Delay Management in Public Transportation

Michael Schachtebeck

17.11.2009

Anschlusssicherung ist ein wichtiger Aspekt des operativen Betriebs im öffentlichen Verkehr. Treten Verspätungen auf, so sind im Wesentlichen zwei Arten von Entscheidungen zu treffen:

- Für jeden Anschluss muss entschieden werden, ob er gehalten werden soll oder nicht (ob ein Anschlusszug auf einen verspäteten Zug warten soll oder nicht). Diese Entscheidungen heißen *Warten-nicht-warten-Entscheidungen* (*wait/depart decisions*).

- Nutzen zwei Züge die gleiche Infrastruktur, muss ihre Reihenfolge festgelegt und außerdem sichergestellt werden, dass Sicherheitsabstände eingehalten werden. Diese Entscheidungen heißen *Reihenfolgeentscheidungen* (*priority decisions*).

Das Ziel ist dabei, die Auswirkungen auf die Fahrgäste zu minimieren. Dazu soll die Summe der Verspätungen aller Fahrgäste am Ziel ihrer Reise minimiert werden.

In diesem Vortrag wird gezeigt, wie sich das Problem mit Hilfe von *Ereignis-Aktivitäts-Netzwerken* modellieren lässt. Ein Ereignis-Aktivitäts-Netzwerk ist ein gerichteter Graph $\mathcal{N} = (\mathcal{E}, \mathcal{A})$, dessen Knotenmenge $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{arr}} \cup \mathcal{E}_{\text{dep}}$ aus *Ankunftsereignissen* $\mathcal{E}_{\text{arr}}$ (Ankunft eines Zuges an einem Bahnhof) und *Abfahrtsereignissen* $\mathcal{E}_{\text{dep}}$ (Abfahrt eines Zuges von einem Bahnhof) besteht. Die Menge der gerichteten Kanten setzt sich aus vier verschiedenen Arten von Aktivitäten $\mathcal{A} = \mathcal{A}_{\text{drive}} \cup \mathcal{A}_{\text{wait}} \cup \mathcal{A}_{\text{change}} \cup \mathcal{A}_{\text{head}}$ zusammen: Eine *Fahraktivität* aus $\mathcal{A}_{\text{drive}}$ modelliert die Fahrt eines Zug zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bahnhöfen, eine *Warteaktivität* aus $\mathcal{A}_{\text{wait}}$ die Haltezeit eines Zuges in einem Bahnhof, während der Passagiere ein- und aussteigen können. *Umsteigeaktivitäten* $\mathcal{A}_{\text{change}}$ erlauben es den Fahrgästen, von einem Zug in einen anderen Zug umzusteigen, und *Abstandskanten* (*headways*) $\mathcal{A}_{\text{head}}$ modellieren Sicherheitsabstände zwischen Zügen, die auf dem gleichen Gleis fahren.

Basierend auf dem graphentheoretischen Modell wird das folgende lineare ganzzahlige Programm vorgestellt:

$$\textbf{(DM)} \;\; \min f(x, z, g) = \sum_{i \in \mathcal{E}} w_i(x_i - \pi_i) + \sum_{a \in \mathcal{A}_{\text{change}}} z_a w_a T$$

so dass

$$\begin{aligned}
x_i &\geq \pi_i + d_i && \forall\, i \in \mathcal{E} \\
x_j - x_i &\geq L_a + d_a && \forall\, a = (i,j) \in \mathcal{A}_{\text{train}} := \mathcal{A}_{\text{drive}} \cup \mathcal{A}_{\text{wait}} \\
Mz_a + x_j - x_i &\geq L_a && \forall\, a = (i,j) \in \mathcal{A}_{\text{change}} \\
Mg_{ij} + x_j - x_i &\geq L_{ij} && \forall\, (i,j) \in \mathcal{A}_{\text{head}} \\
g_{ij} + g_{ji} &= 1 && \forall\, (i,j) \in \mathcal{A}_{\text{head}} \\
x_i &\in \mathbb{N} && \forall\, i \in \mathcal{E} \\
z_a &\in \{0,1\} && \forall\, a \in \mathcal{A}_{\text{change}} \\
g_{ij} &\in \{0,1\} && \forall\, (i,j) \in \mathcal{A}_{\text{head}}.
\end{aligned}$$

Minimiert wird hier die gewichtete Summe der Verspätungen aller Ereignisse plus die gewichtete Summe der verpassten Anschlüsse. Diese Zielfunktion ist im Allgemeinen nur eine obere Schranke für die Summe der Verspätungen aller Fahrgäste am Ziel ihrer Reise – in einigen Sonderfällen stimmen aber beide Funktionen überein.

Einige interessante Eigenschaften des Modells erlauben es, Ergebnisse für Anschlusssicherung ohne Reihenfolgeentscheidungen auf das vorliegende Problem mit Reihenfolgeentscheidungen zu übertragen. Außerdem werden verschiedene Reduktionsverfahren verglichen, mit deren Hilfe die Größe des Ereignis-Aktivitäts-Netzwerks deutlich reduziert werden kann.

Da das Problem bereits in einfachen Sonderfällen NP-schwer ist, werden auch verschiedene Heuristiken vorgestellt, theoretisch untersucht und anhand einer Fallstudie miteinander verglichen.