notation der Infrastruktur des Bikeshaing-Systems | 50 |
| Tab. 5.2 | Notation des Markov-Entscheidungsprozesses | 51 |
| Tab. 7.1 | Notation der Wertfunktionsapproximation | 80 |
| Tab. 8.1 | Merkmale der untersuchten Bike-Sharing-Systeme | 90 |
| Tab. A.1 | Parametrisierung für STR, SLA_{on} , und SLA_{off} | 128 |
| Tab. A.2 | Simulationsläufe für Minneapolis | 129 |
| Tab. A.3 | Simulationsläufe für San Francisco | 130 |
| Tab. A.4 | Dynamische Vorausschau-Horizonte für DLA_{on} und DLA_{off} | 131 |
| Tab. A.5 | Dynamische Vorausschau-Horizonte für manuelle | 132 |
| Tab. A.6 | Ergebnisse der Rollout-Algorithmen in Minneapolis | 133 |
| Tab. A.7 | Ergebnisse der Basispolitiken in San Francisco | 134 |
| Tab. B.1 | Ergebnisse von STR und einem Fahrzeug in Minneapolis | 135 |
| Tab. B.2 | Ergebnisse von STR und einem Fahrzeug in San Francisco | 135 |
| Tab. B.3 | Ergebnisse von STR, zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 136 |
| Tab. B.4 | Ergebnisse von STR, zwei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 136 |
| Tab. B.5 | Ergebnisse von STR, drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 137 |
| Tab. B.6 | Ergebnisse von STR, drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 137 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. B.7 | Ergebnisse von STR, vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 138 |
| Tab. B.8 | Ergebnisse von STR, vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 138 |
| Tab. B.9 | Ergebnisse von STR, zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 138 |
| Tab. B.10 | Ergebnisse von STR, zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 139 |
| Tab. B.11 | Ergebnisse von STR, drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 139 |
| Tab. B.12 | Ergebnisse von STR, drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 139 |
| Tab. B.13 | Ergebnisse von STR, vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 140 |
| Tab. B.14 | Ergebnisse von STR, vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 140 |
| Tab. B.15 | Ergebnisse von STR und einem Fahrzeug in Minneapolis | 141 |
| Tab. B.16 | Ergebnisse von SLA_{on} und einem Fahrzeug in Minneapolis | 141 |
| Tab. B.17 | Ergebnisse von SLA_{off} und einem Fahrzeug in Minneapolis | 142 |
| Tab. B.18 | Ergebnisse der DLA und einem Fahrzeug in Minneapolis | 142 |
| Tab. B.19 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 143 |
| Tab. B.20 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 143 |
| Tab. B.21 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 144 |
| Tab. B.22 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 144 |
| Tab. B.23 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 145 |
| Tab. B.24 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 146 |
| Tab. B.25 | Ergebnisse der DLA und zwei Fahrzeugen in Minneapolis | 147 |
| Tab. B.26 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 147 |
| Tab. B.27 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 148 |
| Tab. B.28 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 148 |
| Tab. B.29 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 149 |
| Tab. B.30 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 150 |
| Tab. B.31 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 151 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab. B.32 | Ergebnisse der DLA und drei Fahrzeugen in Minneapolis | 152 |
| Tab. B.33 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 152 |
| Tab. B.34 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 153 |
| Tab. B.35 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 153 |
| Tab. B.36 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in Minneapolis | 154 |
| Tab. B.37 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in Minneapolis | 155 |
| Tab. B.38 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in Minneapolis | 156 |
| Tab. B.39 | Ergebnisse der DLA und vier Fahrzeugen in Minneapolis | 156 |
| Tab. B.40 | Ergebnisse von STR und einem Fahrzeug in San Francisco | 157 |
| Tab. B.41 | Ergebnisse von SLA_{on} und einem Fahrzeug in San Francisco | 157 |
| Tab. B.42 | Ergebnisse von SLA_{off} und einem Fahrzeug in San Francisco | 158 |
| Tab. B.43 | Ergebnisse der DLA und einem Fahrzeug in San Francisco | 158 |
| Tab. B.44 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 159 |
| Tab. B.45 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 159 |
| Tab. B.46 | Ergebnisse von SLA_{on} , zwei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 160 |
| Tab. B.47 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 160 |
| Tab. B.48 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 161 |
| Tab. B.49 | Ergebnisse von SLA_{off} , zwei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 162 |
| Tab. B.50 | Ergebnisse der DLA und zwei Fahrzeugen in San Francisco | 163 |
| Tab. B.51 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 163 |
| Tab. B.52 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 164 |
| Tab. B.53 | Ergebnisse von SLA_{on} , drei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 164 |
| Tab. B.54 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 165 |
| Tab. B.55 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 166 |
| Tab. B.56 | Ergebnisse von SLA_{off} , drei Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 167 |
| Tab. B.57 | Ergebnisse der DLA und drei Fahrzeugen in San Francisco | 168 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab. B.58 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 168 |
| Tab. B.59 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 169 |
| Tab. B.60 | Ergebnisse von SLA_{on} , vier Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 169 |
| Tab. B.61 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und unabhängiger Zuordnung in San Francisco | 170 |
| Tab. B.62 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und heuristischer Zuordnung in San Francisco | 171 |
| Tab. B.63 | Ergebnisse von SLA_{off} , vier Fahrzeugen und optimaler Zuordnung in San Francisco | 172 |
| Tab. B.64 | Ergebnisse der DLA und vier Fahrzeugen in San Francisco | 172 |

Algorithmen

| | | |
|---------------|----------------------------------|----|
| Algorithmus 1 | Vorausschau-Politik | 73 |
| Algorithmus 2 | Online-Simulationen | 73 |
| Algorithmus 3 | Offline-Simulationen | 74 |
| Algorithmus 4 | Matrix-Maximum-Algorithmus | 76 |
| Algorithmus 5 | Wertfunktionsapproximation | 87 |
| Algorithmus 6 | Boltzmann-Exploration | 88 |