

Algorithmen 1

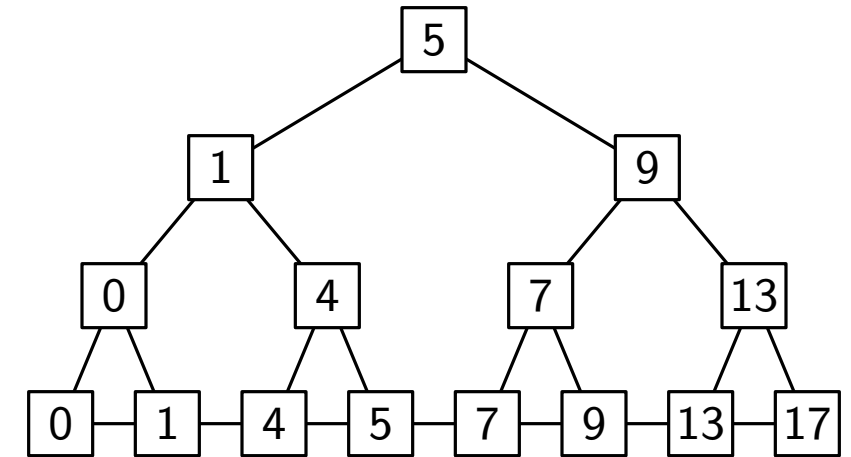
(2, 3)-Bäume – Implementierung



Letztes Mal

Suchbaum zum Verwalten von sortierten Folgen

- verzeigerte Struktur → gut zum Einfügen/Löschen
- Baumstruktur → simuliert binäre Suche



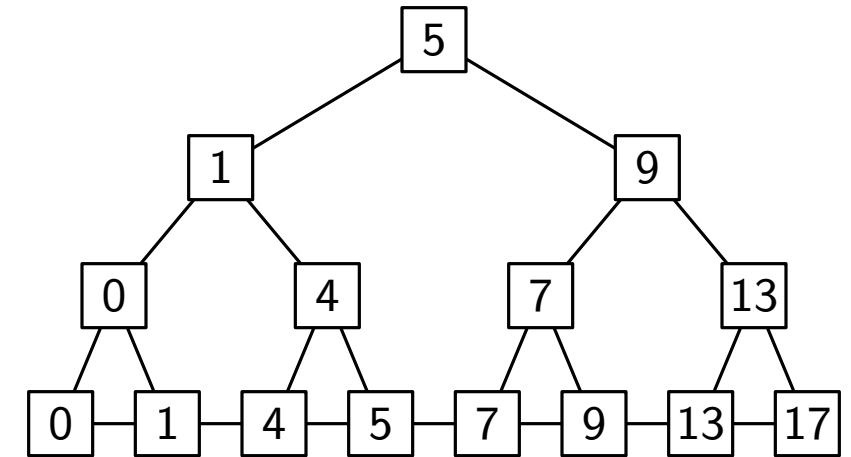
Letztes Mal

Suchbaum zum Verwalten von sortierten Folgen

- verzeigerte Struktur → gut zum Einfügen/Löschen
- Baumstruktur → simuliert binäre Suche

(2, 3)-Baum

- **fast binär:** jeder innere Knoten hat 2 oder 3 Kinder
- **balanciert:** jedes Blatt hat gleiche Tiefe



Letztes Mal

Suchbaum zum Verwalten von sortierten Folgen

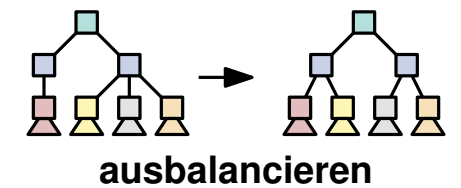
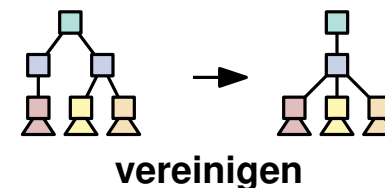
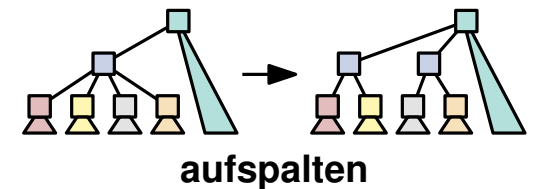
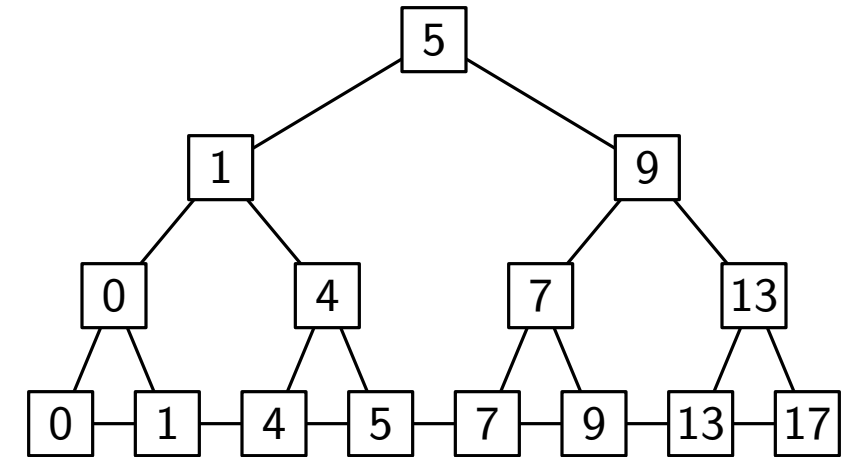
- verzeigerte Struktur → gut zum Einfügen/Löschen
- Baumstruktur → simuliert binäre Suche

(2, 3)-Baum

- **fast binär:** jeder innere Knoten hat 2 oder 3 Kinder
- **balanciert:** jedes Blatt hat gleiche Tiefe

Erhaltung der Struktur beim Einfügen und Löschen

- Einfügen erzeugt ggf. Knoten mit 4 Kindern → aufspalten
- Löschen erzeugt ggf. Knoten mit nur 1 Kind → vereinigen oder ausbalancieren
- verschiebt das Problem Schrittweise nach oben
- $O(\log n)$ Höhe → $O(\log n)$ Laufzeit



Heute

Ausarbeitung der Details

- Was genau speichern wir bei jedem Knoten?
- Wie gehen wir mit Sonderfällen um (z.B. leerer Baum)?
- Wie müssen wir die Schlüssel updaten?
- Wie setzen wir die Datenstruktur in Pseudocode um?

Heute

Ausarbeitung der Details

- Was genau speichern wir bei jedem Knoten?
- Wie gehen wir mit Sonderfällen um (z.B. leerer Baum)?
- Wie müssen wir die Schlüssel updaten?
- Wie setzen wir die Datenstruktur in Pseudocode um?

Anmerkungen

- es gibt meist nicht nur eine Antwort auf die Fragen
- Ziele, wenn wir mehrere Möglichkeiten haben etwas umzusetzen:
 - so einfach wie möglich
 - möglichst wenige Sonderbehandlungen
 - Korrektheit + richtige asymptotische Laufzeit

Heute

Ausarbeitung der Details

- Was genau speichern wir bei jedem Knoten?
- Wie gehen wir mit Sonderfällen um (z.B. leerer Baum)?
- Wie müssen wir die Schlüssel updaten?
- Wie setzen wir die Datenstruktur in Pseudocode um?

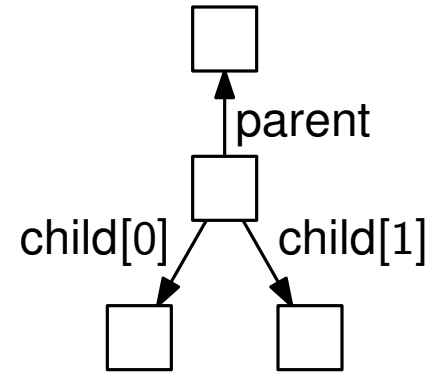
Anmerkungen

- es gibt meist nicht nur eine Antwort auf die Fragen
- Ziele, wenn wir mehrere Möglichkeiten haben etwas umzusetzen:
 - so einfach wie möglich
 - möglichst wenige Sonderbehandlungen
 - Korrektheit + richtige asymptotische Laufzeit
- Lernziel: Umsetzung eines Algorithmus auf hoher Abstraktionsebene in Pseudocode
- nicht das Lernziel: Pseudocode von (2, 3)-Bäumen auswendig können

Was speichern wir bei jedem Knoten?

Baumstruktur

- jeder Knoten hat Zeiger zu bis zu 4 Kindern
- jeder Knoten hat einen Zeiger zum Elter



class NODE

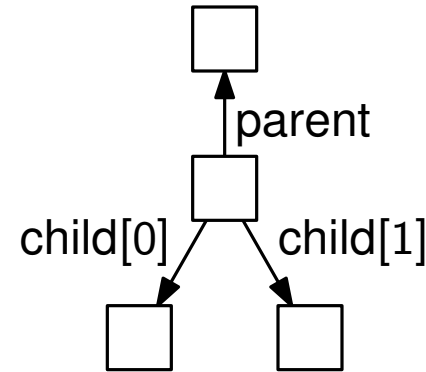
Node parent

Array \langle *Node*, 4 \rangle child

Was speichern wir bei jedem Knoten?

Baumstruktur

- jeder Knoten hat Zeiger zu bis zu 4 Kindern
- jeder Knoten hat einen Zeiger zum Elter



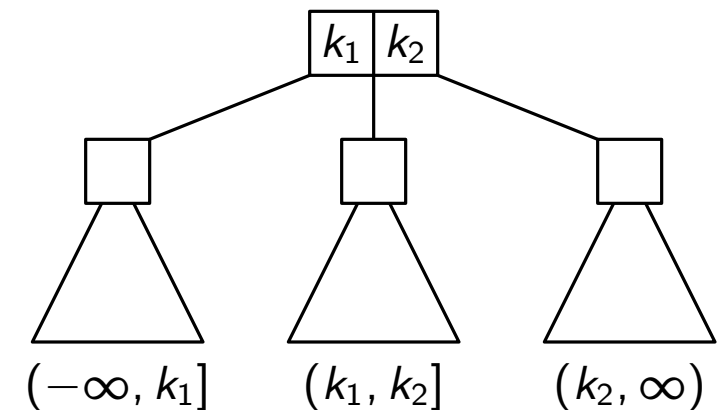
class NODE

Node parent

Array \langle *Node*, 4 \rangle child

Navigation entsprechend der Schlüssel

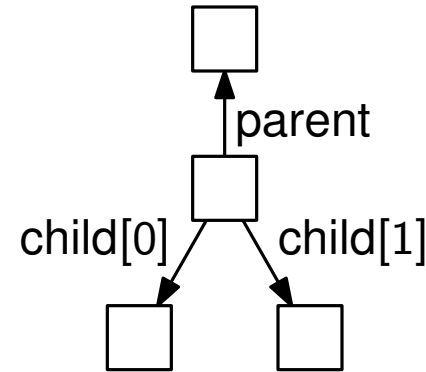
- letztes Mal
 - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
 - $\ell - 1$ Schlüssel für ℓ Kinder



Was speichern wir bei jedem Knoten?

Baumstruktur

- jeder Knoten hat Zeiger zu bis zu 4 Kindern
- jeder Knoten hat einen Zeiger zum Elter



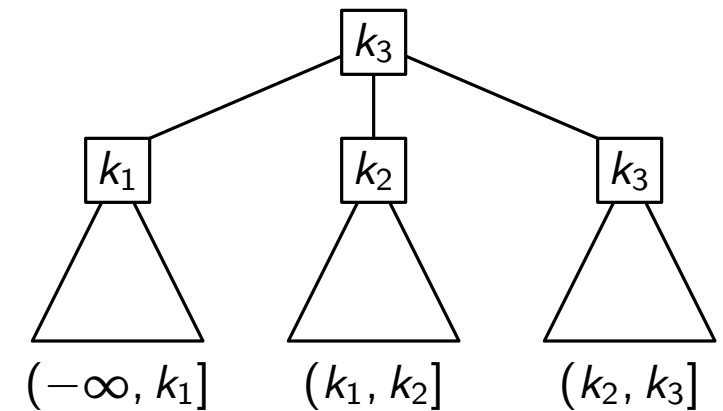
class NODE

```

Node parent
Array<Node, 4> child
Key key
  
```

Navigation entsprechend der Schlüssel

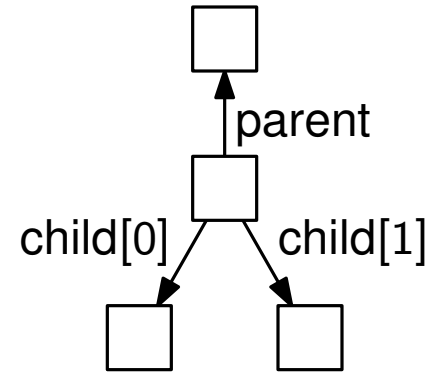
- letztes Mal
 - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
 - $\ell - 1$ Schlüssel für ℓ Kinder
- etwas einfacher
 - jeder Knoten a kennt nur einen Schlüssel $a.key$
 - $a.key =$ größter Schlüssel im Teilbaum unter a



Was speichern wir bei jedem Knoten?

Baumstruktur

- jeder Knoten hat Zeiger zu bis zu 4 Kindern
- jeder Knoten hat einen Zeiger zum Elter



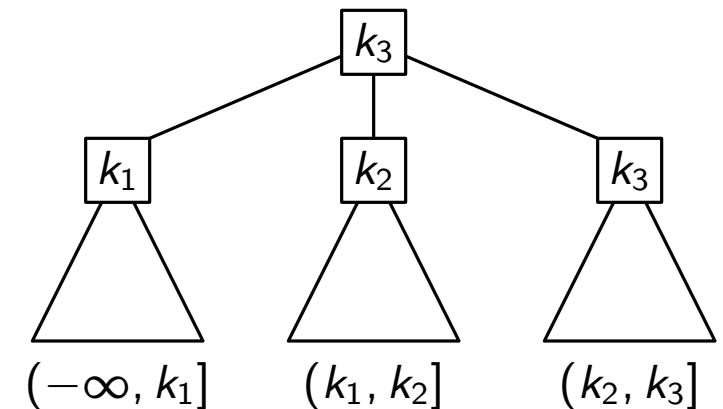
class NODE

```

Node parent
Array<Node, 4> child
Key key
  
```

Navigation entsprechend der Schlüssel

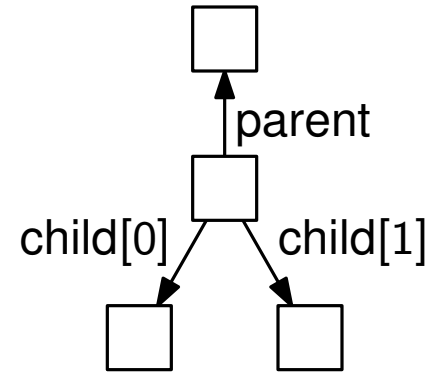
- letztes Mal
 - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
 - $\ell - 1$ Schlüssel für ℓ Kinder
- etwas einfacher
 - jeder Knoten a kennt nur einen Schlüssel $a.key$
 - $a.key =$ größter Schlüssel im Teilbaum unter a
 - Entscheidung für das richtige Kind beim Suchen: entsprechend der Schlüssel der Kinder



Was speichern wir bei jedem Knoten?

Baumstruktur

- jeder Knoten hat Zeiger zu bis zu 4 Kindern
- jeder Knoten hat einen Zeiger zum Elter



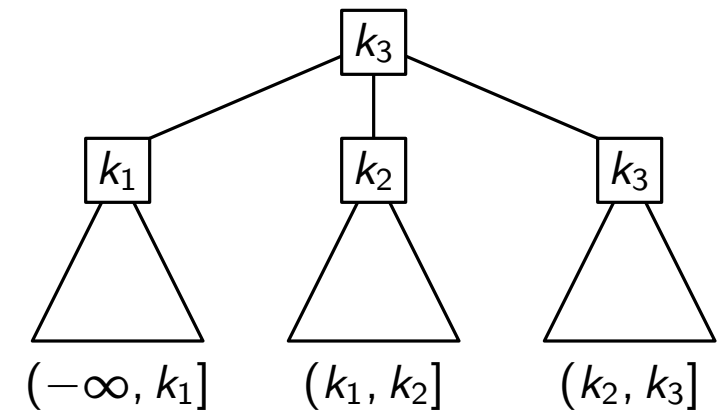
class NODE

```

Node parent
Array<Node, 4> child
Key key
  
```

Navigation entsprechend der Schlüssel

- letztes Mal
 - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
 - $\ell - 1$ Schlüssel für ℓ Kinder
- etwas einfacher
 - jeder Knoten a kennt nur einen Schlüssel $a.key$
 - $a.key =$ größter Schlüssel im Teilbaum unter a
 - Entscheidung für das richtige Kind beim Suchen: entsprechend der Schlüssel der Kinder

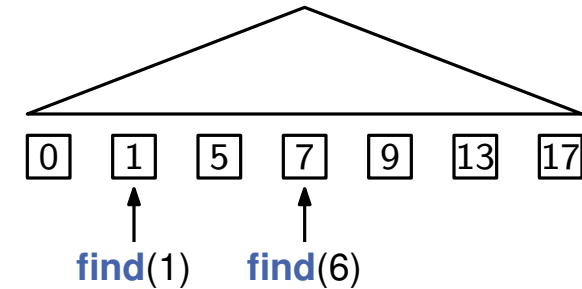


Invariante, die wir nach jeder Operation wiederherstellen

Suchen – Vorüberlegung & Initialisierung

Wonach genau suchen wir?

