

Zeitschrift für Studium und Forschung

WiSt

Wirtschafts-
wissen-
schaftliches
Studium

51. Jahrgang
Heft 04/2022

**Logistik 4.0 –
Einsatz von Digitalisierungstechniken
in der Logistik**

Inga Pollmeier, Sonja Schade
und Marion Steven

**Der Ordoliberalismus: Begriff,
historische Entwicklung und
gegenwärtige Debatte**

Tim Krieger und Daniel Nientiedt

Inflation –

Determinanten von Trend und Zyklus

Uwe Vollmer

On-Demand-Plattformen für den Öffentlichen Personennahverkehr

Fabian Anzenhofer und Robert Klein



ISSN 0340-1650



2350202204

Agiles Banking

On-Demand-Plattformen für den Öffentlichen Personennahverkehr

Digitale On-Demand-Plattformen für Mobilitätsdienstleister haben im vergangenen Jahrzehnt zunehmend an Popularität in Forschung und Praxis gewonnen. Der Öffentliche Personennahverkehr kann derartige Plattformen einsetzen und bereits bestehende Angebote attraktiver gestalten. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf Problemen der operativen Planungsebene, insbesondere der Tourenplanung. Dafür bereiten wir einen Modellierungs- sowie heuristischen Lösungsansatz für ein ausgewähltes Tourenplanungsproblem didaktisch auf.



Fabian Anzenhofer, M.Sc., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Analytics & Optimization an der Universität Augsburg. Bevorzugte Forschungsgebiete: Urban Logistics, Smart Mobility, Customer Choice Modeling, Dynamic Programming.



Prof. Dr. Robert Klein ist Inhaber des oben genannten Lehrstuhls. Bevorzugte Forschungsgebiete: Pricing, Revenue Management, Discrete Choice Analysis, Last Mile Logistics.

Summary: Digital on-demand platforms for mobility service providers have been gaining popularity in research and practice over the past decade. Public transport can use such platforms and make already existing services more attractive. In this paper, we consider problems at the operational planning level with a focus on route planning. For this purpose, we introduce a modelling and heuristic solution approach for a selected vehicle routing problem.

Stichwörter: On-Demand-Plattformen, Öffentlicher Personennahverkehr, Ridepooling, Tourenplanung, Operations Research

1. Einordnung und Relevanz

Die Urbanisierung ist ein Megatrend mit drastischen Auswirkungen auf das Leben in städtischen und ländlichen Räumen. Prognosen bis 2050 lassen vermuten, dass 68 % der Weltbevölkerung in Städten leben werden. Diese Entwicklung stellt den **Öffentlichen Personennahverkehr** (ÖPNV) sowohl im städtischen als auch im ländlichen Raum vor erhebliche Herausforderungen.

Im städtischen Raum ist die wachsende Bevölkerungszahl und die daraus resultierende Nachfrage nach Mobilität ein wesentlicher Treiber für zunehmende Verkehrsprobleme und eine steigende Umweltbelastung. Um diese Effekte zu reduzieren, muss der ÖPNV nicht nur die erhöhte Nachfrage an sich bewältigen, sondern soll zugleich zum **Modal Shift** beitragen, welcher die Verkehrsverlagerung weg vom motorisierten Individualverkehr zum Ziel hat. Eine wesentliche Herausforderung besteht dabei in der Schaffung attraktiver Angebote in Nebenverkehrszeiten und für Kunden aus Randgebieten.

Im ländlichen Raum ergibt sich im Umkehrschluss das Problem einer sinkenden Bevölkerungszahl. Als Folge werden daher klassische Angebote wie Linienbusse immer weniger genutzt und für die Betreiber zunehmend unrentabel. Dies führt häufig zu einer weiteren Reduktion des Angebots und damit der Attraktivität aus Sicht der Kunden. Eine zentrale Herausforderung hier ist die Aufrechterhaltung von **Mobilität** zur allgemeinen **Daseinsvorsorge** jenseits des motorisierten Individualverkehrs.

Als eine Möglichkeit zum Umgang mit den genannten Herausforderungen – sowohl für den städtischen als auch den ländlichen Raum – werden häufig **On-Demand-Plattfor-**

men (ODP) für den ÖPNV gesehen. Im Rahmen dieses Beitrags gehen wir zunächst auf digitale ODPen ein, bevor wir die Optimierung als ein Werkzeug zur Lösung eines zentralen Planungsproblems beim Einsatz von ODPen vorstellen.

2. Digitale On-Demand-Plattformen

Mobilitätssysteme befinden sich seit etwa einem Jahrzehnt weltweit im Wandel. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung ist die Digitalisierung, die intuitive, effiziente und umweltfreundliche Mobilitätsdienste ermöglicht. Im privaten und öffentlichen Verkehrssektor folgt daraus ein Trend zu bedarfsorientierten Dienstleistungen im Rahmen von **Mobility-On-Demand (MOD)**. Anbieter stellen digitale ODPen bereit, über die Nutzer auf ein kundenorientiertes, fahrplan- und häufig haltestellenloses Angebot zugreifen und nach individuellem Bedarf maßgeschneiderte Fahrten buchen können.

