

Algorithmen für Routenplanung

22. Vorlesung, Sommersemester 2024

Adrian Feilhauer | 8. Juli 2024



Unbeschränktes Laufen

[WZ17]

Bisher:

- Effiziente Algorithmen für ÖV mit eingeschränktem Laufen
- Vergleichsweise langsame multimodale Algorithmen

Einschränkungen:

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| ■ RAPTOR | Transitiv abgeschlossen |
| ■ CSA | Transitiv abgeschlossen |
| ■ Trip-Based Routing | Transitiv abgeschlossen |
| ■ Transfer Patterns | Max. 400 m |
| ■ PTL | Nur Transfers aus ÖV-Netzwerk |

Argumente für Einschränkung:

- „Laufen lohnt sich nie“
- „Laufen vom Nutzer unerwünscht“
- „Laufen in der Praxis nicht relevant“

Aber:

- Relevanz nie bewiesen/widerlegt
- Algorithmus sollte über Relevanz entscheiden

Frage

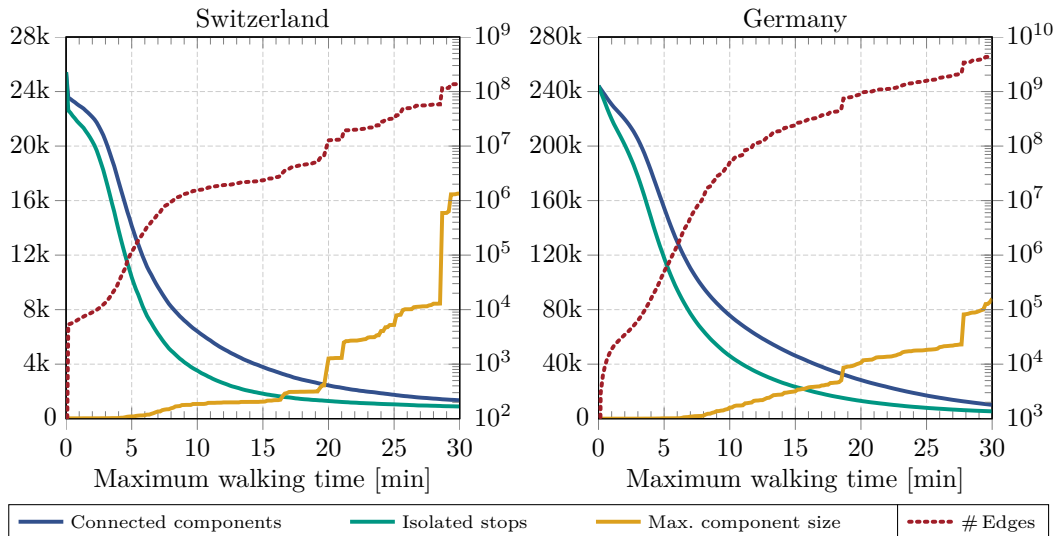
Bis zu welcher Fußweglänge ist transitiver Abschluss praktikabel?

Ansatz:

- Starte mit vollständigem Fußweggraphen
- Wähle maximale Laufdauer τ
- Verbinde Stops \Leftrightarrow Laufdistanz $\leq \tau$
- Bilde transitiven Abschluss des resultierenden Graphen

Wie groß wird dieser Graph?

Größe des transitiven Abschlusses



Fazit

Beobachtung:

- Transitiver Abschluss nur für kurze Laufwege praktikabel
- Somit bestehende Algorithmen nicht anwendbar

Beobachtung:

- Transitiver Abschluss nur für kurze Laufwege praktikabel
- Somit bestehende Algorithmen nicht anwendbar

Frage

Machen längere Laufwege in der Praxis einen Unterschied?

Probleme:

- Hängt von der Tageszeit ab (Tag vs. Nacht)
- Hängt von Start und Ziel ab (ländlich vs. städtisch)
- Hängt von der Distanz zwischen Start und Ziel ab (lang vs. kurz)

Beobachtung:

- Transitiver Abschluss nur für kurze Laufwege praktikabel
- Somit bestehende Algorithmen nicht anwendbar

Frage

Machen längere Laufwege in der Praxis einen Unterschied?

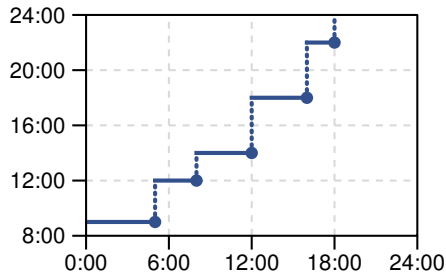
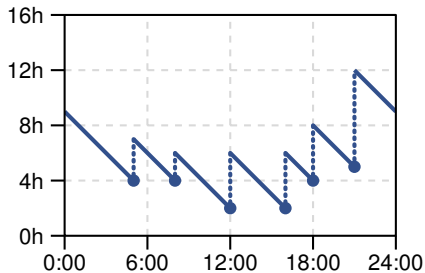
Probleme:

- Hängt von der Tageszeit ab (Tag vs. Nacht)
- Hängt von Start und Ziel ab (ländlich vs. städtisch)
- Hängt von der Distanz zwischen Start und Ziel ab (lang vs. kurz)

⇒ Auswertung von Reisezeitprofilen
auf Instanzen mit unterschiedlich vielen Fußwegen
für viele $s-t$ -Paare

Wiederholung Profil:

- Funktion, die **Abfahrtszeit** auf **Reisezeit** oder **Ankunftszeit** abbildet



Profil-Algorithmen für unbeschränktes Laufen:

- Reine Public-Transit-Algorithmen sind nicht geeignet
- Multimodal Multicriteria RAPTOR (MCR)
 - Kann mit unbeschränktem Laufen umgehen
 - Unterstützt aber nur Queries mit fester Abfahrtszeit

MCR Profil-Algorithmus:

- MCR basiert auf RAPTOR
- RAPTOR kann für Profilberechnung angepasst werden (rRAPTOR)
- Warum ist dies nicht auf MCR übertragbar?

MCR Profil-Algorithmus:

- MCR basiert auf RAPTOR
- RAPTOR kann für Profilberechnung angepasst werden (rRAPTOR)
- Warum ist dies nicht auf MCR übertragbar?

rRAPTOR Profil-Algorithmus: (Wiederholung)

- Profileinträge sind durch Abfahrtszeit des ersten Trips bestimmt
- Sammle alle Abfahrtszeiten am Start ein
- Führe RAPTOR für jede Abfahrtszeit einmal aus

MCR Profil-Algorithmus:

- MCR basiert auf RAPTOR
- RAPTOR kann für Profilberechnung angepasst werden (rRAPTOR)
- Warum ist dies nicht auf MCR übertragbar?

rRAPTOR Profil-Algorithmus: (Wiederholung)

- Profileinträge sind durch Abfahrtszeit des ersten Trips bestimmt
- Sammle alle Abfahrtszeiten am Start ein
- Führe RAPTOR für jede Abfahrtszeit einmal aus

Probleme mit unbeschränktem Laufen/MCR:

- Beliebiges Laufen vor der ersten Fahrt möglich
- Jede Abfahrt im Netzwerk kann die erste genutzte sein

⇒ Zu viele RAPTOR-Anfragen

Alternating RAPTOR (aRAPTOR)

Ziel:

- Nutze Fixed-Departure-Algorithmus (MCR) als Black Box
- Fixed-Departure-Algorithmus berechnet einzelne Profileinträge
- Anzahl Ausführungen \propto Anzahl Profileinträge

Ziel:

- Nutze Fixed-Departure-Algorithmus (MCR) als Black Box
- Fixed-Departure-Algorithmus berechnet einzelne Profileinträge
- Anzahl Ausführungen \propto Anzahl Profileinträge

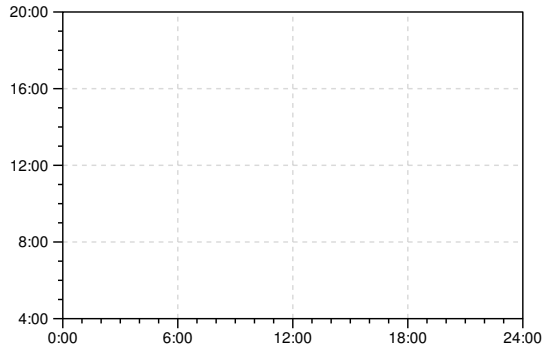
Vorgehen:

- Baue das Profil Eintrag um Eintrag auf
- Pro Profileintrag werden zwei Black-Box-Aufrufe genutzt:
 - Starte mit frühestmöglicher Abfahrtszeit
 - Vorwärtssuche \Rightarrow Frühestmögliche Ankunftszeit
 - Rückwärtssuche \Rightarrow Spätestmögliche Abfahrtszeit
 - Fahre mit der spätestmöglichen Abfahrtszeit + ε fort

aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall [0:00, 24:00]

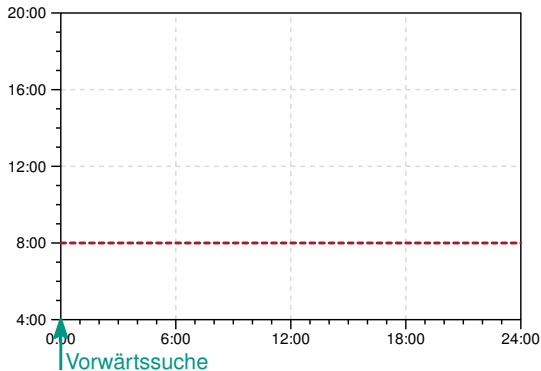


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall [0:00, 24:00]

Schritt 1: Vorwärtssuche für frühestmögliche Abfahrtszeit (0:00)

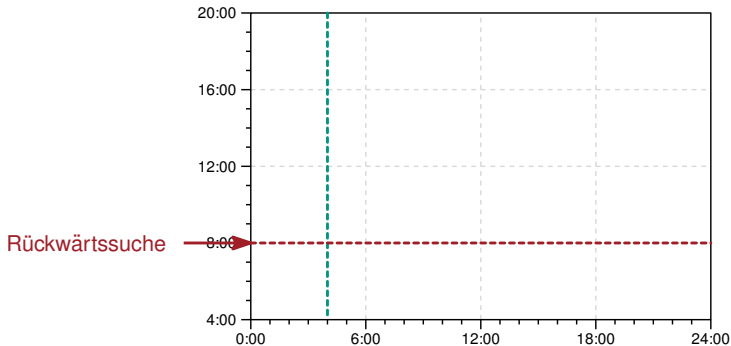


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall [0:00, 24:00]

Schritt 2: Rückwärtssuche für die resultierende Ankunftszeit (8:00)

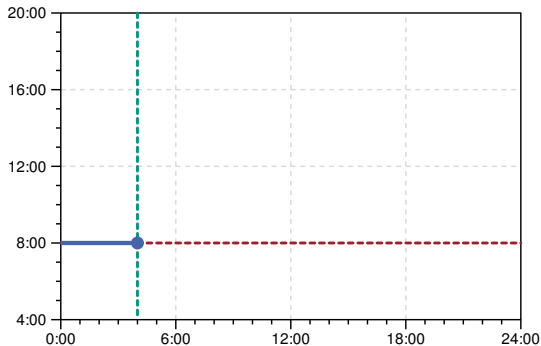


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall [0:00, 24:00]

Schritt 3: Beide Ergebnisse zusammen bilden einen Profileintrag

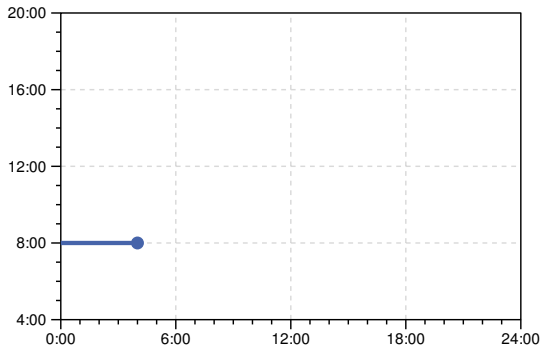


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall [0:00, 24:00]

