

Algorithmen für Routenplanung

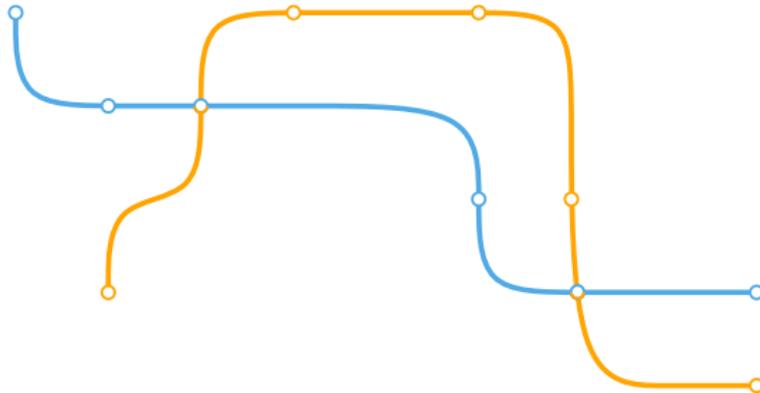
19. Vorlesung, Sommersemester 2021

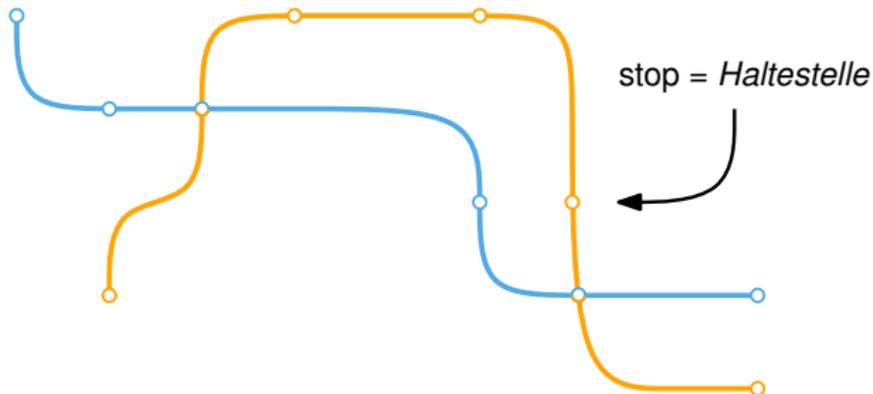
Adrian Feilhauer | 23. Juni 2021

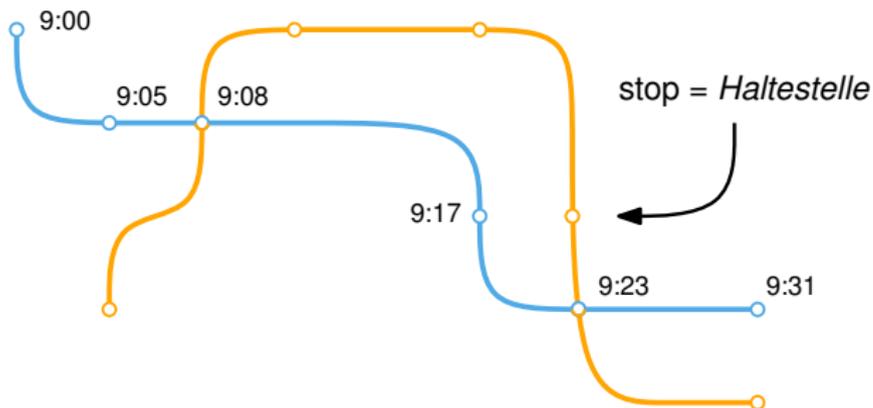
INSTITUT FÜR THEORETISCHE INFORMATIK · ALGORITHMIK · PROF. DR. DOROTHEA WAGNER

Fahrplanauskunft

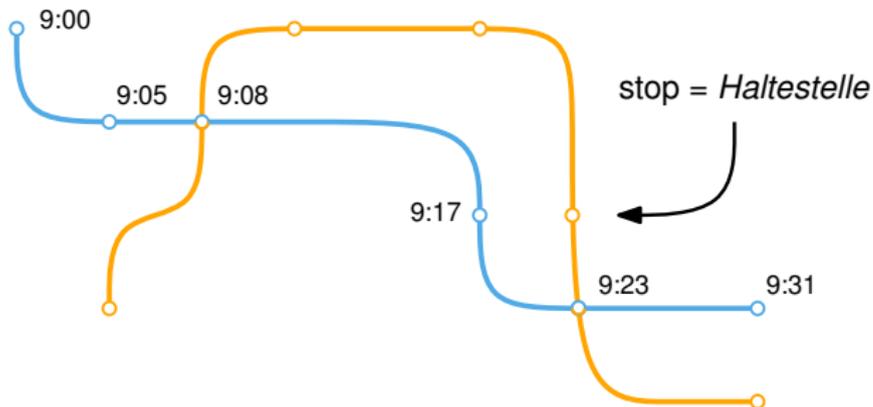
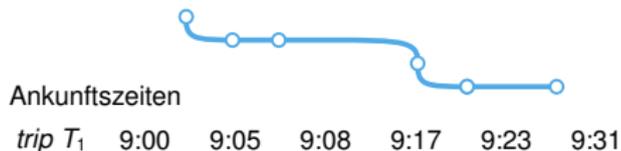




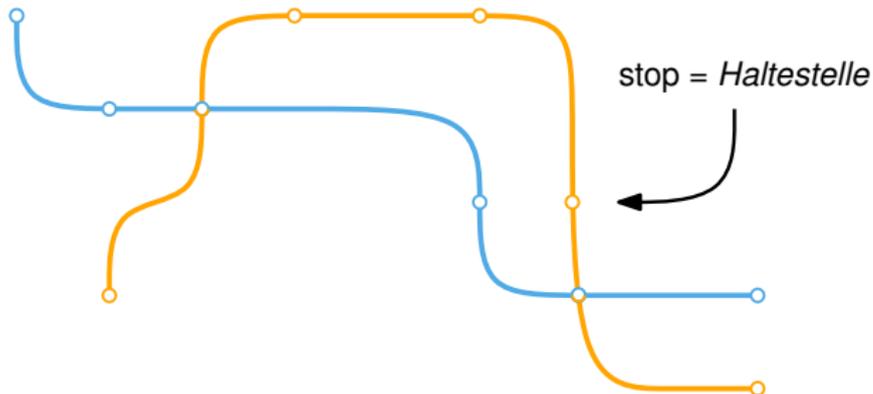
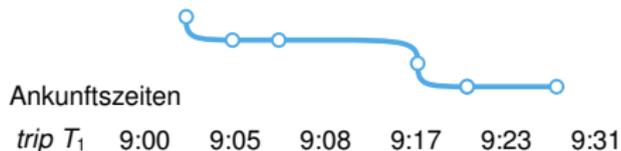




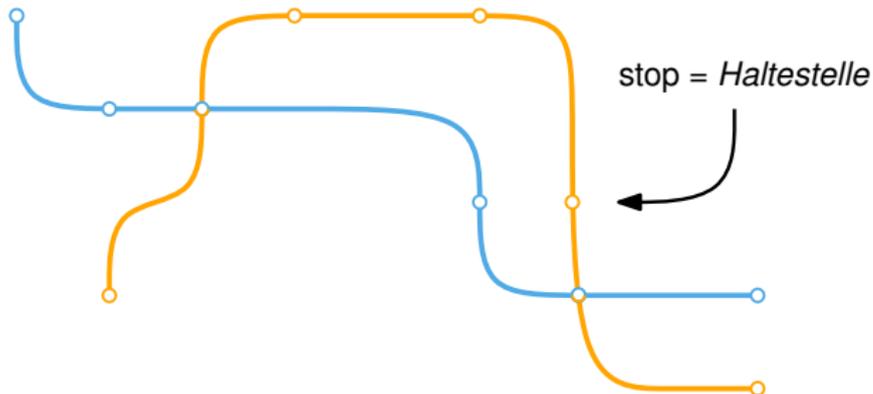
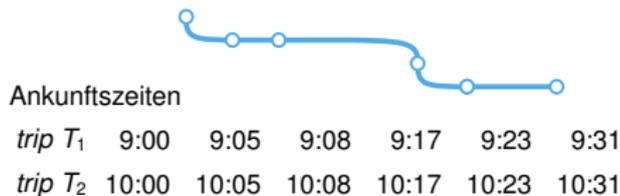
Wdh. Begriffe