2.1. Ridepooling als Alternative zum Ridehailing

Insbesondere im städtischen Raum haben sich kommerzielle ODPen wie beispielsweise *myTaxi*, *Uber* oder *Lyft* etabliert und belegen den Mehrwert der Digitalisierung für MOD-Systeme. Kunden können in Echtzeit per Smartphone-App einen Fahrtenwunsch mit individuellem Abhol- und Zielort sowie zeitlichen Präferenzen abgeben und werden zeitnah bedient. In der Regel handelt es sich dabei um ein **Ridehailing**, wobei „Ride“ für Fahrt und „Hailing“ für Herbeiwinken steht und jede Fahrt genau einen Kundenwunsch bedient.

Eine vielversprechende Alternative dazu ist das **Ridepooling**, das erst durch ein digitales Auftragsmanagement effizient umsetzbar wird. Ridepooling unterscheidet sich vom klassischen Ridehailing dadurch, dass durch intelligente Nachfragesteuerung und Tourenplanung mehrere verschiedene Kundenanfragen in einem Fahrzeug gebündelt werden. Das bedeutet, dass ein Fahrzeug mehrere Fahrgäste, die Umwege für einen ermäßigten Fahrtenpreis in Kauf nehmen, gleichzeitig transportiert. *UberPool* und *Shared Lyft* sind Beispiele für solche Systeme.

Abgesehen davon, dass Ridepooling im Vergleich zum traditionellen Ridehailing nachweislich Staubbildung sowie Emissionen reduzieren kann, profitieren alle Stakeholder finanziell. Während die Passagiere ermäßigte Fahrtenpreise zahlen, steigen die Erlöse pro Fahrt und es können mehr Anfragen mit der gleichen Anzahl an Fahrzeugen bedient werden. Eine empirische Simulationsstudie von *Vazifeh et al. (2018, S. 1 ff.)* zeigt am Beispiel New York, dass sich die Größe einer klassischen Taxiflotte, unter der Annahme, dass die gleiche Anzahl an Kunden ohne Verzögerungen bedient wird, durch Ridepooling um bis zu 30 % reduzieren lässt.

2.2. Bedienformen im ÖPNV

Im Gegensatz zu kommerziell ausgerichteten Mobilitätsangeboten, wie *Uber* oder *Lyft*, ist das übergeordnete Ziel im ÖPNV nicht die Gewinnmaximierung, sondern die kosteneffiziente und umweltfreundliche Optimierung der **Bedienungsqualität** des ÖPNV-Gesamtsystems, wobei die Qualität hier Aspekte wie die Bedienhäufigkeit, die Betriebszeit sowie die Zugänglichkeit umfasst.

Der ÖPNV kombiniert zu diesem Zweck unterschiedliche Serviceangebote. Der **Linienbetrieb** bildet das Grundgerüst des ÖPNV und umfasst sämtliche Bedienformen des konventionellen ÖPNV-Verkehrs, bei denen eine regelmäßige Verbindung mittels Linien für den Personenverkehr genutzt wird. Ein Linienbus fährt beispielsweise eine fest definierte Strecke nach einem fixen Zeitplan. Bedienformen des Linienverkehrs weisen bei einer gerichteten Nachfragestruktur in der Regel eine hohe Bündelungsfähigkeit sowie zeitliche Verlässlichkeit auf.

Neben dem Linienbetrieb existieren **bedarfsorientierte, flexible Bedienformen**, die aus einer räumlichen und zeitlichen Flexibilisierung des bereits bestehenden Linienverkehrs entstanden sind (vgl. *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2009, S. 25 ff.*). Die räumliche Flexibilisierung bezieht sich auf die Gestaltung der Verbindung zwischen Abhol- und Zielort sowie auf den Zu- und Ausstieg eines Kunden. Auf zeitlicher Ebene werden fahrplangebundene und nicht fahrplangebundene Angebotsformen unterschieden.

Zu den flexiblen Bedienformen zählt auch der **Flächenbetrieb**, bei dem entweder Haltestellen oder individuelle Standorte angefahren werden. Eine Fahrt wird nur dann durchgeführt, falls eine Buchung vorliegt (MOD), und ist an keinen Fahrplan gebunden. Die Reihenfolge der Bedienung und damit die Fahrtstrecke resultiert aus den vorliegenden Fahrtwünschen. Entsprechende Bedienformen zeichnen sich durch ihre Kosteneffizienz und Nutzerfreundlichkeit bei geringem Verkehrsaufkommen und disperser Nachfragestruktur aus, da Leerfahrten weitgehend vermieden werden können.

