

# Algorithmen 1

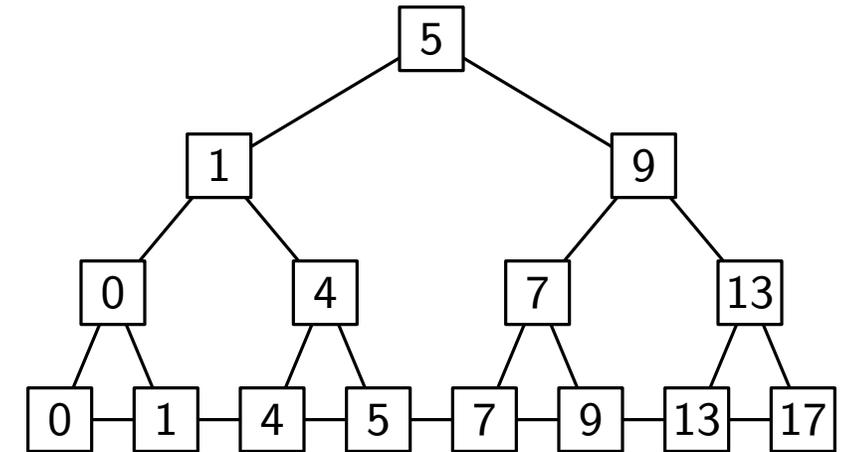
## (2, 3)-Bäume – Implementierung



# Letztes Mal

## Suchbaum zum Verwalten von sortierten Folgen

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



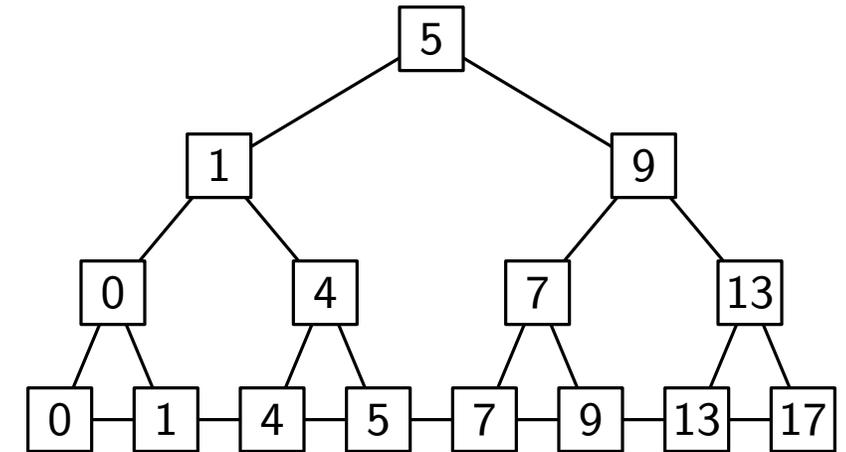
# Letztes Mal

## 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

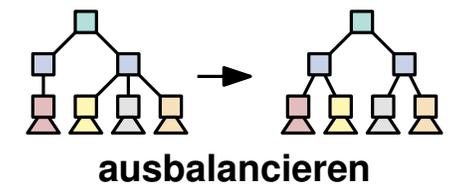
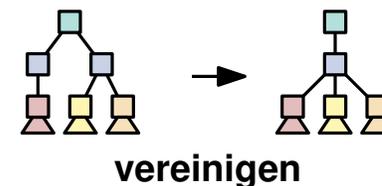
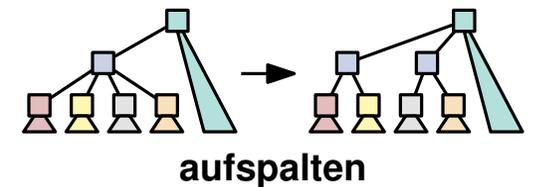
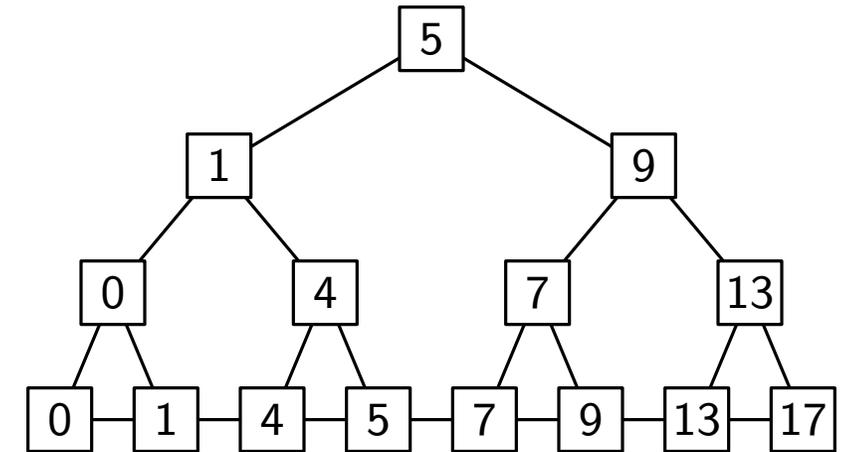
- verzeigerte Struktur → gut zum Einfügen/Löschen
- Baumstruktur → simuliert binäre Suche

