

Algorithmen 1

Kürzeste Wege in gewichteten Graphen – Dijkstras Algorithmus



Problemstellung

Gegeben

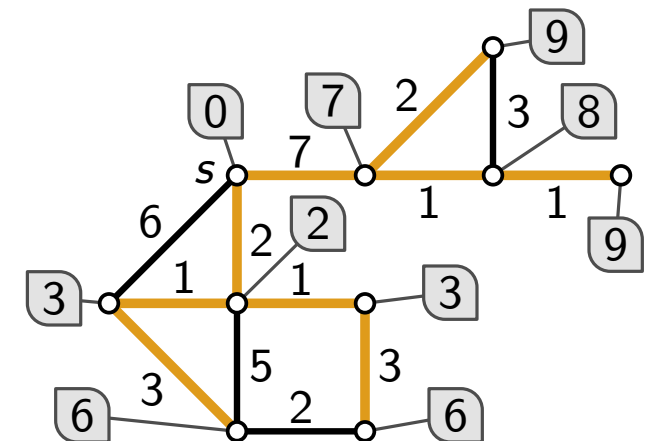
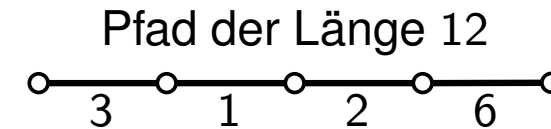
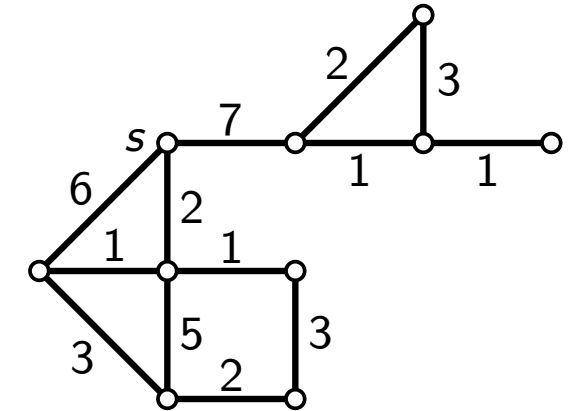
- ein Graph $G = (V, E)$ (ungerichtet oder gerichtet)
- Gewichtsfunktion $\text{len}: E \rightarrow \mathbb{Z}$, die jeder Kante $e \in E$ eine **Länge** $\text{len}(e)$ zuordnet
- Startknoten s

Pfadlängen und Distanzen

- **Länge eines Pfades** $\langle v_0, \dots, v_k \rangle$: $\sum_{i=1}^k \text{len}(v_{i-1}, v_i)$
 (Kurzform für $\text{len}(\{v_{i-1}, v_i\})$)
- **Distanz** $\text{dist}(s, t)$: Länge des kürzesten st -Pfades

Problem: Single-Source Shortest Path (SSSP)

Gegeben einen gewichtete Graphen $G = (V, E)$ und einen Knoten $s \in V$, berechne $\text{dist}(s, t)$ für alle $t \in V$.