2.3. On-Demand-Plattformen für den ÖPNV

Aufgrund der Ziele des ÖPNV werden MOD-Angebote im Flächenbetrieb im Regelfall als Ridepooling-Systeme realisiert. Grundsätzlich sind solche Systeme kein neues Phänomen im ÖPNV. Bereits Ende der 70er Jahre wurden zum Beispiel in Deutschland **Anrufsammeltaxis** eingesetzt, die allerdings häufig wenig Erfolg hatten (vgl. *Enoch et al., 2006, S. 5 ff.*). Die Weiterentwicklung einer analogen Auftragsabwicklung und Planung zu einer digitalen ODP bietet den großen Vorteil, dass das Angebot zum einen komfortabler

für die Kunden und zum anderen kostengünstiger für den Betreiber wird. Daher werden digitale ODPen inzwischen als eine wesentliche Komponente einer nachhaltigen Verkehrsentwicklung gesehen.

Speziell können Ridepooling-Systeme als Ergänzung des bestehenden Verkehrsangebots in städtischen und ländlichen Räumen dienen (**Integrationsansatz**) oder dieses vollständig ersetzen (**Substitutionsansatz**). Die tatsächliche Umsetzung hängt von den Vorgaben und Zielen des Aufgabenträgers, den örtlichen Gegebenheiten und Strukturen wie auch den individuellen Finanzierungsmöglichkeiten ab (vgl. *Wurm/Becker*, 2020, S. 5). In Großstädten herrscht meist bereits ein attraktives Angebot von privaten sowie öffentlichen Mobilitätsdienstleistern. Hier ist beispielsweise eher eine ergänzende als eine verdrängende Rolle denkbar. In Randgebieten bietet sich der Einsatz an Endpunkten des ÖPNV, zur Erweiterung des Verkehrsgebiets oder zu Nebenverkehrszeiten an. Im ländlichen Raum könnte grundlegend die Sicherung der Mobilität zur Daseinsvorsorge im Vordergrund stehen.

Aufgrund der angedachten Rolle von Ridepooling-Systemen im Rahmen der nachhaltigen Verkehrsentwicklung entstehen deutschlandweit zunehmend **Pilotprojekte**. Der *Wittlich-Shuttle* ist ein Beispiel im rheinland-pfälzischen Wittlich zur Erneuerung des ineffizienten und schwach genutzten Linien-Stadtbusses. Kunden können Fahrten über eine Smartphone-App oder per Anruf buchen und werden in einem fixen Verkehrsgebiet flexibel mit der Option zur Fahrtenbündelung bedient. Interessant ist, dass ÖPNV-Knotenpunkte häufige Ziele sind. Daraus lässt sich schließen, dass der Linienverkehr als Basis nicht gänzlich ersetzt werden sollte und das *Wittlich-Shuttle* eher als eine Ergänzung gesehen werden kann (vgl. *Klingenhöfer/Barillère-Scholz*, 2020, S. 18 ff.).

3. Optimierung als Instrument für On-Demand-Plattformen

Ein ÖPNV-Betreiber einer ODP muss sowohl auf der strategisch-taktischen als auch auf der operativen Ebene Planungsentscheidungen treffen. Auf der **strategisch-taktischen Planungsebene** werden elementare, langfristige Entscheidungen über die grundlegende Gestaltung des Ridepooling-Systems getroffen. Dabei handelt es sich beispielsweise um Fragen bezüglich der Standortplanung von Depots und möglicherweise Haltestellen oder der Flottengröße. Im Folgenden liegt der Fokus vor allem auf der **operativen Planungsebene**. Hier werden regelmäßige, kurzfristige Entscheidungen des laufenden Tagesgeschäfts betrachtet.

3.1. Tourenplanung für On-Demand-Plattformen

Eine zentrales Entscheidungsproblem auf operativer Planungsebene ist die Zuordnung von akzeptierten Kunden (Buchungen) zu Fahrzeugen und die Festlegung von Touren für jedes Fahrzeug. Es zählt damit zur Klasse der **Tourenplanungsprobleme** (vgl. *Toth/Vigo*, 2014, S. 1).

Bei der Lösung des Entscheidungsproblems sind in der Regel mehrere Ziele relevant. Bei den relevanten Zielgrößen kann es sich um die entstehenden **Transportkosten**, die **Bedienungsqualität** oder die **Auslastung der Fahrzeuge** handeln. Die resultierenden, zu minimierenden oder maximierenden Ziele sind häufig konfliktär. So führt eine Senkung von Transportkosten durch ein verstärktes Pooling zumeist zu längeren individuellen Fahrzeiten und damit einer sinkenden Bedienungsqualität.

Zur Auflösung der Zielkonflikte lässt sich ein **Hauptziel** deklarieren. Alle übrigen Ziele werden dann entweder vollständig vernachlässigt oder als **Nebenziele** in Form von Satisfizierungszielen berücksichtigt. Die folgenden Ausführungen unterstellen als Hauptziel die Minimierung der Transportkosten. Zur Sicherstellung der Bedienungsqualität werden kundenspezifische Zeitfenster definiert, in denen der Transport der Kunden stattfinden soll und welche die maximal tolerierbare Verzögerung berücksichtigen. Eine Erfassung der Fahrzeugauslastung erfolgt nicht. Unabhängig davon muss sichergestellt werden, dass zu keinem Zeitpunkt die Anzahl der Fahrgäste die Kapazität eines Fahrzeugs überschreitet.