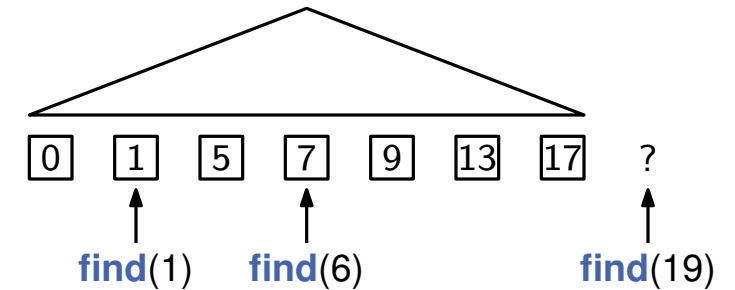
- Eingabe: ein Schlüssel k
- falls k in der Folge \rightarrow entsprechendes Blatt zurückgeben
- k nicht in der Folge \rightarrow Blatt mit nächst größerem Schlüssel



Suchen – Vorüberlegung & Initialisierung

Wonach genau suchen wir?

- Eingabe: ein Schlüssel k
- falls k in der Folge \rightarrow entsprechendes Blatt zurückgeben
- k nicht in der Folge \rightarrow Blatt mit nächst größerem Schlüssel



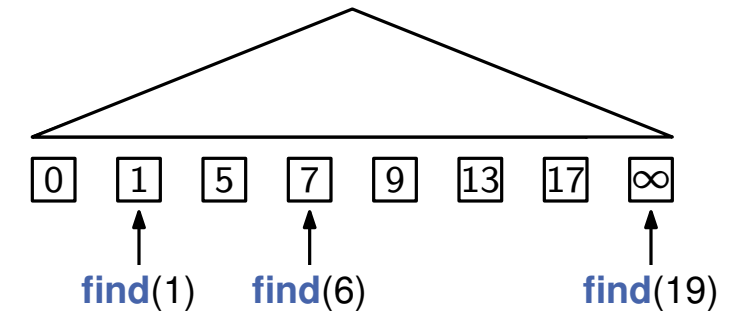
∞ -Trick

- Was, wenn k größer als alle existierenden Schlüssel?

Suchen – Vorüberlegung & Initialisierung

Wonach genau suchen wir?

- Eingabe: ein Schlüssel k
- falls k in der Folge \rightarrow entsprechendes Blatt zurückgeben
- k nicht in der Folge \rightarrow Blatt mit nächst größerem Schlüssel



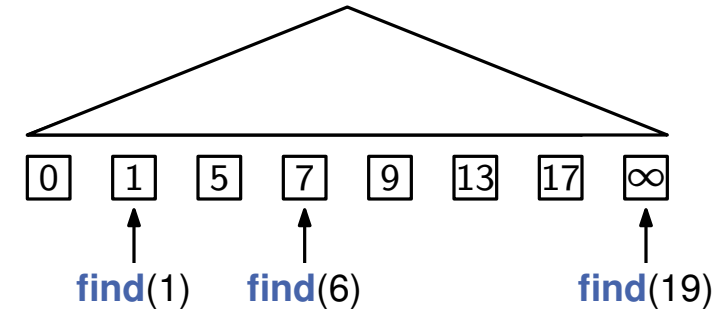
∞ -Trick

- Was, wenn k größer als alle existierenden Schlüssel?
- füge ein Dummy-Blatt mit Schlüssel ∞ ein
- vermeidet den Sonderfall, wenn k zu groß
- vermeidet den Sonderfall, für einen leeren Baum

Suchen – Vorüberlegung & Initialisierung

Wonach genau suchen wir?

- Eingabe: ein Schlüssel k
- falls k in der Folge \rightarrow entsprechendes Blatt zurückgeben
- k nicht in der Folge \rightarrow Blatt mit nächst größerem Schlüssel

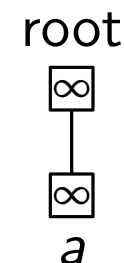


∞ -Trick

- Was, wenn k größer als alle existierenden Schlüssel?
- füge ein Dummy-Blatt mit Schlüssel ∞ ein
- vermeidet den Sonderfall, wenn k zu groß
- vermeidet den Sonderfall, für einen leeren Baum

Initialisierung des (2, 3)-Baums

- Wurzelknoten mit einem Kind mit Schlüssel ∞
- Schlüssel der Wurzel: ebenfalls ∞



class (2, 3)-TREE

Node root

init()

Node a

a.key := ∞

a.parent := root

root.child[0] := a

root.key := ∞

Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

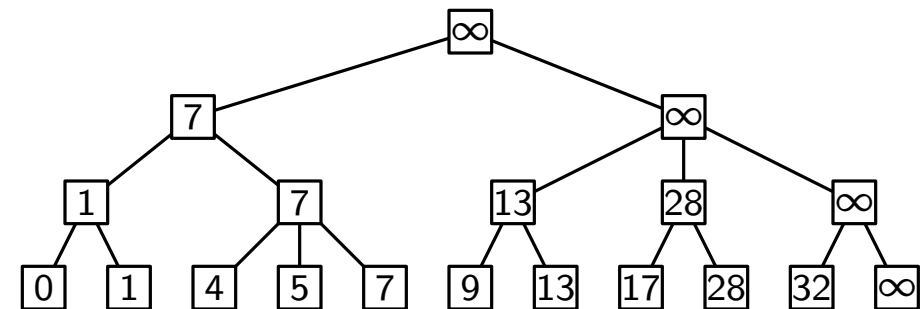
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

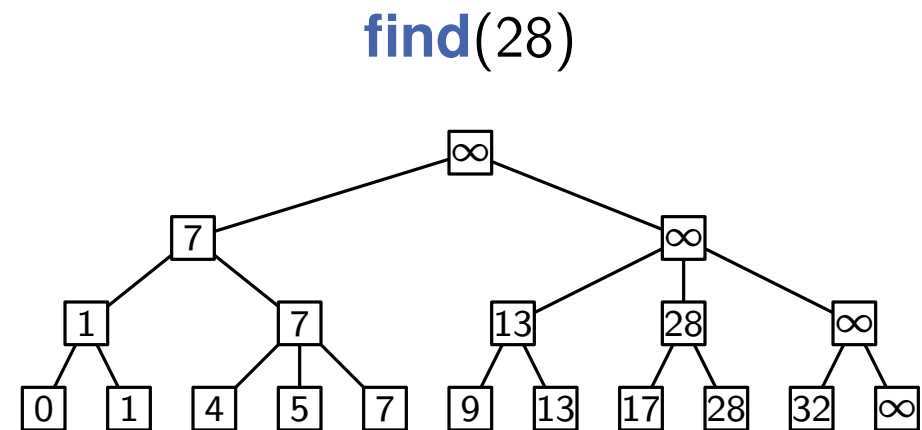
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

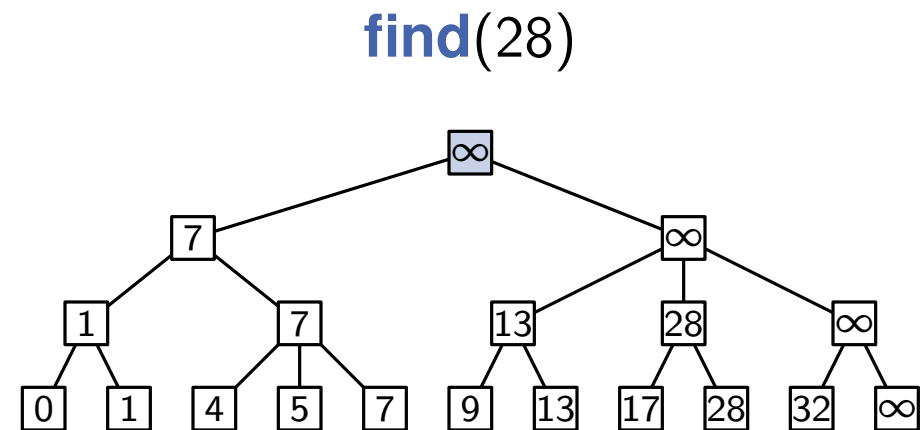
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.child[i].key\}$

$a := a.child[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

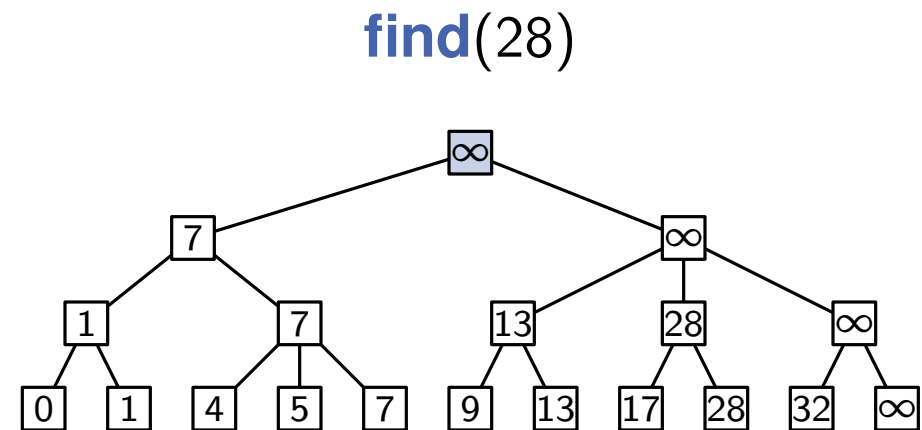
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

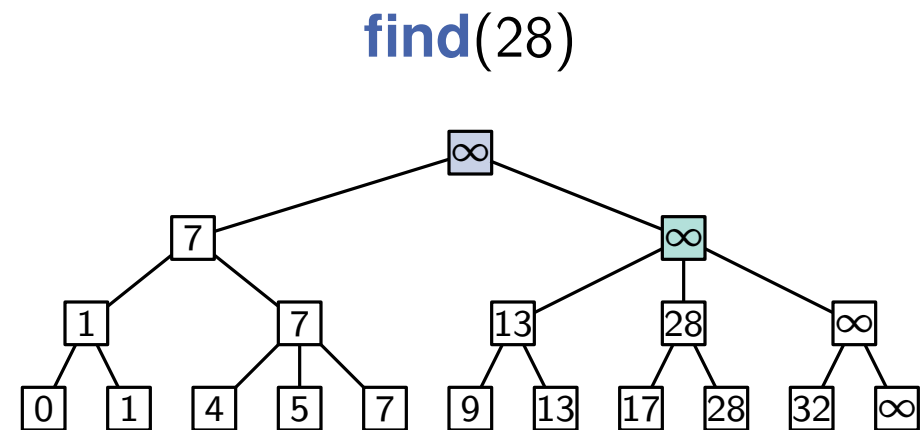
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

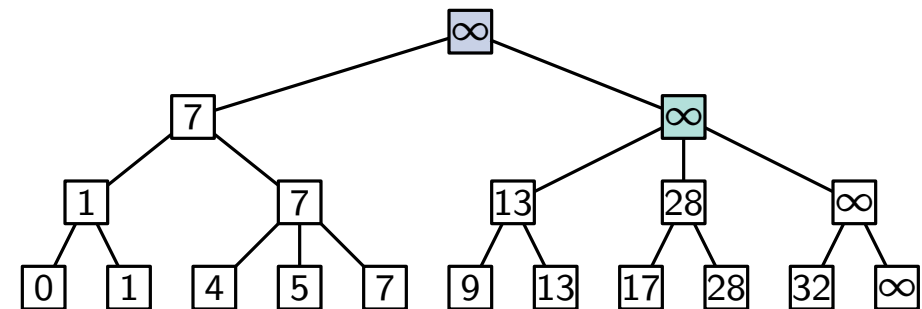
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

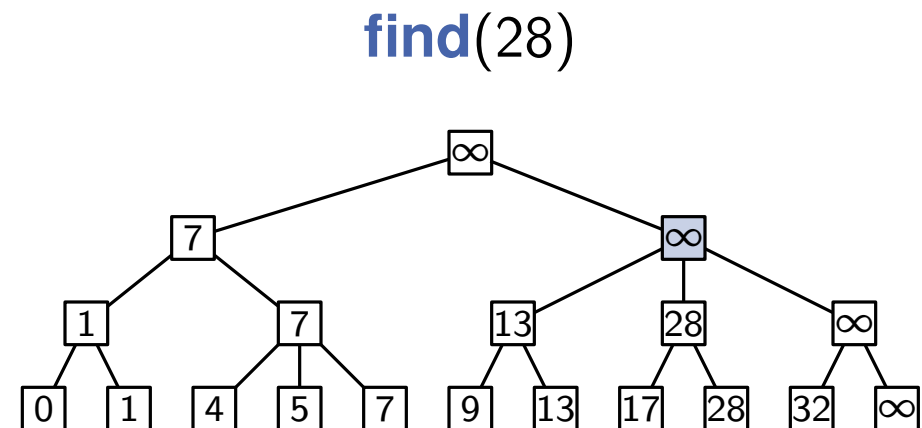
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

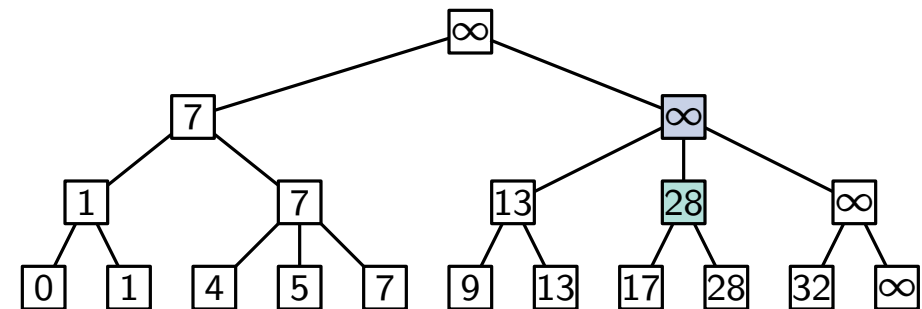
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

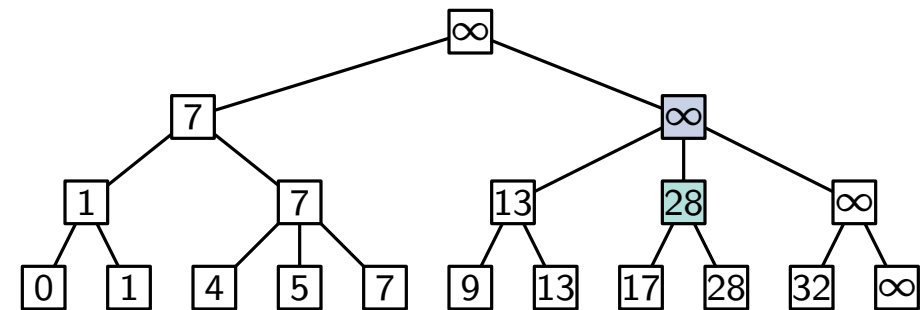
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

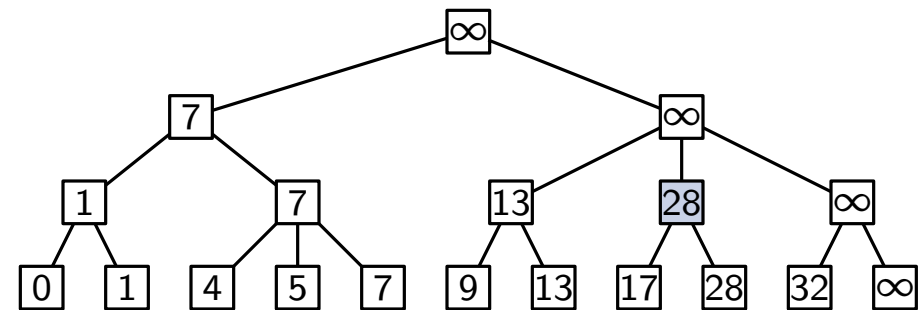
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

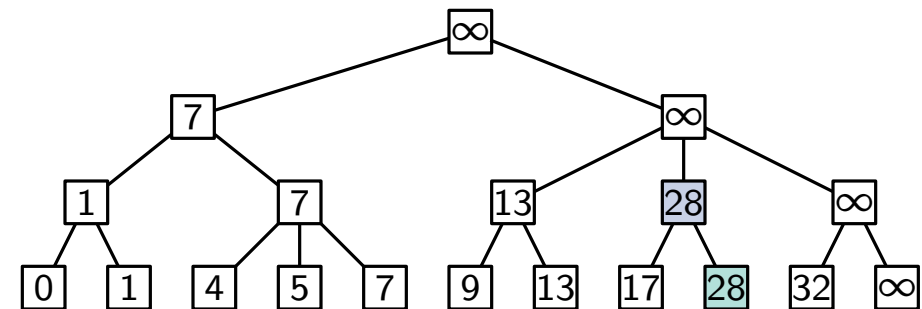
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

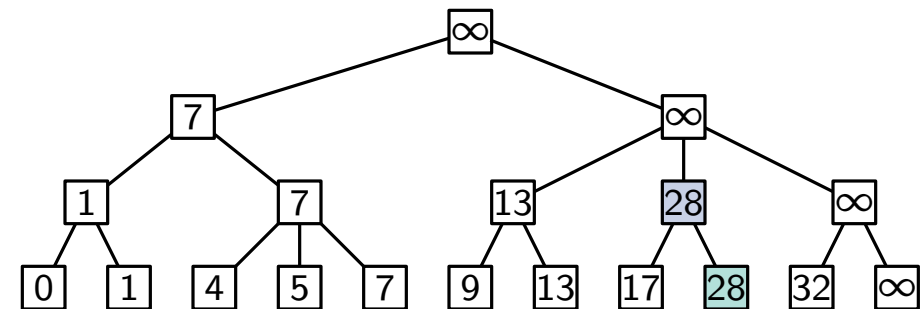
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

