Karlsruher Institut für Technologie

Algorithmen für Routenplanung

10. Vorlesung, Sommersemester 2016

Ben Strasser | 7. Juni 2017

INSTITUT FÜR THEORETISCHE INFORMATIK · ALGORITHMIK

Wiederholung Punkt-zu-Punkt

Karlsruher Institut für Technologie

Anfrage:

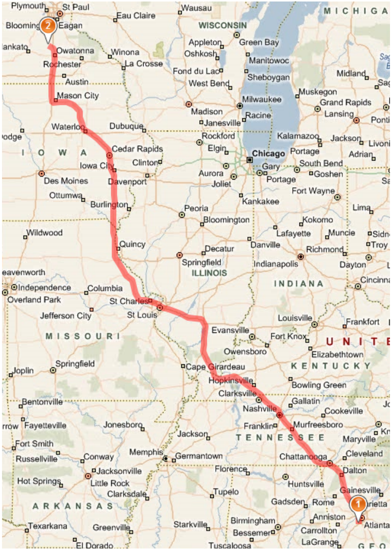
- finde die beste Route in einem Transportnetz

Idee:

- Netzwerk als Graph $G = (V, E)$
- Kantengewichte sind Reisezeiten
- kürzester Weg in G entspricht schnellster Verbindung

Ergebnisse:

- schnelle Algorithmen existieren



Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Alternativ-Routen

Anfrage:

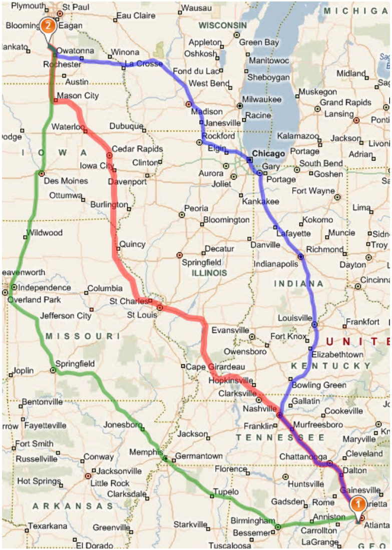
- finde gute Alternativen in einem Transportnetz

Problem:

- der kürzeste Weg ist wohl definiert
- Was aber ist eine gute Alternative?
- Problem erscheint rein heuristischer Natur

Ziele:

- lieber keine als schlechte Routen zeigen
- sollte nicht deutlich langsamer als Punkt-zu-Punkt sein



Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Erste Ansätze

Karlsruher Institut für Technologie

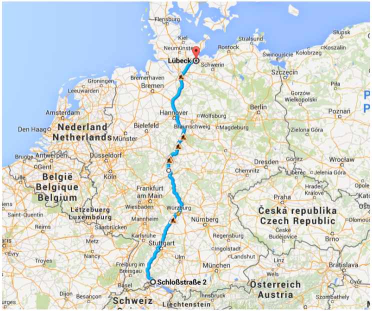
Berechne top-k kürzeste Wege

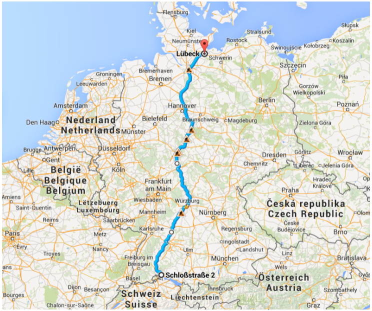
+ Wege sind möglichst kurz
- oft erst für hohes k relevant