Bei dem entstehenden Tourenplanungsproblem handelt es sich um ein **Dial-a-Ride Problem (DARP)** aus dem Bereich der Personenverkehrslogistik, das sich mit Hilfe von Modellen und Methoden des Operations Research lösen lässt (vgl. *Doerner/Salazar-González*, 2014, S. 193 ff.).

Abb. 1 zeigt ein Beispiel. Der ÖPNV strukturiert seine Verkehrsgebiete in der Regel in **Tarifzonen**, die oftmals eine Wabenstruktur aufweisen. Im Beispiel besteht das Verkehrsgebiet aus drei Waben und einem Depot, das sich in Wabe I befindet. Vier Kunden haben gebucht, die jeweiligen Start-, Zielorte und Zeitfenster für ihre Bedienung sind angegeben. Es steht ein Fahrzeug mit einer Kapazität von drei Fahrgästen zur Verfügung, das im Depot startet und nach der Bedienung der Kunden dahin zurückkehren soll. Die Bewertungen an den Pfeilen geben Fahrzeiten (in Minuten) an. Vereinfachend entsprechen die Fahrzeiten auch den Fahrkosten, was durch den häufig annähernd proportionalen Zusammenhang zwischen Fahrzeiten, -strecken und -kosten gerechtfertigt ist.

Die durchgezogenen Pfeile stellen eine **Tour** da, die im Depot zum Zeitpunkt 0 beginnt und dort endet. Zunächst wird Kunde 1 zum Zeitpunkt 10 (nach 10 Minuten) abgeholt. Zum Zeitpunkt 22.5 erreicht das Fahrzeug den Kunden 2.

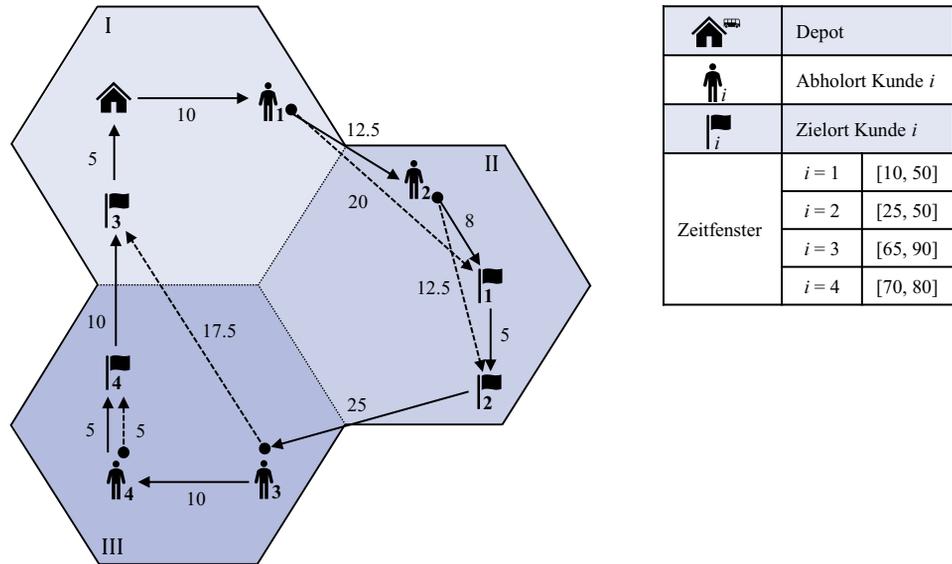


Abb. 1: Beispiel für ein DARP

Aufgrund des vorgegebenen Zeitfensters muss das Fahrzeug mit Kunden 1 jedoch noch warten, bevor Kunde 2 zum Zeitpunkt 25 zusteigt. Nachdem die Kunden 1 und 2 abgesetzt wurden, sind die Kunden 3 und 4 an der Reihe, wobei Kunde 4 das Fahrzeug vor Kunde 3 verlässt. Die Tourdauer beträgt 95 Minuten.

Die gestrichelten Pfeile stellen direkte Fahrten zwischen einem Start- und Zielort dar. Man erkennt, dass die Kunden 1, 2 und 3 aufgrund des **Poolings** länger unterwegs sind. Die maximale Verlängerung der Fahrzeit tritt bei Kunde 3 auf und beträgt 7.5 Minuten. Von der gesamten Fahrzeit werden 13 Minuten mit zwei Fahrgästen erbracht. Die Analyse der Zeitfenster für die Kunden 3 und 4 zeigt, dass eine separate Beförderung den Einsatz eines zweiten Fahrzeugs notwendig gemacht hätte.

