

12 Union Find

Union-Find Datenstruktur \mathcal{P} : Verwaltet die **Partitionierung** einer Menge M , d.h., die Zerlegung der Menge in disjunkte Teilmengen.

Operationen

- ▶ \mathcal{P} . **makeSet**(x): Fügt ein Element x zu M hinzu und fügt es in eine Teilmenge $\{x\}$ ein, d.h., erzeugt eine Teilmenge, die nur dieses Element enthält. Gibt ein **handle** für x zurück.
- ▶ \mathcal{P} . **find**(x): Input: **handle** für ein Element x ; findet die Menge, die x enthält; gibt einen Repräsentanten/Identifizier für die Menge zurück.
- ▶ \mathcal{P} . **union**(x, y): Input: **handles** von zwei Elementen x und y , die momentan in Mengen S_x bzw. S_y sind. Die Funktion ersetzt S_x und S_y durch $S_x \cup S_y$ und gibt den Repräsentanten/Identifizier der neuen Menge zurück.

12 Union Find

Union-Find Datenstruktur \mathcal{P} : Verwaltet die **Partitionierung** einer Menge M , d.h., die Zerlegung der Menge in disjunkte Teilmengen.

Operationen

- ▶ **\mathcal{P} . makeset(x):** Fügt ein Element x zu M hinzu und fügt es in eine Teilmenge $\{x\}$ ein, d.h., erzeugt eine Teilmenge, die nur dieses Element enthält. Gibt ein **handle** für x zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . find(x):** Input: **handle** für ein Element x ; findet die Menge, die x enthält; gibt einen Repräsentanten/Identifizier für die Menge zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . union(x, y):** Input: **handles** von zwei Elementen x und y , die momentan in Mengen S_x bzw. S_y sind. Die Funktion ersetzt S_x und S_y durch $S_x \cup S_y$ und gibt den Repräsentanten/Identifizier der neuen Menge zurück.

12 Union Find

Union-Find Datenstruktur \mathcal{P} : Verwaltet die **Partitionierung** einer Menge M , d.h., die Zerlegung der Menge in disjunkte Teilmengen.

Operationen

- ▶ **\mathcal{P} . makeset(x):** Fügt ein Element x zu M hinzu und fügt es in eine Teilmenge $\{x\}$ ein, d.h., erzeugt eine Teilmenge, die nur dieses Element enthält. Gibt ein **handle** für x zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . find(x):** Input: **handle** für ein Element x ; findet die Menge, die x enthält; gibt einen Repräsentanten/Identifizier für die Menge zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . union(x, y):** Input: **handles** von zwei Elementen x und y , die momentan in Mengen S_x bzw. S_y sind. Die Funktion ersetzt S_x und S_y durch $S_x \cup S_y$ und gibt den Repräsentanten/Identifizier der neuen Menge zurück.

12 Union Find

Union-Find Datenstruktur \mathcal{P} : Verwaltet die **Partitionierung** einer Menge M , d.h., die Zerlegung der Menge in disjunkte Teilmengen.

Operationen

- ▶ **\mathcal{P} . makeset(x):** Fügt ein Element x zu M hinzu und fügt es in eine Teilmenge $\{x\}$ ein, d.h., erzeugt eine Teilmenge, die nur dieses Element enthält. Gibt ein **handle** für x zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . find(x):** Input: **handle** für ein Element x ; findet die Menge, die x enthält; gibt einen Repräsentanten/Identifizier für die Menge zurück.
- ▶ **\mathcal{P} . union(x, y):** Input: **handles** von zwei Elementen x und y , die momentan in Mengen S_x bzw. S_y sind. Die Funktion ersetzt S_x und S_y durch $S_x \cup S_y$ und gibt den Repräsentanten/Identifizier der neuen Menge zurück.

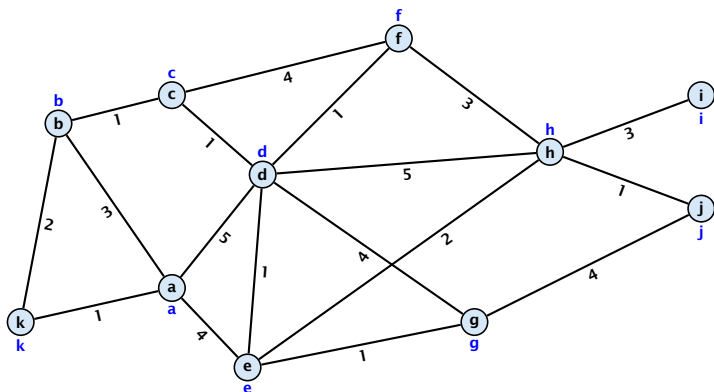
Anwendungen:

- ▶ Verwaltung von Zusammenhangskomponenten in einem **dynamischen** Graphen, der sich durch das Einfügen von Knoten und Kanten ändert.
- ▶ **Kruskals Algorithmus** für minimale Spannbäume.

Anwendungen:

- ▶ Verwaltung von Zusammenhangskomponenten in einem **dynamischen** Graphen, der sich durch das Einfügen von Knoten und Kanten ändert.
- ▶ **Kruskals Algorithmus** für minimale Spannbäume.

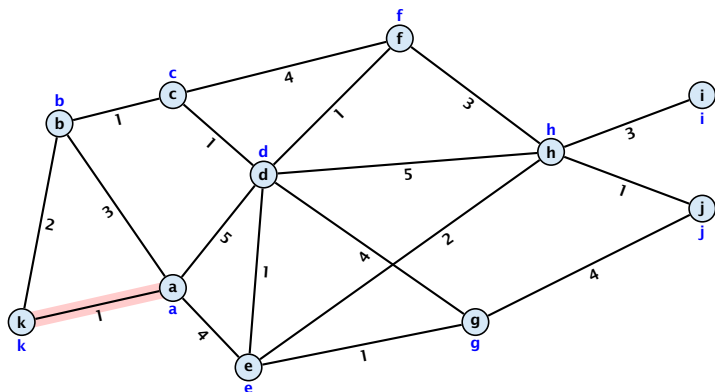
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

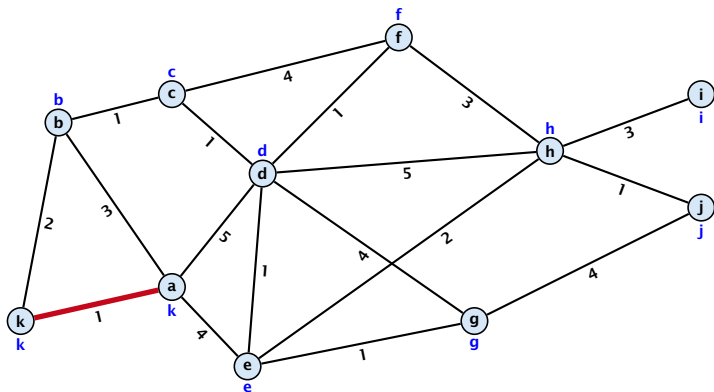
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

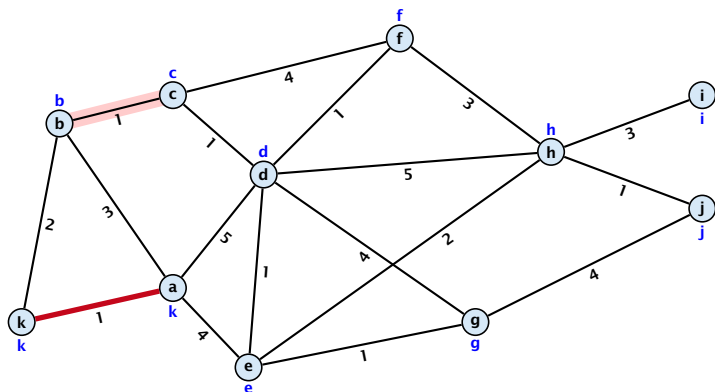
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

