Karlsruher Institut für Technologie

Übung 2 – Algorithmen II

Michael Axtmann – *michael.axtmann@kit.edu*

http://algo2.iti.kit.edu/AlgorithmenII_WS16.php

Institut für Theoretische Informatik - Algorithmik II

Organisatorisches

Vorlesung / Übung

- Gebt uns Feedback!
  - Forum, eMail, Sprechstunde, ...
  - Übungsthemen nach euren Wünschen

Übungsblätter

- Aufgaben Blatt 1 seit Dienstag online
- Programmieraufgaben in `C++`
- viele Aufgaben :-(, ...
  ...viele Übungsmöglichkeiten :-)

Organisatorisches

Klausur

- Mittwoch, den 22.02.2017, von 14:30 bis 16:30 Uhr
- Nachklausur im kommenden Sommersemester

Inhalt

Themenübersicht für heute

- KaHIP
- Ganzzahlige *Priority Queues*
  - *Bucket Queues*
  - *Radix Heaps*
- *Average case* Analyse am Beispiel MST

Implementierung einer BFS

Spezielle *Priority Queues*

monoton, ganzzahlig

Bedingungen

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

  (bezogen auf minimalen Schlüssel *min*)

Spezielle *Priority Queues*

monoton, ganzzahlig

Warum das Ganze?

- spezialisierte Datenstruktur $\longrightarrow$ 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

$O(\cdot)$	*Bin. Heap*	*Fib. Heap*	*Bkt. Queue*	*Radix Heap*
$T_{decreaseKey}$	$\log n$	1	1	1
T_{insert}	$\log n$	1	1	$\log C$
$T_{deleteMin}$	$\log n$	$\log n$	C	$\log C$
$T_{Djkstra}$	$(m+n)\log n$	$m + n \log n$	$m + nC$	$m + n \log C$

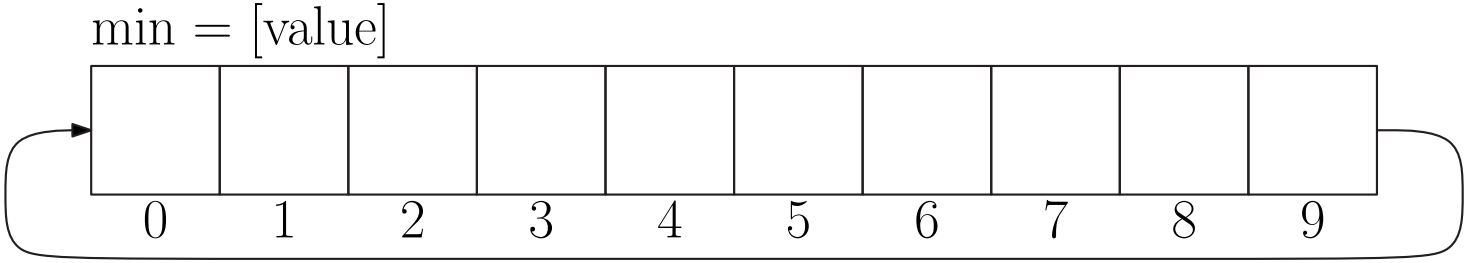
Bucket Queues

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 $C \longrightarrow$ # Buckets $|B| = C + 1$



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

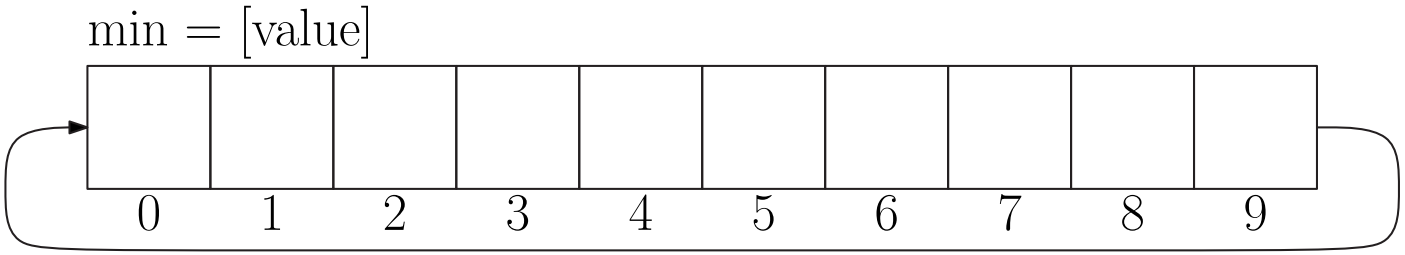
Bucket Queues

Ablauf:

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



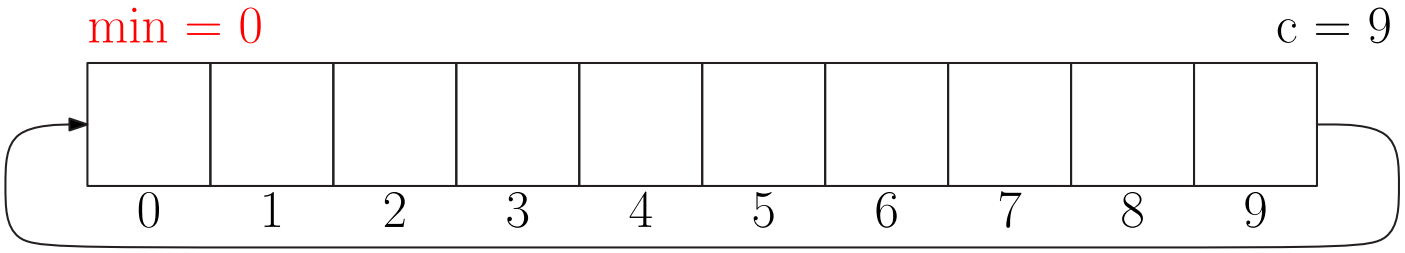
Bucket Queues

Ablauf:

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



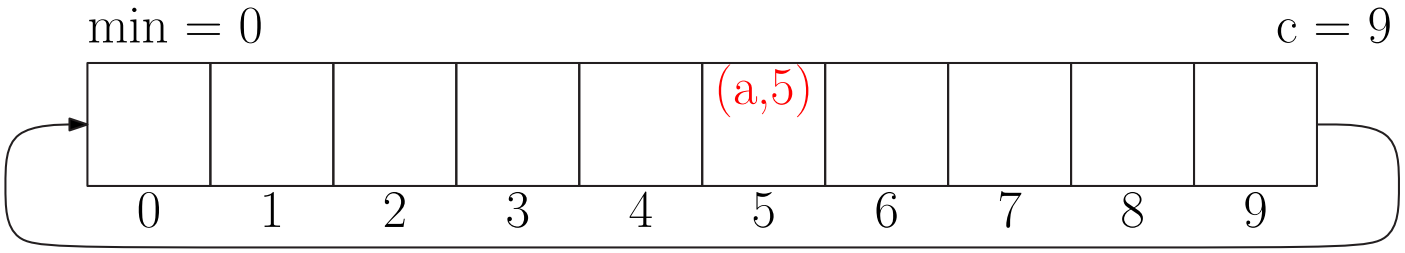
Bucket Queues

Ablauf:

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



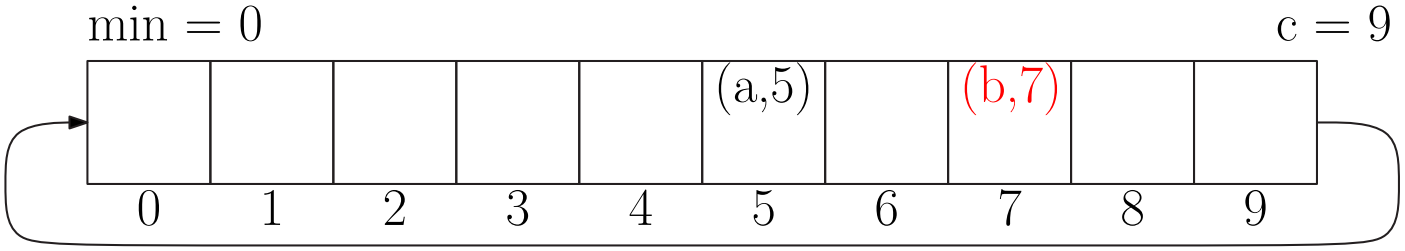
Bucket Queues

Ablauf:

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



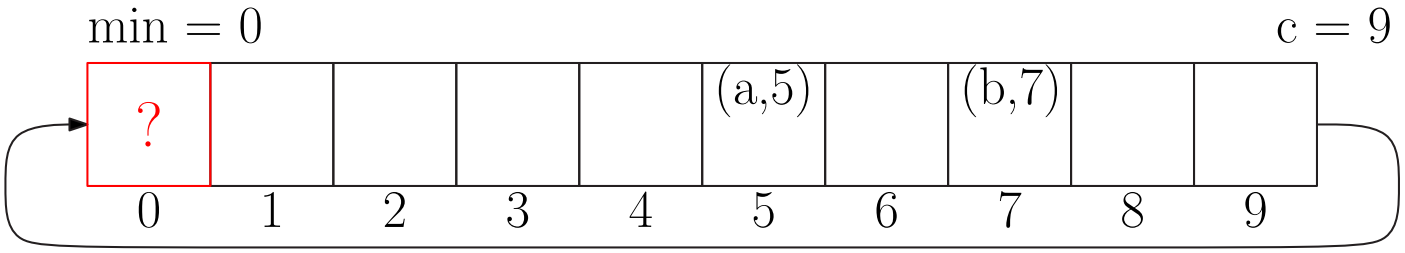
Bucket Queues

Ablauf:

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



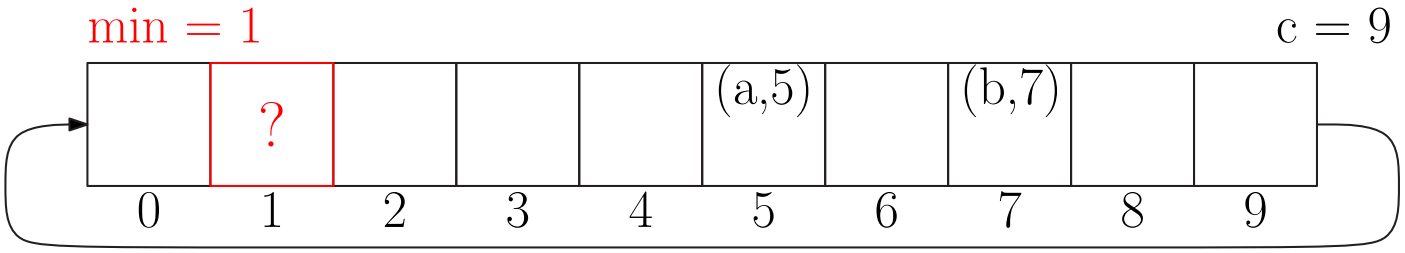
Bucket Queues

Ablauf:

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



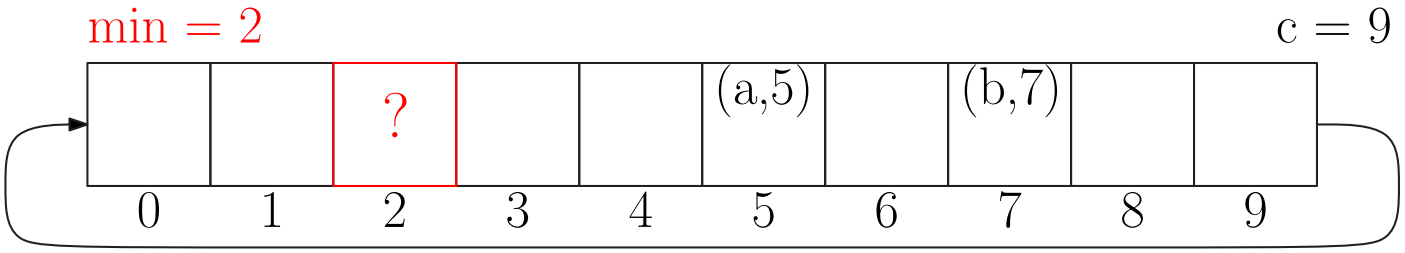
Bucket Queues

Ablauf:

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



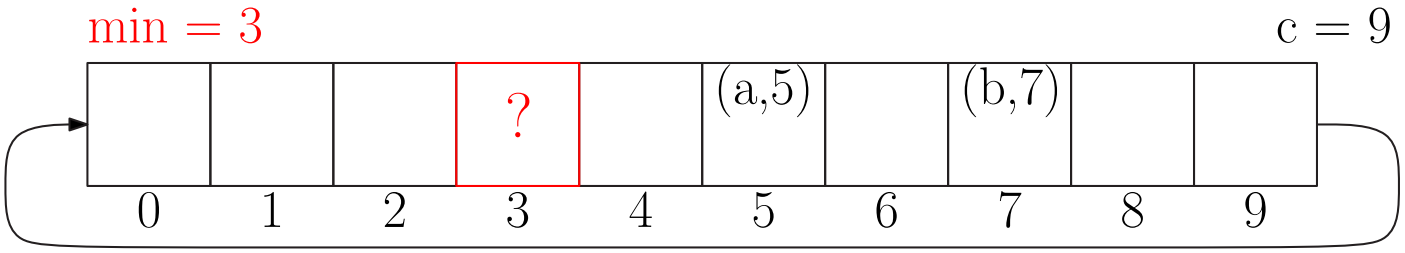
Bucket Queues

Ablauf:

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



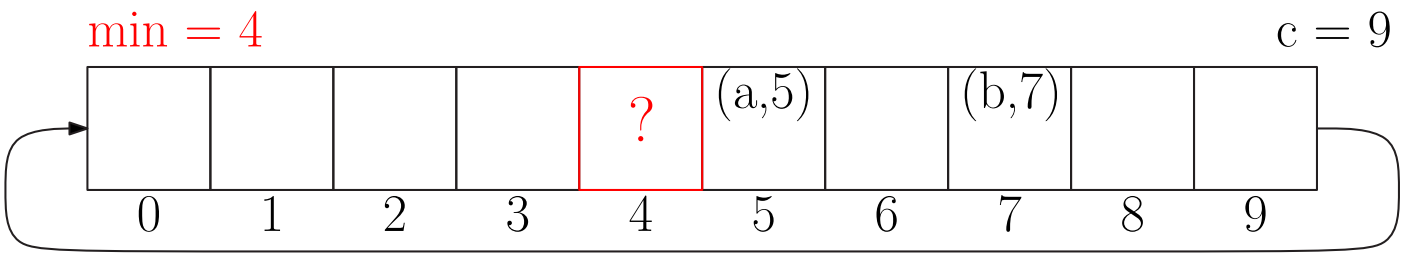
Bucket Queues

Ablauf:

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



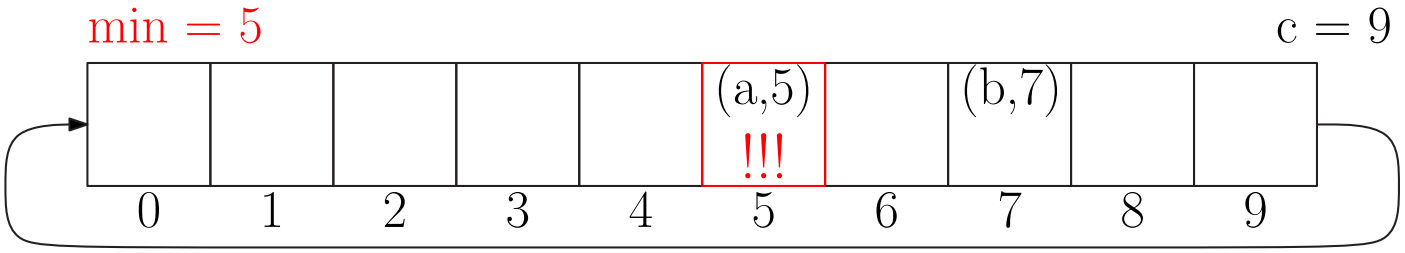
Bucket Queues

Ablauf:

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



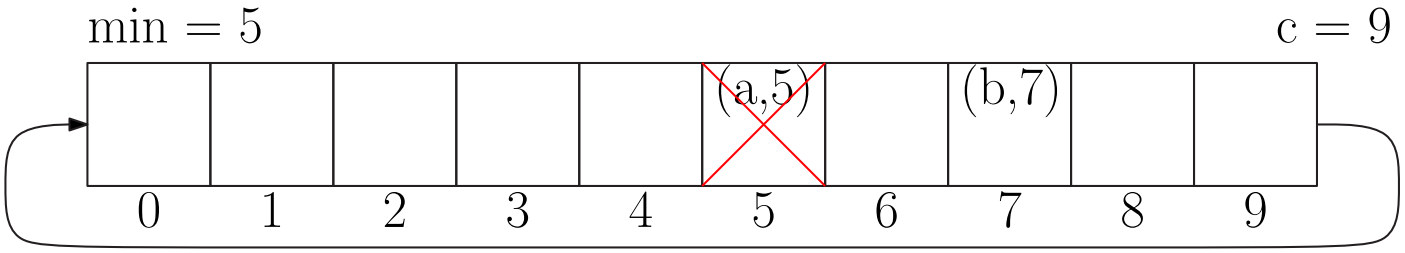
Bucket Queues

Ablauf:

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



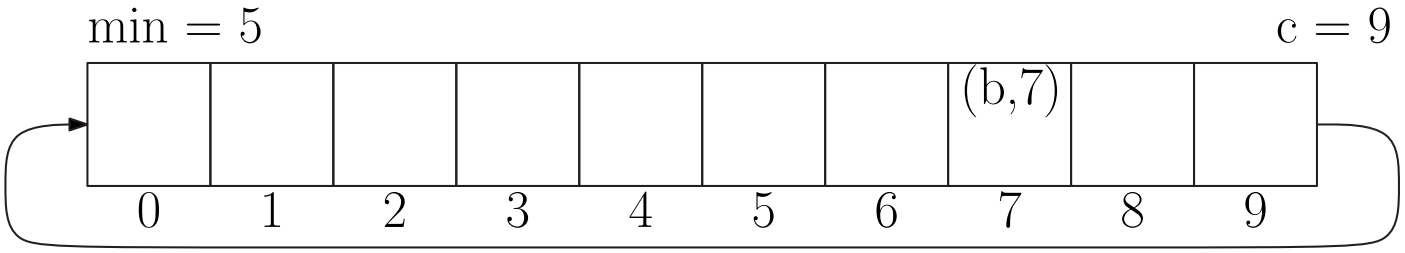
Bucket Queues

Ablauf:

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



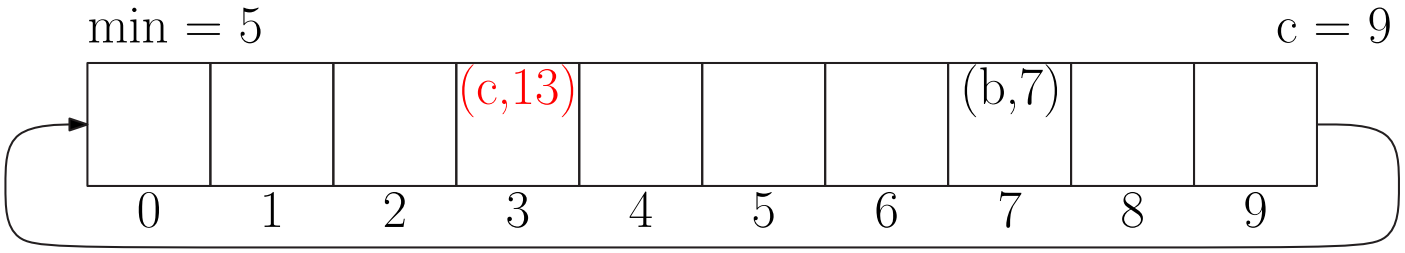
Bucket Queues

Ablauf:

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



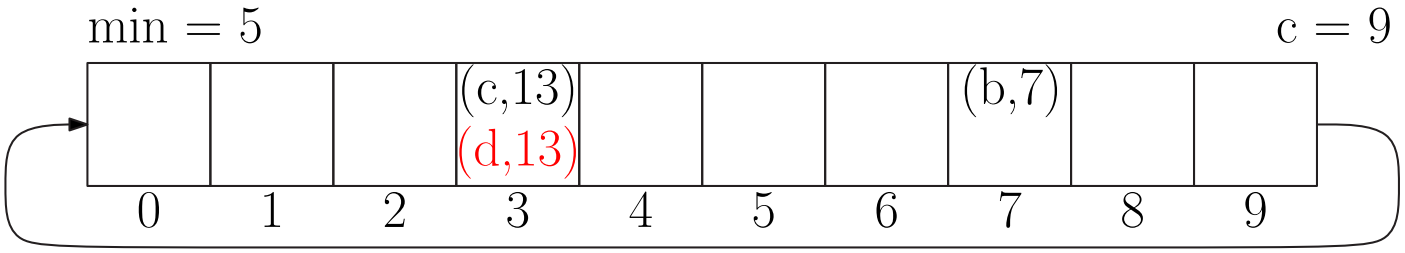
Bucket Queues

Ablauf:

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



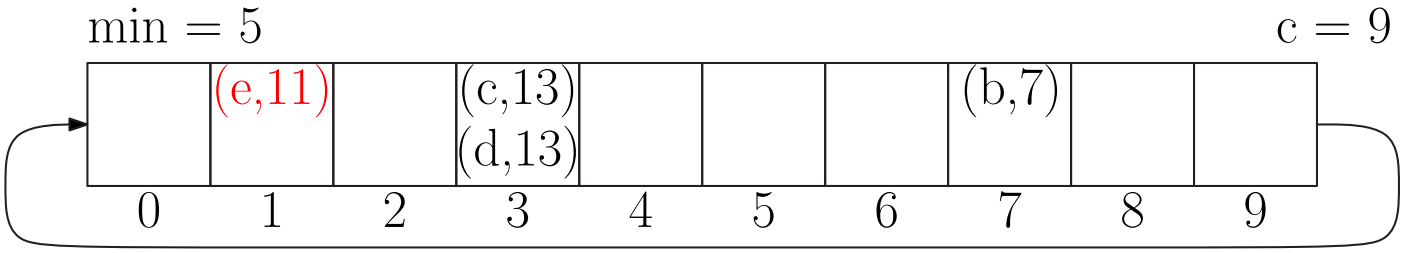
Bucket Queues

Ablauf:

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



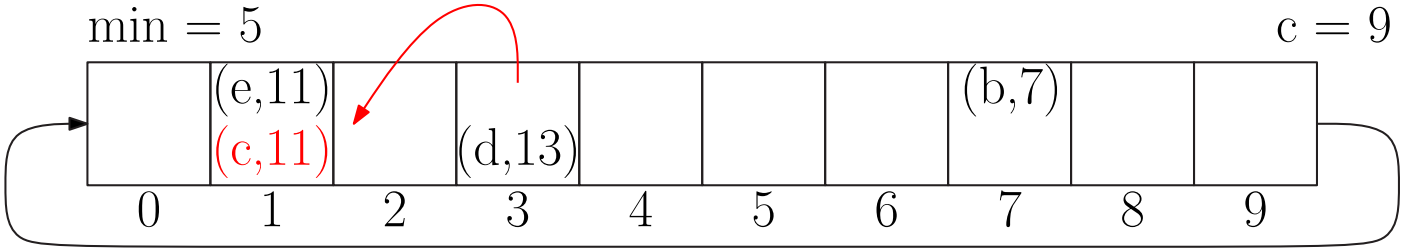
Bucket Queues

Ablauf:

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



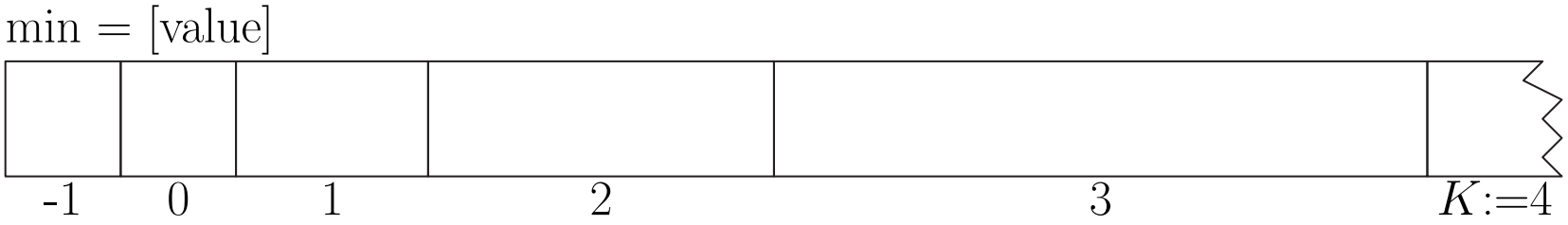
Radix Heaps

Aufbau:

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

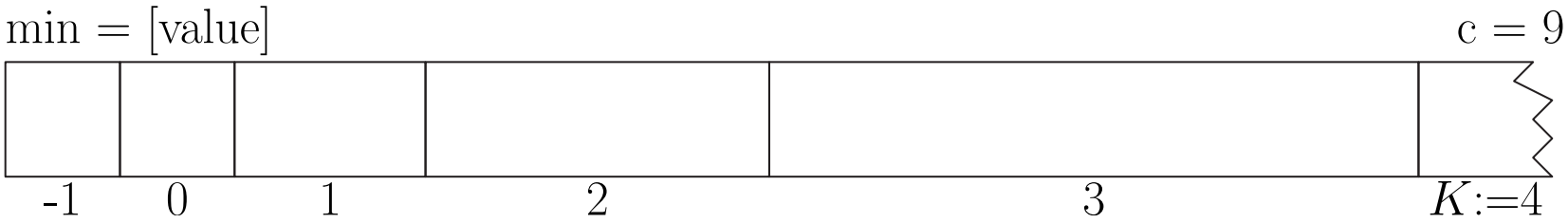
gegeben:

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



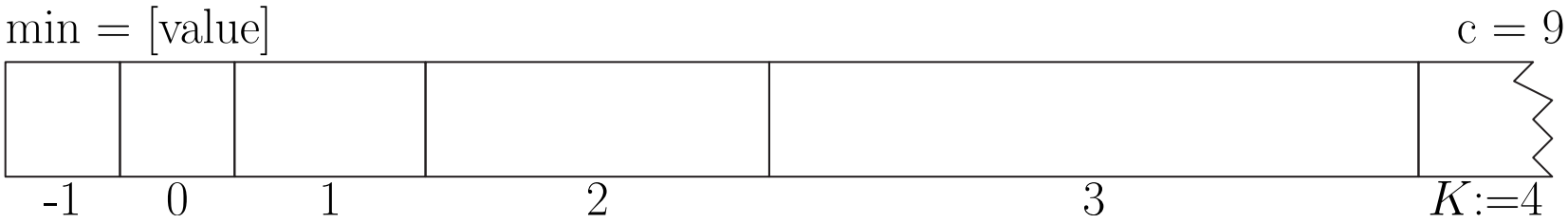
$$C = 9 \longrightarrow K + 2 = (\lfloor \log C \rfloor + 1) + 2 = (3 + 1) + 2 = 6$$

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

$\rightarrow$ Bucket K ist *overflow* Bucket

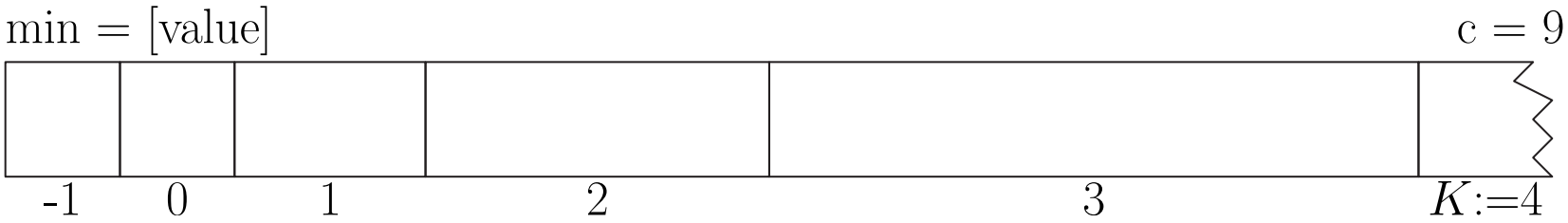
$\rightarrow$ höchstwertiges unterschiedliche Bit ist i

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

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

$\rightarrow$ leer, wenn Bit i von min gesetzt

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

$\rightarrow$ Bucket K ist *overflow* Bucket

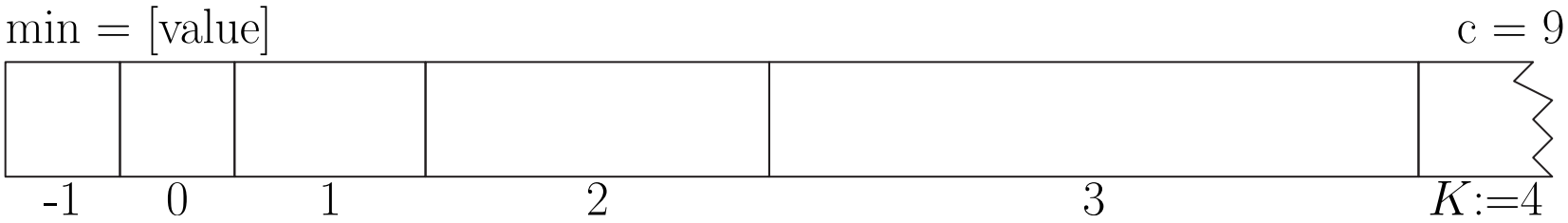
$\rightarrow$ höchstwertiges unterschiedliche Bit ist i

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

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

$\rightarrow$ leer, wenn Bit i von min gesetzt

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

$\rightarrow$ Bucket K ist *overflow* Bucket

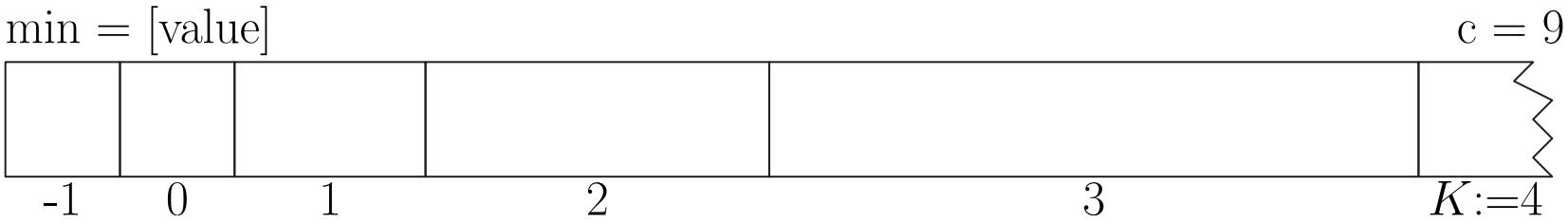
$\rightarrow$ höchstwertiges unterschiedliche Bit ist i