### (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?

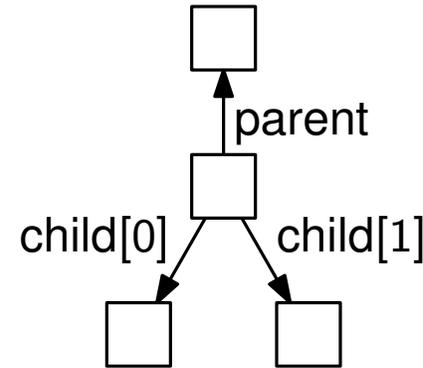
## Anmerkungen

- 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

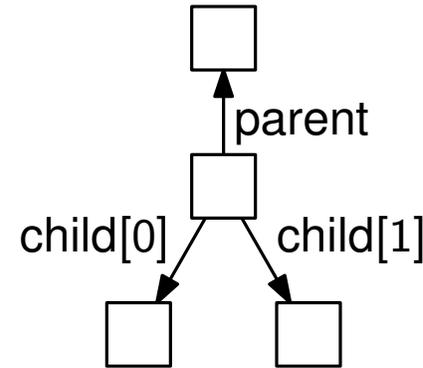
*Node* parent

*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



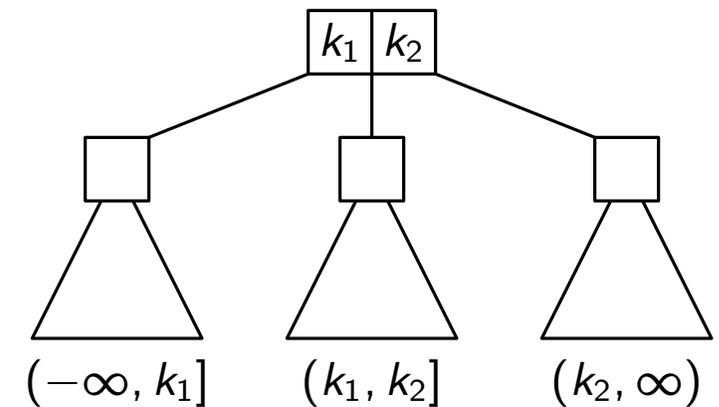
## class NODE

*Node* parent

*Array* $\langle$ *Node*, 4 $\rangle$  child

## Navigation entsprechend der Schlüssel

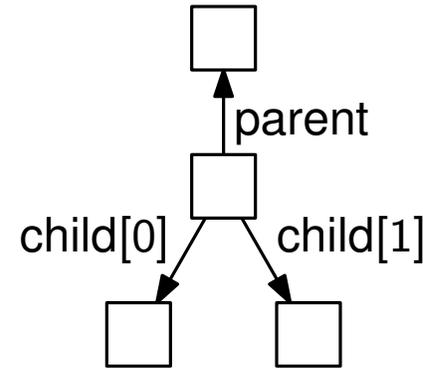
- letztes Mal
  - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
  - $\ell - 1$  Schlüssel für  $\ell$



# Was speichern wir bei jedem Knoten?

## Baumstruktur

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



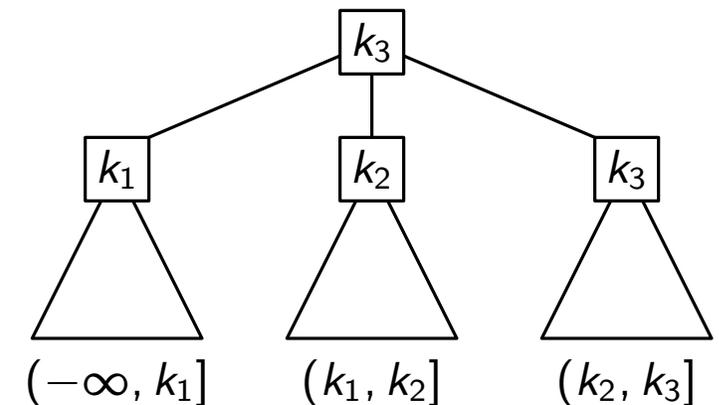
## class NODE

```

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

## Navigation entsprechend der Schlüssel

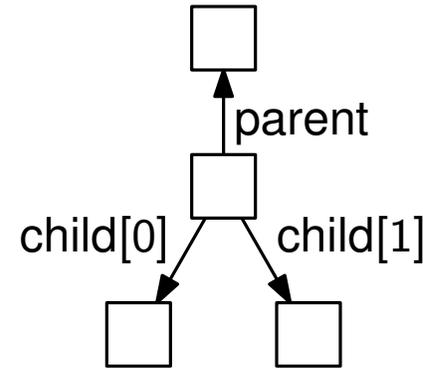
- letztes Mal
  - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
  - $\ell - 1$  Schlüssel für  $\ell$
- etwas einfacher
  - jeder Knoten  $a$  kennt nur einen Schlüssel  $a.key$
  - $a.key =$  größter Schlüssel im Teilbaum unter  $a$



# Was speichern wir bei jedem Knoten?

## Baumstruktur

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



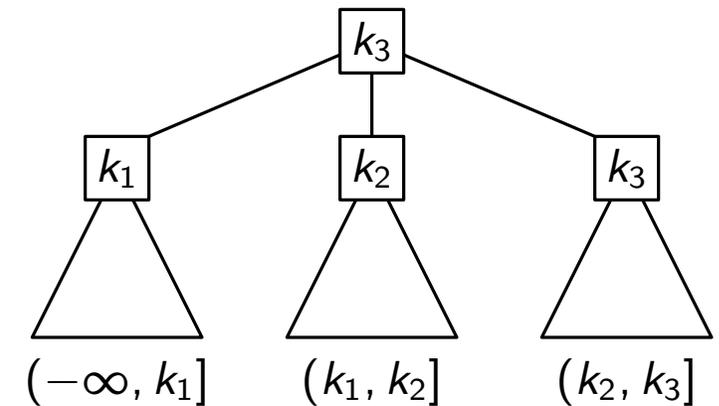
## class NODE

```

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

## Navigation entsprechend der Schlüssel

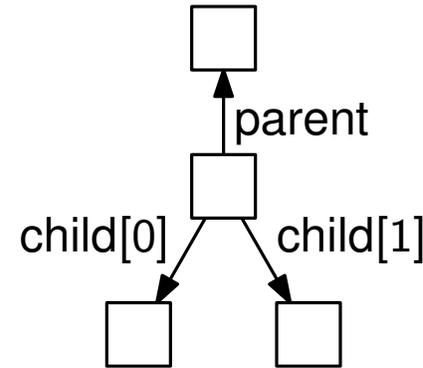
- letztes Mal
  - jeder Knoten kennt mehrere Schlüssel
  - $\ell - 1$  Schlüssel für  $\ell$
- etwas einfacher
  - jeder Knoten  $a$  kennt nur einen Schlüssel  $a.key$
  - $a.key =$  größter Schlüssel im Teilbaum unter  $a$
  - Entscheidung für das richtige Kind beim Suchen: entsprechend der Schlüssel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