Erste Ansätze

Berechne top-*k* kürzeste Wege

+ Wege sind möglichst kurz
- oft erst für hohes *k* relevant

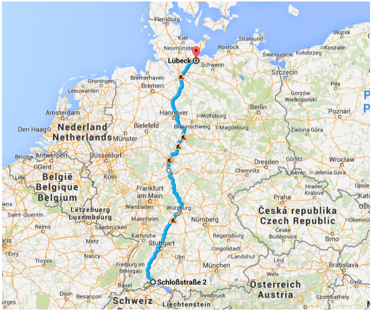


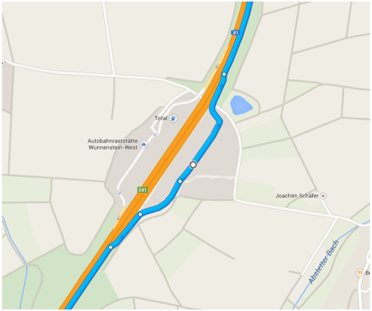


Erste Ansätze

Berechne top-k kürzeste Wege

+ Wege sind möglichst kurz
- oft erst für hohes k relevant





Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Erste Ansätze

Optimiere verschiedene Metriken

- z.B. schnellster und kürzester Weg

\+ bedient verschiedene Vorlieben

\- verpasst interessante Alternativen

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

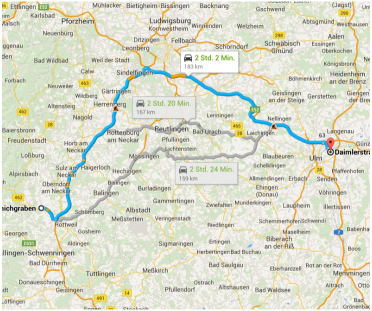
Erste Ansätze

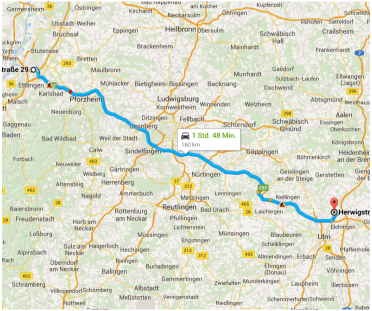
Optimiere verschiedene Metriken

- z.B. schnellster und kürzester Weg

\+ bedient verschiedene Vorlieben

\- verpasst interessante Alternativen



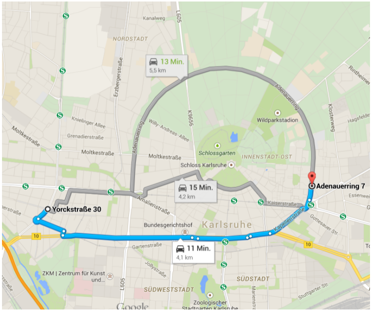


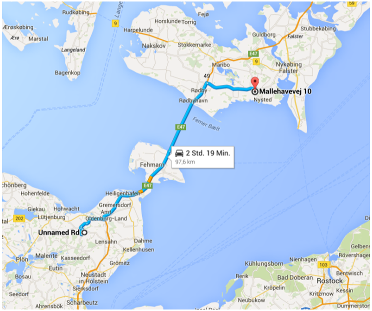
Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Erste Ansätze

Disjunkte Pfade

+ stark unterschiedliche Pfade
- verpasst interessante Alternativen



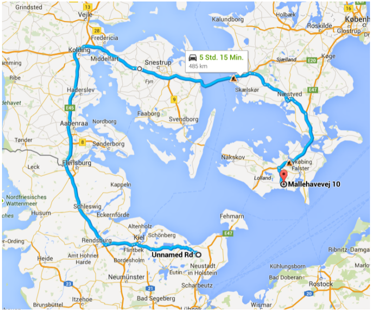


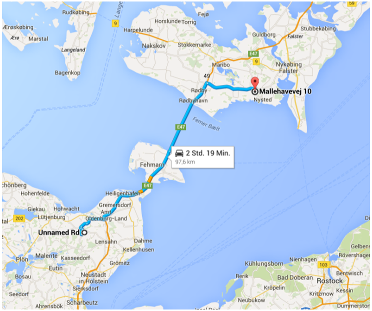
Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Erste Ansätze

Disjunkte Pfade

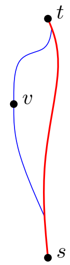
+ stark unterschiedliche Pfade
- verpasst interessante Alternativen





Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Fortgeschrittene Ansätze

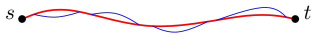


Via-Knoten

- nutze dritten Knoten
- berechne zusammengesetzten Pfad
- Problem: Woher kommt dieser Knoten?

