

Simulationsgestützte robuste Umlaufplanung

VON KNUT HAASE

Zusammenfassung

Ein simulationsgestützter Ansatz zur Umlaufplanung für die Fahrzeuge eines Verkehrsunternehmens des Öffentlichen Personennahverkehrs wird vorgestellt. Dabei beschränken wir uns gedanklich auf die Linienfahrten der morgendlichen Hauptverkehrszeit. Zielsetzung ist die Vermeidung von verspätet gestarteter Linienfahrten. Zur Lösung wird ein dreistufiger Ansatz vorgestellt. In der ersten Stufe wird die Anzahl an Fahrzeugen minimiert. In der zweiten Stufe minimieren wir die Leerzeit (Warten und Leerfahrten) unter Beachtung der minimalen Anzahl an Fahrzeugen. In der dritten Stufe betrachten wir (unabhängig) exponentiell verteilte Linienfahrtdauern. Zur Berücksichtigung der stochastischen Einflüsse generieren wir Szenarien. Jedes Szenario beinhaltet für jede Linienfahrt eine Realisierung der zufällig verteilten Linienfahrtdauer. Minimiert wird die durchschnittliche Summe an Verspätungsminuten der Startzeiten von Linienfahrten unter Einhaltung einer vorgegebenen Anzahl an Fahrzeugen und einer insgesamt verfügbaren Leerzeit. Durch eine Rechenstudie analysieren wir die Austauschbeziehungen zwischen zusätzlich bereitgestellter Fahrzeugen sowie Erhöhung der verfügbaren Leerzeit und verspätet gestarteter Linienfahrten. Im Ergebnis wird ersichtlich, dass eine geeignete Kombination beider Instrumente maßgeblich dazu beiträgt, planungsbedingte Verspätungen zu vermeiden.

1 Einführung

Die Zuordnung von Linienfahrten zu Fahrzeugen (z.B. Bus, Straßenbahn) ist Gegenstand der Umlaufplanung. Im Ergebnis wird festgelegt, wann ein Fahrzeug sein Depot erstmalig verlässt, welche Linien- und Leerfahrten im Laufe des Tages bedient werden und wann das

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Knut Haase
Universität Hamburg
Fakultät für Betriebswirtschaft
Institut für Verkehrswirtschaft
Moorweidenstraße 18
20148 Hamburg
E-Mail: knut.haase@uni-hamburg.de

Fahrzeug im Depot endgültig wieder abgestellt wird. Die Umlaufplanung gehört zur Dienstleistungsproduktion von Verkehrsunternehmen des öffentlichen Personenverkehrs, wobei von einem gegebenen Fahrplan ausgegangen wird. Die Abbildung 1 verdeutlicht die Einordnung der Umlaufplanung in den mehrstufigen Leistungserstellungsprozess eines Verkehrsunternehmens des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Bezüglich eines umfangreichen Überblicks über Modellierungsansätze zur Umlaufplanung sei auf [3] verwiesen.

Zur Verbesserung des Gesamtergebnisses sind zwischen den einzelnen Planungsstufen Rückkopplungen vorgesehen. Diese können entfallen, wenn Stufen simultan geplant werden: In [2] und [11] werden die Umlaufplanung und die Fahrplanbildung unter Beachtung von Zeitfenstern für Linienfahrten betrachtet. In [5] wird ein Ansatz zur Bestimmung optimaler Dienste und Umläufe vorgestellt. In [7] wird die Fahrplanbildung in die Umlauf- und Dienstplanung integriert.