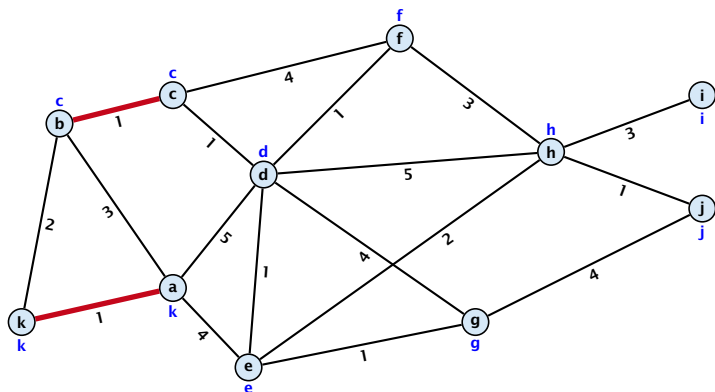
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

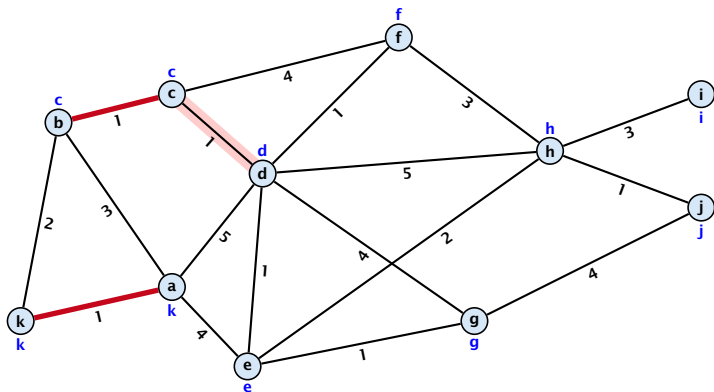
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

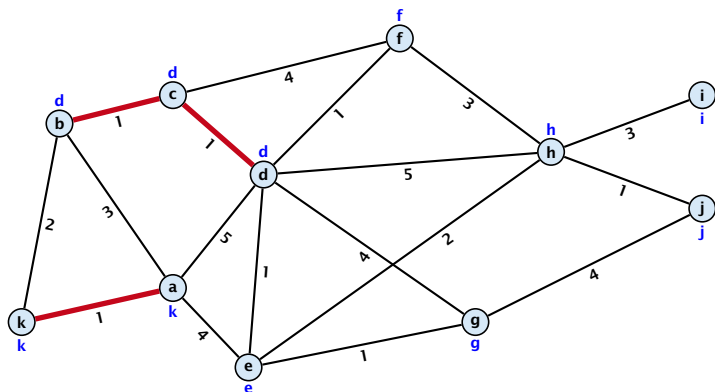
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

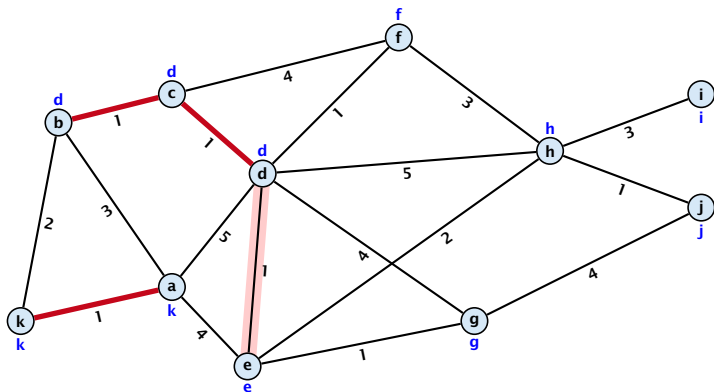
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

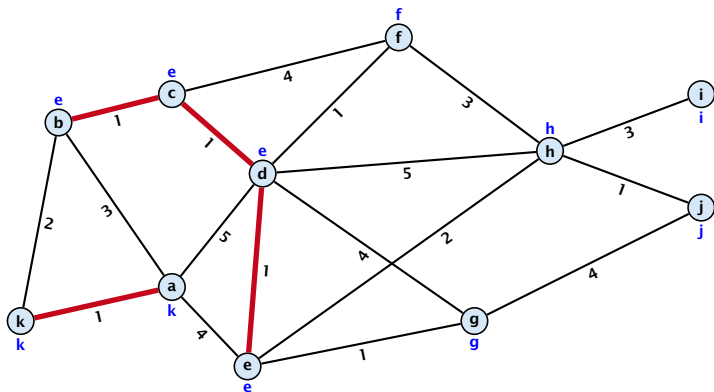
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

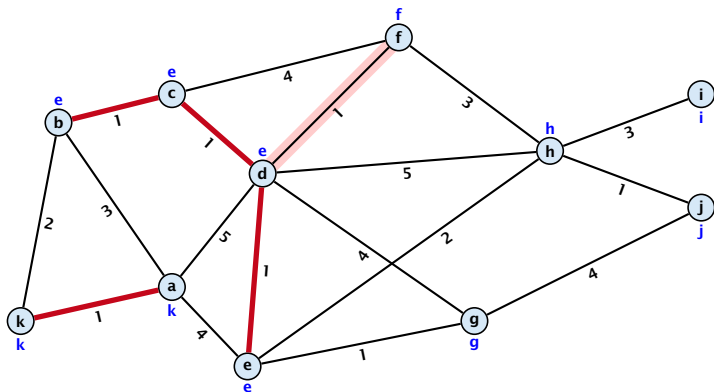
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

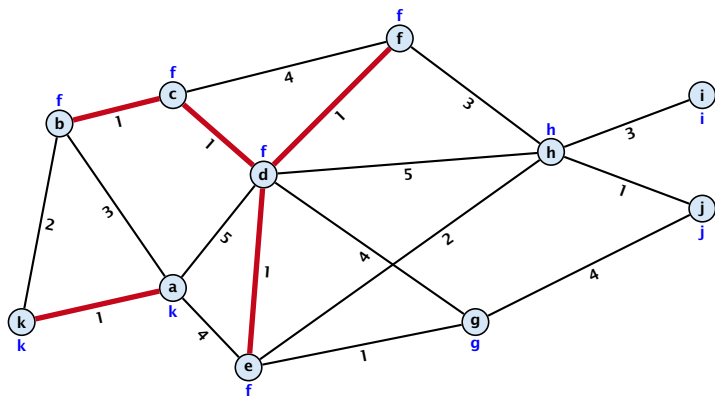
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

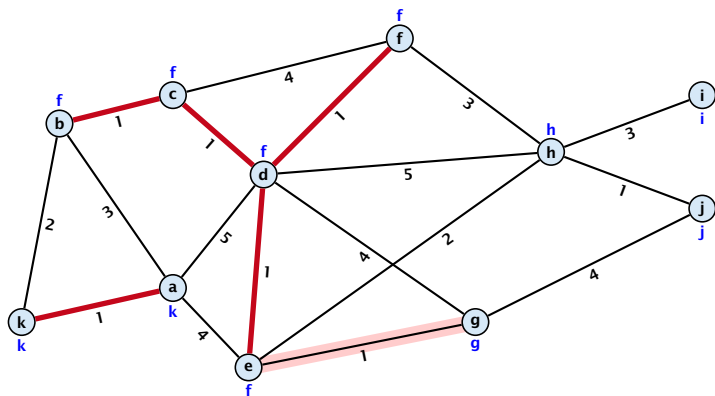
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

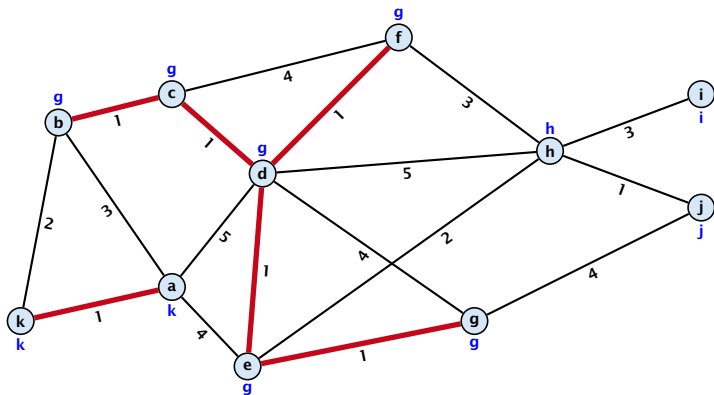
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

