

Intermodale Optimierung von Fahrplänen

Michael Siebert
michael.siebert2k@gmail.com

Institut für Numerische und Angewandte Mathematik Göttingen

Future Mobility Camp 2013

Outline

- 1 Warm Up
- 2 Mathematische Verkehrsplanung
- 3 Fazit

Plan

- 1 Warm Up
- 2 Mathematische Verkehrsplanung
- 3 Fazit

Braess Paradox

- Mehr Straßen = Verkehr schneller?

Braess Paradox

- Mehr Straßen = Verkehr schneller? i.A. nein

Braess Paradox

- Mehr Straßen = Verkehr schneller? i.A. nein

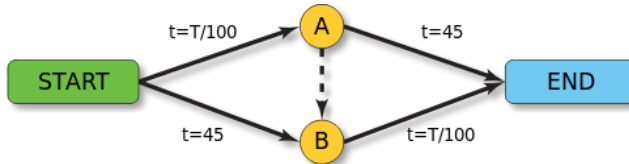


Abbildung : Braess Paradox, Quelle: Wikipedia

- 4000 Autofahrer wollen von *Start* nach *End*
- t : Zeitdauer in Minuten, T : Autos auf Abschnitt
- Ohne Verbindung $A \rightarrow B$: 65 min
- Mit Verbindung $A \rightarrow B$ (0 min): 80 min

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten?

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten? Statistisch: Nein

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten? Statistisch: Nein
- Steinberg and Zangwill 1983:
 - Zufallsnetzwerk: 50% Auftrittswahrscheinlichkeit
 - *Kann* durch Planung verhindert werden

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten? Statistisch: Nein
- Steinberg and Zangwill 1983:
 - Zufallsnetzwerk: 50% Auftrittswahrscheinlichkeit
 - *Kann* durch Planung verhindert werden
- Tritt Braess in realen, *geplanten* Netzen auf?

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten? Statistisch: Nein
- Steinberg and Zangwill 1983:
 - Zufallsnetzwerk: 50% Auftrittswahrscheinlichkeit
 - *Kann* durch Planung verhindert werden
- Tritt Braess in realen, *geplanten* Netzen auf? Ja!

Braess Paradox

- Ist das Braess Paradox selten? Statistisch: Nein
- Steinberg and Zangwill 1983:
 - Zufallsnetzwerk: 50% Auftrittswahrscheinlichkeit
 - *Kann* durch Planung verhindert werden
- Tritt Braess in realen, *geplanten* Netzen auf? Ja!
- Kee Yeon Hwang, Professor für Stadtplanung an der Hongik University, Seoul:

„The idea was sown in 1999,“ Hwang says. „We had experienced a strange thing. We had three tunnels in the city and one needed to be shut down. Bizarrely, we found that that car volumes dropped. I thought this was odd. We discovered it was a case of 'Braess paradox', [...]“

Braess Paradox

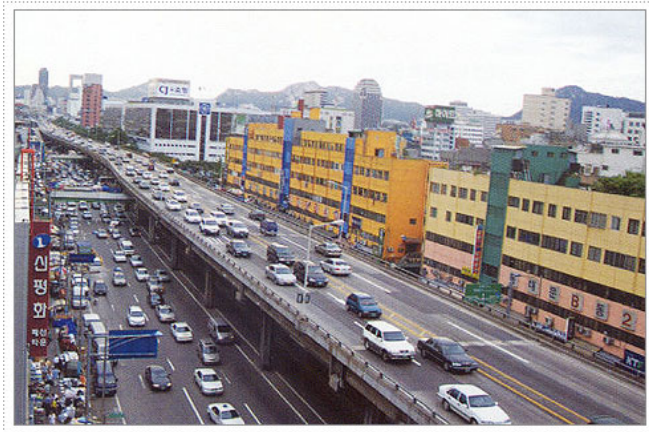


Abbildung : Cheonggyecheon Fluss, Quelle: <http://www.preservenet.com/freeways/FreewaysCheonggye.html>

Braess Paradox



Abbildung : Cheonggyecheon Fluss nach Umbau, Quelle: Wikipedia

Braess Paradox

- Kostenpunkt Cheonggyecheon
 - 900 mio. \$ Baukosten, 22 Jahre Bauzeit
 - 380 mio. \$ Abriss
 - 620.000 Tonnen Beton und Asphalt
- Nachgewiesene Braess Fälle außerhalb Südkoreas:
 - Stuttgart (1969)
 - New York (1990)
 - Dezentralen Stromnetzen (Max Plank Institut, 2012)

⇒ Intuition ist trügerisch

⇒ Word und Excel reichen zum Planen nicht aus

⇒ (Stadt)planer müssen Simulationssoftware verwenden!