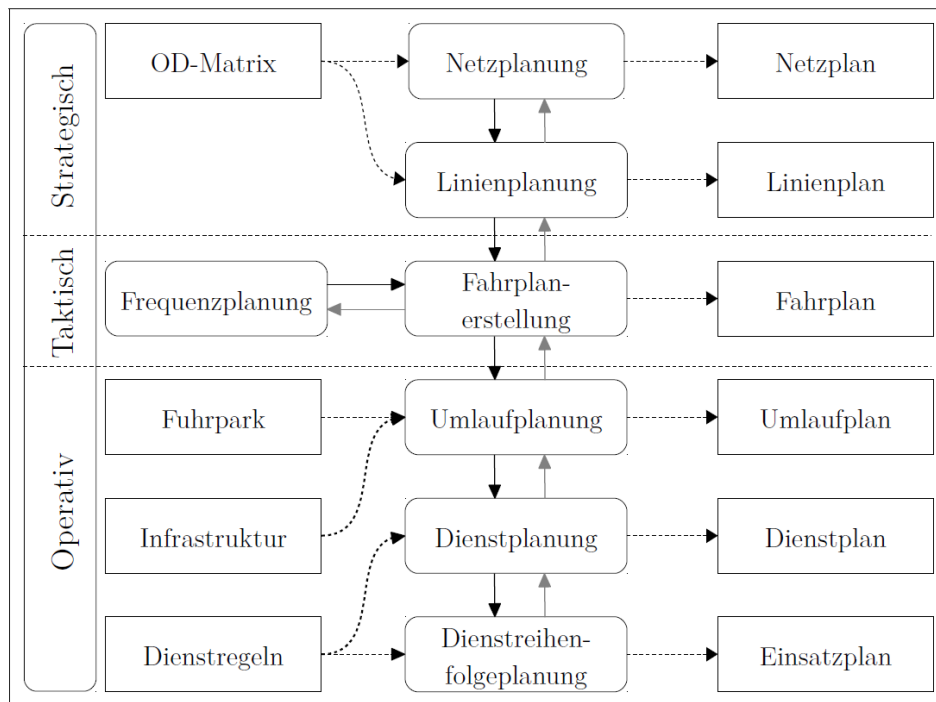


Abbildung 1: Dienstleistungsproduktion von Verkehrsunternehmen (in Anlehnung an [2, Bunte (2009)])

Die Abbildung 1 suggeriert, dass die OD-Matrix gegeben ist, d.h. die Anzahl der Passagiere, die von A nach B wollen, unabhängig vom Leistungsangebot ist. Dies steht im

Widerspruch zu empirischen Befunden (siehe z.B. [13, Abschnitt 3.9, S. 79ff] oder [9]). So haben die erwarteten Reisezeiten einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl. Da die Reisezeiten von den geplanten Linien und Fahrplänen abhängen, wäre eigentlich eine Rückkopplung zwischen der Angebotsplanung und der erwarteten Nachfrage erforderlich (siehe Abb. 2). Einen ersten Ansatz, der diesen Sachverhalt im Rahmen der Linienplanung aufgreift, finden wir in [8].

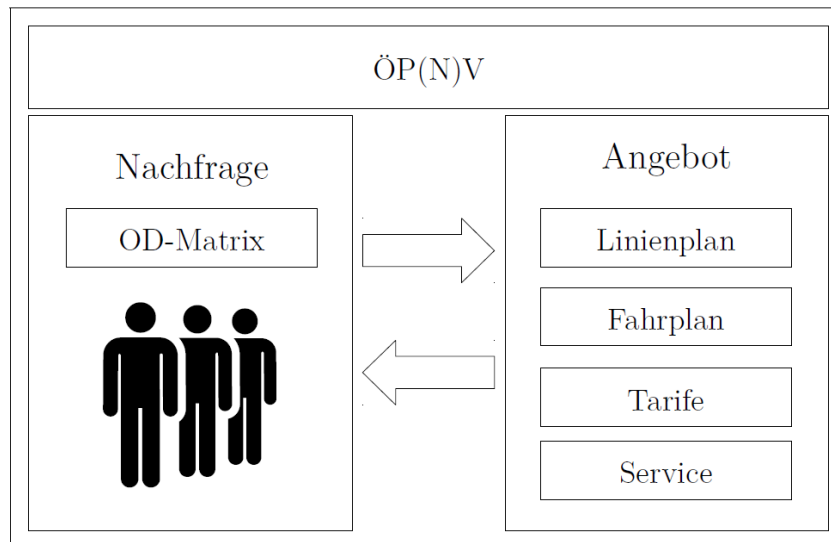


Abbildung 2: Wechselwirkung zwischen Angebot und Nachfrage im ÖP(N)V

Gerade bei morgendlichen Fahrten zur Arbeit ist es für die Individuen wichtig, dass ein Fahrplan eingehalten wird. Wenn zwischen zwei verknüpften Linienfahrten nur ein geringer zeitlicher Puffer liegt, kann eine Verspätung der ersten Fahrt zu einer Verspätung der zweiten Fahrt führen. Ein Umlaufplan ist robust, wenn derartige negative Wechselwirkungen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auftreten. In der Literatur finden wir kostenorientierte Ansätze zur robusten Umlaufplanung: [10], [12] und [6]. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass Strafterme für Verspätungen berücksichtigt werden.