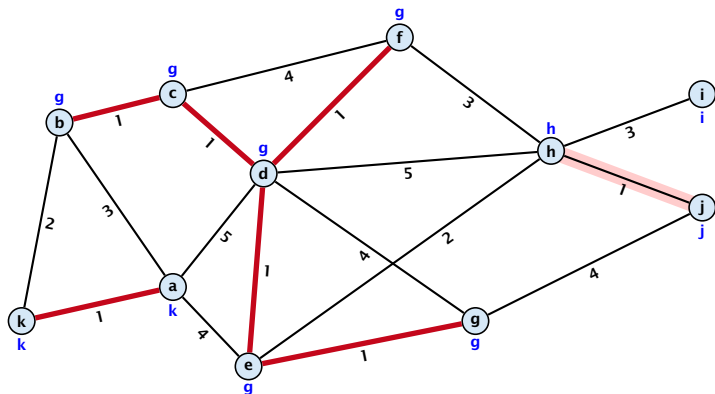
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

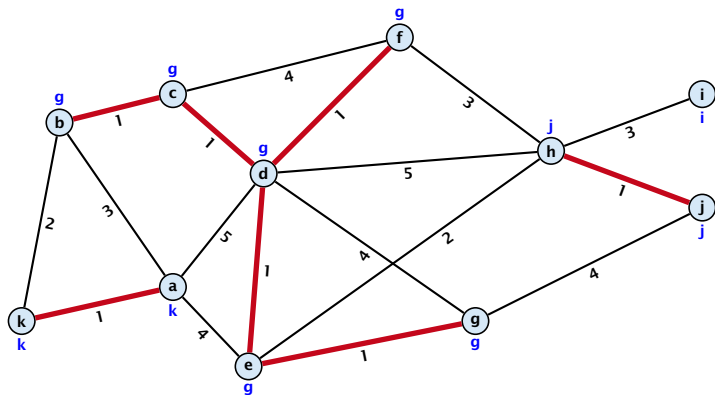
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

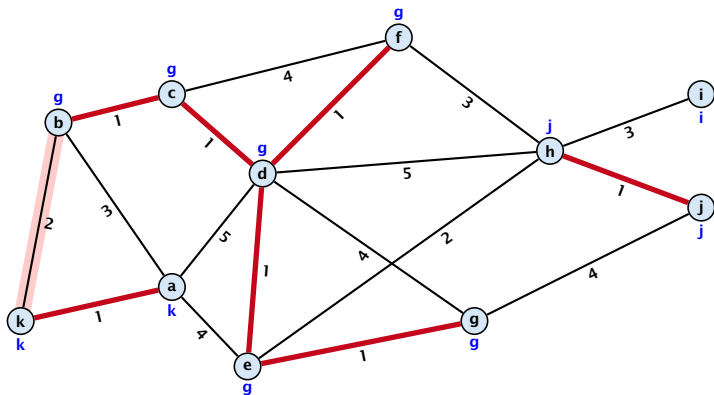
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

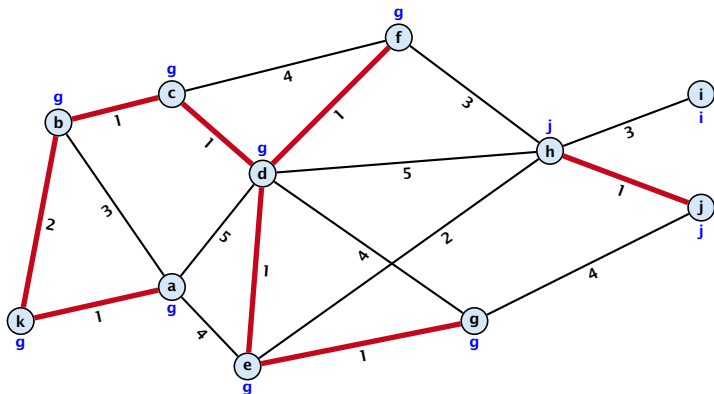
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

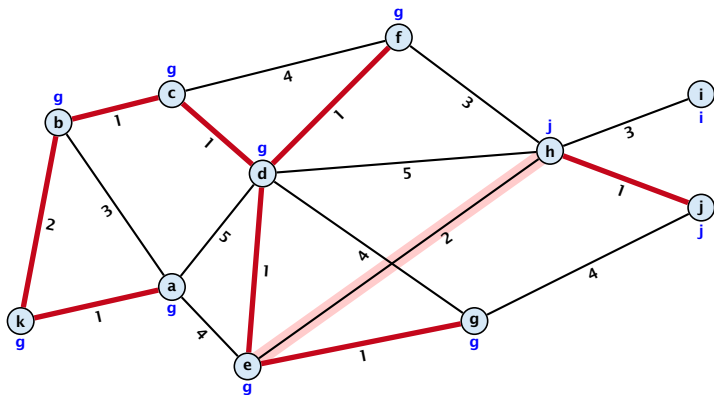
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

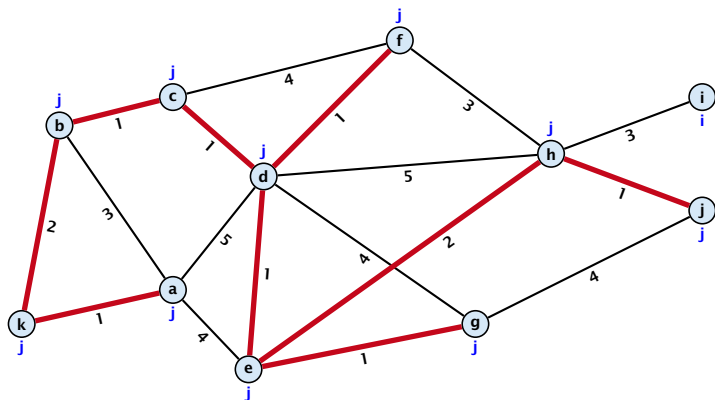
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

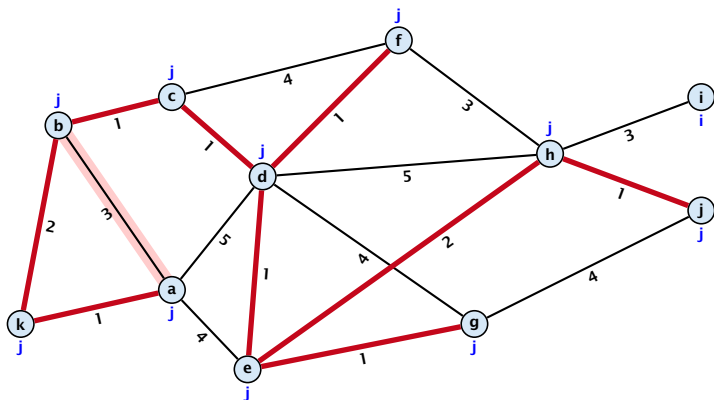
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

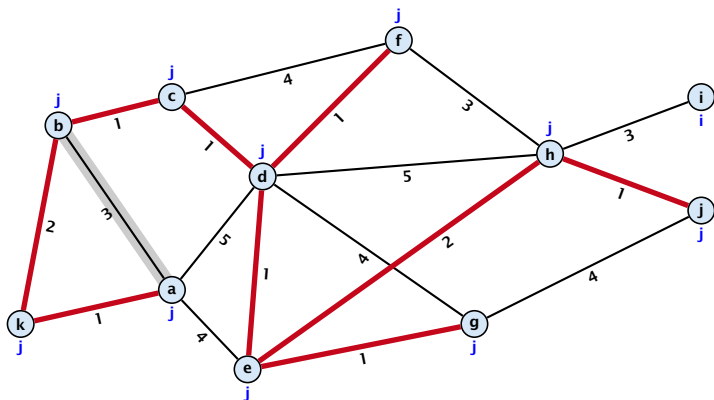
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