Simulierter Stau

- verlangsame einzelne Segmente künstlich
- Gefahr vieler kleiner Umleitungen



Und wie?

- was macht eine gute Alternative aus
- wie berchnen wir sie schnell

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Intuition

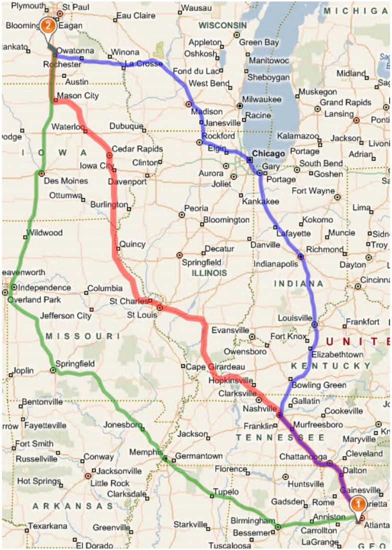
Alternativen sollten erfüllen:

- nicht viel länger als der kürzeste Weg
- signifikant verschieden

Erste Idee:

- finde einen Pfad, der Länge und Gemeinsamkeit minimiert
  - maximal $x\%$ länger
  - teilt maximal $y\%$

Ist das genug?

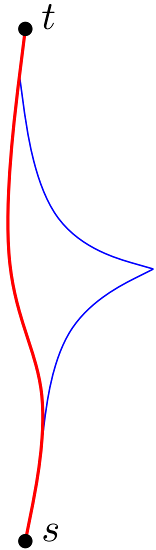


Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Das dritte Kriterium

Problem:

- Routen können seltsam aussehen
- sogar wenn sie verschieden und kurz sind
- lokale Umwege
- “Diese Strecke macht doch keinen Sinn.
  Das kann ich besser!”



Idee:

- kurze Subpfade müssen kürzeste Pfade sein
- beliebige Paare von Knoten auf dem Pfad sollen kleinen stretch haben

$\Rightarrow$ keine unnötigen lokalen Umwege

Das dritte Kriterium

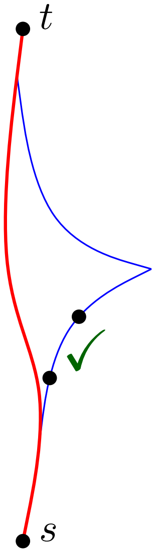
Problem:

- Routen können seltsam aussehen
- sogar wenn sie verschieden und kurz sind
- lokale Umwege
- "Diese Strecke macht doch keinen Sinn. Das kann ich besser!"

Idee:

- kurze Subpfade müssen kürzeste Pfade sein
- beliebige Paare von Knoten auf dem Pfad sollen kleinen stretch haben

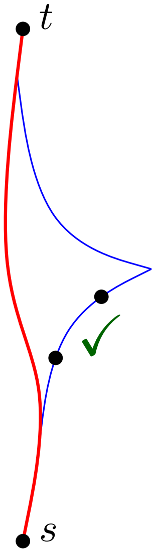
$\Rightarrow$ keine unnötigen lokalen Umwege



Das dritte Kriterium

Problem:

- Routen können seltsam aussehen
- sogar wenn sie verschieden und kurz sind
- lokale Umwege
- "Diese Strecke macht doch keinen Sinn.
  Das kann ich besser!"



Idee:

- kurze Subpfade müssen kürzeste Pfade sein
- beliebige Paare von Knoten auf dem Pfad sollen kleinen stretch haben

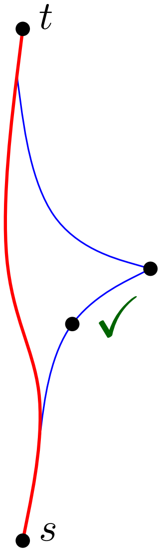
$\Rightarrow$ keine unnötigen lokalen Umwege

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Das dritte Kriterium

Problem:

- Routen können seltsam aussehen
- sogar wenn sie verschieden und kurz sind
- lokale Umwege
- "Diese Strecke macht doch keinen Sinn.
  Das kann ich besser!"