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

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

$\rightarrow$ leer, wenn Bit i von min gesetzt

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

$\rightarrow$ Bucket K ist *overflow* Bucket

$\rightarrow$ höchstwertiges unterschiedliche Bit ist i

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

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

$\rightarrow$ leer, wenn Bit i von min gesetzt

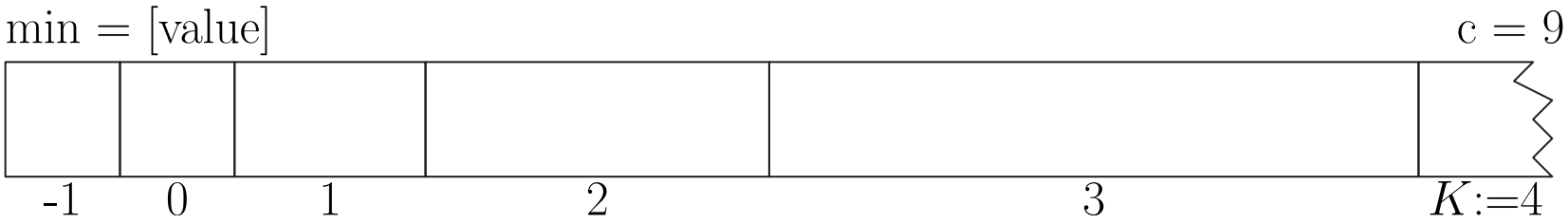
Beispiele

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

$\text{msd}(\texttt{00001010},\ \texttt{01001000}) = 6$

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

Radix Heaps

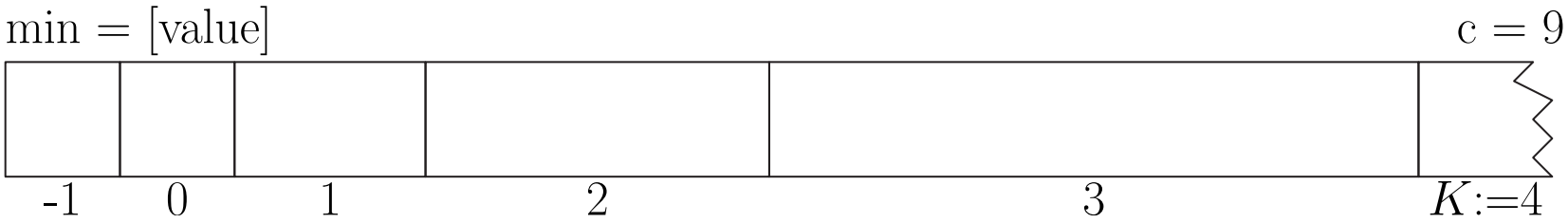


Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

Beispiele
$min := \texttt{00001000}\ (08)$
$\text{msd}(\texttt{00001000},\ \texttt{01******}) = 6 \longrightarrow 2^6 = 64$ Werte
$\text{msd}(\texttt{00001000},\ \texttt{0000101*}) = 1 \longrightarrow 2^1 = 2$ Werte

Radix Heaps

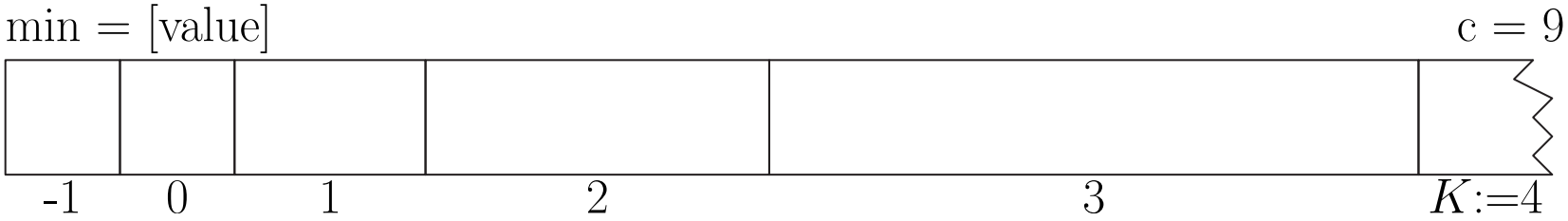


Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

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

Beispiele
$min := \texttt{00001000}\ (08)$
$\text{msd}(\texttt{00001000},\ \texttt{00000110}) = 3 \longrightarrow$ kann nicht passieren, da $6 < 8$
$\text{msd}(\texttt{00001000},\ \texttt{00000100}) = 3 \longrightarrow$ kann nicht passieren, da $4 < 8$

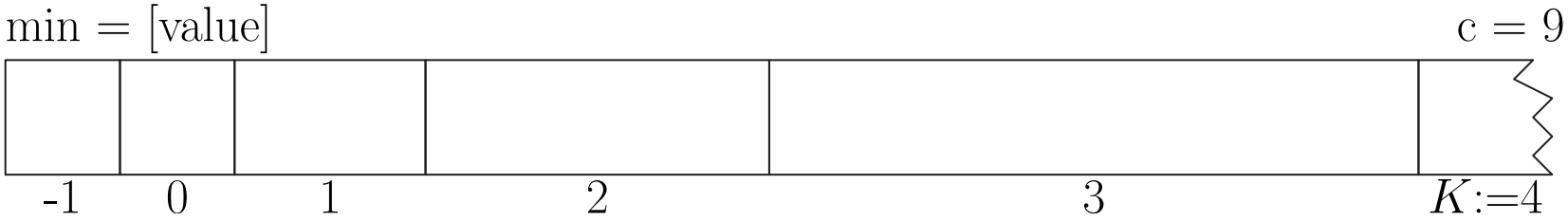
Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-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..69+C ?

Radix Heaps



Welche Schlüssel kommen in welches Bucket?

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-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 !	- !

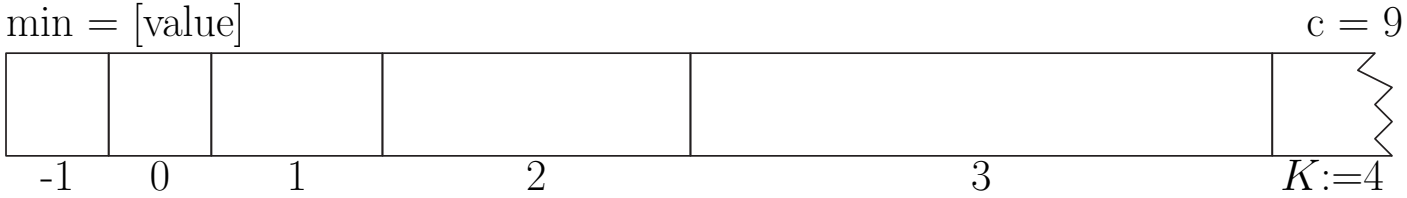
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



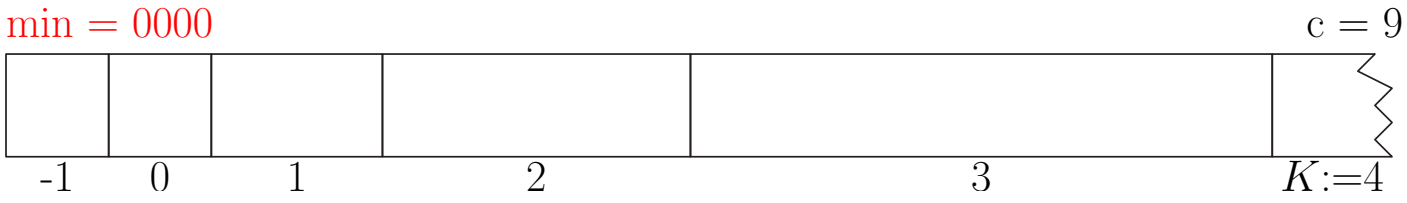
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



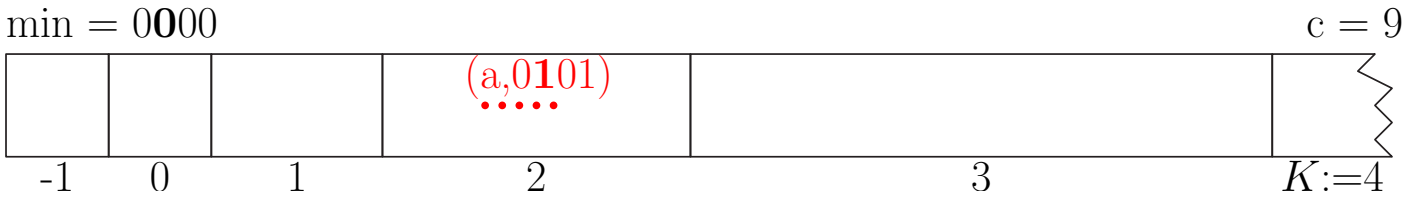
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



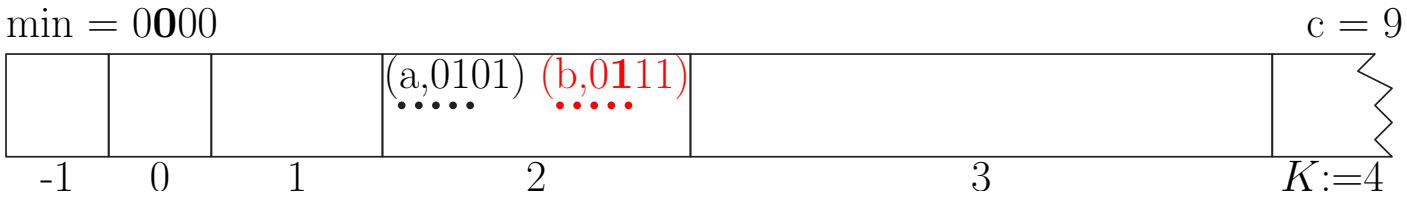
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



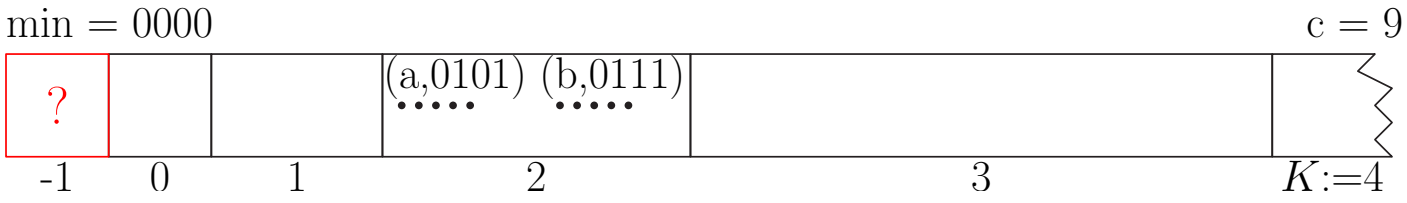
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



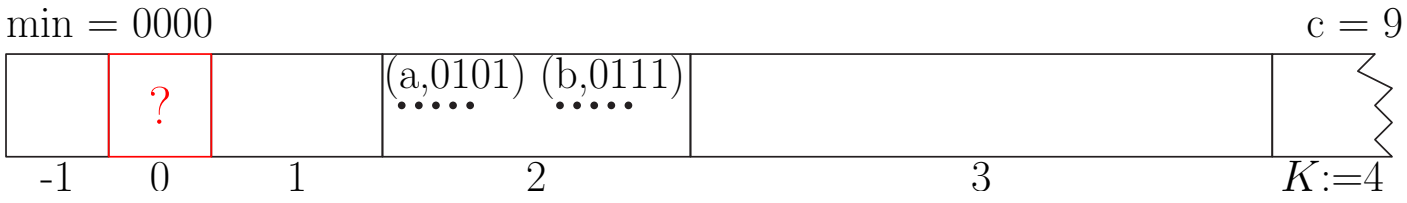
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



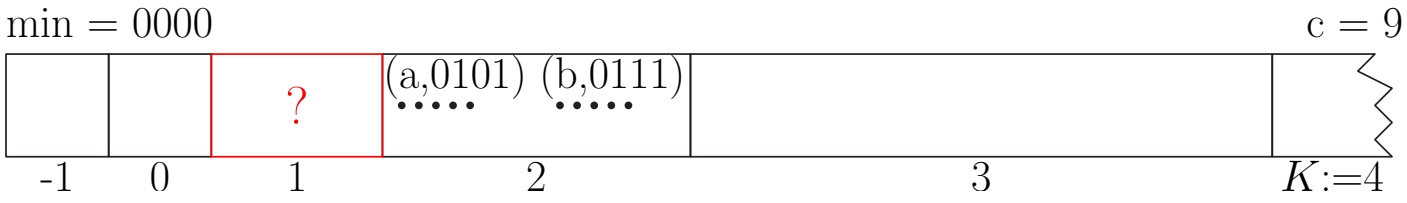
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



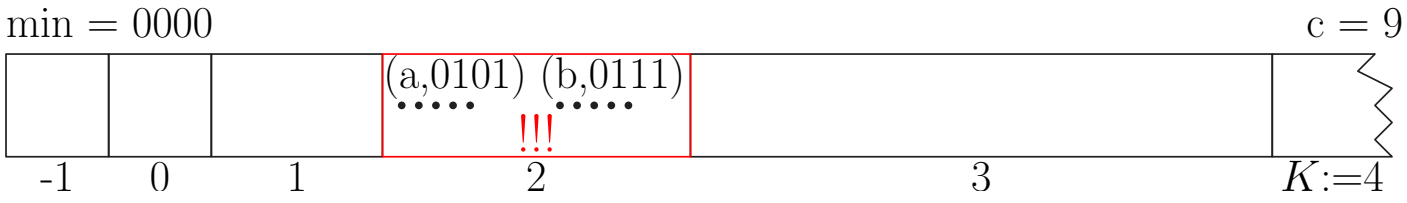
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



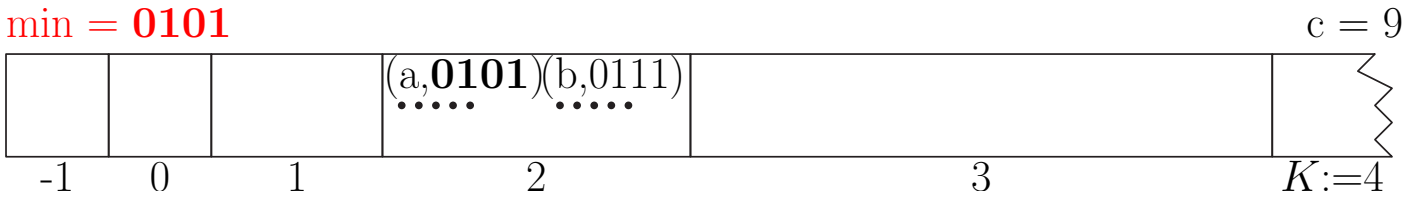
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



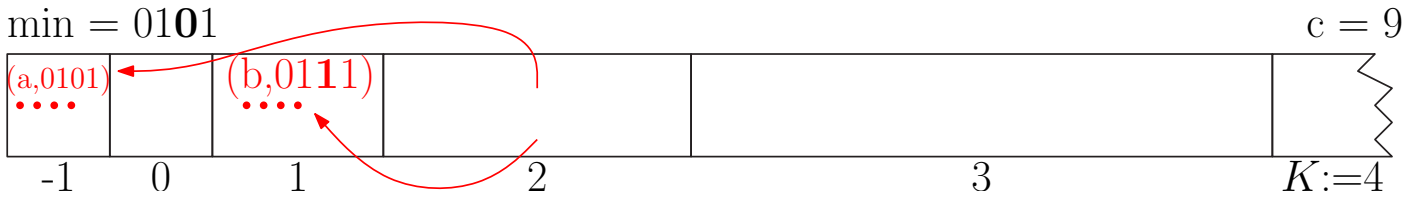
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert):

