

Übung 2 – Algorithmen II

Moritz Laupichler, Hans-Peter Lehmann – {moritz.laupichler, hans-peter.lehmann}@kit.edu
http://algo2.iti.kit.edu/AlgorithmenII_WS22.php

Institut für Theoretische Informatik - Algorithmik II

```
    result = current_weight;
    return true;
}

for( EdgeID eid = graph.edgeBegin( current ); eid != graph.edgeEnd( current ); ++eid ){
    const Edge & edge = graph.getEdge( eid );
    COUNTING( statistic_data.inc( DijkstraStatisticData::TOUCHED_EDGES ); )
    if( edge.forward ){
        COUNTING( statistic_data.inc( DijkstraStatisticData::RELAXED_EDGES ); )
        weight new_weight = edge.weight + current_weight;
        GUARANTEE( new_weight >= current_weight, std::runtime_error, "Weight overflow detected." );
        if( !priority_queue.isReached( edge.target ) ){
            COUNTING( statistic_data.inc( DijkstraStatisticData::SUCCESSFULLY_RELAXED_EDGES ); )
            COUNTING( statistic_data.inc( DijkstraStatisticData::REACHED_NODES ); )
            priority_queue.push( edge.target, new_weight );
        } else {
            if( priority_queue.getCurrentKey( edge.target ) > new_weight ){
                COUNTING( statistic_data.inc( DijkstraStatisticData::SUCCESSFULLY_RELAXED_NODES ); )
                priority_queue.decreaseKey( edge.target, new_weight );
            }
        }
    }
}
```

- Ganzzahlige *Priority Queues*
 - *Bucket Queues*
 - *Radix Heaps*
- Bidirektionale Suche
- A*-Suche
- All-to-All Suche

Spezielle *Priority Queues*

monoton, ganzzahlig

Warum das Ganze?

- spezialisierte Datenstruktur → schneller
- Dijkstras Algorithmus

Idee

- speichere Schlüssel in *Buckets* statt *Bäumen*

Spezielle *Priority Queues*

Dijkstras Algorithmus

Laufzeit Dijkstras Algorithmus

■ $T_{Dijkstra} = O(m \cdot T_{decreaseKey} + n \cdot (T_{deleteMin} + T_{insert}))$

amortisierte Laufzeiten

$O(\cdot)$	<i>Bin. Heap</i>	<i>Fib. Heap</i>	<i>Bkt. Queue</i>	<i>Radix Heap</i>
$T_{decreaseKey}$	$\log n$	1	1	1
T_{insert}	$\log n$	1	1	$\log C$
$T_{deleteMin}$	$\log n$	$\log n$	C	$\log C$
$T_{Dijkstra}$	$(m + n) \log n$	$m + n \log n$	$m + nC$	$m + n \log C$

Spezielle *Priority Queues*

monoton, ganzzahlig

Bedingungen

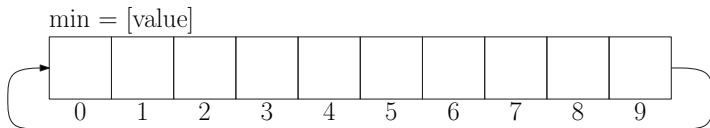
- positive, **ganzzahlige** Schlüssel
- neue/geänderte Schlüssel $k \geq$ minimaler Schlüssel min
- **maximales** Schlüsselinkrement $C \longrightarrow min \leq k \leq min + C$

Aufbau:

- zirkuläre Liste aus Buckets $B[\cdot]$
- Variable mit minimalem Schlüssel min
(der in die Datenstruktur aufgenommen werden kann)
- min : letzter deleteMin-Schlüssel, initialisiert mit 0

gegeben:

- max. Schlüsselinkrement $C \longrightarrow \# \text{ Buckets } |B| = C + 1$



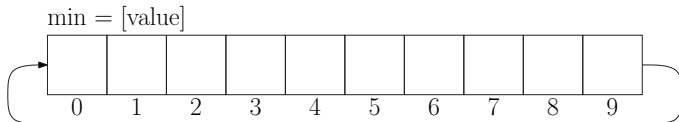
$$C = 9 \longrightarrow |B| = C + 1 = 10$$

Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

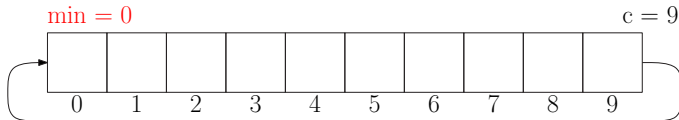


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

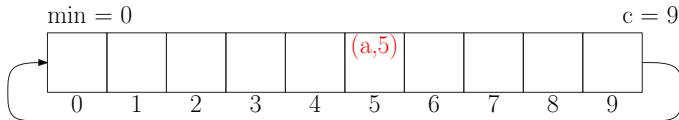
■ deleteMin()

■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

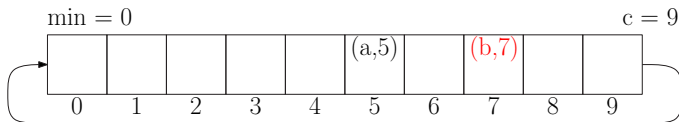


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

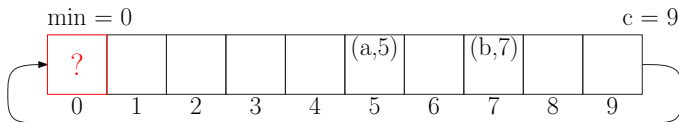


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

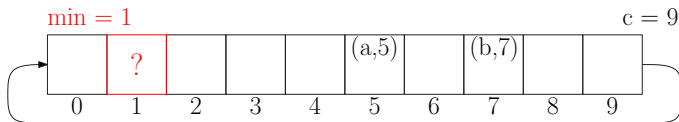


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

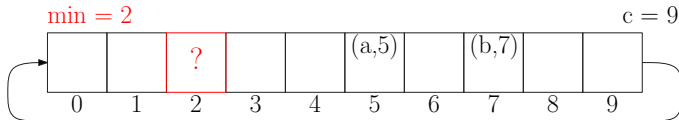


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

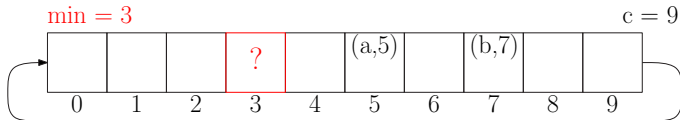


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

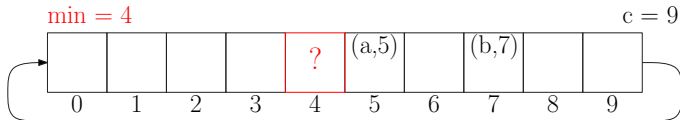


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

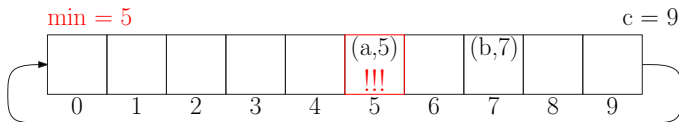


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

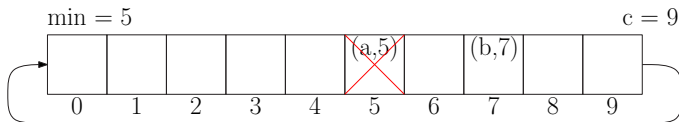


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

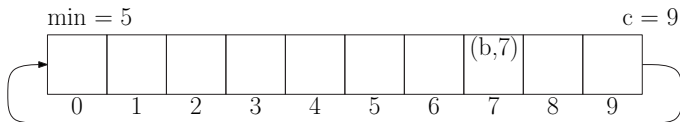


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

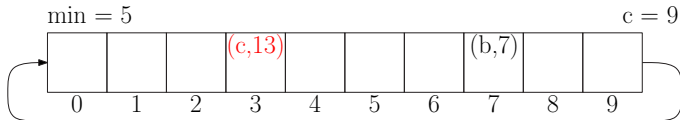


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

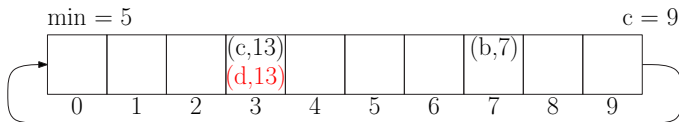


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

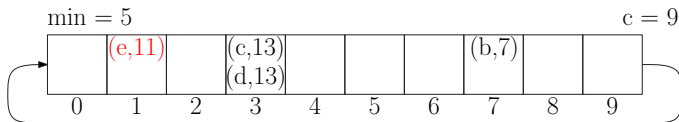


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

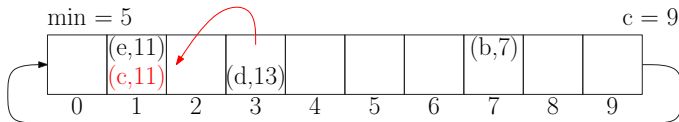


Ablauf:

insert:	Einfügen in Bucket $B[key \bmod (C + 1)]$	$O(1)$
deleteMin:	Entfernen aus Bucket $B[\min \bmod (C + 1)]$ (bzw. aus erstem nicht-leeren Folgebucket)	$O(C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neuen Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Spezielle *Priority Queues*

Dijkstras Algorithmus

Laufzeit Dijkstras Algorithmus

■ $T_{Dijkstra} = O(m \cdot T_{decreaseKey} + n \cdot (T_{deleteMin} + T_{insert}))$

amortisierte Laufzeiten

$O(\cdot)$	<i>Bin. Heap</i>	<i>Fib. Heap</i>	<i>Bkt. Queue</i>	<i>Radix Heap</i>
$T_{decreaseKey}$	$\log n$	1	1	1
T_{insert}	$\log n$	1	1	$\log C$
$T_{deleteMin}$	$\log n$	$\log n$	C	$\log C$
$T_{Dijkstra}$	$(m + n) \log n$	$m + n \log n$	$m + nC$	$m + n \log C$

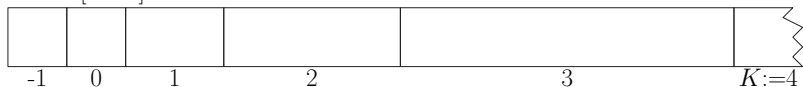
Aufbau:

- Liste aus **logarithmischer Anzahl** Buckets $B[\cdot]$
- Variable mit minimalem Schlüssel min
(der in die Datenstruktur aufgenommen werden kann)

gegeben:

- max. Schlüsselinkrement $C \longrightarrow \# \text{ Buckets } |B| = K + 2$
 $= (\lfloor \log C \rfloor + 1) + 2$

$min = [value]$



$$C = 9 \longrightarrow K + 2 = (\lfloor \log C \rfloor + 1) + 2 = (3 + 1) + 2 = 6$$