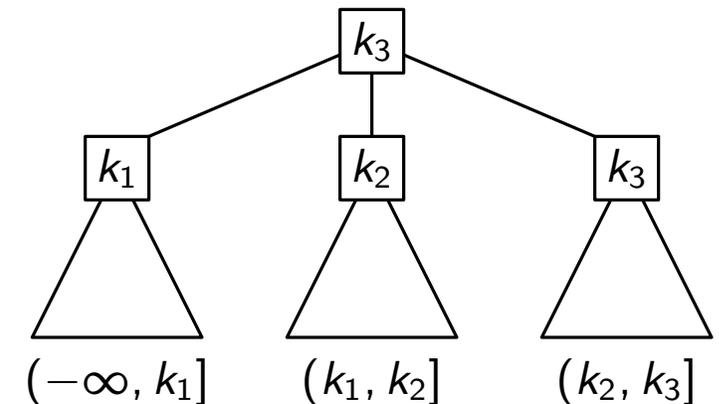
## class NODE

```

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

## Navigation entsprechend der Schlüssel

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

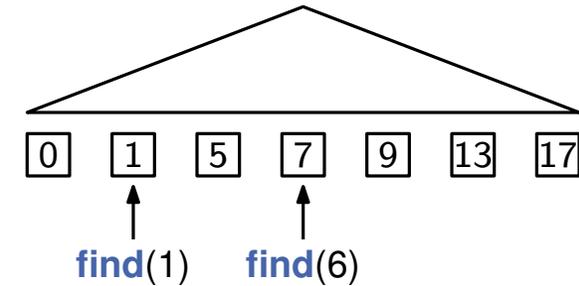


**Invariante**, die wir nach jeder Operation wiederherstellen

# Suchen – Vorüberlegung & Initialisierung

## Wonach genau suchen wir?

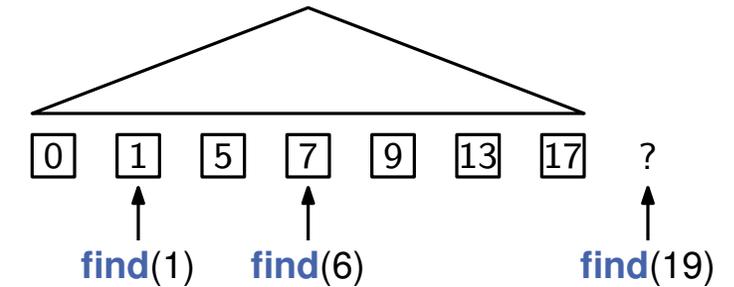
- Eingabe: ein Schlüssel  $k$
- falls  $k$  in der Folge  $\rightarrow$  entsprechendes Blatt zurückgeben
- $k$  nicht in der Folge  $\rightarrow$  Blatt mit nächst größerem Schlüssel



# 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



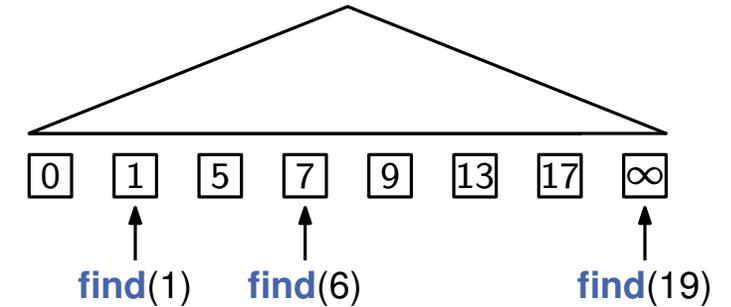