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



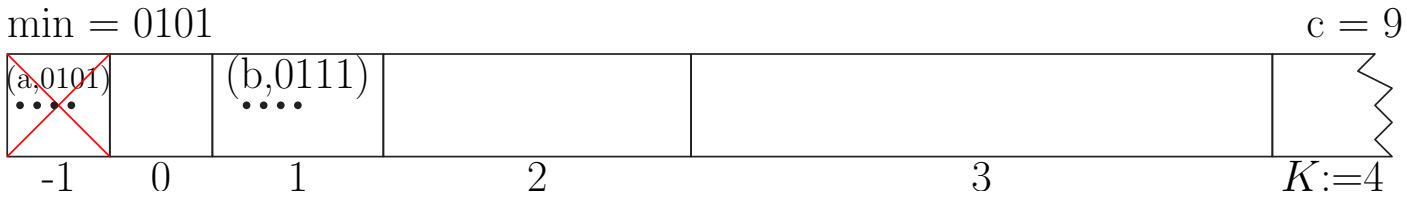
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



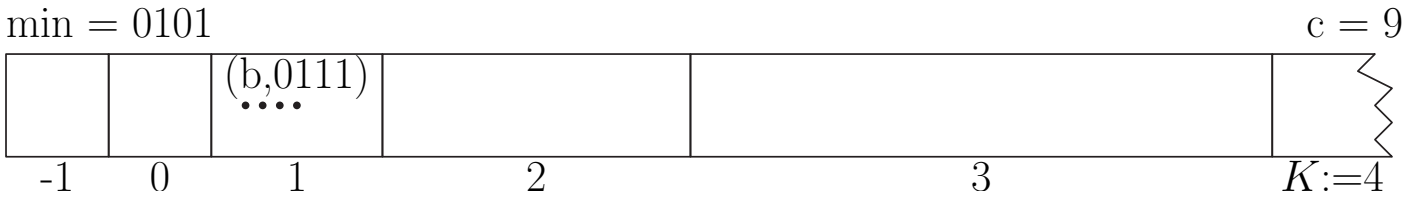
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



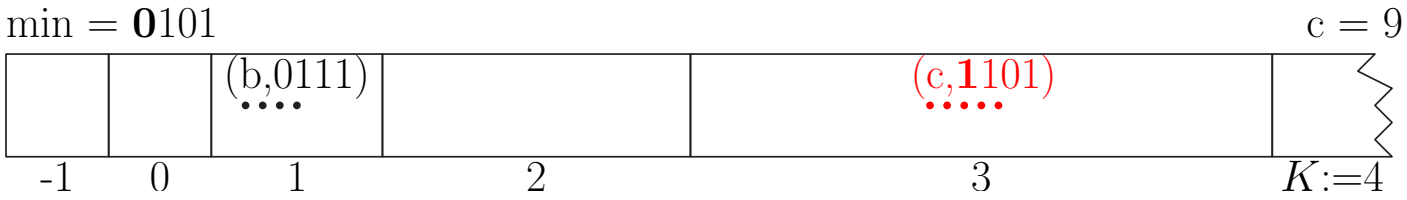
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



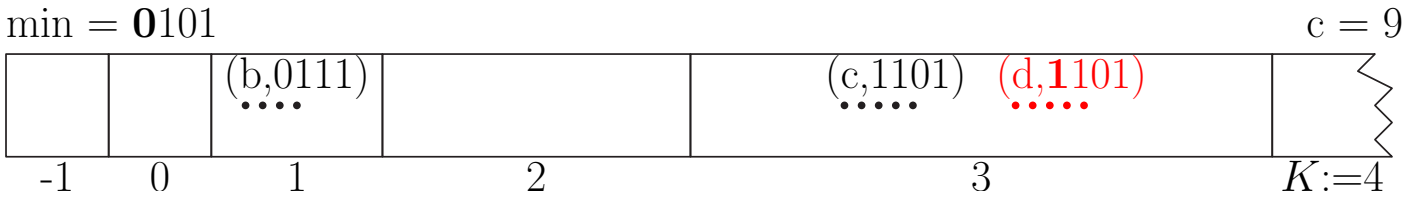
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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)`



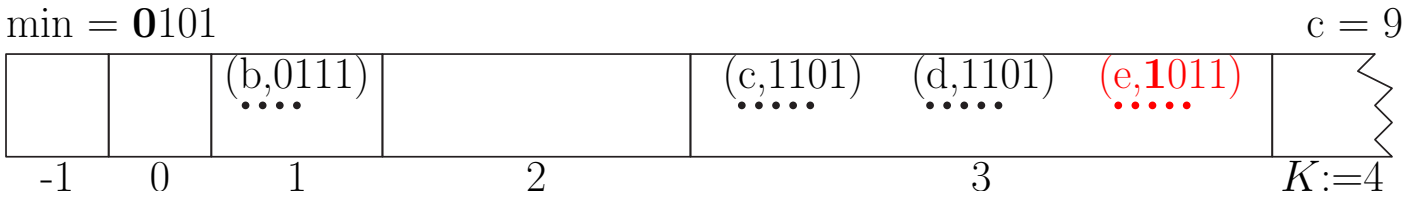
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

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



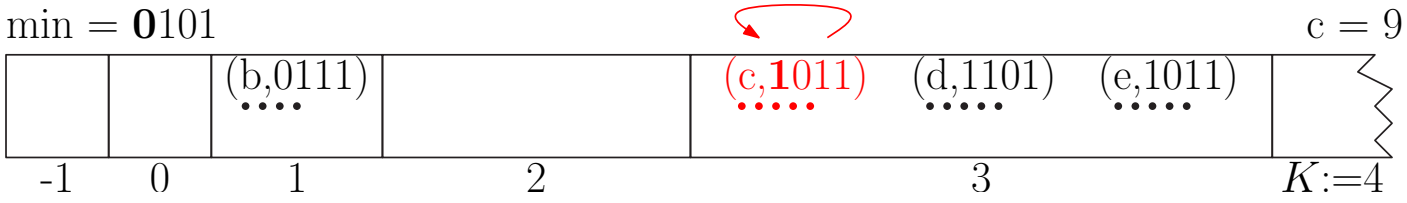
Radix Heaps

Ablauf und Laufzeiten (amortisiert)*:*

`insert`:	Einfügen in Bucket $B[\min(\mathrm{msd}(min, key), K)]$	$O(\log C)$
`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:

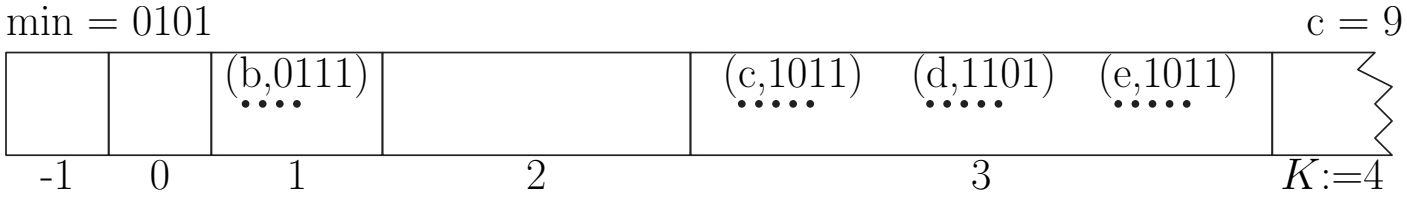
- `insert(a,5)`
- `insert(b,7)`
- `deleteMin()`
- `insert(c,13)`
- `insert(d,13)`
- `insert(e,11)`
- `decreaseKey(c,11)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

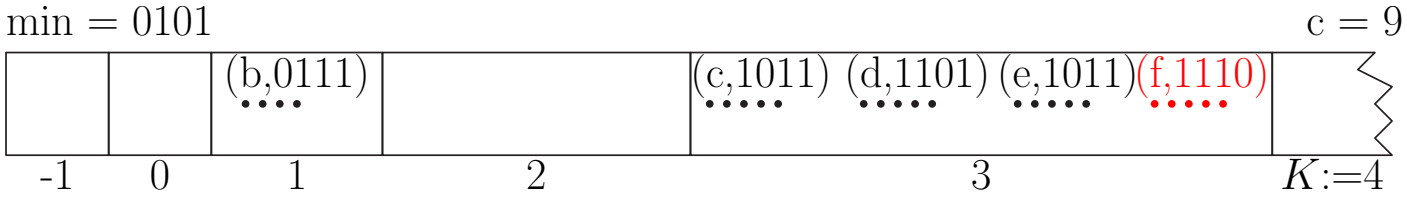
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

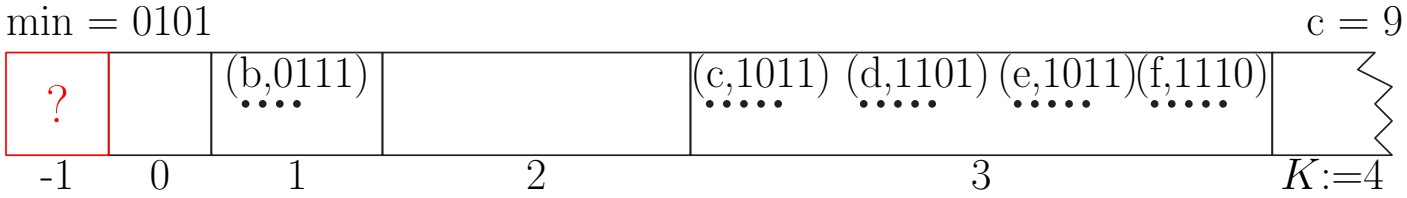
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

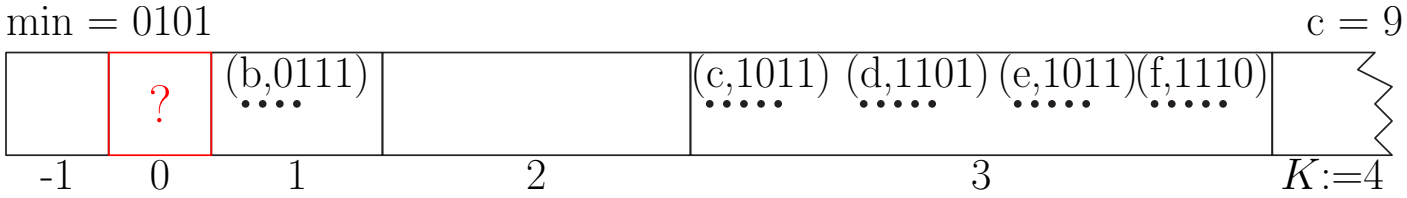
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

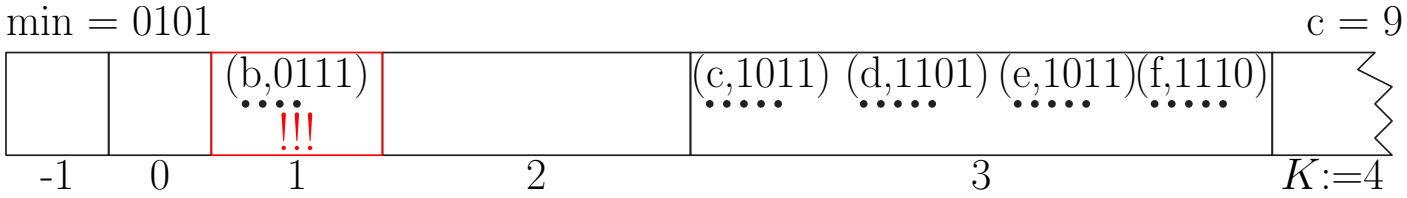
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

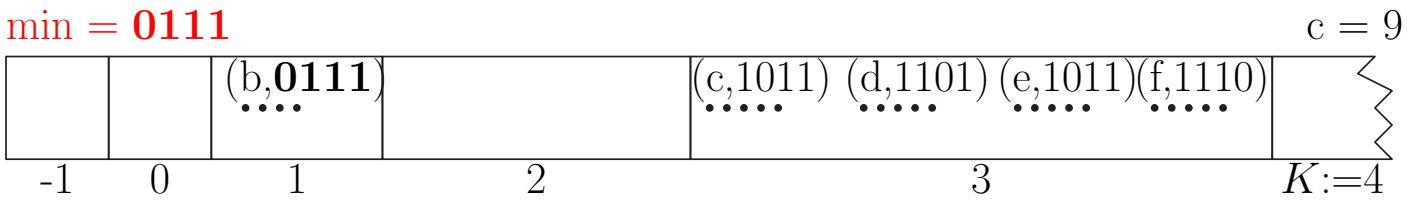
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

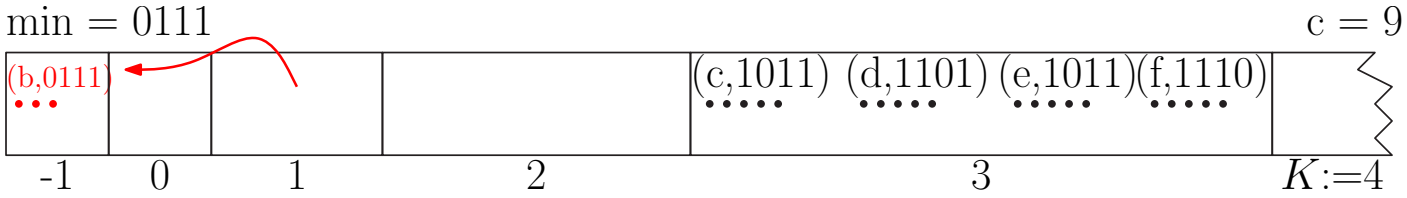
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

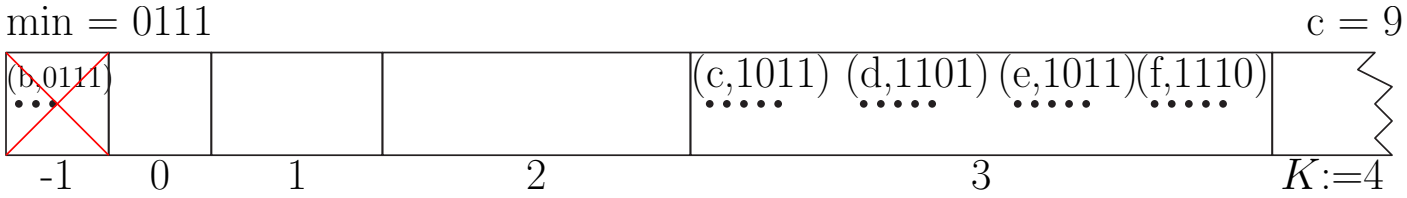
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

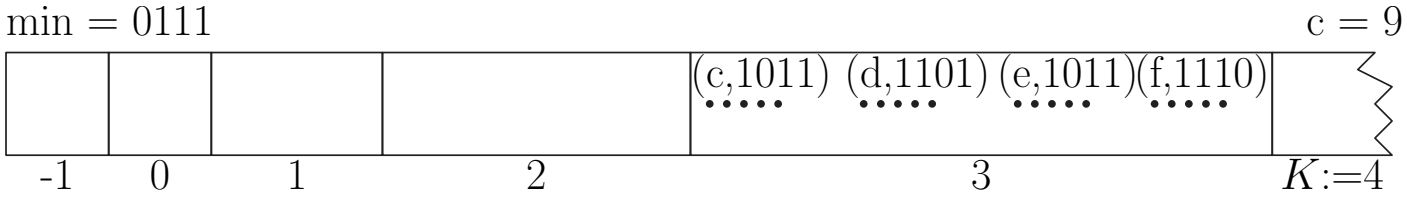
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