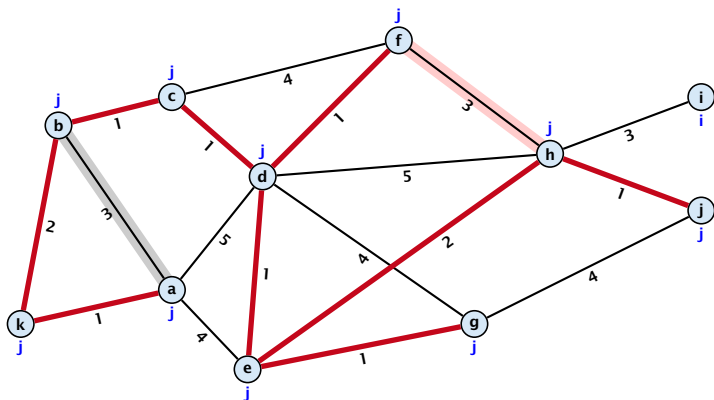
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

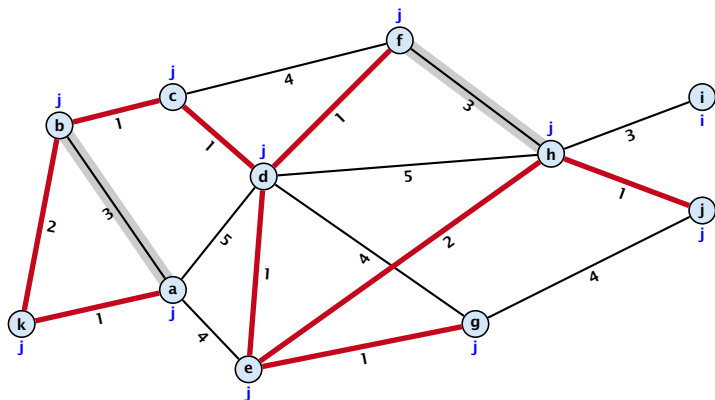
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

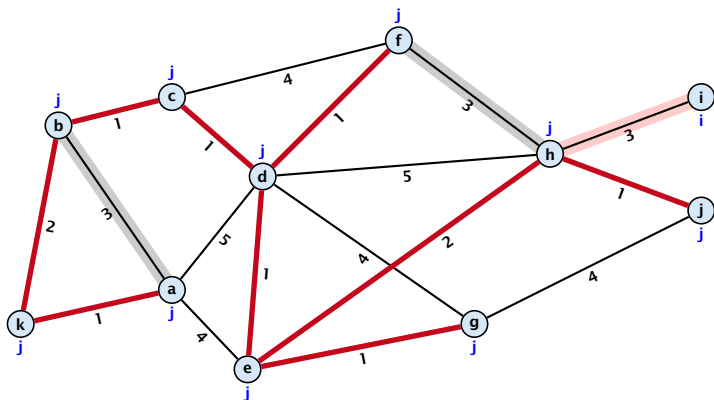
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

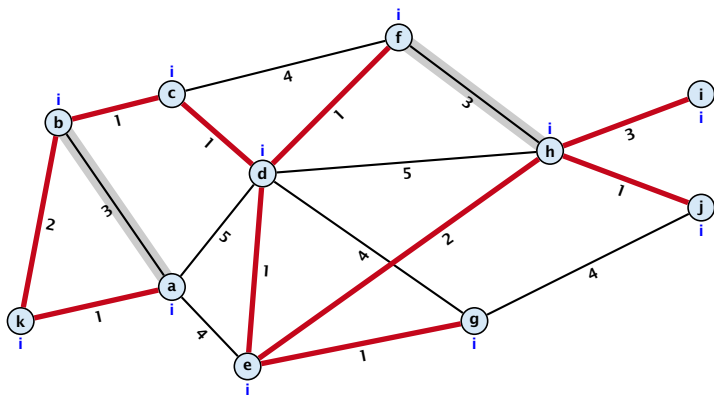
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

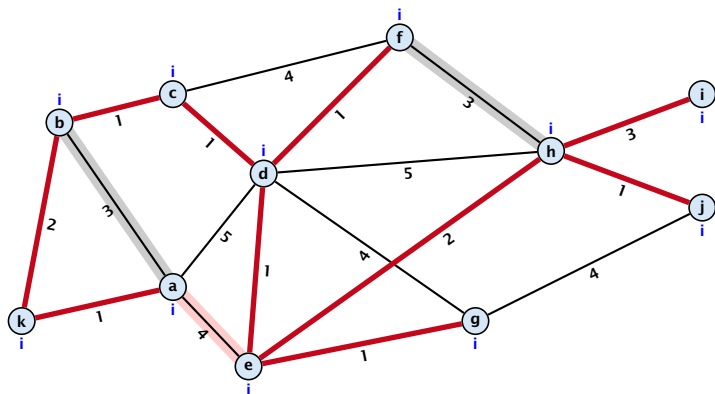
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

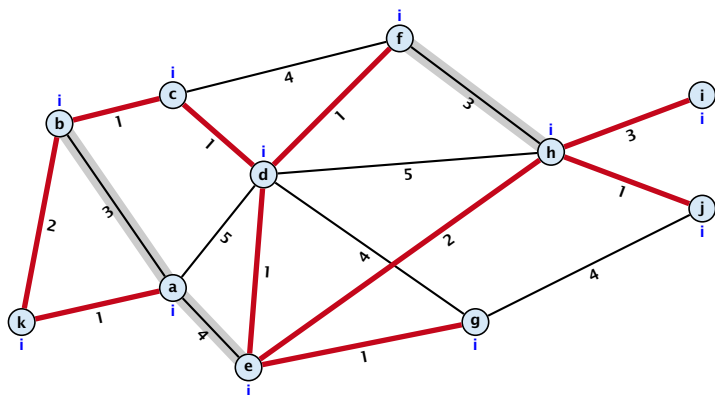
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

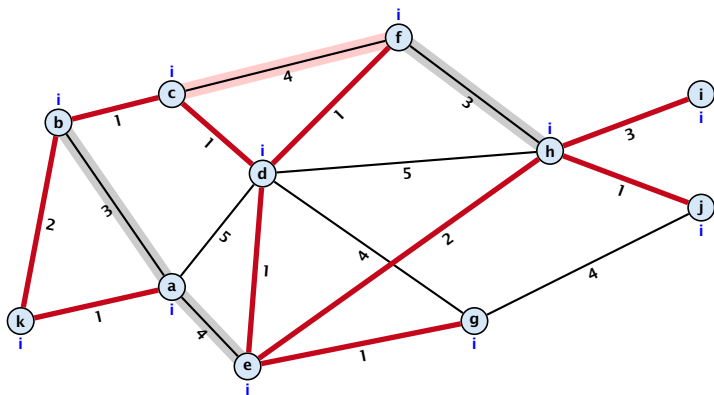
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

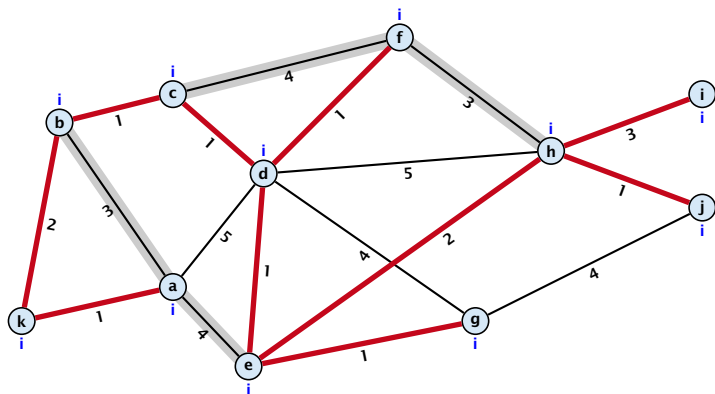
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