Node $a := \text{root}$

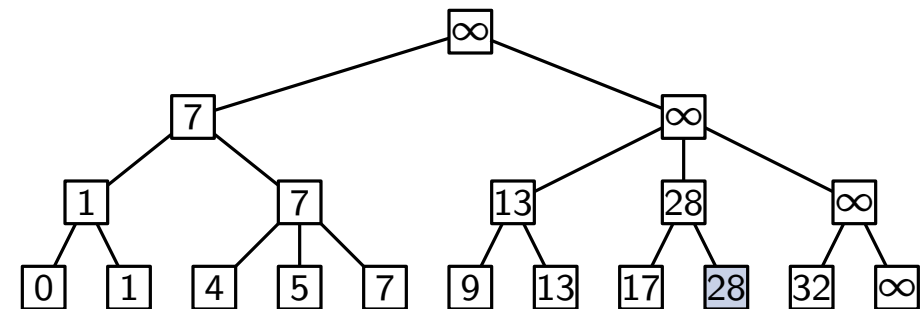
while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a

find(28)



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

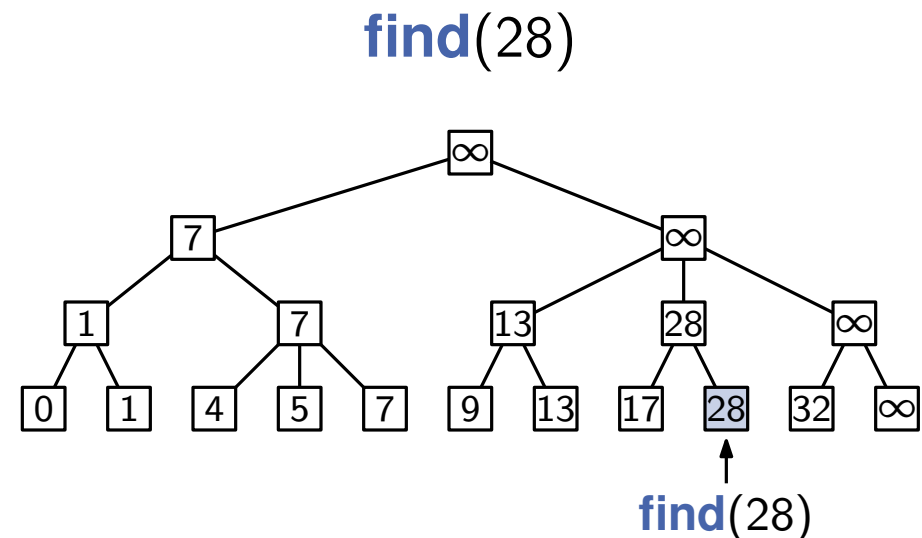
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

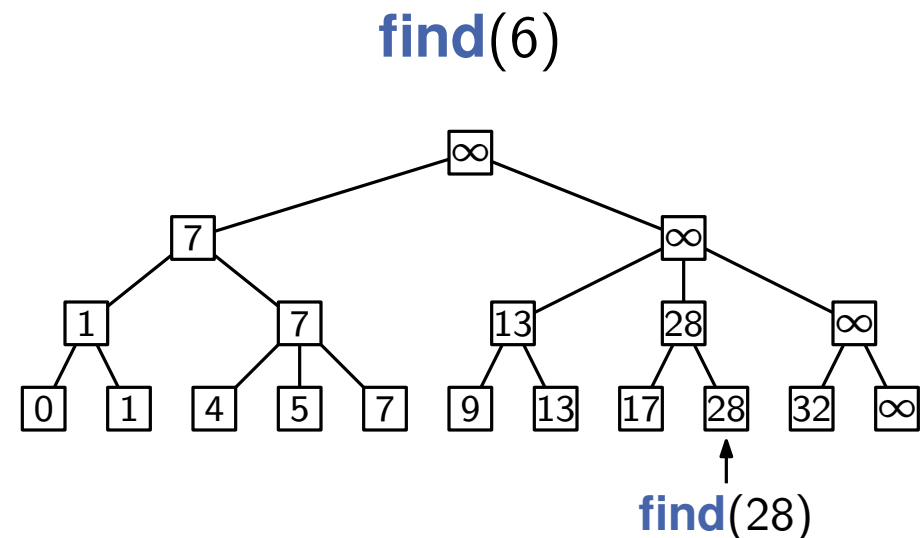
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

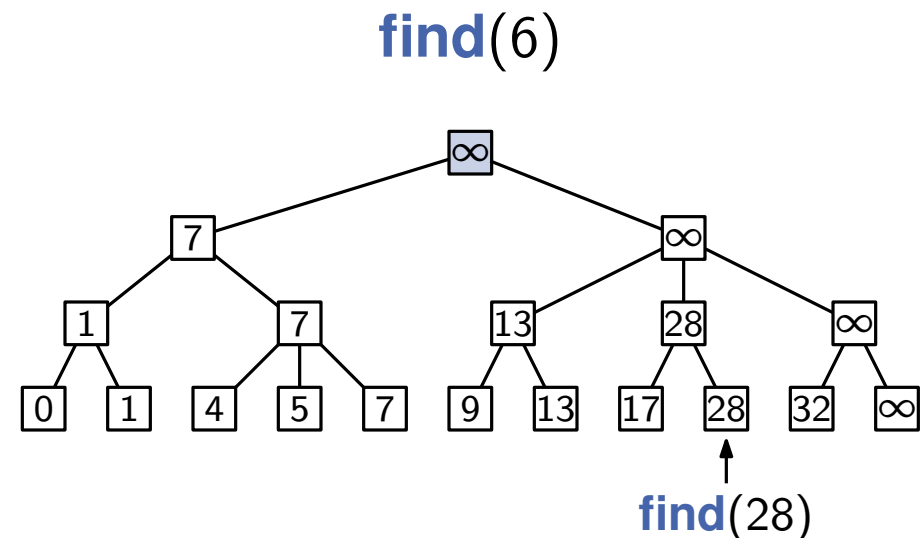
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

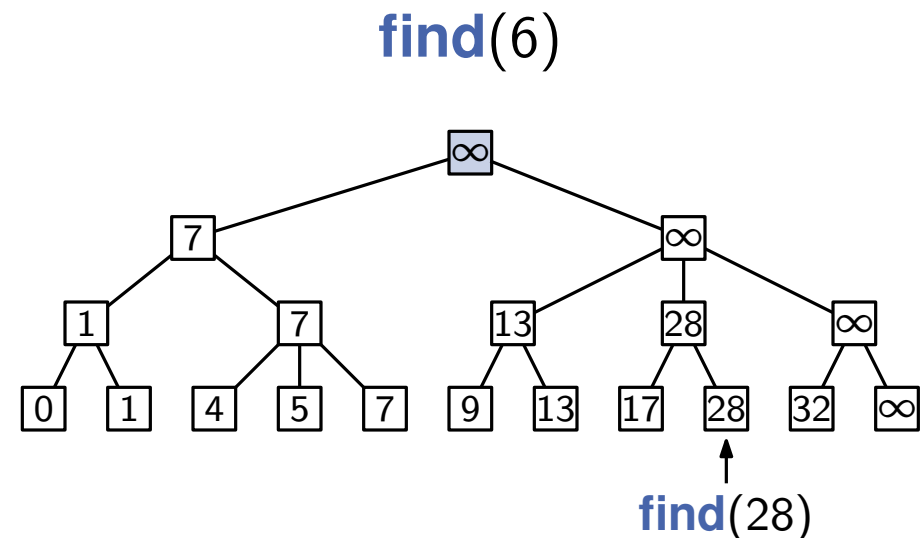
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

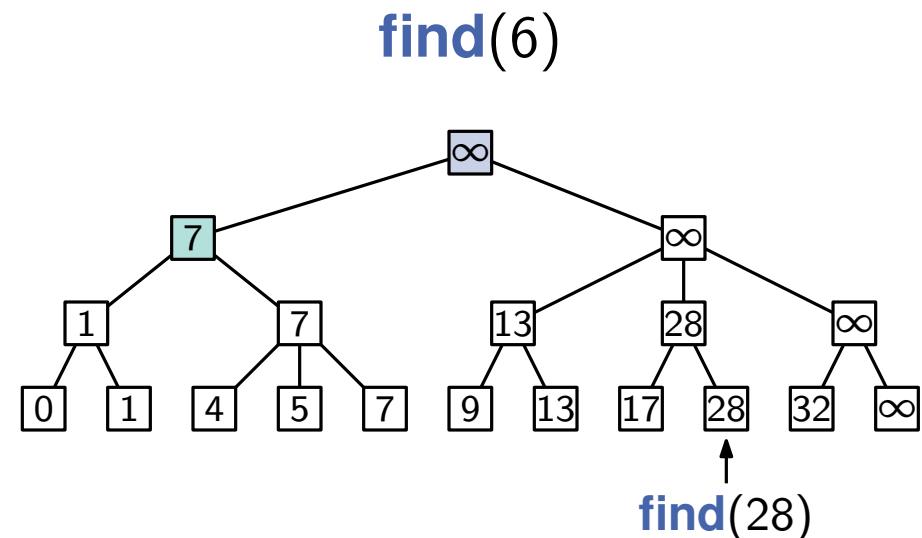
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

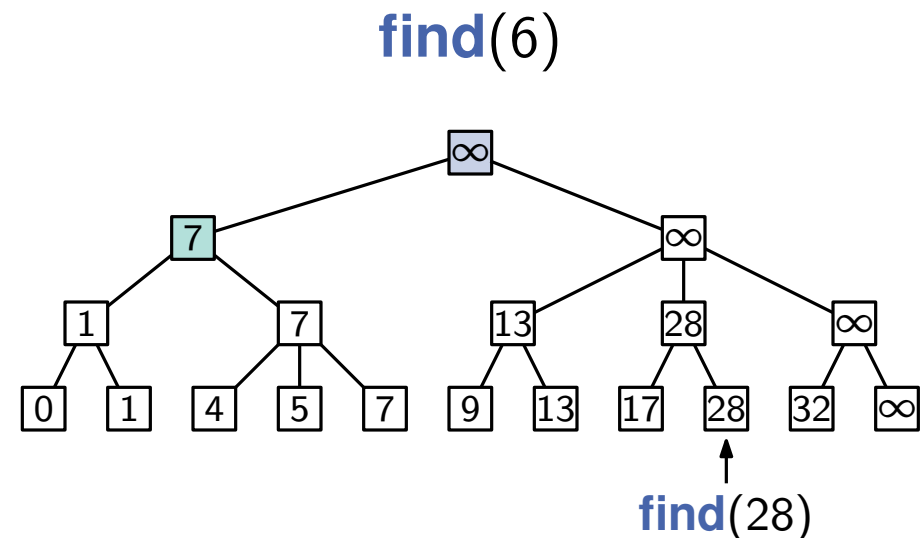
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

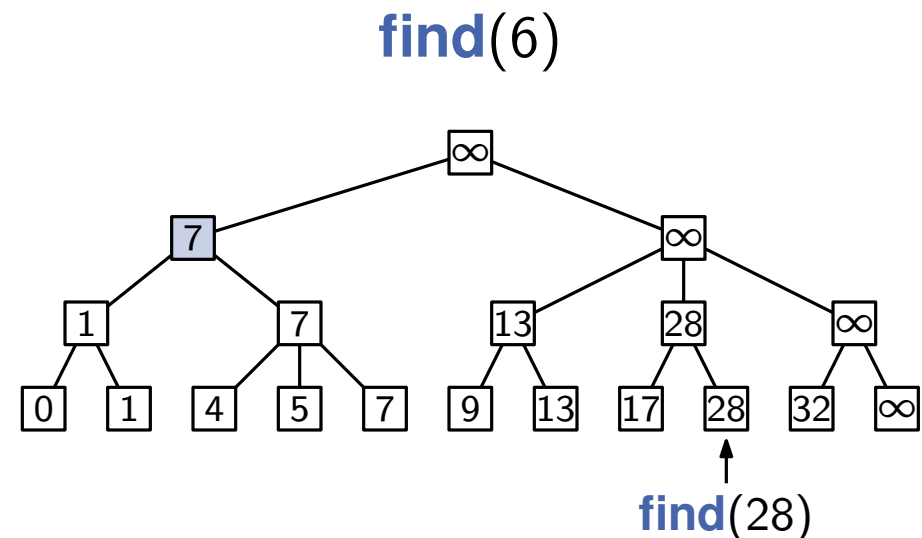
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

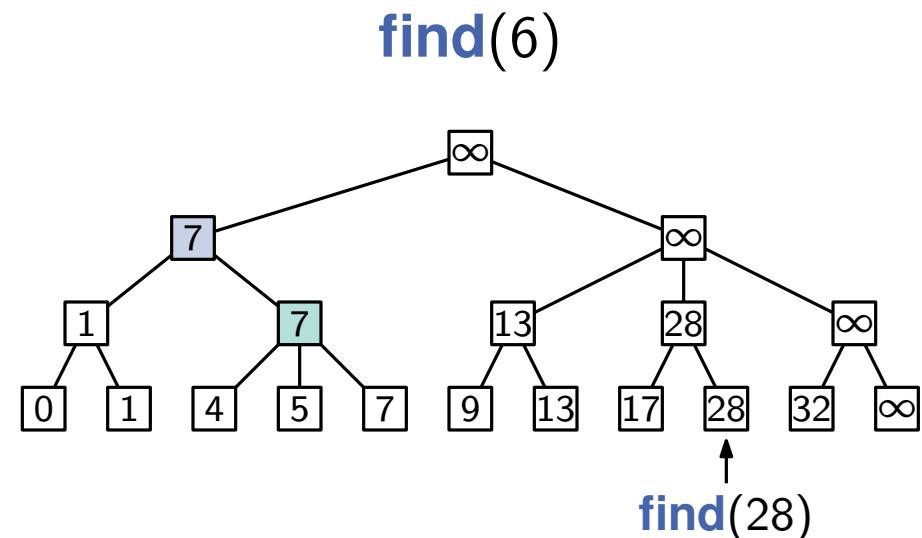
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

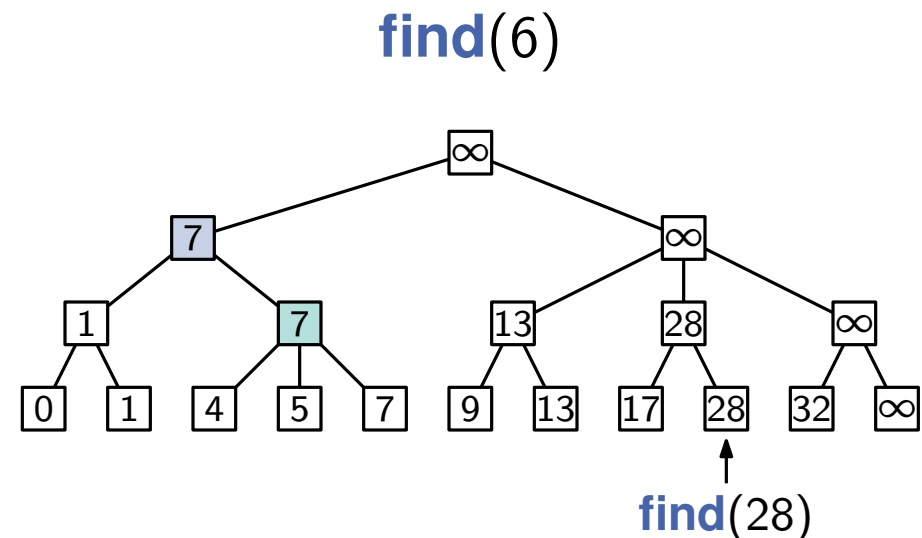
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

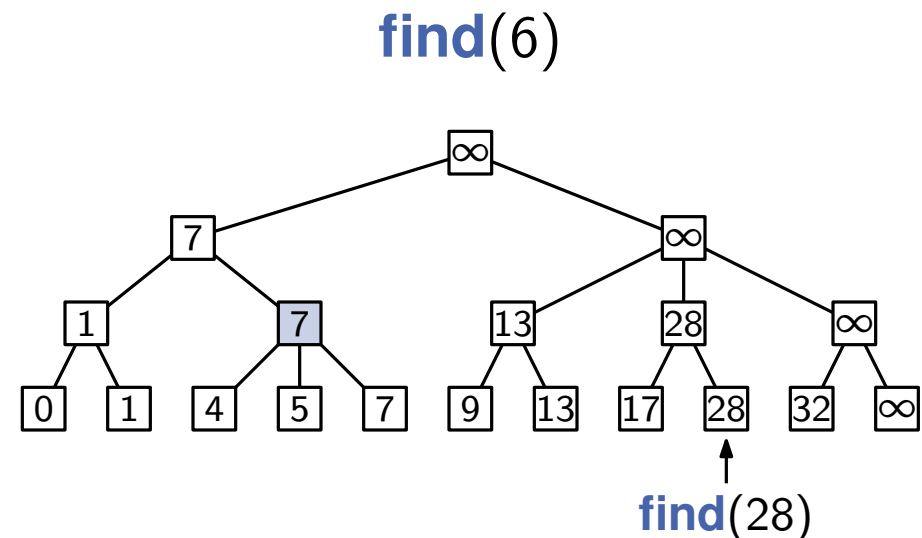
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