Plan

- 1 Warm Up
- 2 Mathematische Verkehrsplanung**
- 3 Fazit

Workflow Verkehrsoptimierung

1. **Standortplanung** Welche Haltestellen/Bahnhöfe?
 2. **Linienplanung** Wie verlaufen Linien?
 3. **Umlegung** Wieviele Passagiere Umstiege/Fahrten?
 4. **Fahrplanbestimmung** Welche Zeiten Abfahrten/Ankünfte?
 5. **Umlaufplanung** Welche Fahrzeuge, welche Linien?
 6. **Verspätungsmanagement** Was tun bei Verspätungen?
- Üblich: sequentielle Planung, eine Lösung pro Schritt

Workflow Verkehrsoptimierung

1. **Standortplanung** Welche Haltestellen/Bahnhöfe?
 2. **Linienplanung** Wie verlaufen Linien?
 3. **Umlegung** Wieviele Passagiere Umstiege/Fahrten?
 4. **Fahrplanbestimmung** Welche Zeiten Abfahrten/Ankünfte?
 5. **Umlaufplanung** Welche Fahrzeuge, welche Linien?
 6. **Verspätungsmanagement** Was tun bei Verspätungen?
- Üblich: sequentielle Planung, eine Lösung pro Schritt

Passagierumlegung & Fahrplan

Gegeben

- Quell-Ziel Matrix
 - Wie viele Passagiere wollen von A nach B ?
 - Für alle Haltestellen/Bahnhofspaare
- Ereignis Aktivitäts Netzwerk (Graph)
 - Ereignisse (Knoten): Abfahrten, Ankünfte
 - Aktivitäten (Kanten)
 - Fahren, Warten (im Fahrzeug)
 - *Umsteigen* (zwischen Fahrzeugen)
 - Headway (Sicherheitsabstand, für Passagiere unsichtbar)
 - Synchronisation (Fahrzeuge einer Linie, f. P. unsichtbar)
- Zeitschranken für Aktivitäten: Nebenbedingungen

Gesucht

- 1 Passagierzahlen für Aktivitäten
- 2 Zeiten für Ereignisse (Fahrplan)
 - Nebenbedingungen eingehalten
 - Gesamtreisezeit minimal

Datensätze

- Spiel (8 Haltestellen)
 - Peanuts
- Athen Metro (50 Haltestellen)
 - Peanuts
- Modelldatensatz, an Fernverkehrsnetz DB angelehnt
 - auf Folgefolien betrachtet
 - Nur Fernverkehr, kein Regionalverkehr
 - 319 Haltestellen
 - 4932 Abfahrten/Ankünfte
 - 33446 Nebenbedingungen
 - 77.878 Quell-Ziel-Paare
 - 86 Linien mit Frequenz

Passagierumlegung

- Gehe über alle Quell-Ziel-Paare
 - Berechne kürzesten Weg bzgl. Zeit
 - Summiere Passagiere über Aktivitäten
- Ineffiziente Implementation: 2,7s für 77.000 QZ-Paaren
- Läuft (beweisbar) schnell
- Länge (bzw. Dauer) eines KW eindeutig
- aber: mehrere Wege können kürzeste Länge haben
 - Für Fahrplanberechnung nutzbar

Fahrplanberechnung

- Löse das Periodic Event Scheduling Problem (PESP)

$$\min \sum_{a=(e,e') \in \mathcal{A}} w_a (\pi_{e'} - \pi_e + Tz_a)$$

$$\text{so dass } l_a \leq \pi_{e'} - \pi_e + Tz_a \leq u_a \quad a \in \mathcal{A}$$

$$\pi_e \in \{0, 1, \dots, T\} \quad e \in \mathcal{E}$$

$$z_a \in \{0, 1\} \quad a \in \mathcal{A}$$

- $\mathcal{E}$ Ereignisse, $\mathcal{A}$ Aktivitäten
- Konstanten: T (=60 oder 120min) Takt, Passagierzahlen w
- Variablen: Zeiten π , *Modulo Parameter* z
- In Worten
 - Minimiere die Summe über Zeit mal Passagiere
 - sodass die Zeitschranken eingehalten sind