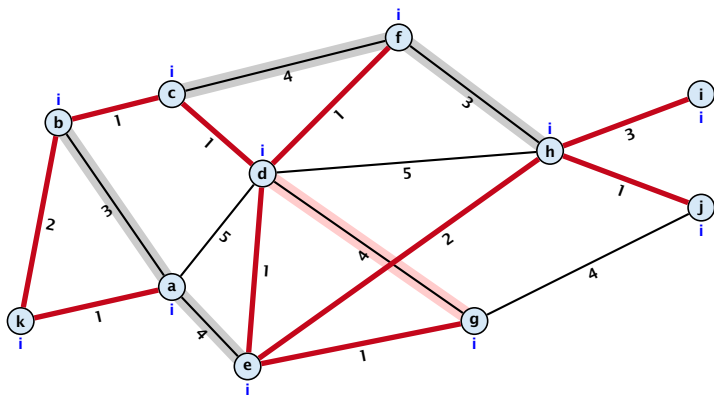
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

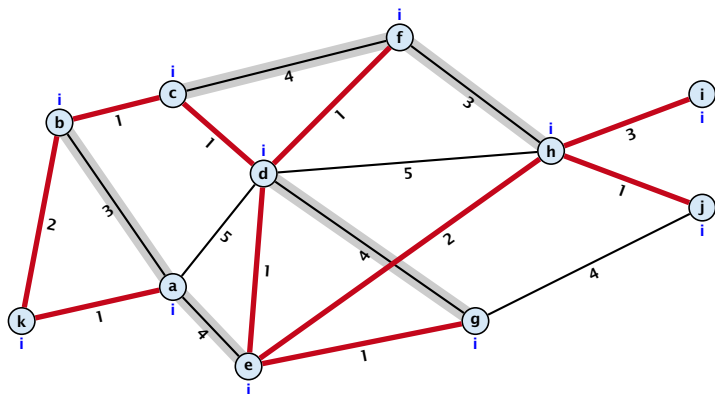
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

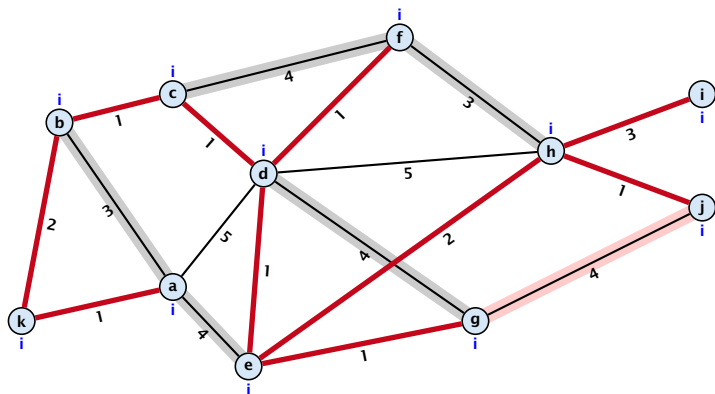
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

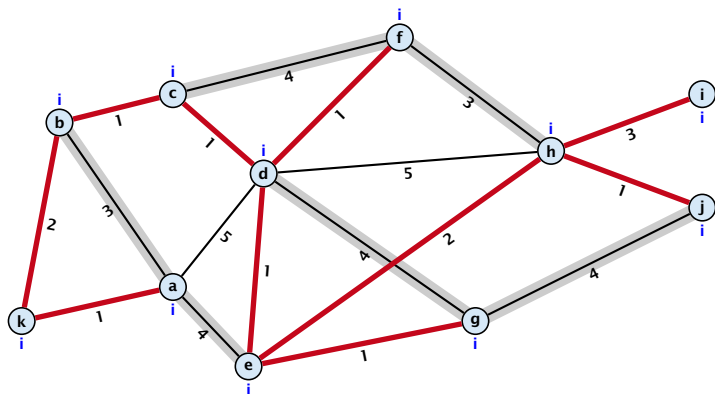
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

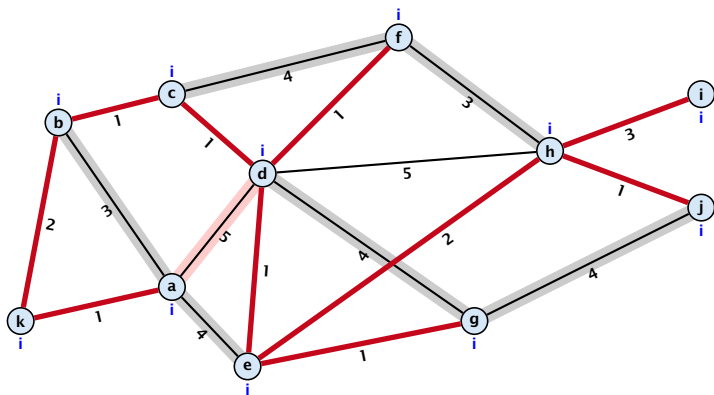
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

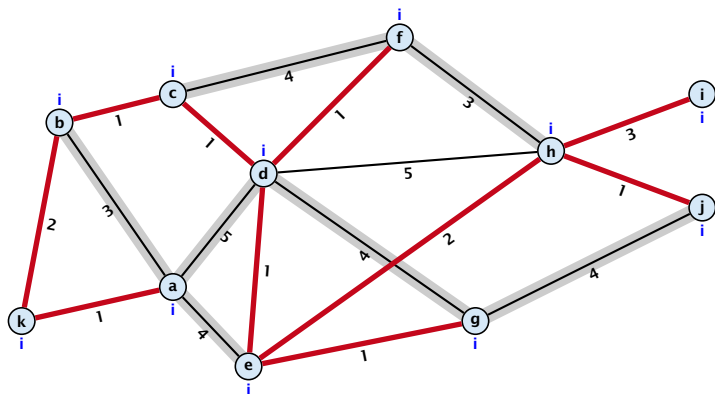
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

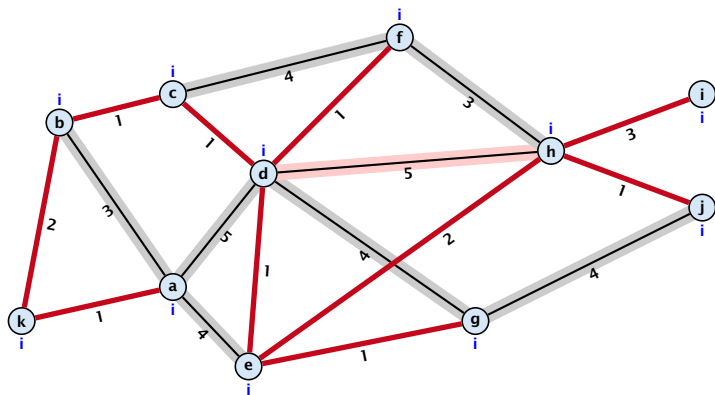
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

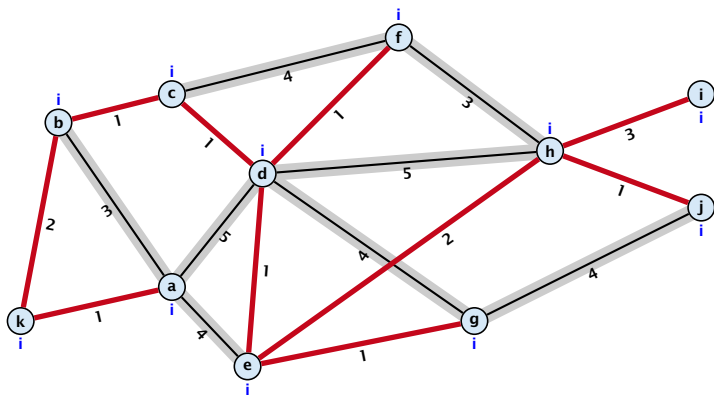
Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

Minimaler Spannbaum (Kruskal)



Beobachtung:

Sei E' eine Teilmenge der Kanten, und sei $e \in E'$ eine billigste Kante aus E' , die mit Kanten aus $E - E'$ keinen Kreis schließt. Dann gibt es einen MST, der e enthält.

