20 Projekt Ride-Hailing Wuppertal

Im Rahmen des Verbundprojekts bergisch.smart.mobility forschen wir in Zusammenarbeit mit den Wuppertaler Stadtwerken an intelligenter Routenplanung für Ride-Hailing Services in Wuppertal. Wir nutzen Methoden der multikriteriellen, diskreten Optimierung, um kosteneffiziente und kundenfreundliche Touren zu bestimmen.

PD Dr. Michael Stiglmayr und Daniela Gaul M.Sc. beschreiben ihre Erfahrungen mit dem Ride-Hailing Projekt.

Ride-Hailing-Dienste werden als ein wichtiger Baustein im ökologischen Stadtverkehr der Zukunft betrachtet und stellen eine flexible Ergänzung zum klassischen öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) dar. Ride-Hailing-Dienste grenzen sich dabei durch ihre adaptive Routenplanung vom linienbasierten ÖPNV ab. Vom klassischen Taxiverkehr unterscheiden sich Ride-Hailing-Dienste dadurch, dass nicht individuelle Touren gefahren werden, sondern Transportanfragen gegebenenfalls gebündelt werden und sich mehrere Fahrgäste auf Teilstrecken ein Fahrzeug teilen. In diesem Fall spricht man von . Auf Grund ihrer spezifischen Anforderungen erfordert die Routenplanung für Ride-Hailing-Dienste angepasste Modelle und Algorithmen. Insbesondere die Zeitdynamik stellt dabei eine große Herausforderung an Optimierungsalgorithmen dar: Fahrtanforderungen gehen kontinuierlich ein (Online-Problem) und müssen ad-hoc beantwortet werden. Mögliche Entscheidungen sind die (optimierte) Integration der Fahrt in eine bestehende Tour (die dadurch auch dynamisch verändert werden kann), die Eröffnung einer neuen Tour, aber auch die Ablehnung der Anfrage. Vorrangiges Ziel der Routenplanung ist die zeiteffiziente Erfüllung möglichst vieler Fahrtanfragen. Unvermeidbare Wartezeiten für einzelne Fahrgäste müssen dabei möglichst präzise vorhergesagt werden, um eine entsprechende Akzeptanz zu gewährleisten. Dabei müssen wirtschaftliche Aspekte von Anfang an mitgedacht werden, da der berechnete Fahrpreis nur von Start- und Zielpunkt abhängt, während die Transportkosten von der gefahrenen Route abhängen, insbesondere also davon wie gut sich diese Anfrage in eine bestehende Tour integrieren lässt. Der Trade-Off zwischen individuellen (Nutzer-) Interessen und ökonomischen sowie ökologischen Kriterien wird mit Hilfe multikriterieller Ansätze untersucht.

Anstatt die Routenplanung direkt auf dem Straßennetzwerk zu bestimmen nutzen wir eine Reformulierung des Problems in einem event-basierten Graph (siehe Abbildung 22). Dadurch kann die Reihenfolge und Verteilung der Passagiere auf die Fahrzeuge von der konkreten Wegeplanung zwischen zwei Event-Knoten entkoppelt werden. Knoten im event-basierten Graph entsprechen dabei Änderungen in der Passagierbelegung eines Fahrzeugs. Da diese fest mit einem Einsteige- bzw. Aussteigeort und einem entsprechenden Zeitfenster verknüpft sind, können die paarweisen Fahrzeiten zwischen diesen vorberechnet werden.

Das Ride-Hailing-Problem lässt sich wie folgt formulieren: Insgesamt haben wir n Fahrtanfragen und m Fahrzeuge. Sei $R := \{1, \ldots, n\}$ die Menge der Fahrtanfragen. Jede

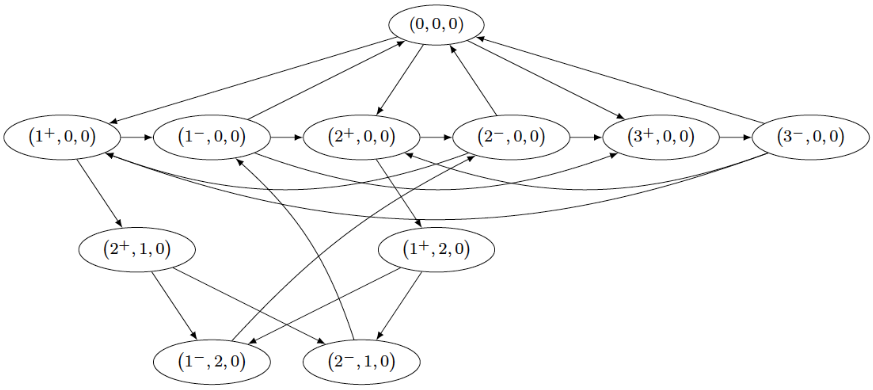

Abbildung 22: Event-basierter Graph für Fahrzeuge mit drei Sitzplätzen.