## $\infty$ -Trick

- 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



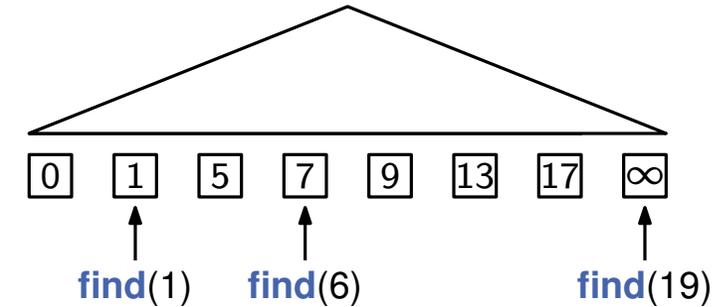
## $\infty$ -Trick

- Was, wenn  $k$  größer als alle existierenden Schlüssel?
- füge ein Dummy-Blatt mit Schlüssel  $\infty$  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

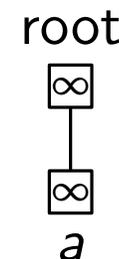


## $\infty$ -Trick

- Was, wenn  $k$  größer als alle existierenden Schlüssel?
- füge ein Dummy-Blatt mit Schlüssel  $\infty$  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  $\infty$
- Schlüssel der Wurzel: ebenfalls  $\infty$



## class (2, 3)-TREE

*Node* root

**init()**

*Node* a

a.key :=  $\infty$

a.parent := root

root.child[0] := a

root.key :=  $\infty$

# Suche

## Erinnerung

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

