

Datenstrukturen und Algorithmen

Vorlesung 19: Maximaler Fluss

Joost-Pieter Katoen

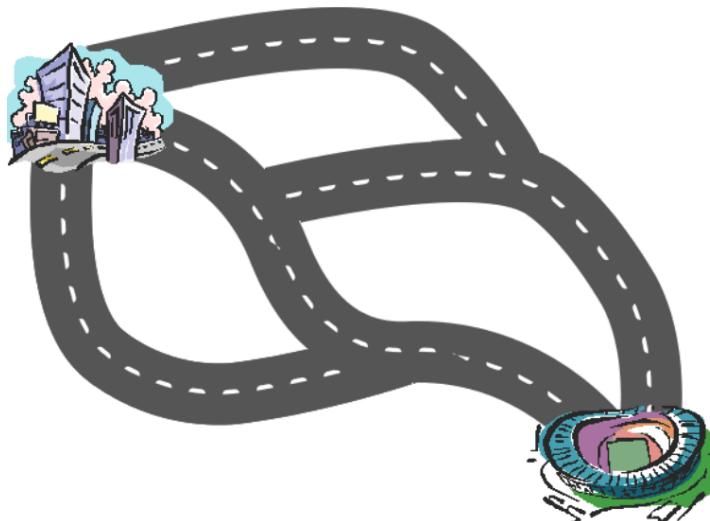
Lehrstuhl für Informatik 2
Software Modeling and Verification Group

<http://www-i2.informatik.rwth-aachen.de/i2/dsal12/>

29. Juni 2012



Graphenproblem: maximale Flüsse



Übersicht

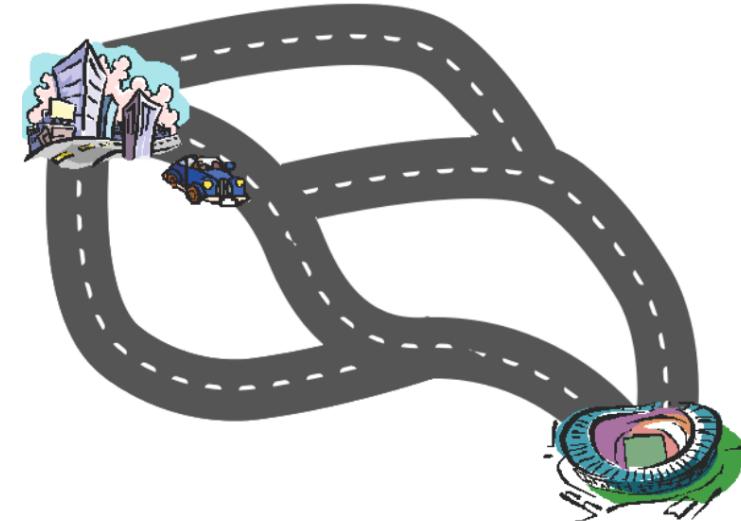
1 Flussnetzwerke

2 Ford-Fulkerson-Methode

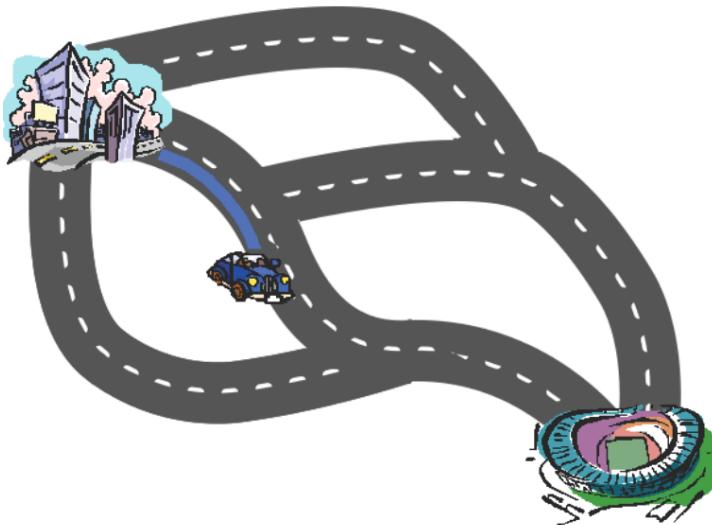
- Restnetzwerke
- Algorithmus
- Schnitte