Idee:

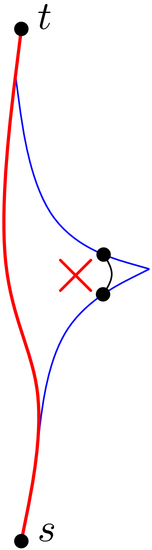
- kurze Subpfade müssen kürzeste Pfade sein
- beliebige Paare von Knoten auf dem Pfad sollen kleinen stretch haben

$\Rightarrow$ keine unnötigen lokalen Umwege

Das dritte Kriterium

Problem:

- Routen können seltsam aussehen
- sogar wenn sie verschieden und kurz sind
- lokale Umwege
- "Diese Strecke macht doch keinen Sinn.
  Das kann ich besser!"



Idee:

- kurze Subpfade müssen kürzeste Pfade sein
- beliebige Paare von Knoten auf dem Pfad sollen kleinen stretch haben

$\Rightarrow$ keine unnötigen lokalen Umwege

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

Karlsruher Institut für Technologie

Idee

Alternativ-Pfade sollen hinreichend verschieden sein.

- P ist die Kantenmenge des kürzesten st-Pfads
- P' ist die Kantenmenge des alternativen st-Pfads
- $\ell(Q)$ ist die Summe über alle Kanten-Längen
- Eine Alternative ist γ-verschieden wenn

$$\ell(P \cap P') \leq \gamma \ell(P)$$

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

Idee

Alternativ-Pfade sollen kein große Umwege sein

- Sei $\mathrm{dist}(s, t)$ die Länge des kürzesten *st*-Pfads
- Sei P' der alternative *st*-Pfad und $\ell(P')$ seine Länge
- P' hat einen Stretch von höchstens ϵ wenn

$$\ell(P') \leq (1 + \epsilon)\,\mathrm{dist}(s, t)$$

Kriterium für die Vorlesung vereinfacht, siehe [ADGW13] für Details.

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

Idee

Alternativ-Pfade sollen lokal sinnvoll sein.

- Sei P' der alternative Pfad und P'_{xy} der Subpfad von x bis y
- P' besteht den T-Test wenn für alle P'_{xy} mit $\ell(P'_{xy}) \leq T$ gilt, dass P'_{xy} ein kürzester xy-Pfad ist
- P' ist α-lokal-optimal wenn er den Test für $T = \alpha\,\text{dist}(s, t)$ besteht

Kriterium für die Vorlesung vereinfacht, siehe [ADGW13] für Details.

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

- **Ziel**: Finde Pfad der γ-verschieden ist, einen Stretch ϵ und α-lokal-optimal.

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

Karlsruher Institut für Technologie

- **Ziel**: Finde Pfad der γ-verschieden ist, einen Stretch ϵ und α-lokal-optimal.

- γ, ϵ, und α sind Tuningparameter des Problems
- Typische Werte sind: $\alpha = 25\%$, $\epsilon = 25\%$, $\gamma = 80\%$

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Formelle Qualitätseigenschaften

- **Ziel**: Finde Pfad der γ-verschieden ist, einen Stretch ϵ und α-lokal-optimal.

- γ, ϵ, und α sind Tuningparameter des Problems
- Typische Werte sind: $\alpha = 25\%$, $\epsilon = 25\%$, $\gamma = 80\%$

- Bei mehreren Alternativen:
  Neue Alternative muss γ-verschieden von der Vereinigung aller bisher gefunden Pfade sein.

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Weiteres Vorgehen

- Bisher: Wir haben gültige Alternativen formalisiert
- Nun: Wie finden wir gute Alternativen?

Weiteres Vorgehen

- Bisher: Wir haben gültige Alternativen formalisiert
- Nun: Wie finden wir gute Alternativen?

- **Vorgehen**:
  - Finde Kandidaten-Pfad nach einem heuristischen Verfahren
  - Prüfe ob der Pfad eine gute Alternative ist
- Findet nicht immer eine Alternative

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Weiteres Vorgehen

- Bisher: Wir haben gültige Alternativen formalisiert
- Nun: Wie finden wir gute Alternativen?