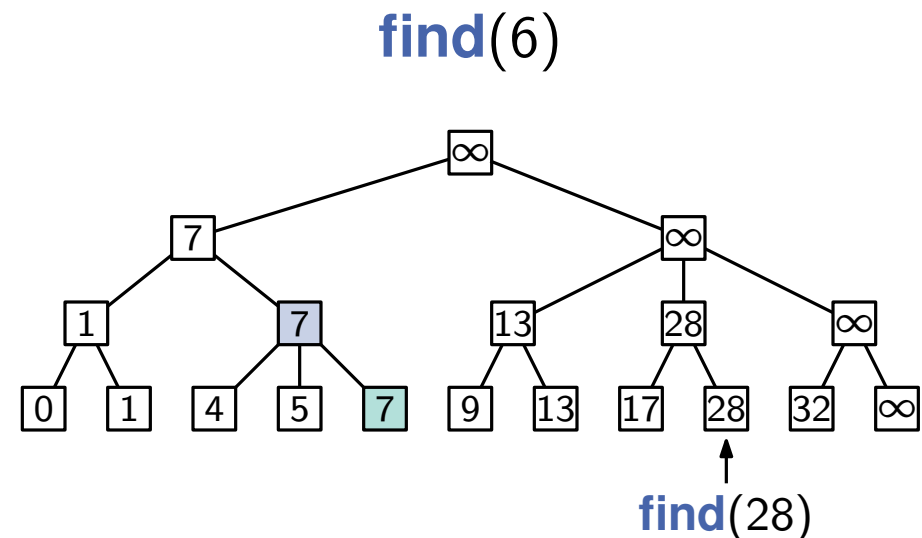
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

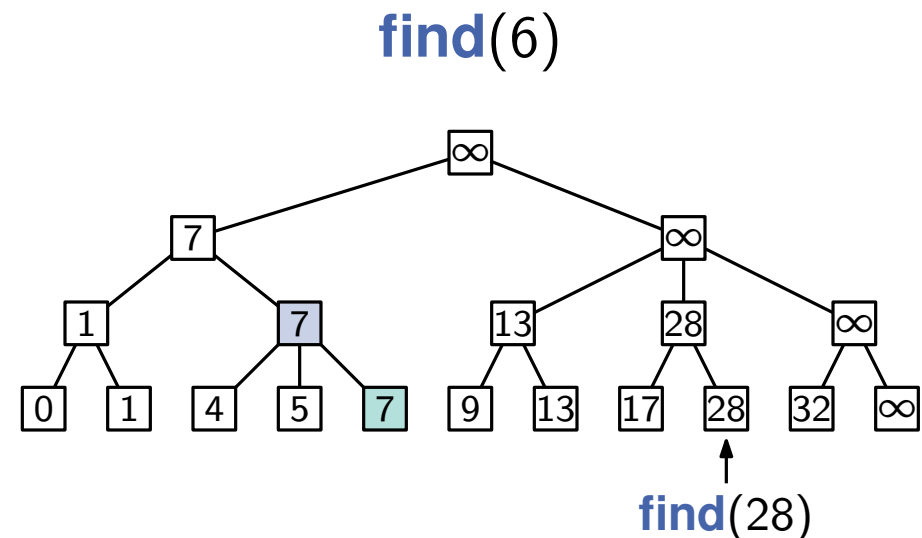
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

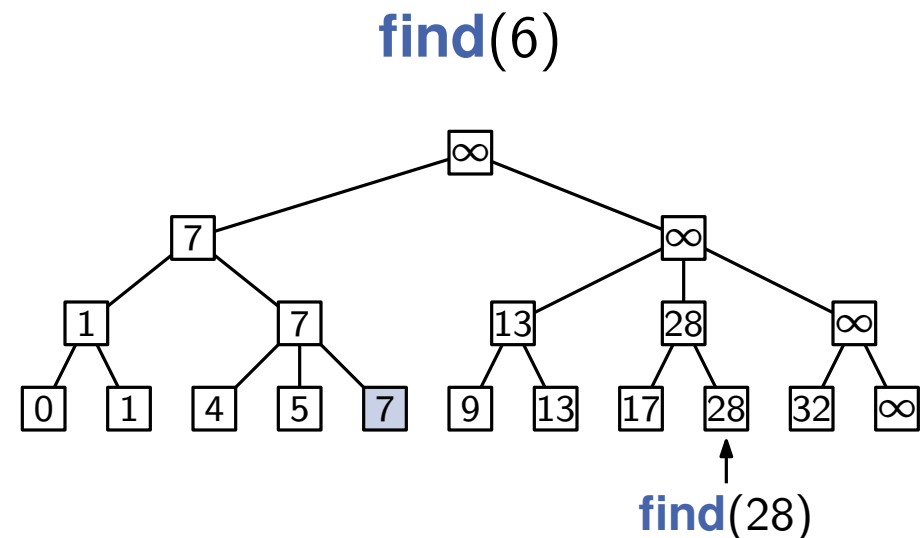
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

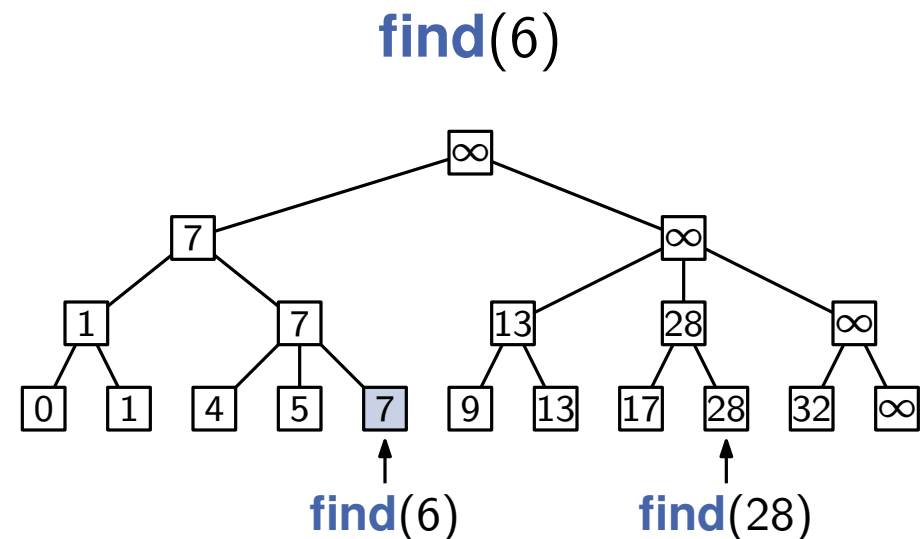
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Suche

Erinnerung

- Ziel: finde erstes Blatt mit Schlüssel $\geq k$
- Invariante: $a.key = \text{größter Schlüssel im Teilbaum unter } a$

find(Key k)

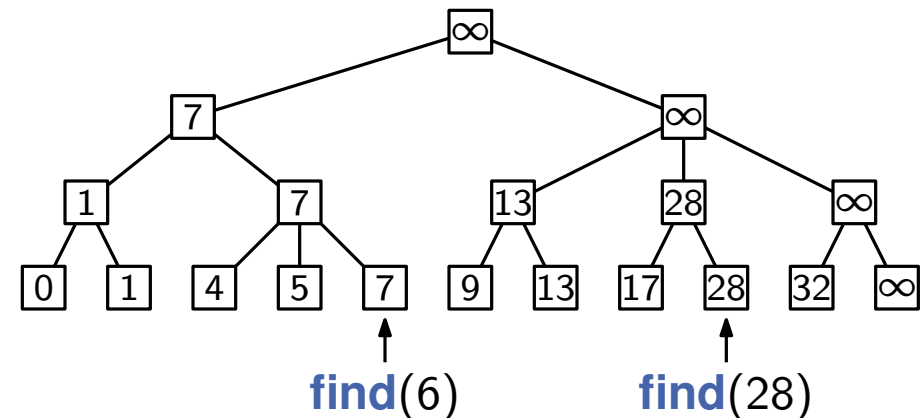
Node $a := \text{root}$

while a is not a leaf **do**

$i := \min\{i \mid k \leq a.\text{child}[i].\text{key}\}$

$a := a.\text{child}[i]$

return a



Einfügen – Was wollen wir eigentlich genau?

Option 1: `insert(k)`

- durchsuchbare Menge von Schlüsseln
- Duplikate beim Einfügen überspringen

Einfügen – Was wollen wir eigentlich genau?

Option 1: **insert**(k)

- durchsuchbare Menge von Schlüsseln
- Duplikate beim Einfügen überspringen

Option 2: **set**(k, v)

- Abbildung von Schlüsseln auf Werte
- speichere zusätzlich einen Wert an jedem Blatt
- Blatt mit Schlüssel existiert nicht → neues Blatt
- Blatt existiert → Wert überschreiben

Einfügen – Was wollen wir eigentlich genau?

Option 1: `insert(k)`

- durchsuchbare Menge von Schlüsseln
- Duplikate beim Einfügen überspringen

Option 2: `set(k, v)`

- Abbildung von Schlüsseln auf Werte
- speichere zusätzlich einen Wert an jedem Blatt
- Blatt mit Schlüssel existiert nicht → neues Blatt
- Blatt existiert → Wert überschreiben

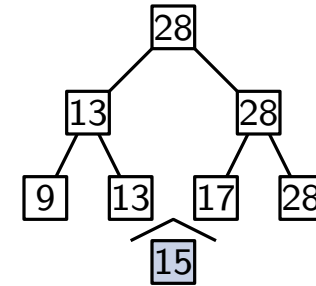
Heute

- wir betrachten hier Option 1
- Option 2 lässt sich aber analog umsetzen

Einfügen – Vorüberlegung

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

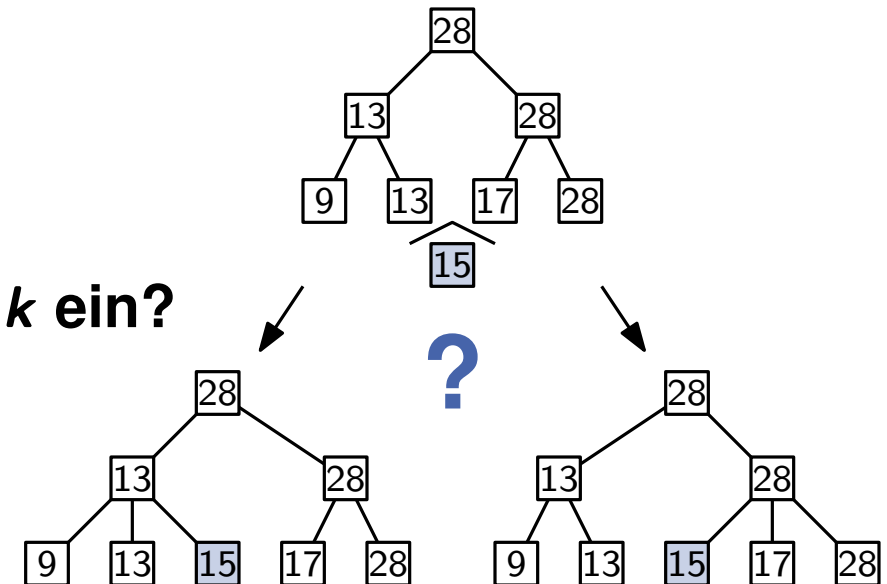


Einfügen – Vorüberlegung

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

Schritt 1: Wo genau fügen wir den neuen Schlüssel k ein?



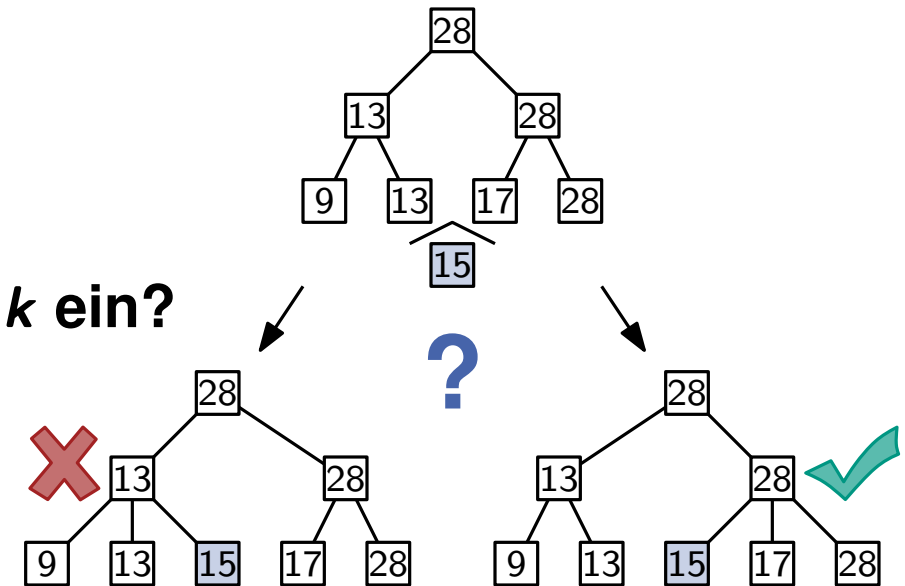
Einfügen – Vorüberlegung

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

Schritt 1: Wo genau fügen wir den neuen Schlüssel k ein?

- an den Elter des Nachfolgers
- also: neues Blatt wird an $\text{find}(k).\text{parent}$ gehängt



Einfügen – Vorüberlegung

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

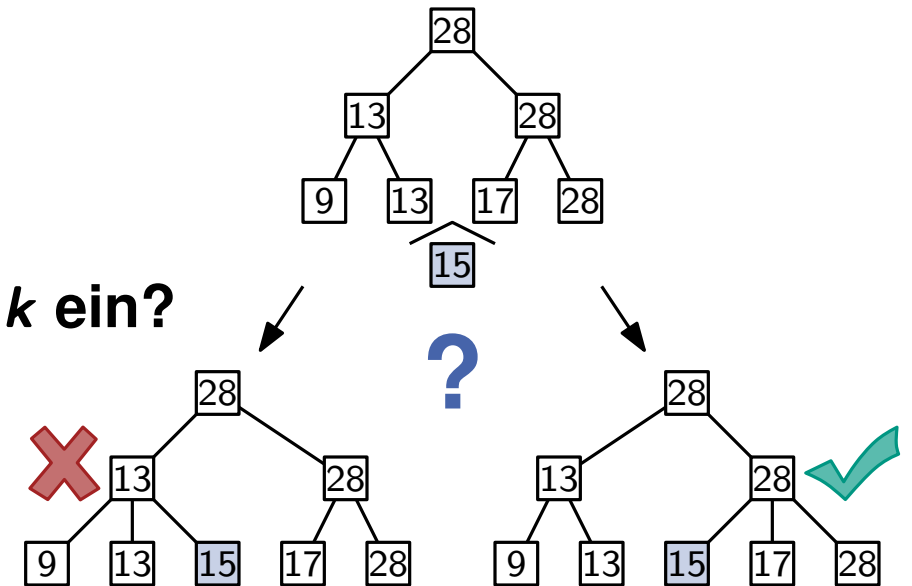
- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

Schritt 1: Wo genau fügen wir den neuen Schlüssel k ein?

- an den Elter des Nachfolgers
- also: neues Blatt wird an $\text{find}(k).\text{parent}$ gehängt

Anmerkung

- eigentlich egal: an den Elter des Vorgängers hängen würde auch gehen
- der Elter des Nachfolgers hat aber ein paar Vorteile
 - $\text{find}(k)$ liefert direkt den Nachfolger
 - Nachfolger existiert immer, dank des ∞ -Knotens \rightarrow kein Sonderfall
 - Schlüssel der inneren Knoten bleiben korrekt \rightarrow kein Update nötig

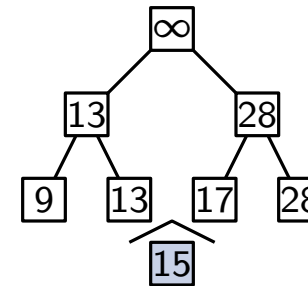


Einfügen

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

insert(*Key k*)



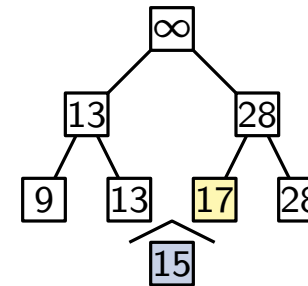
Einfügen

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

`insert(Key k)`

 | `if find(k).key = k then return`



Einfügen

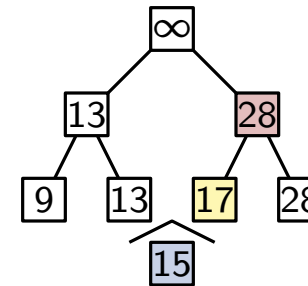
Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

insert(Key k)

if `find(k).key = k` **then return**

Node $a :=$ `find(k).parent`



Einfügen

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

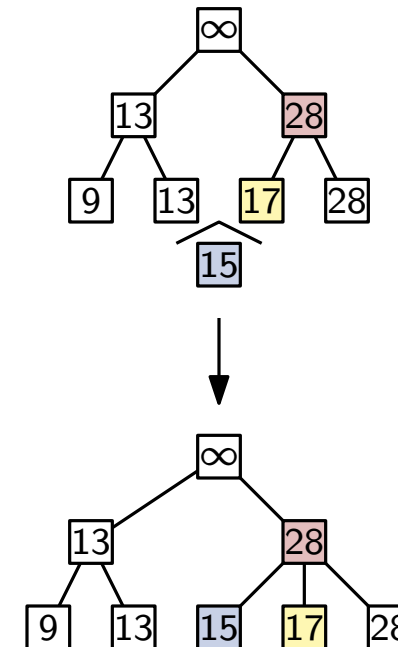
insert(Key k)

if `find(k).key = k` **then return**

Node $a :=$ `find(k).parent`

Node $b :=$ {key : k , parent : a } // new leaf

insert b into a .child // keeping it sorted



Einfügen

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

insert(Key k)