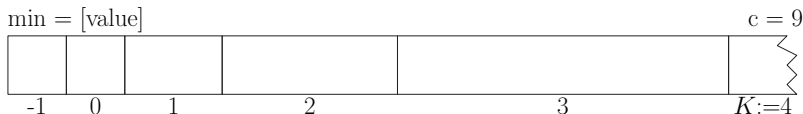
Radix Heaps

$\text{min} = [\text{value}]$

$c = 9$



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)$

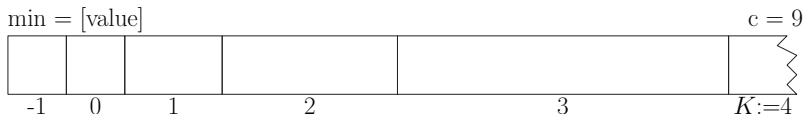
→ Bucket K ist *overflow* Bucket

→ höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i

(bzw. -1 wenn $key = min$)

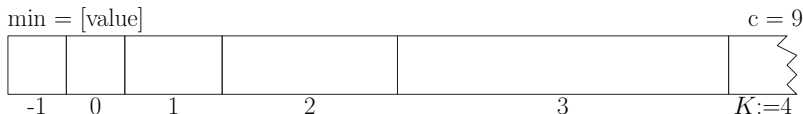
→ $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel

→ leer, wenn Bit i von min gesetzt



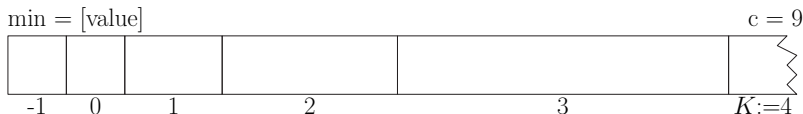
Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

- Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\min, \text{key}), K)$
- Bucket K ist overflow Bucket
 - höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i
(bzw. -1 wenn $\text{key} = \min$)
 - $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel
 - leer, wenn Bit i von \min gesetzt



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

- Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)$
- Bucket K ist *overflow* Bucket
 - höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i
(bzw. -1 wenn $\text{key} = \text{min}$)
 - $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel
 - leer, wenn Bit i von min gesetzt



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

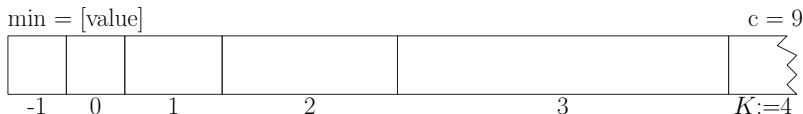
- Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)$
- Bucket K ist *overflow* Bucket
 - höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i
(bzw. -1 wenn $\text{key} = \text{min}$)
 - $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel
 - leer, wenn Bit i von min gesetzt

Beispiele

$\text{min} := 00001000$ (08)

$\text{msd}(00001000, 01001000) = 6$

$\text{msd}(00001000, 00001010) = 1$



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

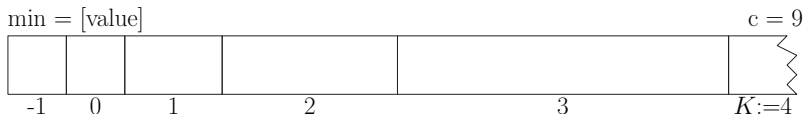
- Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)$
- Bucket K ist *overflow* Bucket
 - höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i
(bzw. -1 wenn $\text{key} = \text{min}$)
 - $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel
 - leer, wenn Bit i von min gesetzt

Beispiele

$\text{min} := 00001000$ (08)

$\text{msd}(00001000, 01*****) = 6 \rightarrow 2^6 = 64$ Werte

$\text{msd}(00001000, 0000101*) = 1 \rightarrow 2^1 = 2$ Werte



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

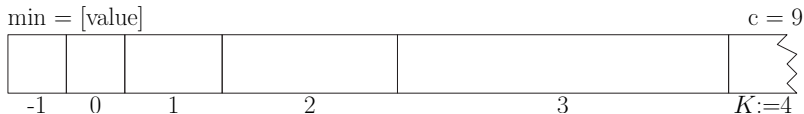
- Bucket i : hält Elemente mit $i = \min(\text{msd}(\min, \text{key}), K)$
- Bucket K ist *overflow* Bucket
 - höchstwertiges unterschiedliches Bit ist i
(bzw. -1 wenn $\text{key} = \min$)
 - $\max(1, 2^i)$ verschiedene Schlüssel
 - **leer, wenn Bit i von \min gesetzt**

Beispiele

$\min := 00001000$ (08)

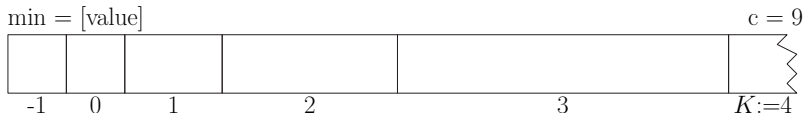
$\text{msd}(0000\textcolor{red}{1}000, 0000\textcolor{red}{0}110) = 3 \rightarrow$ kann nicht passieren, da $6 < 8$

$\text{msd}(0000\textcolor{red}{1}000, 0000\textcolor{red}{0}100) = 3 \rightarrow$ kann nicht passieren, da $4 < 8$



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

	Bucket $B[\cdot]$					
<i>min</i>	-1	0	1	2	3	4
1000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	16..8+C
1010 (10)	10	11	-	12..15	-	16..10+C
1111 (15)	15	-	-	-	-	16..15+C
1000100 (68)	68	69	70..71	-	72..79 ?	80..68+C ?



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

	Bucket $B[\cdot]$					
<i>min</i>	-1	0	1	2	3	4
1000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	16..8+C
1010 (10)	10	11	-	12..15	-	16..10+C
1111 (15)	15	-	-	-	-	16..15+C
1000100 (68)	68	69	70..71	-	72..77 !	- !

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	$\text{min} = \text{minimaler Schlüssel (aus Bucket } i\text{),}$ Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

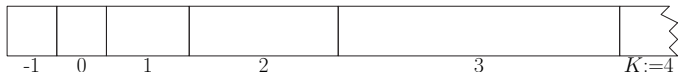
■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0000



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

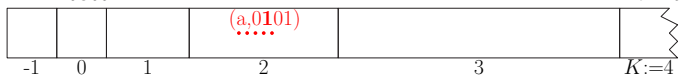
■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0000



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

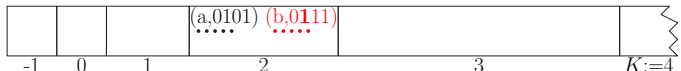
■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0000



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

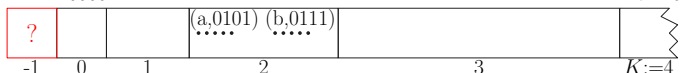
■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0000



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

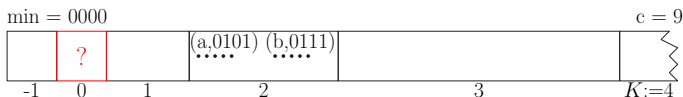
■ deleteMin()

■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

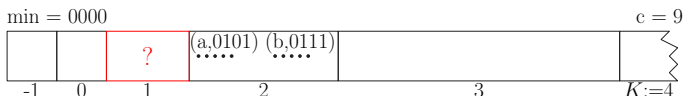
■ deleteMin()

■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

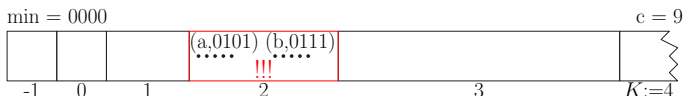
■ deleteMin()

■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

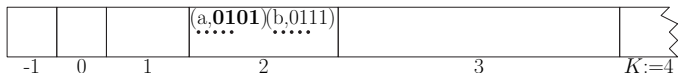
■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0101

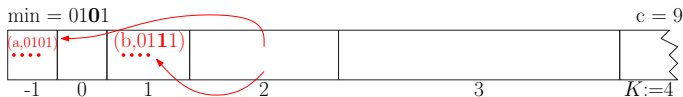


Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

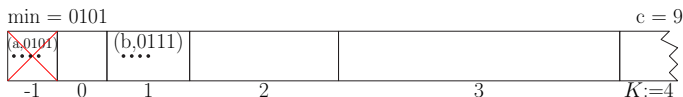


Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

■ insert(a,5)

■ insert(b,7)

■ deleteMin()

■ insert(c,13)

■ insert(d,13)

■ insert(e,11)

■ decreaseKey(c,11)

min = 0101

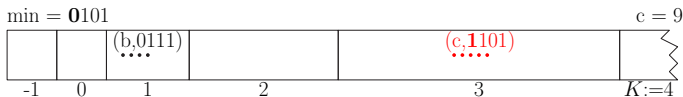


Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

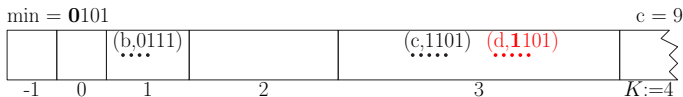


Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)

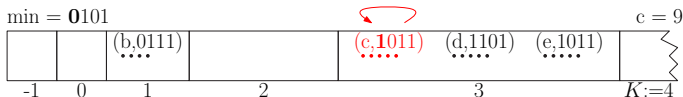


Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

insert:	Einfügen in Bucket $B[\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)]$	$O(\log C)$
deleteMin:	min = minimaler Schlüssel (aus Bucket i), Elemente aus Bucket i verschieben, Entfernen aus Bucket $B[-1]$	$O(\log C)$
decreaseKey:	Verschieben von altem in neues Bucket	$O(1)$

Beispiel:

- insert(a,5)
- insert(b,7)
- deleteMin()
- insert(c,13)
- insert(d,13)
- insert(e,11)
- decreaseKey(c,11)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

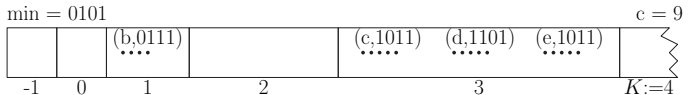
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

■ `insert(f,14)`

■ `deleteMin()`

■ `deleteMin()`

■ `insert(g,20)`

■ `deleteMin()`

■ `insert(h,18)`

■ `deleteMin()`

■ `decreaseKey(g,16)`

■ `deleteMin()`

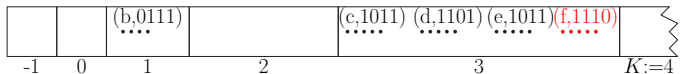
■ `deleteMin()`

■ `insert(i,24)`

■ `insert(j,22)`

■ `decreaseKey(i,16)`

min = 0101



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin() min = 0101

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

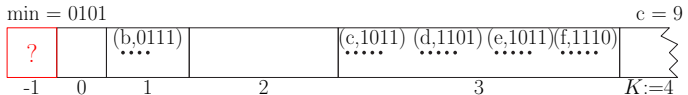
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

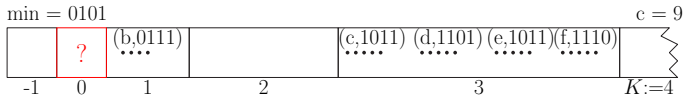
■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

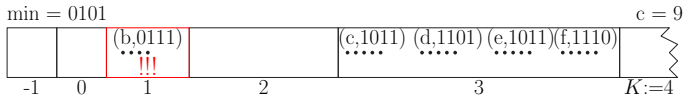
- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



```

    decreaseKey(i, 16)

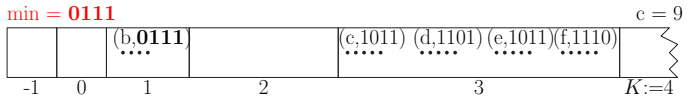
```