3 Edmonds-Karp-Algorithmus

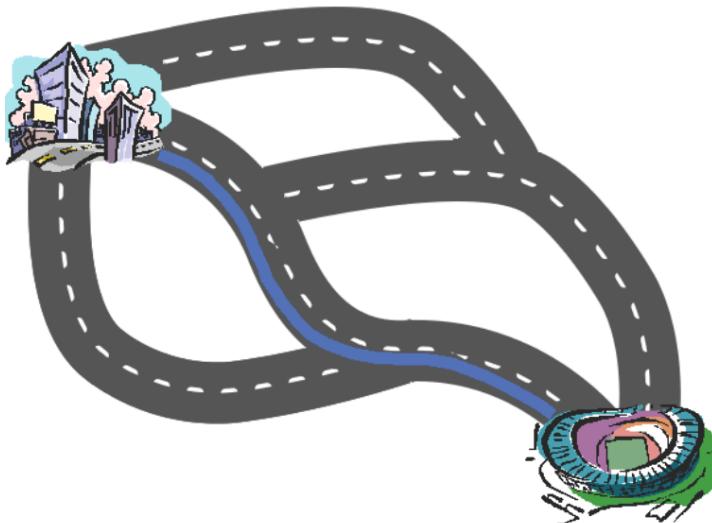
Graphenproblem: maximale Flüsse



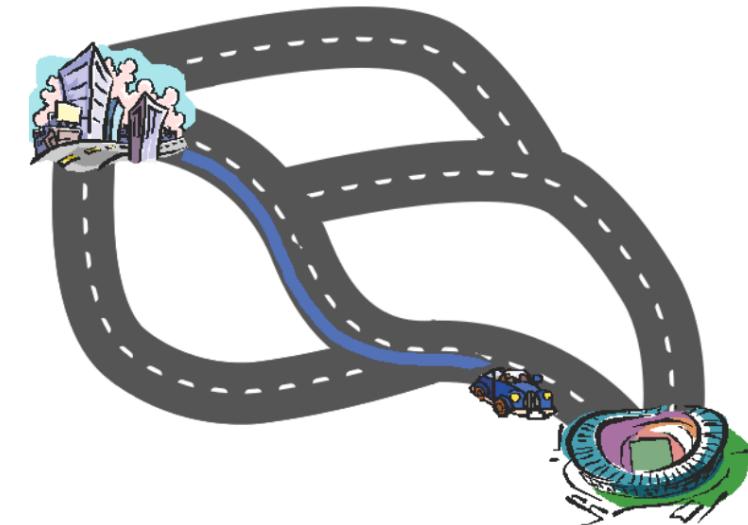
Graphenproblem: maximale Flüsse



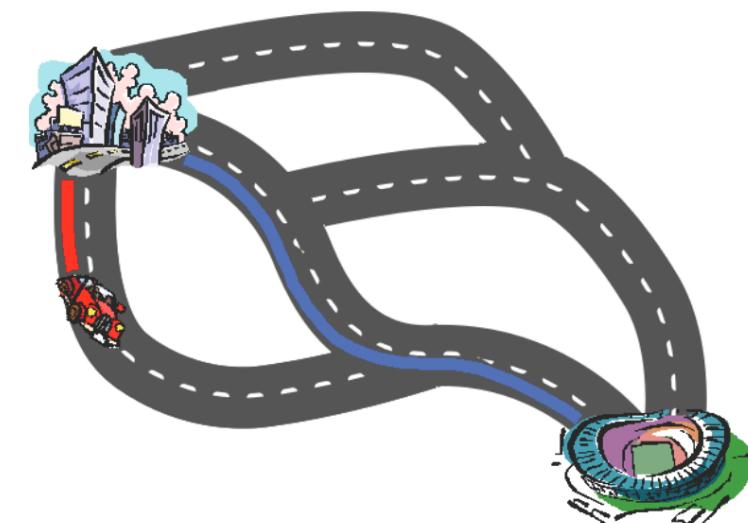
Graphenproblem: maximale Flüsse



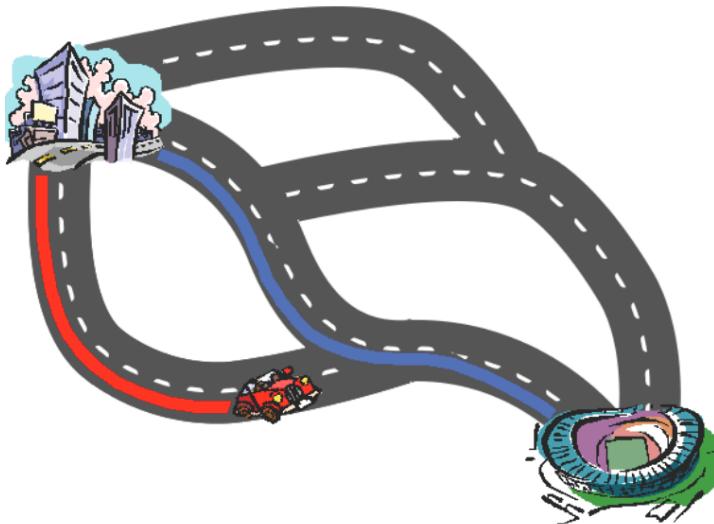
Graphenproblem: maximale Flüsse



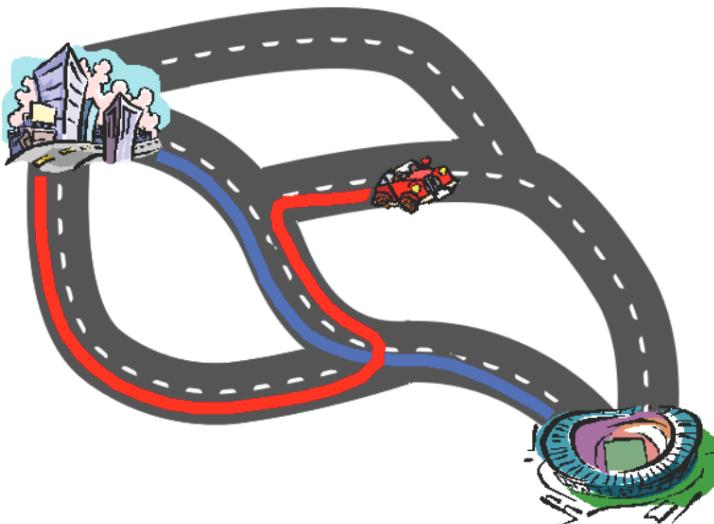
Graphenproblem: maximale Flüsse



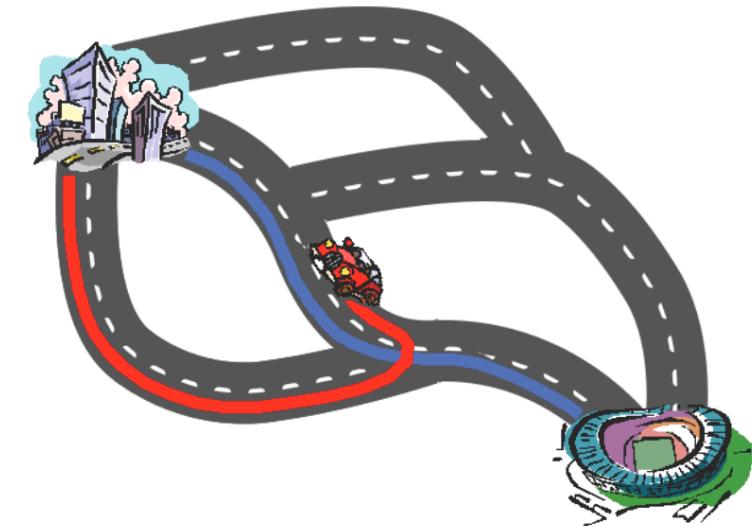
Graphenproblem: maximale Flüsse



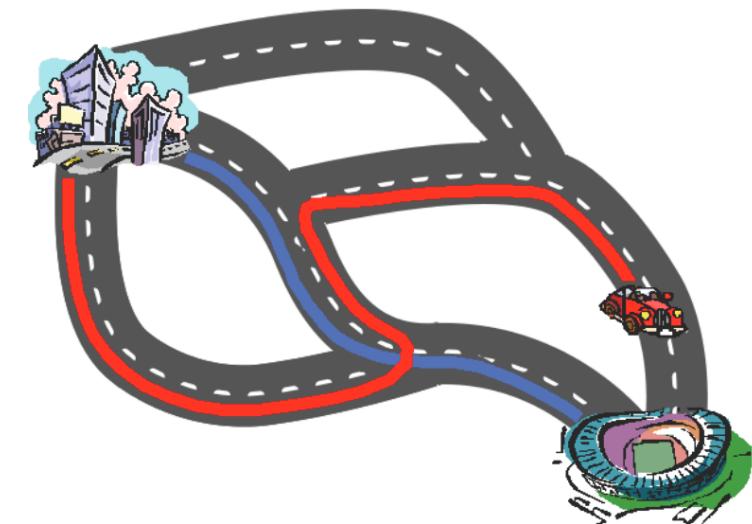
Graphenproblem: maximale Flüsse



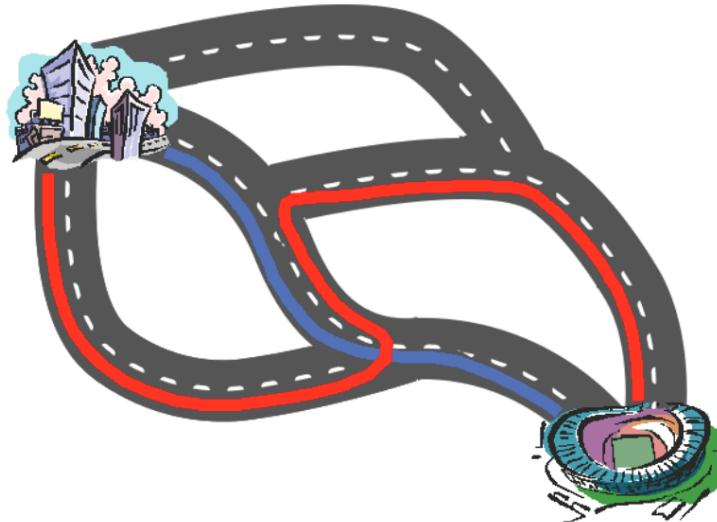
Graphenproblem: maximale Flüsse



Graphenproblem: maximale Flüsse



Graphenproblem: maximale Flüsse



Übersicht

1 Flussnetzwerke

2 Ford-Fulkerson-Methode

- Restnetzwerke
- Algorithmus
- Schnitte

3 Edmonds-Karp-Algorithmus

Graphenproblem: maximale Flüsse

Beispiel (maximale Flüsse)

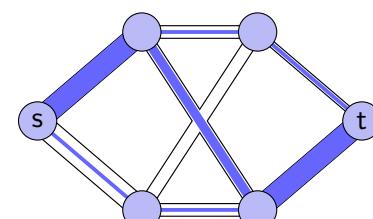
- Eingabe:** 1. Eine Straßenkarte, auf der die Kapazität der Straßen eingezeichnet ist,
2. eine Quelle, und
3. eine Senke.

Ausgabe: Die maximale Rate, mit der Material (= Zuschauer) von der Quelle bis zur Senke (= Stadion) transportiert werden kann, ohne die Kapazitätsbeschränkungen der Straßen zu verletzen.