### find(Key $k$ )

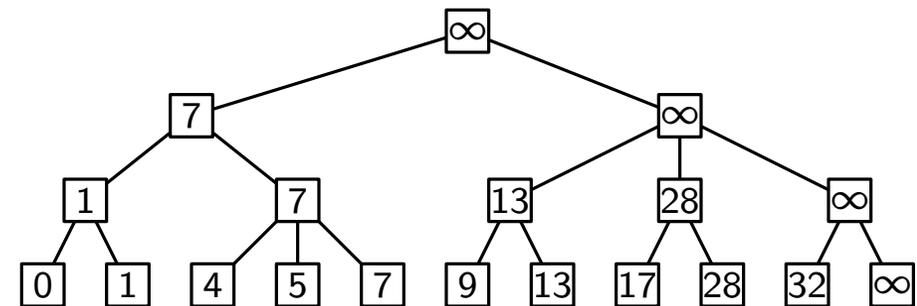
Node  $a := \text{root}$

**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  $a := \text{root}$

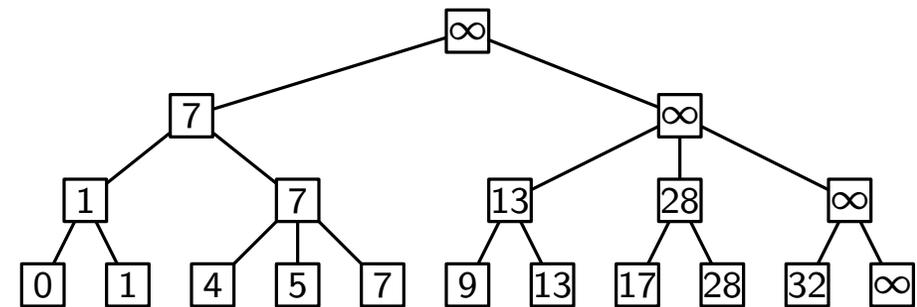
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**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 $k$ )

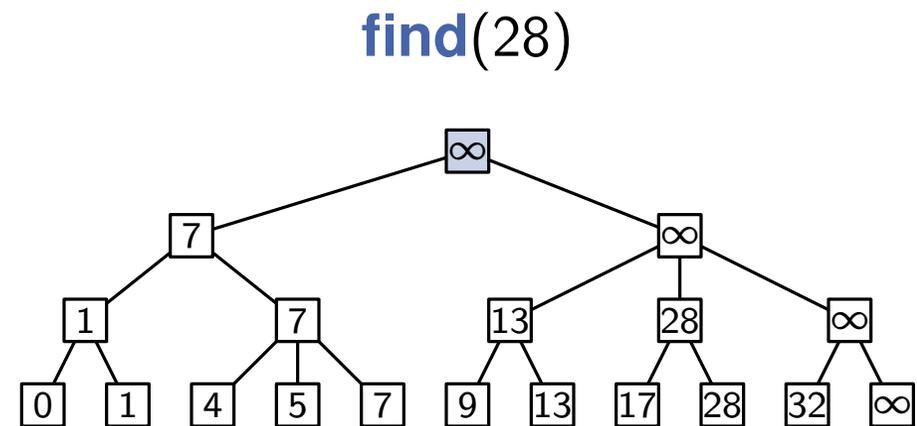
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

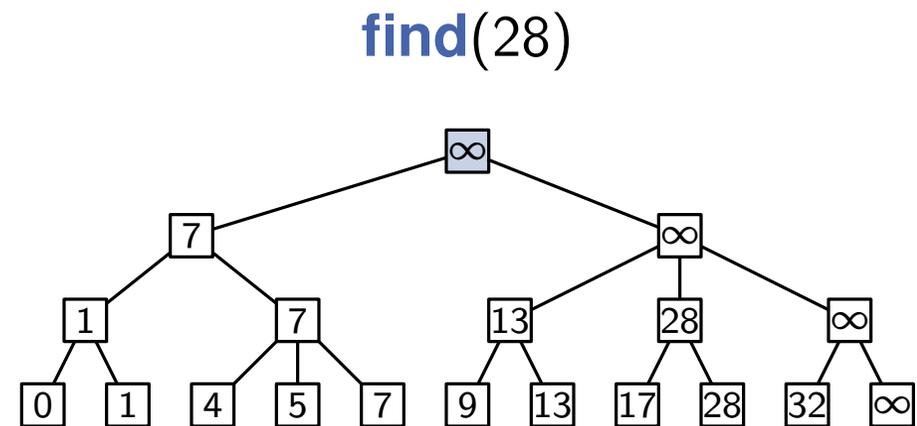
Node  $a := \text{root}$

**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**  $a$



# Suche

## Erinnerung

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

### find(Key $k$ )

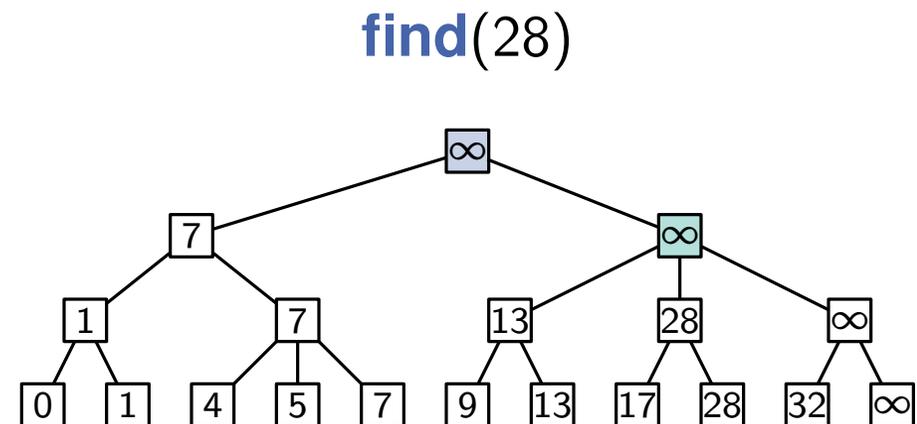
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