Radix Heaps

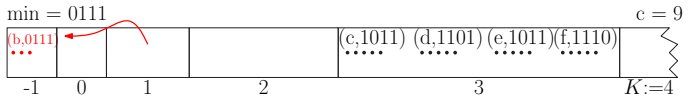
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

■ `insert(f,14)`

■ `deleteMin()`

■ `deleteMin()`

■ `insert(g,20)`

■ `deleteMin()`

■ `insert(h,18)`

■ `deleteMin()`

■ `decreaseKey(g,16)`

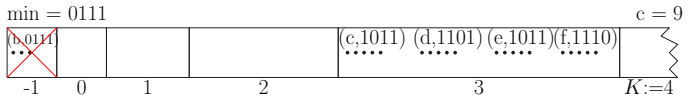
■ `deleteMin()`

■ `deleteMin()`

■ `insert(i,24)`

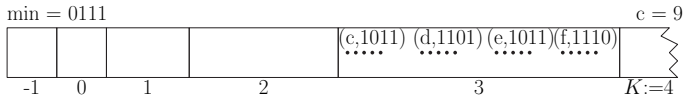
■ `insert(j,22)`

■ `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin() min = 0111

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

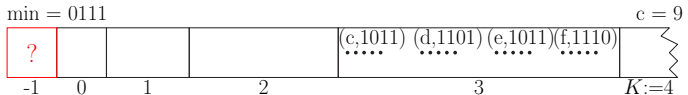
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

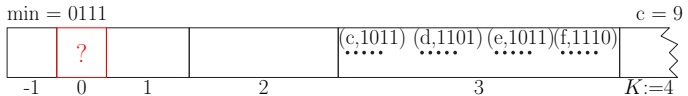
■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



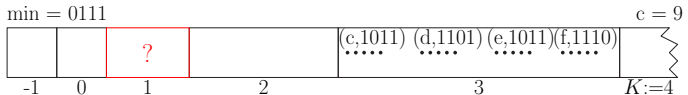
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



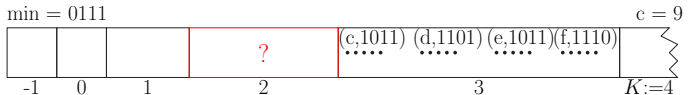
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

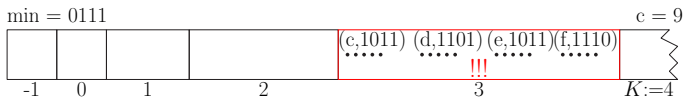
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



```

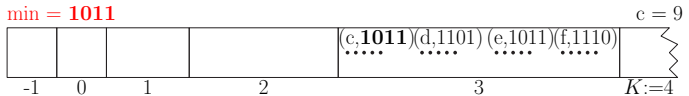
decreaseKey(i, 16)

```



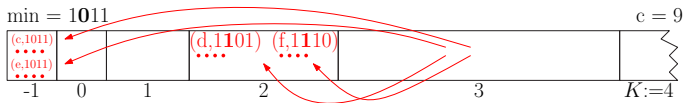
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

■ deleteMin()

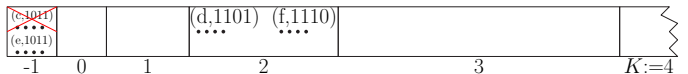
■ deleteMin()

■ insert(i,24)

■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)

min = 1011



Beispiel (fortgesetzt):

■ `insert(f,14)`

■ `deleteMin()`

■ `deleteMin()`

■ `insert(g,20)`

■ `deleteMin()`

■ `insert(h,18)`

■ `deleteMin()`

■ `decreaseKey(g,16)`

■ `deleteMin()`

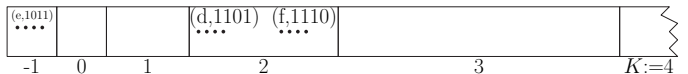
■ `deleteMin()`

■ `insert(i,24)`

■ `insert(j,22)`

■ `decreaseKey(i,16)`

min = 1011



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

■ deleteMin()

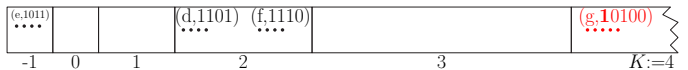
■ deleteMin()

■ insert(i,24)

■ insert(j,22)

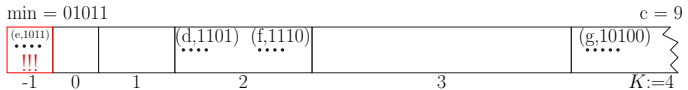
■ decreaseKey(i,16)

min = 01011



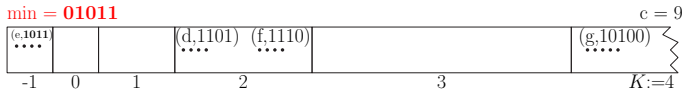
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

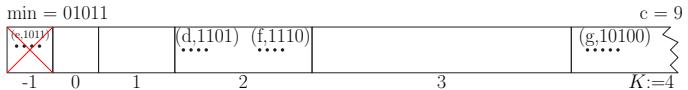
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

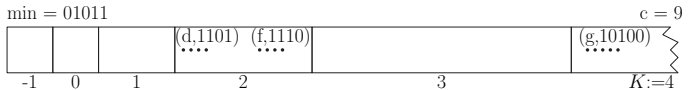
■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

■ deleteMin()

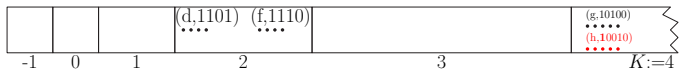
■ deleteMin()

■ insert(i,24)

■ insert(j,22)

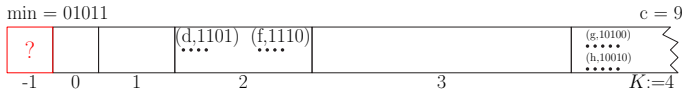
■ decreaseKey(i,16)

min = 01011



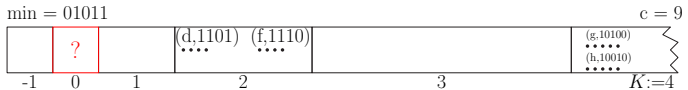
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



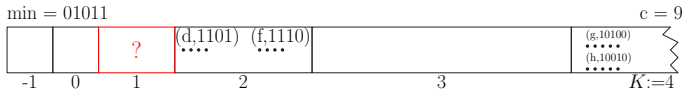
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



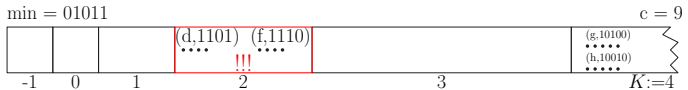
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- **deleteMin()**
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

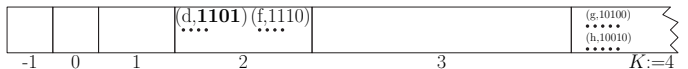
- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)

min = 01101



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

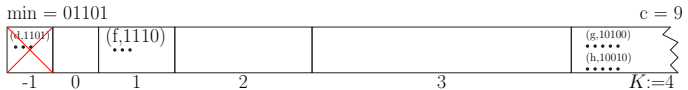
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

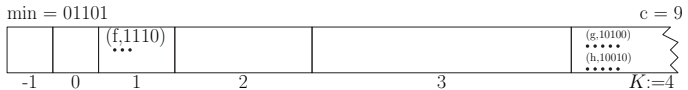
■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

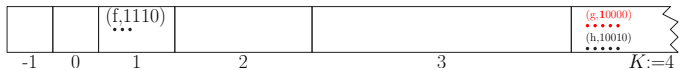
- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

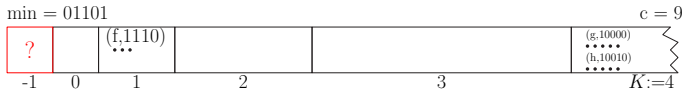
- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)

min = 01101



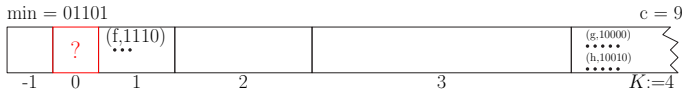
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



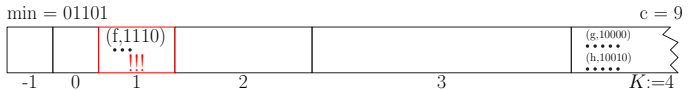
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



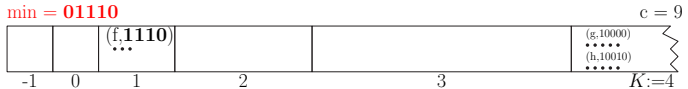
Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)

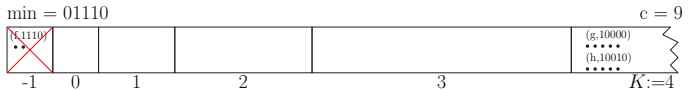


Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



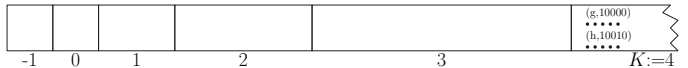
- decreaseKey(i, 16)



Beispiel (fortgesetzt):

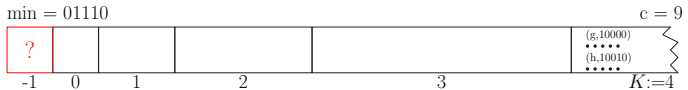
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`

min = 01110



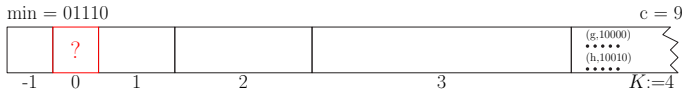
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



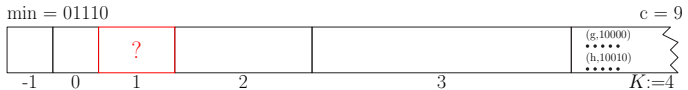
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

- insert(f,14)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(g,20)
- deleteMin()
- insert(h,18)
- deleteMin()
- decreaseKey(g,16)
- deleteMin()
- deleteMin()
- insert(i,24)
- insert(j,22)
- decreaseKey(i,16)



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

■ deleteMin()

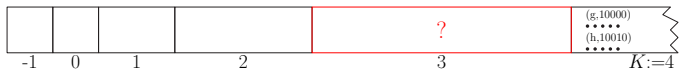
■ deleteMin()

■ insert(i,24)

■ insert(j,22)

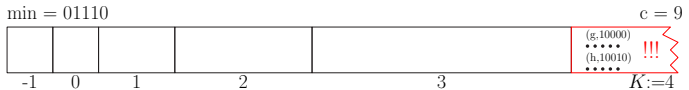
■ decreaseKey(i,16)

min = 01110



Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

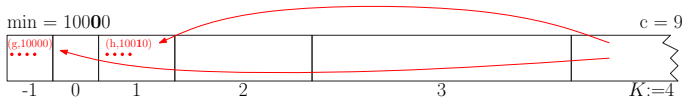
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`

min = 10000



Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

■ insert(f,14)