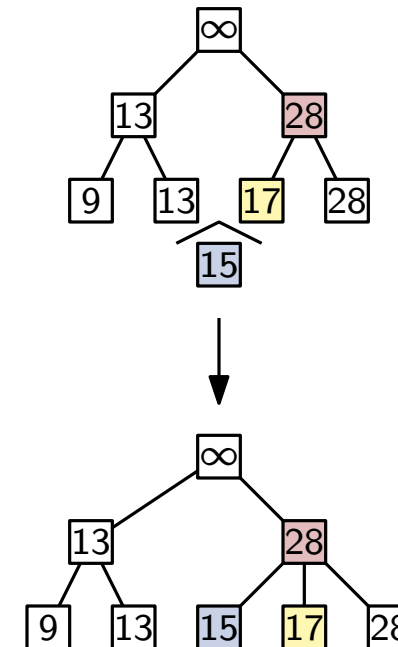
if `find(k).key = k` **then return**

Node $a :=$ `find(k).parent`

Node $b :=$ {key : k , parent : a } // new leaf

insert b into a .child // keeping it sorted

// invariant: keys are correct (largest key in subtree)



Einfügen

Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

insert(Key k)

if $\text{find}(k).key = k$ **then return**

$\text{Node } a := \text{find}(k).parent$

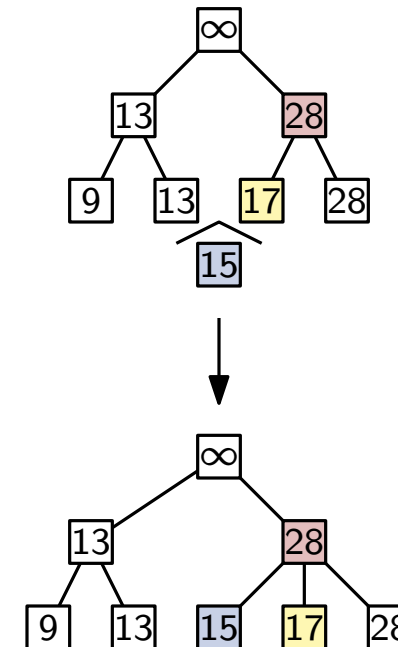
$\text{Node } b := \{key : k, parent : a\}$ // new leaf

insert b into $a.child$ // keeping it sorted

// invariant: keys are correct (largest key in subtree)

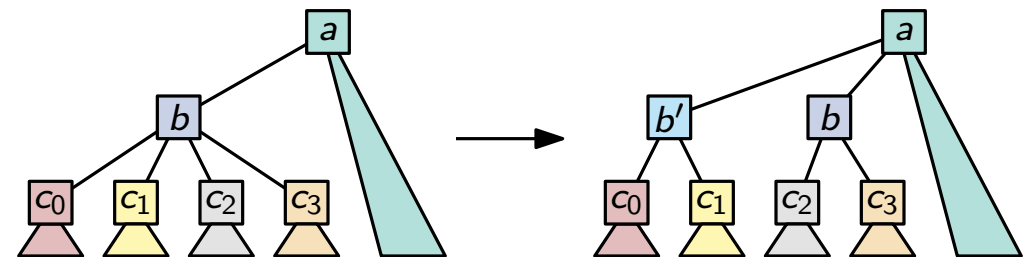
if a has four children **then**

split(a)



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

`split(Node b)`

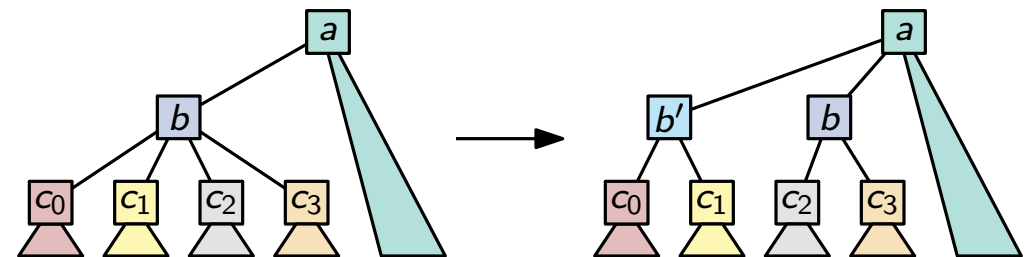


Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

$a := b.\text{parent}$

$c_i := b.\text{child}[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)



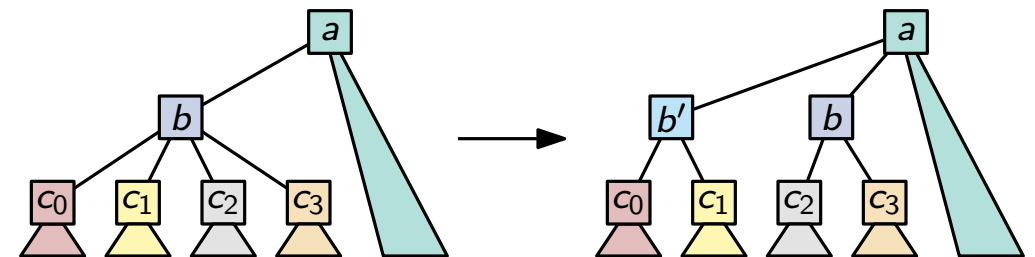
Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

$a := b.\text{parent}$

$c_i := b.\text{child}[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node b' := {key: c_1 .key, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

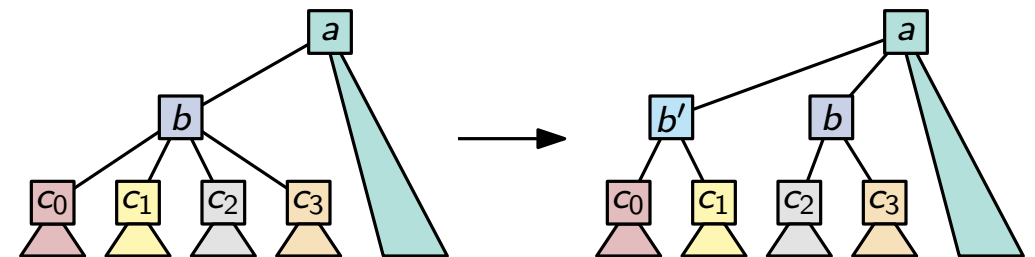
split(Node b)

$a := b.\text{parent}$

$c_i := b.\text{child}[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node b' := {key: c_1 .key, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

insert b' into $a.\text{child}$



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

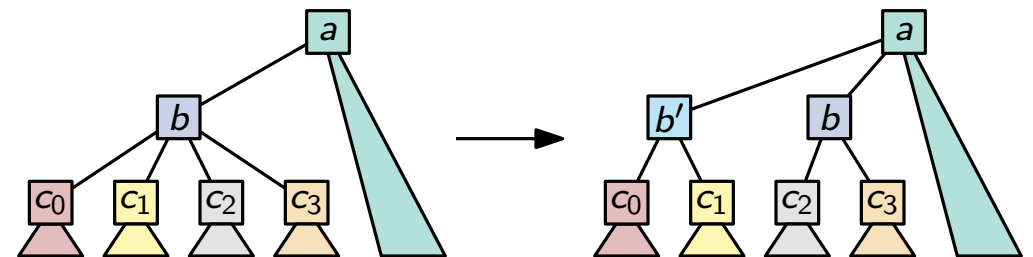
$a := b.parent$

$c_i := b.child[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node b' := {key: $c_1.key$, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

insert b' into $a.child$

$c_0.parent, c_1.parent := b'$



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

$a := b.parent$

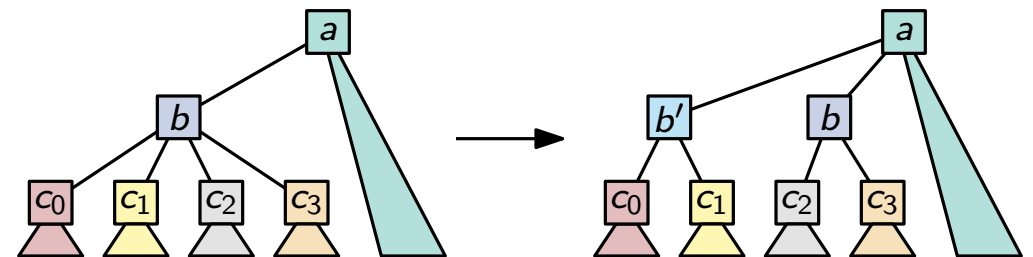
$c_i := b.child[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node b' := {key: $c_1.key$, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

insert b' into $a.child$

$c_0.parent, c_1.parent := b'$

remove c_0 and c_1 from $b.child$





Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

Was haben wir da noch vergessen?

split(Node b)

$a := b.parent$

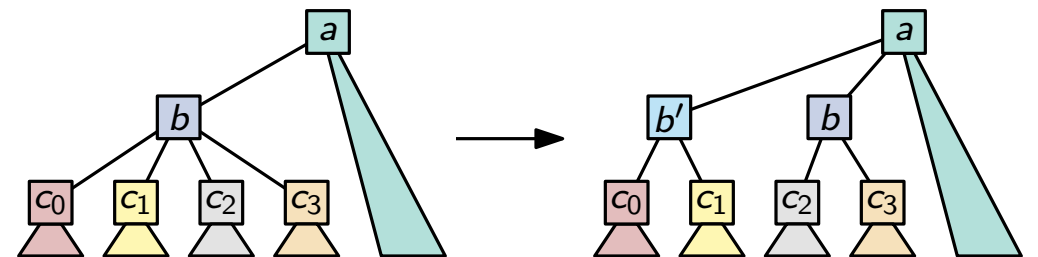
$c_i := b.child[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node b' := {key: $c_1.key$, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

insert b' into $a.child$

$c_0.parent, c_1.parent := b'$

remove c_0 and c_1 from $b.child$



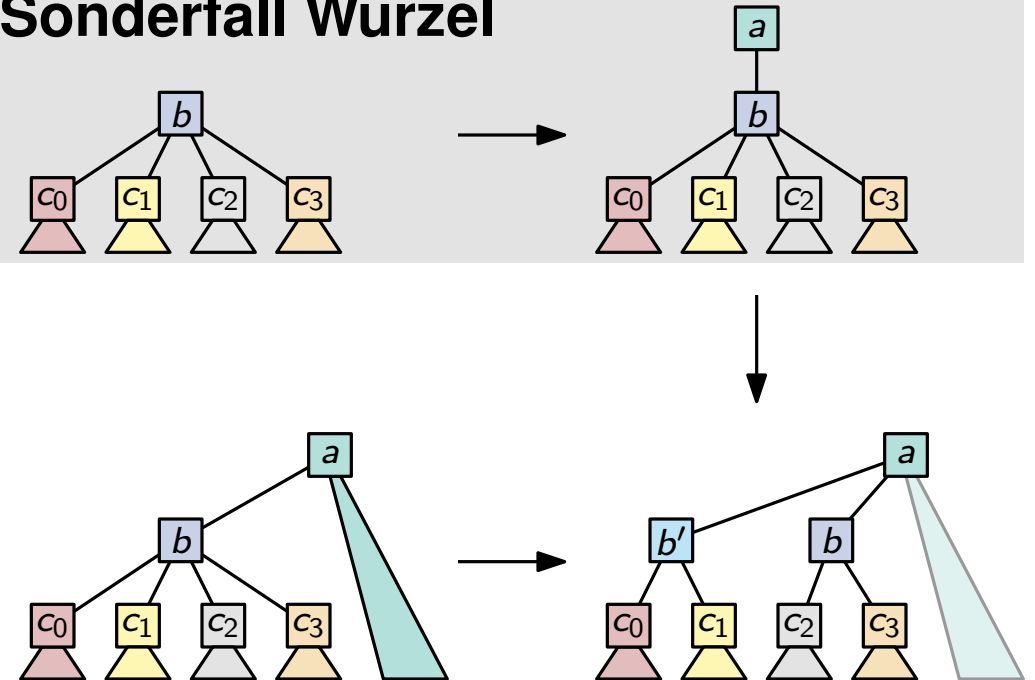
Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

```

if  $b = \text{root}$  then
  Node  $a := \{\text{key}: \infty; \text{parent}: \perp; \text{child}: \langle b \rangle\}$ 
   $b.\text{parent} := a$ 
   $\text{root} := a$ 
 $a := b.\text{parent}$ 
 $c_i := b.\text{child}[i]$  (for  $i \in \{0, 1\}$ )
  Node  $b' := \{\text{key}: c_1.\text{key}, \text{parent}: a, \text{child}: \langle c_0, c_1 \rangle\}$ 
  insert  $b'$  into  $a.\text{child}$ 
   $c_0.\text{parent}, c_1.\text{parent} := b'$ 
  remove  $c_0$  and  $c_1$  from  $b.\text{child}$ 
  
```

Sonderfall Wurzel



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

```

if  $b = \text{root}$  then
  Node  $a := \{\text{key}: \infty; \text{parent}: \perp; \text{child}: \langle b \rangle\}$ 
   $b.\text{parent} := a$ 
   $\text{root} := a$ 

```

$a := b.\text{parent}$

$c_i := b.\text{child}[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node $b' := \{\text{key}: c_1.\text{key}, \text{parent}: a, \text{child}: \langle c_0, c_1 \rangle\}$

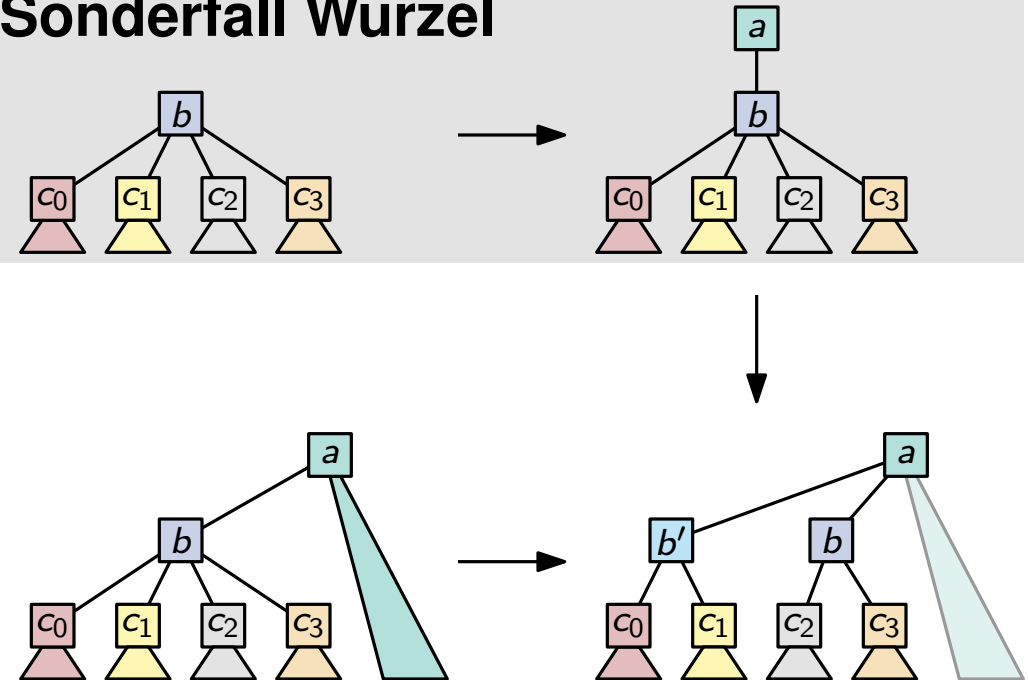
insert b' into $a.\text{child}$

$c_0.\text{parent}, c_1.\text{parent} := b'$

remove c_0 and c_1 from $b.\text{child}$

// invariant: keys are correct (largest key in subtree)

Sonderfall Wurzel



Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

split(Node b)

```

if  $b = \text{root}$  then
  Node  $a := \{\text{key}: \infty; \text{parent}: \perp; \text{child}: \langle b \rangle\}$ 
   $b.\text{parent} := a$ 
   $\text{root} := a$ 

```

$a := b.\text{parent}$

$c_i := b.\text{child}[i]$ (for $i \in \{0, 1\}$)

Node $b' := \{\text{key}: c_1.\text{key}, \text{parent}: a, \text{child}: \langle c_0, c_1 \rangle\}$

insert b' into $a.\text{child}$

$c_0.\text{parent}, c_1.\text{parent} := b'$

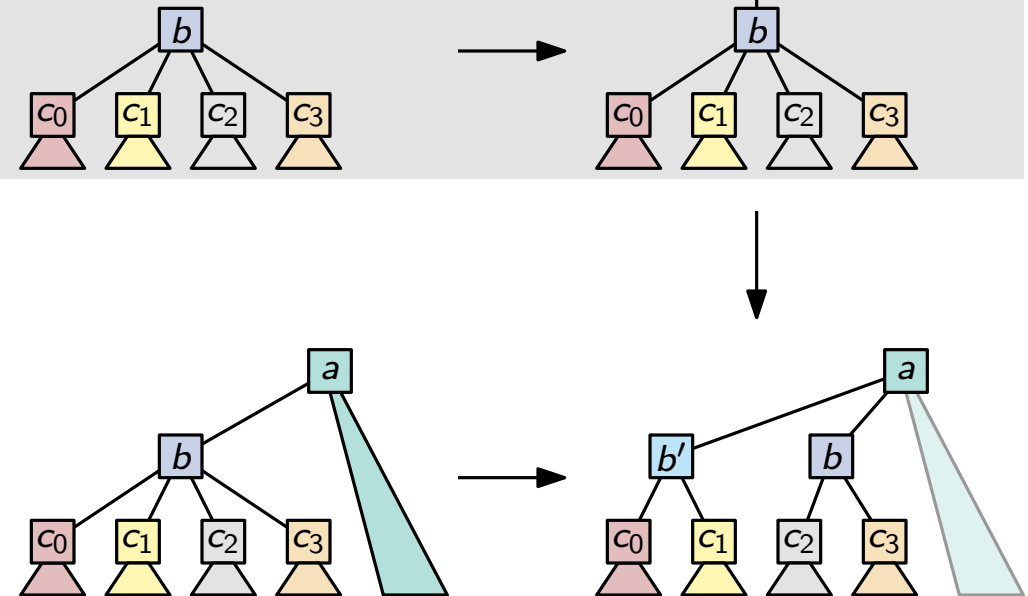
remove c_0 and c_1 from $b.\text{child}$

// invariant: keys are correct (largest key in subtree)

if a has four children **then**

split(a)

Sonderfall Wurzel



ggf. rekursiv aufspalten

Geht das noch etwas schöner?