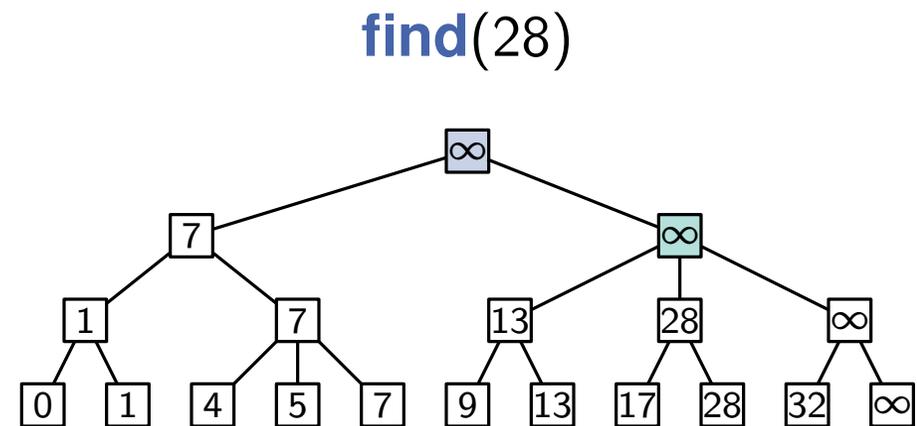
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

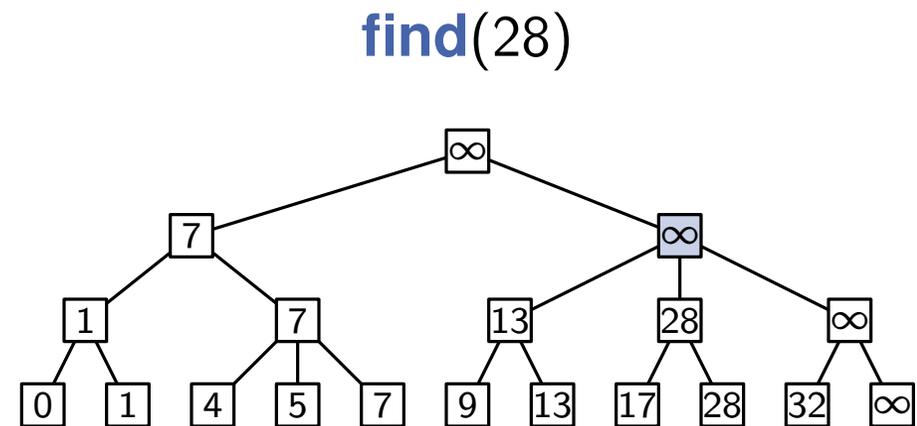
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

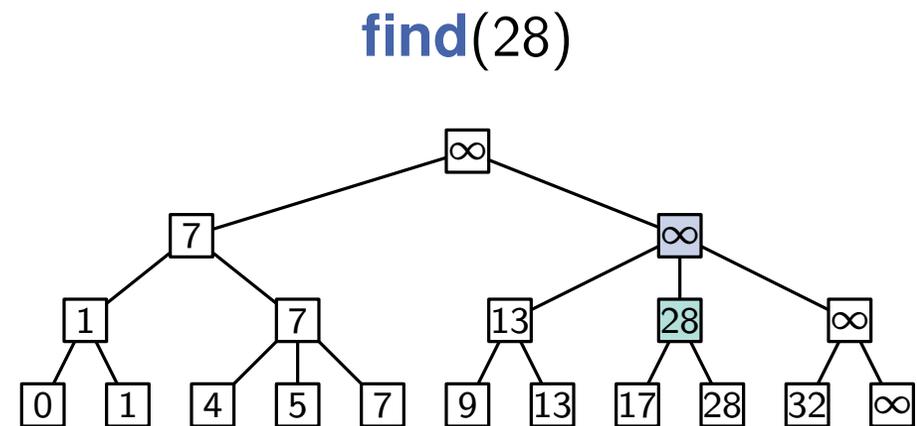
Node  $a := \text{root}$

**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  $a := \text{root}$

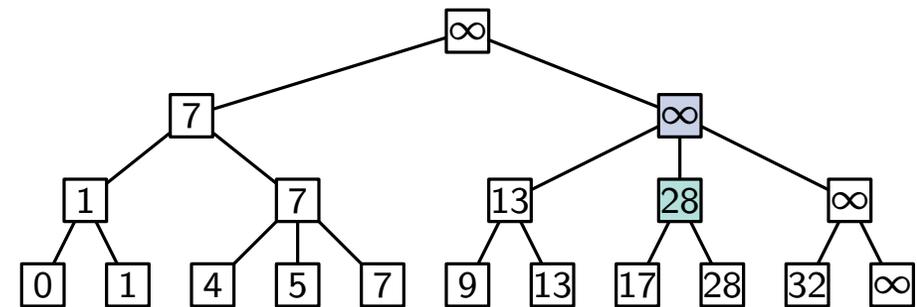
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**return**  $a$

### 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  $a := \text{root}$

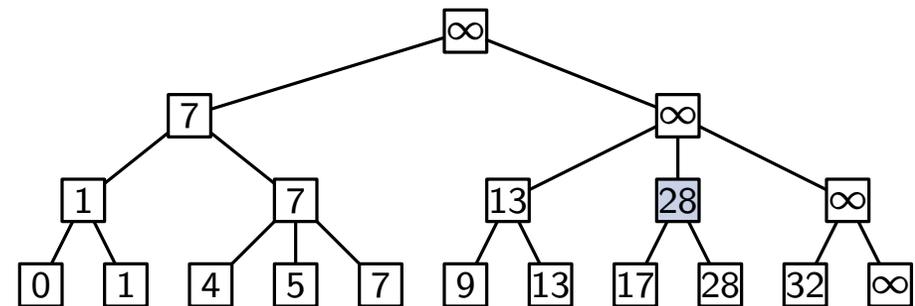
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**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  $a := \text{root}$

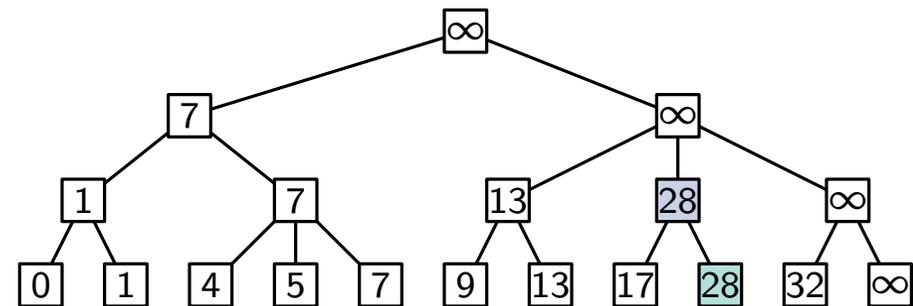