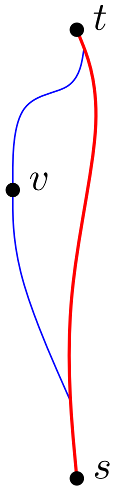
- **Vorgehen**:
  - Finde Kandidaten-Pfad nach einem heuristischen Verfahren
  - Prüfe ob der Pfad eine gute Alternative ist
- Findet nicht immer eine Alternative

- **Problem**: Wie effizient testen?
- Nicht trivial
- Der Test braucht eine nicht vernachlässigbare Menge von Rechenzeit
- Details nicht in der Vorlesung

Bestimmung von Kandidaten

Single via paths:

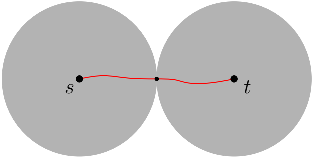
- Konkatenation von zwei kürzesten Pfaden: s–v und v–t
- Eigenschaften:
  - lineare viele Pfade
  - einzelner Pfad ist definiert durch via Knoten v (Notation: P_v)
  - lokal optimal von s nach v und v nach t
  - Verletzungen nur um v herum
  - Alternativen können effizient berechnet werden sobald v bekannt ist



Prinzip Bidirektionale Suche

Relaxiertes Stop-Kriterium

- suche bidirektional
- stoppe sobald Radii größer als $(1+\epsilon)\ell(\mathit{Opt})$



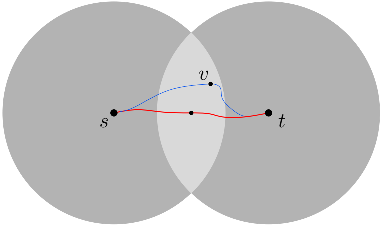
Finde Alternative:

- für alle v, die von beiden Suchen gescannt worden sind:
- Teste ob P_v den Anforderungen genügt
- finde besten P_v anhand einer Optimierungsfunktion

Problem:

- Anzahl der Kandidaten ist sehr hoch
- Interaktion mit Beschleunigungstechniken?

Prinzip Bidirektionale Suche



Relaxiertes Stop-Kriterium

- suche bidirektional
- stoppe sobald Radii größer als $(1+\epsilon)\ell(\mathit{Opt})$

Finde Alternative:

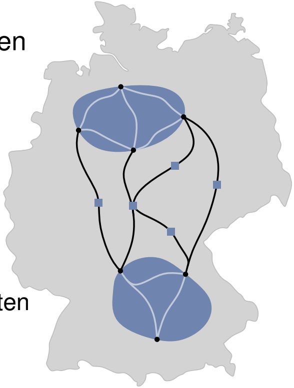
- für alle v, die von beiden Suchen gescannt worden sind:
- Teste ob P_v den Anforderungen genügt
- finde besten P_v anhand einer Optimierungsfunktion

Problem:

- Anzahl der Kandidaten ist sehr hoch
- Interaktion mit Beschleunigungstechniken?

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Alternativen mit CH



Idee

- Lasse Vorwärts- und Rückwärtssuche laufen bis Stretch erreicht ist
- Entpacke Pfad für jeden Knoten im gemeinsamen Suchraum
- Teste Pfad

Probleme

- gegenläufige Ziele
  - CH will Suchraum klein haben
  - Alternativrouten brauchen genug Kandidaten
- Tests und Pfadenpackungen kosten Zeit

“Lösung”

- Für gute Alternativen muss man vereinzelt auch Kanten folgen die den Suchraum verlassen
- Je weiter man den Suchraum verlässt, je besser werden die gefunden Pfad, aber je schlechter werden die Laufzeiten
- Siehe [ADGW13] für Details

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Alternativen mit Reach

Idee

- Analog zu Dijkstra
- Lasse Vorwärts- und Rückwärtssuche laufen bis Stretch erreicht ist
- Teste Pfad