Wdh. Begriffe



Wdh. Begriffe

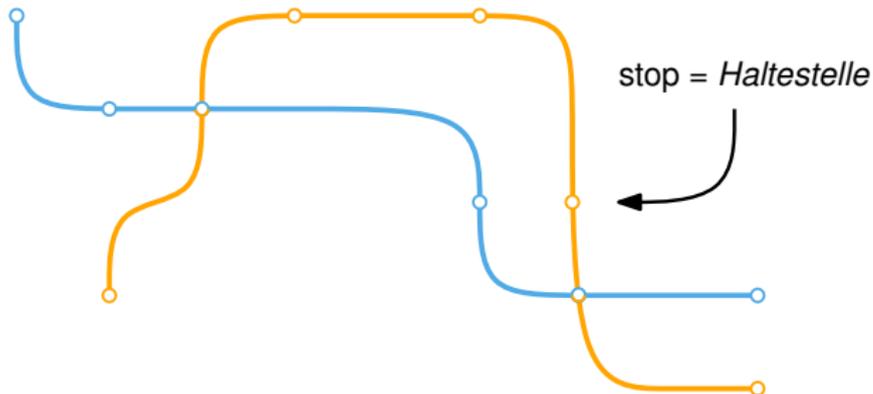


Wdh. Begriffe



Ankunftszeiten

trip T_1	9:00	9:05	9:08	9:17	9:23	9:31
trip T_2	10:00	10:05	10:08	10:17	10:23	10:31
trip T_3	10:30	10:35	10:38	—	—	10:53



Wdh. Begriffe

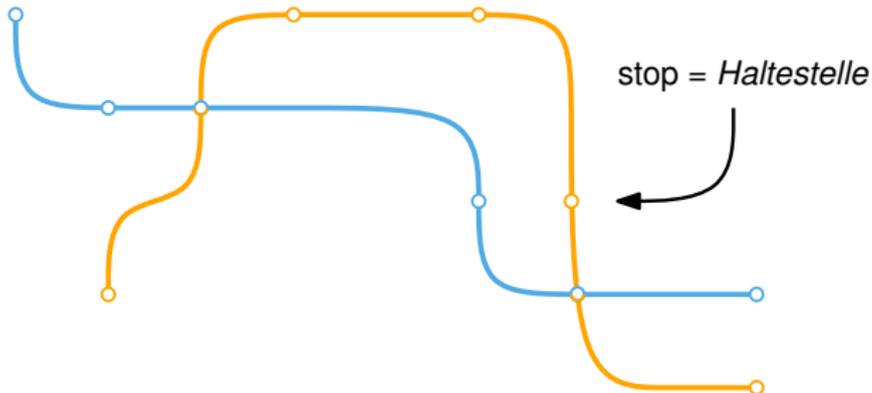


Ankunftszeiten

<i>trip</i> T_1	9:00	9:05	9:08	9:17	9:23	9:31
<i>trip</i> T_2	10:00	10:05	10:08	10:17	10:23	10:31
<i>trip</i> T_3	10:30	10:35	10:38	—	—	10:53

Route R_1

Route R_2

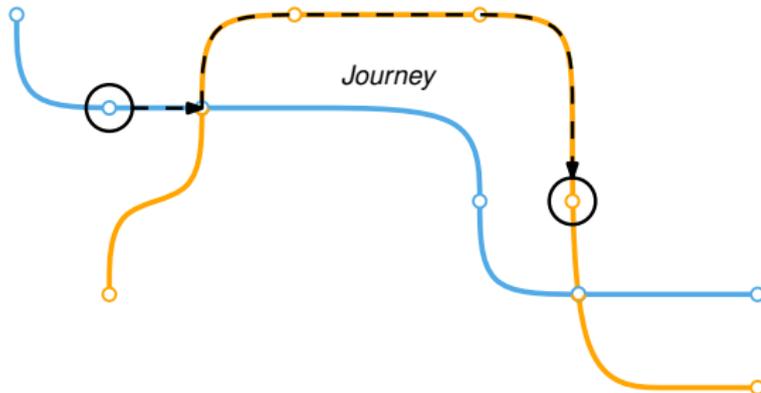


Wdh. Begriffe



Ankunftszeiten

<i>trip</i> T_1	9:00	9:05	9:08	9:17	9:23	9:31	Route R_1
<i>trip</i> T_2	10:00	10:05	10:08	10:17	10:23	10:31	
<i>trip</i> T_3	10:30	10:35	10:38	—	—	10:53	Route R_2



Gesucht: „Gute“ Journeys für Ankunftszeit **und** Anzahl Umstiege



Ankunft 11:08 Uhr, 2 Umstiege



Ankunft 11:09 Uhr, 0 Umstiege

Gesucht: „Gute“ Journeys für Ankunftszeit **und** Anzahl Umstiege



Ankunft 11:08 Uhr, 2 Umstiege



Ankunft 11:09 Uhr, 0 Umstiege

Problem:

Dijkstra-basierter Multi-Label-Correcting-Ansatz zu langsam

Graph-Modelle?

Bis jetzt:

- Modelliere Fahrplan als gerichteten Graphen
- Zeitexpandiert vs. zeitabhängig
- Verschiedene Varianten von Dijkstras Algorithmus
- Earliest Arrival-, Profil-, Multi-Criteria-Suchen

Bis jetzt:

- Modelliere Fahrplan als gerichteten Graphen
- Zeitexpandiert vs. zeitabhängig
- Verschiedene Varianten von Dijkstras Algorithmus
- Earliest Arrival-, Profil-, Multi-Criteria-Suchen

Probleme:

- Viele Knoten und Kanten
- Overhead von Priority Queue
- Wenig explizites Ausnutzen der Fahrplanstruktur
- Dynamische Szenarien erfordern Updates der Graph-Topologie
- Außerdem: Beschleunigungstechniken funktionieren nicht gut

Bis jetzt:

- Modelliere Fahrplan als gerichteten Graphen
- Zeitexpandiert vs. zeitabhängig
- Verschiedene Varianten von Dijkstras Algorithmus
- Earliest Arrival-, Profil-, Multi-Criteria-Suchen

Probleme:

- Viele Knoten und Kanten
- Overhead von Priority Queue
- Wenig explizites Ausnutzen der Fahrplanstruktur
- Dynamische Szenarien erfordern Updates der Graph-Topologie
- Außerdem: Beschleunigungstechniken funktionieren nicht gut

Sind Graphen die beste Art, Fahrpläne zu modellieren?

Anforderungen:

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege
- Nutzt die Struktur der Fahrpläne aus
benutzt Routen und Trips explizit?

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege
- Nutzt die Struktur der Fahrpläne aus
benutzt Routen und Trips explizit?
- Funktioniert in dynamischen Szenarien
Verspätungen, Zugausfälle, Routenänderungen; keine Vorberechnung

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege
- Nutzt die Struktur der Fahrpläne aus
benutzt Routen und Trips explizit?
- Funktioniert in dynamischen Szenarien
Verspätungen, Zugausfälle, Routenänderungen; keine Vorberechnung
- Kann auf zusätzliche Kriterien erweitert werden
z.B. Tarifzonen, Umstiegssicherheit, etc.

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege
- Nutzt die Struktur der Fahrpläne aus
benutzt Routen und Trips explizit?
- Funktioniert in dynamischen Szenarien
Verspätungen, Zugausfälle, Routenänderungen; keine Vorberechnung
- Kann auf zusätzliche Kriterien erweitert werden
z.B. Tarifzonen, Umstiegssicherheit, etc.
- ... und ist hinreichend schnell
für interaktive Szenarien

Anforderungen:

- Berechnet Pareto-Mengen
mindestens Ankunftszeit und # Umstiege
- Nutzt die Struktur der Fahrpläne aus
benutzt Routen und Trips explizit?
- Funktioniert in dynamischen Szenarien
Verspätungen, Zugausfälle, Routenänderungen; keine Vorberechnung
- Kann auf zusätzliche Kriterien erweitert werden
z.B. Tarifzonen, Umstiegssicherheit, etc.
- ... und ist hinreichend schnell
für interaktive Szenarien

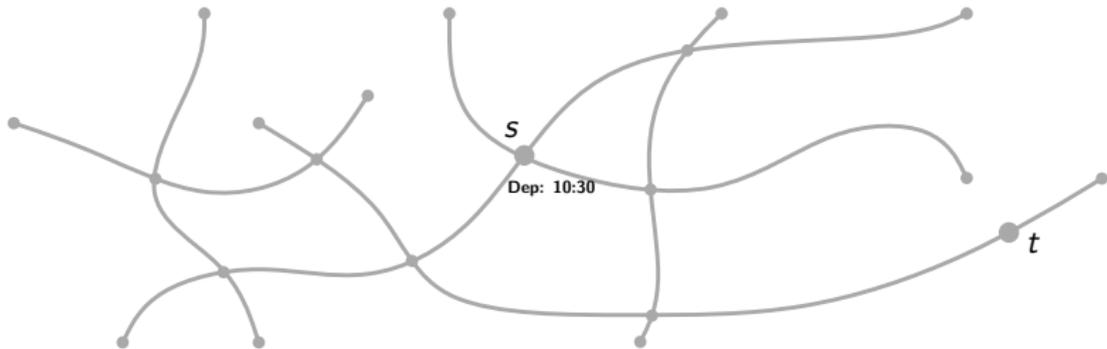
RAPTOR: Round-bAseed Public Transit Optimized Router

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.