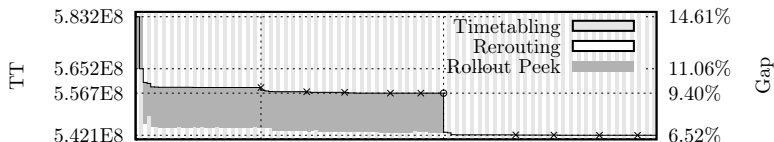
Periodic Event Scheduling Problem

- $\mathcal{NP}$ -schwer
 - beweisbar eines der schwersten Probleme der Mathematik
 - führende industrielle Solver
 - Lizenzkosten: 35.000 EUR
 - Nach 3 Wochen Rechenzeit: *nichts*
- ⇒ brauchen anderen Ansatz
- PESP einfach, wenn Modulo Parameter konstant (0,7s)
- Ansatz
 - Bestimme Modulo Parameter mit Constraint Satisfactory Solver (6 Sekunden) ⇒ Lösung nicht optimal, aber zulässig
 - Halte für Folgeberechnungen Modulo Parameter fest

Workflow Verkehrsoptimierung

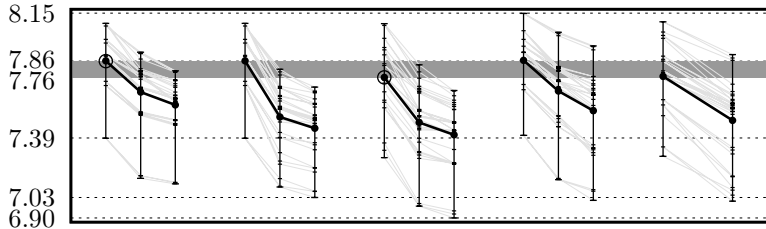
1. **Standortplanung** Welche Haltestellen/Bahnhöfe?
 2. **Linienplanung** Wie verlaufen Linien?
 3. **Umlegung** Wieviele Passagiere Umstiege/Fahrten?
 4. **Fahrplanbestimmung** Welche Zeiten Abfahrten/Ankünfte?
 5. **Umlaufplanung** Welche Fahrzeuge, welche Linien?
 6. **Verspätungsmanagement** Was tun bei Verspätungen?
- Üblich: sequentielle Planung, eine Lösung pro Schritt
 - **Problem: Schritte wechselwirken, mehrere Lösungen!**
 - **Was verpassen wir?**

Fahrplanberechnung



- Abwechselnd Umlegung/Fahrplanberech. bis Konvergenz
- Gap: % Entfernung globale untere Schranke
- TT: total traveling time (Summe aller Reisezeiten)
- *Rollout Peek*: ignorieren (Details im Paper)
- ×: Stärkeres Timetablingverfahren (Dresden!)
- Beobachtung
 - Erster Optimierungsschritt hat meisten Einfluss
 - Aber: Wir können noch viel mehr rausholen!

Fahrplanberechnung



- Skala: Gap
- Dünne Linien: Durchläufe wie auf letzter Folie
 - Unterschiedliche Startfahrpläne
 - Neunummerierung Ereignisse
 - CSP Solver neu angeworfen
- Grauer Balken: Passagiere nur einmal umgelegt
 - State-of-the-Art aus den letzten 20 Jahren Forschung

Plan

- 1 Warm Up
- 2 Mathematische Verkehrsplanung
- 3 **Fazit**

Mathematisches Fazit

- Integrierte Umlegung/Fahrplanberechnung ist machbar
 - Für große Netzwerke
 - Multimodal
 - In Echtzeit (Größenordnung Sekunden/Minuten)
- Komplexe Modelle gewinnen gegen komplexe Verfahren

Wirtschaftliches Fazit

- Verkehrsunternehmen
 - 137 Beschäftigte VBB: Fahrpläne *sammeln*
 - 100 Beschäftigte DB: Fahrpläne *per Hand* erstellen
⇒ Deutschland: Bedarf an hochwertiger Verwaltungssoftware viel höher als Bedarf an Optimierung
 - Schweiz SBB: mathematisch optimierter Fahrplan
- Können bestehende Verkehrsnetze verbessern
 - attraktiver machen
 - oder aber: Kosten senken
- Können neuartige Verkehrsnetze erschaffen
 - Echtzeitanpassung des Netzes
 - optimale Fahrpläne (insb. Umstiege) on-the-fly
 - Reagieren auf Verspätungen
 - Variable Infrastruktur (Carsharing)

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Fragen?

Paper

An Experimental Comparison of Periodic Timetabling Models Michael Siebert, Marc Goerigk