Flussnetzwerk

Ein **Flussnetzwerk** $G = (V, E, c)$ ist ein digraph (V, E) mit

- ▶ $c : V \times V \longrightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$ die **Kapazitätsfunktion** sodaß:
 - ▶ $(u, v) \in E$ dann $c(u, v) \geq 0$
 - ▶ $(u, v) \notin E$ dann $c(u, v) = 0$
- ▶ $s, t \in V$, die **Quelle s** und **Senke t** des Flussnetzwerkes
- ▶ Jeder Knoten $v \in V$ liegt auf einem Pfad von Quelle s zur Senke t



- ▶ An der Quelle wird produziert
- ▶ An der Senke wird verbraucht
- ▶ Kanten sind wie Wasserrohre
- ▶ Kapazität = maximale Durchsatzrate

Fluss in einem Flussnetzwerk

Definition (Fluss)

Ein **Fluss** ist eine Funktion $f: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$, mit folgenden Eigenschaften:

Beschränkung: Für $u, v \in V$ gilt $f(u, v) \leq c(u, v)$.

Asymmetrie: Für $u, v \in V$ gilt $f(u, v) = -f(v, u)$.

Flusserhaltung: Für $u \in V - \{s, t\}$ gilt: $\sum_{v \in V} f(u, v) = 0$.

$f(u, v)$ ist der Fluss vom Knoten u zum Knoten v .

Definition (Wert eines Flusses)

Der **Wert** $|f|$ des Flusses f ist der Gesamtfluss aus der Quelle s :

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s, v).$$

Maximale Flüsse

Ein **maximaler** Fluss ist einen Fluss mit maximalem Wert.

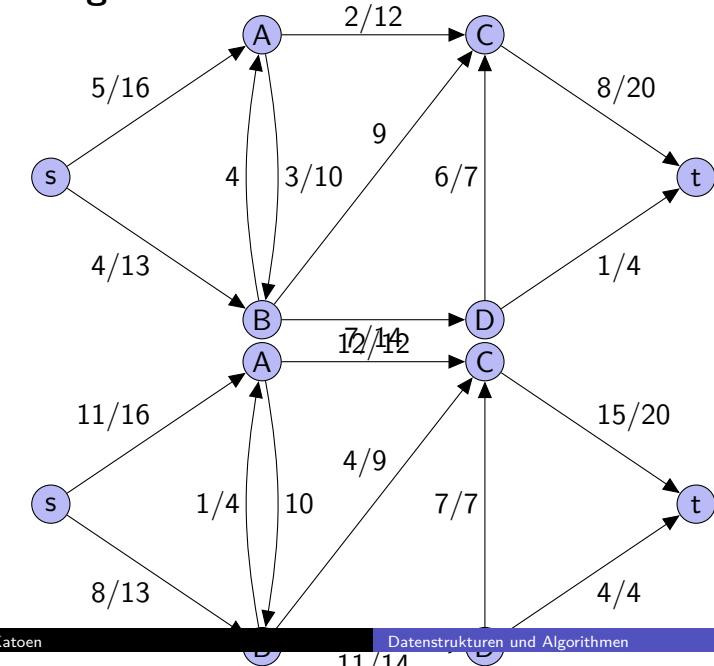
Problem (Maximaler Fluss)

Finde einen **maximalen Fluss** in einem gegebenen Flussnetzwerk G .

Beispiel (Anwendungen)

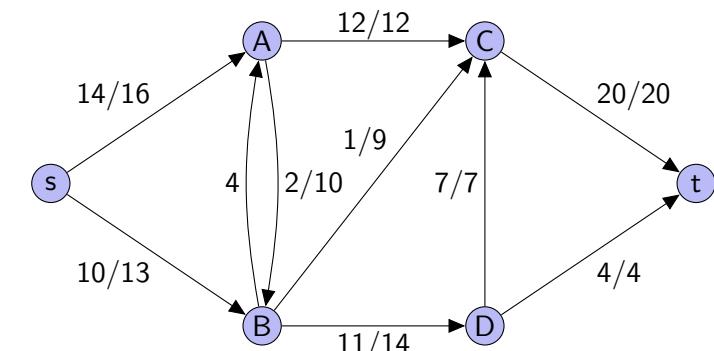
- Wie groß ist der maximale Datendurchsatz zwischen zwei Computern in einem Netzwerk?
- Wie kann der Verkehr in einem Straßennetz so geleitet werden, dass möglichst viele Autos in einer gegebenen Zeitspanne ein Ziel erreichen?
- Wie viele Leitungen müssen zerstört sein, damit zwei Computer nicht mehr miteinander kommunizieren können?

Darstellung von Flüssen



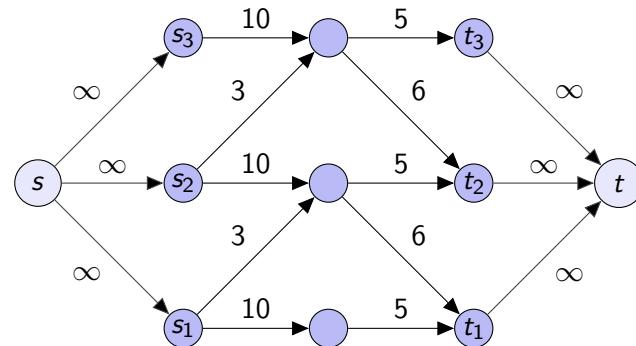
► Wir beschriften Kanten mit $f(u, v)/c(u, v)$, falls $f(u, v) > 0$

Ein maximaler Fluss



- Ein maximaler Fluss in diesem Beispiel hat den Wert $|f| = 24$.
- Es kann mehrere maximale Flüsse geben.