■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(g,20)

■ deleteMin()

■ insert(h,18)

■ deleteMin()

■ decreaseKey(g,16)

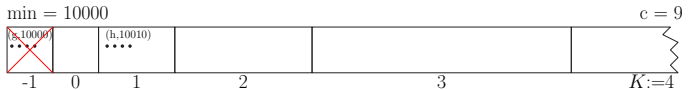
■ deleteMin()

■ deleteMin()

■ insert(i,24)

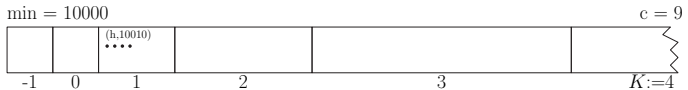
■ insert(j,22)

■ decreaseKey(i,16)



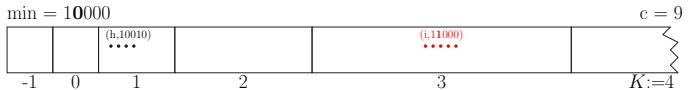
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



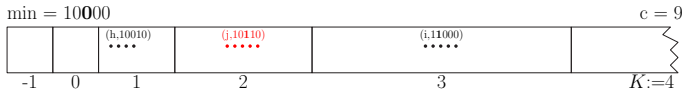
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



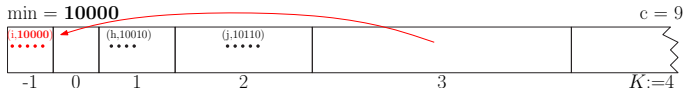
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



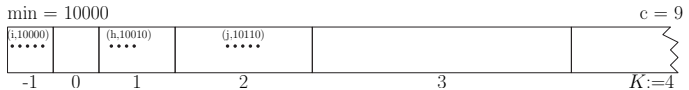
Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Warum komplizierte Formel $\min(\text{msd}(\text{min}, \text{key}), K)$?

- viel anschaulicher wäre doch

$$i = \lceil \log(\text{key} - \text{min}) \rceil$$

- okay, Anzahl Verschiebungen **erhöht sich nicht** ...
- ... aber, jede Änderung von *min* ändert **potentiell alle Buckets**
→ **schlechtere Laufzeit!**

Beispiel

$\text{min} := 01000 \text{ (08)} \xrightarrow{\text{deleteMin}} \text{min} := 01010 \text{ (10)}$

	Bucket $B[\cdot]$					
<i>min</i>	-1	0	1	2	3	4
1000 (08)	8	9	10	11..12	13..16	17..8+C
1010 (10)	10	11	12	13..14	15..18	19..10+C

$\min = 1000$

$c = 9$



Änderung von $\min \rightarrow$ Umverteilung eines Bucket genügt

$\min := 01000$ (08)

\min	Bucket $B[\cdot]$					
	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16

min = 1000

c = 9



Änderung von min \rightarrow Umverteilung eines Bucket genügt

$min := 01000$ (08) $\xrightarrow{\text{deleteMin}}$ $min := 01001$ (09)

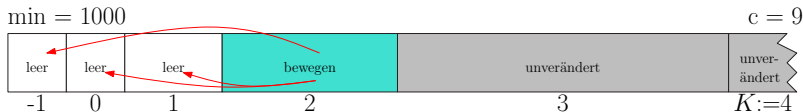
	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16
01001 (09)	9	-	10..11	12..15	-	≥ 16



Änderung von min \rightarrow Umverteilung eines Bucket genügt

$min := 01000 (08) \xrightarrow{\text{deleteMin}} min := 0101* (10..11)$

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16
01010 (10)	10	11	-	12..15	-	≥ 16
01011 (11)	11	-	-	12..15	-	≥ 16

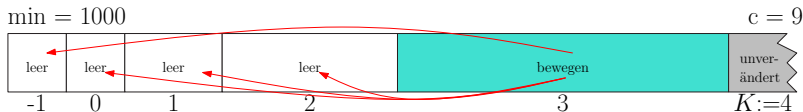


Änderung von min \rightarrow Umverteilung eines Bucket genügt

$min := 01000 (08) \xrightarrow{\text{deleteMin}} min := 011 ** (12..15)$

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16

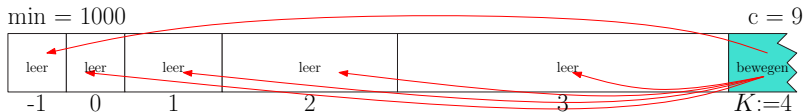
01100 (12)	12	13	14..15	-	-	≥ 16
01101 (13)	13	-	14..15	-	-	≥ 16
01110 (14)	14	15	-	-	-	≥ 16
01111 (15)	15	-	-	-	-	≥ 16



Änderung von min \rightarrow Umverteilung eines Bucket genügt

$min := 01000 (08) \xrightarrow{\text{deleteMin}} min := -, \text{ Bucket 3 ist leer}$

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16



Änderung von min \rightarrow Umverteilung eines Bucket genügt

$min := 01000 (08) \xrightarrow{\text{deleteMin}} min := 1**** (16..)$

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	≥ 16

10000 (16)	16	17	-	-	-	-
10001 (17)	17	-	-	-	-	-

Spezielle *Priority Queues*

Dijkstras Algorithmus

Laufzeit Dijkstras Algorithmus

■ $T_{Dijkstra} = O(m \cdot T_{decreaseKey} + n \cdot (T_{deleteMin} + T_{insert}))$

amortisierte Laufzeiten

$O(\cdot)$	<i>Bin. Heap</i>	<i>Fib. Heap</i>	<i>Bkt. Queue</i>	<i>Radix Heap</i>
$T_{decreaseKey}$	$\log n$	1	1	1
T_{insert}	$\log n$	1	1	$\log C$
$T_{deleteMin}$	$\log n$	$\log n$	C	$\log C$
$T_{Dijkstra}$	$(m + n) \log n$	$m + n \log n$	$m + nC$	$m + n \log C$

Eigenschaften

- gegeben
 - Graph $G = (V, E)$
 - Kantengewichte $c(u, v) : E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$
- betrachte Suche von Start s nach Ziel t (One-to-One Query)
→ kürzeste Distanz $\mu(s, t)$ bestimmen

Übersicht über verschiedene Varianten

- Dijkstras Algorithmus (auch One-to-All Query)
- Bellmann Ford Algorithmus (auch negative Kantengewichte)
- Bidirektionale Suche (Beschleunigungstechnik)
- A*-Suche (Heuristik)
- ...

Suche in Graphen

Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus



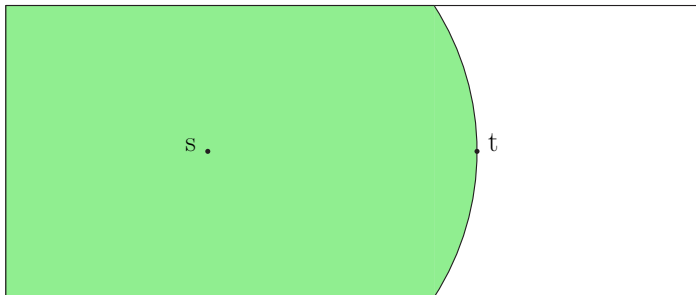
Bidirektionale Suche



A* Suche



Bidirektionale A* Suche



Suche in Graphen

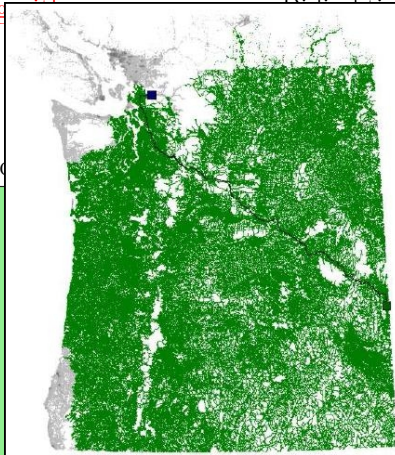
Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus

Brute Force Suche

A* Suche

Heuristische A* Suche

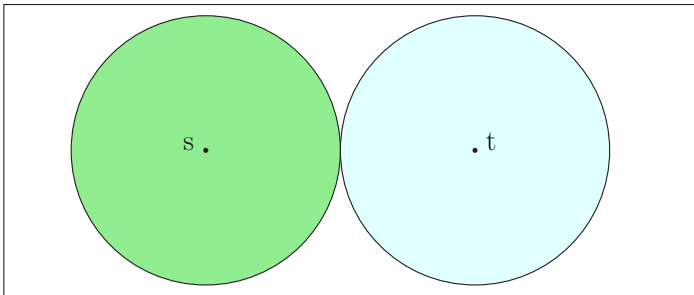


Suche in Graphen

Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus \longrightarrow Bidirektionale Suche

\downarrow \downarrow
A* Suche \longrightarrow Bidirektionale A* Suche



Suche in Graphen

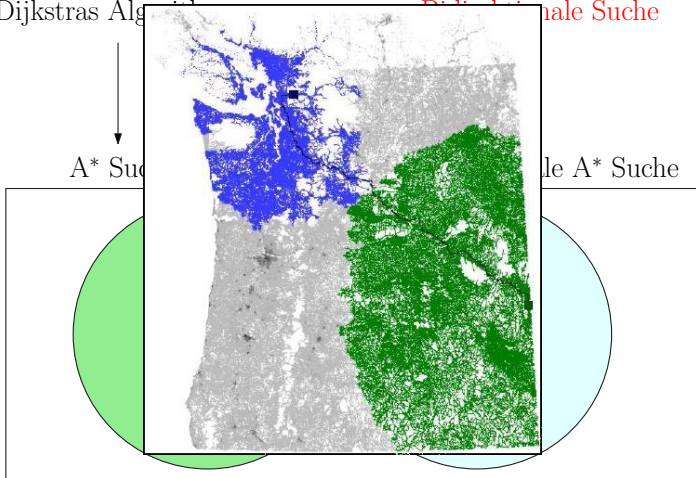
Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus

Dijkstra'sche Suche

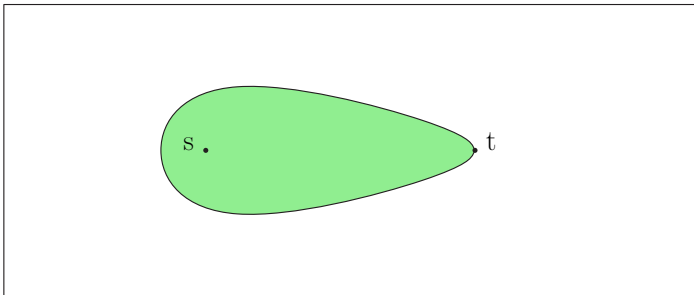
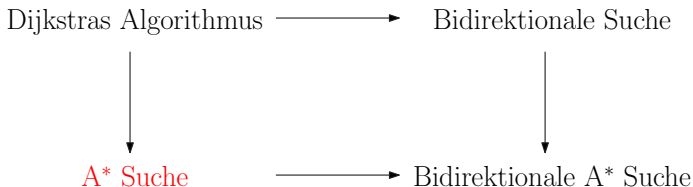
A* Suche