Der weitere Aufbau des Beitrages ist wie folgt: Im nächsten Abschnitt stellen wir zunächst einen mehrstufigen Ansatz zur robusten Umlaufplanung vor. Stochastische Einflüsse bezüglich der Dauern von Linienfahrten werden über simulierte Szenarien erfasst. Im dritten Abschnitt stellen wir die Ergebnisse einer Rechenstudie vor. Dabei analysieren wir, inwieweit eine Erhöhung der Anzahl an Fahrzeugen oder der Leerzeiten einen Einfluss auf die Einhaltung der Startzeiten von Linienfahrten haben.

2 Modellbasierter Planungsansatz

In diesem Abschnitt präsentieren wir einen dreistufigen Ansatz zur robusten Umlaufplanung (vgl. [6]). Zunächst minimieren wir die Fahrzeuganzahl und in der zweiten Stufe die insgesamt erforderliche Leerzeit. In der letzten Stufe formulieren wir einen szenariobasierten Modellansatz zur Vermeidung verspätet gestarteter Linienfahrten.

2.1 MINIMIERUNG DER FAHRZEUGANZAHL

Eine Linienfahrt j ist kompatibel mit der Linienfahrt i , wenn der fahrplanmäßige Startzeitpunkt der Linienfahrt j größer oder gleich dem fahrplanmäßigen Endzeitpunkt der Linienfahrt i zuzüglich der Dauer der Leerfahrt von der Endhaltestelle der Fahrt i zur Starthaltestelle der Linienfahrt j ist. Nachfolgend gehen wir davon aus, dass wir nur einen Fahrzeugtyp und nur die Linienfahrten der Hauptverkehrszeit betrachten. Maximieren wir die Anzahl der Verknüpfungen kompatibler Fahrten, so erhalten wir als Ergebnis die zur Bedienung der Linienfahrten erforderliche minimale Anzahl an Fahrzeugen. Die Problemstellung ist ein lineares Zuordnungsproblem. Zur Formalisierung definieren wir folgende Mengen und Variablen:

Mengen

- I Menge der Linienfahrten; Indices i, j
- J_i Menge der zur Linienfahrt i kompatiblen Linienfahrten (Einhaltung des Fahrplanes)

Variablen

- F_1 Anzahl an Linienfahrtverknüpfungen
- X_{ij} =1, falls nach Linienfahrt i die Linienfahrt j bedient wird (0, sonst)

Das lineare Zuordnungsproblem kann nun wie folgt formalisiert werden:

Modell der ersten Stufe: Fahrzeugminimierung

$$\text{Maximiere } F_1 = \sum_i \sum_{j \in J_i} X_{ij} \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{j \in J_i} X_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I | j \in J_i} X_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in I \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (4)$$

Dabei gilt: (1) maximiert die Anzahl an Linienfahrtverknüpfungen, was äquivalent zur Minimierung der Fahrzeuganzahl ist. Jede Linienfahrt kann nur mit einer direkt nachfolgenden Linienfahrt sowie einer direkten Vorgängerfahrt verknüpft sein, was durch die Nebenbedingungen (2) bzw. (3) abgebildet wird.

2.2 MINIMIERUNG DER LEERZEITEN

Während der morgendlichen Hauptverkehrszeit finden mutmaßlich eher keine unbezahlten Pausen sowie Zwischenstopps in den Depots statt. Die Leerzeit zwischen zwei Linienfahrten eines Umlaufes sollte somit proportional zu den variablen Personalkosten sein. Daher ist die Annahme gerechtfertigt, dass die Minimierung der Leerzeiten nahezu äquivalent zur Minimierung der Personalkosten ist.