Schritt 4: Das Profil ist schon korrekt für das Intervall [0:00, 4:00]

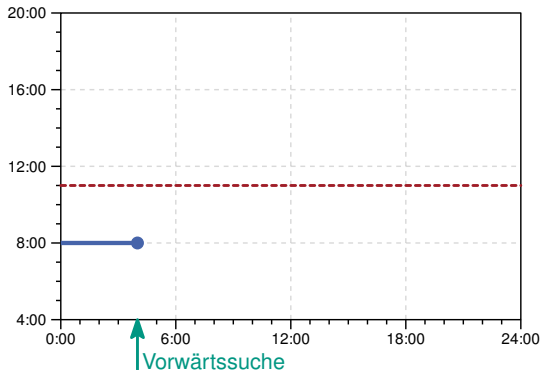


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 1: Vorwärtssuche für frühestmögliche Abfahrtszeit (4:00 + ϵ)

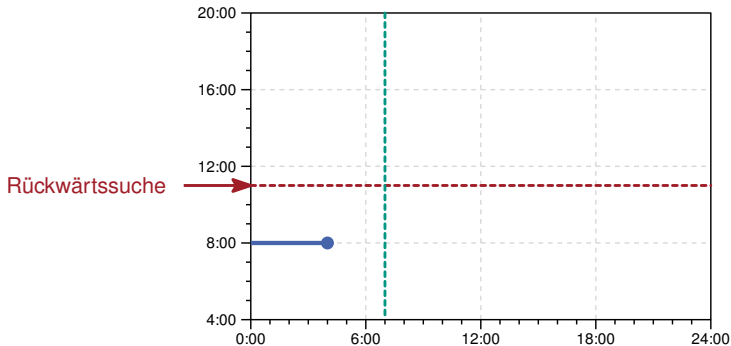


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 2: Rückwärtssuche für die resultierende Ankunftszeit (11:00)

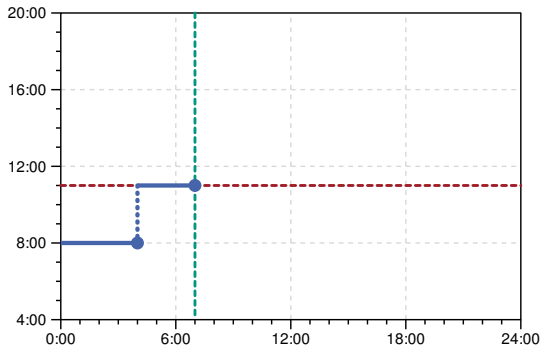


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 3: Beide Ergebnisse zusammen bilden einen Profileintrag

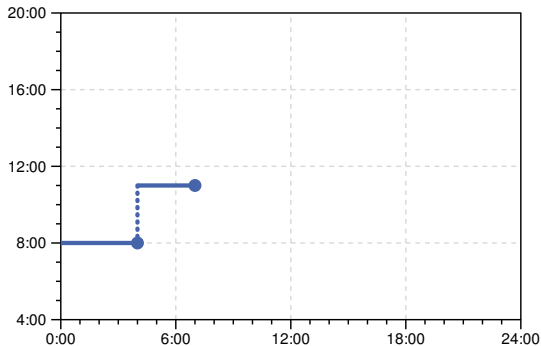


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 4: Das Profil ist schon korrekt für das Intervall [0:00, 7:00]

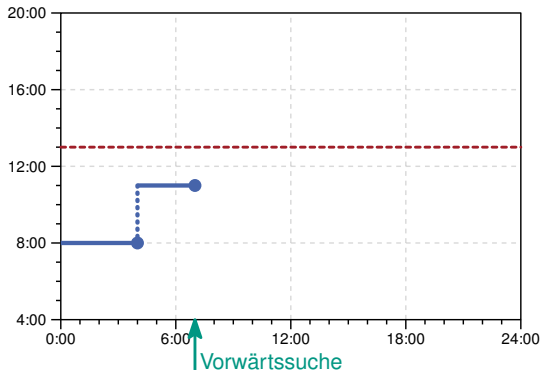


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (7:00, 24:00]

Schritt 1: Vorwärtssuche für frühestmögliche Abfahrtszeit (7:00 + ϵ)

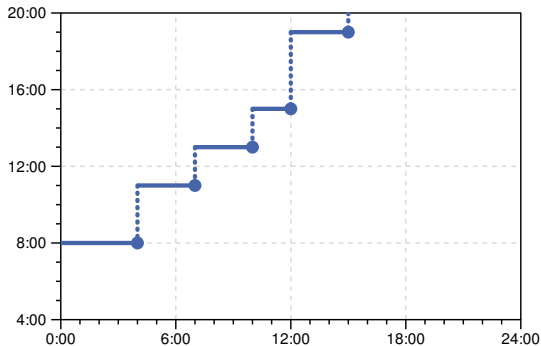


aRAPTOR – Beispiel

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (7:00, 24:00]

Ende: Der Algorithmus endet, wenn das gesamte Profil berechnet wurde



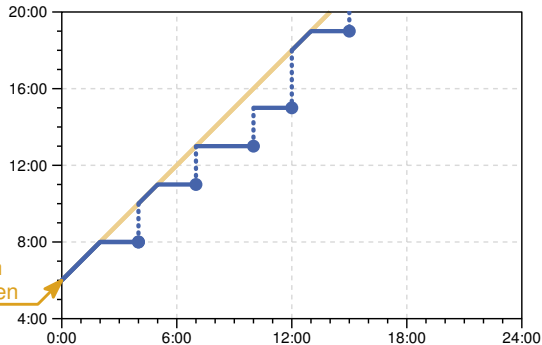
aRAPTOR – Direktes Laufen

Problem:

- **Direktes Laufen** verhindert Fortschritt

Beispiel:

Direktes Laufen
dauert 6 Stunden

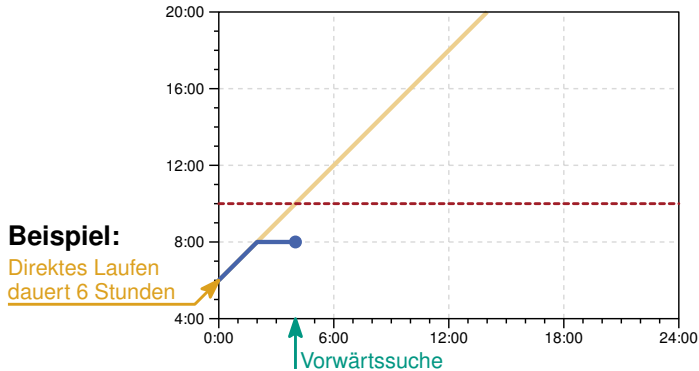


aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 1: Vorwärtssuche für frühestmögliche Abfahrtszeit (4:00 + ϵ)

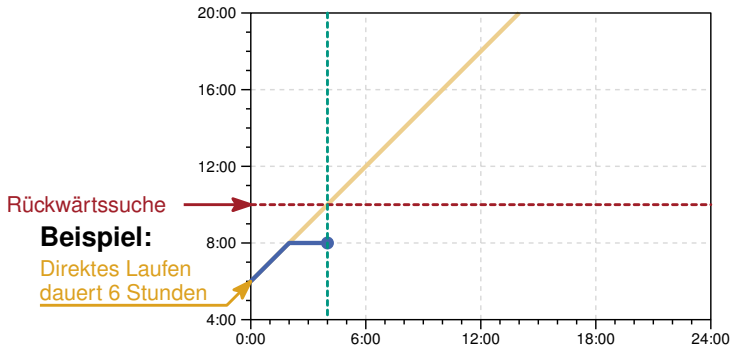


aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 2: Rückwärtssuche für die resultierende Ankunftszeit (10:00)

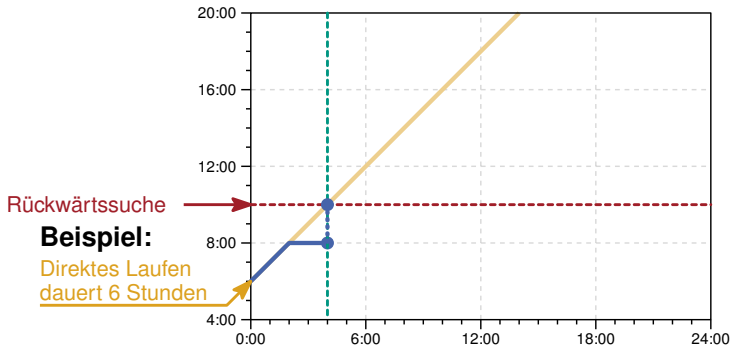


aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 3: Beide Ergebnisse zusammen bilden einen Profileintrag



aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

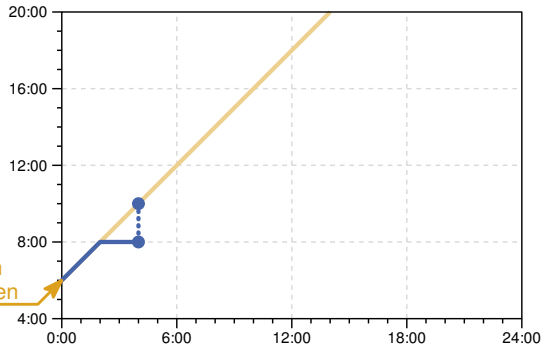
Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 4: Das Profil ist immer noch korrekt für das Intervall [0:00, 4:00]

Beispiel:

Direktes Laufen
dauert 6 Stunden



aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

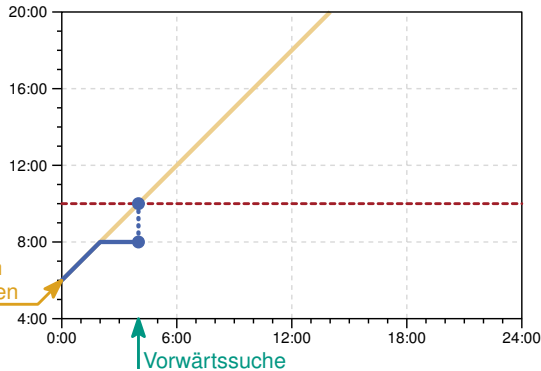
Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Schritt 1: Vorwärtssuche für frühestmögliche Abfahrtszeit ($4:00 + \epsilon$)

Beispiel:

Direktes Laufen
dauert 6 Stunden



aRAPTOR – Unbeschränktes Laufen

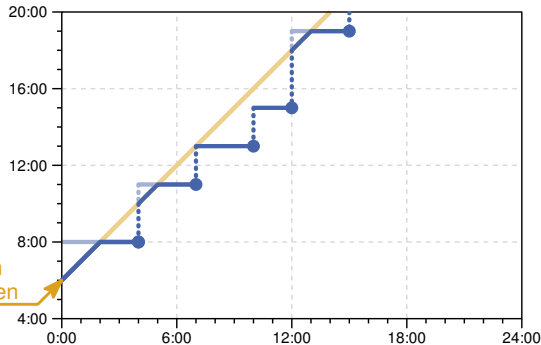
Ziel:

- Berechne ein Profil für das Intervall (4:00, 24:00]

Lösung: Berechne Profil ohne direktes Laufen,
füge den direkten Laufweg danach hinzu

Beispiel:

Direktes Laufen
dauert 6 Stunden



Frage

Machen längere Laufwege in der Praxis einen Unterschied?