A* Suche



Suche in Graphen

Übersicht über verschiedene Varianten

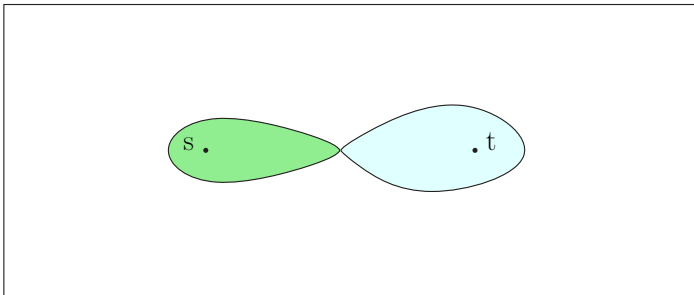


Suche in Graphen

Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus → Bidirektionale Suche

A* Suche → Bidirektionale A* Suche



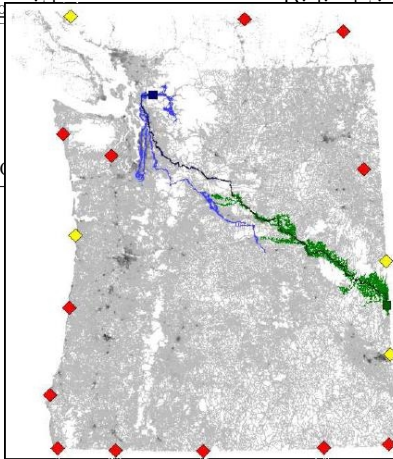
Suche in Graphen

Übersicht über verschiedene Varianten

Dijkstras Algorithmus Breitensuche

A* Suche

Heuristische A* Suche



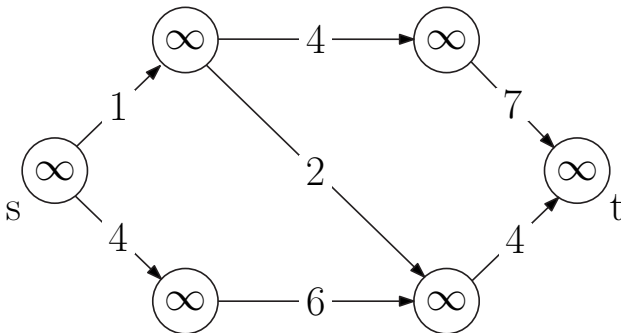
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



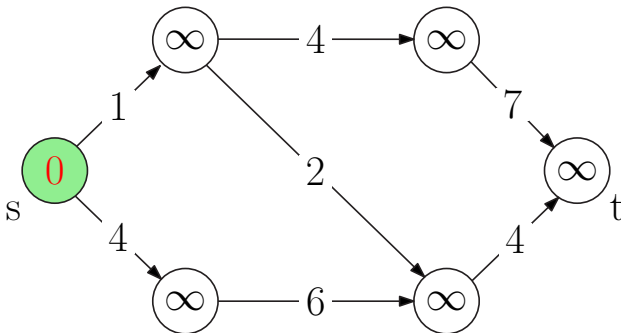
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



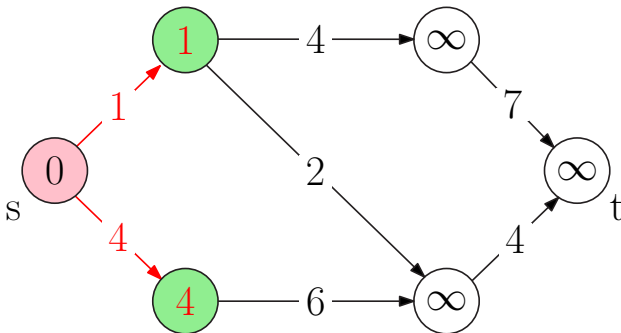
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



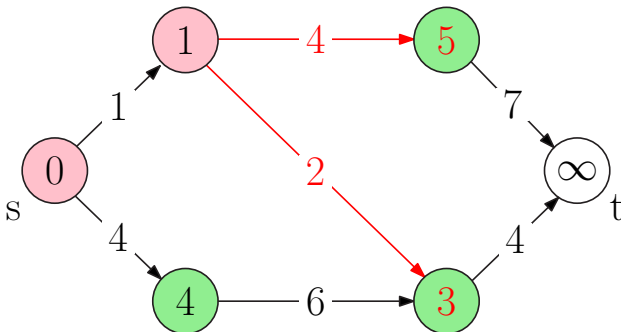
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



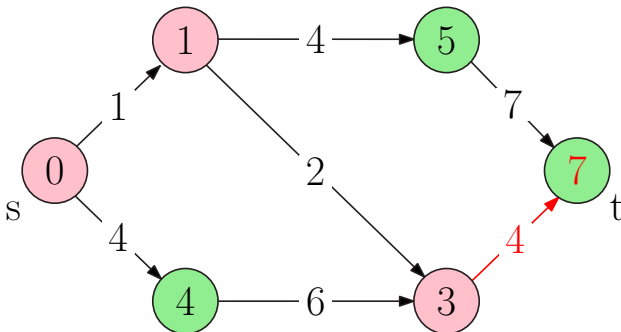
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



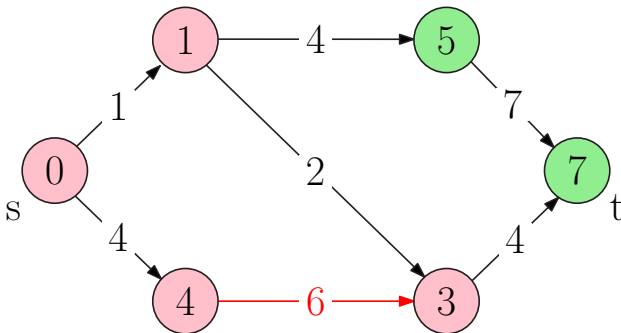
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



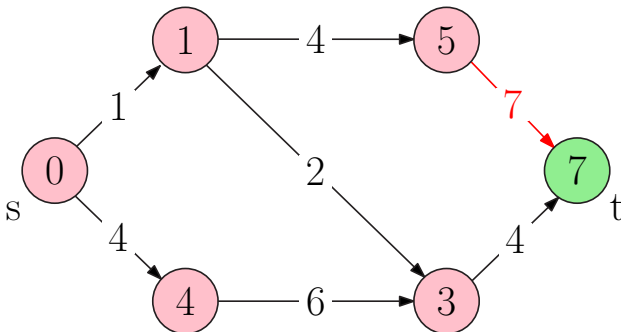
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

Beispiel



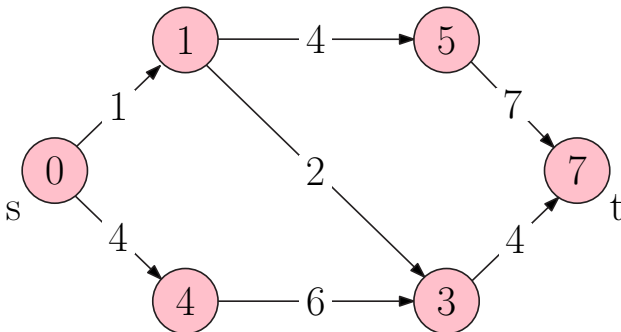
Suche in Graphen

Dijkstras Algorithmus

Einige Eigenschaften

- benötigt **nicht-negative** Kantengewichte
- verwaltet vorläufige Distanzen $d[\cdot]$ in *Priority Queue*
→ unterscheide **erreichte** Knoten und **gescannte** Knoten

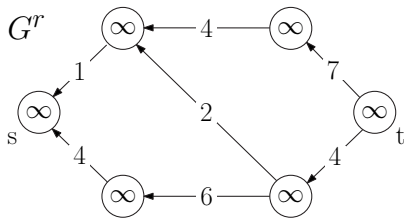
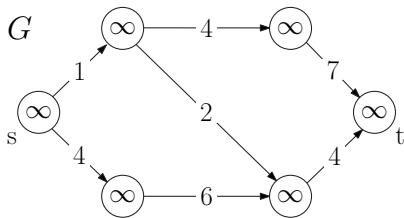
Beispiel



Eigenschaften

- führt zweimal Dijkstras Algorithmus aus
 - Vorwärtssuche ($s \rightarrow t$) auf normalem Graph G ,
 - Rückwärtssuche ($t \rightarrow s$) auf Rückwärtsgraph G^r

Beispiel



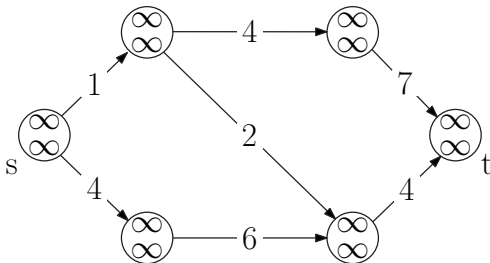
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel!



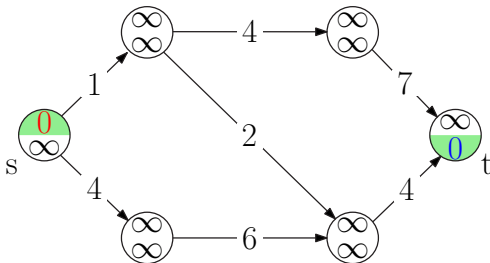
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel



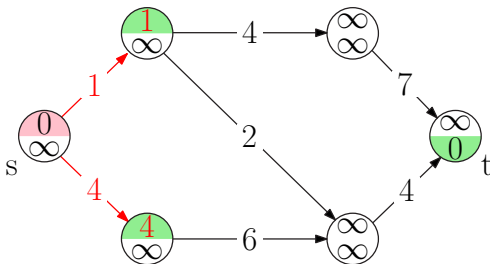
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel



forward

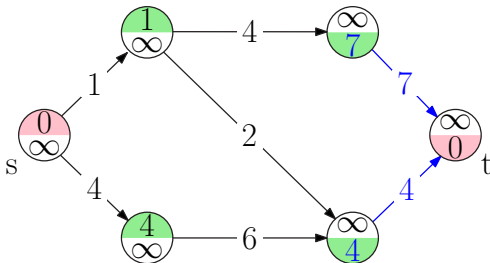
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel!



backward

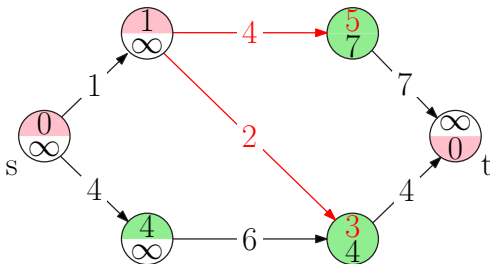
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel



forward

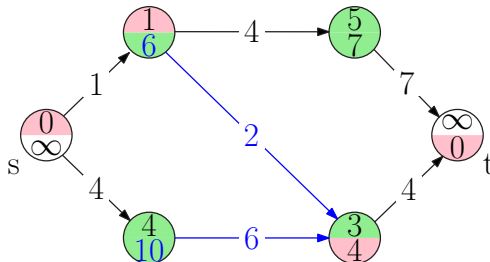
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel



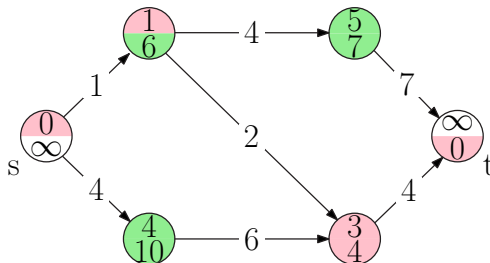
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Eigenschaften (weiter)

- wechselt Suchrichtung in jedem Schritt
(alternativ: wähle Richtung mit kleinerem $pq.min$)
- Abbruch, wenn ein Knoten in beiden Suchen **gescannt** wurde
(aufpassen bei alternativer Wahl der Suchrichtung!)