Zur Formalisierung unserer deterministischen Problemstellung definieren wir zunächst einige zusätzliche Parameter:

Zusätzliche Parameter

δ_{ij} fahrplanmäßiger zeitlicher Abstand zwischen dem Ende der Linienfahrt i und dem Beginn der Linienfahrt j

F_1^* optimaler Zielfunktionswert des ersten Modells (1) - (4)

f_1 zulässige Erhöhung der Fahrzeuganzahl

Der Parameter f_1 wird dazu dienen zu analysieren, welche Qualitätsverbesserung hinsichtlich der Fahrplanstabilität zu erwarten ist, wenn wir die Anzahl der Fahrzeuge erhöhen.

Unter Verwendung der zusätzlichen Parameter formalisieren wir nun das Modell der zweiten Stufe wie folgt:

Modell der zweiten Stufe: Leerzeitenminimierung

$$\text{Minimiere } F_2 = \sum_i \sum_{j \in J_i} \delta_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

unter den Nebenbedingungen

$$(2), (3), (4)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J_i} X_{ij} \geq F_1^* - f_1 \quad (6)$$

Die Zielfunktion (5) berechnet die entscheidungsrelevanten Leerzeiten. Dass die vorgegebene Anzahl an Fahrzeugen eingehalten wird, gewährleistet (6). Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl der Linienfahrten abzüglich der Anzahl an Verknüpfungen die erforderliche Anzahl an Fahrzeugen ergibt. Reduzieren wir also die Anzahl der Verknüpfungen, so erhöhen wir die erforderliche Fahrzeuganzahl.

2.3 MINIMIERUNG VERSPÄTETER STARTZEITEN VON LINIENFAHRTEN

In diesem Abschnitt beschränken wir uns darauf, davon auszugehen, dass lediglich die Dauern der Linienfahrten stochastischen Einflüssen ausgesetzt sind. Definieren wir die zusätzlichen

Parameter

- b_i fahrplanmäßiger Start der Linienfahrt i ,
- e_i fahrplanmäßiges Ende der Linienfahrt i ,
- d_{is} simulierte Dauer der Linienfahrt i im Szenario s ,
- l_{ij} Dauer der Leerfahrt von der Endstation der Linienfahrt i zur Startstation der Linienfahrt j ,
- f_2 zulässige Erhöhung der Leerzeiten,
- F_2^* optimaler Zielfunktionswert des zweiten Modells (5) - (6)

und die zusätzlichen

Variablen

- Z_{is} Verspätung der Linienfahrt i im Szenario s ,
- T_{is} Startzeit der Linienfahrt i im Szenario s ,

so kann unser Modell zur Bestimmung eines robusten Umlaufplanes (während der morgendlichen Hauptverkehrszeit) wie folgt formuliert werden:

Modell der dritten Stufe: Minimierung von Startzeitverspätungen

$$\text{Minimiere } F_3 = \frac{1}{|S|} \sum_s \sum_t Z_{is} \quad (7)$$

unter den Nebenbedingungen

(2), (3), (6)

$$\sum_i \sum_{j \in J_i} \delta_{ij} X_{ij} \leq F_2^* + f_2 \quad (8)$$

$$T_{is} + (d_{is} + l_{ij}) X_{ij} - T_{js} \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i, s \in S \quad (9)$$

$$T_{is} - Z_{is} \leq b_i \quad \forall i \in I, s \in S \quad (10)$$

$$Z_{is} \geq 0 \quad \forall i \in I, s \in S \quad (11)$$

$$T_{is} \geq b_i \quad \forall i \in I, s \in S \quad (12)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (13)$$

Die Zielfunktion (7) schätzt die erwartete Summe der Verspätungen in Minuten. Die insgesamt verfügbare Leerzeit wird durch (8) vorgegeben. Die Startzeit einer Linienfahrt im Szenario s wird in (9) bestimmt. Inwieweit eine Linienfahrt verspätet im Szenario s beginnt, wird durch (10) erfasst. Die Wertbereiche unserer Entscheidungsvariablen werden durch die Nebenbedingungen (11) bis (13) definiert. Zu beachten ist, dass die Ganzzahligkeitseigenschaft unserer Verknüpfungsvariablen X_{ij} nicht mehr – wie bei den ersten beiden Modellen – gilt.