12 Union Find

```
1 Input: ungerichteter Graph  $G=(V,E,w)$ 
2 Output: Minimaler Spannbaum von  $G$ 
3
4 Kruskal( $G$ )
5    $A = \emptyset$ 
6   foreach  $v \in V$ 
7      $v \rightarrow \text{set} = P \rightarrow \text{makeset}(v \rightarrow \text{label})$ 
8   sort edges according to weight  $w$ ;
9   foreach  $(u,v) \in E$  in increasing order
10    if ( $P \rightarrow \text{find}(u \rightarrow \text{set}) \neq P \rightarrow \text{find}(v \rightarrow \text{set})$ )
11       $A = A \cup \{(u,v)\}$ 
12     $P \rightarrow \text{union}(u \rightarrow \text{set}, v \rightarrow \text{set});$ 
```

Listenimplementierung

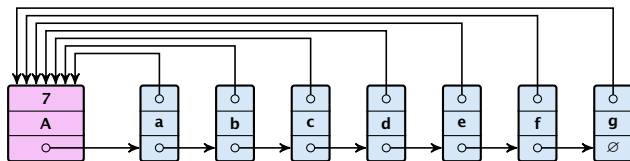
- ▶ Die Elemente einer Teilmenge werden in verketteter Liste gespeichert; jedes Listenelement bekommt zusätzlich einen Zeiger auf den Listenkopf.
- ▶ Der Listenkopf enthält den Identifier der Teilmenge und die Größe der Menge



- ▶ `makeset(x)` kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.
- ▶ `find(x)` kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.

Listenimplementierung

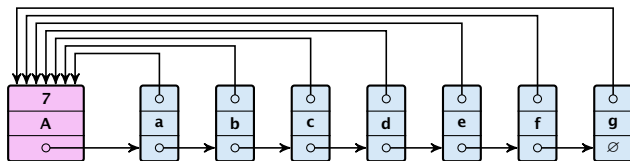
- ▶ Die Elemente einer Teilmenge werden in verketteter Liste gespeichert; jedes Listenelement bekommt zusätzlich einen Zeiger auf den Listenkopf.
- ▶ Der Listenkopf enthält den Identifier der Teilmenge und die Größe der Menge



- ▶ `makeset(x)` kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.
- ▶ `find(x)` kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.

Listenimplementierung

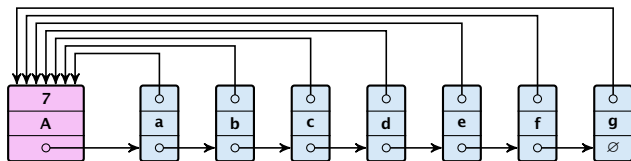
- ▶ Die Elemente einer Teilmenge werden in verketteter Liste gespeichert; jedes Listenelement bekommt zusätzlich einen Zeiger auf den Listenkopf.
- ▶ Der Listenkopf enthält den Identifier der Teilmenge und die Größe der Menge



- ▶ $\text{makeset}(x)$ kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.
- ▶ $\text{find}(x)$ kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.

Listenimplementierung

- ▶ Die Elemente einer Teilmenge werden in verketteter Liste gespeichert; jedes Listenelement bekommt zusätzlich einen Zeiger auf den Listenkopf.
- ▶ Der Listenkopf enthält den Identifier der Teilmenge und die Größe der Menge



- ▶ $\text{makeset}(x)$ kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.
- ▶ $\text{find}(x)$ kann in konstanter Zeit ausgeführt werden.

Listenimplementierung

union(x , y)

- ▶ Bestimme Mengen S_x und S_y .
- ▶ Durchlaufe die kleinere Liste (z.B. S_y), und ändere alle Zeiger auf den Listenkopf, so dass sie auf den Listenkopf von S_x zeigen.
- ▶ Füge S_y am Anfang von S_x ein.
- ▶ Passe den Größeneintrag von S_x an.
- ▶ Laufzeit: $\min\{|S_x|, |S_y|\}$.

Listenimplementierung

union(x , y)

- ▶ Bestimme Mengen S_x und S_y .
- ▶ Durchlaufe die kleinere Liste (z.B. S_y), und ändere alle Zeiger auf den Listenkopf, so dass sie auf den Listenkopf von S_x zeigen.
- ▶ Füge S_y am Anfang von S_x ein.
- ▶ Passe den Größeneintrag von S_x an.
- ▶ Laufzeit: $\min\{|S_x|, |S_y|\}$.

Listenimplementierung

union(x, y)

- ▶ Bestimme Mengen S_x und S_y .
- ▶ Durchlaufe die kleinere Liste (z.B. S_y), und ändere alle Zeiger auf den Listenkopf, so dass sie auf den Listenkopf von S_x zeigen.
- ▶ Füge S_y am Anfang von S_x ein.
- ▶ Passe den Größeneintrag von S_x an.
- ▶ Laufzeit: $\min\{|S_x|, |S_y|\}$.

Listenimplementierung

union(x, y)

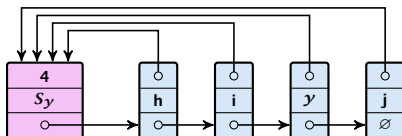
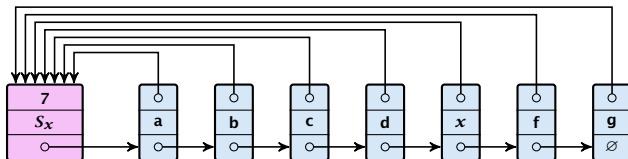
- ▶ Bestimme Mengen S_x und S_y .
- ▶ Durchlaufe die kleinere Liste (z.B. S_y), und ändere alle Zeiger auf den Listenkopf, so dass sie auf den Listenkopf von S_x zeigen.
- ▶ Füge S_y am Anfang von S_x ein.
- ▶ Passe den Größeneintrag von S_x an.
- ▶ Laufzeit: $\min\{|S_x|, |S_y|\}$.

Listenimplementierung

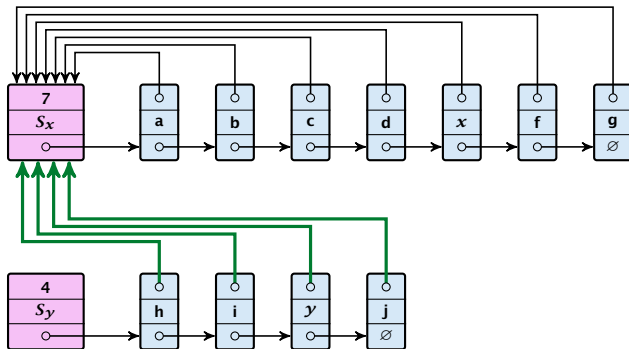
union(x , y)

- ▶ Bestimme Mengen S_x und S_y .
- ▶ Durchlaufe die kleinere Liste (z.B. S_y), und ändere alle Zeiger auf den Listenkopf, so dass sie auf den Listenkopf von S_x zeigen.
- ▶ Füge S_y am Anfang von S_x ein.
- ▶ Passe den Größeneintrag von S_x an.
- ▶ Laufzeit: $\min\{|S_x|, |S_y|\}$.