Beispiel

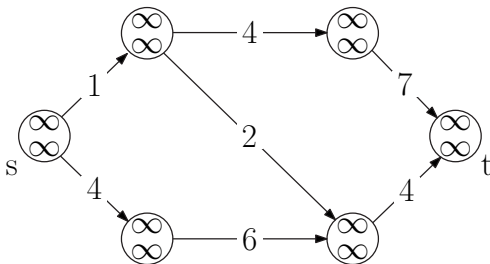


forward

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere Vorgänger u ,
 - falls vorläufige kürzeste Distanz $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere Treffpunkt v

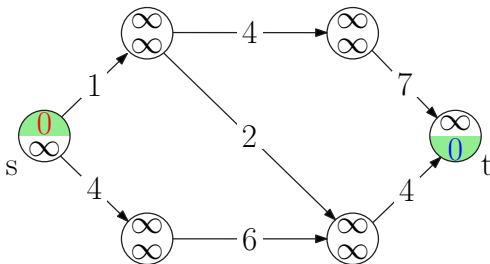
Beispiel



Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere Vorgänger u ,
 - falls vorläufige kürzeste Distanz $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere Treffpunkt v

Beispiel



$$d[s, t] = \infty$$

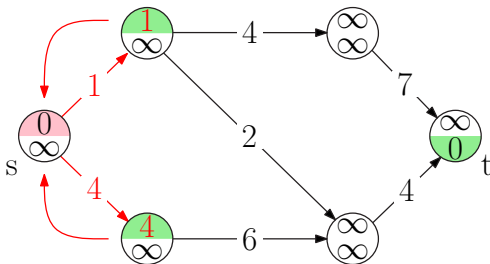
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = \infty$$

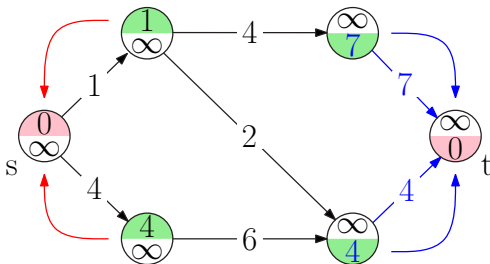
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



backward

$$d[s, t] = \infty$$

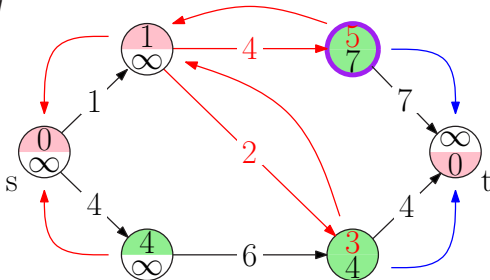
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = 12$$

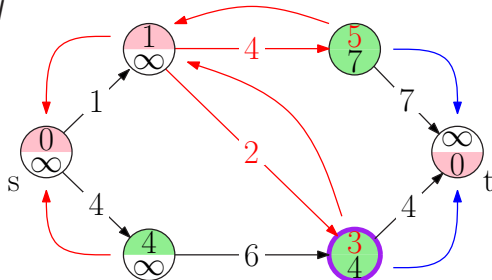
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = 7$$

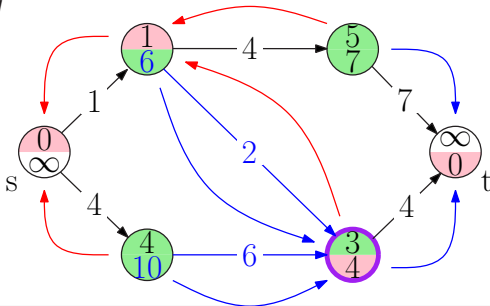
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



backward

$$d[s, t] = 7$$

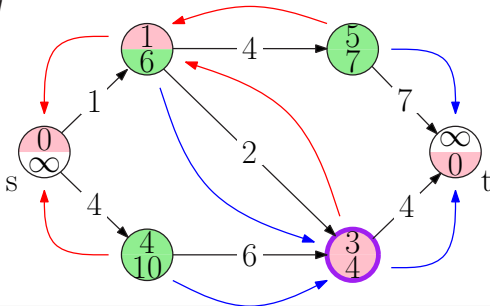
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = 7$$

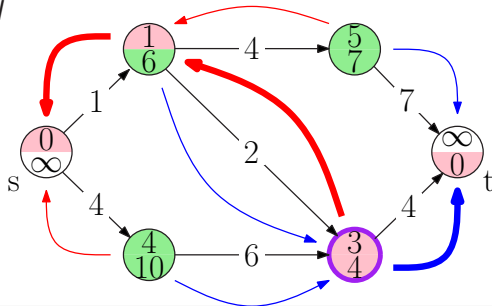
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = 7$$

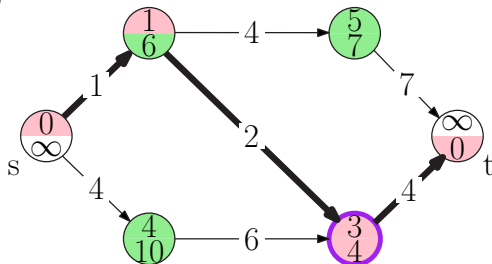
Suche in Graphen

Bidirektionale Suche

Wie wissen wir kürzeste Distanz und Weg nach Abbruch?

- wenn sich $d_{fwd}[v]$ oder $d_{bwd}[v]$ ändert,
 - aktualisiere **Vorgänger** u ,
 - falls **vorläufige kürzeste Distanz** $d[s, t] > d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v]$
 - aktualisiere $d[s, t]$,
 - aktualisiere **Treffpunkt** v

Beispiel



forward

$$d[s, t] = 7$$

Eigenschaften

- zielgerichtete Suche
 - benötigt **Potentialfunktion** $\text{pot}(\cdot) : V \longrightarrow \mathbb{R}$
 - **reduzierte Kantengewichte** $\bar{c}(u, v) := c(u, v) + \text{pot}(v) - \text{pot}(u)$ bzw.
 - **modifizierte Schlüssel** $\bar{d}[v] := d[v] + \text{pot}(v)$
- Abarbeitung der Knoten wird geändert (verbessert?)
- kürzeste Pfade bleiben erhalten

Eigenschaften

- Potentialfunktion $\text{pot}(\cdot) : V \longrightarrow \mathbb{R}$
- heuristische Funktion
 - modelliert **vorhandenes Wissen** über Graph
 - **schätzt Distanz zum Ziel** $\rightarrow \bar{d}[v]$ schätzt $\mu(s, t)$

gültige Potentialfunktion $\text{pot}(\cdot)$

- untere Schranke für Distanz zum Ziel t
 $\rightarrow \text{pot}(u) \leq \mu(u, t) \quad \forall u \in V$
(beendet Suche sobald t gescannt wurde)
- nicht-negative reduzierte Kantengewichte
 $\rightarrow \bar{c}(u, v) := c(u, v) + \text{pot}(v) - \text{pot}(u) \geq 0 \quad \forall (u, v) \in E$
(für Dijkstras Algorithmus)

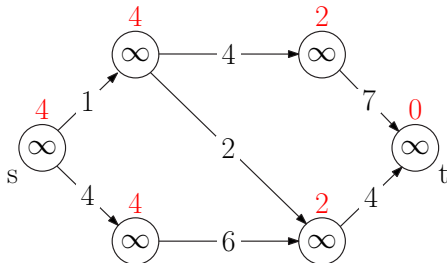
Suche in Graphen

A*-Suche – Potentialfunktionen

Woher nehmen?

- Manhattan-Distanz (nur Gittergraphen), euklidischer Abstand, ...
(benötigt geometrische Einbettung des Graphen)
- Distanzen zu Landmarken und Dreiecksungleichung
(funktioniert ohne Einbettung)
- Erfahrungswerte
(z.B. Bewertung von Spielsituationen)

Beispiel



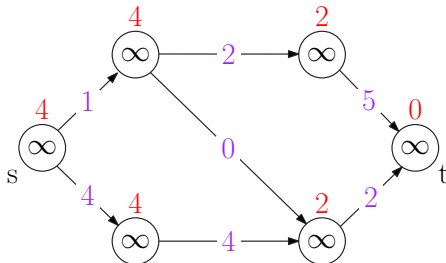
Suche in Graphen

A*-Suche – Potentialfunktionen

Woher nehmen?

- Manhattan-Distanz (nur Gittergraphen), euklidischer Abstand, ...
(benötigt geometrische Einbettung des Graphen)
- Distanzen zu Landmarken und Dreiecksungleichung
(funktioniert ohne Einbettung)
- Erfahrungswerte
(z.B. Bewertung von Spielsituationen)