Probleme

- Reach dünnt Suchraum schlechter aus als CH
- Mehr Kandidaten
- Bessere Alternativen
- Aber langsamer

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Plateau

Karlsruher Institut für Technologie

Problem mit Via-Knoten:

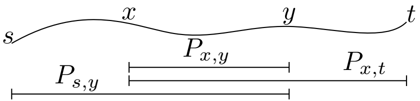
- lokale Optimalität am Via-Knoten verletzt

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Plateau

Problem mit Via-Knoten:

- lokale Optimalität am Via-Knoten verletzt

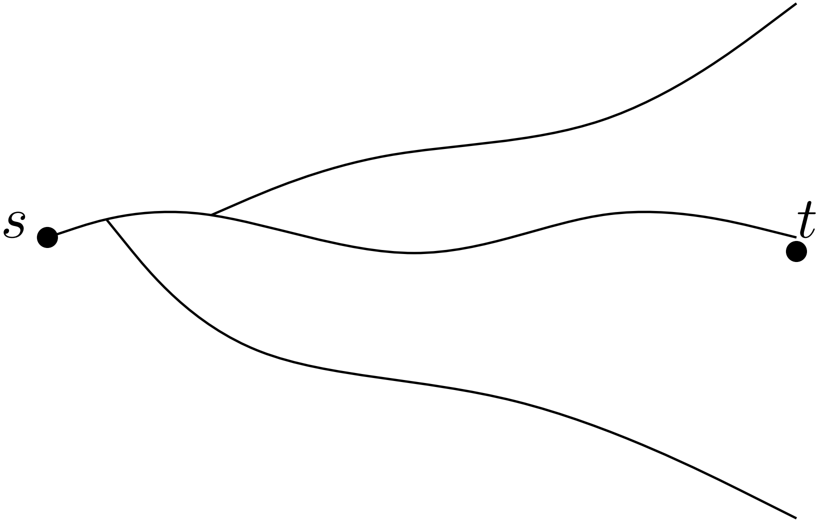


Idee:

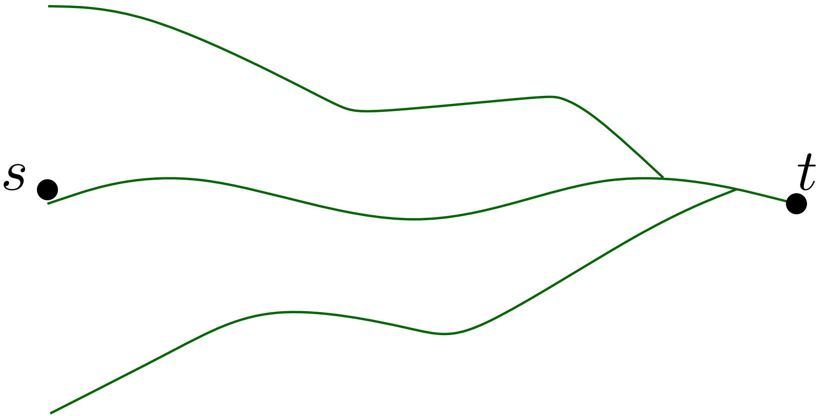
- Suche zwei kürzeste Pfade $P_{s,y}$ und $P_{x,t}$
- mit $P_{x,y} \subseteq P_{s,y}$ und $P_{x,y} \subseteq P_{x,t}$
- $P_{x,y}$ heißt Plateau
- Alternative besteht T-Test für $T \leq \ell(P_{x,y})$
- Langes Plateau $\rightarrow$ gute Alternative
- Randfall Via-Knoten: $x = y$