Ansatz: Vergleiche Reisezeiten für verschiedene Fußwegegraphen

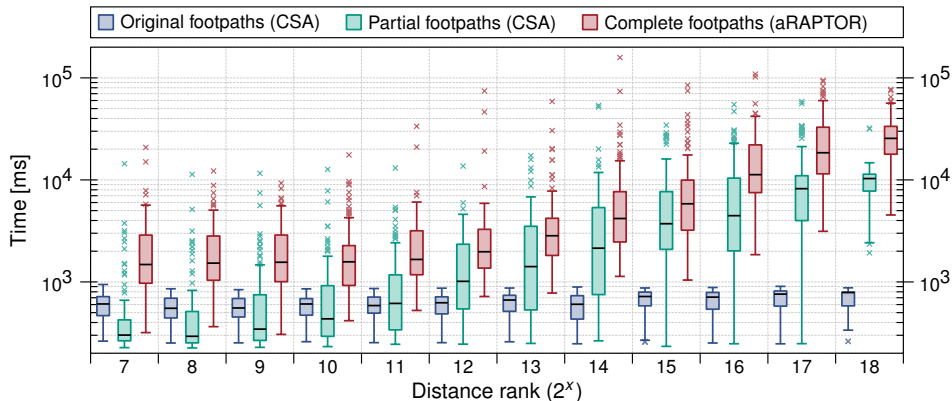
- **original:** Nur im PT-Netzwerk spezifizierte Fußwege
- **partial:** Transitiv abgeschlossener Fußwegegraph
- **complete:** Vollständiger Fußwegegraph

PT network	Footpaths	Stops	Vertices	Edges	Connections	Max. deg.
Switzerland	original	25 427	25 427	5 604	4 373 268	25
	partial	25 427	25 427	3 104 974	4 373 268	1 246
	complete	25 427	604 230	1 844 286	4 373 268	25
Germany	original	244 245	244 245	95 036	46 119 896	18
	partial	244 245	244 245	26 193 136	46 119 896	2 622
	complete	244 245	6 876 758	21 382 408	46 119 896	21

Experimente

Vergleich der Anfragezeiten:

- Auf dem Schweizer Netzwerk
- Für Pareto-Profile (Reisezeit, Anzahl Umstiege)
- Profil-CSA für original-/partial-Fußwege
- aRAPTOR für complete-Fußwege

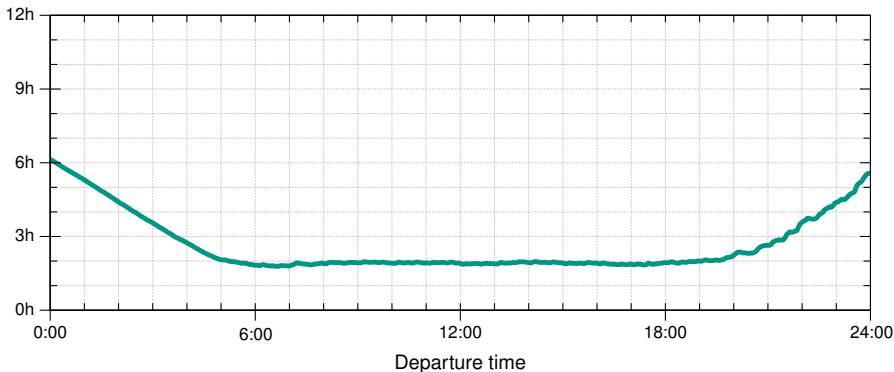


Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)

— Average travel time (complete)



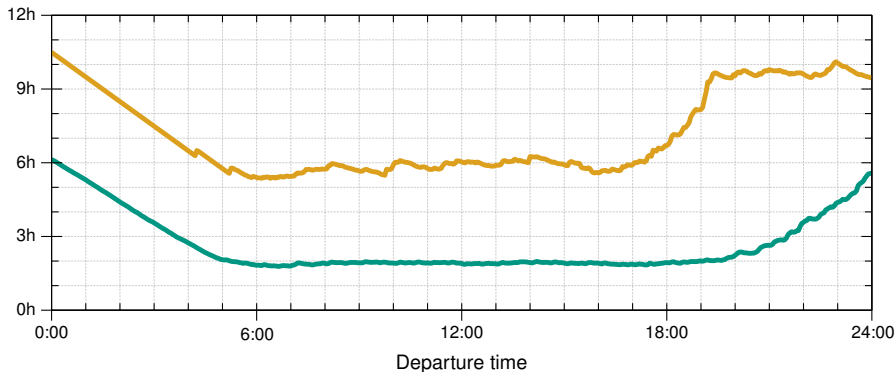
Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)

— Average travel time (complete)

— Average travel time (original)



Experimente

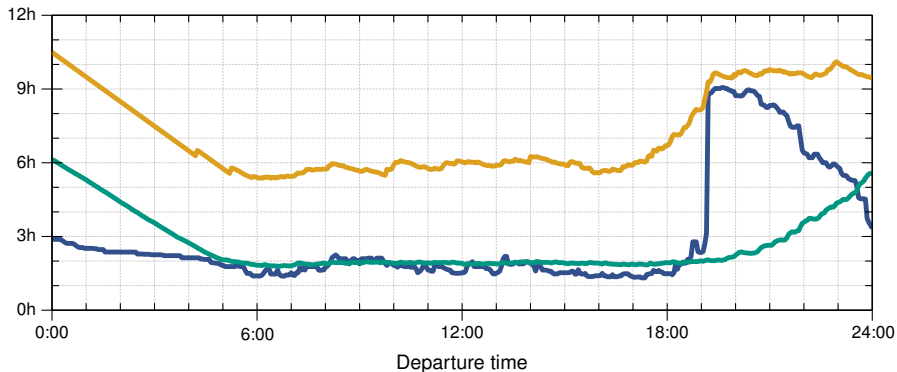
Vergleich der Reisezeiten:

- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)

— Average travel time (complete)

— Average travel time (original)

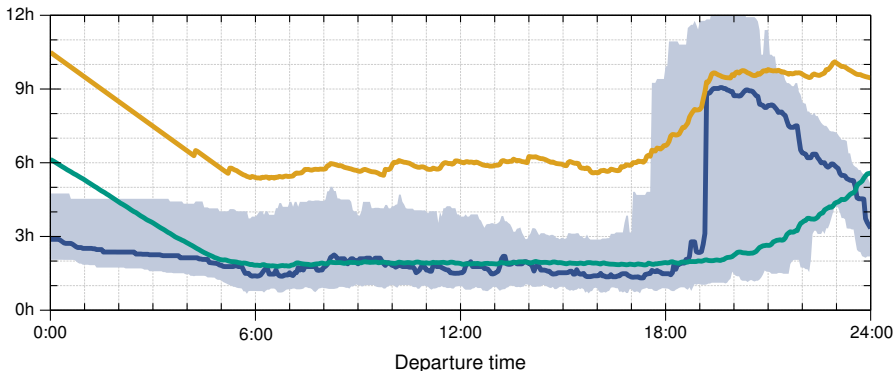
— Median of travel time difference



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

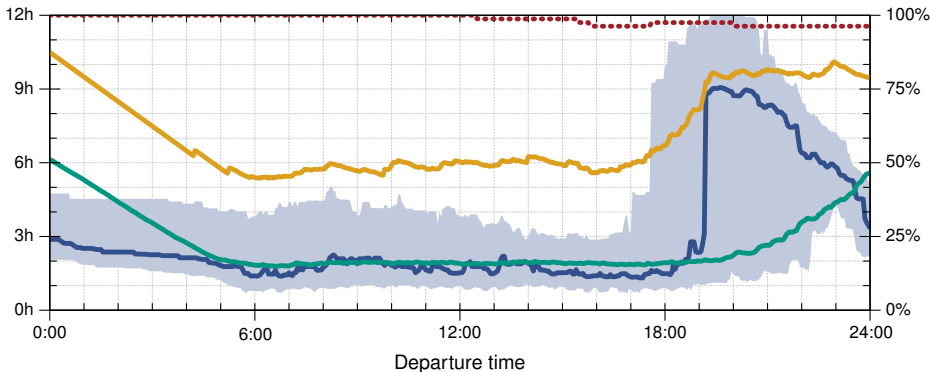
- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

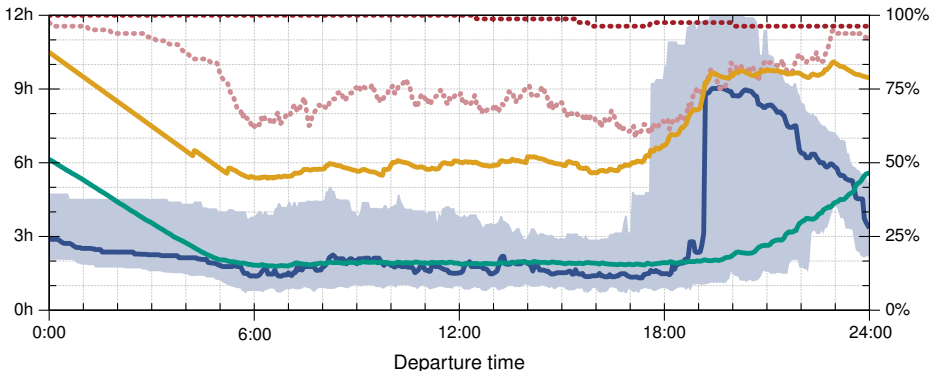
- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

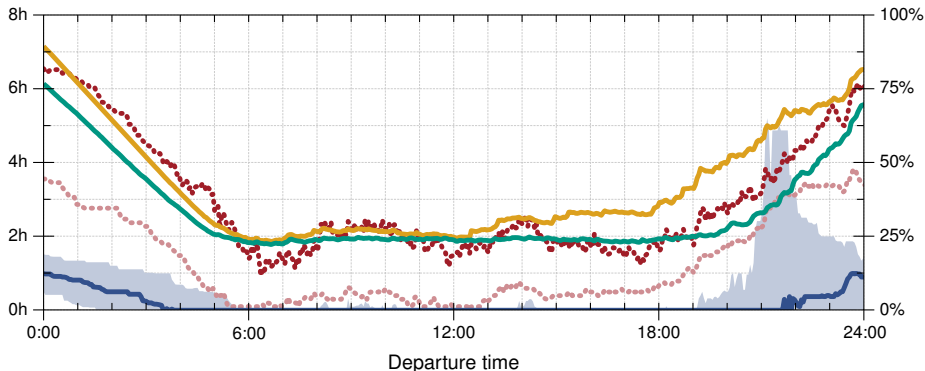
- Switzerland complete vs. original (Distance rank 16)



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

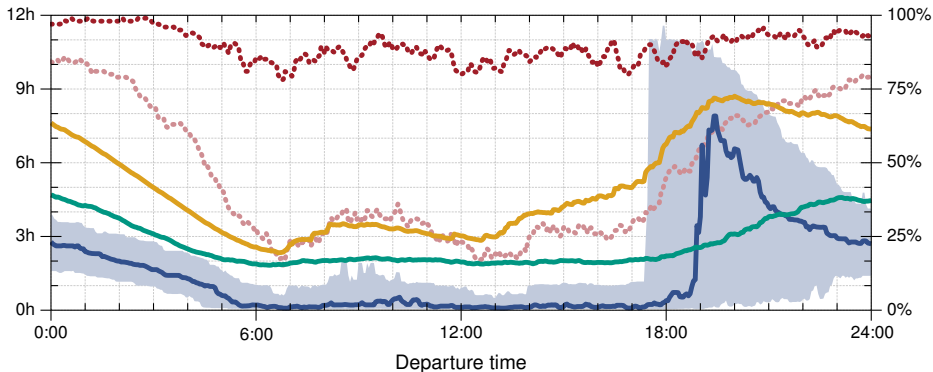
- Switzerland complete vs. partial (Distance rank 16)



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

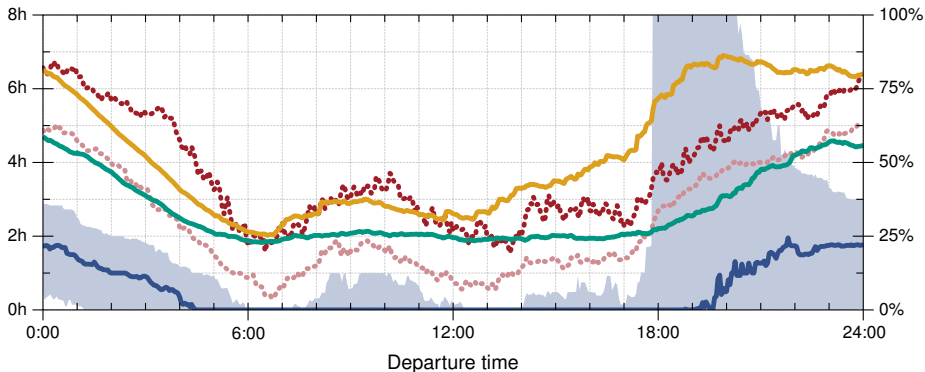
- Germany complete vs. original (Distance rank 16)



Experimente

Vergleich der Reisezeiten:

- Germany complete vs. partial (Distance rank 16)



Frage

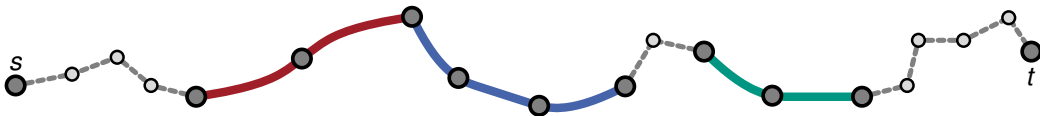
In welchem Teil der Journey wird unbeschränktes Laufen benötigt?