Beispiel

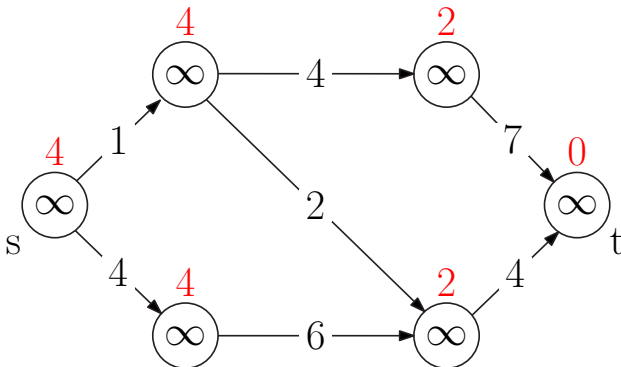


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

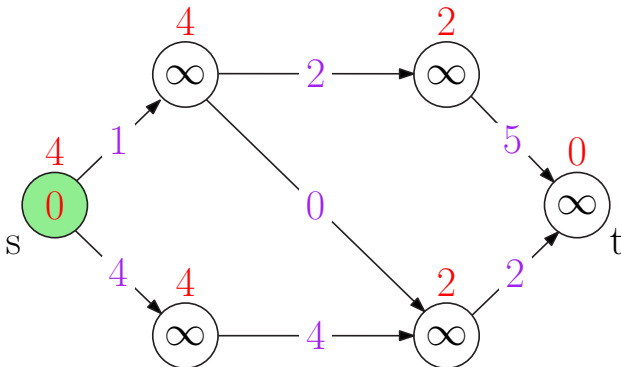


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

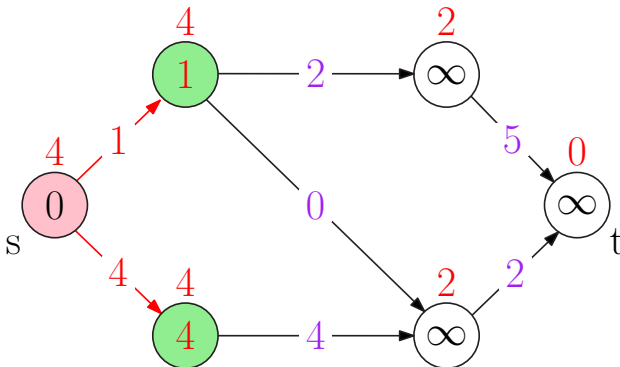


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

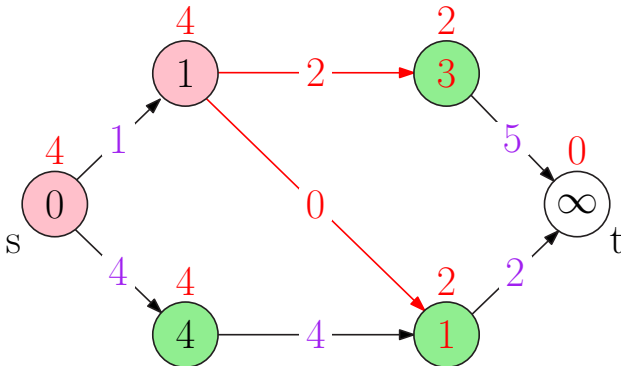


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

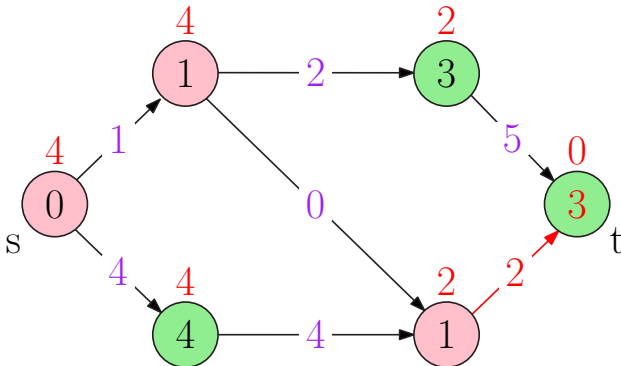


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

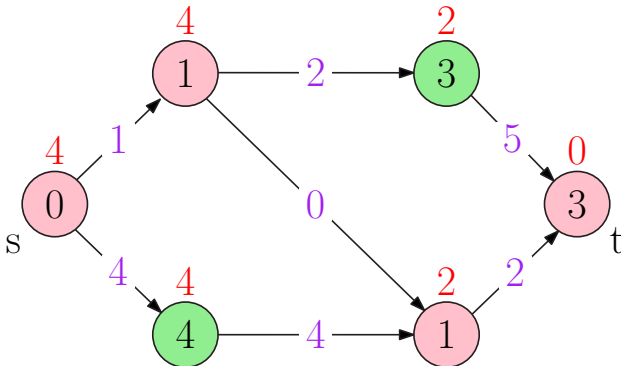


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit reduzierten Kantengewichten

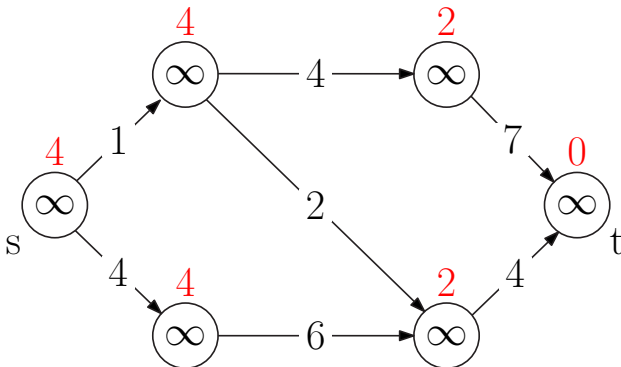


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*

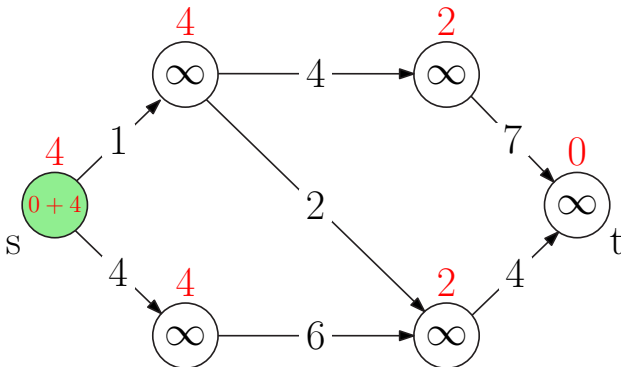


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*

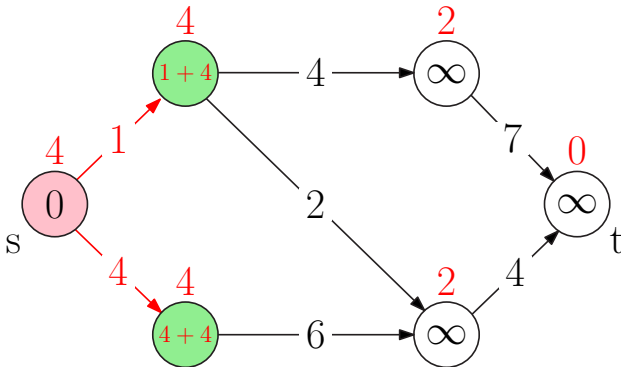


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*

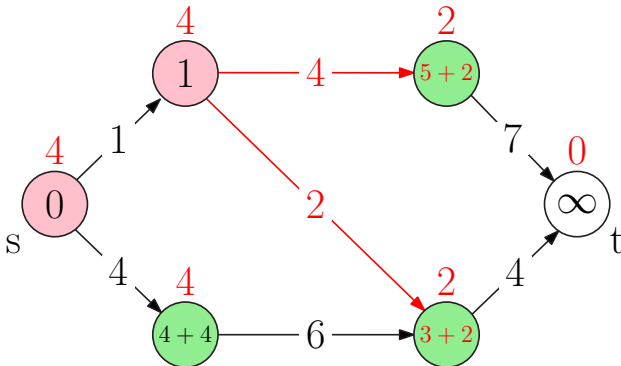


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*

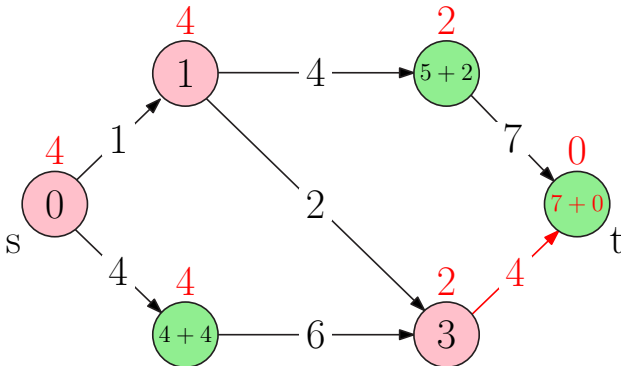


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*

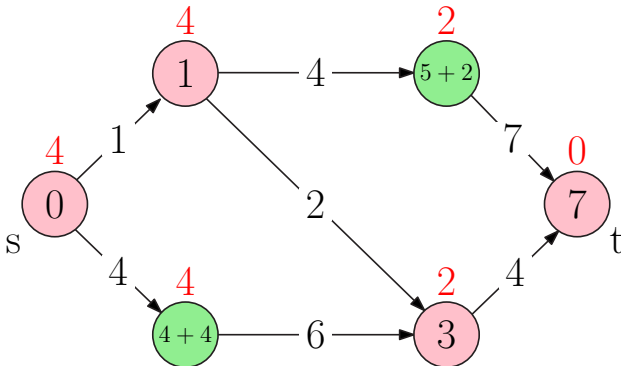


Suche in Graphen

A*-Suche

Beispiel

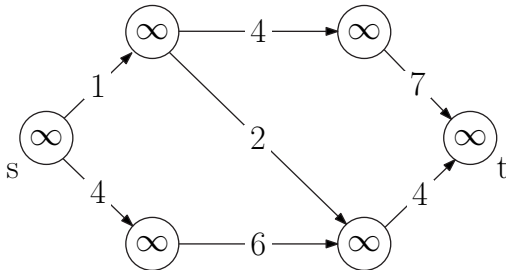
- Suche mit geänderten Schlüsseln in *Priority Queue*



Erster Ansatz

- $\text{pot}(v) := \mu(v, t)$ sei **optimales Potential**
 - Algorithmus besucht nur Knoten auf kürzesten Pfaden
 - **zu hoher Speicherverbrauch** → benötigt alle kürzesten Distanzen!

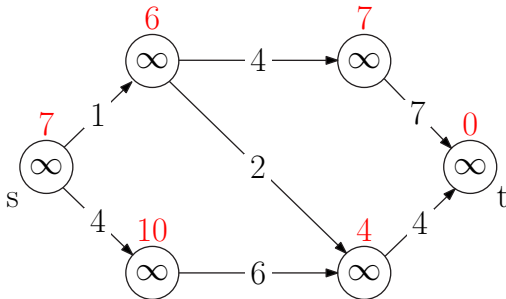
Beispiel



Erster Ansatz

- $\text{pot}(v) := \mu(v, t)$ sei **optimales Potential**
 - Algorithmus besucht nur Knoten auf kürzesten Pfaden
 - **zu hoher Speicherverbrauch** → benötigt alle kürzesten Distanzen!

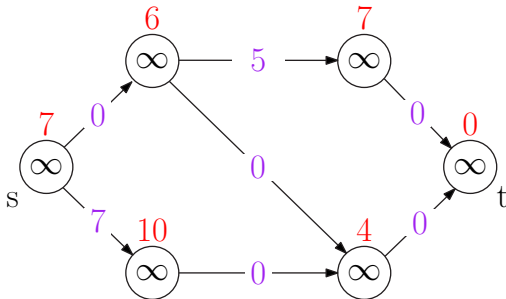
Beispiel



Erster Ansatz

- $\text{pot}(v) := \mu(v, t)$ sei **optimales Potential**
 - Algorithmus besucht nur Knoten auf kürzesten Pfaden
 - **zu hoher Speicherverbrauch** → benötigt alle kürzesten Distanzen!