Mehrere Quellen und Senken



- Es kann auch Flussnetzwerke mit **mehrere** Quellen oder Senken geben.
- Sie können durch eine neue „Superquelle“ und „Supersenke“ in ein übliches Flussnetzwerk überführt werden.

Beweis: $f(X, X) = 0$

$$\begin{aligned}
 f(X, X) &= \sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} f(x_1, x_2) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} f(x_1, x_2) + \sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} f(x_2, x_1) \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left(\sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} f(x_1, x_2) + \sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} f(x_2, x_1) \right) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} (f(x_1, x_2) + f(x_2, x_1)) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{x_1 \in X} \sum_{x_2 \in X} (f(x_1, x_2) - f(x_1, x_2)) \\
 &= 0.
 \end{aligned}$$

Für den Beweis benötigen wir lediglich die Eigenschaft der Asymmetrie.

Flüsse zwischen Knotenmengen

Notationen

$$f(x, Y) = \sum_{y \in Y} f(x, y) \quad \text{für } Y \subseteq V$$

$$f(X, y) = \sum_{x \in X} f(x, y) \quad \text{für } X \subseteq V$$

$$f(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} f(x, y) \quad \text{für } X, Y \subseteq V$$

Eigenschaften von Flüssen zwischen Mengen

Falls f ein Fluss für Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ ist, dann gilt:

- $f(X, X) = 0 \quad \text{für } X \subseteq V$
- $f(X, Y) = -f(Y, X) \quad \text{für } X, Y \subseteq V$
- $f(X \cup Y, Z) = f(X, Z) + f(Y, Z) \quad \text{für } X, Y, Z \subseteq V : X \cap Y = \emptyset$
- $f(Z, X \cup Y) = f(Z, X) + f(Z, Y) \quad \text{für } X, Y, Z \subseteq V : X \cap Y = \emptyset$

Eingehender Fluss in der Senke

Wie groß ist der an der Senke eingehende Fluss?

Aufgrund der Flusserhaltung in alle Zwischenknoten ist zu erwarten, dass er dem austretenden Fluss an der Quelle entspricht:

$$f(s, V) = f(V, t)$$

Beweis:

$$\begin{aligned}
 f(s, V) &= f(V, V) - f(V - \{s\}, V) && | \text{ Eigenschaft 3} \\
 &= -f(V - \{s\}, V) && | \text{ Eigenschaft 1} \\
 &= f(V, V - \{s\}) && | \text{ Eigenschaft 2} \\
 &= f(V, t) + f(V, V - \{s, t\}) && | \text{ Eigenschaft 4} \\
 &= f(V, t). && | \text{ Flusserhaltung}
 \end{aligned}$$

Übersicht

1 Flussnetzwerke

2 Ford-Fulkerson-Methode

- Restnetzwerke
- Algorithmus
- Schnitte

3 Edmonds-Karp-Algorithmus

Restnetzwerke

„Netzwerk minus Fluss = Restnetzwerk“

Definition (Restnetzwerk G_f)

Sei Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ und Fluss f . Dann ist $G_f = (V, E_f, c_f)$ das **Restnetzwerk** (auch: Residualnetzwerk) zu G und f mit:

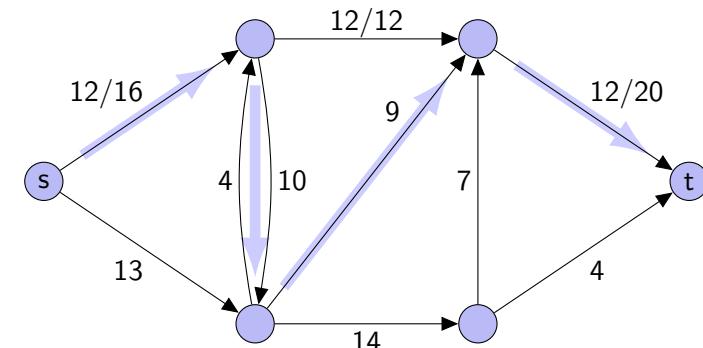
$$c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v),$$

und

$$E_f = \{(u, v) \in V \times V \mid c_f(u, v) > 0\},$$

$c_f(u, v)$ ist die **Restkapazität** von (u, v) in G zu Fluss f .

Ford-Fulkerson-Methode – Idee



1. Suche einen Pfad p von s nach t .
2. Setze den Fluss der Kanten in p um die kleinste Kapazität in p .
3. Suche einen Pfad p' von s nach t , aus Kanten mit freier Kapazität.
4. Ergänze den Fluss der Kanten in p' um die kleinste Restkapazität in p' .
5. Wiederhole 3. und 4. bis es keinen Pfad p mehr gibt.

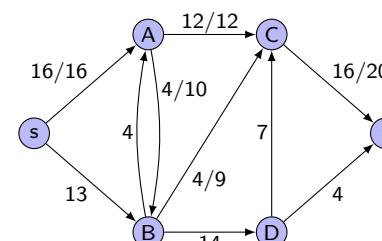
Restnetzwerk: Beispiel

Definition (Restnetzwerk G_f)

Sei Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ und Fluss f . Dann ist $G_f = (V, E_f, c_f)$ das **Restnetzwerk** (auch: Residualnetzwerk) zu G und f mit:

- $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$
- $E_f = \{(u, v) \in V \times V \mid c_f(u, v) > 0\}.$

$c_f(u, v)$ ist die **Restkapazität** von (u, v) in G zu Fluss f .