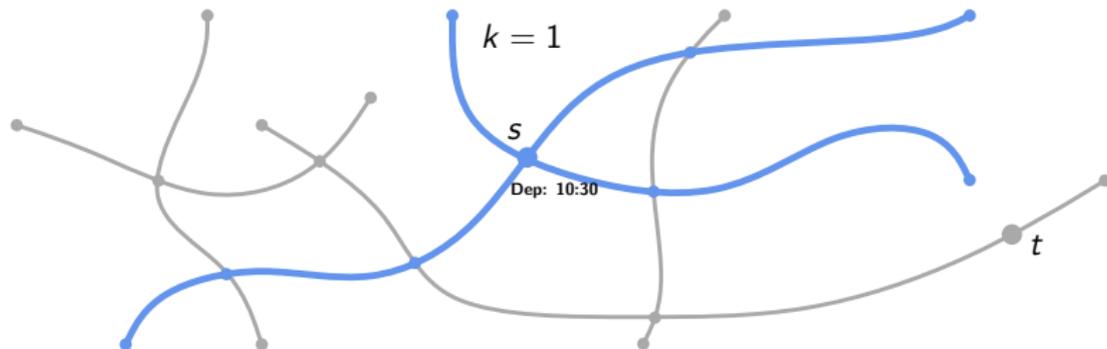
Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

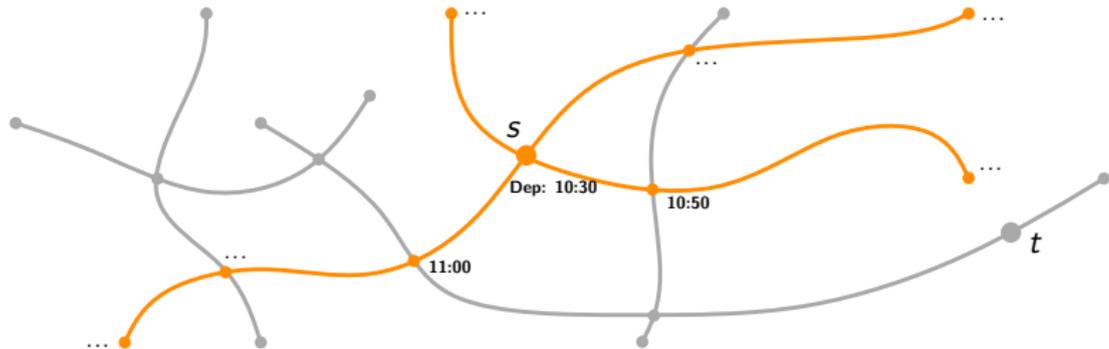
Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

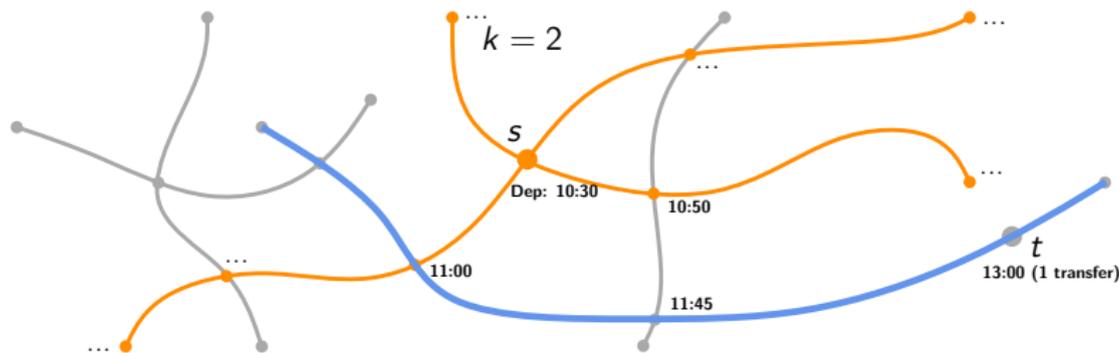
Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

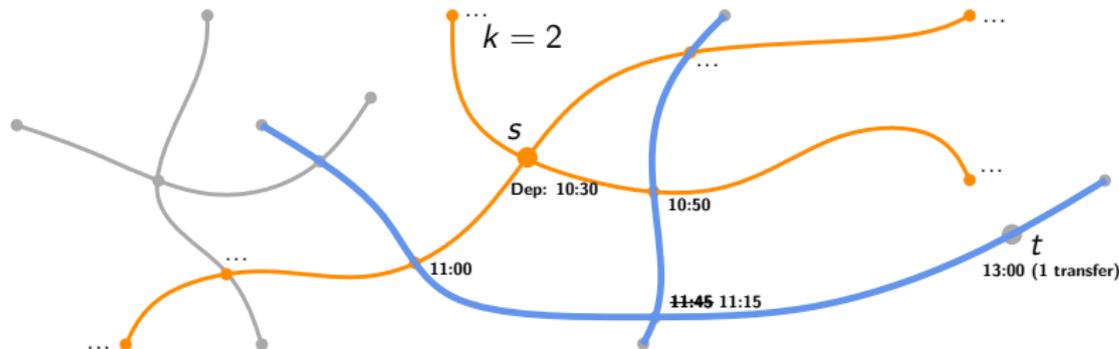
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

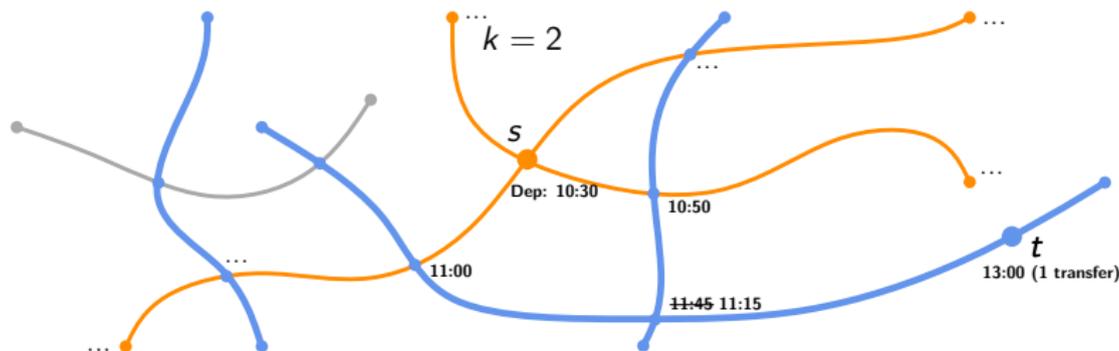
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

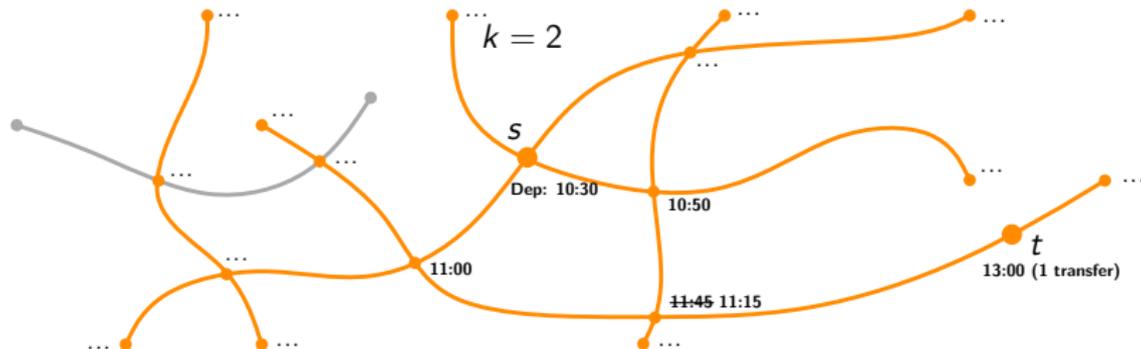
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

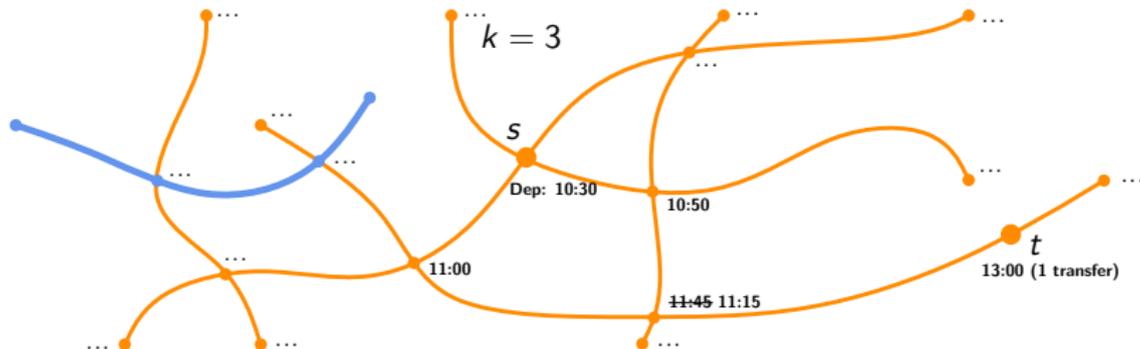
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

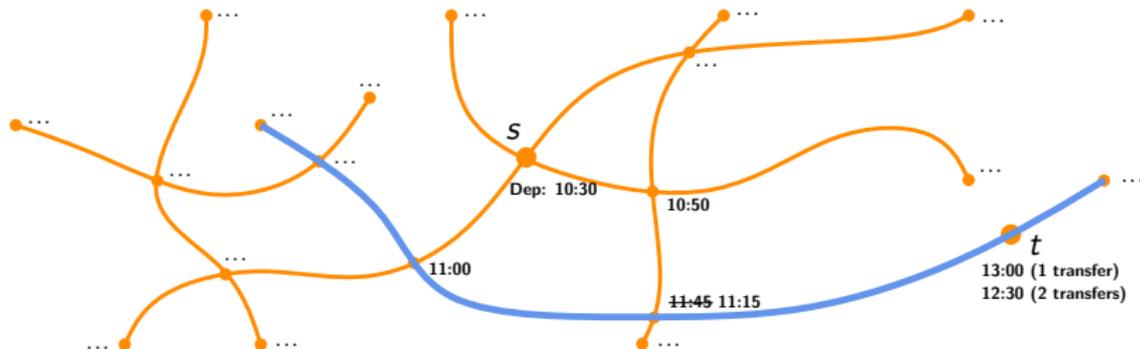
Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.



Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Beobachtung: Wechseln zw. Trips führt immer zu einem Umstieg.

Idee: Eine **Runde** für jeden genommenen Trip.

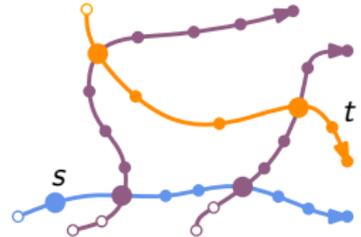


Ansatz: Runde k berechnet Ankunftszeiten für Journeys mit k Trips.

Scanne jede **Route** höchstens einmal pro Runde.

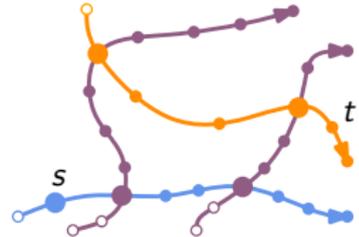
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Scanne jede Route
- 2 Relaxiere Fußwege



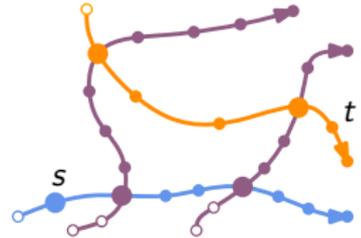
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Scanne jede Route
- 2 Relaxiere Fußwege



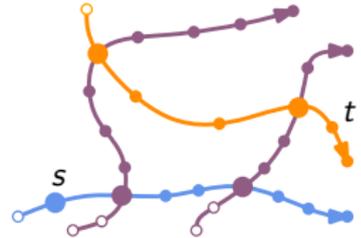
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Scanne jede Route
- 2 Relaxiere Fußwege

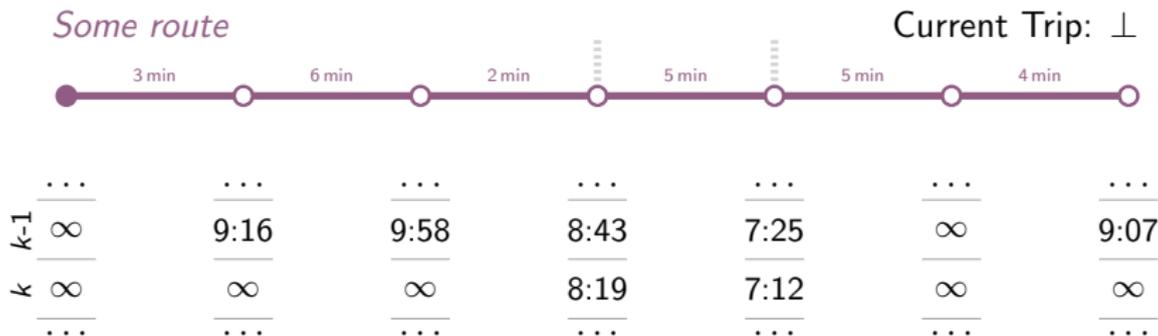


Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Scanne jede Route
- 2 Relaxiere Fußwege



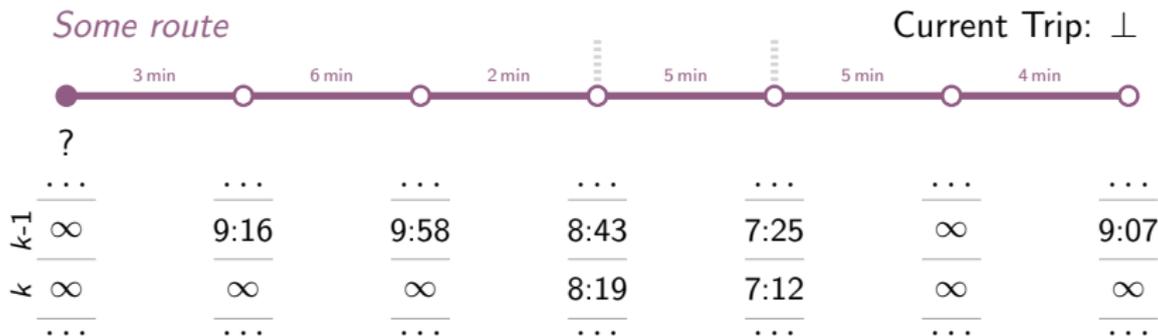
Terminiere, wenn ... ?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

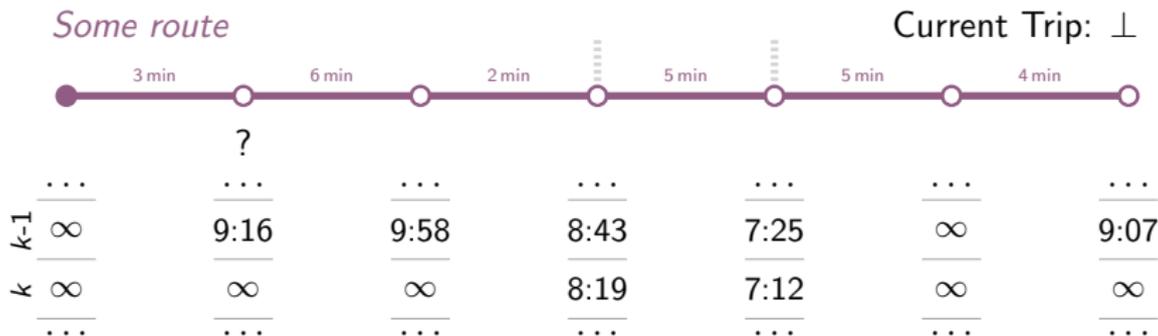
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

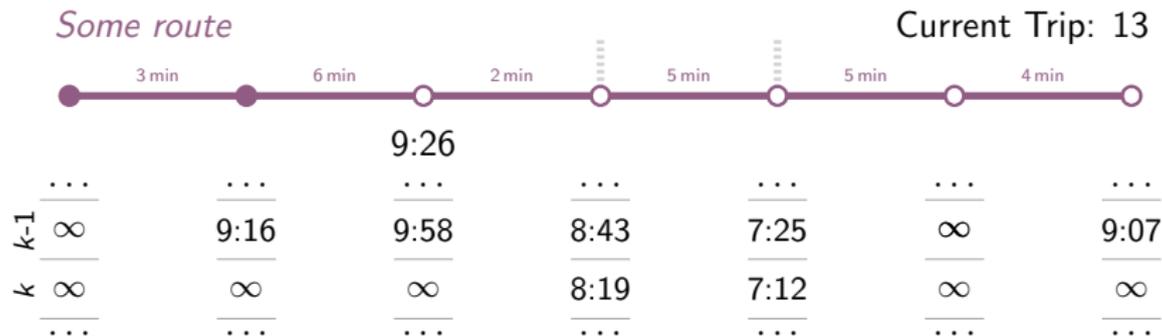
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

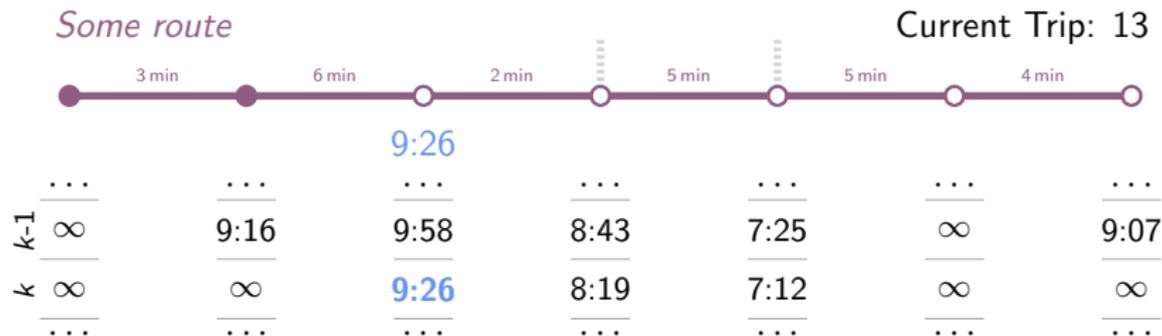
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

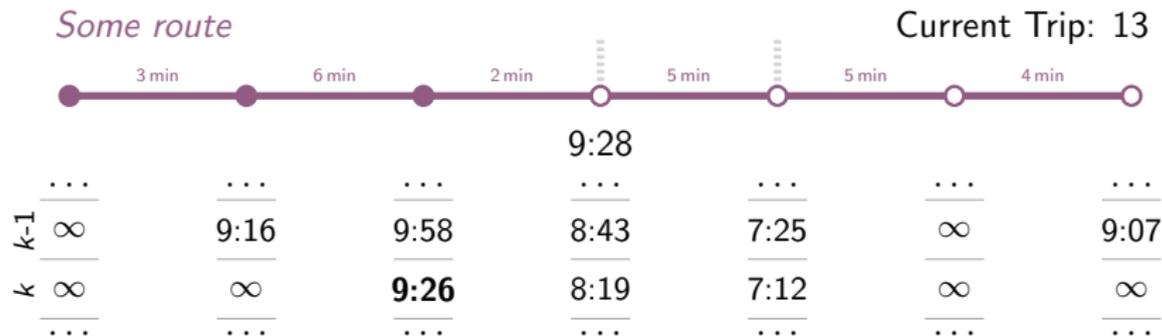
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?