Frage

In welchem Teil der Journey wird unbeschränktes Laufen benötigt?

Arten von Transfers:

- **Initialer Transfer:** (engl. *initial transfer*)
Verbindet Startknoten mit erstem Stop
- **Zwischentransfer:** (engl. *intermediate transfer*)
Verbindet zwei Trips
- **Finaler Transfer:** (engl. *final transfer*)
Verbindet letzten Stop mit Zielknoten

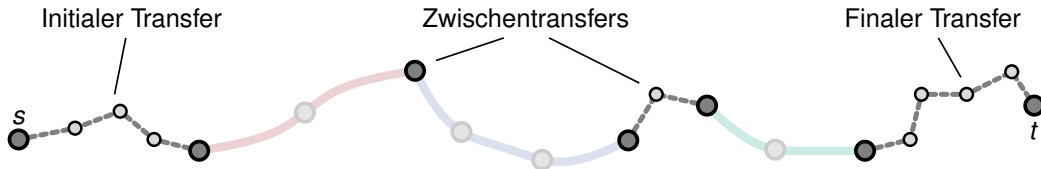


Frage

In welchem Teil der Journey wird unbeschränktes Laufen benötigt?

Arten von Transfers:

- **Initialer Transfer:** (engl. *initial transfer*)
Verbindet Startknoten mit erstem Stop
- **Zwischentransfer:** (engl. *intermediate transfer*)
Verbindet zwei Trips
- **Finaler Transfer:** (engl. *final transfer*)
Verbindet letzten Stop mit Zielknoten



Hypothese

- Lange Laufwege hauptsächlich bei initialen und finalen Transfers (Anbindung von Start- und Zielpunkt ans ÖV-Netzwerk)
- Lange Zwischentransfers sind eher selten

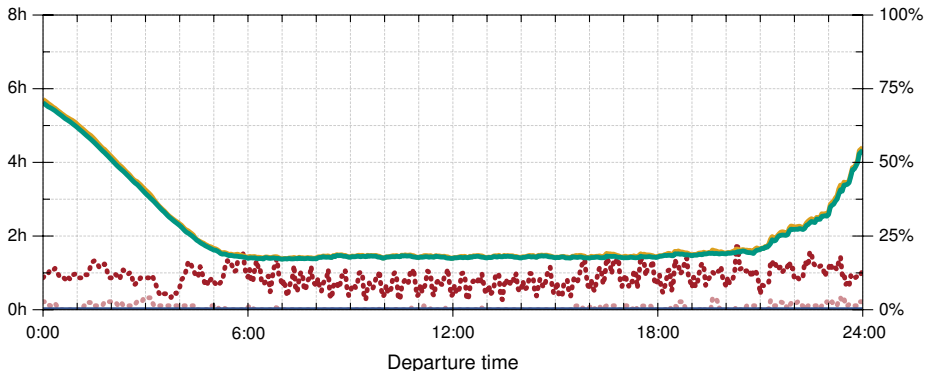
Weiteres Experiment:

- Neue Fußwege-Konfiguration **partial intermediate**:
 - Erlaube unbeschränktes Laufen nur für initiale und finale Transfers
 - Benutze transitiv abgeschlossenen Graph für Zwischentransfers
- Vergleiche mit komplett unbeschränktem Laufen
- Unterschied in Reisezeiten sollte deutlich schrumpfen

Experimente

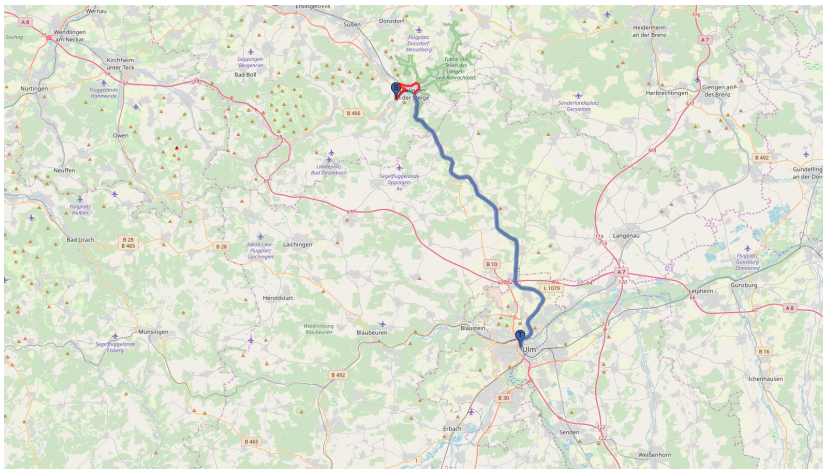
Vergleich der Reisezeiten:

- Switzerland complete vs. partial intermediate (Distance rank 16)



Beispiel

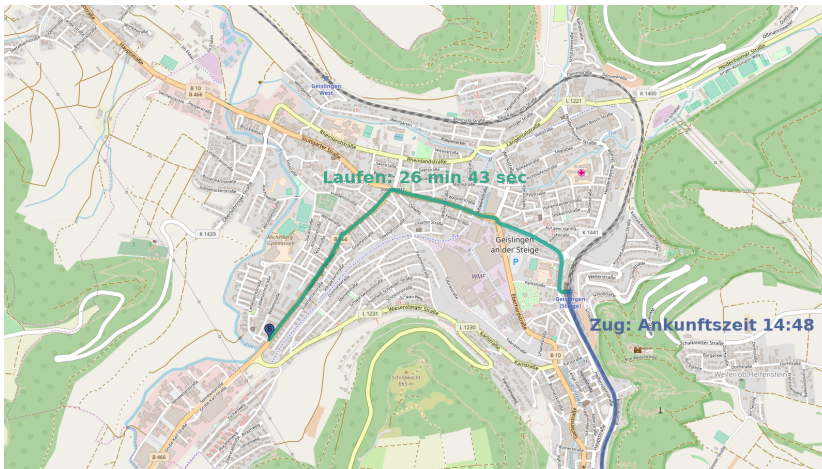
Query: Geislingen (Bebelstraße) nach Ulm Hbf um 13:10



Beispiel

Query: Geislingen (Bebelstraße) nach Ulm Hbf um 13:10

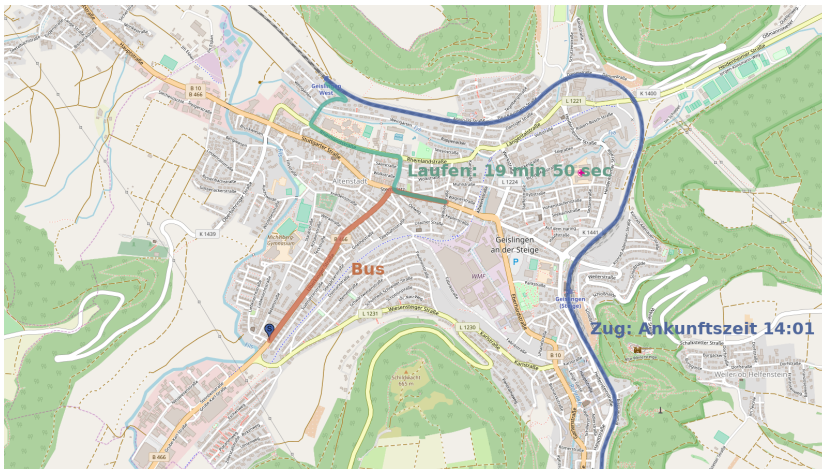
Zwischentransfers beschränkt:



Beispiel

Query: Geislingen (Bebelstraße) nach Ulm Hbf um 13:10

Zwischentransfers unbeschränkt:



ULTRA

(UnLimited TRAnsfers)

[BBS⁺19]

Problemstellung

Gegeben:

- Public-Transit-Netzwerk
 - Alle fahrplanbasierten Transportmodi
 - Zug, Straßenbahn, Bus, ...
- Unbeschränkter Transfergraph
 - Ein nicht-fahrplanbasierter Transportmodus
 - Laufen, Fahrrad, E-Scooter, ...
- Startknoten s , Zielknoten t , Abfahrtszeit τ_{dep}



Gesucht:

- Pareto-Menge von s - t -Journeys
- Kriterien: Ankunftszeit und Anzahl benutzter Trips

Problemstellung

Gegeben:

- Public-Transit-Netzwerk
 - Alle fahrplanbasierten Transportmodi
 - Zug, Straßenbahn, Bus, ...
- Unbeschränkter Transfergraph
 - Ein nicht-fahrplanbasierter Transportmodus
 - Laufen, Fahrrad, E-Scooter, ...
- Startknoten s , Zielknoten t , Abfahrtszeit τ_{dep}

Gesucht:

- Pareto-Menge von s - t -Journeys
- Kriterien: Ankunftszeit und Anzahl benutzter Trips



Bisher:

- Reine PT-Algorithmen können nur beschränkte Transfers
- MCR mit zwei Kriterien ($MR-\infty$) braucht teure Dijkstra-Phasen

Ziel:

- Unbeschränkte Transfers ohne Performance-Einbußen in der Query
- Nehme dafür Vorberechnungsphase in Kauf

Folgerungen aus Experimenten:

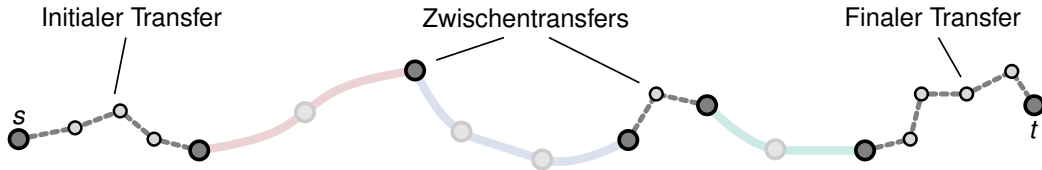
- Unbeschränktes Laufen lohnt sich oft
- Bei schnellerem Transfermodus (z.B. Fahrrad) erst recht
- Behandle initiale/finale Transfers anders als Zwischentransfers

Initiale/finale Transfers:

- Häufig
- Oft lang
- + Ein Endpunkt bekannt (s oder t)

Zwischentransfers:

- + Selten
- + Meistens kurz
- Beide Endpunkte unbekannt

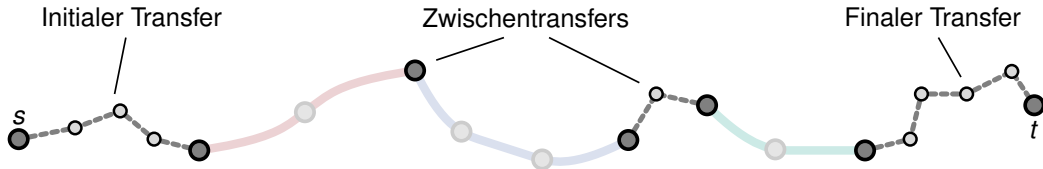


Initiale/finale Transfers:

- Häufig
- Oft lang
- + Ein Endpunkt bekannt (s oder t)
- Benutze schnelle One-to-Many-Technik
- Bucket-CH

Zwischentransfers:

- + Selten
- + Meistens kurz
- Beide Endpunkte unbekannt
- Berechne für alle relevanten Zwischentransfers Shortcuts vor
- 1-Hop-Transfers in der Query



Vorbereitung – Grundidee

Erste Idee:

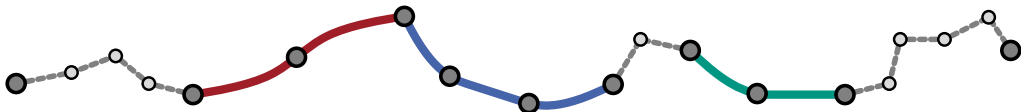
- Zähle alle Pareto-optimalen Journeys auf
- Füge für jeden benutzten Zwischentransfer einen Shortcut ein

Nutze Subpfadeigenschaft aus:

- Es reicht, Journeys mit genau 2 Trips aufzuzählen

Naive Implementierung:

- Profil-Variante von MCR beschränkt auf zwei Runden
- Für jeden Stop: Profilsuche zu allen anderen Stops
- Aber vorhin gesehen: Profil-MCR ist ineffizient



Vorberechnung – Grundidee

Erste Idee:

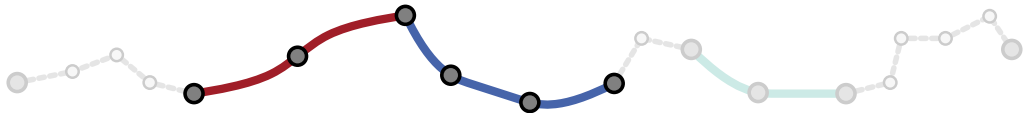
- Zähle alle Pareto-optimalen Journeys auf
- Füge für jeden benutzten Zwischentransfer einen Shortcut ein

Nutze Subpfadeigenschaft aus:

- Es reicht, Journeys mit genau 2 Trips aufzuzählen

Naive Implementierung:

- Profil-Variante von MCR beschränkt auf zwei Runden
- Für jeden Stop: Profilsuche zu allen anderen Stops
- Aber vorhin gesehen: Profil-MCR ist ineffizient



Vorberechnung – Grundidee

Erste Idee:

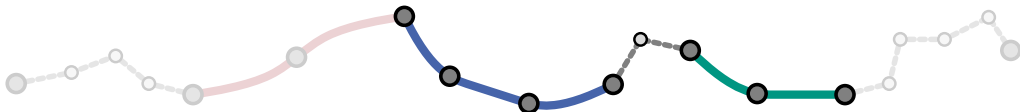
- Zähle alle Pareto-optimalen Journeys auf
- Füge für jeden benutzten Zwischentransfer einen Shortcut ein

Nutze Subpfadeigenschaft aus:

- Es reicht, Journeys mit genau 2 Trips aufzuzählen

Naive Implementierung:

- Profil-Variante von MCR beschränkt auf zwei Runden
- Für jeden Stop: Profilsuche zu allen anderen Stops
- Aber vorhin gesehen: Profil-MCR ist ineffizient

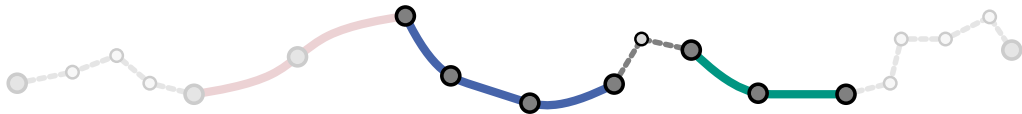


Beobachtung:

- Wir müssen nicht *alle* Pareto-optimalen 2-Trip-Journeys aufzählen
- Wir müssen nur alle benötigten Zwischentransfers finden

Zwei Typen von Journeys:

- **Kandidaten** haben die Form Trip – Transfer – Trip
- **Zeugen** sind alle anderen Journeys mit höchstens 2 Trips



Kandidat wird von einem Zeugen dominiert \Leftrightarrow Kein Shortcut benötigt

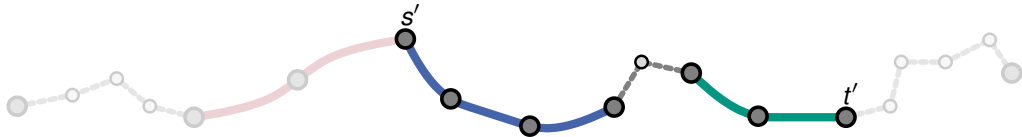
(Vereinfachende Annahme: Keine zwei Journeys sind in beiden Kriterien gleichwertig)

Beobachtung:

- Wir müssen nicht *alle* Pareto-optimalen 2-Trip-Journeys aufzählen
- Wir müssen nur alle benötigten Zwischentransfers finden

Zwei Typen von Journeys:

- **Kandidaten** haben die Form Trip – Transfer – Trip
- **Zeugen** sind alle anderen Journeys mit höchstens 2 Trips



Kandidat wird von einem Zeugen dominiert \Leftrightarrow Kein Shortcut benötigt

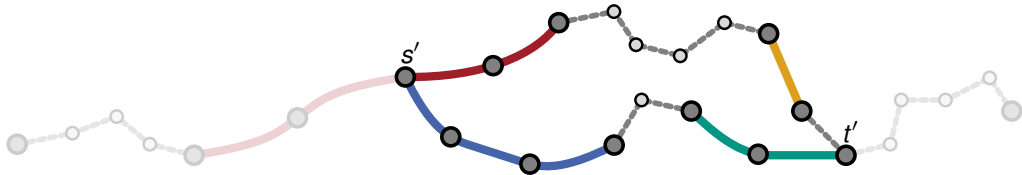
(Vereinfachende Annahme: Keine zwei Journeys sind in beiden Kriterien gleichwertig)

Beobachtung:

- Wir müssen nicht *alle* Pareto-optimalen 2-Trip-Journeys aufzählen
- Wir müssen nur alle benötigten Zwischentransfers finden

Zwei Typen von Journeys:

- **Kandidaten** haben die Form Trip – Transfer – Trip
- **Zeugen** sind alle anderen Journeys mit höchstens 2 Trips



Kandidat wird von einem Zeugen dominiert \Leftrightarrow Kein Shortcut benötigt

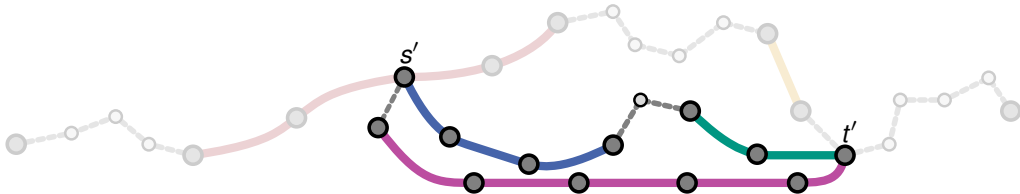
(Vereinfachende Annahme: Keine zwei Journeys sind in beiden Kriterien gleichwertig)

Beobachtung:

- Wir müssen nicht *alle* Pareto-optimalen 2-Trip-Journeys aufzählen
- Wir müssen nur alle benötigten Zwischentransfers finden

Zwei Typen von Journeys:

- **Kandidaten** haben die Form Trip – Transfer – Trip
- **Zeugen** sind alle anderen Journeys mit höchstens 2 Trips



Kandidat wird von einem Zeugen dominiert \Leftrightarrow Kein Shortcut benötigt

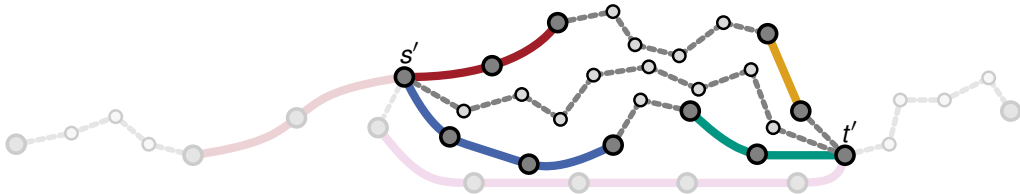
(Vereinfachende Annahme: Keine zwei Journeys sind in beiden Kriterien gleichwertig)

Beobachtung:

- Wir müssen nicht *alle* Pareto-optimalen 2-Trip-Journeys aufzählen
- Wir müssen nur alle benötigten Zwischentransfers finden

Zwei Typen von Journeys:

- **Kandidaten** haben die Form Trip – Transfer – Trip
- **Zeugen** sind alle anderen Journeys mit höchstens 2 Trips



Kandidat wird von einem Zeugen dominiert \Leftrightarrow Kein Shortcut benötigt

(Vereinfachende Annahme: Keine zwei Journeys sind in beiden Kriterien gleichwertig)

Aufzählen der Kandidaten

Wir wollen aufzählen:

- 1 Alle optimalen Kandidaten
- 2 Für jeden dominierten Kandidaten: ≥ 1 dominierenden Zeugen

Finde Kandidaten:

- Keine initialen Transfers \rightarrow Abfahrt immer an s
- Eine RAPTOR-Iteration pro Abfahrt direkt an s (r-RAPTOR)

Finde dominierende Zeugen für Kandidaten mit Abfahrtszeit τ :

- Normale RAPTOR-Query für Abfahrtszeit τ
- Kann in RAPTOR-Iteration für τ integriert werden

Einsammeln der Abfahrtszeiten

- Erzeuge Tupel $(R, v, \tau_{\text{dep}})$ für jede
 - Abfahrt von Route R
 - an Stop v
 - zum Zeitpunkt $\tau_{\text{dep}} + d(s, v)$
- Sortiere Tupel absteigend nach τ_{dep}
- Tupel mit $v = s$:
 - Potenzieller Kandidat
 - RAPTOR-Iteration für τ_{dep}
- Tupel mit $v \neq s$:
 - Potenzieller Zeuge
- RAPTOR-Iteration für τ :
 - Sammle Tupel mit $\tau_{\text{dep}} \geq \tau$
 - Scanne jeweils Route R ab Stop v
 - Lösche Tupel

	Kandidaten	Zeugen	
			⋮
Iterationen -	R_1	s	9:25
	R_4	v_3	9:20
	R_1	v_2	9:17
	R_4	v_3	9:15
	R_1	s	9:12
	R_2	s	9:12
	R_3	v_2	9:08
	R_2	v_1	9:05
	R_1	s	9:00
	R	v	τ_{dep}

Vorbereitung – Pseudocode

```
for jeden Stop s do // trivial parallelisierbar
  Relaxiere initiale Transfers von s zu allen Stops
  Sammle Abfahrtszeiten ein
  for jede Abfahrtszeit  $\tau$  an s absteigend do
    // Runde 1
    Sammle initiale Routen ein
    Scanne initiale Routen
    Relaxiere Zwischentransfers

    // Runde 2
    Scanne finale Routen // Erzeugt Kandidaten
    Relaxiere finale Transfers // Prunt Kandidaten

    for jeden optimalen Kandidaten do
      Entpacke Shortcut
```

Während der RAPTOR-Iteration:

- Kandidaten brauchen Parent-Pointer zum Entpacken der Shortcuts
 - Wie Zeugen von Kandidaten unterscheiden?
- ⇒ Zeugen bekommen Dummy-Wert als Parent-Pointer

Shortcuts entpacken:

- Iteriere über in Runde 2 erzeugte Labels
- Parent-Pointer nicht Dummy ⇒ optimaler Kandidat
- Verfolge Parent-Pointer und extrahiere Shortcut

Noch besseres Pruning:

- Journey ist nur Kandidat, wenn Shortcut noch nicht hinzugefügt wurde

Relaxiere Transfers:

- Dijkstra auf partiell kontrahiertem Core-Graph (wie UCCH & MCR)
- Trotz Kontraktion teuer \rightsquigarrow beschränken?