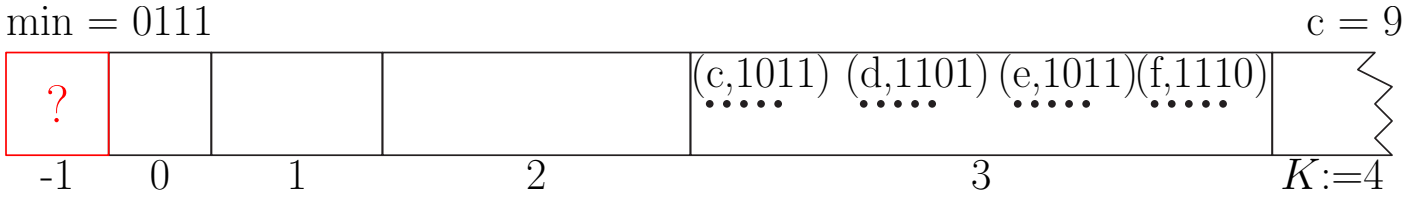
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

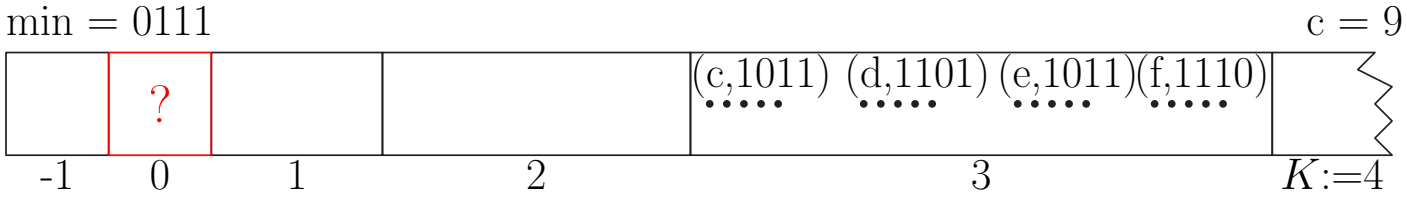
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

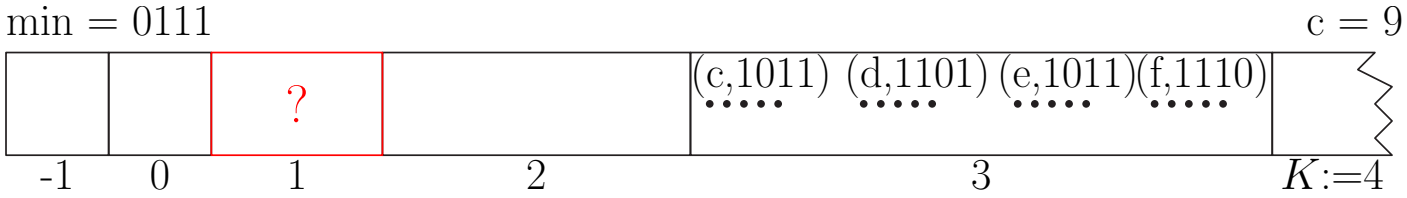
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

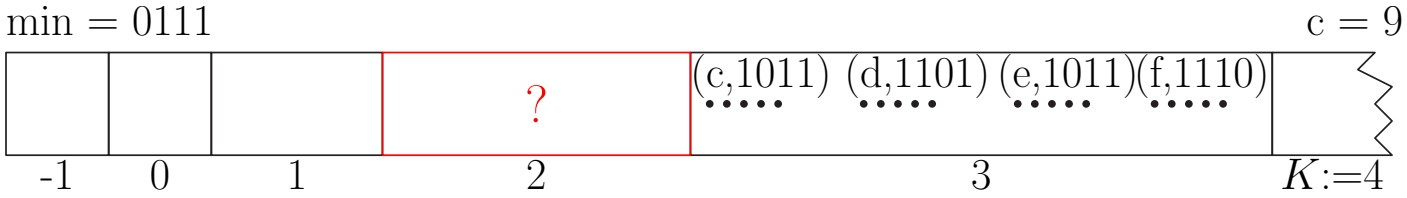
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

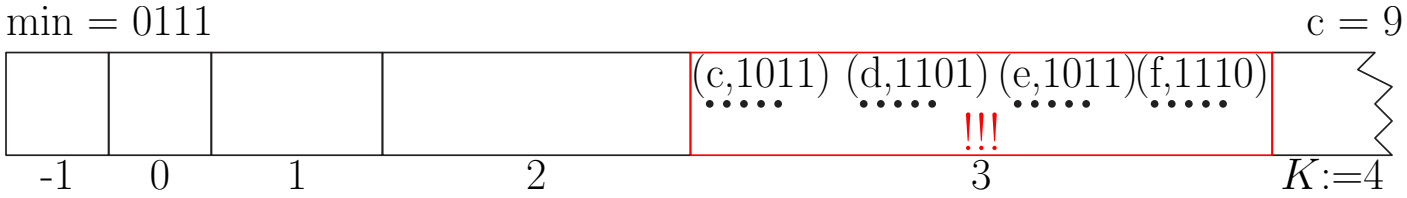
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

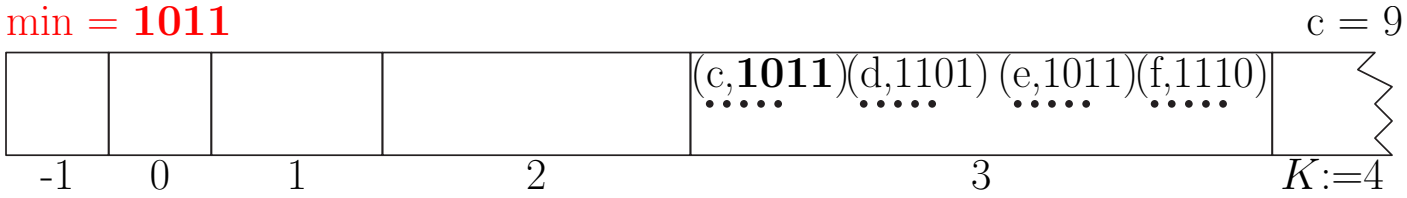
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

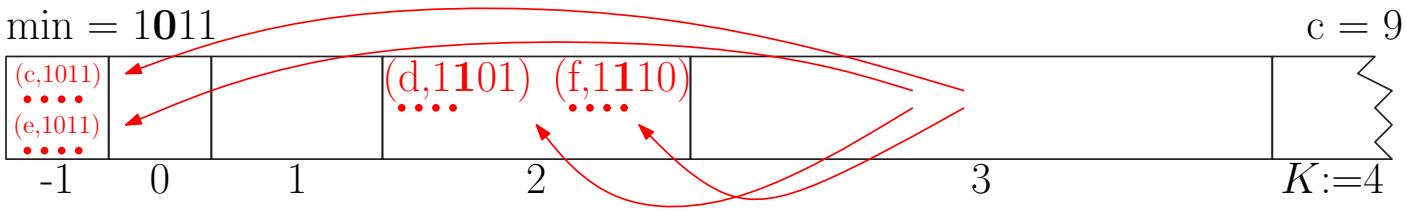
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

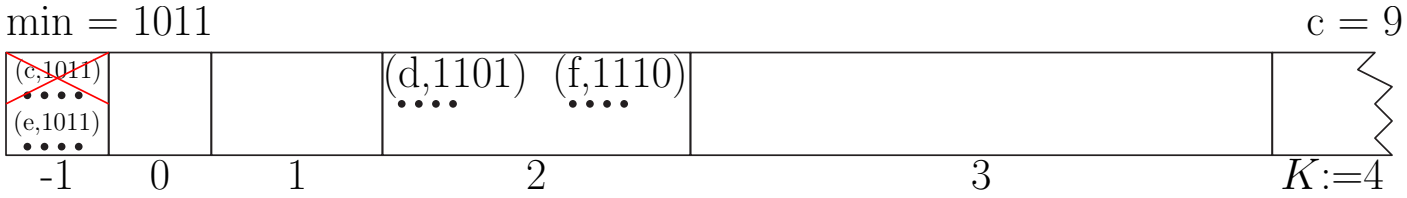
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

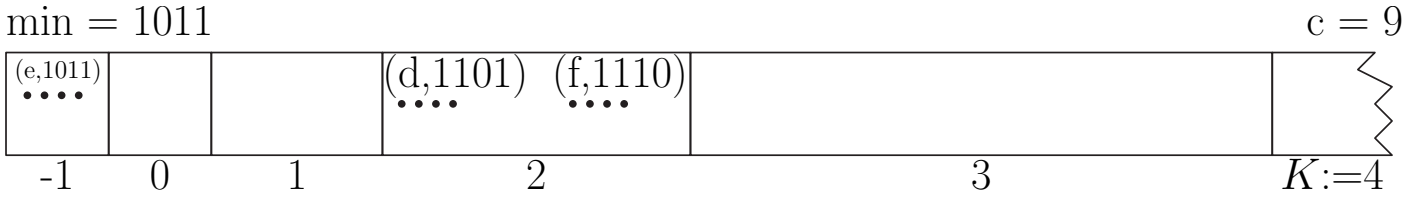
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

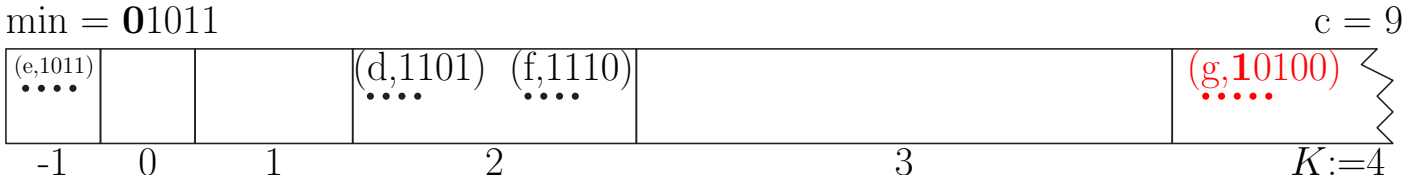
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

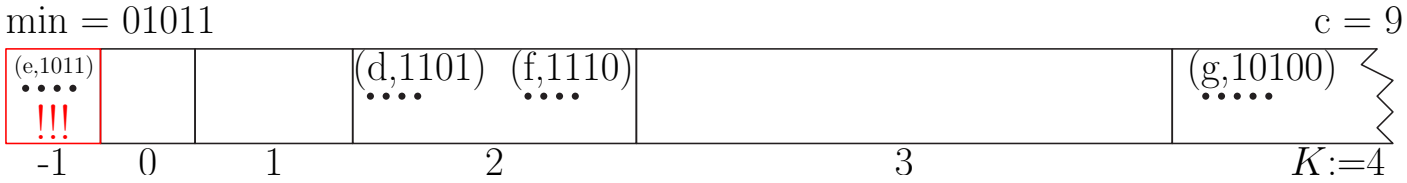
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

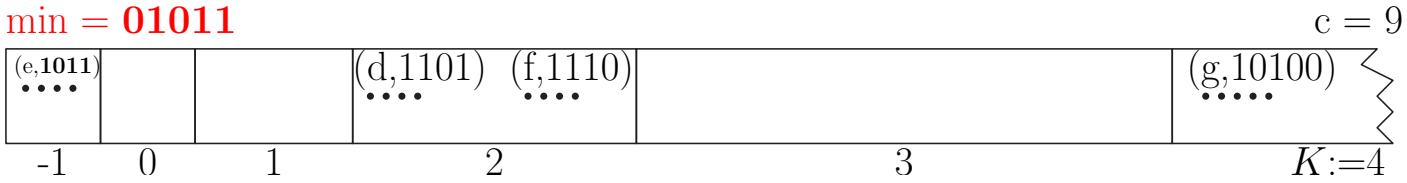
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

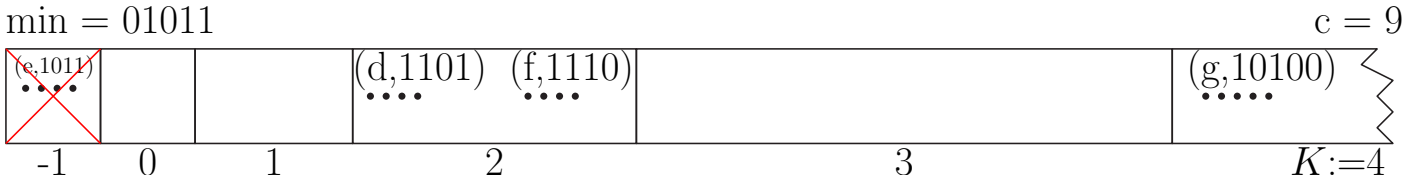
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

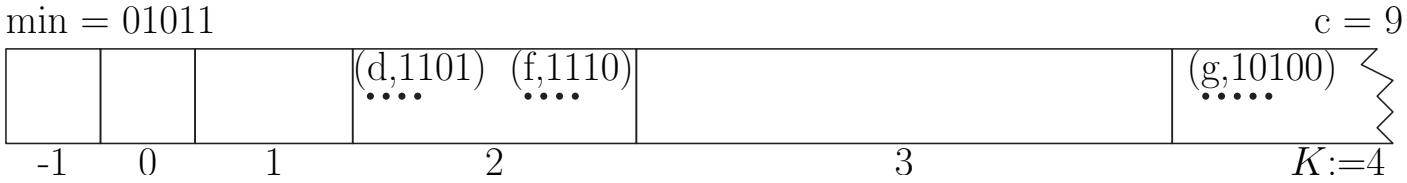
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

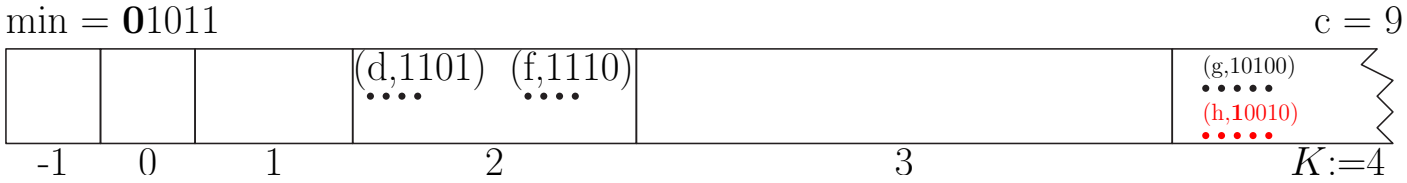
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`

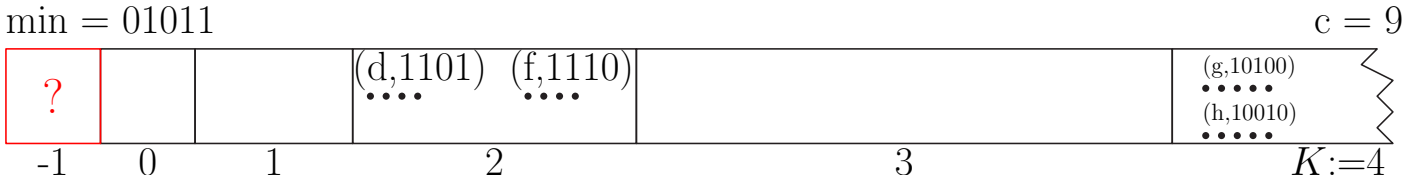


- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`

Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

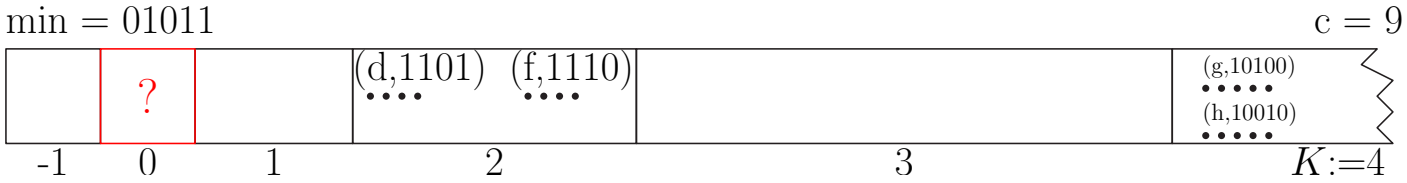
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