Node b' := {key: c_1 .key, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

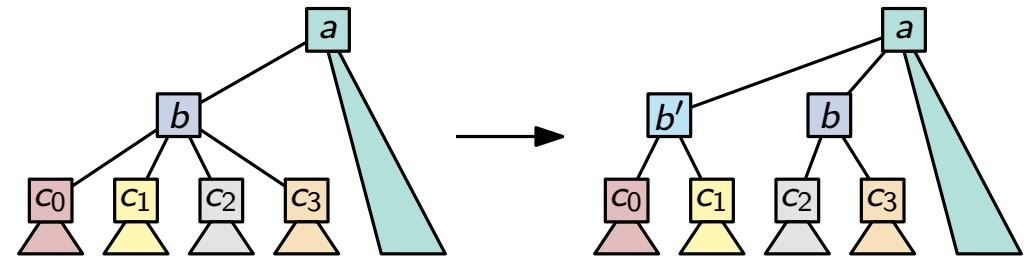
insert b' into a .child

c_0 .parent, c_1 .parent := b'

remove c_0 and c_1 from b .child

Probleme

- schwer zu parsen
- fehleranfällig
- Wiederverwendbarkeit



Geht das noch etwas schöner?

Node b' := {key: c_1 .key, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

insert b' into a .child

c_0 .parent, c_1 .parent := b'

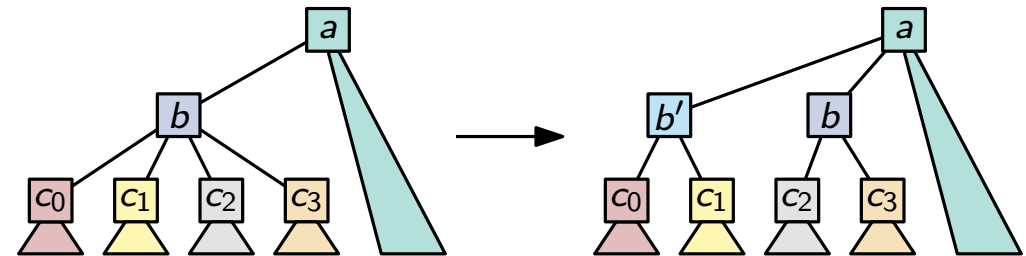
remove c_0 and c_1 from b .child

Probleme

- schwer zu parsen
- fehleranfällig
- Wiederverwendbarkeit

Eigentlich machen wir drei Dinge

- Knoten b' erstellen
- Kinder c_0, c_1 von b nach b' verschieben
- b' als Kind zu a hinzufügen



Geht das noch etwas schöner?

```

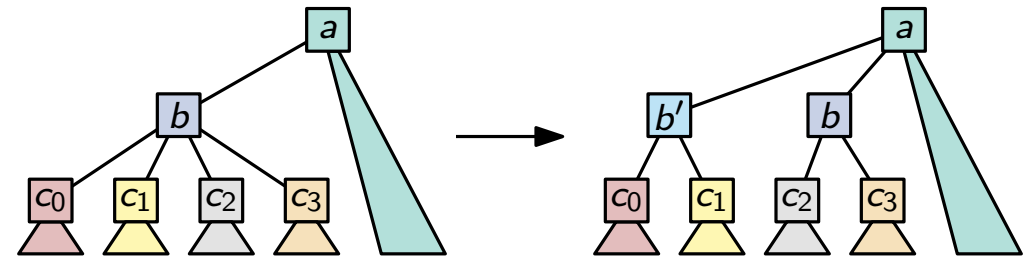
Node b' := {key: c1.key, parent: a, child: <c0, c1>}
insert b' into a.child
c0.parent, c1.parent := b'
remove c0 and c1 from b.child
  
```

Probleme

- schwer zu parsen
- fehleranfällig
- Wiederverwendbarkeit

Eigentlich machen wir drei Dinge

- Knoten b' erstellen
- Kinder c_0, c_1 von b nach b' verschieben
- b' als Kind zu a hinzufügen



Geht das noch etwas schöner?

Node b' := {key: c_1 .key, parent: a , child: $\langle c_0, c_1 \rangle$ }
 insert b' into a .child
 c_0 .parent, c_1 .parent := b'
 remove c_0 and c_1 from b .child

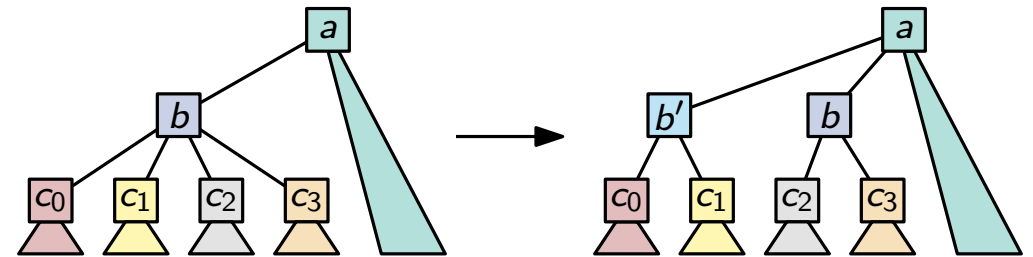
Probleme

- schwer zu parsen
- fehleranfällig
- Wiederverwendbarkeit

Eigentlich machen wir drei Dinge

- Knoten b' erstellen
- Kinder c_0, c_1 von b nach b' verschieben
- b' als Kind zu a hinzufügen

create Node b'
 move children c_0 and c_1 from b to b'
 add b' as child to a



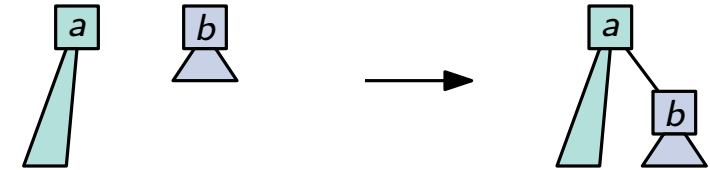
Besser

- lagere grundlegende Operationen in Subroutinen aus

Grundlegende Subroutinen

***b* als Kind von *a* einfügen**

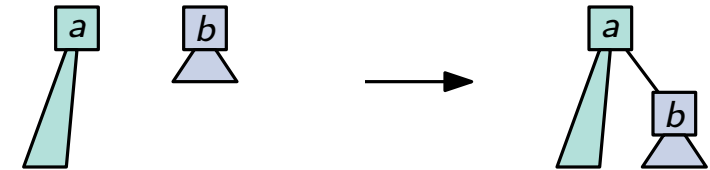
- *b* an der richtigen Position von *a.child* einfügen
- *b.parent* auf *a* setzen
- *a.key* auf *b.key* setzen, falls *b* das rechte Kind ist



Grundlegende Subroutinen

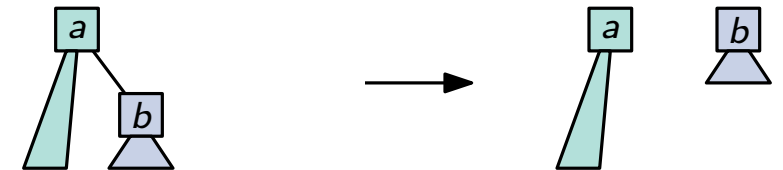
***b* als Kind von *a* einfügen**

- *b* an der richtigen Position von *a.child* einfügen
- *b.parent* auf *a* setzen
- *a.key* auf *b.key* setzen, falls *b* das rechte Kind ist



Kind *b* von *a* löschen

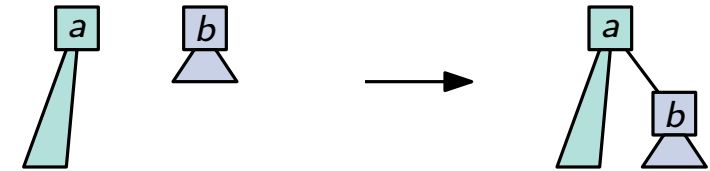
- *b* aus *a.child* entfernen
- *b.parent* auf \perp setzen
- *a.key* aktualisieren, falls *b* das rechte Kind war



Grundlegende Subroutinen

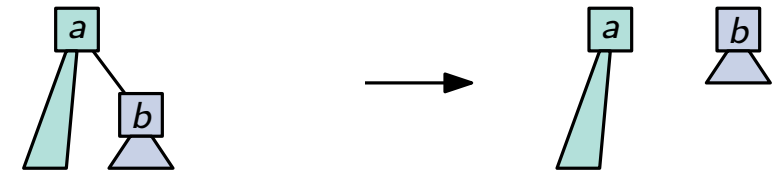
***b* als Kind von *a* einfügen**

- *b* an der richtigen Position von *a.child* einfügen
- *b.parent* auf *a* setzen
- *a.key* auf *b.key* setzen, falls *b* das rechte Kind ist

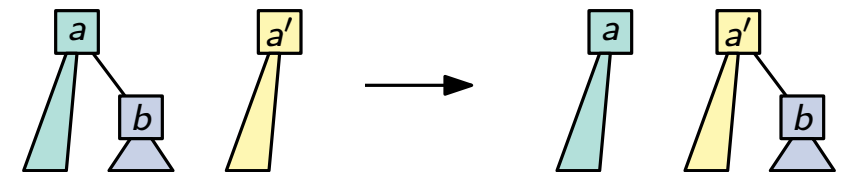


Kind *b* von *a* löschen

- *b* aus *a.child* entfernen
- *b.parent* auf \perp setzen
- *a.key* aktualisieren, falls *b* das rechte Kind war



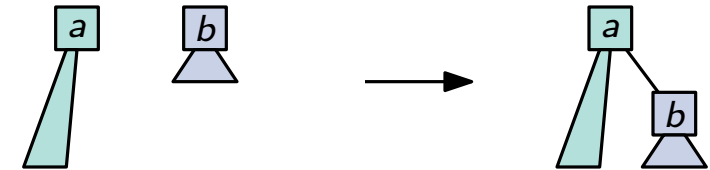
Kind *b* von Elter *a* zu *a'* schieben: löschen + einfügen



Grundlegende Subroutinen

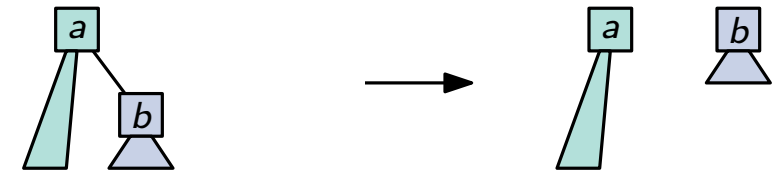
b als Kind von a einfügen

- b an der richtigen Position von $a.child$ einfügen
- $b.parent$ auf a setzen
- $a.key$ auf $b.key$ setzen, falls b das rechte Kind ist

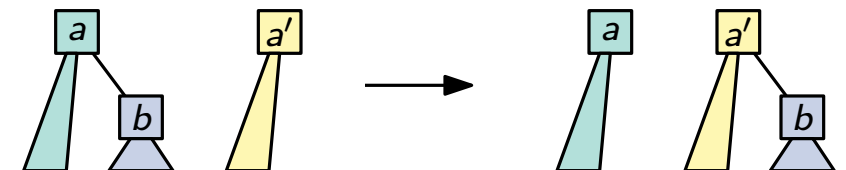


Kind b von a löschen

- b aus $a.child$ entfernen
- $b.parent$ auf \perp setzen
- $a.key$ aktualisieren, falls b das rechte Kind war



Kind b von Elter a zu a' schieben: löschen + einfügen



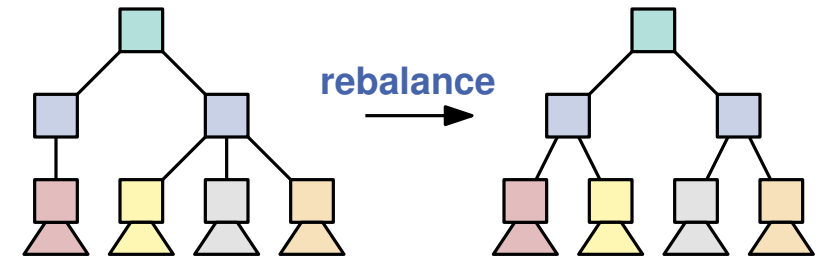
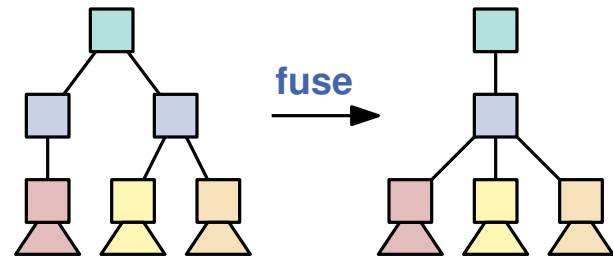
Anmerkung: Aktualisierung des Schlüssels

- machen wir hier nur lokal \rightarrow wird insbesondere nicht an den Elter von a weitergegeben
- daher: Subroutinen immer bottom-up ausführen
- ggf. am Ende nochmal Restpfad zur Wurzel aktualisieren (werden wir beim Löschen gleich noch sehen)

Löschen – Vorüberlegung

Erinnerung

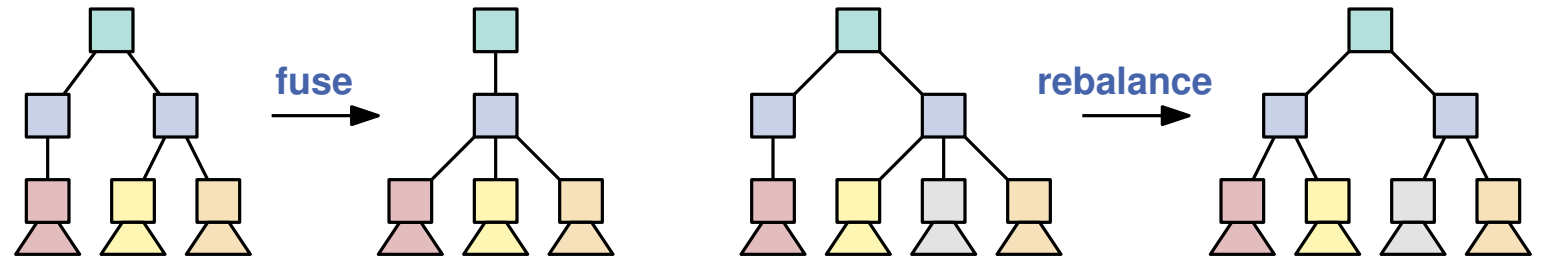
- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Versmelzen oder Ausbalancieren)



Löschen – Vorüberlegung

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)



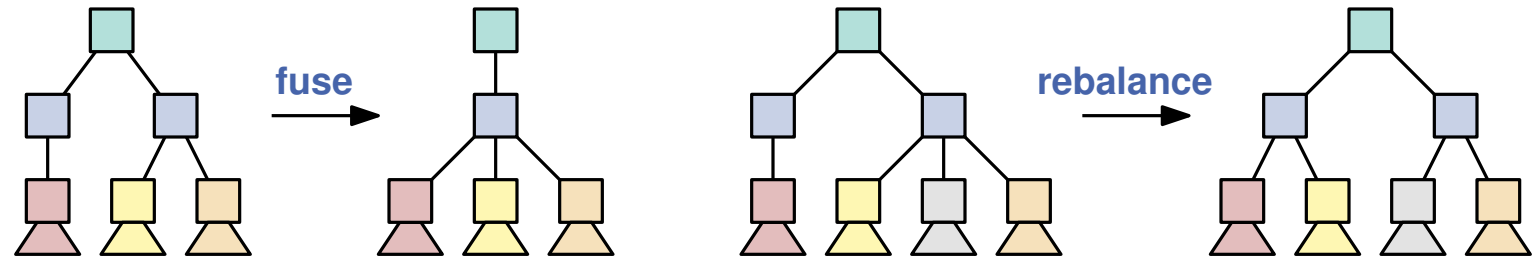
Rekursive Aufrufe

- nach Verschmelzen: Elter hat ggf. nur noch ein Kind → rekursiv aufräumen
- Problem wird Schritt für Schritt weiter nach oben propagiert
- Stopp bei Ausbalancieren oder wenn der Elter bei Verschmelzen vorher drei Kinder hatte

Löschen – Vorüberlegung

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)



Rekursive Aufrufe

- nach Verschmelzen: Elter hat ggf. nur noch ein Kind → rekursiv aufräumen
- Problem wird Schritt für Schritt weiter nach oben propagiert
- Stopp bei Ausbalancieren oder wenn der Elter bei Verschmelzen vorher drei Kinder hatte

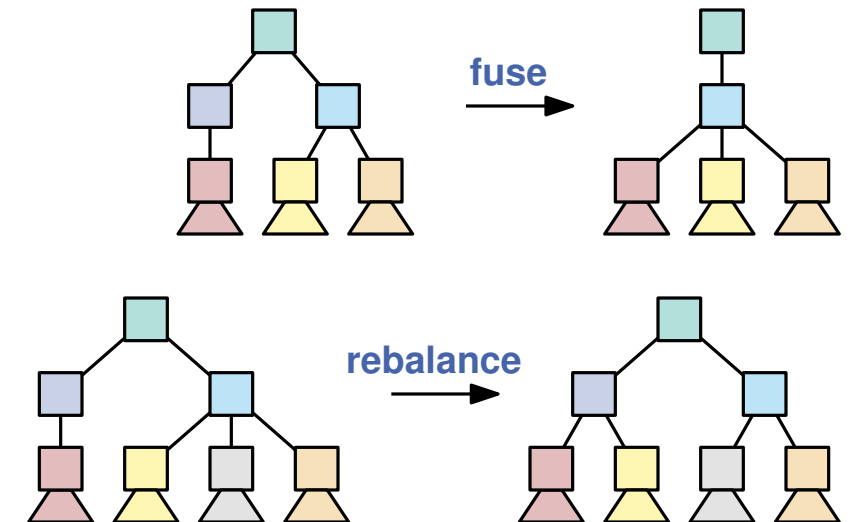
Aktualisierung der Schlüssel

- benutze Operationen von eben → Schlüssel werden auf dem Weg nach oben aktualisiert
- stimmt nicht für den restlichen Pfad zur Wurzel, wenn die Rekursion stoppt
- ignorieren wir zunächst und fixen es später