3 Rechenstudie

Die nachfolgenden Ergebnisse wurden unter Verwendung von GAMS\Cplex (siehe [1] und [4]) auf einem Surface Pro 3 mit einer i7 CPU (2.30 GHz) und einem Arbeitsspeicher von 8 GB unter dem Betriebssystem Microsoft Windows 10 Pro bestimmt.

3.1 GENERIERUNG VON INSTANZEN

Für unsere Rechenstudie verwenden wir ausschließlich synthetische Instanzen. Unter Verwendung einer Gleichverteilung und einer Exponentialverteilung generieren wir die Daten der Instanzen. Der Parameter einer Exponentialverteilung wird zumeist mit λ bezeichnet, wobei der Erwartungswert einer exponentialverteilten Zufallszahl $\mu = 1/\lambda$ ist. Details sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

$U(a,b)$	liefert gleichverteilte Zufallszahl aus $\{a, a+1, \dots, b\}$
$\text{Exp}(\lambda)$	liefert exponentialverteilte Zufallszahl mit Erwartungswert $\mu = 1/\lambda$
Linienfahrten	150; Indices: $i \in \{1, \dots, 150\}$
Haltestellen	16; Indices: $h, k \in \{1, \dots, 16\}$
XY-Koordinaten der Haltestelle h	$X_h = U(1, 40), Y_h = U(1, 40)$
Starthaltestelle der Linienfahrt i	$U(1, 16)$
Endhaltestelle der Linienfahrt i	$U(1, 16)$
Distanz der Haltestellen h und k	$ X_h - X_k + Y_h - Y_k $
Dauer der Linienfahrt i	Distanz zwischen Start- und Endhaltestelle der Linienfahrt i plus $U(10, 20)$
Startzeit der Linienfahrt i	$i/180 \times 150$ gerundet
Szenarien	12; Indices: $s \in \{1, \dots, 100\}$
Simulierte Dauer der Linienfahrt i im Szenario s	Dauer der Linienfahrt i plus $\text{Exp}(\lambda)$ gerundet

Tabelle 1: Daten der generierten Instanzen

3.2 ANALYSE DER ERGEBNISSE

In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse unserer Rechenstudie zusammengefasst. Wir betrachten insgesamt 18 Instanzen (s. 1. Spalte). Der Erwartungswert der exponentialverteilten Linienfahrtzeitverlängerungen in den Instanzen 1 bis 9 und 10 bis 18 beträgt 3 bzw. 6 Minuten (s. 2. Spalte). Mindestens 53 Fahrzeuge werden zur Bedienung der 150 Linienfahrten während der 3-stündigen Hauptverkehrszeit benötigt. In Abhängigkeit von f_1 erhöht sich die Anzahl auf 55 oder 57 Fahrzeuge (vgl. 2. und 5. Spalte). In der 7. Spalte ist die geschätzte erwartete Gesamtverspätung angegeben, d.h. die Angaben entsprechen dem Zielfunktionswert F_3 . Der durchschnittliche zeitliche Puffer zwischen zwei verknüpften Linienfahrten ist in der vorletzten Spalte angegeben. In der letzten Spalte ist die zugehörige Varianz der Pufferzeiten wiedergegeben.

Instanz	μ	f_1	f_2	Fahr- zeuge	Leer- zeit	Verspät- ung	Mittelwert Puffer	Varianz Puffer
1	3	0	0	53	416	32.67	14.58	175.93
2			60	53	476	15.50	14.51	120.02
3			120	53	536	11.42	14.12	109.02
4	3	2	0	55	312	25.83	17.19	197.75
5			60	55	372	9.33	17.60	155.95
6			120	55	427	6.00	17.14	143.80
7	3	4	0	57	264	15.33	19.80	222.68
8			60	57	324	3.83	20.44	188.83
9			120	57	382	1.33	20.25	159.37
10	6	0	0	53	416	146.92	14.75	178.08
11			60	53	476	99.92	14.62	102.63
12			120	53	536	91.67	14.20	90.36
13	6	2	0	55	312	112.83	17.41	195.44
14			60	55	369	69.00	18.03	155.74
15			120	55	429	54.00	17.54	109.45
16	6	4	0	57	264	76.67	20.06	214.28
17			60	57	323	38.00	20.87	150.07
18			120	57	384	30.75	20.51	119.24