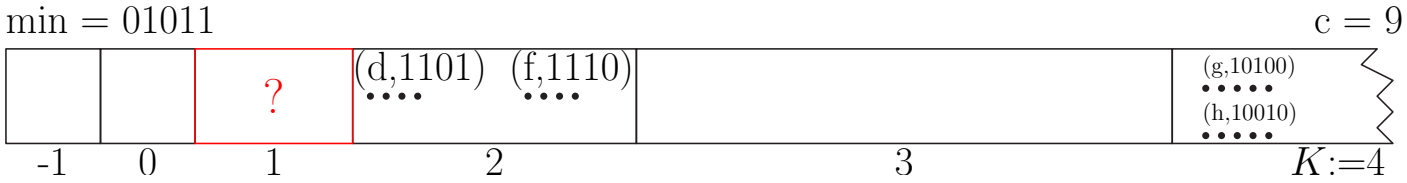
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

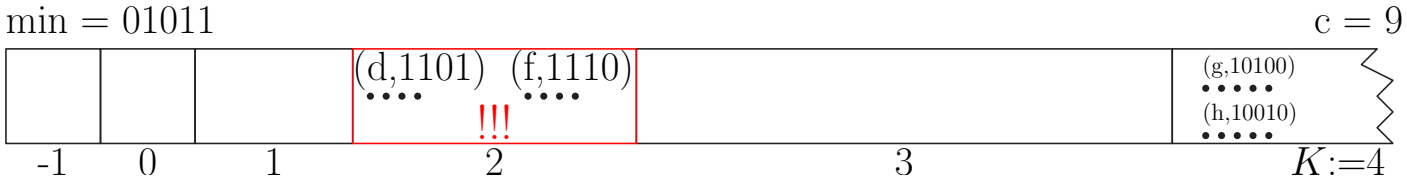
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

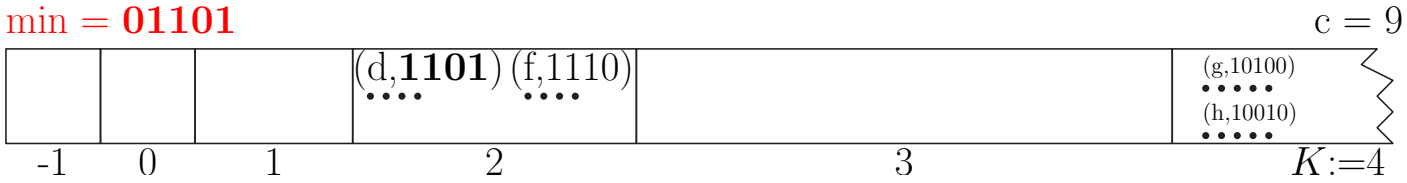
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

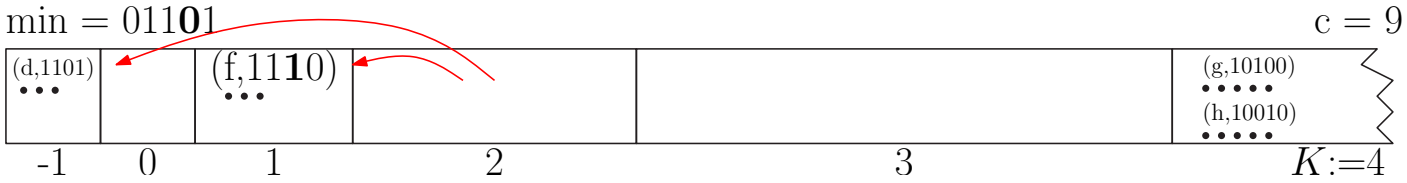
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

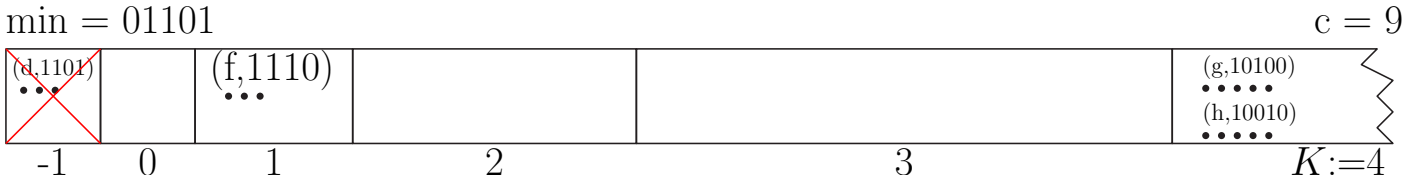
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

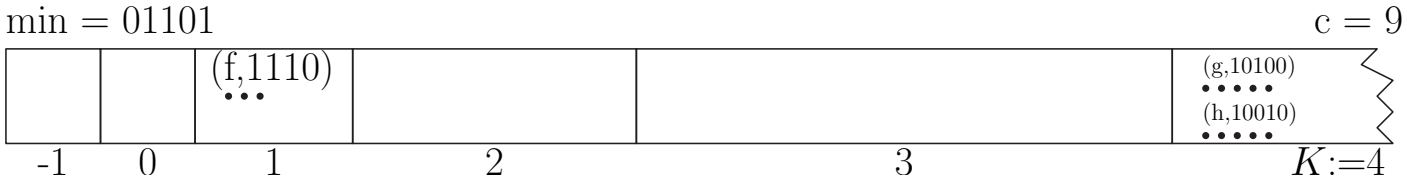
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

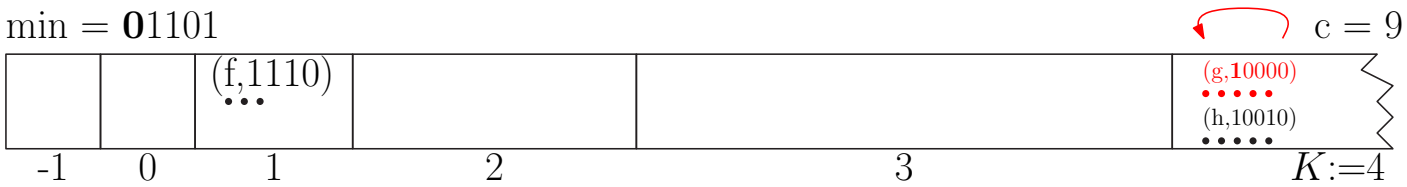
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

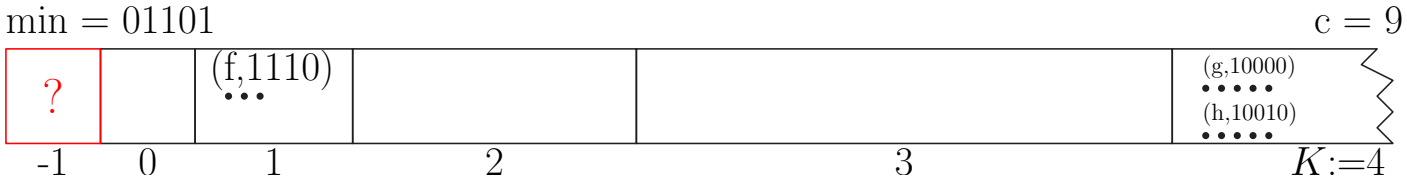
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

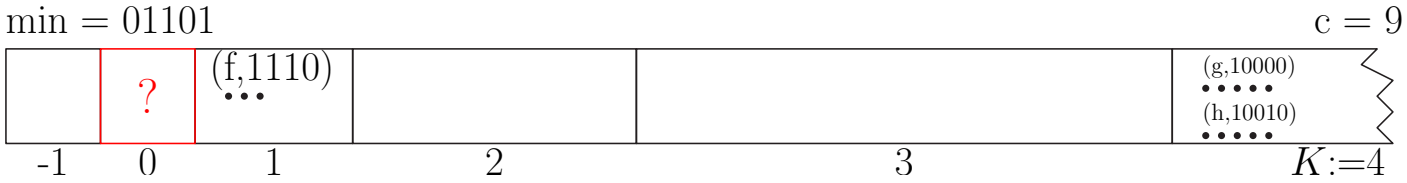
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

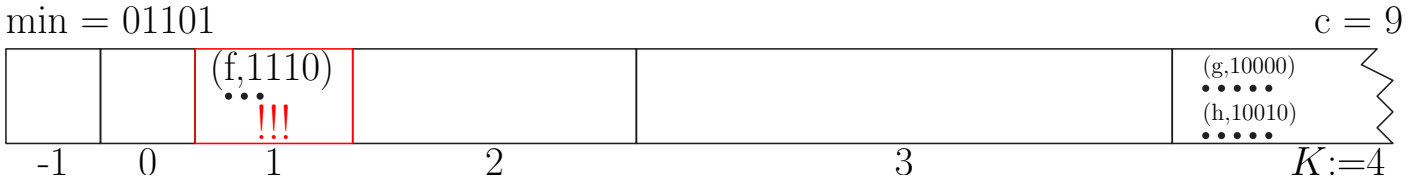
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

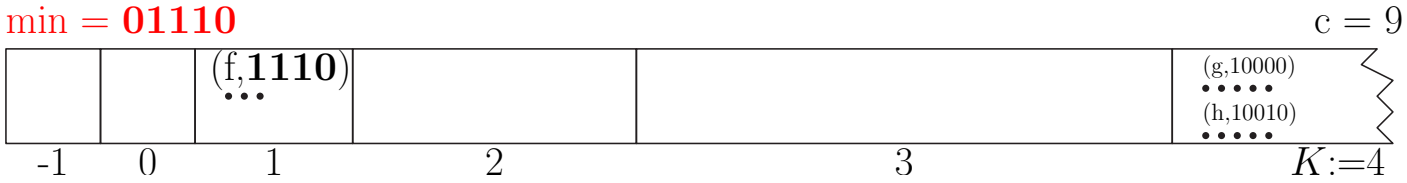
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

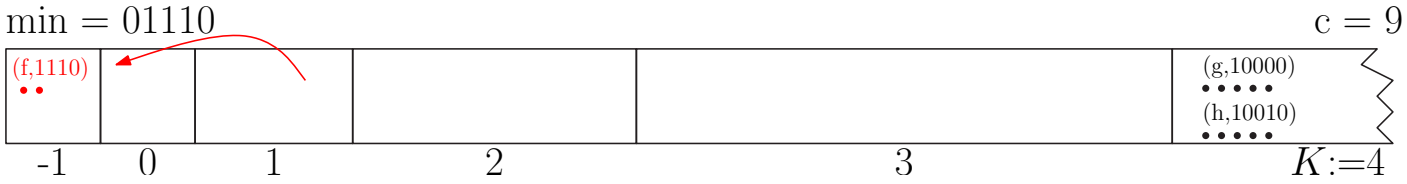
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

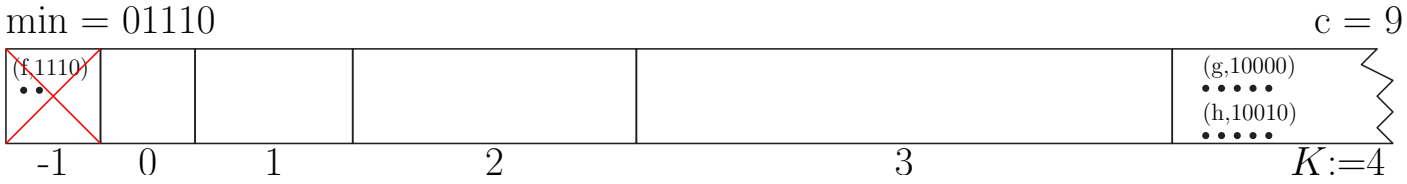
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

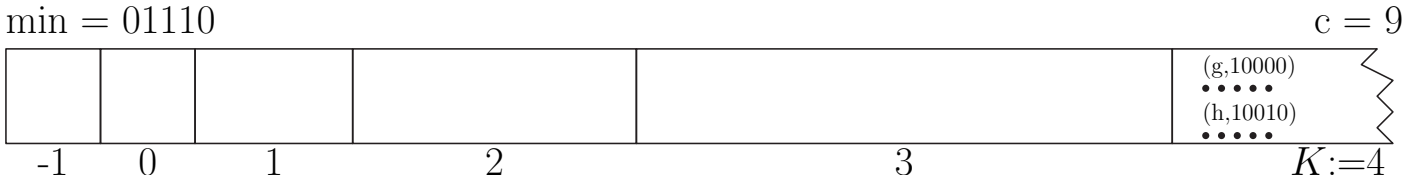
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

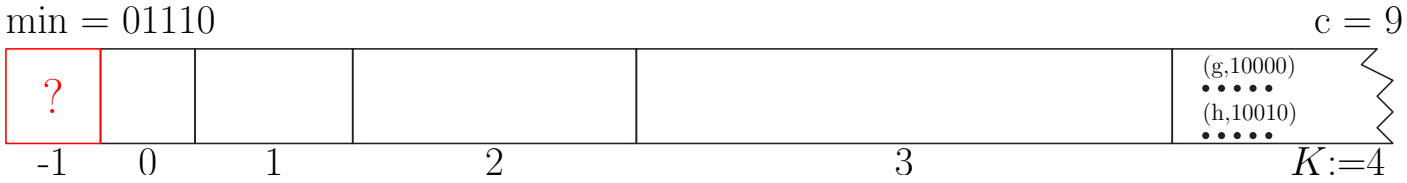
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

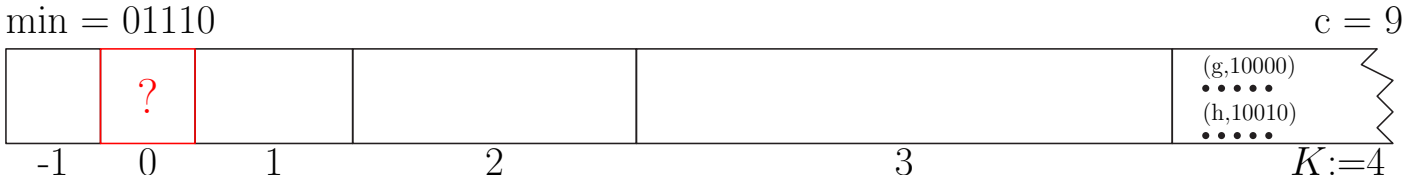
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

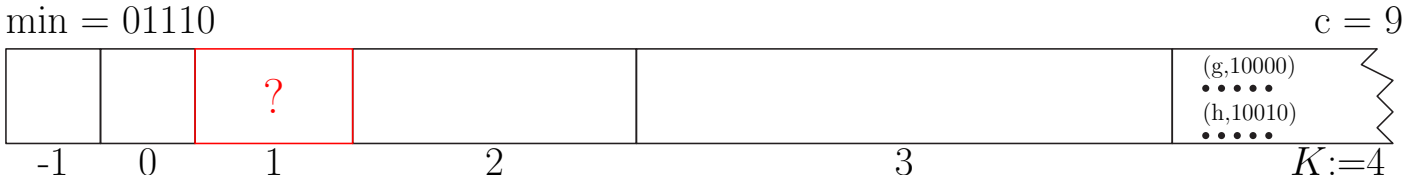
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

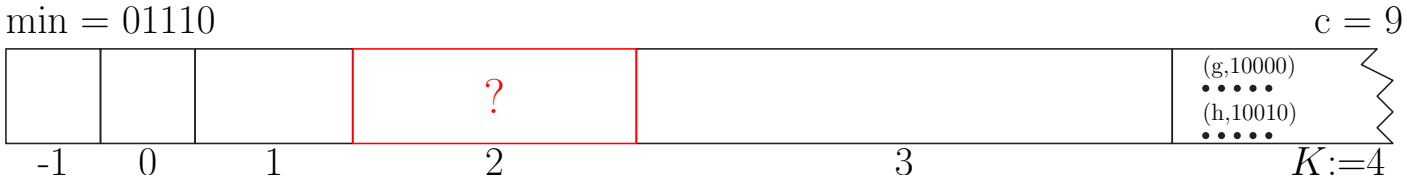
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