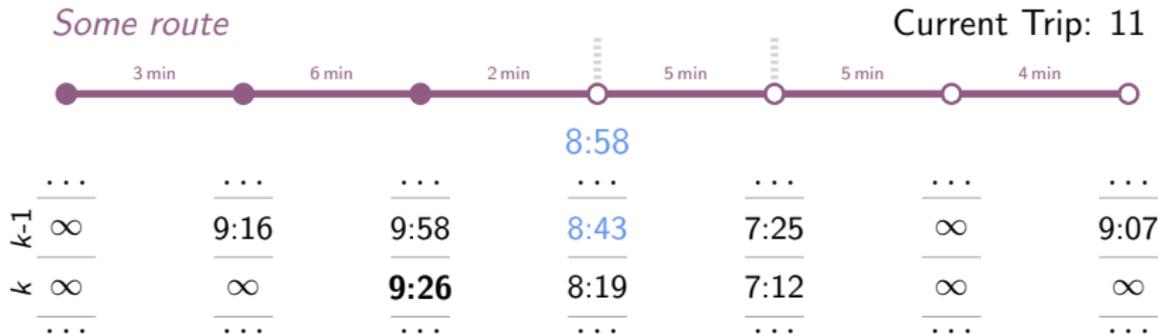


- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?

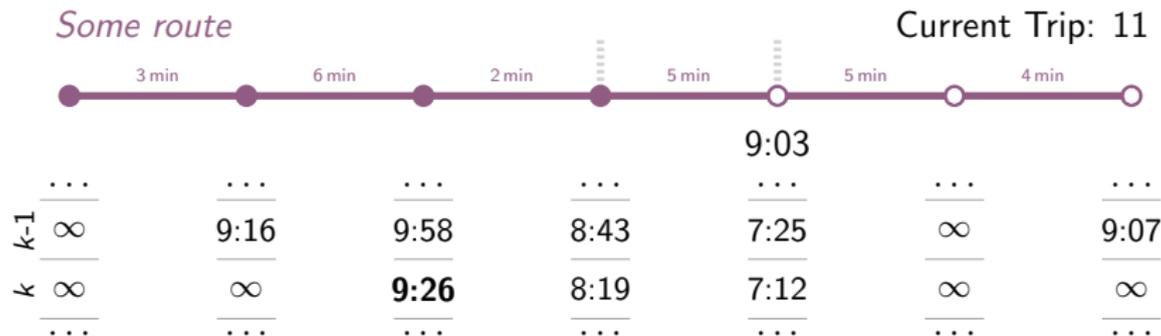
Current Trip: 11



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

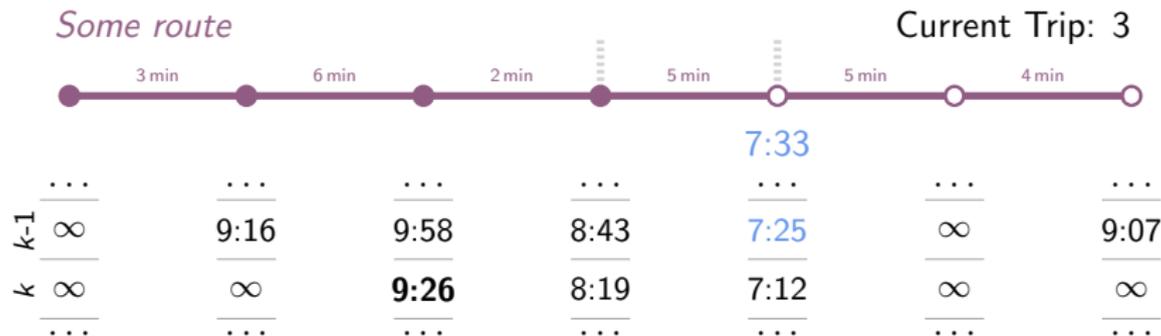
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

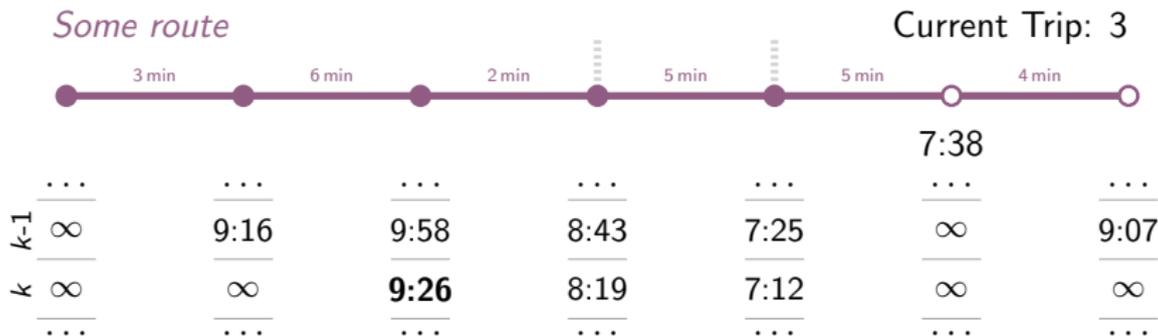
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

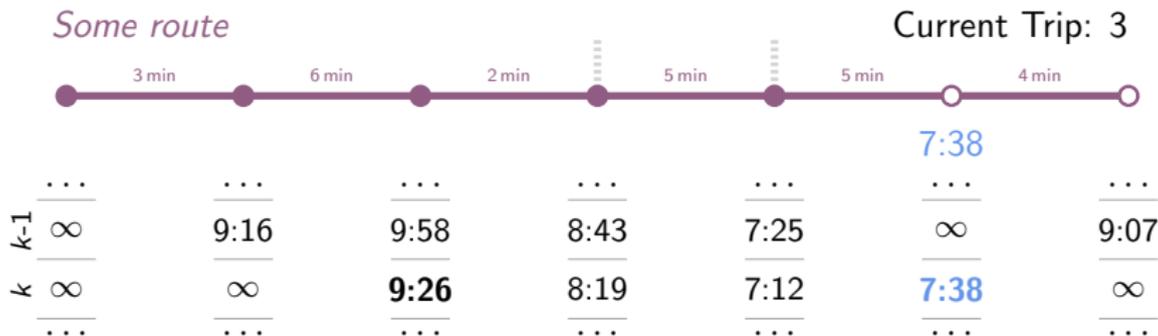
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

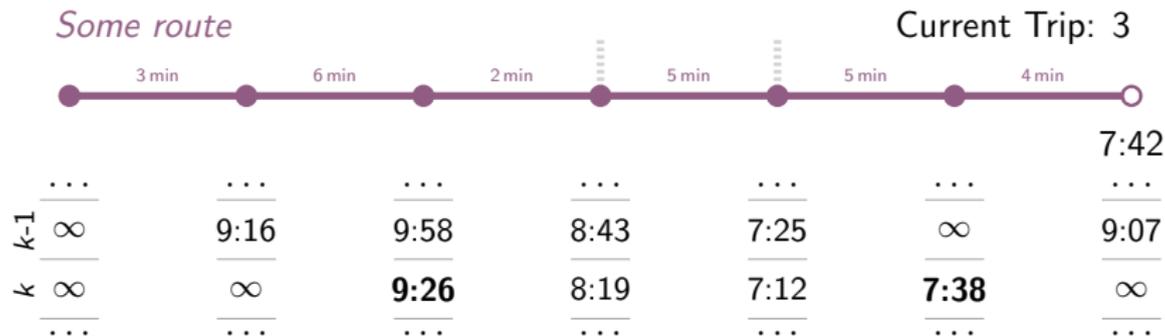
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

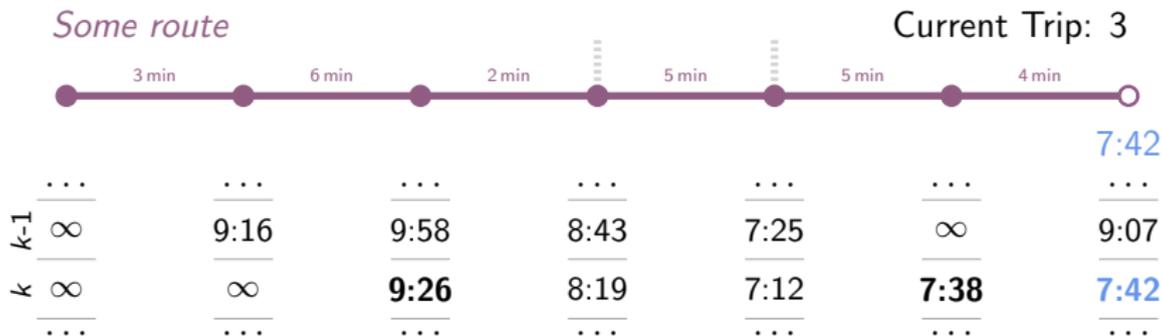
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