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**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  $a := \text{root}$

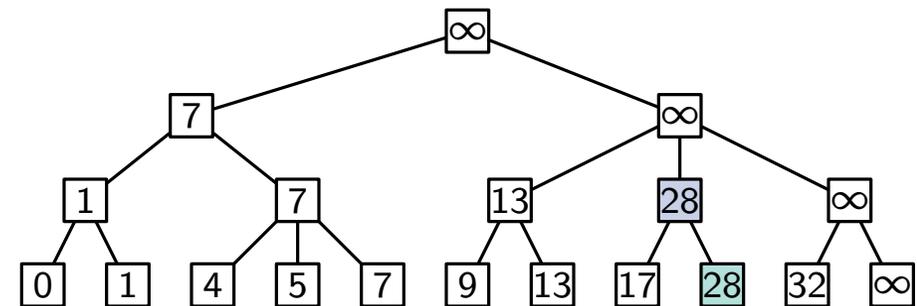
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**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  $a := \text{root}$

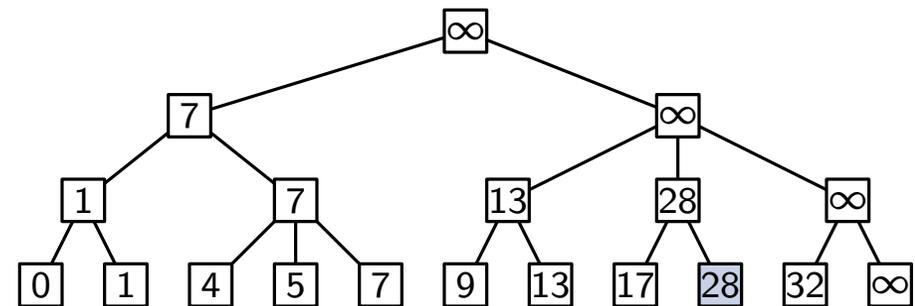
**while**  $a$  is not a leaf **do**

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

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

**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 $k$ )

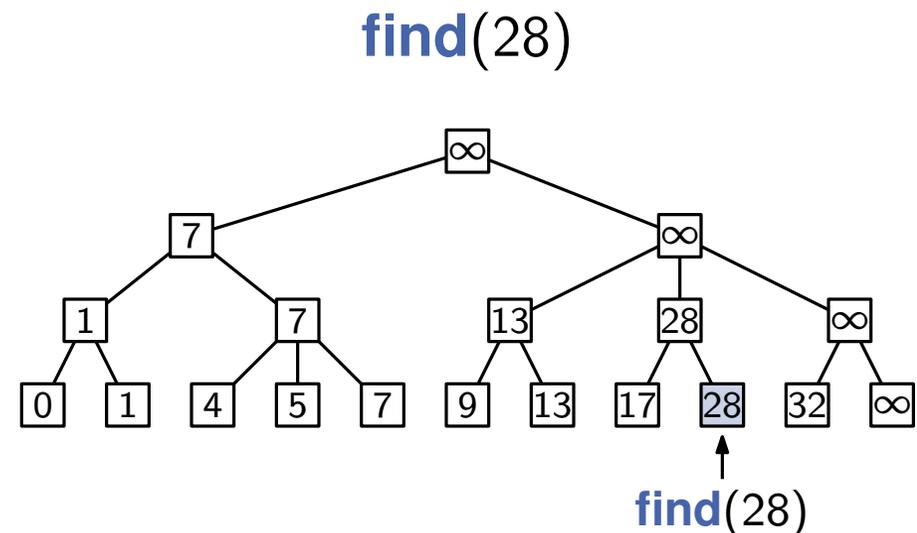
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

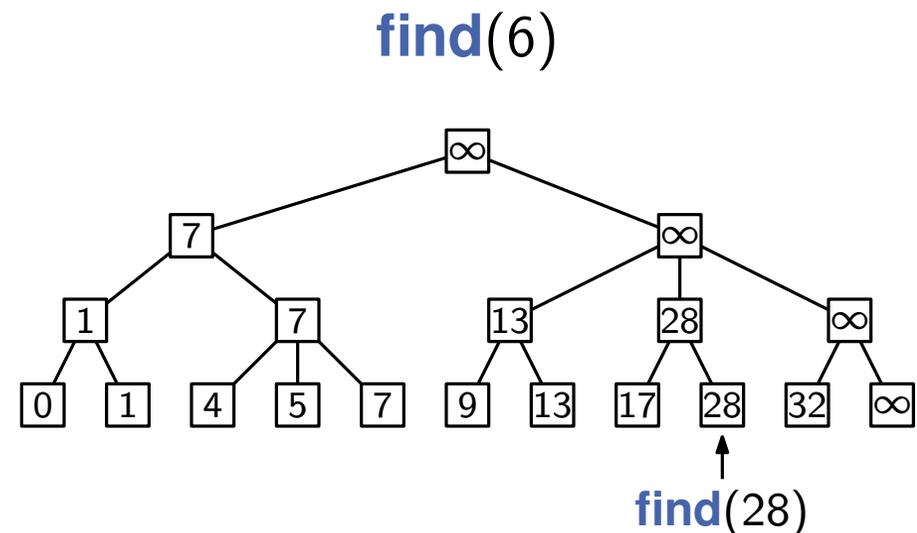
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