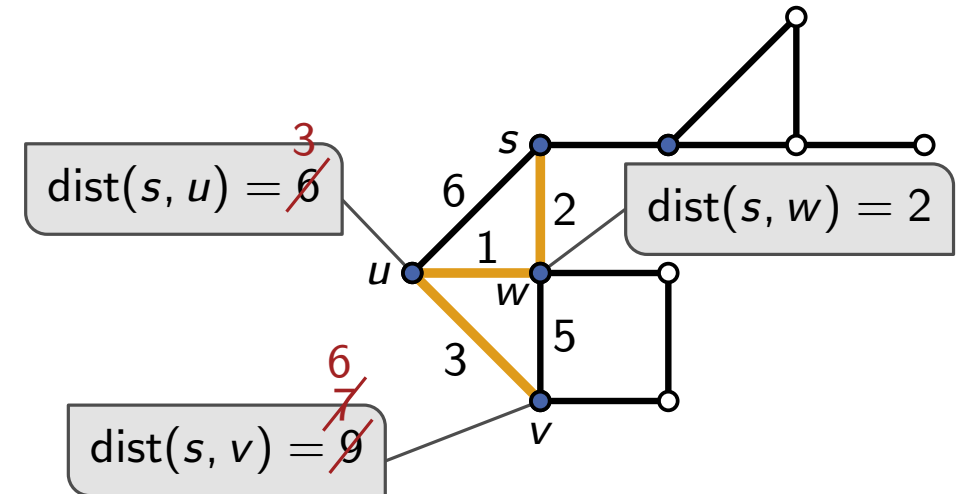
Erinnerung: BFS

Vorgehen

- arbeite die Knoten layerweise ab
- **Explorieren** eines Knotens u aus Layer $i - 1$:
 - betrachte alle Nachbarn v von u
 - v ungefärbt $\Rightarrow v$ gehört zu Layer i

Kürzeste Pfade: v in Layer $i \Rightarrow \text{dist}(s, v) = i$

- sv -Pfad der Länge i ($\text{dist}(s, v) \leq i$)
 - induktiv: es gibt einen Pfad der Länge $i - 1$ zu u
 - zusammen mit $\{u, v\} \Rightarrow sv$ -Pfad der Länge i
- kein kürzerer Pfad möglich ($\text{dist}(s, v) \geq i$):
 - gäbe es einen kürzeren sv -Pfad, dann hätte v einen Nachbarn in einem vorherigen Layer
 - layerweise Abarbeitung $\Rightarrow v$ wäre schon gefärbt



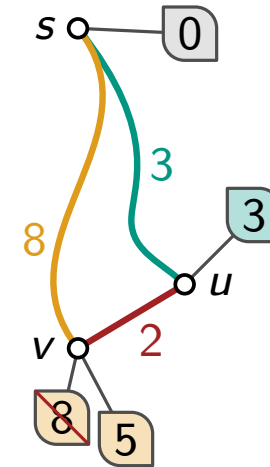
Mit Kantenlängen?

- speichere $\text{dist}(s, v)$ statt Layer
- $\text{dist}(s, u) \leq 6 \Rightarrow \text{dist}(s, v) \leq 9$
- ggf. findet man später einen kürzeren Pfad zu v
- oder sogar zu u

Kernproblem beim Umgang mit Kantenlängen

Plan für das generelle Vorgehen

- speichere $d[v]$ für jeden Knoten v : Länge des kürzesten bekannten sv -Pfades (Invariante: $\text{dist}(s, v) \leq d[v]$)
- **Explorieren** eines Knotens u :
 - betrachte alle Nachbarn v von u
 - falls $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$, setze $d[v] = d[u] + \text{len}(u, v)$



Anders als bei BFS

- | | |
|---|---|
| ■ v gefunden $\not\Rightarrow$ kürzester sv -Pfad gefunden | nicht schlimm: keine Zusatzkosten verglichen mit dem Testen ob v schon gefärbt ist |
| ■ $d[v]$ wird ggf. mehrfach aktualisiert | |
| ■ v schon exploriert, wenn $d[v]$ sich ändert $\rightarrow v$ muss erneut exploriert werden | problematisch: könnte öfters passieren und ggf. kaskadieren |

Ziel im Folgenden

- | | |
|--|--|
| ■ v exploriert \Rightarrow kürzester sv -Pfad gefunden | super: jeden Knoten einmal explorieren kostet insgesamt $\Theta(m)$ (wie bei BFS) |
|--|--|

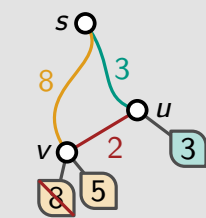
Explorierungsreihenfolge → Dijkstras Algorithmus

Ziel: v exploriert \Rightarrow kürzester sv -Pfad gefunden

Strategie: explore **Knoten u mit minimalem $d[u]$**
 (unter allen noch nicht explorierten Knoten)