Beispiel



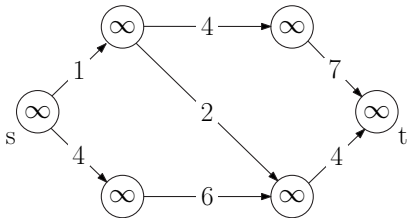
Suche in Graphen

A*-Suche – Landmarken

Kompromiss

- berechne Potential für einige Knoten l (Landmarken)
- bei konkreter Anfrage:
 - wähle Landmarke l hinter dem Ziel t (heuristisch)
 - verwende Potential $\text{pot}(v) := \mu(v, l) - \mu(t, l)$

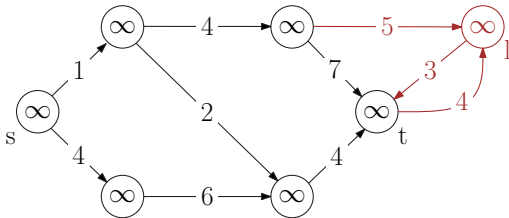
Beispiel



Kompromiss

- berechne Potential für einige Knoten l (Landmarken)
- bei konkreter Anfrage:
 - wähle Landmarke l hinter dem Ziel t (heuristisch)
 - verwende Potential $\text{pot}(v) := \mu(v, l) - \mu(t, l)$

Beispiel



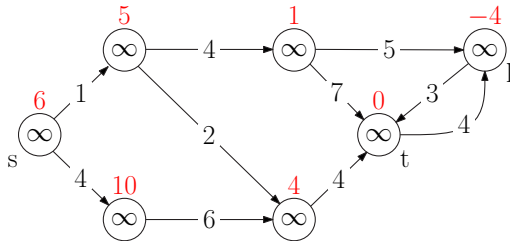
Suche in Graphen

A*-Suche – Landmarken

Kompromiss

- berechne Potential für einige Knoten l (Landmarken)
- bei konkreter Anfrage:
 - wähle Landmarke l hinter dem Ziel t (heuristisch)
 - verwende Potential $\text{pot}(v) := \mu(v, l) - \mu(t, l)$

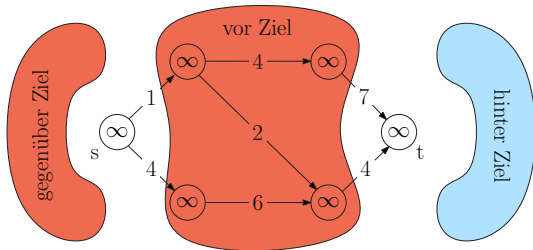
Beispiel



Qualität der Landmarken

- Was passiert bei **schlechter Landmarke** (vor/gegenüber Ziel)?
 - Korrektheit?
 - Laufzeit?

Beispiel



Qualität der Landmarken

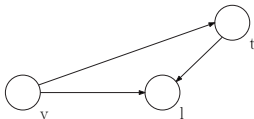
- Korrektheit:
immer korrekt dank **Dreiecksungleichung**

- untere Schranke für Distanz zum Ziel t

$$\text{pot}(v) = \mu(v, l) - \mu(t, l) \leq \mu(v, t) \Leftrightarrow \mu(v, l) \leq \mu(v, t) + \mu(t, l)$$

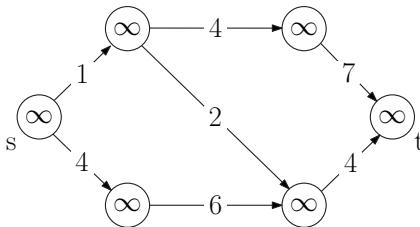
- nicht-negative reduzierte Kantengewichte

$$\begin{aligned}\bar{c}(u, v) &= c(u, v) + \text{pot}(v) - \text{pot}(u) \\ &= c(u, v) + \mu(v, l) - \mu(t, l) - \mu(u, l) + \mu(t, l) \\ &= c(u, v) + \mu(v, l) - \mu(u, l) \geq 0 \quad \forall (u, v) \in E\end{aligned}$$



Qualität der Landmarken

- Laufzeit:
Algorithmus sucht in **falscher Richtung** → **langsam!**
- Beispiel

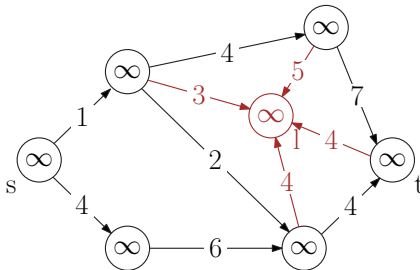


Suche in Graphen

A*-Suche – Landmarken

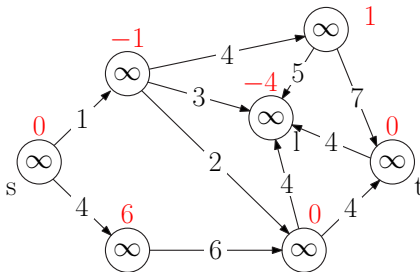
Qualität der Landmarken

- Laufzeit:
Algorithmus sucht in **falscher Richtung** → **langsam!**
- Beispiel



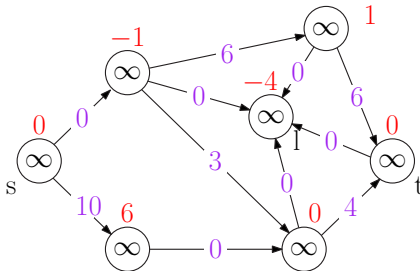
Qualität der Landmarken

- Laufzeit:
Algorithmus sucht in **falscher Richtung** → **langsam!**
- Beispiel



Qualität der Landmarken

- Laufzeit:
Algorithmus sucht in **falscher Richtung** → **langsam!**
- Beispiel



Legende



Kante mit Gewicht 4



Kante mit Gewicht 4, wird gerade in Vorwärtsrichtung betrachtet



Kante mit Gewicht 4, wird gerade in Rückwärtsrichtung betrachtet



Kante mit reduziertem Gewicht 1



neu eingefügte Kante mit Gewicht 4



Knoten v mit oberer Schranke für Distanz vom Start $d[v] = \infty$ und Potential $\text{pot}[v] = 2$



erreichter Knoten v mit oberer Schranke für Distanz vom Start $d[v] = 2$ (in *Priority Queue*)



erreichter Knoten v mit oberer Schranke für Distanz vom Start $d[v] = 1$ (in *Priority Queue*)
(obere Schranke gerade verkleinert)



gescannter Knoten v mit exakter Distanz vom Start $d[v] = 1$ (aus *Priority Queue* entfernt)



Knoten in Vorwärtsrichtung gescannt mit exakter Distanz vom Start $d_{fwd}[v] = 1$,
in Rückwärtsrichtung erreicht mit oberer Schranke für Distanz zum Ziel $d_{bwd}[v] = 3$



Knoten in Vorwärtsrichtung gescannt mit $d_{fwd}[v] = 1$, in Rückwärtsrichtung erreicht mit $d_{bwd}[v] = 2$
(obere Schranke in Rückwärtsrichtung gerade verkleinert)



aktueller Treffpunkt von Vorwärts- und Rückwärtssuche mit minimalem $d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v] = 3$



erreichter Knoten v mit oberer Schranke für Distanz vom Start $d[v] = 2$ (in *Priority Queue*)
(Schlüssel in *Priority Queue* ist $d[v] + \text{pot}[v] = 3 + 2$)



Zeiger auf Vorgänger
(in Vorwärtsrichtung)



Zeiger auf Vorgänger
(in Rückwärtsrichtung)

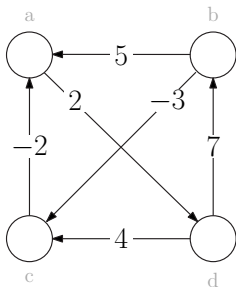


neu eingefügter Knoten

- n -mal Dijkstra
- Negative Kantengewichte (aber keine negativen Kreise)
 - n -mal Bellman-Ford
 - Langsam $O(n^2m)$
 - → Kombiniere Dijkstra, Bellman-Ford und Knotenpotentiale
 - $O(nm + n^2 \log n)$

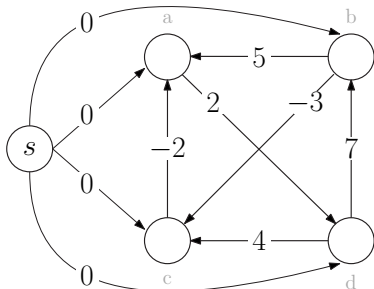
Suche in Graphen

All-to-all



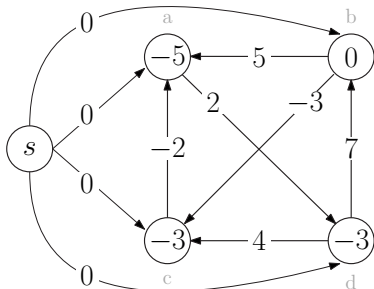
Suche in Graphen

All-to-all



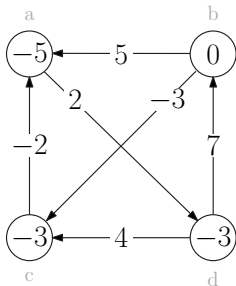
Suche in Graphen

All-to-all



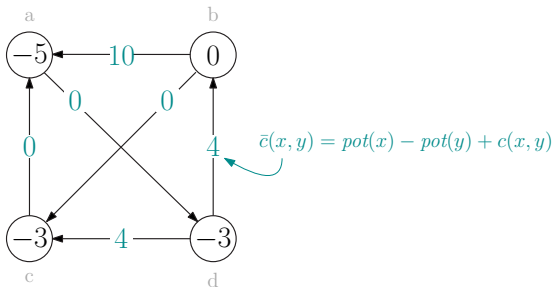
Suche in Graphen

All-to-all



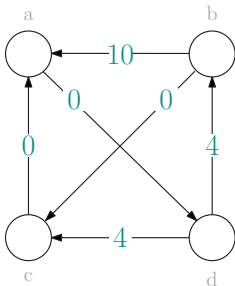
Suche in Graphen

All-to-all



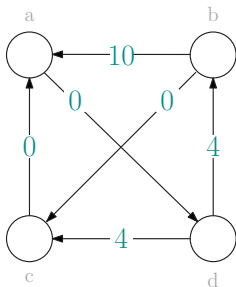
Suche in Graphen

All-to-all



Suche in Graphen

All-to-all



$$\bar{\mu}(a, b) = 4$$

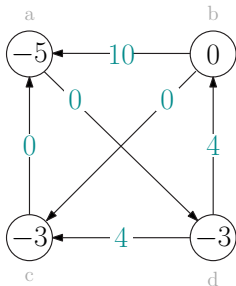
$$\bar{\mu}(b, a) = 0$$

$$\bar{\mu}(c, d) = 0$$

...

Suche in Graphen

All-to-all



$$\bar{\mu}(a, b) = 4$$

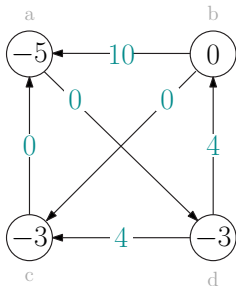
$$\bar{\mu}(b, a) = 0$$

$$\bar{\mu}(c, d) = 0$$

...

Suche in Graphen

All-to-all



$$\mu(a, b) = \bar{\mu}(a, b) + \text{pot}(b) - \text{pot}(a) = 9$$

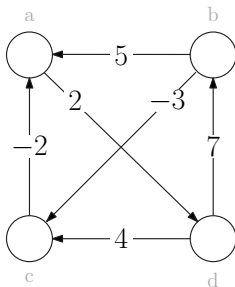
$$\mu(b, a) = -5$$

$$\bar{\mu}(c, d) = 0$$

...

Suche in Graphen

All-to-all



$$\mu(a, b) = \bar{\mu}(a, b) + \text{pot}(b) - \text{pot}(a) = 9$$

$$\mu(b, a) = -5$$

$$\bar{\mu}(c, d) = 0$$

...

Ende!



Feierabend!