Flussnetzwerk G

Restnetzwerk G_f

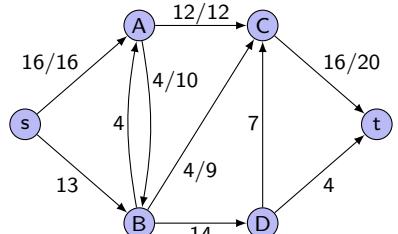
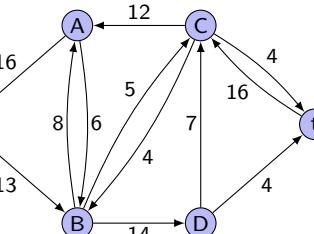
Restnetzwerk: Beispiel

Definition (Restnetzwerk G_f)

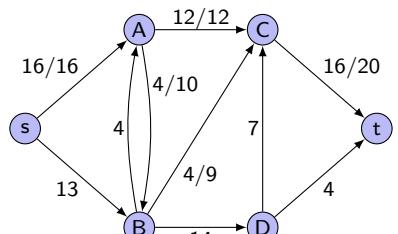
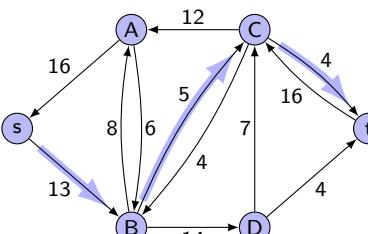
Sei Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ und Fluss f . Dann ist $G_f = (V, E_f, c_f)$ das **Restnetzwerk** (auch: Residualnetzwerk) zu G und f mit:

- $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$
- $E_f = \{(u, v) \in V \times V \mid c_f(u, v) > 0\}$.

$c_f(u, v)$ ist die **Restkapazität** von (u, v) in G zu Fluss f .

Flussnetzwerk G Restnetzwerk G_f

Augmentierende Pfade

Flussnetzwerk G Restnetzwerk G_f

- Ein s - t -Pfad p in Restnetzwerk G_f heißt **augmentierender Pfad** (vergrößernder Pfad).
- $c_f(p) = \min\{c_f(u, v) \mid (u, v) \in p\}$ heißt **Restkapazität von p** .

Der Pfad im obigen Beispiel hat die Restkapazität 4.

Restnetzwerk: Beispiel

Definition (Restnetzwerk G_f)

Sei Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ und Fluss f . Dann ist $G_f = (V, E_f, c_f)$ das **Restnetzwerk** (auch: Residualnetzwerk) zu G und f mit:

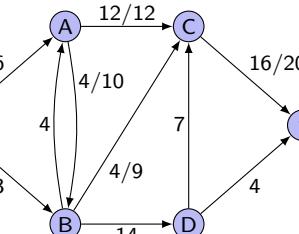
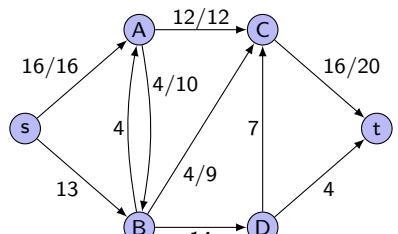
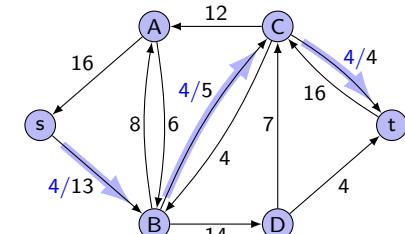
- $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$
- $E_f = \{(u, v) \in V \times V \mid c_f(u, v) > 0\}$.

$c_f(u, v)$ ist die **Restkapazität** von (u, v) in G zu Fluss f .

Kanten im Restnetzwerk

- Falls $f(u, v) < c(u, v)$, dann folgt $c_f(u, v) > 0$ und $(u, v) \in E_f$
 - Falls $f(u, v) > 0$, dann $f(v, u) < 0$, und damit $c_f(v, u) > 0$ und $(v, u) \in E_f$
 - Falls weder $(u, v) \notin E$ noch $(v, u) \notin E$, dann $c_f(u, v) = c_f(v, u) = 0$
- Also $|E_f| \leq 2 \cdot |E|$.

Augmentierende Pfade

Flussnetzwerk G Restnetzwerk G_f

Sei G ein Flussnetzwerk, f ein Fluss in G , p ein augmentierender Pfad in G_f . Sei:

$$f_p(u, v) = \begin{cases} c_f(p) & \text{falls } (u, v) \text{ auf } p \\ -c_f(p) & \text{falls } (v, u) \text{ auf } p \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann ist f_p ein **Fluss in Restnetzwerk G_f** mit dem Wert $|f_p| = c_f(p) > 0$.

Ford-Fulkerson-Theorem

Idee: ergänze ein Fluss f in G um den Fluss f_p im Restnetzwerk G_f .

Sei $f_1, f_2 : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ zwei Flüsse. Die **Flusssumme** $f_1 + f_2$ ist definiert durch: $(f_1 + f_2)(u, v) = f_1(u, v) + f_2(u, v)$.

Theorem (Ford-Fulkerson)

Sei $G = (V, E, c)$ ein Flussnetzwerk und f ein Fluss in G , sowie f' ein Fluss in G_f .