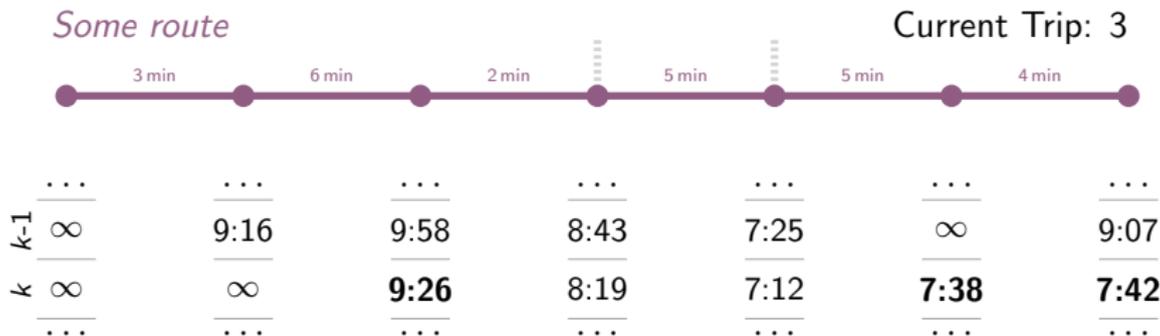
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

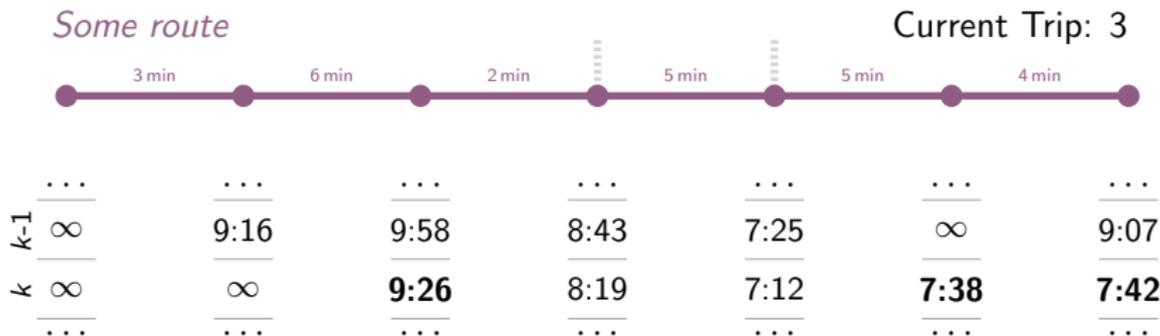
- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?



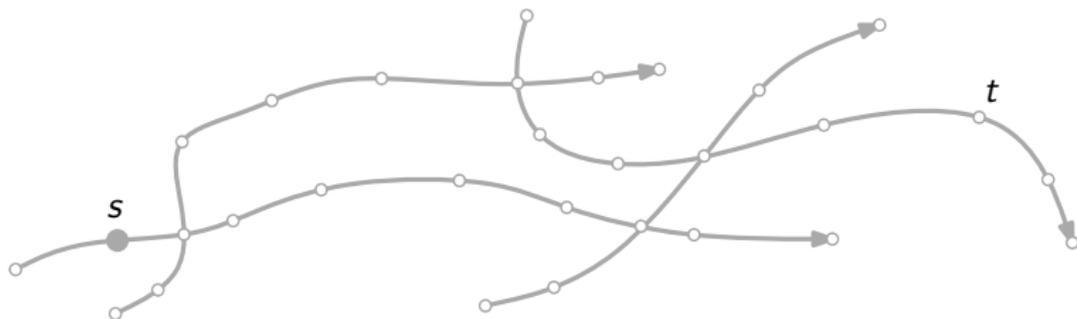
- Jeder Stop hat ein Label (Ankunftszeit) *pro Runde*
- Routenscan in Runde k : Iteriere über Stops der Route
- Aktiver Trip: Frühester Trip, in den wir bisher einsteigen konnten

Prüfe für jeden Stop:

- Aussteigen: Verbessert aktiver Trip das Label aus Runde k ?
- Einsteigen: Verbessert Label aus Runde $k - 1$ den aktiven Trip?

Dynamischer Programmierungsansatz

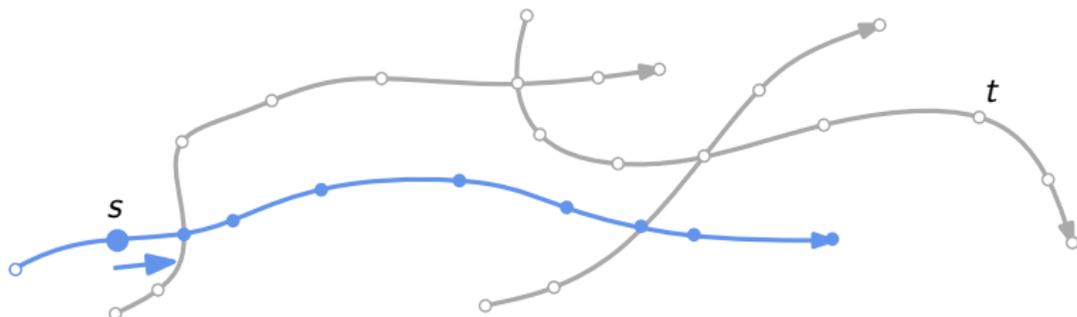
Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.



Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

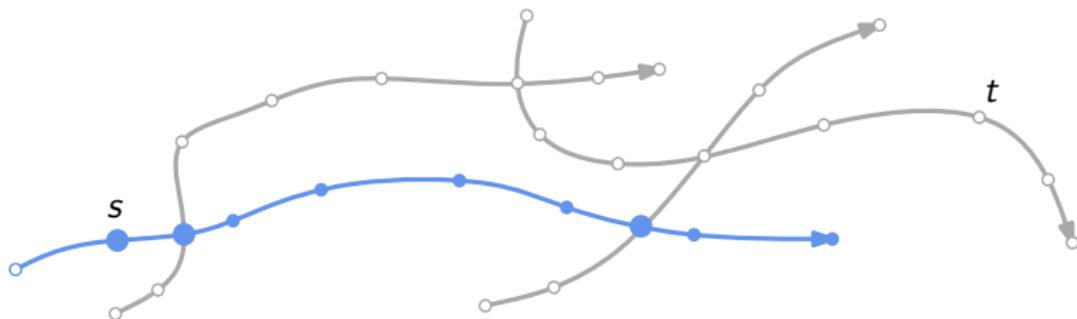
Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.



Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

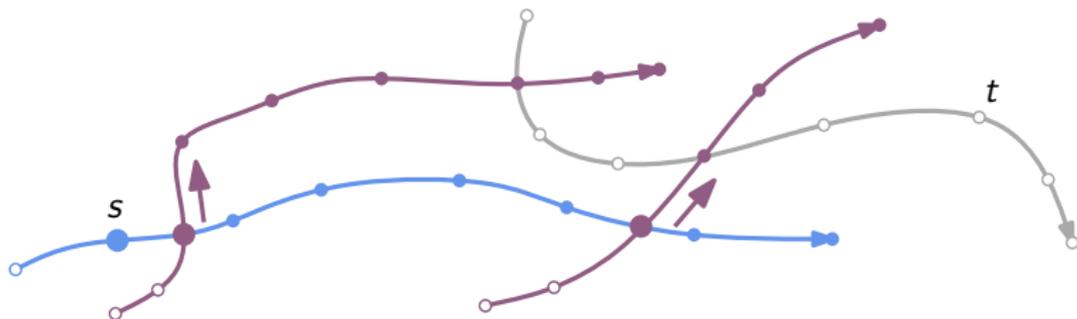
Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.



Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

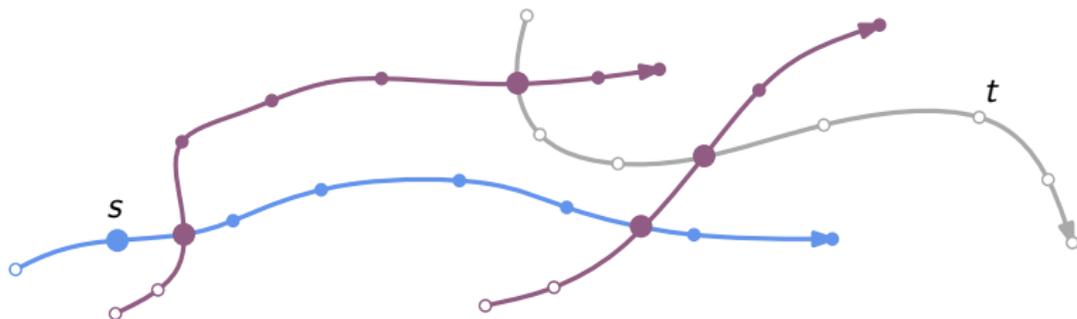
Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.



Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

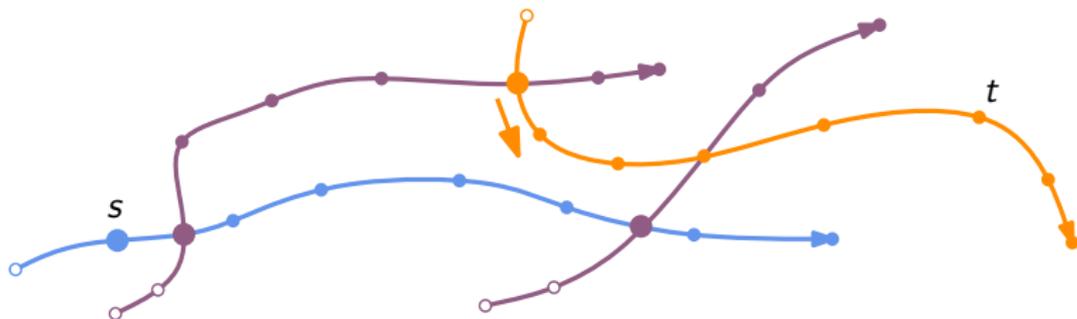
Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.



Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

Beobachtung: Nicht alle Routen werden in jeder Runde erreicht.

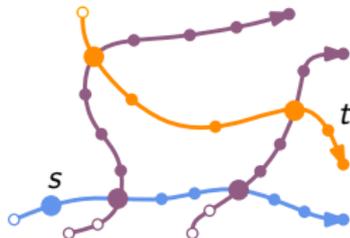


Markieren und Pruning:

- Route scannen: Markiere Stop, falls Ankunftszeit verbessert
- Nächste Runde: Nur Routen von markierten Stops scannen
- Scanne jede Route ab ihrem ersten markierten Stop

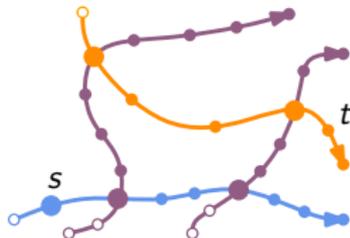
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Wähle erreichte Routen aus letzter Runde
- 2 Scanne diese Routen
- 3 Relaxiere Fußwege



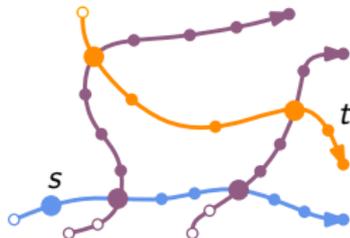
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Wähle erreichte Routen aus letzter Runde
- 2 Scanne diese Routen
- 3 Relaxiere Fußwege



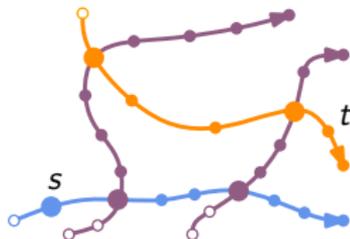
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Wähle erreichte Routen aus letzter Runde
- 2 Scanne diese Routen
- 3 Relaxiere Fußwege



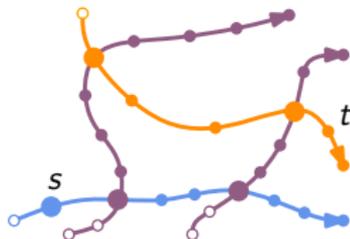
Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Wähle erreichte Routen aus letzter Runde
- 2 Scanne diese Routen
- 3 Relaxiere Fußwege



Für jede Runde $k \leftarrow 1, 2, \dots$

- 1 Wähle erreichte Routen aus letzter Runde
- 2 Scanne diese Routen
- 3 Relaxiere Fußwege



Terminiere, wenn kein Stop markiert wurde.

Datenstrukturen:

- Q : Menge von Tupeln (R, i)
 - Erreichte Route R mit Stopsequenz $(v_0, v_1, \dots, v_{|R|-1})$
 - Frühester erreichter Stop auf R ist v_i

Leere Q

for alle markierten Stops v **do**

for alle Routen R , die v besuchen **do**

$i \leftarrow$ Position von v in R

if $\exists j$ mit $(R, j) \in Q$ **then**

 Ersetze (R, j) durch $(R, \min\{i, j\})$ in Q

else

 Füge (R, i) in Q ein

Lösche alle Markierungen

Datenstrukturen:

- $\tau_k(v)$: Ankunftszeit an v in Runde k
- $\tau^*(v)$: Beste Ankunftszeit an v bisher
- $\text{pred}(T)$: Nächstfrüherer Trip vor T in der Route

for alle $(R, i) \in Q$ **do**

$T \leftarrow \arg \min_{T \in R} \{ \tau_{\text{dep}}(T, v_i) \geq \tau_{k-1}(v_i) \}$

for alle $v_j \in R$ mit $j > i$ **do**

if $T \neq \perp$ und $\tau_{\text{arr}}(T, v_j) < \min\{\tau^*(v_j), \tau^*(t)\}$ **then**

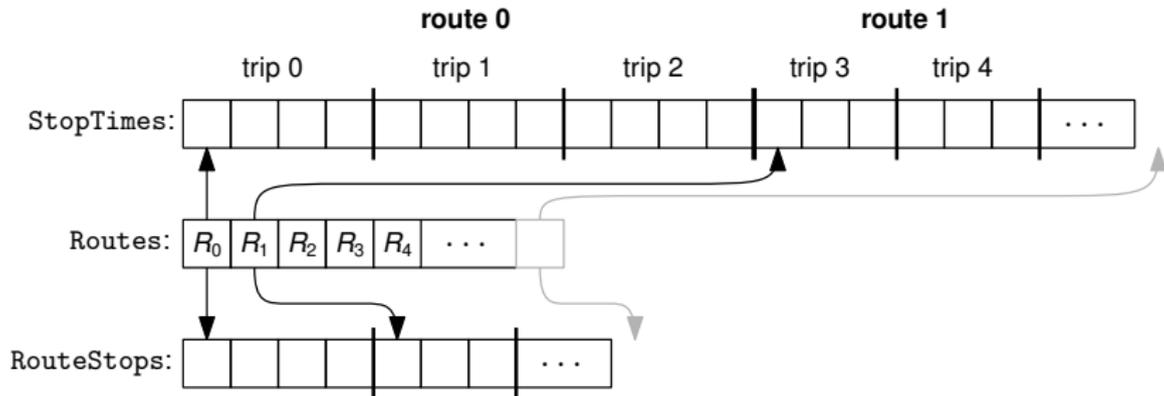
$\tau_k(v_j) \leftarrow \tau_{\text{arr}}(T, v_j)$

$\tau^*(v_j) \leftarrow \tau_{\text{arr}}(T, v_j)$

 Markiere v_j

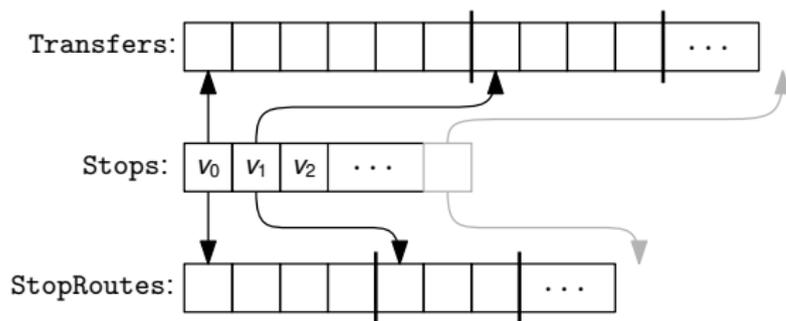
while $\text{pred}(T) \neq \perp$ und $\tau_{k-1}(v_j) < \tau_{\text{dep}}(\text{pred}(T), v_j)$ **do**

$T \leftarrow \text{pred}(T)$



Route R_j scannen:

- Finde ersten Stop in `RouteStops`
- Finde aktiven Trip in `StopTimes`
- Iteriere simultan über `RouteStops` und aktiven Trip
- Nächstfrüherer Trip: Springe in `StopTimes` um $|R_j|$ nach links



Transfers relaxieren:

- Iteriere über `Transfers` von allen markierten Stops

Erreichte Routen einsammeln:

- Iteriere über `StopRoutes` von allen markierten Stops

Beobachtung: Routen werden in beliebiger Reihenfolge gescannt.

Beobachtung: Routen werden in beliebiger Reihenfolge gescannt.

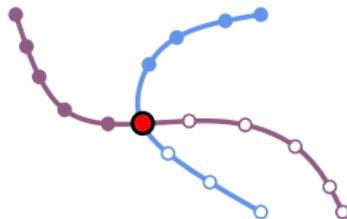
Verteile Routen auf verschiedene CPU-Kerne; scanne parallel.

Beobachtung: Routen werden in beliebiger Reihenfolge gescannt.

Verteile Routen auf verschiedene CPU-Kerne; scanne parallel.