3.2. Mathematisches Modell des Dial-a-Ride Problems

Im Folgenden wird ein mathematisches Optimierungsmodell für das Single Vehicle DARP (SDARP) mit einem einzigen Fahrzeug vorgestellt. Das SDARP lässt sich durch einen gerichteten Graphen $G = (V, A)$ mit der Knotenmenge V und der Pfeilmenge A beschreiben und als **gemischt-ganzzahliges Programm** formulieren (vgl. Cordeau/Laporte, 2007, S. 31 ff.). Ein Graph besteht aus Knoten, die miteinander verbunden sein können. Besitzen die Verbindungen eine Orientierung, nennt man sie Pfeile und spricht von gerichteten Graphen. Ein gemischt-ganzzahliges Programm enthält sowohl kontinuierliche als auch ganzzahlige Variablen. Es liegen Buchungen von n Kunden mit gewünschten Start- und Zielorten vor. Für jeden Kunden $i \in \{1, \dots, n\}$ entspricht i dem Start- und $j = 2i + 1$ dem Zielort. Die Abbildung des SDARPs als Graph erfolgt durch die **Knotenmenge** $V = P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}$. Das Depot wird dupliziert, wobei die zugeordneten Knoten 0 und $2n + 1$ den

Start bzw. das Ende der Tour repräsentieren. Die Knoten der Mengen $P = \{1, \dots, n\}$ und $D = \{n + 1, \dots, 2n\}$ korrespondieren entsprechend zu den Start- und Zielorten der Kunden.

Die **Pfeilmenge** A enthält drei Typen von Pfeilen (i, j) . Dies sind zunächst Pfeile vom Depot $i = 0$ zu allen Startorten $j \in P$ sowie Pfeile von den Zielorten $j \in D$ zum Depot $j = 2n + 1$. Der dritte Typ umfasst Pfeile zwischen allen Paaren aus $(i, j) \in P \cup D$, außer für Paare $i \neq j$ und $i \neq n + j$. Ein Pfeil (i, j) mit $i = j$ würde von einem Knoten zu sich selbst führen, ein Pfeil (i, j) mit $i = n + j$ von einem Zielort i eines Kunden zu seinem Startort j .

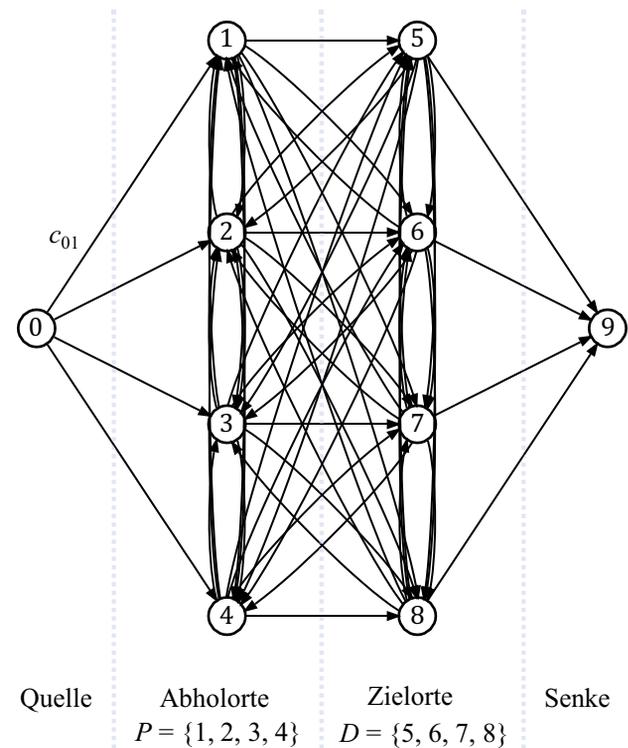


Abb. 2: Gerichteter Graph für vier Kunden ($n = 4$)

Für unser Beispiel mit 4 Kunden aus Abschnitt 3.1 ergibt sich der Graph mit den Knotenmengen $P = \{1, 2, 3, 4\}$, $D = \{5, 6, 7, 8\}$, $V = \{0, 1, \dots, 8, 9\}$ (siehe Abb. 2). Es existiert kein Pfeil $(5, 1)$, da dies einer Fahrt vom Zielort des Kunden 1 zu seinem Startort entsprechen würde. Durch weitere Analysen lässt sich A ggf. weiter verkleinern. So können aufgrund der gegebenen Zeitfenster alle Pfeile von den Knoten 3, 4, 7 und 8 zu den Knoten 1, 2, 5 und 6 eliminiert werden, da das Abholen und Absetzen der Kunden 3 und 4 erst nach Absetzen der Kunden 1 und 2 erfolgt.

Bei der Formulierung als **mathematisches Optimierungsmodell** sind drei wesentliche Restriktionen zu berücksichtigen, welche durch geeignete Variablen und Nebenbedingungen abgebildet werden müssen.