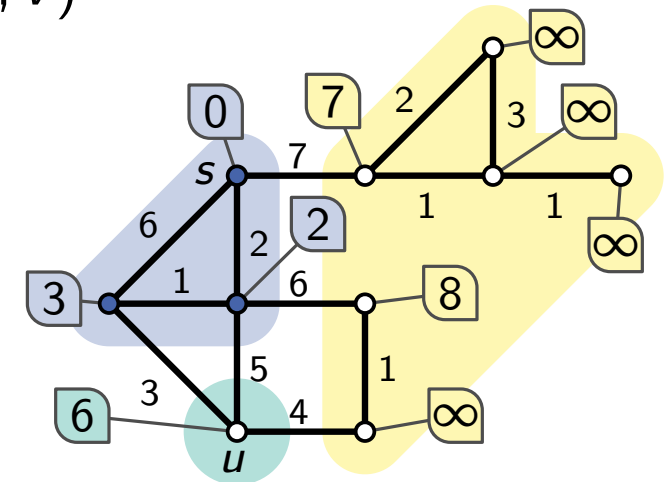
Erinnerung: Explorieren von u

- betrachte alle Nachbarn v von u
- falls $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$, setze $d[v] = d[u] + \text{len}(u, v)$



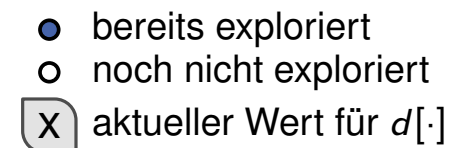
Zielführende Strategie

- Annahme: für alle **vorher explorierten Knoten v** gilt $d[v] = \text{dist}(s, v)$
- zeige: für u gilt ebenfalls $d[u] = \text{dist}(s, u)$
- Intuition:
 - su -Pfad über v mit $d[v] < d[u]$ schon gefunden (v exploriert)
 - Knoten w mit $d[w] > d[u]$ explorieren kann $d[u]$ nicht senken
- **Achtung:** wir nehmen hier nicht-negative Kantenlängen an



Gleich

- Wrap-Up: Algo-Beschreibung, Umsetzung in Pseudocode, Beispiel
- formaler Korrektheitsbeweis

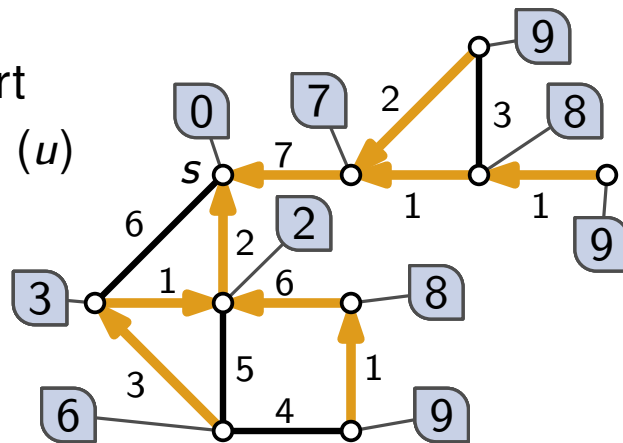


Dijkstras Algorithmus

Algorithmus

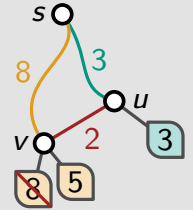
- wiederhole bis alle Knoten exploriert:
 - wähle unexplorierten Knoten u mit minimalem $d[u]$
 - exploriere u
- Initialisierung: $d[v] = \infty$ für $v \in V$ und $d[s] = 0$

- schon exploriert
- am explorieren (u)
- unexploriert
- $d[\cdot]$



Erinnerung: Explorieren von u

- betrachte alle Nachbarn v von u
- falls $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$, setze $d[v] = d[u] + \text{len}(u, v)$



Dijkstra(*Graph G*, *Node s*)

$d :=$ Array of size n initialized with ∞
 $d[s] := 0$

while there is an unexplored node **do**

$Node\ u :=$ unexp. node with min. $d[u]$

for $Node\ v$ in $N(u)$ **do**

if $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$ **then**

$d[v] := d[u] + \text{len}(u, v)$

Konstruktion der kürzesten Pfade (wie bei BFS)

- jeder Knoten merkt sich seinen Vorgänger

Ausblick: Priority-Queue

Wie finden wir den unexplorierten Knoten u mit minimalem $d[u]$?