Vermeiden von Race-Conditions:

- Lock auf Schreiben von Labels (teuer)



Beobachtung: Routen werden in beliebiger Reihenfolge gescannt.

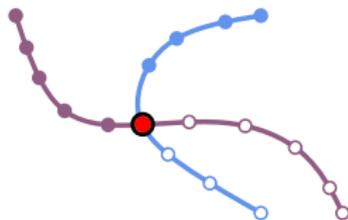
Verteile Routen auf verschiedene CPU-Kerne; scanne parallel.

Vermeiden von Race-Conditions:

- Lock auf Schreiben von Labels (teuer)

Oder ohne Locks:

- Synchronisiere Labels nach jeder Runde
- Sicherstellen, dass nur „unabhängige“ Routen gleichzeitig gescannt werden (Reduktion auf Färbeproblem)



Mögliche Erweiterungen:

- Profil-Anfragen (Intervallanfragen)
Flexible Abfahrtszeiten
- Tarifzonen
Längere Routen könnten billiger sein.
- Umstiegssicherheit
Routen könnten knappe Umstiege haben.
- ...



Performance hängt von Anzahl *nichtdominierter* Journeys ab.

More Criteria: McRAPTOR

Ziel: Erweitern von RAPTOR auf zusätzliche Kriterien



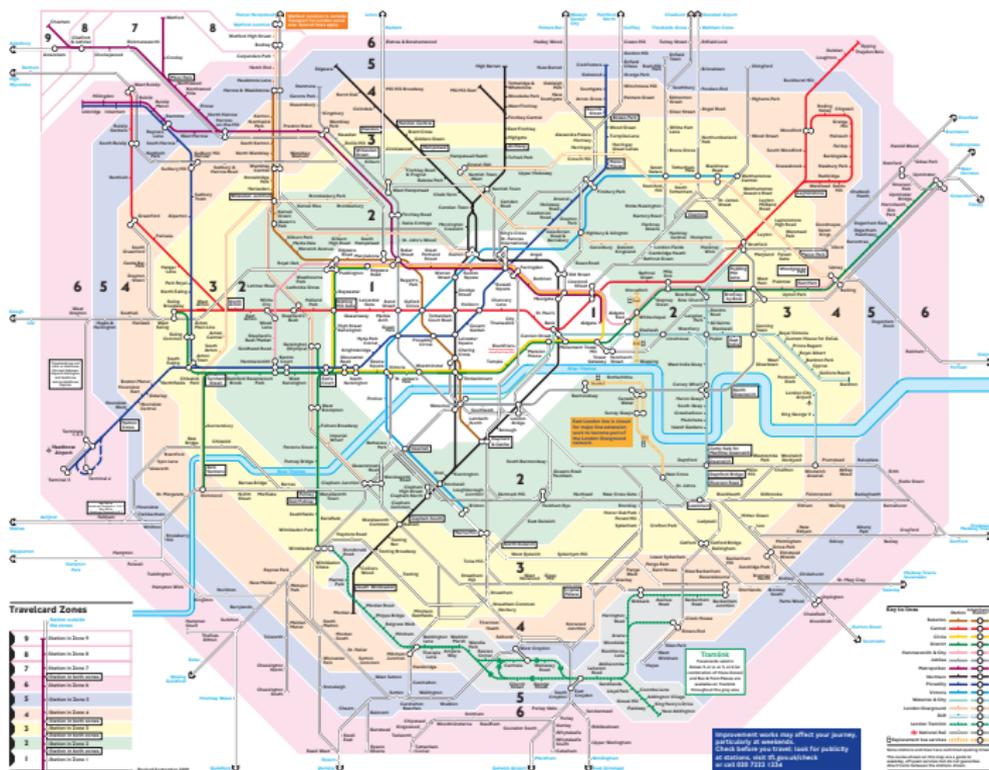
Ziel: Erweitern von RAPTOR auf zusätzliche Kriterien



Ansatz:

- Labels haben Wert für jedes zusätzliche Kriterium
- Mehrere nichtdominierte Labels pro Stop und Runde
- Beim Routenscan: Ein aktiver Trip pro nichtdominiertem Label
- Lösche dominierte Labels on-the-fly

McRAPTOR Beispiel: Tarifzonen



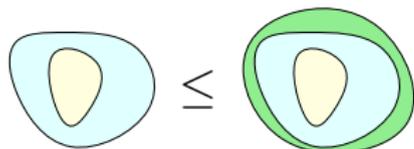
Tarifzonen einbauen:

- Direkte Preise (£) nicht handhabbar
- ⇒ Berechne alle Kombinationen von Tarifzonen
- ... und filtere im Postprocessing



Tarifzonen einbauen:

- Direkte Preise (£) nicht handhabbar
- ⇒ Berechne alle Kombinationen von Tarifzonen
- ... und filtere im Postprocessing



Implementierung:

- Mengen von Tarifzonen als Kriterium
- Dominieren $\hat{=}$ Teilmengenrelation
- Benutze Bits von `int64` für Mengen

Profil-Anfragen: rRAPTOR

Problem: Finde alle optimalen Journeys,
die in einem Zeitintervall Δ abfahren.



Problem: Finde alle optimalen Journeys, die in einem Zeitintervall Δ abfahren.

- Lösbar mit McRAPTOR...
- ... mit Abfahrtszeit als Kriterium.



Problem: Finde alle optimalen Journeys, die in einem Zeitintervall Δ abfahren.

- Lösbar mit McRAPTOR...
- ... mit Abfahrtszeit als Kriterium.



Effizienterer Ansatz: rRAPTOR (Self-Pruning)

- Sammle alle Abfahrten aus Intervall Δ in Menge \mathcal{D}
- Dann: RAPTOR für jedes $\tau \in \mathcal{D}$ geordnet absteigend nach Zeit
- Reinitialisiere keine Labels zwischen den Aufrufen!

Problem: Finde alle optimalen Journeys, die in einem Zeitintervall Δ abfahren.

- Lösbar mit McRAPTOR...
- ... mit Abfahrtszeit als Kriterium.



Effizienterer Ansatz: rRAPTOR (Self-Pruning)

- Sammle alle Abfahrten aus Intervall Δ in Menge \mathcal{D}
- Dann: RAPTOR für jedes $\tau \in \mathcal{D}$ geordnet absteigend nach Zeit
- Reinitialisiere keine Labels zwischen den Aufrufen!

Prunt implizit Journeys, die früher abfahren und später ankommen.

Experimente



Das vollständige Londoner Netzwerk

- Ein Dienstag
- Beinhaltet Tube, Bus, DLR, Tram, ...
- 20 843 Stops
- 2 225 Routen mit 133 011 Trips
- 5 132 672 Connections pro Tag



Das vollständige Londoner Netzwerk

- Ein Dienstag
- Beinhaltet Tube, Bus, DLR, Tram, ...
- 20 843 Stops
- 2 225 Routen mit 133 011 Trips
- 5 132 672 Connections pro Tag

Experimente: 10 000 zufällige $s-t$ -Anfragen



Vergleich der Algorithmen

(Hardware: Intel Xeon X5680 mit 3.33 GHz und 96 GiB DDR3-1333 RAM)

Algorithm	Ar	R	Tr	Fz	Rounds	Journeys	[ms]
Dijkstra	●	○	○	○	—	0.9	14.2
RAPTOR	●	○	●	○	8.4	1.9	7.3
LD	●	○	●	○	—	1.9	44.5
MLC	●	○	●	○	—	1.9	67.2
McRAPTOR	●	○	●	●	10.8	9.0	107.4
MLC	●	○	●	●	—	9.0	399.5
McRAPTOR	●	●	●	○	9.5	16.3	259.8
rRAPTOR	●	●	●	○	138.5	16.3	87.0
SPCS	●	●	○	○	—	7.8	183.6

(Ar: Arrival Time, R: Range, Tr: Transfers, Fz: Fare Zones)

Algorithm	Ar	R	Tr	Fz	1 core [ms]	3 cores [ms]	6 cores [ms]	12 cores [ms]
RAPTOR	●	○	●	○	7.7	5.0	4.1	3.7
McRAPTOR	●	○	●	●	118.6	49.4	29.9	26.1
rRAPTOR	●	●	●	○	92.3	39.5	26.8	21.6
SPCS	●	●	○	○	183.6	69.1	44.9	38.9

(Ar: Arrival Time, R: Range, Tr: Transfers, Fz: Fare Zones)

Algorithm	Ar	R	Tr	Fz	1 core [ms]	3 cores [ms]	6 cores [ms]	12 cores [ms]
RAPTOR	●	○	●	○	7.7	5.0	4.1	3.7
McRAPTOR	●	○	●	●	118.6	49.4	29.9	26.1
rRAPTOR	●	●	●	○	92.3	39.5	26.8	21.6
SPCS	●	●	○	○	183.6	69.1	44.9	38.9

(Ar: Arrival Time, R: Range, Tr: Transfers, Fz: Fare Zones)

- Gute Speedups auf bis zu 6 Kernen
- RAPTOR immer ≤ 30 ms



Daniel Delling, Thomas Pajor, and Renato F. Werneck.

Round-Based Public Transit Routing.

In *Proceedings of the 14th Meeting on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX'12)*, pages 130–140. SIAM, 2012.