Zunächst muss eine **Tour** gefunden werden, die im Depot startet sowie endet und jeden Kunden von seinem Start- zu seinem Zielort transportiert. Eine solche Tour entspricht im Graphen V einem Weg, der in Pfeilrichtung von Knoten 0 zum Knoten $2n + 1$ führt und alle Knoten $i \in \{1, \dots, 2n\}$ genau einmal besucht. Eine binäre Variable x_{ij} gibt an, ob eine Strecke von Knoten i zu Knoten j gefahren wird ($x_{ij} = 1$) oder nicht ($x_{ij} = 0$). Die Lösung aus Abb. 1 repräsentiert die Tour $(0, 1, 2, 5, 6, 3, 4, 8, 7, 9)$ in Abb. 2. Für die Tour gilt $x_{01} = x_{12} = x_{25} = x_{56} = x_{63} = x_{34} = x_{48} = x_{87} = x_{79} = 1$. Alle anderen Variablen x_{ij} mit $(i, j) \in A$ besitzen den Wert 0.

Des Weiteren ist die **Fahrzeugkapazität** von Q Fahrgästen zu jeder Zeit einzuhalten. Die Veränderung der Anzahl der Fahrgäste in einem Knoten i wird dazu durch einen Parameter q_i ausgedrückt, die Variable Q_i erfasst die Anzahl an Fahrgästen, wenn das Fahrzeug Knoten i verlässt. Für die Knoten $i = 1, \dots, n$ (Startorte) steigt die Anzahl der Fahrgäste um einen zusätzlichen Kunden ($q_i = 1$) während sie für die Zielorte $i = n + 1, \dots, 2n$ um einen Kunden sinkt ($q_i = -1$). Für das Depot gilt $q_0 = q_{2n+1} = 0$. In der oben genannten Tour ergeben sich beispielhaft die Werte $Q_1 = 1$, $Q_2 = 2$, $Q_5 = 1$ und $Q_6 = 0$, nachdem die Kunden 1 und 2 bedient wurden. Schließlich sind die **zeitlichen Präferenzen** der Kunden zu berücksichtigen. Dazu ist für jeden Kunden i ein Zeitfenster $[e_i, l_i]$, in dem die Fahrt stattfinden soll, definiert. e_i entspricht dem frühesten Abholzeitpunkt am Startort $i \in P$ und l_i dem spätesten Ankunftszeitpunkt am Zielort $i + n \in D$. Die Variable B_i erfasst die Zeit, zu der das Fahrzeug den Knoten i bedient. Für unsere Tour resultieren beispielhaft die Werte $B_1 = 10$, $B_2 = 25$, $B_5 = 33$, $B_6 = 38$.

Unter den vorliegenden Restriktionen wird eine Tour gesucht, die **minimale Kosten** verursacht. Damit ergibt sich das folgende Optimierungsmodell (3.1) – (3.12):

$$\text{Minimiere } \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{2n + 1\} \quad (3.2)$$

$$\sum_{(i,2n+1) \in A} x_{i,2n+1} = 1 \quad (3.3)$$

$$\sum_{(i,i) \in A} x_{ji} - \sum_{(i,j) \in A} x_{ij} = 0 \quad \forall i \in P \cup D \quad (3.4)$$

$$B_j \geq B_i + c_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.5)$$

$$Q_j \geq Q_i + q_j - M(1 - x_{ij}) \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.6)$$

$$B_{i+n} - B_i \geq c_{ij} \quad \forall i \in P \quad (3.7)$$

$$e_i \leq B_i \quad \forall i \in P \quad (3.8)$$

$$B_{i+n} \leq l_i \quad \forall i \in P \quad (3.9)$$

$$Q_i \leq Q \quad \forall i \in V \quad (3.10)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3.11)$$

$$B_i \geq 0, Q_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (3.12)$$

Die Zielfunktion (3.1) minimiert die Summe über die Kosten, die für jede befahrene Strecke (i, j) mit $x_{ij} = 1$ anfallen. Die Nebenbedingung (3.2) stellt sicher, dass jeder Start- und Zielort eines Kunden i sowie das Depot genau ein Mal verlassen werden. Die Nebenbedingung (3.3) gewährleistet, dass die Tour im Depot endet. Die Nebenbedingung (3.4) bezeichnet man häufig als Flusserspartheilungsbedingung. Jeder Knoten muss besucht und auch wieder verlassen werden.

Die Nebenbedingungen (3.5) und (3.6) bestimmen für alle Knoten $j \in V$, zu welchem Zeitpunkt B_j der Knoten erreicht wird und die resultierende Anzahl der Fahrgäste Q_j . Bei M handelt es sich um eine Konstante, die einer hinreichend großen Zahl entspricht. Sowohl in den Nebenbedingungen (3.5) und (3.6) sorgt der Term $-M(1 - x_{ij})$ dafür, dass die Nebenbedingungen für $x_{ij} = 0$ immer erfüllt sind. Im Umkehrschluss greifen sie nur für den Fall $x_{ij} = 1$, d.h. wenn die Strecke (i, j) befahren wird.

Die Nebenbedingung (3.7) gewährleistet, dass der Startort eines Kunden i vor seinem Zielort angefahren wird. Zusätzlich stellen die Nebenbedingungen (3.8) bis (3.9) die Einhaltung der Zeitfenster sicher. Nebenbedingung (3.10) garantiert, dass die Kapazität Q nicht überschritten wird. Die Nebenbedingungen (3.11) und (3.12) definieren die Entscheidungsvariablen.