Existierendes Blatt entfernen

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)



Existierendes Blatt entfernen

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)

remove(Key k)

$b := \text{find}(k)$

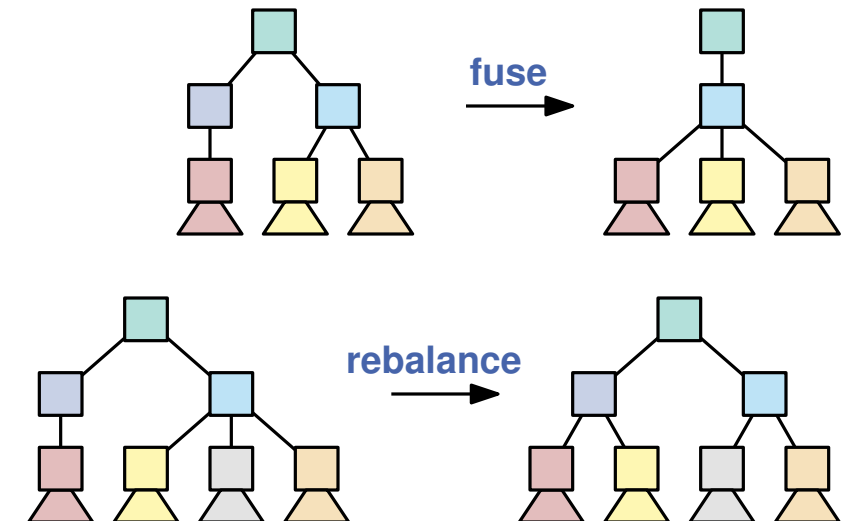
if $b.\text{key} \neq k$ **then return**

$a := b.\text{parent}$

remove b as child from a

if a has only one child **then**

fuseOrRebalance(a)





Existierendes Blatt entfernen

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)

remove(Key k)

$b := \text{find}(k)$

if $b.\text{key} \neq k$ **then return**

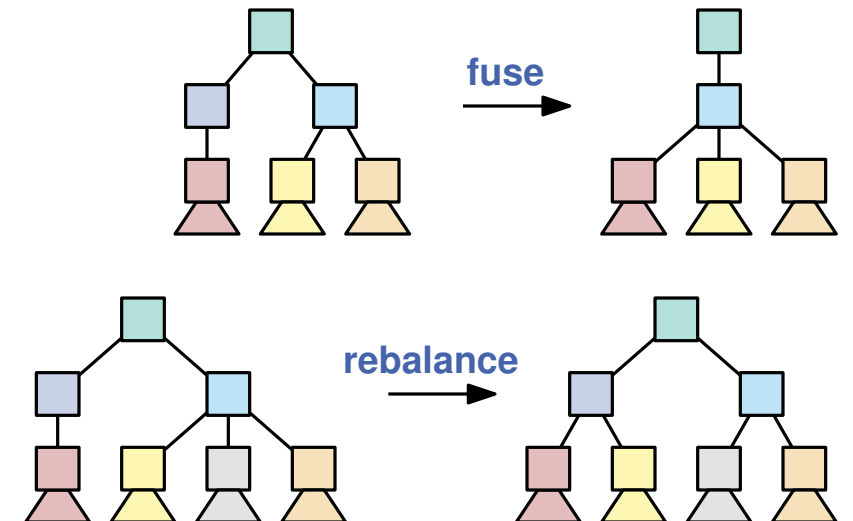
$a := b.\text{parent}$

remove b as child from a

if a has only one child **then**

fuseOrRebalance(a)

Welche Knoten haben garantiert den richtigen Schlüssel?



Existierendes Blatt entfernen

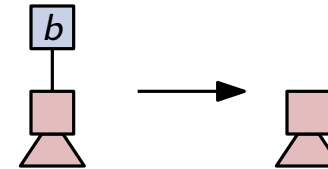
Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)

`fuseOrRebalance(Node b)`

```

if  $b = \text{root}$  then
   $\text{root} := b.\text{child}[0]$ 
  remove child  $\text{root}$  from  $b$ 
  return
  
```



`remove(Key k)`

```
 $b := \text{find}(k)$ 
```

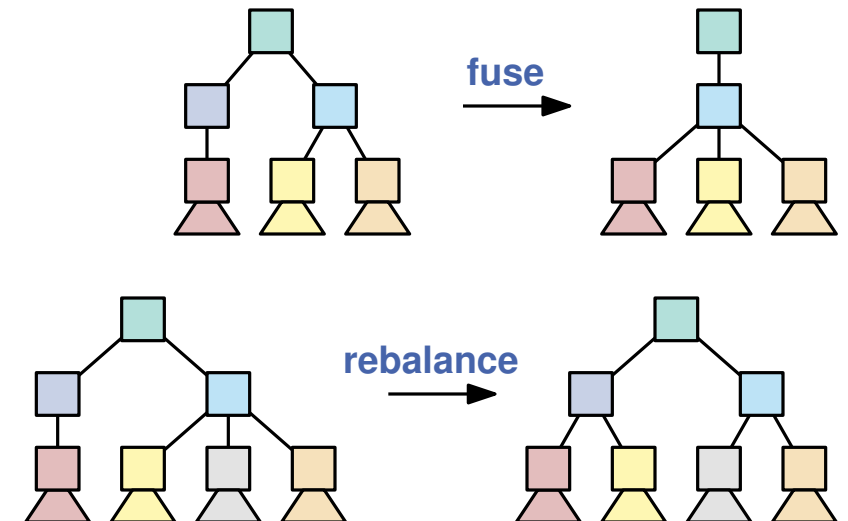
```
if  $b.\text{key} \neq k$  then return
```

```
 $a := b.\text{parent}$ 
```

```
remove  $b$  as child from  $a$ 
```

```
if  $a$  has only one child then
```

```
  fuseOrRebalance(a)
```



Existierendes Blatt entfernen

Erinnerung

- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen
(Verschmelzen oder Ausbalancieren)

remove(Key k)

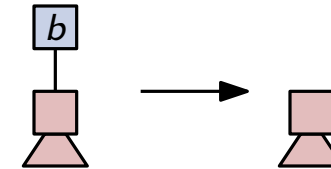
```

 $b := \text{find}(k)$ 
if  $b.\text{key} \neq k$  then return
 $a := b.\text{parent}$ 
remove  $b$  as child from  $a$ 
if  $a$  has only one child then
  fuseOrRebalance( $a$ )
  
```

fuseOrRebalance(Node b)

```

if  $b = \text{root}$  then
   $\text{root} := b.\text{child}[0]$ 
  remove child  $\text{root}$  from  $b$ 
  return
  
```



```

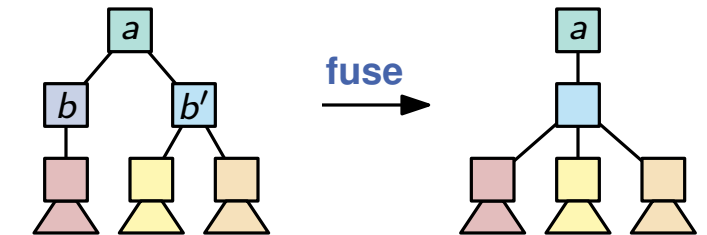
Node  $a := b.\text{parent}$ 
  
```

```

Node  $b' = \text{successor or predecessor of } b \text{ in } a.\text{child}$ 
  
```

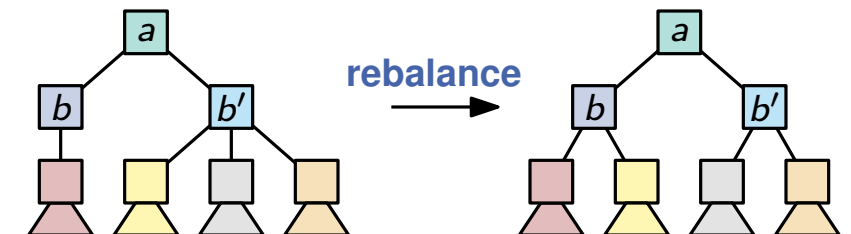
```

if  $b'$  has two children then
  fuse( $b, b'$ )
  
```

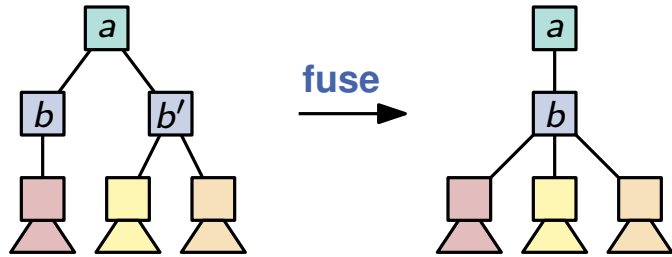


```

else //  $b'$  has three children
  rebalance( $b, b'$ )
  
```



fuse und rebalance



fuse(Node b , Node b')

$a := b.\text{parent}$

for Node $c \in b'.\text{child}$ **do**

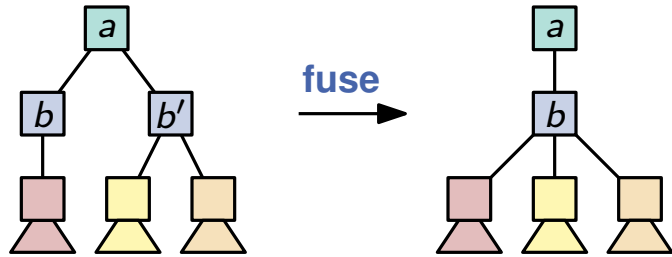
 | move child c from b' to b

 remove b' as child from a

if a has only one child **then**

 | **fuseOrRebalance**(a)

fuse und rebalance



fuse(Node b , Node b')

$a := b.\text{parent}$

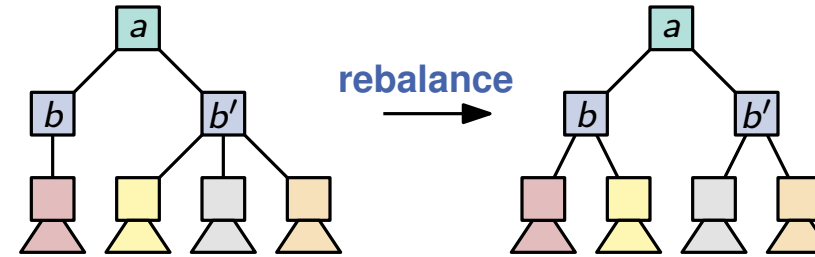
for Node $c \in b'.\text{child}$ **do**

 | move child c from b' to b

 remove b' as child from a

if a has only one child **then**

 | **fuseOrRebalance**(a)



rebalance(Node b , Node b')

$a := b.\text{parent}$

$\ell := \arg \min_{x \in \{b, b'\}} x.\text{key}$

$r := \arg \max_{x \in \{b, b'\}} x.\text{key}$

if ℓ has three children **do**

 | move child $\ell.\text{child}[2]$ from ℓ to r

else

 | move child $r.\text{child}[0]$ from r to ℓ

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(*Node a*)

// only ancestors of *a* have incorrect keys

while $a \neq \text{root}$ **do**

$a := a.\text{parent}$

$a.\text{key} := \text{key of right-most child}$

// all keys are correct

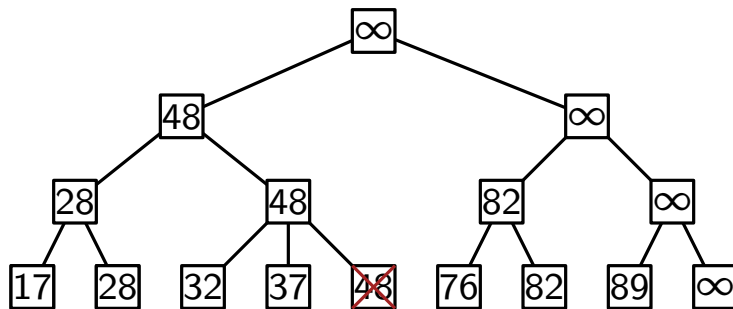
fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct

```



remove(Key k)

```

// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)

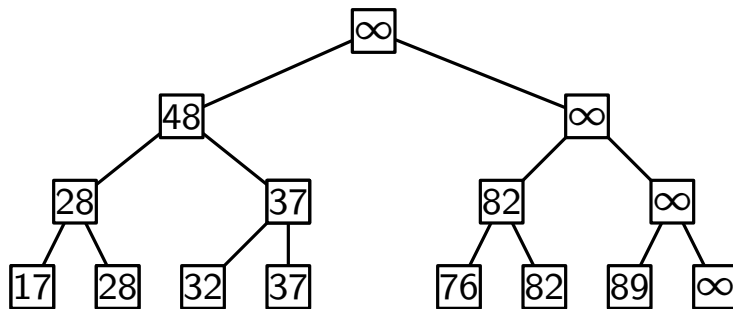
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



remove(Key k)

```

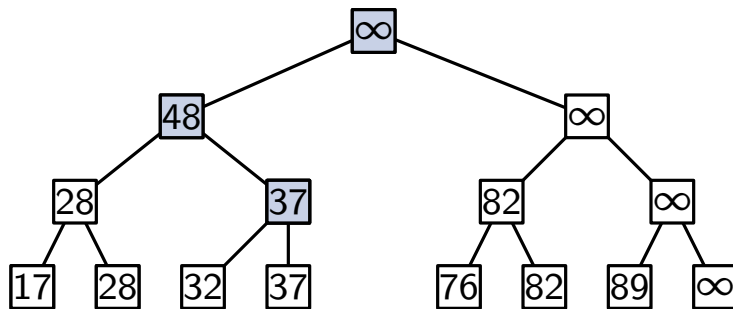
// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```


fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



remove(Key k)

```

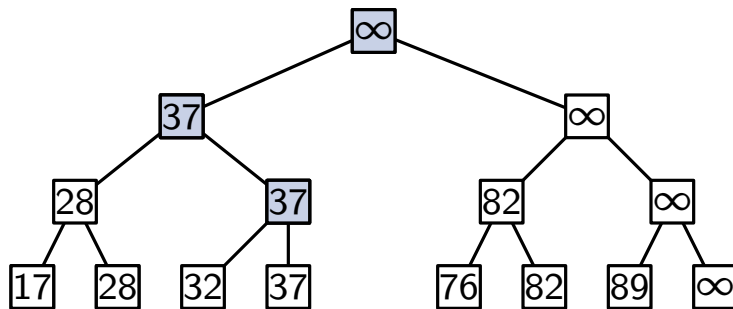
// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



remove(Key k)

```

// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct

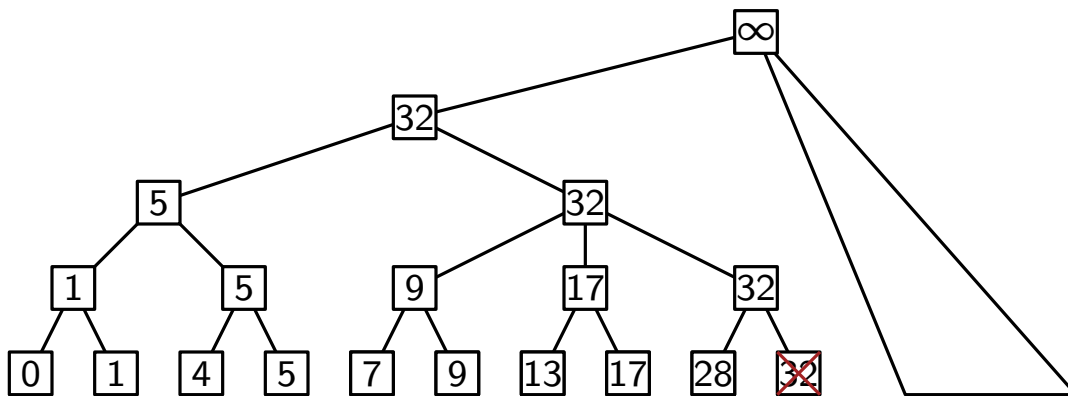
```

remove(Key k)

```

// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)

```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct

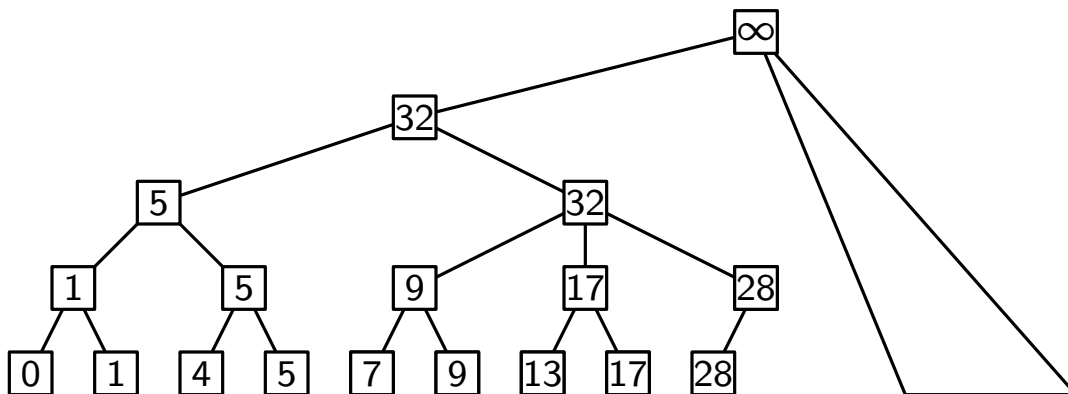
```

remove(Key k)