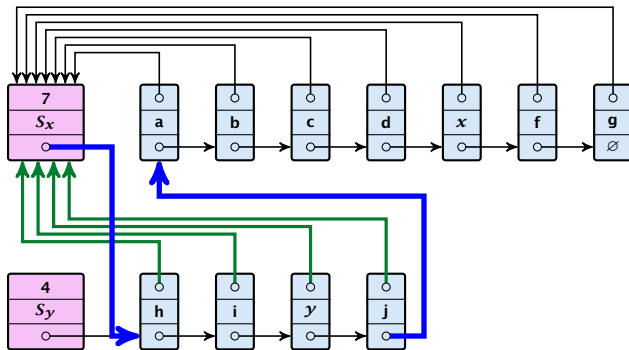
List Implementation



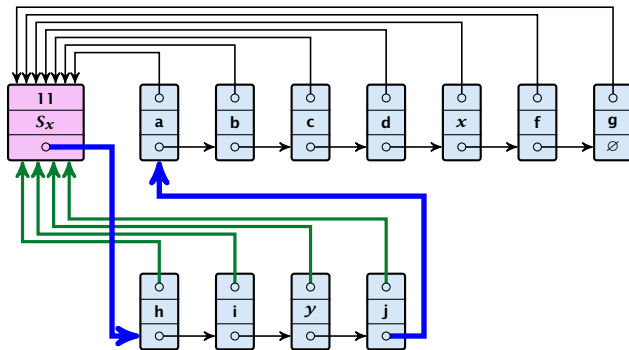
List Implementation



List Implementation



List Implementation



List Implementation

Laufzeiten:

- ▶ $\text{find}(x)$: konstant
- ▶ $\text{makeset}(x)$: konstant
- ▶ $\text{union}(x, y)$: $\mathcal{O}(n)$.

Baumimplementierung

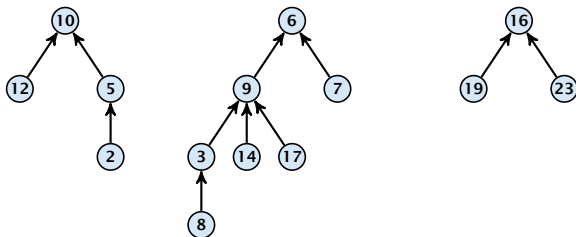
- ▶ Verwalte Elemente in Bäumen.
- ▶ Die Wurzel eines Baumes dient als Identifier der jeweiligen Teilmenge.
- ▶ Nur Elternzeiger existieren; wir können den Baum nicht traversieren und z.B. all Elemente einer Teilmenge ausgeben.
- ▶ Beispiel:



Mengensystem $\{2, 5, 10, 12\}$, $\{3, 6, 7, 8, 9, 14, 17\}$, $\{16, 19, 23\}$.

Baumimplementierung

- ▶ Verwalte Elemente in Bäumen.
- ▶ Die Wurzel eines Baumes dient als Identifier der jeweiligen Teilmenge.
- ▶ Nur Elternzeiger existieren; wir können den Baum nicht traversieren und z.B. all Elemente einer Teilmenge ausgeben.
- ▶ Beispiel:



Mengensystem $\{2, 5, 10, 12\}$, $\{3, 6, 7, 8, 9, 14, 17\}$,
 $\{16, 19, 23\}$.

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzelmem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzeltem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzeltem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

- ▶ Handle ist Zeiger auf Element;
- ▶ Starte beim Element x im Baum. Gehe aufwärts bis zu Wurzel.
- ▶ Gib Identifier der Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(\text{level}(x))$, wobei $\text{level}(x)$ die Distanz von x zu Wurzel des jeweiligen Baumes ist. **nicht konstant.**

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzeltem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

- ▶ Handle ist Zeiger auf Element;
- ▶ Starte beim Element x im Baum. Gehe aufwärts bis zu Wurzel.
- ▶ Gib Identifier der Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(\text{level}(x))$, wobei $\text{level}(x)$ die Distanz von x zu Wurzel des jeweiligen Baumes ist. **nicht konstant.**

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzeltem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

- ▶ Handle ist Zeiger auf Element;
- ▶ Starte beim Element x im Baum. Gehe aufwärts bis zu Wurzel.
- ▶ Gib Identifier der Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(\text{level}(x))$, wobei $\text{level}(x)$ die Distanz von x zu Wurzel des jeweiligen Baumes ist. **nicht konstant.**

Baumimplementierung

makeset(x)

- ▶ Erzeuge Baum mit einzeltem Element. Gib Zeiger auf Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(1)$.

find(x)

- ▶ Handle ist Zeiger auf Element;
- ▶ Starte beim Element x im Baum. Gehe aufwärts bis zu Wurzel.
- ▶ Gib Identifier der Wurzel zurück.
- ▶ Zeit: $\mathcal{O}(\text{level}(x))$, wobei $\text{level}(x)$ die Distanz von x zu Wurzel des jeweiligen Baumes ist. **nicht konstant.**

Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x , y)

- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.

Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x, y)

- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.
- ▶ $\text{link}(a, b)$ fügt den **kleineren** Teilbaum als Kind an den größeren an.

Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x, y)

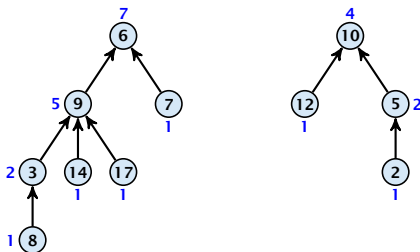
- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.
- ▶ $\text{link}(a, b)$ fügt den **kleineren** Teilbaum als Kind an den größeren an.
- ▶ Zusätzlich wird dabei das Größenfeld der neuen Wurzel aktualisiert.

Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x, y)

- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.
- ▶ $\text{link}(a, b)$ fügt den **kleineren** Teilbaum als Kind an den größeren an.
- ▶ Zusätzlich wird dabei das Größenfeld der neuen Wurzel aktualisiert.

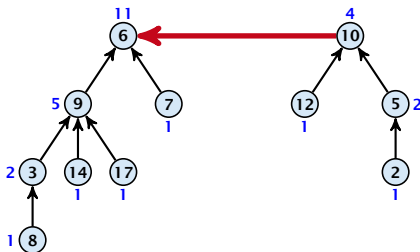


Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x, y)

- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.
- ▶ $\text{link}(a, b)$ fügt den **kleineren** Teilbaum als Kind an den größeren an.
- ▶ Zusätzlich wird dabei das Größenfeld der neuen Wurzel aktualisiert.

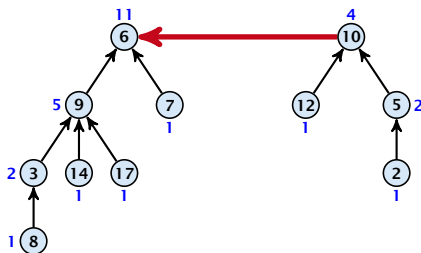


Baumimplementierung

Trick: wir speichern für jeden Baum zusätzlich die Anzahl der Elemente des Baumes.

union(x, y)

- ▶ Führe $a = \text{find}(x)$; $b = \text{find}(y)$ aus. Dann: $\text{link}(a, b)$.
- ▶ $\text{link}(a, b)$ fügt den **kleineren** Teilbaum als Kind an den größeren an.
- ▶ Zusätzlich wird dabei das Größenfeld der neuen Wurzel aktualisiert.



- ▶ Laufzeit: konstant für $\text{link}(a, b)$ + zwei find-Operationen.

Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel x an einen Teilbaum

mit Wurzel y anfügen, $\text{find}(x)$ wird um $\log n$ zunehmen.

Dabei kann $\text{find}(x)$ sich nicht mehr als $\log n$ erhöhen.

Das heißt, wenn wir x anfügen kann $\text{find}(x)$ um $\log n$ zunehmen.

□

Das heißt, wenn wir x anfügen kann $\text{find}(x)$ um $\log n$ zunehmen.

Das heißt, wenn wir x anfügen kann $\text{find}(x)$ um $\log n$ zunehmen.

Das heißt, wenn wir x anfügen kann $\text{find}(x)$ um $\log n$ zunehmen.



Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

- ▶ Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel c an einen Teilbaum mit Wurzel p anfügen, gilt nachher $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$.
- ▶ Danach kann sich $\text{size}(c)$ nicht mehr ändern, während $\text{size}(p)$ noch weiter steigen kann (durch weitere union-Operationen).
- ▶ D.h. jeder Baum erfüllt immer $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$, für eine Kante (p, c) , wobei p der Elternknoten von c ist.
- ▶ Deshalb kann die Höhe des Baumes nur $\mathcal{O}(\log n)$ sein.



Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

- ▶ Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel c an einen Teilbaum mit Wurzel p anfügen, gilt nachher $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$.
- ▶ Danach kann sich $\text{size}(c)$ nicht mehr ändern, während $\text{size}(p)$ noch weiter steigen kann (durch weitere **union**-Operationen).
- ▶ D.h. jeder Baum erfüllt immer $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$, für eine Kante (p, c) , wobei p der Elternknoten von c ist.
- ▶ Deshalb kann die Höhe des Baumes nur $\mathcal{O}(\log n)$ sein.



Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

- ▶ Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel c an einen Teilbaum mit Wurzel p anfügen, gilt nachher $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$.
- ▶ Danach kann sich $\text{size}(c)$ nicht mehr ändern, während $\text{size}(p)$ noch weiter steigen kann (durch weitere **union**-Operationen).
- ▶ D.h. jeder Baum erfüllt immer $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$, für eine Kante (p, c) , wobei p der Elternknoten von c ist.
- ▶ Deshalb kann die Höhe des Baumes nur $\mathcal{O}(\log n)$ sein.



Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

- ▶ Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel c an einen Teilbaum mit Wurzel p anfügen, gilt nachher $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$.
- ▶ Danach kann sich $\text{size}(c)$ nicht mehr ändern, während $\text{size}(p)$ noch weiter steigen kann (durch weitere union -Operationen).
- ▶ D.h. jeder Baum erfüllt immer $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$, für eine Kante (p, c) , wobei p der Elternknoten von c ist.
- ▶ Deshalb kann die Höhe des Baumes nur $\mathcal{O}(\log n)$ sein.



Baumimplementierung

Lemma 1

Laufzeit für $\text{find}(x)$ ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Beweis.

- ▶ Wenn wir einen Teilbaum mit Wurzel c an einen Teilbaum mit Wurzel p anfügen, gilt nachher $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$.
- ▶ Danach kann sich $\text{size}(c)$ nicht mehr ändern, während $\text{size}(p)$ noch weiter steigen kann (durch weitere union -Operationen).
- ▶ D.h. jeder Baum erfüllt immer $\text{size}(p) \geq 2 \text{size}(c)$, für eine Kante (p, c) , wobei p der Elternknoten von c ist.
- ▶ Deshalb kann die Höhe des Baumes nur $\mathcal{O}(\log n)$ sein.



Pfadkomprimierung

find(x):

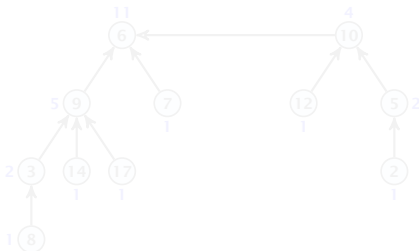
- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.



Pfadkomprimierung

find(x):

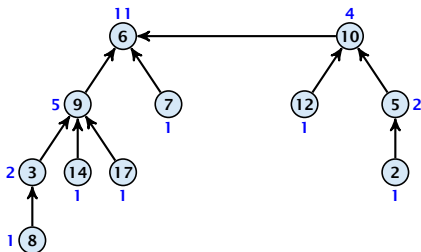
- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.



Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

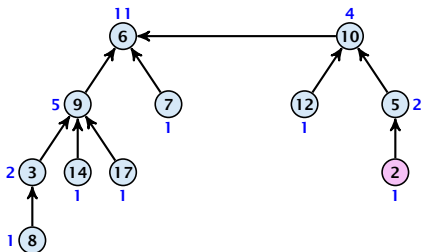


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

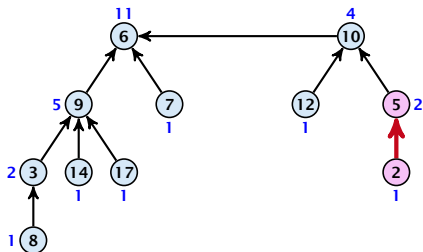


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

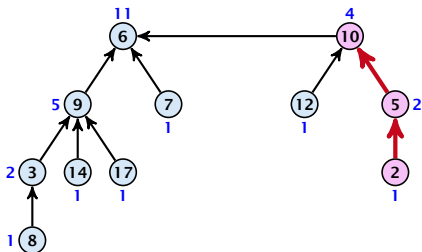


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

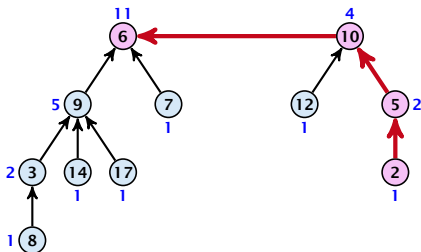


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

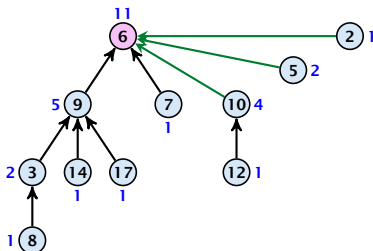


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.

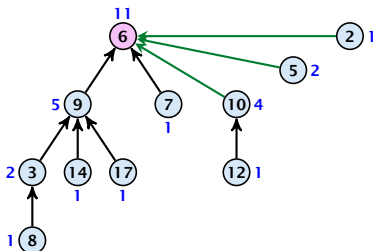


- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

find(x):

- ▶ Gehe aufwärts bis zur Wurzel.
- ▶ Hänge alle **besuchten** Knoten als Kinder unter die Wurzel.
- ▶ Beschleunigt nachfolgende find-Operationen.



- ▶ Beachte, dass die Größenfelder jetzt nur an den Wurzeln der Teilbäume korrekt sind.

Pfadkomprimierung

Die asymptotische Laufzeit ändert sich durch das Hinzufügen der Pfadkomprimierung nicht.

Die worst-case Laufzeit ist immer noch nur $\Theta(\log n)$.

Pfadkomprimierung

Die asymptotische Laufzeit ändert sich durch das Hinzufügen der Pfadkomprimierung nicht.

Die worst-case Laufzeit ist immer noch nur $\mathcal{O}(\log n)$.

Amortisierte Analyse

Bei der amortisierten Analyse betrachtet man nicht die Laufzeit für **eine** Operation, sondern die **durchschnittliche** Laufzeit über eine Folge von Operationen (auf höchstens n Elementen beginnend mit leerer Menge).

- ▶ Die Listenimplementierung hat eine amortisierte Laufzeit von $\mathcal{O}(\log n)$ für **union**, und $\mathcal{O}(1)$ für **makeset**, und **find**.
- ▶ Die Baumimplementierung hat eine amortisierte Laufzeit von $\mathcal{O}(\log^* n)$ für alle Operationen.

$\log^* n$ kann man sich folgendermaßen vorstellen. Man gibt n in den Taschenrechner ein, und zählt wie oft man die \log -Taste drücken muß damit man eine Zahl ≤ 1 erhält. Falls n die Anzahl der Atome im (beobachtbaren) Universum ist dann ist $\log^* n = 5$.

Laufzeit Kruskal

- ▶ Der Algorithmus sortiert die Kanten gemäß Gewicht;
Laufzeit $\mathcal{O}(m \log m)$
- ▶ Dann läuft er über alle Kanten; für jede Kante führt er 2
find-Operationen aus und ggf. eine union-Operation.
 $\mathcal{O}(m \log^* m)$

Insgesamt: $\mathcal{O}(m \log m)$ (dominiert durch das Sortieren der Kanten)