Plateau

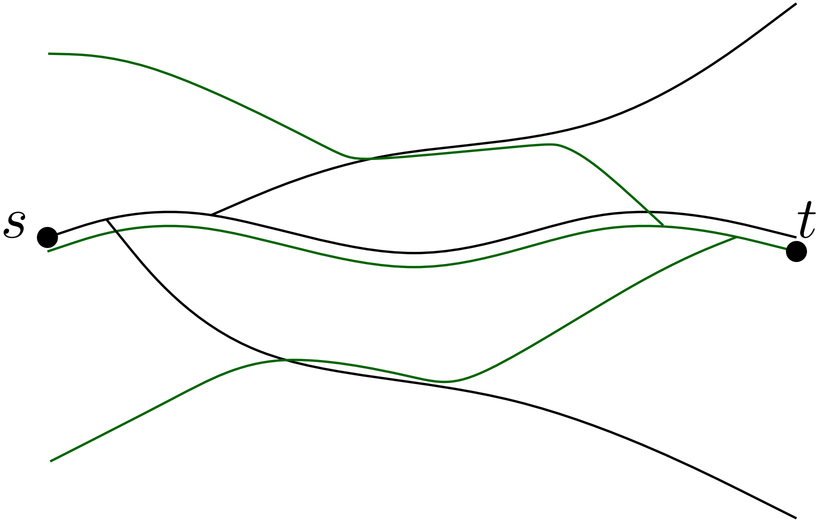
Plateau



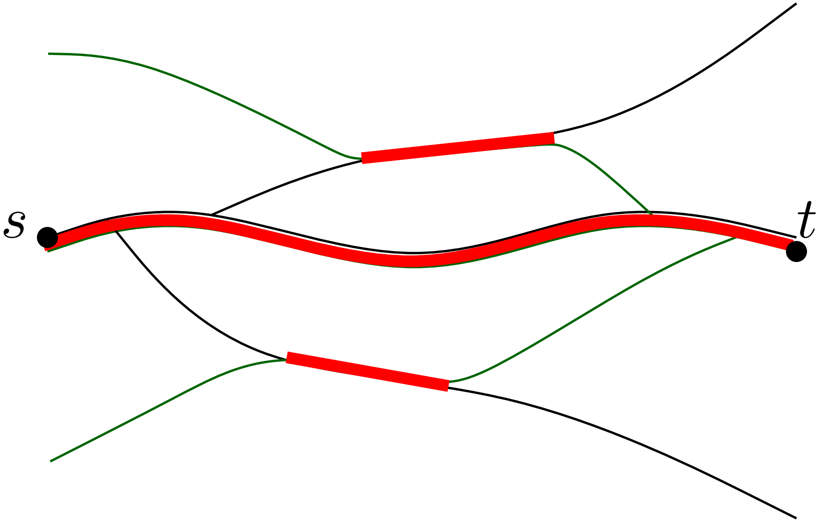
Plateau



Plateau

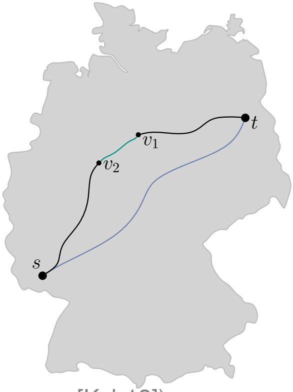


Plateau



Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Plateaux berechnen



- benötigt optimale Suchbäume
- einfach mit Dijkstra
- CH: komplex, aber möglich
  (Grundlage: vollständiges Entpacken des Suchraums: [Kob13])

Plateaux vs Via-Knoten

Karlsruher Institut für Technologie

- Via-Knoten einfacher und schneller zu berechnen
- Aber: Mehr Via-Knoten als Plateaux
- d.h. mehr Zulässigkeitstests mit Via-Knoten

- Jede Plateau-Alternative ist auch eine Via-Alternative
- **Beweis:**
  - Sei $P_{s,t} = s \to y \to x \to t$ die Plateau-Alternative
  - Für jeder Knoten $v \in P_{y,x}$ ist $P_{s,t}$ eine Via-Alternative mit Via-Knoten v, da $P_{s,v}$ und $P_{v,t}$ kürzeste Pfade sind

Alternativen durch Stausimulation

Idee:

- Suche kürzesten Pfad P_1
- Simuliere Stau auf P_1
- Suche neuen kürzesten Pfad P_2 der Stau in Betracht zieht
- Simuliere Stau auf P_1 und P_2
- Suche neuen kürzesten Pfad P_3 der Stau in Betracht zieht
- ...
- Wiederhole bis Alternativen zu lang werden