Anfrage i aus R enthält einen Einsteigeort i^+ und einen Aussteigeort i^-. Zu jeder Anfrage gehören außerdem die Anzahl der zu transportierenden Personen, die maximale Fahrzeit, sowie ein Einsteige- und ein Aussteigezeitfenster.

Im folgenden Beispiel gehen wir zur Vereinfachung von 3 Sitzplätzen in einem Fahrzeug aus. Der event-basierte Graph besteht aus Knoten und Kanten. Einen Knoten schreiben wir als 3-Tupel $v = (v_1, v_2, v_3)$ wobei jeder Eintrag einen Sitzplatz des Fahrzeuges beschreibt. Ist $v_j = 0$, so ist der Sitzplatz i leer. Der Knoten $v = (1^+, 2, 0)$ beschreibt ein Fahrzeug mit den Kunden 1 und 2. Die erste Koordinate des Knotens gibt dabei zusätzlich an welcher Ort zuletzt besucht wurde (in diesem Beispiel ist Kunde 1 eingestiegen). Ein Knoten wird nur zum Graphen hinzugefügt, falls die Summe der angefragten Sitzplätze die Fahrzeugkapazität nicht übersteigt. In Abbildung 22 ist der event-basierte Graph für ein Szenario mit drei Kunden abgebildet, wobei Kunden 1 und 2 beide zwei Sitzplätze anfragen.

Mithilfe des event-basierten Graphen kann das Ride-Hailing-Problem als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP) beschrieben werden. Das bedeutet, wir beschreiben die Menge der zulässigen Lösungen für das Ride-Hailing-Problem durch lineare Ungleichungen mit ganzzahligen und kontinuierlichen reellen Variablen. Die ganzzahligen Variablen x_α modellieren dabei die diskreten Entscheidungen, in welcher Reihenfolge welches Fahrzeug welche Fahrgäste abholt bzw. aussteigen lässt. Die kontinuierlichen Variablen B_v enthalten die Zeitpunkte, an denen ein Fahrzeug an den Knoten (Einstieg/Ausstieg) ankommt. Diese müssen innerhalb entsprechenden Zeitfenstern liegen. Neben den Nebenbedingungen, die sicherstellen, dass die Fahrgäste in den angegebenen Zeitfenster einsteigen und aussteigen, sind eine Reihe weiterer Nebenbedinungen nötig, die unter Anderem die Aufteilung der Fahrgäste auf die Fahrzeuge und die Auftragsreihenfolge der Fahrzeuge modellieren. Die Zielfunktion bewertet dabei die Qualität einer zulässigen Lösung. Im vereinfachten Modell in Abbildung 23 wird dazu die Gesamtfahrstrecke aller Fahrzeuge verwendet. Eine optimale Lösung für dieses Modell wäre also eine Tourenplanung, die alle Nebenbedingungen erfüllt und dabei die geringste Gesamtfahrstrecke aufweist.

$$
\begin{aligned}
\min \; & \sum_{a \in A} c_a \, x_a \\
s.\,t. \; & \sum_{a \in \delta^{in}(v)} x_a - \sum_{a \in \delta^{out}(v)} x_a = 0 \quad \forall v \in V, \\
& \sum_{\substack{a \in \delta^{in}(v) \\ v \in V_{i+}}} x_a = 1 \quad \forall i \in R, \\
& \sum_{a \in \delta^{out}(\mathbf{0})} x_a \leq |K|, \\
& e_0 \leq B_{\mathbf{0}} \leq \ell_0, \\
& e_{i^+} + (\ell_{i^+} - e_{i^+}) \left(1 - \sum_{a \in \delta^{in}(v)} x_a\right) \leq B_v \leq \ell_{i^+} \quad \forall i \in R,\, v \in V_{i^+}, \\
& e_{i^-} \leq B_v \leq e_{i^+} + L_i + s_{i^+} + (\ell_{i^+} - e_{i^+}) \sum_{a \in \delta^{in}(v)} x_a \quad \forall i \in R,\, v \in V_{i^-}, \\
& B_w - B_v - s_{i^+} \leq L_i \quad \forall i \in R,\, v \in V_{i^+},\, w \in V_{i^-}, \\
& B_w \geq B_v + s_{v_1} + t_{(v,w)} - \tilde{M}_{v,w} \left(1 - x(v,w)\right) \quad \forall (v,w) \in A, \\
& x_a \in \{0,1\} \quad \forall a \in A, \\
& B_v \geq 0 \quad \forall v \in V.
\end{aligned}
$$

Abbildung 23: Vereinfachtes Ride-Hailing Optimierungsproblem.