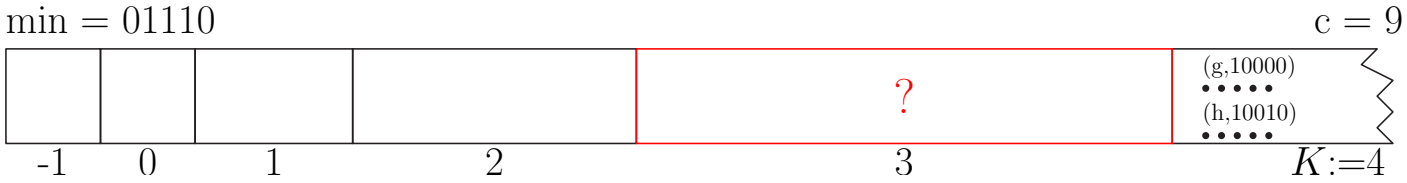
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

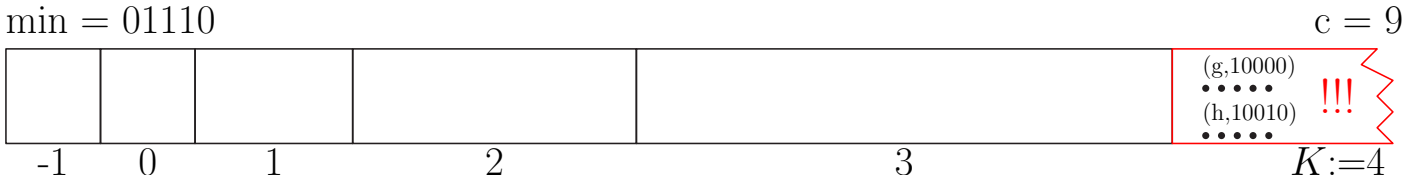
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

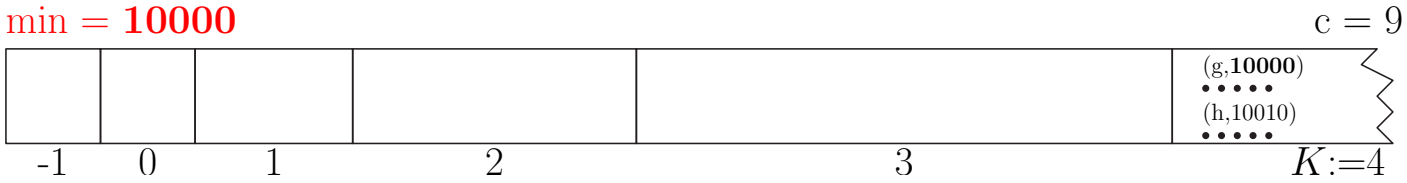
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

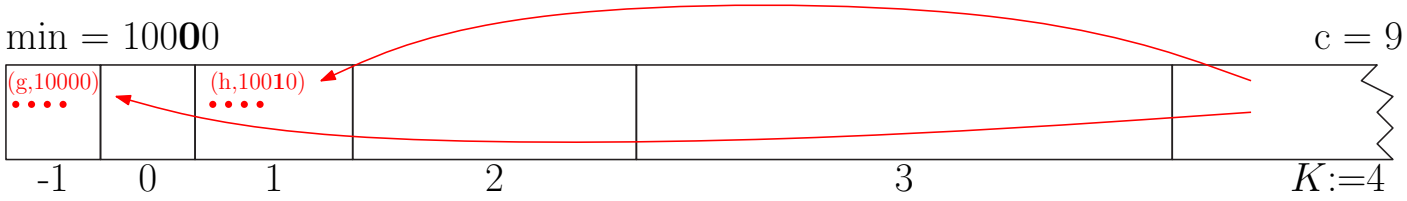
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

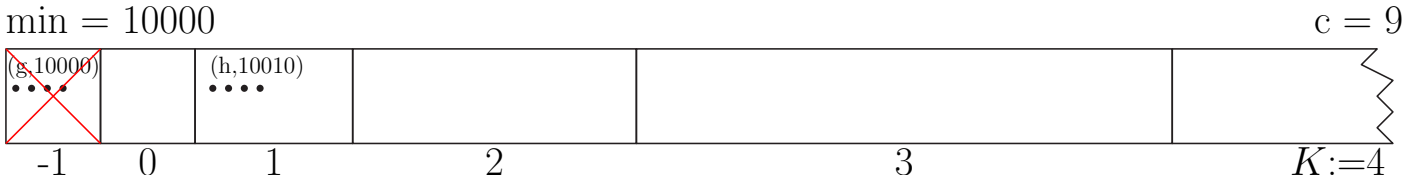
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

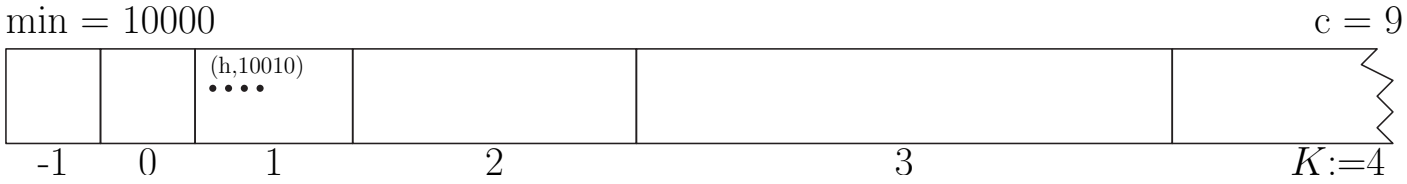
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

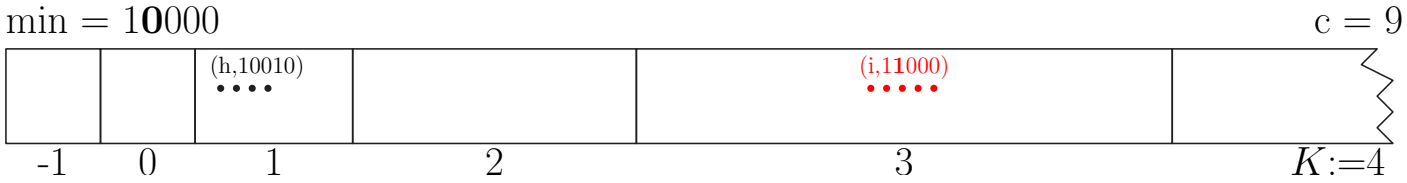
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

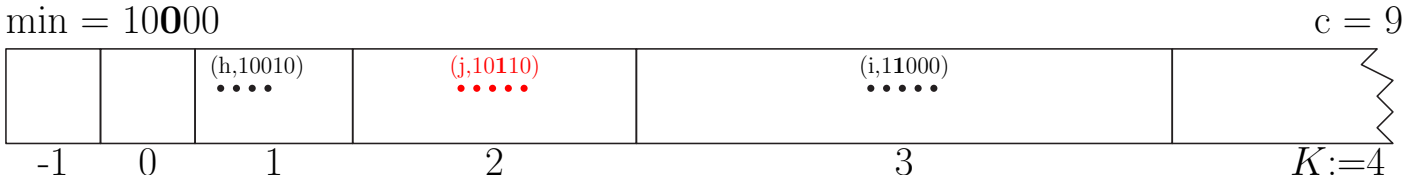
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

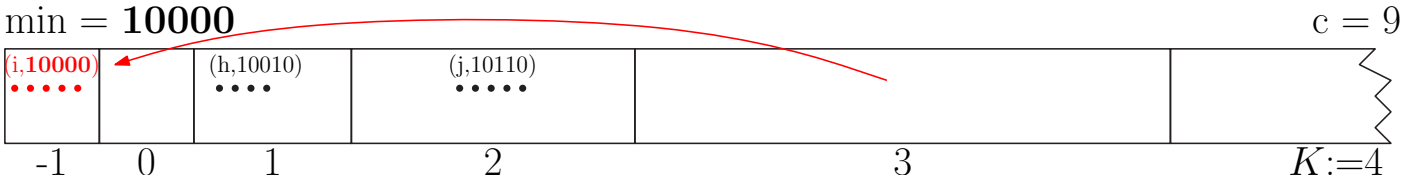
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



Radix Heaps

Beispiel (fortgesetzt):

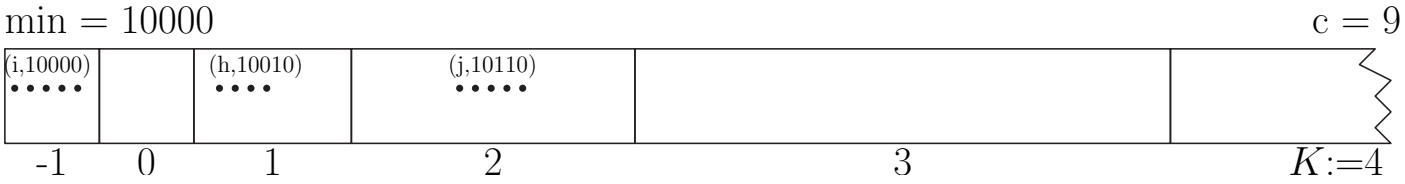
- `insert(f,14)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(g,20)`
- `deleteMin()`
- `insert(h,18)`
- `deleteMin()`
- `decreaseKey(g,16)`
- `deleteMin()`
- `deleteMin()`
- `insert(i,24)`
- `insert(j,22)`
- `decreaseKey(i,16)`



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)`



Radix Heaps

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

- viel anschaulicher wäre doch

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

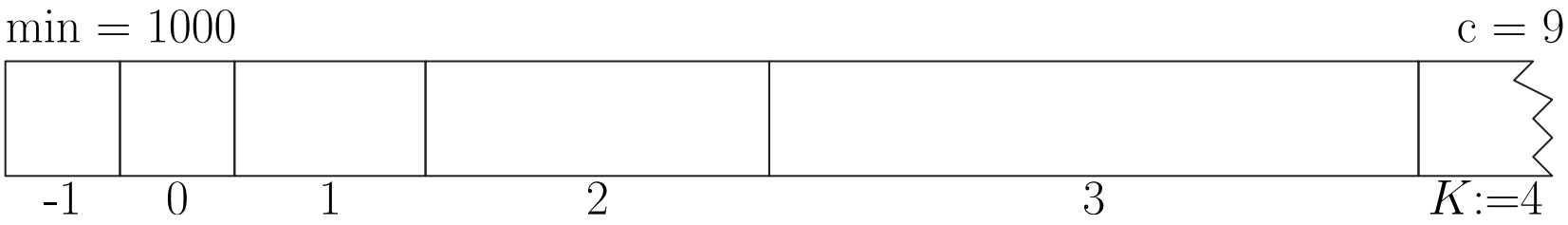
- okay, Anzahl Verschiebungen erhöht sich nicht ...
- ... aber, jede Änderung von *min* ändert potentiell alle Buckets
  $\rightarrow$ schlechtere Laufzeit!

Beispiel

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

	Bucket $B[\cdot]$				
min	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

Radix Heaps

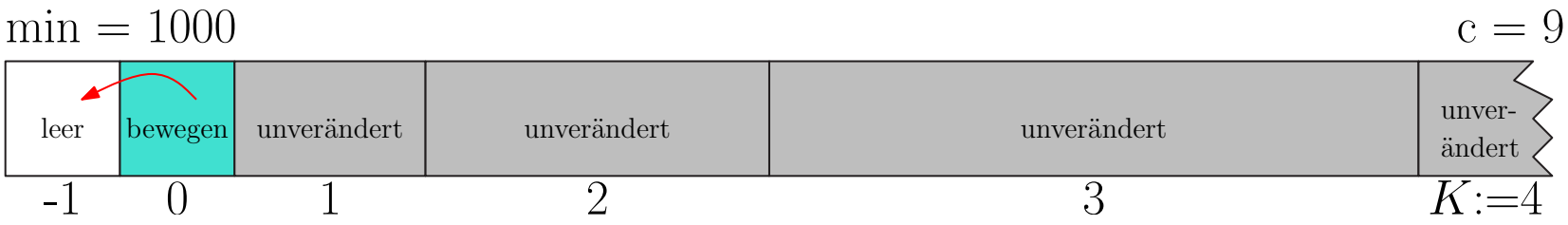


Änderung von min $\longrightarrow$ *Umverteilung eines Bucket genügt*

min $:= \texttt{01000}\ (08)$

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

Radix Heaps

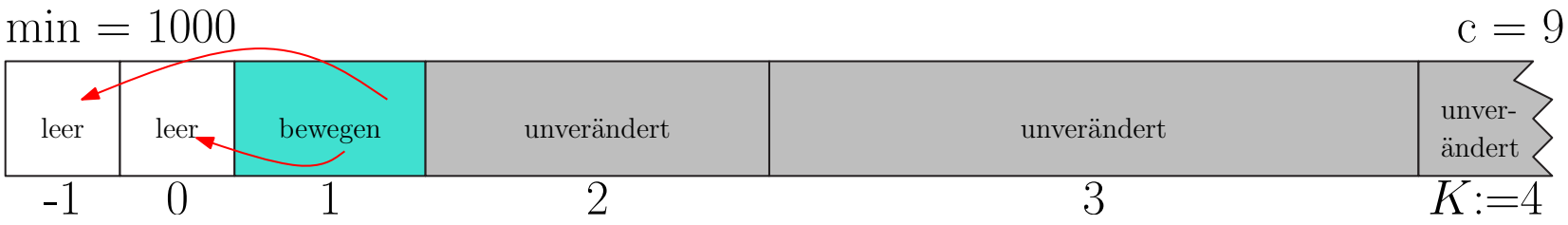


Änderung von min $\longrightarrow$ *Umverteilung eines Bucket genügt*

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

	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

Radix Heaps

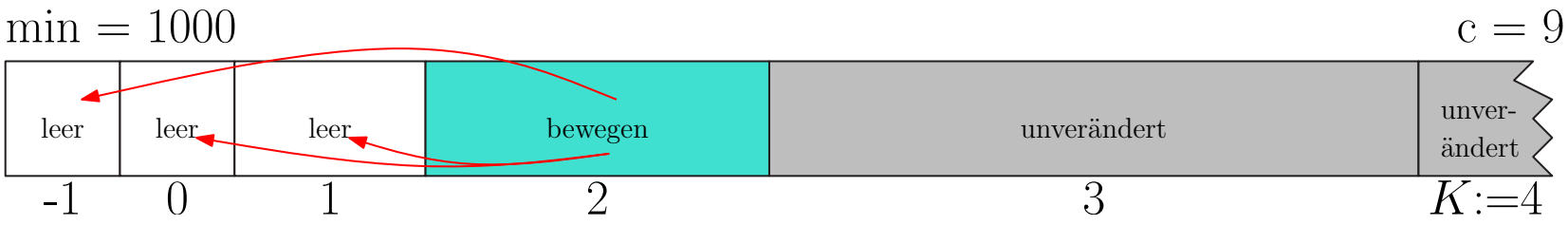


Änderung von min $\longrightarrow$ *Umverteilung eines Bucket genügt*

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

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

Radix Heaps

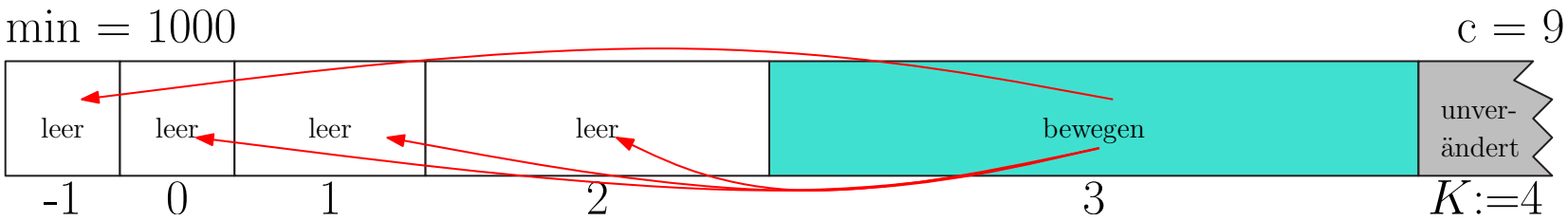


Änderung von min $\longrightarrow$ *Umverteilung eines Bucket genügt*

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

	Bucket $B[\cdot]$					
min	-1	0	1	2	3	4
01000 (08)	8	9	10..11	12..15	-	$\geq$ 16
01100 (12)	12	13	14..15	-	-	$\geq$ 16
01101 (13)	13	-	14..15	-	-	$\geq$ 16
01110 (14)	14	15	-	-	-	$\geq$ 16
01111 (15)	15	-	-	-	-	$\geq$ 16