Dann gilt: $f + f'$ ist ein Fluss in G .

Beweis.

Wir zeigen, dass $f + f'$ beschränkt, asymmetrisch und flusserhaltend ist (s. nächste Folie). \square

Die Ford-Fulkerson-Methode

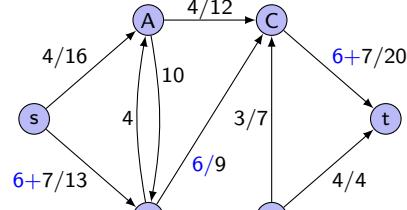
Algorithmus

Initialisiere Fluss f zu 0

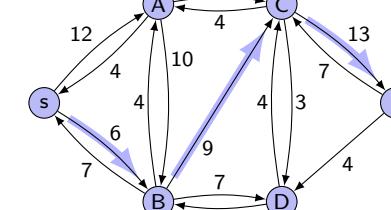
while es gibt einen augmentierenden Pfad p

do augmentiere f entlang p // $f := f + f_p$

return f



Flussnetzwerk G



Restnetzwerk G_f

1. Asymmetrie:

$$\begin{aligned} (f + f')(u, v) &= f(u, v) + f'(u, v) \\ &= -f(v, u) - f'(v, u) \\ &= -(f(v, u) + f'(v, u)) \\ &= -(f + f')(v, u) \end{aligned}$$

2. Flusserhaltung:

$$(f + f')(u, V) = f(u, V) + f'(u, V) = 0 \quad | \forall u \in V - \{s, t\}$$

3. Beschränkung:

$$\begin{aligned} (f + f')(u, v) &= f(u, v) + f'(u, v) \\ &\leq f(u, v) + c_f(u, v) \\ &= f(u, v) + (c(u, v) - f(u, v)) \\ &= c(u, v). \end{aligned}$$

Implementierung Ford-Fulkerson-Methode

```

1 int[n,n] maxFlow(List adjLst[n], int n, int s, int t) {
2   int flow[n,n] = 0, path[];
3   int cfp; // Restkapazität des Pfades
4
5   while (true) {
6     // Finde augmentierenden Pfad und dessen Restkapazität
7     (path, cfp) = augmentPfad(adjLst, flow, s, t);
8     if (cfp == 0) { // kein Pfad gefunden
9       return flow;
10    }
11
12    // addiere Restkapazität entlang des Pfades zum Fluss
13    for (int i = 1; i < pfad.length; i++) {
14      int u = pfad[i-1], v = pfad[i];
15      f[u,v] = f[u,v] + cfp;
16      f[v,u] = -f[u,v];
17    }
18  }
19 }
```

Laufzeit der Ford-Fulkerson-Methode

Ein Flussproblem ist **integral**, wenn alle Kapazitäten ganzzahlig sind.

Theorem

Sei f^* der durch die Ford-Fulkerson-Methode bestimmte Fluss zu einem integralen Flussproblem, so benötigt die Methode $|f^*|$ Iterationen und es ergibt sich eine Laufzeit von $O(E \cdot |f^*|)$.

Beweis.

In jeder Iteration wird der Wert des Flusses um $c_f(p) \geq 1$ erhöht.

Er ist anfangs 0 und am Ende f^* . □

Korollar

Bei **rationalen** Kapazitäten terminiert die Ford-Fulkerson-Methode.

Brüche können durch Multiplikation aufgehoben werden.

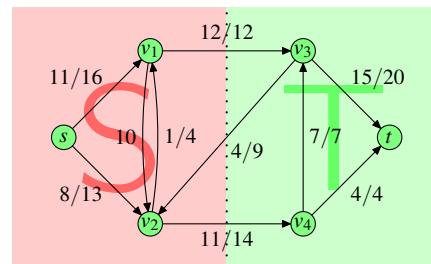
- Für ein **integrales** Flussproblem bestimmt die Ford-Fulkerson-Methode einen Fluss f , sodass jedes $f(u, v)$ **ganzzahlig** ist.

Schnitte in Flussnetzwerken

Definition

Ein **Schnitt** (S, T) in einem Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ ist eine Partition $S \cup T = V$, $S \cap T = \emptyset$ mit $s \in S$ und $t \in T$.

- Wenn f ein Fluss in G ist, dann ist $f(S, T)$ der **Fluss über** (S, T) .
- Die **Kapazität** von (S, T) ist $c(S, T)$.
- Ein **minimaler Schnitt** ist ein Schnitt mit minimaler Kapazität.



Korrektheit Ford-Fulkerson Methode

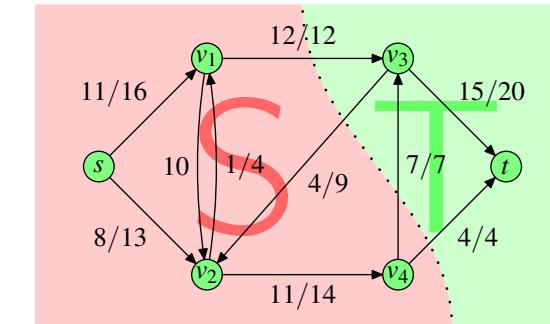
Die Ford-Fulkerson Methode erweitert sukzessive den Fluss in G um augmentierende Pfade im Restnetzwerk G_f bis es keine solche Pfade mehr gibt.

Ist das korrekt?

Wir werden zeigen, dass ein Fluss in G genau dann **maximal** ist, wenn sein Restnetzwerk **keine augmentierende Pfade** enthält.