3.3. Heuristische Lösungsverfahren für das Dial-a-Ride Problem

Das DARP ist ein **NP-schweres** Problem (vgl. *Baugh et al.*, 1998, S. 96 ff.). Das bedeutet, dass es für größere Probleminstanzen in der Regel nicht möglich ist, durch Anwendung eines exakten Verfahrens eine optimale Lösung zu finden und als solche zu beweisen. Aus diesem Grund existiert eine große Vielfalt **heuristischer Lösungsverfahren** für das statische DARP (vgl. *Molenbruch et al.*, 2017, S. 307 ff.).

Im Folgenden soll beispielhaft eine **Insertion-Heuristik** aus dem Bereich der Eröffnungsheuristiken vorgestellt werden, die an das Verfahren von *Haferkamp* und *Ehmke*

(2021, S. 8 ff.) angelehnt ist. Ausgehend von einer leeren Tour wird die gesuchte Gesamt tour konstruiert, indem Kunden iterativ nach einer vorgegebenen Reihenfolge (z.B. nach monoton steigenden Abholzeitpunkten) in eine vorläufige Tour eingeplant werden. Die Heuristik arbeitet dabei nach dem Best-Insertion-Prinzip, das heißt, die Positionen des Start- und Zielorts in der Tour werden kostenminimal gewählt. Aufgrund der vorgegebenen Zeitfenster kann der Fall auftreten, dass keine zulässigen Einfügepositionen für den Start- und/oder Zielort existieren. In diesem Fall kann eine alternative Einplanungsreihenfolge untersucht werden.

Das genaue Vorgehen wird am Beispiel aus Abschn. 3.1. verdeutlicht. Auf eine Kapazitätsbeschränkung wird zur Vereinfachung verzichtet. Die im Laufe des Verfahrens gebildeten Touren beschreiben wir durch Tupel $r = (i_0, i_1, \dots,$

$i_m, \dots, i_M, i_{M+1})$. M entspricht dabei der Anzahl der bereits eingeplanten Start- und Zielorte. Der Ort i_m wird an der m -ten Position der Tour bedient, die am Depot beginnt und endet ($i_0 = i_{M+1} = 0$). B_{i_m} entspricht dem Bedienzeitpunkt am Ort i_m .

Die Heuristik startet mit einer leeren Tour $r := (0, 0)$, die Kunden werden in der Reihenfolge ihrer Nummerierung betrachtet. In der ersten Iteration wird zunächst Kunde $i = 1$ mit dem Zeitfenster $[e_1 = 10, l_1 = 50]$, eingefügt und es resultiert die Tour $r = (0, 1, 5, 0)$. Da es sich um den einzigen Kunden handelt, wird sein Zeitfenster eingehalten.

Als nächstes wird in der zweiten Iteration der Kunde $i = 2$ mit dem Zeitfenster $[25, 50]$ betrachtet. Dazu werden für den Abholort 2 die möglichen Einfügepositionen $m = 1, \dots, 3$ untersucht. Abb. 3 zeigt den Fall der Einfügeposition $m = 1$. In diesem Fall resultiert die vorläufige Tour $r = (0, 2,$