Radix Heaps

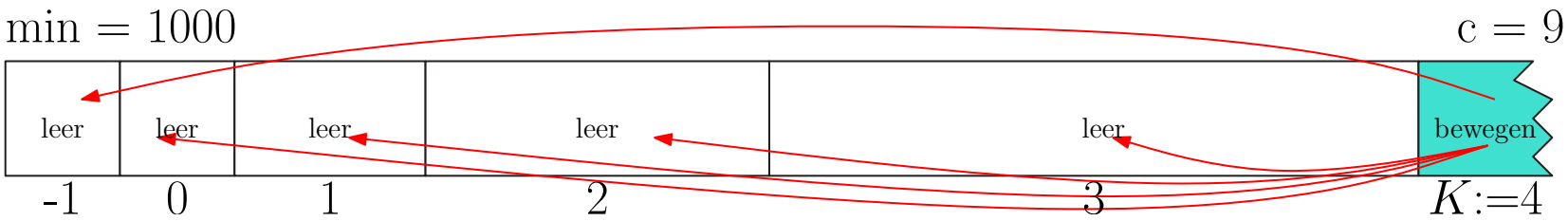


Änderung von min $\longrightarrow$ *Umverteilung eines Bucket genügt*

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

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

Radix Heaps



Änderung von min $\longrightarrow$ *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	-	$\geq$ 16
10000 (16)	16	17	-	-	-	-
10001 (17)	17	-	-	-	-	-

Average case Analyse für MST

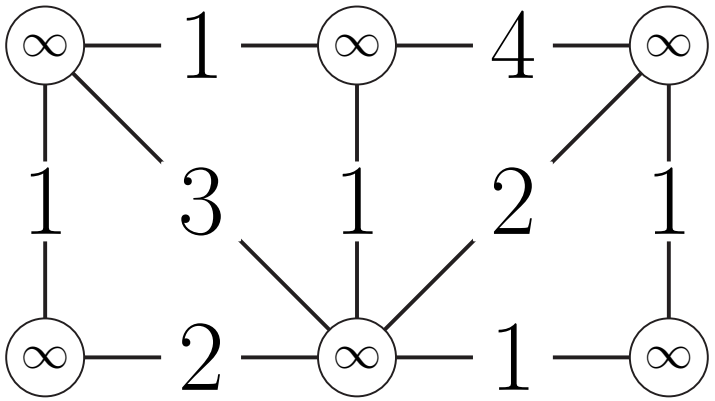
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

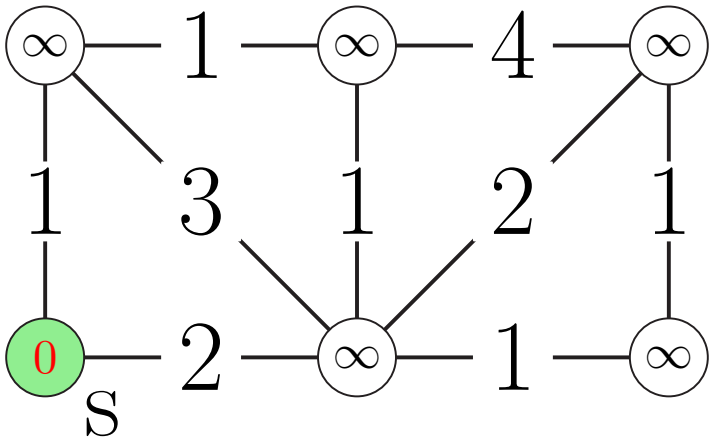
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

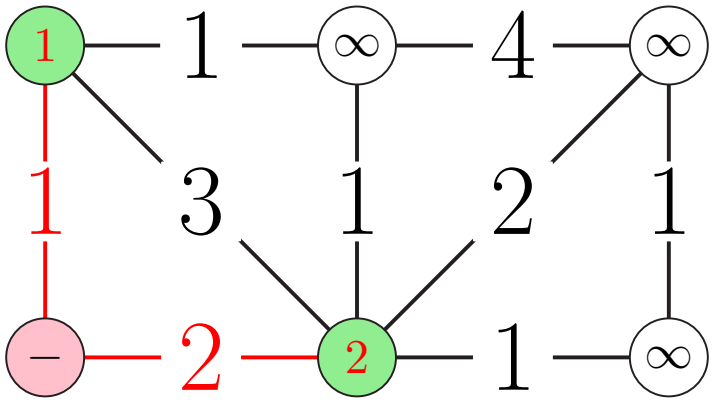
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

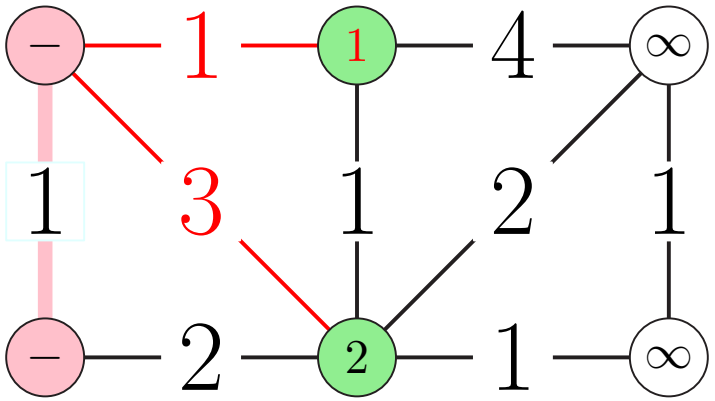
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

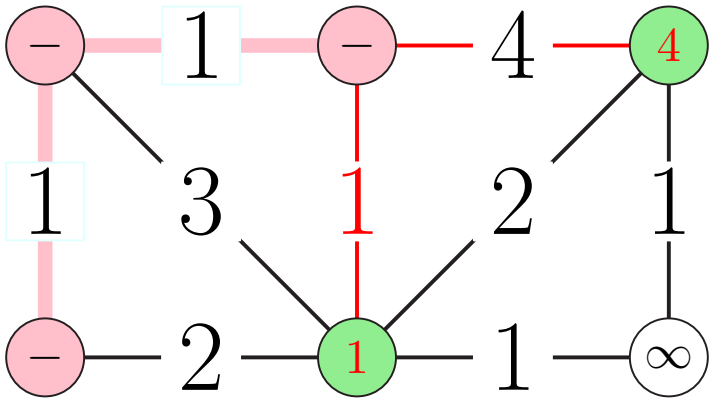
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

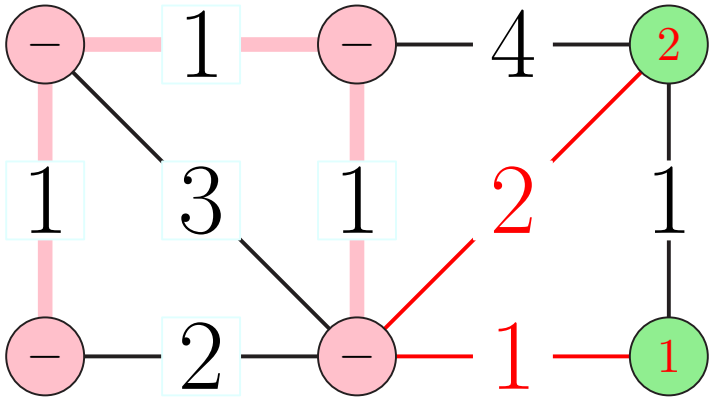
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

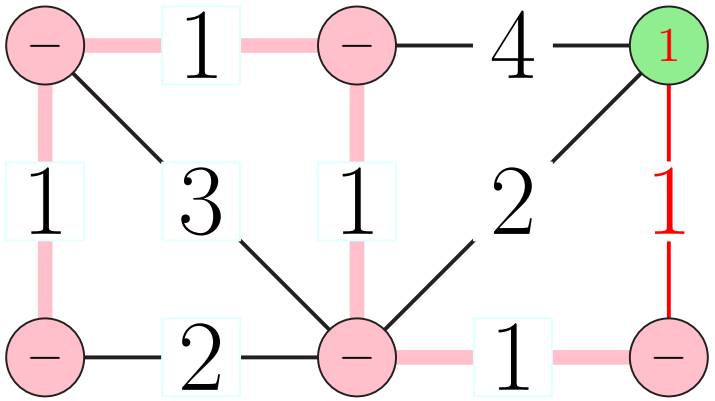
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

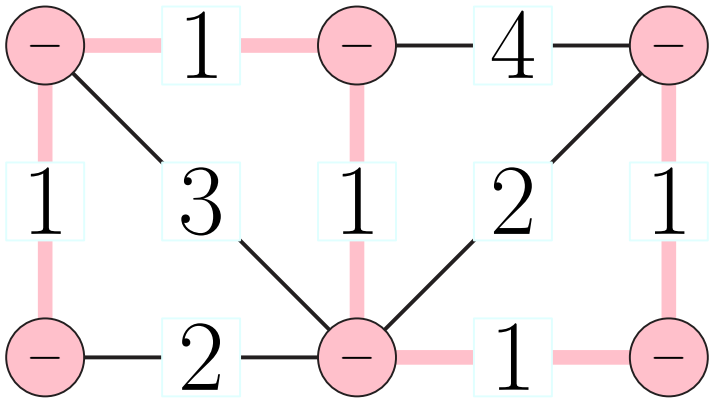
Motivation

- Algorithmus zur Berechnung minimaler Spannbäume (MSTs)
  (siehe Algorithmen I: Algorithmus von Jarnik-Prim)
- Beweis analog zu Dijkstras Algorithmus

Kurze Wiederholung von Jarnik-Prim

- Wähle beliebigen Startknoten s
- Füge iterativ Knotem v zu MST mit kleinstem Abstand $d[v]$

$\rightarrow$ Verwalte vorläufige Abstände $d[\cdot]$ in *Priority Queue*!



Average case Analyse für MST

Durchschnittliche Laufzeit Jarnik Prim Algorithmus

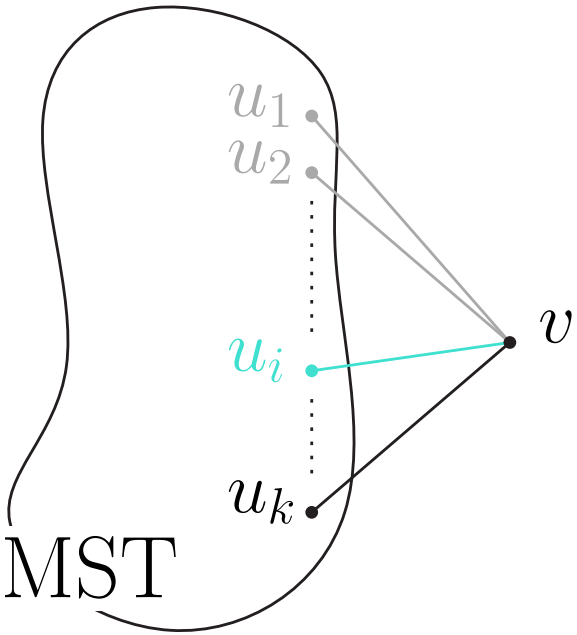
- Annahme: Gewichte $1, \ldots, m$ sind Kanten zufällig zugeordnet.
- $T_{Prim} = O(m + n \cdot (T_{insert} + T_{deleteMin} + T_{insertMST}) + x \cdot T_{decreaseKey})$

Average case Analyse für MST

Durchschnittliche Anzahl `decreaseKey` *Operationen*

- betrachte Knoten v:
  `decreaseKey(v)`, wenn Knoten u zu MST hinzugefügt wird mit $c(u, v) < d[v]$
  $\rightarrow$ Reihenfolge $u_1, \ldots, u_k$
  $\rightarrow$ $c(u_i, v) < \min_{j<i} c(u_j, v)$

- Wie oft tritt dies auf?
  $\rightarrow$ Erwartungswert M_k für Anzahl Präfixminima
  $\rightarrow$ $\mathbb{E}(M_k) = H_k$ (k'te harmonische Zahl)



Average case Analyse für MST

Präfixminima

Zufallsvariablen

- M_k: Anzahl Präfixminima einer Folge von k Zahlen
- I_i: $I_i = 1$ gdw. i-te Zahl Präfixminimum (Indikator) $\longrightarrow \mathbb{P}[I_i = 1] = \frac{1}{i}$

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(M_k) &= \mathbb{E}(\sum_{i=1}^{k} I_i) = \sum_{i=1}^{k} \mathbb{E}(I_i) \\ &= \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{i} = H_k\end{aligned}$$

Intuition

- Wahrscheinlichkeit, dass i-tes Element Präfixminimum ist, ist $\frac{1}{i}$, da nur ein Minimum in den ersten i Elementen existiert.

Average case Analyse für MST

Durchschnittliche Anzahl `decreaseKey` *Operationen (weiter)*

- erwartet H_k Präfixminima
  - Erstes Minimum $\rightarrow$ `insert(v)`
  - $H_k - 1$ Minima $\rightarrow$ `decreaseKey(v)`
    (Bemerkung: $H_k - 1 < \ln k = \ln \mathrm{grad}(v)$)

- Gesamt:

$$
\begin{aligned}
x &:= \sum_{v \in V} (H_k - 1) = \sum_{v \in V} (H_{\mathrm{grad}(v)} - 1) \\
&< \sum_{v \in V} \ln \mathrm{grad}(v) \overset{konkav}{\leq} n \ln \cdot \frac{\sum_{v \in V} \mathrm{grad}(v)}{n} = n \ln \frac{2m}{n} = O(n \ln \frac{m}{n})
\end{aligned}
$$

Legende

Karlsruher Institut für Technologie

4 — Kante mit Gewicht 4

4 — Kante mit Gewicht 4, wird gerade in Vorwärtsrichtung betrachtet

4 — Kante mit Gewicht 4, wird gerade in Rückwärtsrichtung betrachtet

1 — Kante mit reduziertem Gewicht 1

4 — neu eingefügte Kante mit Gewicht 4

Zeiger auf Vorgänger (in Vorwärtsrichtung)

Zeiger auf Vorgänger (in Rückwärtsrichtung)

2, v, ∞ — Knoten v mit oberer Schranke für Distanz vom Start $d[v] = \infty$ und Potential $pot[v] = 2$

∞ — neu eingefügter Knoten

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

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

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

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

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

1, 2 — aktueller Treffpunkt von Vorwärts- und Rückwärtssuche mit minimalem $d_{fwd}[v] + d_{bwd}[v] = 3$

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

Ende!

Feierabend!