Dazu benutzen wir **Schnitte**.

Schnitte in Netzwerken



S	$\{s, v_1, v_2\}$	$\{s\}$	$\{s, v_1, v_2, v_4\}$
T	$\{t, v_3, v_4\}$	$\{t, v_1, v_2, v_3, v_4\}$	$\{t, v_3\}$
Fluss	19	19	19
Kapazität	26	29	23

- Für den Fluss über einen Schnitt gilt: $f(S, T) = |f| \leq c(S, T)$.

Max-flow Min-cut Theorem

Theorem (Max-flow Min-cut)

Sei f ein Fluss im Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$, dann sind äquivalent:

1. f ist ein maximaler Fluss.
2. In G_f gibt es keinen augmentierenden Pfad.
3. $|f| = c(S, T)$ für einen Schnitt (S, T) , d. h. (S, T) ist minimal.

Folgerungen

1. Die Kapazität eines minimalen Schnittes ist gleich dem Wert eines maximalen Flusses.
2. Falls die Ford-Fulkerson-Methode terminiert, berechnet sie einen maximalen Fluss.

Max-flow Min-cut Theorem

Theorem (Max-flow Min-cut)

Sei f ein Fluss im Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$, dann sind äquivalent:

1. f ist ein maximaler Fluss.
2. In G_f gibt es keinen augmentierenden Pfad.
3. $|f| = c(S, T)$ für einen Schnitt (S, T) , d. h. (S, T) ist minimal.

2. \Rightarrow 3.

Es gibt keinen s - t -Pfad (d.h. augmentierenden Pfad) in G_f .

Sei $S := \{v \in V \mid \exists s$ - v -Pfad in $G_f\}$ und $T := V - S$, dann gilt:

1. $\forall u \in S, v \in T$ gilt: $c_f(u, v) = 0 \Rightarrow f(u, v) = c(u, v)$.
 2. (S, T) ist ein Schnitt und somit gilt $f(S, T) = |f|$.
- $\Rightarrow c(S, T) = f(S, T) = |f|$.



Max-flow Min-cut Theorem

Theorem (Max-flow Min-cut)

Sei f ein Fluss im Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$, dann sind äquivalent:

1. f ist ein maximaler Fluss.
2. In G_f gibt es keinen augmentierenden Pfad.
3. $|f| = c(S, T)$ für einen Schnitt (S, T) , d. h. (S, T) ist minimal.

1. \Rightarrow 2. (Widerspruchsbeweis).

Sei f ein maximaler Fluss in G und p einen augmentierenden Pfad in G_f .

- $\Rightarrow f + f_p$ ist ein Fluss in G mit $|f + f_p| > |f|$.
- \Rightarrow **Widerspruch!** Denn f ist ein maximaler Fluss.



Max-flow Min-cut Theorem

Theorem (Max-flow Min-cut)

Sei f ein Fluss im Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$, dann sind äquivalent:

1. f ist ein maximaler Fluss.
2. In G_f gibt es keinen augmentierenden Pfad.
3. $|f| = c(S, T)$ für einen Schnitt (S, T) , d. h. (S, T) ist minimal.

3. \Rightarrow 1.

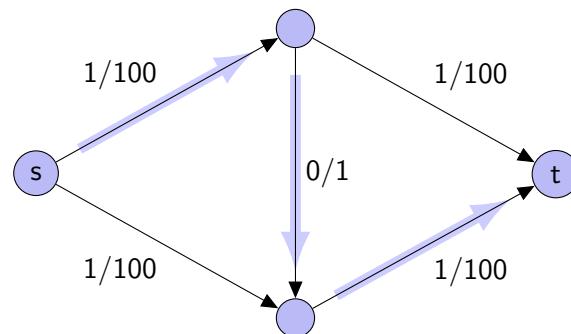
Sei f' ein beliebiger Fluss in G dann gilt:

$$|f'| = f'(S, T) = \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f'(u, v) \leq \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) = c(S, T)$$

Da $|f| = c(S, T)$ und $\forall f' : |f'| \leq c(S, T)$, folgt f ist maximal.



Laufzeit der Ford-Fulkerson-Methode



Die Worst-Case-Laufzeit ist abhängig vom Wert eines maximalen Flusses, da der Wert des Flusses im schlimmsten Fall sich jeweils nur um eine Einheit erhöht.

Übersicht

1 Flussnetzwerke

2 Ford-Fulkerson-Methode

- Restnetzwerke
- Algorithmus
- Schnitte

3 Edmonds-Karp-Algorithmus

Edmonds-Karp-Algorithmus

Edmonds-Karp-Algorithmus

Eine Implementierung der Ford-Fulkerson-Methode, die zur Bestimmung augmentierender Pfade eine **Breitensuche** nutzt. Laufzeit: $O(V \cdot E^2)$.
 1ex] Sie erweitert stets den Fluss entlang kürzester Pfade.

Lemma

Im Edmonds-Karp-Algorithmus steigt für alle Knoten $v \in V - \{s, t\}$ der Abstand (d.h. Anzahl der Kanten) des kürzesten Pfaes von s nach v im Restnetzwerk G_f **monoton** mit jeder Flusserweiterung.

Theorem

Die Gesamtzahl der Flusserweiterungen im Edmonds-Karp-Algorithmus für das Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ ist in $O(V \cdot E)$.