- naiv: einmal alle Knoten anschauen $\rightarrow \Theta(n)$ pro Iteration $\rightarrow \Theta(n^2)$ insgesamt
- Datenstruktur: Priority-Queue (Prioritätswarteschlange)
 - **push**($v, 7$): füge v mit Priorität 7 ein
 - **popMin**(): extrahiere Element mit kleinster Priorität
 - **decPrio**($v, 4$): verkleinere Priorität von v auf 4

Wie schnell gehen die Operationen?

- unterschiedliche Varianten mit unterschiedlichen Laufzeiten
- viele schnelle Varianten: $O(\log n)$ pro Operation
- Fibonacci-Heap: $\Theta(\log n)$ für **popMin**, $\Theta(1)$ für **push** und **decPrio**

Wie geht das?

- clevere Verwaltung der Elemente in einer Baumstruktur
- werden wir bald genauer kennen lernen

Dijkstras Algorithmus mit Priority-Queue

Dijkstra(*Graph G, Node s*)

$d :=$ Array of size n initialized with ∞

$d[s] := 0$

PriorityQueue $Q :=$ empty priority queue

for Node v in V **do**

$Q.$ **push**($v, d[v]$)

while $Q \neq \emptyset$ **do**

$u := Q.$ **popMin**()

for Node v in $N(u)$ **do**

if $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$ **then**

$d[v] := d[u] + \text{len}(u, v)$

$Q.$ **decPrio**($v, d[v]$)

Anmerkung

- man könnte die Knoten auch beim ersten entdecken erst in die Queue einfügen
- dann muss man sich merken, welche schon eingefügt sind (ähnlich zu BFS)

Laufzeitanalyse

- n Mal **push**
- jeder Knoten wird nur einmal aus der Queue entfernt $\Rightarrow n$ Mal **popMin**
- jeder Kante nur zweimal betrachtet (einmal von jeder Seite) $\Rightarrow m$ Mal **decPrio**
- $\Theta(n \log n + m)$, wenn **decPrio** in $\Theta(1)$
- $\Theta((n + m) \log n)$, wenn **decPrio** in $\Theta(\log n)$

Korrektheit: Überblick

Theorem

Gegeben einen Graphen $G = (V, E)$, Kantenlängen $len: E \rightarrow \mathbb{N}$ und $s \in V$, dann berechnet Dijkstras Algorithmus in $\Theta(n \log n + m)$ Zeit die Distanzen $dist(s, v)$ für alle $v \in V$.

Beweis

Anmerkung: die Kantenlängen sind hier nicht-negativ

- Laufzeit: gerade gesehen
- Korrektheit: zeige die folgenden zwei Lemmas

Lemma

(der Algo behauptet nicht Pfade zu kennen, die es gar nicht gibt)

Wenn $d[v] < \infty$, dann gibt es einen sv -Pfad der Länge $d[v]$. Das heißt $d[v] \geq dist(s, v)$ gilt zu jedem Zeitpunkt.

Lemma

(der Algo findet tatsächlich den kürzesten Pfad)

In dem Moment, in dem u aus der Queue entfernt und exploriert wird gilt $d[u] = dist(s, u)$.

Korrektheit: Algo kennt nur existierende Pfade

Lemma

(der Algo behauptet nicht Pfade zu kennen, die es gar nicht gibt)

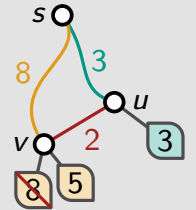
Wenn $d[v] < \infty$, dann gibt es einen sv -Pfad der Länge $d[v]$. Das heißt $d[v] \geq \text{dist}(s, v)$ gilt zu jedem Zeitpunkt.

Mehr oder weniger offensichtlich

- Invariante gilt am Anfang
- bleibt beim Explorieren eines Knotens erhalten

Erinnerung: Explorieren von u

- betrachte alle Nachbarn v von u
- falls $d[v] > d[u] + \text{len}(u, v)$, setze $d[v] = d[u] + \text{len}(u, v)$



Beweis im Detail

- Invariante gilt nach der Initialisierung: $d[s] = 0$ und $d[v] = \infty$ für alle $v \in V \setminus \{s\}$
- $d[v]$ kann nur durch das Explorieren eines Nachbarn u geändert werden
 - da Invariante vorher galt: es gibt su -Pfad der Länge $d[u]$
 - Invariante bleibt erhalten: es gibt sv -Pfad der Länge $d[u] + \text{len}(u, v)$

Korrektheit: Algo findet kürzesten Pfad

Lemma

(der Algo findet tatsächlich den kürzesten Pfad)

In dem Moment, in dem u aus der Queue entfernt und exploriert wird gilt $d[u] = \text{dist}(s, u)$.