Möchte man sich zur Bewertung einer Lösung nicht auf rein ökonomische Aspekte beschränken, können neben der Minimierung der Fahrtkosten, welche die Zielfunktion in Abbildung 23 beschreibt, weitere Kriterien in Betracht gezogen werden. Dies können kundenorientierte Kriterien sein, wie zum Beispiel die Minimierung der zusätzlichen Fahrzeit im Vergleich zu einer direkten Fahrt, oder die Wartezeit am Einsteigeort. Desweiteren können Situationen auftreten in denen einige Anfragen abgelehnt werden müssen, wenn das Bedienen dieser Anfragen für die restlichen Kunden große zusätzliche Umwege bedeutet. Ein weiteres Kriterium ist somit die Erfüllung möglichst vieler Anfragen. Bei der Betrachtung mehrerer Kriterien (Zielfunktionen) spricht man von multikriterieller Optimierung. Bei der Lösung eines multikriteriellen Optimierungsproblems möchte man sogenannte Pareto-optimale Lösungen finden. Das sind Lösungen, bei denen man sich in keinem Kriterium verbessern kann, ohne sich in einem anderen Kriterium zu verschlechtern.

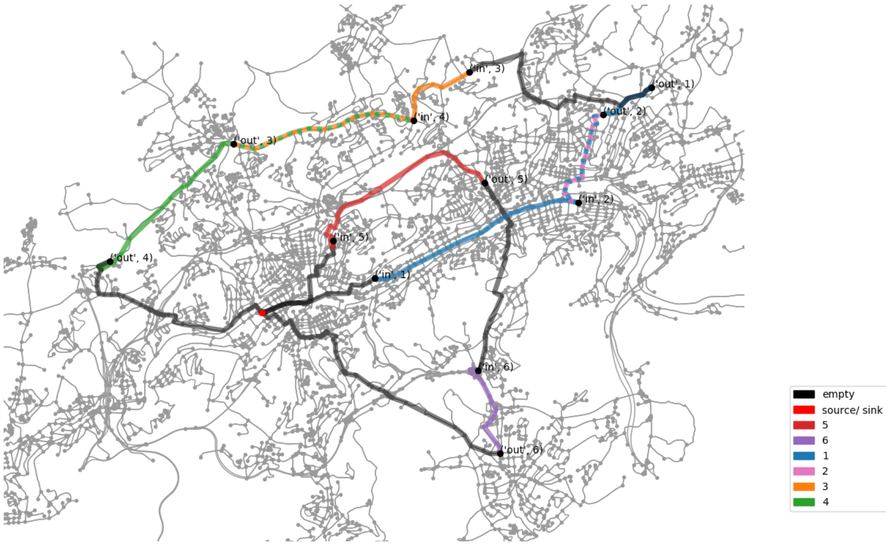

Abbildung 24: Routenplanung für 6 Kunden und 2 Fahrzeuge (auf den gestrichelten Abschnitten teilen sich mehrere Kunden ein Fahrzeug).

Für die exakte Lösung der auftretenden gemischt-ganzzahligen Optimierungsprobleme verwenden wir Branch-and-Bound Algorithmen. Diese nutzen die rekursive Aufteilung des Entscheidungsraums (Menge der zulässigen Lösungen) hinsichtlich der ganzzahligen Variablen, um mit Hilfe von Schranken suboptimale Entscheidungen frühzeitig zu erkennen und zu verwerfen. Für ein kleines Beispiel mit sechs Kunden und zwei Fahrzeugen ist die optimale Tourenplanung in Abbildung 24 dargestellt.

Für große Instanzen kann die exakte Lösung jedoch zu zeitaufwendig sein, weswegen wir aktuell ergänzend an heuristischen Verfahren arbeiten, die schnell eine gute, aber nicht notwendigerweise optimale, Lösung generieren können. Dies ist insbesondere in der dynamischen Betrachtung des Problems relevant, wenn Fahranfragen sukzessive eintreffen, beantwortet und in die Tourenplanung integriert werden müssen. Dazu kann man die oben diskutierten statischen Modelle nutzen und diese in einen sogenannten *Rolling-Horizon-Ansatz* integrieren. Darüber hinaus liefern Lösungen des statischen Modells in Verbindung mit simulierten Fahrtanfragedaten aber auch wichtige Information für die unternehmerische Planung von Ride-Hailing-Diensten. So können etwa Fragen zu potentiellen Gebietserweiterungen oder Vergleichsstudien zur Ersetzung von Buslinien durch Ride-Hailing Angebote untersucht werden.