```

// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)

```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

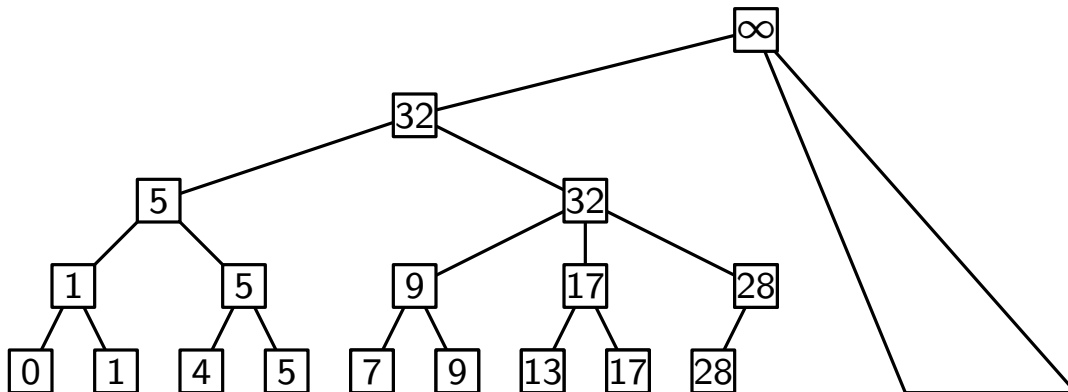
```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```

fuse(Node b, Node b')

```

// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
for Node c ∈ b'.child do
  | move child c from b' to b
  | remove b' as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  | fuseOrRebalance(a)
else
  | fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

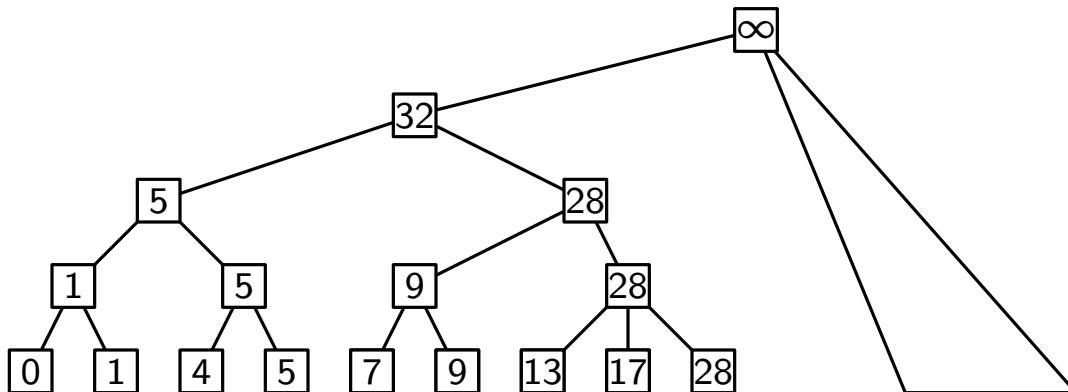
```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```

fuse(Node b, Node b')

```

// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
for Node c ∈ b'.child do
  | move child c from b' to b
  | remove b' as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  | fuseOrRebalance(a)
else
  | fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct

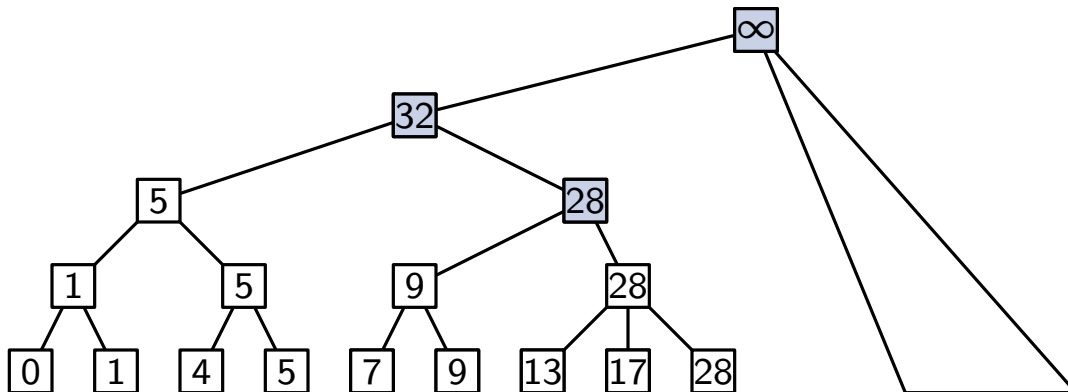
```

fuse(Node b, Node b')

```

// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
for Node c ∈ b'.child do
  | move child c from b' to b
  | remove b' as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  | fuseOrRebalance(a)
else
  | fixKeysOnPathToRoot(a)

```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

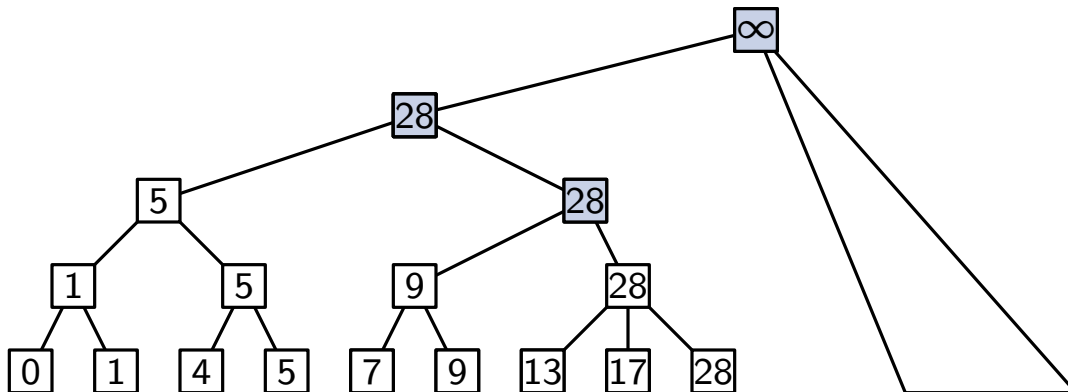
```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```

fuse(Node b, Node b')

```

// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
for Node c ∈ b'.child do
  | move child c from b' to b
  | remove b' as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  | fuseOrRebalance(a)
else
  | fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```



fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

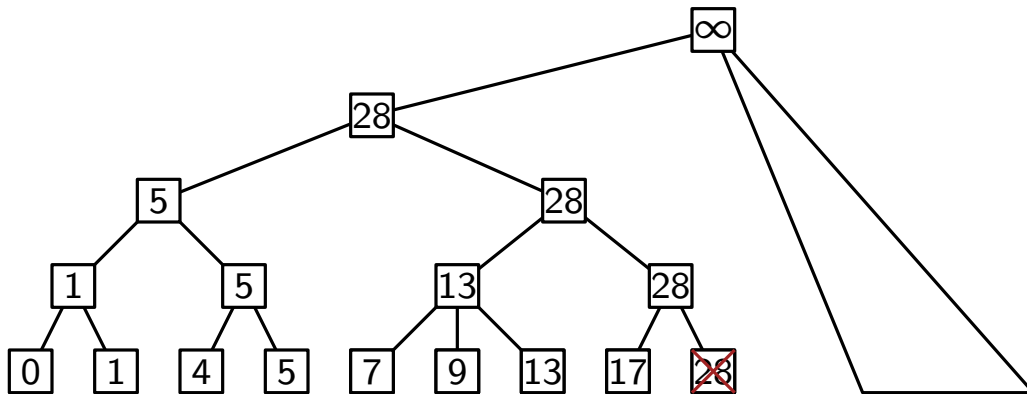
```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```

remove(Key k)

```

// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```

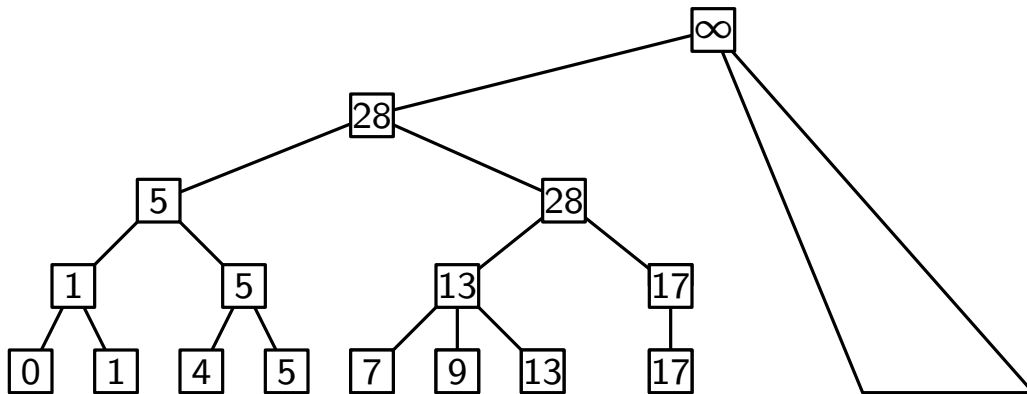


fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



remove(Key k)

```

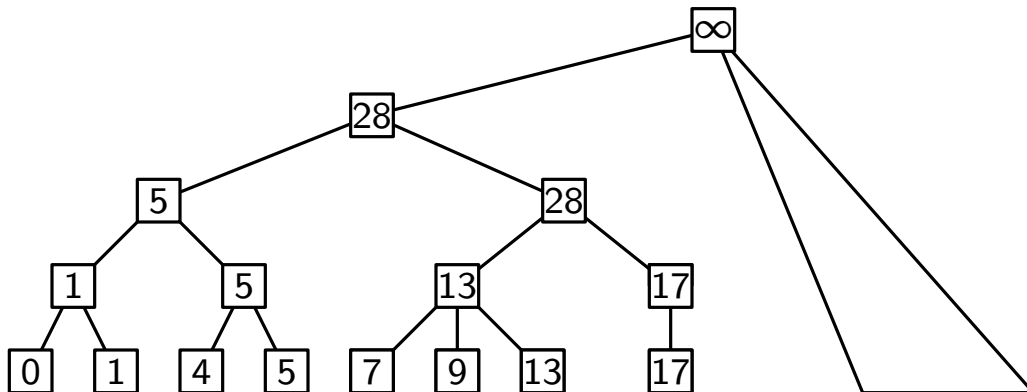
// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



rebalance(Node b, Node b')

```

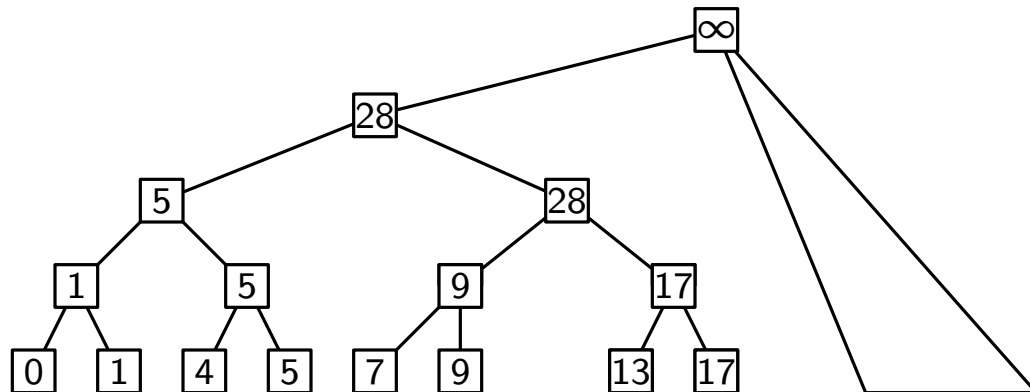
// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
ℓ := arg minx∈{b,b'} x.key
r := arg maxx∈{b,b'} x.key
if ℓ has three children do
  | move child ℓ.child[2] from ℓ to r
else
  | move child r.child[0] from r to ℓ
// only ancestors of b have incorrect keys
fixKeysOnPathToRoot(b)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



rebalance(Node b, Node b')

```

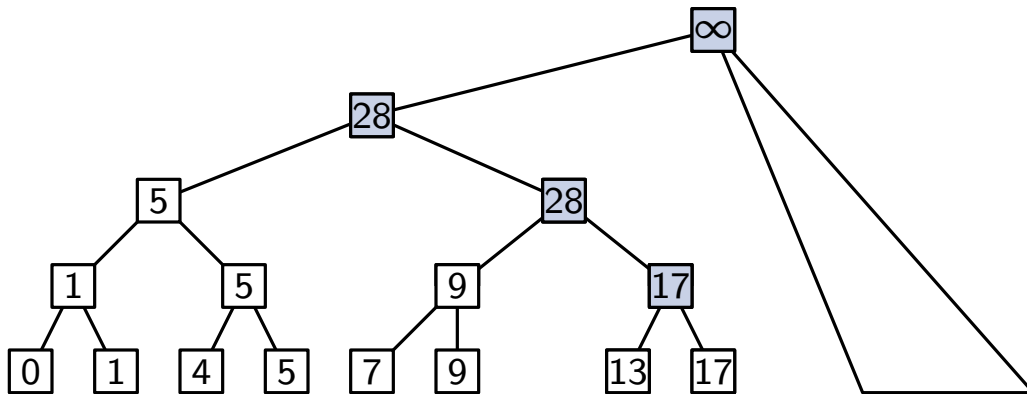
// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
ℓ := arg minx∈{b,b'} x.key
r := arg maxx∈{b,b'} x.key
if ℓ has three children do
  | move child ℓ.child[2] from ℓ to r
else
  | move child r.child[0] from r to ℓ
// only ancestors of b have incorrect keys
fixKeysOnPathToRoot(b)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



rebalance(Node b, Node b')

```

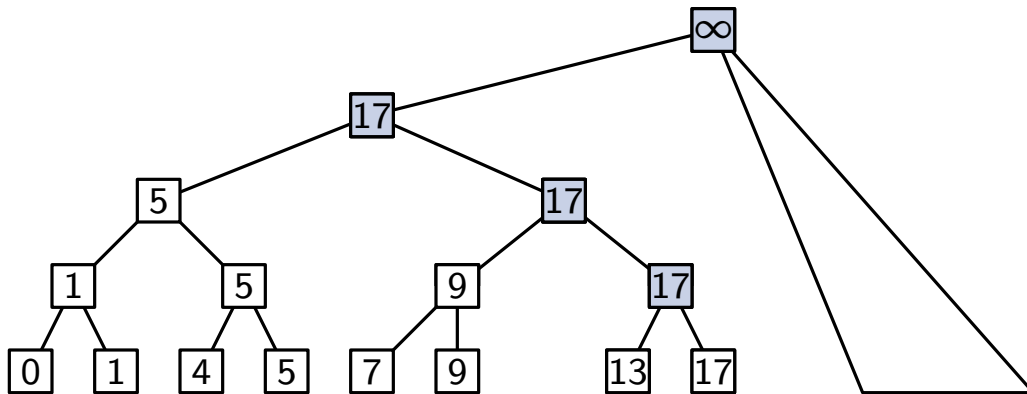
// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
ℓ := arg minx∈{b,b'} x.key
r := arg maxx∈{b,b'} x.key
if ℓ has three children do
  | move child ℓ.child[2] from ℓ to r
else
  | move child r.child[0] from r to ℓ
// only ancestors of b have incorrect keys
fixKeysOnPathToRoot(b)
  
```

fixKeysOnPathToRoot

fixKeysOnPathToRoot(Node a)

```

// only ancestors of a have incorrect keys
while a ≠ root do
  a := a.parent
  a.key := key of right-most child
// all keys are correct
  
```



rebalance(Node b, Node b')

```

// only ancestors of b have incorrect keys
a := b.parent
ℓ := arg minx∈{b,b'} x.key
r := arg maxx∈{b,b'} x.key
if ℓ has three children do
  | move child ℓ.child[2] from ℓ to r
else
  | move child r.child[0] from r to ℓ
// only ancestors of b have incorrect keys
fixKeysOnPathToRoot(b)
  
```

Zusammenfassung

(2, 3)-Bäume

- Ausarbeitung der Details
- insbesondere Verwaltung und Aktualisierung der Schlüssel
- Endergebnis: Pseudocode

Zusammenfassung

(2, 3)-Bäume

- Ausarbeitung der Details
- insbesondere Verwaltung und Aktualisierung der Schlüssel
- Endergebnis: Pseudocode

Der Weg ist das Ziel

- unwichtig: unser Endergebnis – der Pseudocode selbst
- wichtig: der Prozess, der uns dort hin gebracht hat
 - Sonderfälle vermeiden (∞ -Knoten)
 - Ziel: Lesbarkeit, Wiederverwendbarkeit, geringe Fehleranfälligkeit
 - keine Scheu nochmal umzubauen, wenn es zu frickelig wird

Zusammenfassung

(2, 3)-Bäume

- Ausarbeitung der Details
- insbesondere Verwaltung und Aktualisierung der Schlüssel
- Endergebnis: Pseudocode

Der Weg ist das Ziel

- unwichtig: unser Endergebnis – der Pseudocode selbst
- wichtig: der Prozess, der uns dort hin gebracht hat
 - Sonderfälle vermeiden (∞ -Knoten)
 - Ziel: Lesbarkeit, Wiederverwendbarkeit, geringe Fehleranfälligkeit
 - keine Scheu nochmal umzubauen, wenn es zu frickelig wird

Lernziel: von der Algorithmeneidee zum Pseudocode

- gegeben die algorithmische Idee
- Details ausarbeiten → korrekten Pseudocode bauen