Intuition

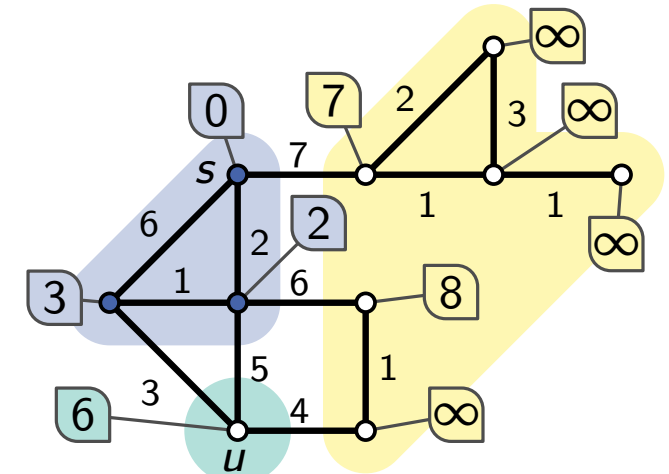
- Erinnerung: wir explorieren immer den unexplorierten Knoten u mit minimalem $d[u]$
- su -Pfad über v mit $d[v] < d[u]$ schon gefunden (v exploriert)
- Knoten w mit $d[w] > d[u]$ explorieren kann $d[u]$ nicht senken

Problem: das ist noch kein Beweis

- nur weil wir später keinen kürzeren Pfad mehr finden können heißt das nicht, dass wir jetzt den kürzesten Pfad haben

Nützliche Beobachtung

- Knoten werden in nicht-absteigender Reihenfolge exploriert
- also: wenn $d[v] < d[u]$ beim Explorieren, dann wird v vor u exploriert



- bereits exploriert
- noch nicht exploriert
- ⓧ aktueller Wert für $d[\cdot]$

Korrektheit: Algo findet kürzesten Pfad

Lemma

(der Algo findet tatsächlich den kürzesten Pfad)

In dem Moment, in dem u aus der Queue entfernt und exploriert wird gilt $d[u] = \text{dist}(s, u)$.

Beweis: angenommen es stimmt nicht

- wähle Gegenbeispiel u mit $d[u] > \text{dist}(s, u)$, sodass u der erste solche Knoten auf einem kürzesten su -Pfad ist

Notation

- $d[v]$: Länge des kürzesten bekanntesten Pfades von s nach v **beim Explorieren**
- $\text{dist}(s, v)$: tatsächliche Distanz von s nach v
- $\text{len}(v, u)$: Länge der Kante $\{v, u\}$

Einschub: Beweistechnik

- naheliegendes Argument: u ist Gegenbeispiel \Rightarrow ein Nachbar von u ist Gegenbeispiel
- damit hangeln wir uns von Gegenbeispiel zu Gegenbeispiel
- und müssen zeigen: irgendwann endet das in einem Widerspruch
- schöner: starte mit einem **minimalen Gegenbeispiel**

Korrektheit: Algo findet kürzesten Pfad

Lemma

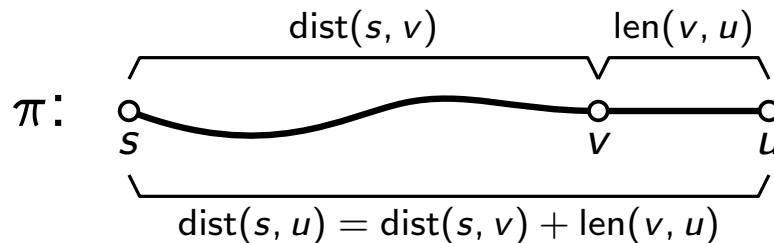
(der Algo findet tatsächlich den kürzesten Pfad)

In dem Moment, in dem u aus der Queue entfernt und exploriert wird gilt $d[u] = \text{dist}(s, u)$.