Initiale Transfers:

- Werden nur einmal pro Stop exploriert

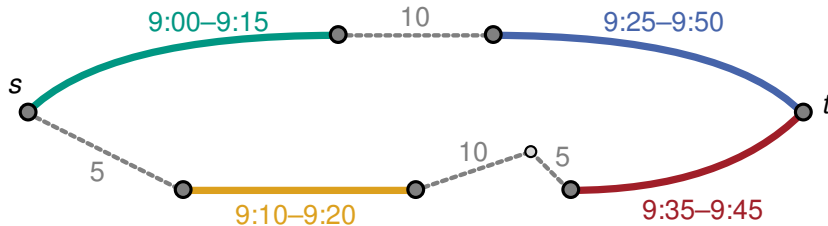
Finale Transfers:

- Routenscan in Runde 2: Merke Stops, die über Kandidat erreicht werden
- Abbruchkriterium: Dijkstra hat alle diese Stops erreicht
- Korrektheit: Danach kann kein Kandidat mehr dominiert werden

Vorbereitung – Zwischentransfers

Zwischentransfers:

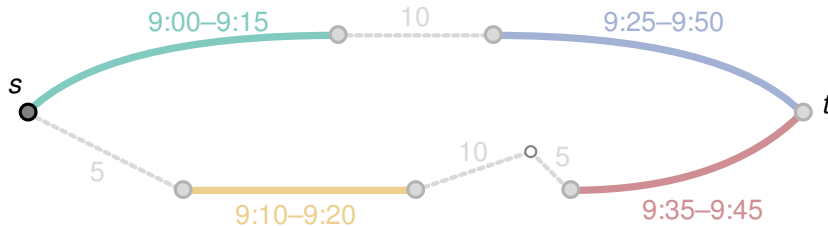
- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Vorbereitung – Zwischentransfers

Zwischentransfers:

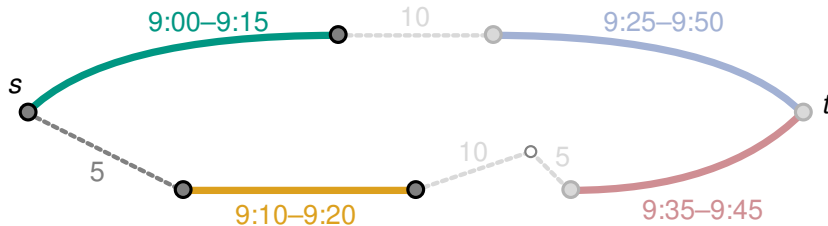
- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Vorbereitung – Zwischentransfers

Zwischentransfers:

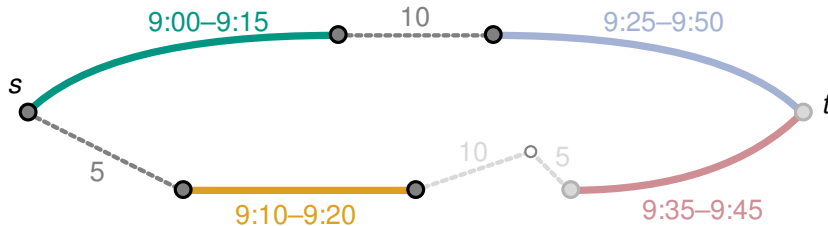
- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Vorbereitung – Zwischentransfers

Zwischentransfers:

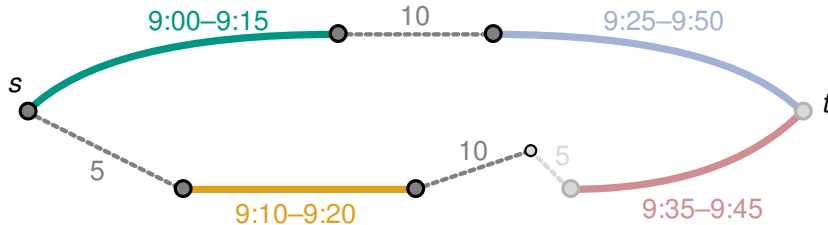
- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Vorbereitung – Zwischentransfers

Zwischentransfers:

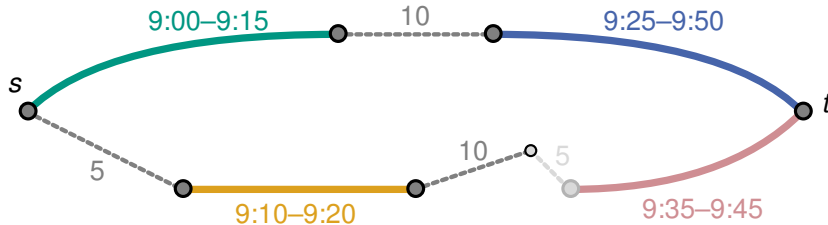
- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Vorbereitung – Zwischentransfers

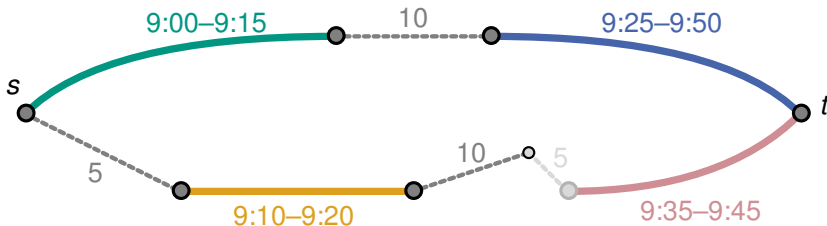
Zwischentransfers:

- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



Zwischentransfers:

- Breche ab, wenn keine Kandidaten mehr in Queue sind?
- Kann zu nicht gefundenen Zeugen führen → überflüssige Shortcuts



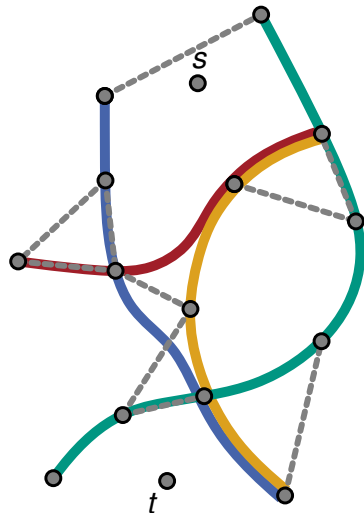
Witness Limit $\bar{\tau}$:

- τ_{arr} : Späteste optimale Ankunftszeit ohne initialen Transfer
- Abbruchkriterium: Queue-Key $> \tau_{arr} + \bar{\tau}$
- Tradeoff Laufzeit vs. Anzahl Shortcuts

Query – Black-Box

Black-Box-Query:

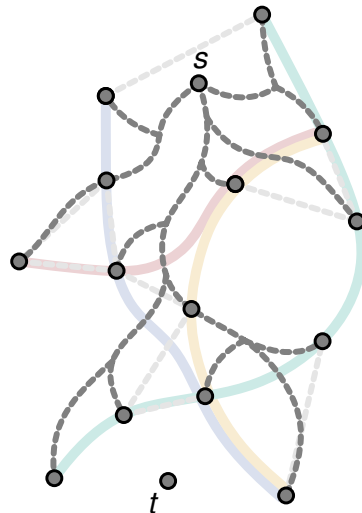
- Berechne initiale/finale Transfers mit One-to-Many-Algorithmus
 - One = Start/Ziel
 - Many = Stops
 - Schnelle Implementierung: Bucket-CH
- Baue temporären Transfer-Graph G' mit:
 - Vorberechneten Shortcuts
 - Initialen Transfers
 - Finalen Transfers
- Lasse beliebigen PT-Algorithmus auf PT-Netzwerk + G' laufen



Query – Black-Box

Black-Box-Query:

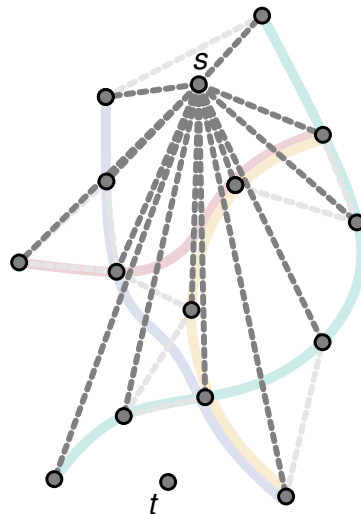
- Berechne initiale/finale Transfers mit One-to-Many-Algorithmus
 - One = Start/Ziel
 - Many = Stops
 - Schnelle Implementierung: Bucket-CH
- Baue temporären Transfer-Graph G' mit:
 - Vorberechneten Shortcuts
 - Initialen Transfers
 - Finalen Transfers
- Lasse beliebigen PT-Algorithmus auf PT-Netzwerk + G' laufen



Query – Black-Box

Black-Box-Query:

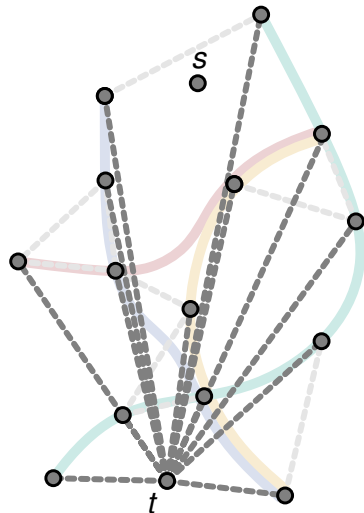
- Berechne initiale/finale Transfers mit One-to-Many-Algorithmus
 - One = Start/Ziel
 - Many = Stops
 - Schnelle Implementierung: Bucket-CH
- Baue temporären Transfer-Graph G' mit:
 - Vorberechneten Shortcuts
 - Initialen Transfers
 - Finalen Transfers
- Lasse beliebigen PT-Algorithmus auf PT-Netzwerk + G' laufen



Query – Black-Box

Black-Box-Query:

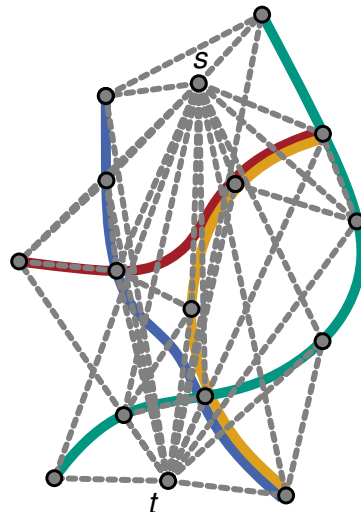
- Berechne initiale/finale Transfers mit One-to-Many-Algorithmus
 - One = Start/Ziel
 - Many = Stops
 - Schnelle Implementierung: Bucket-CH
- Baue temporären Transfer-Graph G' mit:
 - Vorberechneten Shortcuts
 - Initialen Transfers
 - Finalen Transfers
- Lasse beliebigen PT-Algorithmus auf PT-Netzwerk + G' laufen



Query – Black-Box

Black-Box-Query:

- Berechne initiale/finale Transfers mit One-to-Many-Algorithmus
 - One = Start/Ziel
 - Many = Stops
 - Schnelle Implementierung: Bucket-CH
- Baue temporären Transfer-Graph G' mit:
 - Vorberechneten Shortcuts
 - Initialen Transfers
 - Finalen Transfers
- Lasse beliebigen PT-Algorithmus auf PT-Netzwerk + G' laufen



Query – Direkte Integration

Temporärer Graph G' unterscheidet nicht zwischen Transfertypen
→ direkte Integration in PT-Algorithmus

Temporärer Graph G' unterscheidet nicht zwischen Transfertypen

→ direkte Integration in PT-Algorithmus

Initiale Transfers:

- Liefern Distanz $d(s, u)$ zu jedem erreichbaren Stop u
- Initialisiere jeden erreichbaren Stop u mit $\tau_{\text{dep}} + d(s, u)$
- Beispiel RAPTOR: Aktualisiere Label, sammle Routen für u ein

Query – Direkte Integration

Temporärer Graph G' unterscheidet nicht zwischen Transfertypen

→ direkte Integration in PT-Algorithmus

Initiale Transfers:

- Liefern Distanz $d(s, u)$ zu jedem erreichbaren Stop u
- Initialisiere jeden erreichbaren Stop u mit $\tau_{\text{dep}} + d(s, u)$
- Beispiel RAPTOR: Aktualisiere Label, sammle Routen für u ein

Finale Transfers:

- On-the-fly während PT-Query
- Wenn Query Stop v mit $d(v, t) < \infty$ erreicht:
Überprüfe, ob finaler Transfer Ankunftszeit an t verbessert
- Beispiel RAPTOR: Beim Erreichen von v in der Routenphase

Vorwärts-Bucket $\beta^\uparrow(u)$:

- Enthält Eintrag $(v, d(u, v))$ für jeden erreichbaren Stop v
- Befüllt durch Rückwärtssuchen von allen Stops
- Sortiere Einträge aufsteigend nach $d(u, v)$

Vorwärts-Bucket $\beta^\uparrow(u)$:

- Enthält Eintrag $(v, d(u, v))$ für jeden erreichbaren Stop v
- Befüllt durch Rückwärtssuchen von allen Stops
- Sortiere Einträge aufsteigend nach $d(u, v)$

Bucket-Auswertung mit Target Pruning:

- CH-Suche zwischen s und $t \Rightarrow d(s, t)$ bekannt
- Scanne $\beta^\uparrow(u)$ nur, falls $d(s, u) \leq d(s, t)$
- Das gilt genau dann, wenn CH-Aufwärtssuche u besucht hat
- Scannen von $\beta^\uparrow(u)$:
 - Iteriere über Einträge $(v, d(u, v))$
 - Update $d(s, v)$ mit $d(s, u) + d(u, v)$
 - Breche ab, sobald $d(s, u) + d(u, v) > d(s, t)$

Query – Bucket-CH

Vorwärts-Bucket $\beta^\uparrow(u)$:

- Enthält Eintrag $(v, d(u, v))$ für jeden erreichbaren Stop v
- Befüllt durch Rückwärtssuchen von allen Stops
- Sortiere Einträge aufsteigend nach $d(u, v)$

Bucket-Auswertung mit Target Pruning:

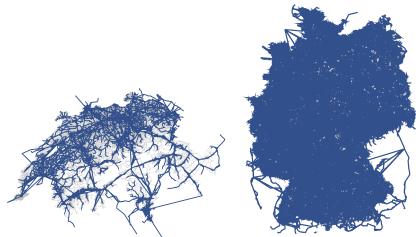
- CH-Suche zwischen s und $t \Rightarrow d(s, t)$ bekannt
- Scanne $\beta^\uparrow(u)$ nur, falls $d(s, u) \leq d(s, t)$
- Das gilt genau dann, wenn CH-Aufwärtssuche u besucht hat
- Scannen von $\beta^\uparrow(u)$:
 - Iteriere über Einträge $(v, d(u, v))$
 - Update $d(s, v)$ mit $d(s, u) + d(u, v)$
 - Breche ab, sobald $d(s, u) + d(u, v) > d(s, t)$

Analog für Rückwärts-Buckets $\beta^\downarrow(u)$

Experimente – Instanzen

Instanzen:

- Fahrpläne über zwei Tage
 - Schweiz (GTFS-Feed)
 - Deutschland (von DB)
- Transfer-Graphen von OSM
 - Straßen und Fußgängerzonen
 - Beachte Tempolimits
- Transitive Graphen zum Vergleich
 - Beschränkte Laufdauer
 - Avg. Knotengrad ≈ 100



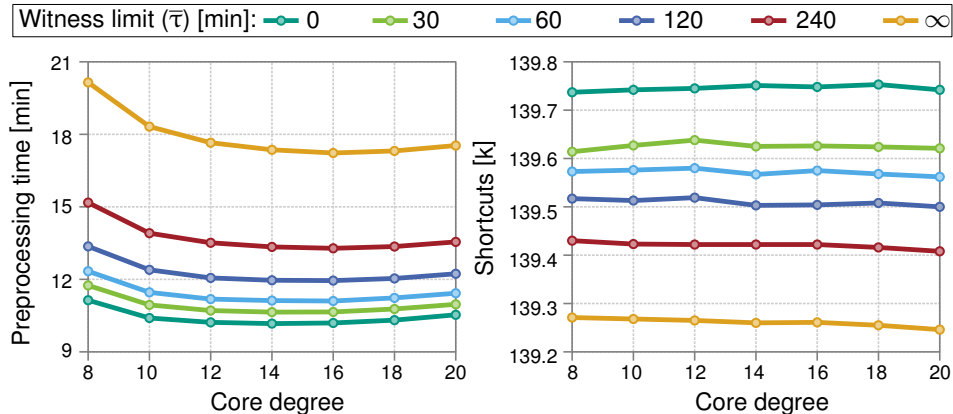
Network	Switzerland	Germany
Stops	25 426	244 055
Routes	13 934	231 089
Trips	369 534	2 387 297
Stop events	4 740 929	48 495 169
Vertices	604 167	6 872 105
Full edges	1 847 140	21 372 360
Transitive edges	4 687 016	22 645 480

Vorberechnung – Witness Limit

Aufbau:

- Schweiz mit Laufen als Transfermodus (4.5 km/h)
- Parallel mit 16 Kernen

Ergebnis:



Aufbau:

- Schweiz mit Laufen als Transfermodus (4.5 km/h)
- Witness Limit $\bar{\tau} = 15$ min (ab jetzt immer)

Ergebnis:

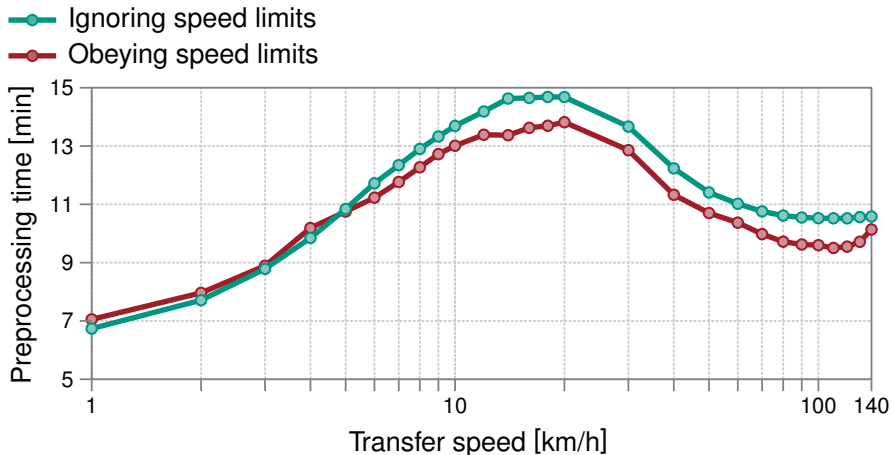
Number of threads	1	2	4	8	16
Preprocessing time [mm:ss]	2:00:56	58:03	31:11	17:29	10:12
Speed-up factor	1	2.08	3.88	6.92	11.85

Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

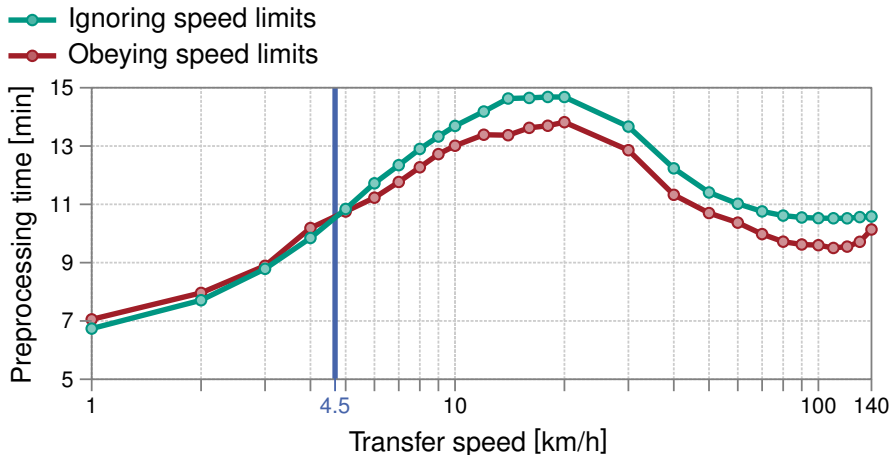


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

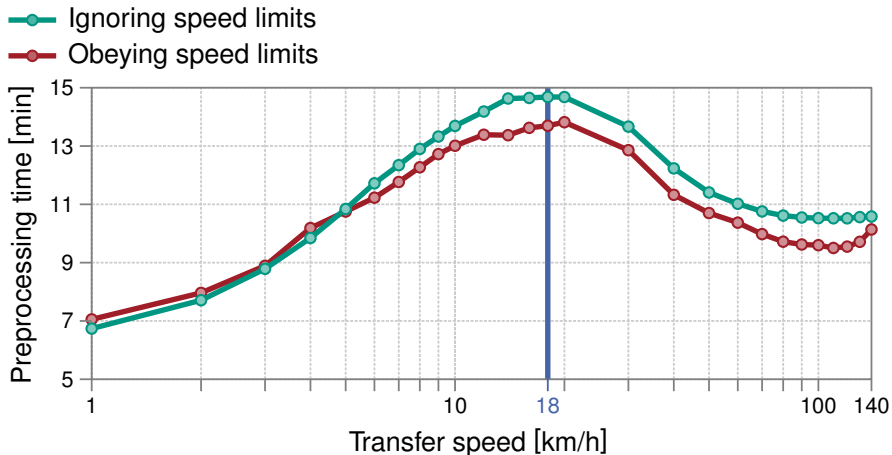


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

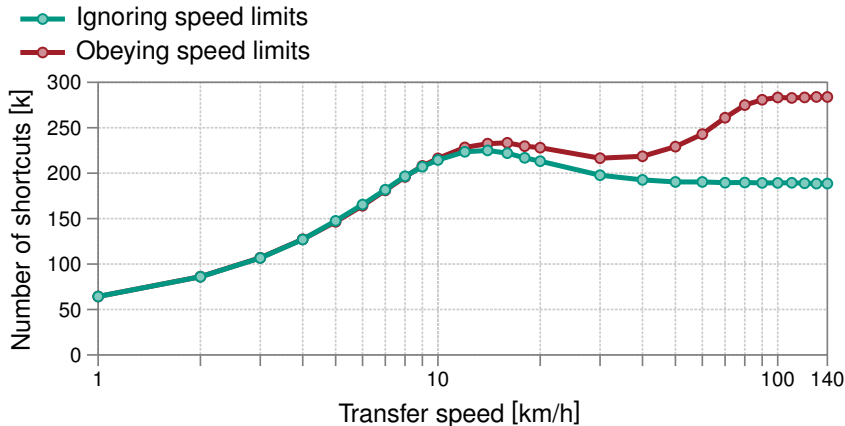


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

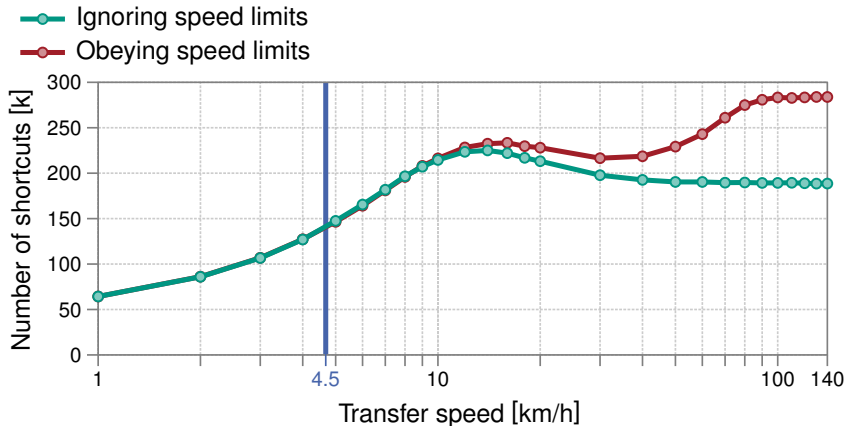


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

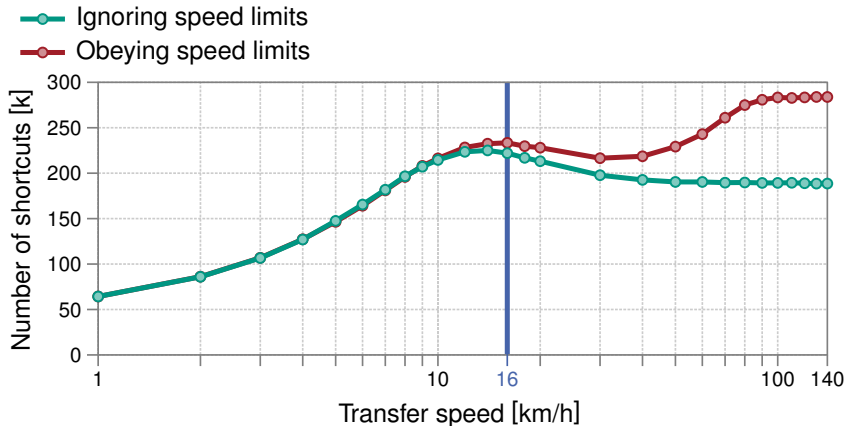


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

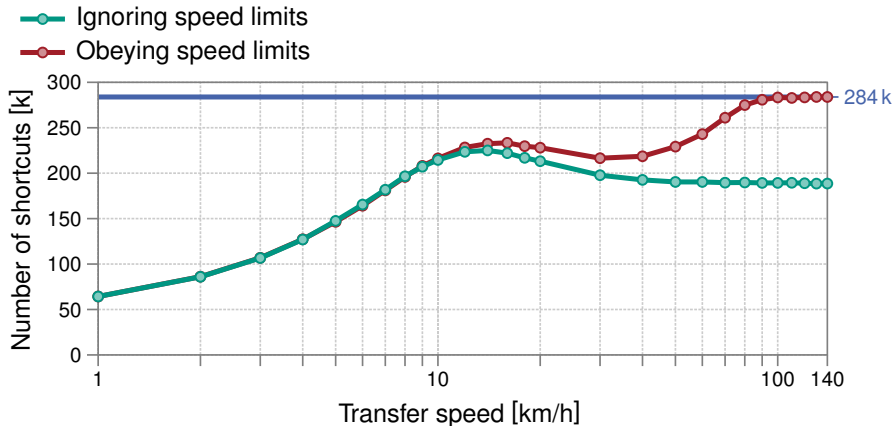


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph

Ergebnis:

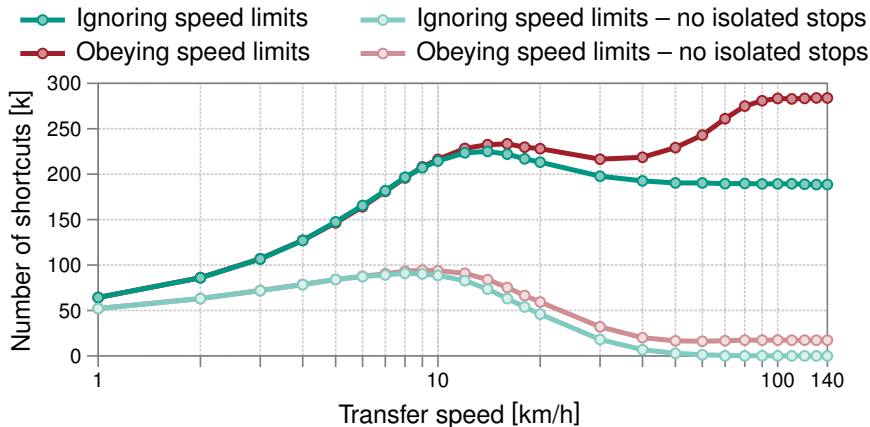


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph
- Im Transfergraph isolierte Stops wurden herausgefiltert

Ergebnis:

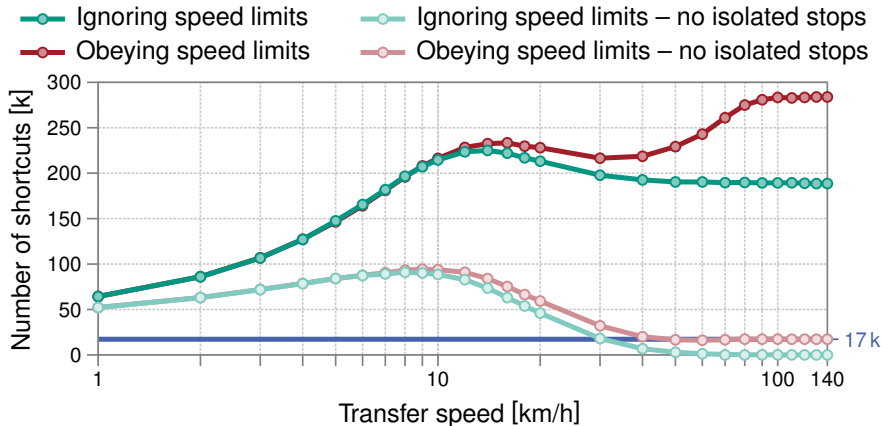


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph
- Im Transfergraph isolierte Stops wurden herausgefiltert

Ergebnis:

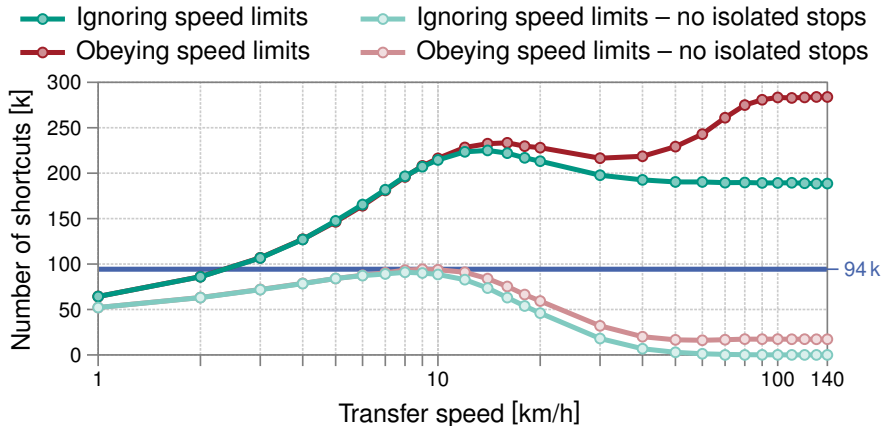


Vorberechnung

Aufbau:

- Schweiz mit verschiedenen Geschwindigkeiten für den Transfergraph
- Im Transfergraph isolierte Stops wurden herausgefiltert

Ergebnis:



Setup:

- CSA-basierte Queries, optimieren nur Ankunftszeit
- MCSA kombiniert CSA mit Dijkstra (ähnlich MCR)
- Query-Typ für CSA*: Stop-zu-Stop
- Query-Typ für MCSA, ULTRA-CSA: Knoten-zu-Knoten

Network	Algorithm	Scans [k]		Time [ms]		
		Connections	Edges	Init.	Scan	Total
Switzerland (4.5 km/h)	CSA*	124.7	1 294	0.1	6.0	6.2
	MCSA	85.3	244	9.9	9.0	18.8
	ULTRA-CSA	84.7	80	1.3	4.2	5.6
Germany (4.5 km/h)	CSA*	2 564.0	6 269	1.7	145.8	147.5
	MCSA	1 527.8	3 182	148.2	185.9	334.1
	ULTRA-CSA	1 523.4	933	23.3	119.7	143.0

Setup:

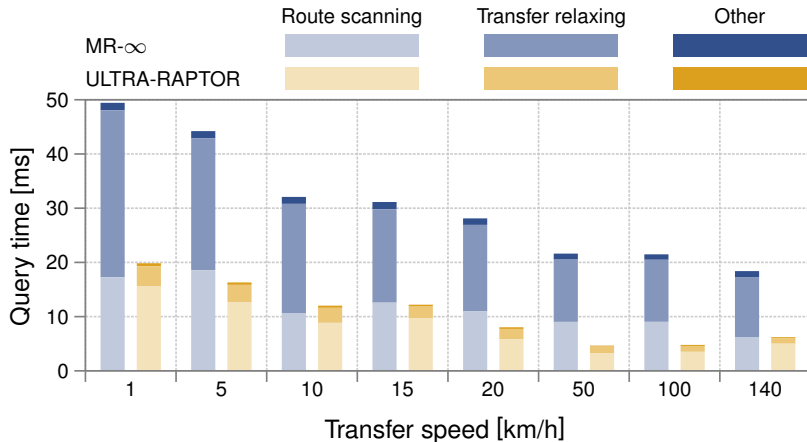
- RAPTOR-basierte Queries, optimieren Ankunftszeit und Anzahl Trips
- $MR-\infty$ ist MCR mit unbeschränktem Laufen
- Query-Typ für RAPTOR*: Stop-zu-Stop
- Query-Typ für $MR-\infty$, ULTRA-RAPTOR: Knoten-zu-Knoten

Network	Algorithm	Scans [k]		Time [ms]				
		Routes	Edges	Init.	Collect	Scan	Relax	Total
Switzerland (4.5 km/h)	RAPTOR*	27.2	3527	0.0	3.7	6.4	7.8	18.4
	$MR-\infty$	34.9	769	11.6	5.9	8.2	12.3	39.3
	ULTRA-RAPTOR	37.7	148	1.6	4.9	7.9	1.9	16.7
Germany (4.5 km/h)	RAPTOR*	480.4	25798	0.0	166.9	178.0	85.1	436.5
	$MR-\infty$	555.8	12571	191.1	250.7	202.2	272.2	944.1
	ULTRA-RAPTOR	610.6	2224	26.8	204.5	202.9	37.0	477.8

Query – ULTRA-RAPTOR

Setup:

- RAPTOR-basierte Queries, optimieren Ankunftszeit und Anzahl Trips



Erweiterungen der ULTRA-Vorbereitung:

- Drittes Kriterium: Im Transfermodus verbrachte Zeit
- Weitere Kriterien (Preis, Fahrzeugbelegung, ...)
- Shortcuts mit Verspätungstoleranz
- Mehrere Transfermodi
- Kompliziertere Transfermodi (Bike-Sharing-Stationen)

[PS22b]

Offen

In Arbeit

[PS22a]

[SWZ20b]

Anwendungen der ULTRA-Shortcuts:

- Multimodale Umlegung
- Andere PT-Algorithmen (Trip-Based Routing, ...)
- One-to-Many-Queries

[SWZ19]

[SWZ20c]

[SWZ20a]

Ende

Praktikum zur Routenplanung


- 6 ECTS-Punkte
- Implementierung von Algorithmen aus der Vorlesung, z.B.
 - CRP
 - CCH
 - PHAST
 - ULTRA
 - CHArge
 - ...
- In 2er- oder 3er-Teams
- Möglichkeit, aktuelle Forschung praktisch auszuprobieren!

Details werden auf unserer Website bekanntgegeben

 Moritz Baum, Valentin Buchhold, Jonas Sauer, Dorothea Wagner, and Tobias Zündorf.


UnLimited TRAnsfers for Multi-Modal Route Planning: An Efficient Solution.

In *27th Annual European Symposium on Algorithms (ESA 2019)*, pages 14:1–14:16, 2019.

 Moritz Potthoff and Jonas Sauer.


Efficient Algorithms for Fully Multimodal Journey Planning.

In *22nd Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2022)*, pages 14:1–14:15, 2022.

 Moritz Potthoff and Jonas Sauer.

Fast Multimodal Journey Planning for Three Criteria.

In *Proceedings of the 24th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX 2022)*, pages 145–157, 2022.

 Jonas Sauer, Dorothea Wagner, and Tobias Zündorf.

Efficient Computation of Multi-Modal Public Transit Traffic Assignments Using ULTRA.

In *Proceedings of the 27th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, page 524–527, 2019.



Jonas Sauer, Dorothea Wagner, and Tobias Zündorf.

An Efficient Solution for One-to-Many Multi-Modal Journey Planning.

In 20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2020), pages 1:1–1:15, 2020.



Jonas Sauer, Dorothea Wagner, and Tobias Zündorf.

Faster Multi-Modal Route Planning With Bike Sharing Using ULTRA.

In 18th International Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2020), pages 16:1–16:14, 2020.



Jonas Sauer, Dorothea Wagner, and Tobias Zündorf.

Integrating ULTRA and Trip-Based Routing.

In 20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2020), pages 4:1–1:15, 2020.



Dorothea Wagner and Tobias Zündorf.

Public Transit Routing with Unrestricted Walking.

In 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017), 2017.