Tabelle 2: Ergebnisse der Rechenstudie

Folgende Zusammenhänge lassen sich aus den Ergebnissen für die untersuchten Instanzen ableiten:

Je stärker die Dauern der Linienfahrten stochastischen Einflüssen ausgesetzt sind, desto höher sind die erwarteten Verspätungen; vergleiche z.B. Instanz 1 und Instanz 10 ($\mu = 3$ bzw. $\mu = 6$).

Zusätzliche Leerzeiten erhöhen nicht die durchschnittlichen Pufferzeiten. Sie reduzieren aber die Varianz der Pufferzeiten. Offenbar werden hohe Pufferzeiten und niedrige Pufferzeiten vermieden, was eine Reduzierung der Varianz der Pufferzeiten bewirkt.

Eine Erhöhung der erlaubten Leerzeitminuten wirkt sich stets positiv auf die Einhaltung der Startzeiten von Linienfahrten aus.

Insbesondere bei geringen Linienfahrzeitverlängerungen (Instanzen 1 bis 9) ist eine Erhöhung der zulässigen Leerzeit wirkungsvoller als eine Erhöhung der Fahrzeuganzahl. So ist in den Instanzen 2 und 7 eine Erhöhung der gesamten Leerzeit von 60 Minuten nahezu genauso wirkungsvoll wie der Einsatz von 4 zusätzlichen Fahrzeugen.

Beide Maßnahmen (Leerzeitminuten, Fahrzeuganzahl) ergänzen sich positiv. Insbesondere bei erheblichen Linienfahrzeitverlängerungen erscheint eine Kombination beider Maßnahmen angeraten, um verspätete Linienstartzeiten gravierend zu vermeiden.

Literatur

- [1] Bruce A. McCarl et. al. McCarl Expanded GAMS User Guide, GAMS Release 24.2.1. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 2013.
- [2] Stefan Bunte. Lösungen für Anwendungsfälle der Fahrzeugeinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr. PhD thesis, 2009.
- [3] Stefan Bunte and Natalia Kliewer. An overview on vehicle scheduling models. *Public Transport*, 1(4):299–317, 2009.
- [4] GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA. GAMS A User’s Guide, GAMS Release 24.2.1, 2013.
- [5] Knut Haase, Guy Desaulniers, and Jacques Desrosiers. Simultaneous vehicle and crew scheduling in urban mass transit systems. *Transportation science*, 35(3):286–303, 2001.
- [6] Dennis Huisman, Richard Freling, and Albert PM Wagelmans. A robust solution approach to the dynamic vehicle scheduling problem. *Transportation Science*, 38(4):447–458, 2004.
- [7] András Kéri and Knut Haase. Simultaneous vehicle and crew scheduling with trip shifting. In *Operations Research Proceedings 2007*, pages 467–472. Springer, 2008.
- [8] Michael J Klier and Knut Haase. Urban public transit network optimization with flexible demand. *Or Spectrum*, 37(1):195–215, 2015.
- [9] Sven Müller, Stefan Tscharktschiew, and Knut Haase. Travel-to-school mode choice modelling and patterns of school choice in urban areas. *Journal of Transport Geography*, 16(5):342–357, 2008.
- [10] Marc Naumann, Leena Suhl, and Stefan Kramkowski. A stochastic programming approach for robust vehicle scheduling in public bus transport. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 20:826–835, 2011.
- [11] Verena Schmid and Jan Fabian Ehmke. Integrated timetabling and vehicle scheduling with balanced departure times. *OR spectrum*, 37(4):903–928, 2015.
- [12] Yindong Shen, Jia Xu, and Jingpeng Li. A probabilistic model for vehicle scheduling based on stochastic trip times. *Transportation Research Part B: Methodological*, 85:19–31, 2016.
- [13] Kenneth E Train. *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge university press, 2009.