Beweis: angenommen es stimmt nicht

- wähle Gegenbeispiel u mit $d[u] > \text{dist}(s, u)$, sodass u der erste solche Knoten auf einem kürzesten su -Pfad ist
- sei v der Vorgänger von u auf diesem Pfad

(v ist also kein Gegenbeispiel)



- es gilt: $d[v] = \text{dist}(s, v) \leq \text{dist}(s, u) < d[u]$
- damit wird v vor u exploriert
- dabei wird $d[u]$ auf $d[v] + \text{len}(v, u) = \text{dist}(s, v) + \text{len}(v, u) = \text{dist}(s, u)$ gesetzt



Notation

- $d[v]$: Länge des kürzesten bekanntesten Pfades von s nach v **beim Explorieren**
- $\text{dist}(s, v)$: tatsächliche Distanz von s nach v
- $\text{len}(v, u)$: Länge der Kante $\{v, u\}$

Nützliche Beobachtung

- Knoten werden in nicht-absteigender Reihenfolge exploriert
- also: wenn $d[v] < d[u]$ beim Explorieren, dann wird v vor u exploriert

Dijkstras Algo: Zusammenfassung und Anmerkungen

Theorem

Gegeben einen Graphen $G = (V, E)$, Kantenlängen $len: E \rightarrow \mathbb{N}$ und $s \in V$, dann berechnet Dijkstras Algorithmus in $\Theta(n \log n + m)$ Zeit die Distanzen $dist(s, v)$ für alle $v \in V$.

Anmerkungen

- funktioniert für gerichtete und ungerichtete Graphen
- wir brauchen nicht-negativen Kantenlängen
- das Betrachten der Kante $e = \{u, v\}$ beim Explorieren von u heißt auch **relaxieren** von e

Nächstes Mal

- Umgang mit negativen Kantenlängen: Bellman–Ford
- Berechnung der Distanzen zwischen allen Paaren: Floyd–Warshall

Später

- effiziente Priority-Queues

Ausblick: Routenplanung in der Praxis

Kürzeste Wege auf Straßengraphen

- Europa hat ca. 18 M Knoten und 42 M Kanten
- Dijkstra braucht mehrere Sekunden
- ungeeignet für viele Anwendungen

Problem: viel besser als $O(n \log n + m)$ kann es nicht werden

Beobachtung: der Eingabegraph ist immer der gleiche

Idee

- zwei Phasen:
 1. generiere Zusatzinformationen über G
 2. **beschleunigte Anfrage** dank dieser Information
- drei Kriterien: Beschleunigung, Vorberechnungszeit, Speicherplatz

Ausblick: Routenplanung in der Praxis (Beispiele)

Zielgerichtetes Routing (Arc-Flags)

- manche Straßen in Karlsruhe sind nicht relevant, wenn man nach Berlin möchte
- Vorberechnung: berechne für jede Kante, ob sie für ein Ziel in Berlin relevant ist
- Anfrage: Zielknoten liegt in Berlin → Dijkstra aber ignoriere irrelevanten Kanten

Ausnutzung von Transitknoten

- Situation: wir wollen von Karlsruhe weit weg fahren
- kürzester Weg führt dann immer erstmal auf die Autobahn
- es gibt nicht so viele Autobahnauffahrten → wenige Transitknoten
- berechne Distanzen zwischen allen Paaren von Transitknoten vor

Anmerkungen

- es lohnt sich: bis zu 1 000 000 mal schneller als Dijkstra
- viele der Algorithmen wurden hier in Karlsruhe entwickelt
- mehr davon? → Vorlesung Algorithmen für Routenplanung (Master)

Zusammenfassung

Dijkstras Algorithmus

- vermutlich der bekannteste Graphalgorithmus (vielleicht nach BFS und DFS)
- effiziente Berechnung kürzester Wege
- Wunschzettel: eine schnelle Priority-Queue

Beweistechniken

- Invariante (Algo kennt nur Pfade, die es wirklich gibt)
- Widerspruch mit minimalem Gegenbeispiel (Algo findet den kürzesten Pfad)

Ausblick Routenplanung

- Algorithmische Technik: Vorberechnung, wenn bei vielen Anfragen auf den selben Daten
- kann Anfragen sehr beschleunigen