Alternativen durch Stausimulation

Karlsruher Institut für Technologie

Idee:

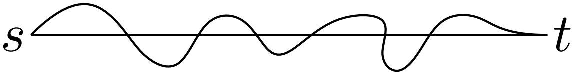
- Suche kürzesten Pfad P_1
- Simuliere Stau auf P_1
- Suche neuen kürzesten Pfad P_2 der Stau in Betracht zieht
- Simuliere Stau auf P_1 und P_2
- Suche neuen kürzesten Pfad P_3 der Stau in Betracht zieht
- ...
- Wiederhole bis Alternativen zu lang werden

- Englischer Fachbegriff: Penalty Method
- Quelle: [BDGS11]

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Alternativen durch Stausimulation

Ist das eine gute Alternative?



- Nicht lokal optimal
- Bestrafe nicht nur die Kanten auf dem Weg, sondern auch die inzidente Kanten.

Alternativen durch Stausimulation

Strafterme

- Einfluss von additiven Straftermen hängt vom Graph ab
  mehr Grad-2 Knoten $\rightarrow$ größerer Einfluss
- **Lösung**: Multiplikative Strafterme

- Anders formuliert: Setzt die Geschwindigkeit gleichmäßig runter anstatt jede Kante um x Sekunden zu verlängern

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Alternativen durch Stausimulation

Wie implementieren?

- Benutze 3-Phasen Vorberechnungstechnik
- Nur Teile der Metrik ändern sich $\rightarrow$ kann ausgenutzt werden
- [KRS13] baut auf MLD/CRP auf

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik

Ein Paar Zahlen

algorithm	first time [ms]	first success rate [%]	second time [ms]	second success rate [%]	third time [ms]	third success rate [%]
X-BDV	11 451.5	94.5	12 225.9	80.6	13 330.9	59.6
CRP-π	130.0	96.3	130.0	84.0	130.0	62.9
X-REV	20.4	91.3	33.6	70.3	42.6	43.0
HiDAR	18.2	91.5	18.2	75.7	18.2	55.9
X-CHV-v1	16.9	90.7	20.3	70.1	22.1	42.3
X-CHV-v2	3.1	58.2	3.6	28.6	3.9	10.9

- X-BDV: Bidirektionaler Dijkstra
- X-REV: Reach
- X-CHV-v1 und X-CHV-v2: Zwei CH-Varianten, v1 sucht mehr Kanten außerhalb des Suchraums ab
- HiDAR: Plateau-CH
- CRP-π: Simulierter Stau

Zusammenfassung Alternativ-Routen

Karlsruher Institut für Technologie

- Eine gute Alternative ist:
  - Nicht viel länger
  - Lokal-optimal
  - Hinreichend verschieden
- Alternativen findet man durch
  - Kandidaten heuristisch aufzählen
  - Schlechte Kandidaten Ausfiltern
- Kandidaten findet man mit
  - Via-Knoten
  - Plateaux
  - Simuliertem Stau

Literatur I

Ittai Abraham, Daniel Delling, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck.
Alternative routes in road networks.
ACM Journal of Experimental Algorithmics, 18(1):1–17, 2013.

Roland Bader, Jonathan Dees, Robert Geisberger, and Peter Sanders.
Alternative route graphs in road networks.
In *Proceedings of the 1st International ICST Conference on Theory and Practice of Algorithms in (Computer) Systems (TAPAS'11)*, volume 6595 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 21–32. Springer, 2011.

Moritz Kobitzsch.
HiDAR: An alternative approach to alternative routes.
In *Proceedings of the 21st Annual European Symposium on Algorithms (ESA'13)*, volume 8125 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 613–624. Springer, 2013.

Moritz Kobitzsch, Marcel Radermacher, and Dennis Schieferdecker.
Evolution and evaluation of the penalty method for alternative graphs.
In *Proceedings of the 13th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems (ATMOS'13)*, OpenAccess Series in Informatics (OASIcs), pages 94–107, 2013.

Institut für Theoretische Informatik
Lehrstuhl Algorithmik