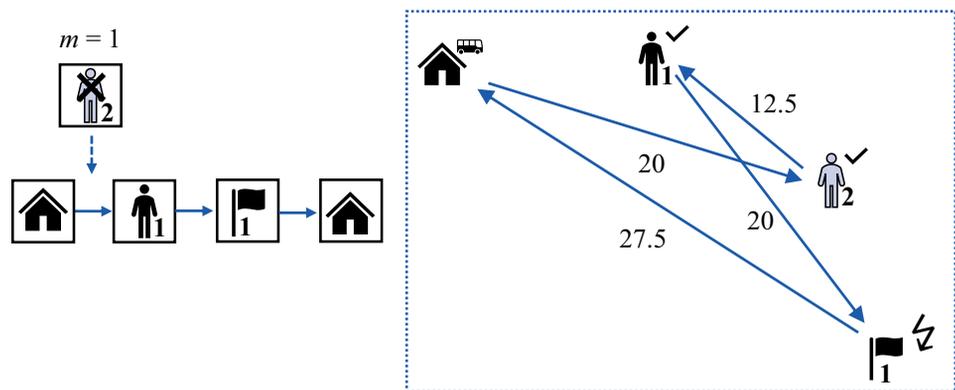


Abb. 3: Prüfung auf Zulässigkeit des Abholortes des Kunden 2

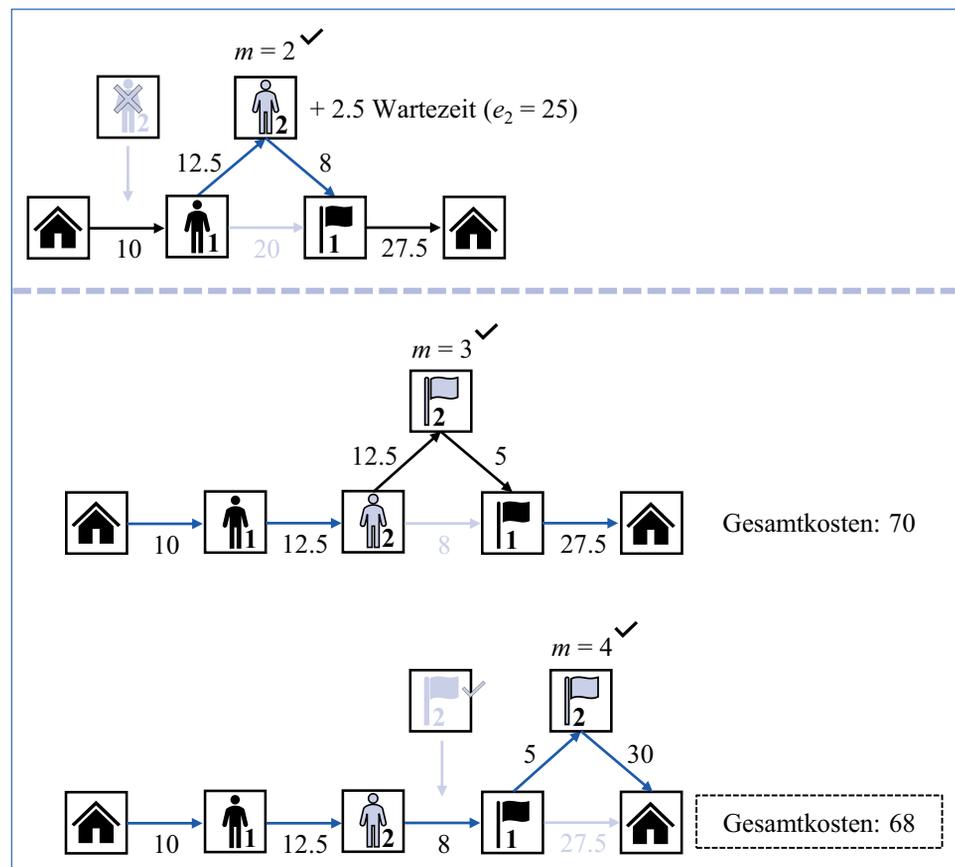


Abb. 4: Gesamtkosten der vorläufigen Touren $(0, 1, 2, 6, 5, 0)$ und $(0, 1, 2, 5, 6, 0)$

Klingenhöfer, F., M. Barillère-Scholz, On-Demand-Lösungen für AST-/ALT-Betriebe: Neuausrichtung bestehender ÖPNV-Systeme als Effizienzhebel, ioki Mobility Discussion Paper Series, Nr. 02/2020, 2020.

Molenbruch, Y., K. Braekers, A. Cari, Typology and Literature Review for Dial-a-Ride Problems, in: Annals of Operations Research, Vol. 259 (2017), S. 295–325.

Parragh, S. N., K. F., Doerner, K. F., R. F. Hartl, A Survey on Pickup and Delivery Problems, in: Journal für Betriebswirtschaft, 58. Jg. (2008), Nr. 2, S. 81–117.

Toth, P., D. Vigo, D., The Family of Vehicle Routing Problems, in: P. Toth, D. Vigo (Hrsg.), Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, 2. Aufl., Philadelphia 2014, S. 1–33.

Vazifeh, M. M., P. Santi, G. Resta, S. H. Strogatz, C. Ratti, Addressing the Minimum Fleet Problem in On-Demand Urban Mobility, in: Nature, Vol. 557 (2018), S. 534–538.

Wurm, M., A. Becker, On-Demand-Mobilität trifft Linienverkehr: Datenbasierte Analyse der relativen Vorteilhaftigkeit von Flächen- und Linienverkehren in Städten, ioki Mobility Discussion Paper Series, Nr. 01/2020, 2020.

Vertrauen schaffen.



Portofreie Lieferung  vahlen.de/32970958

Eller

VertrauensArchitektur

2022. 225 Seiten. Kartoniert € 27,90

ISBN 978-3-8006-6712-3 | Neu im April 2022

Ohne Vertrauen

gehen Kundinnen und Kunden uns aus dem Weg. Sie lehnen unsere Angebote ab, legen unsere Produkte zur Seite oder verlassen unsere Website. Dass der Erfolg von Unternehmen maßgeblich vom Vertrauen der Kundinnen und Kunden abhängt, ist uns längst klar. Doch: Wie können wir mehr Vertrauen schaffen?

VertrauensArchitektur

ist die systematische Entwicklung von Vertrauenssituationen. Der Sozialpsychologe Dr. Eric Eller beschreibt, unter welchen Voraussetzungen Vertrauen entsteht und wie Unternehmen das Vertrauen ihrer Kundinnen und Kunden gezielt gewinnen können.

Erhältlich im Buchhandel oder bei: beck-shop.de |

Verlag Franz Vahlen GmbH · 80791 München | kundenservice@beck.de |

Preise inkl. MwSt. | 174335 | [in.linkedin.com/company/vahlen](https://www.linkedin.com/company/vahlen)

Vahlen