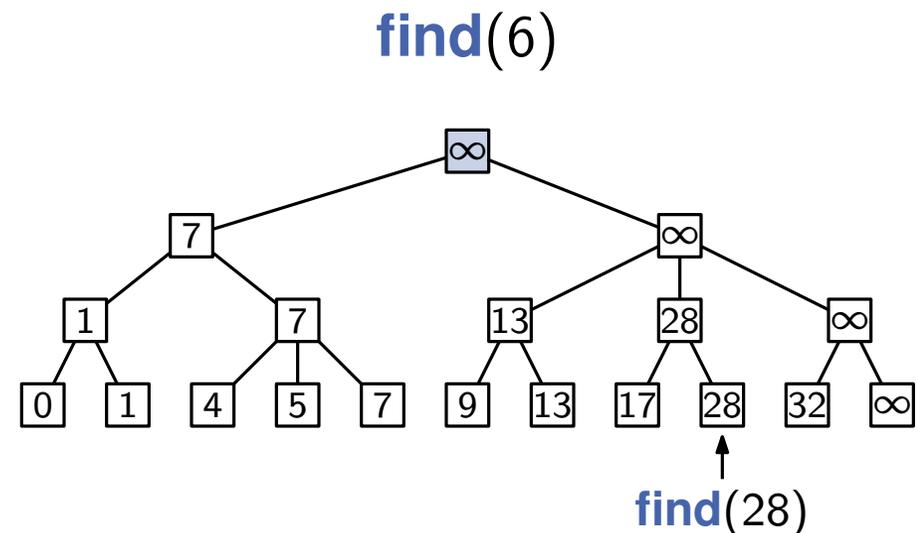
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

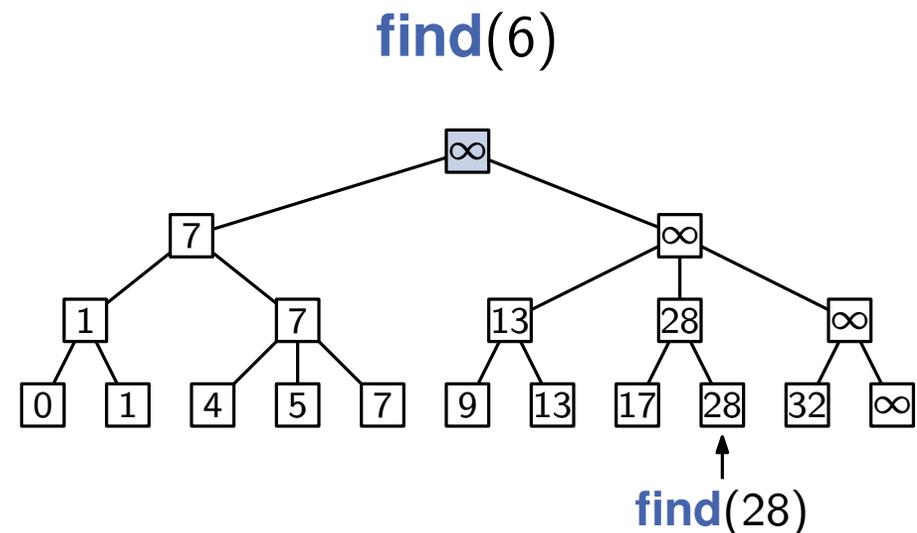
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

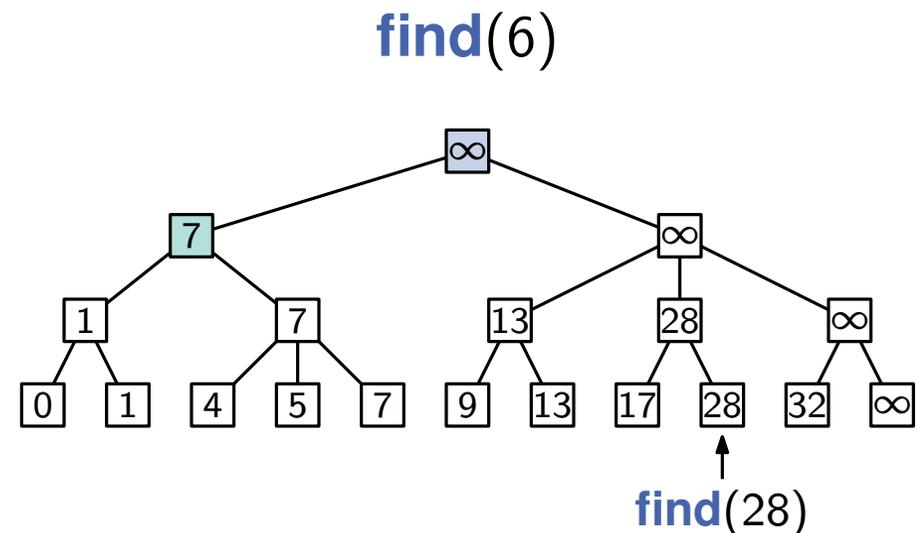
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

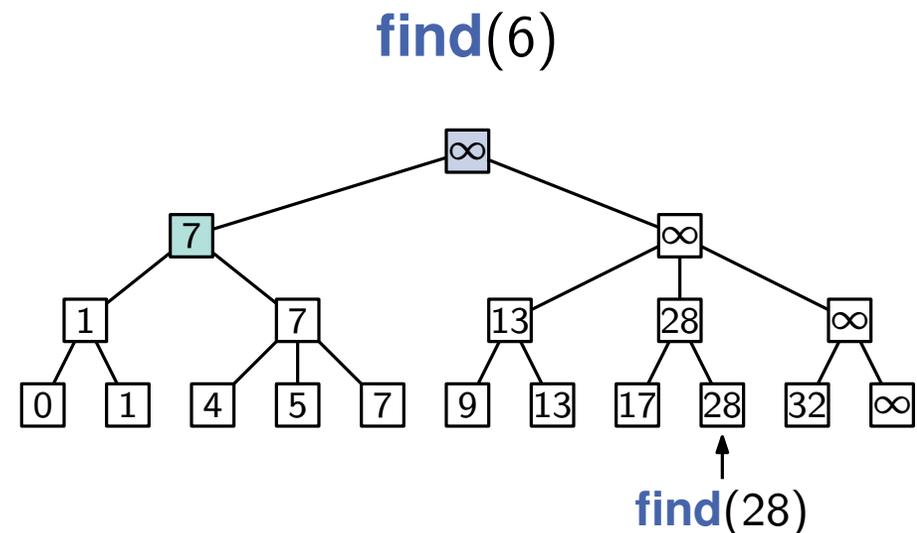
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

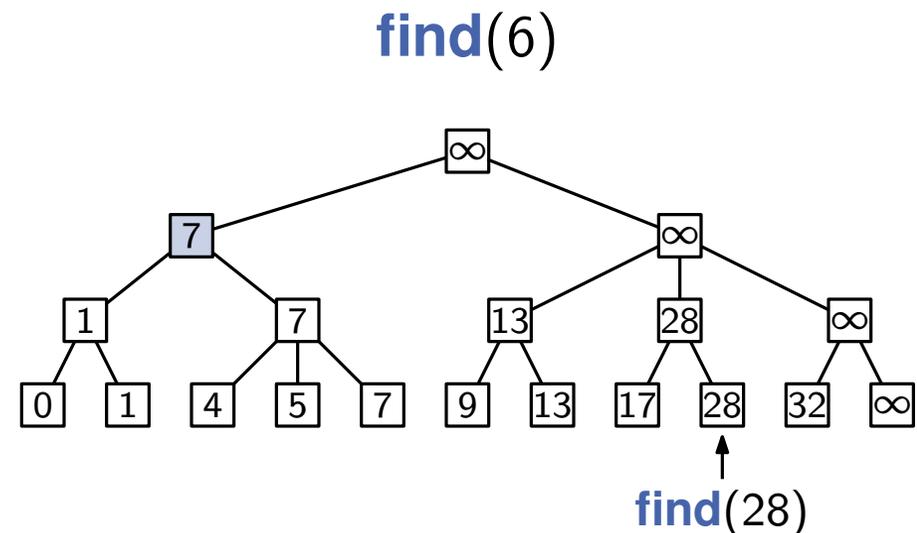
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

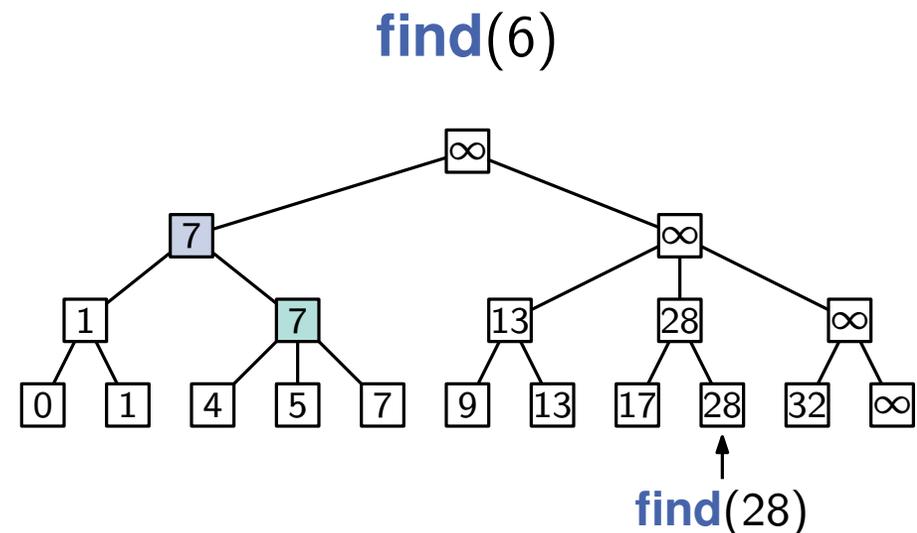
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

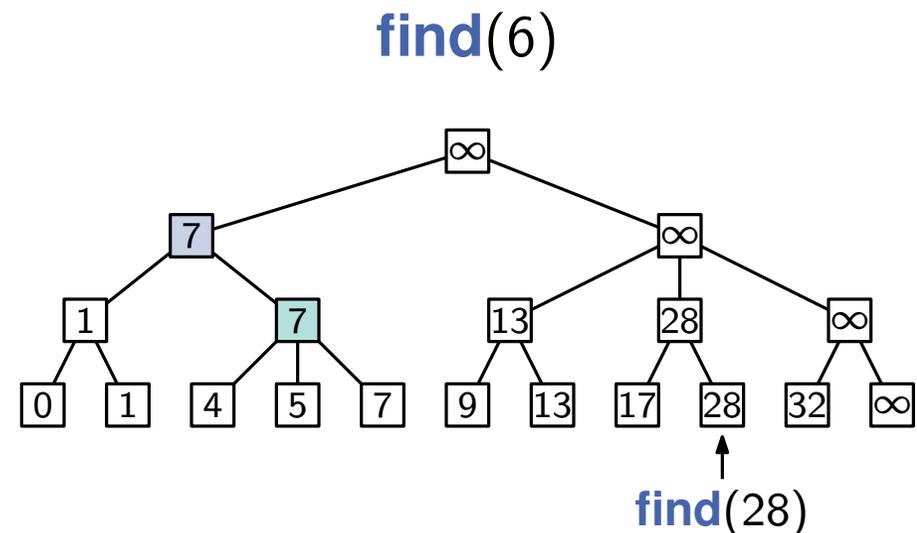
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

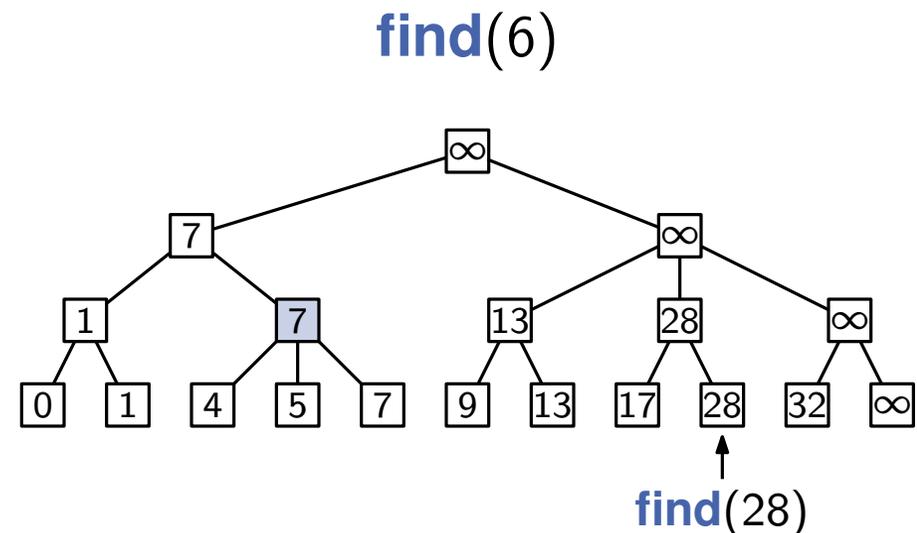
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

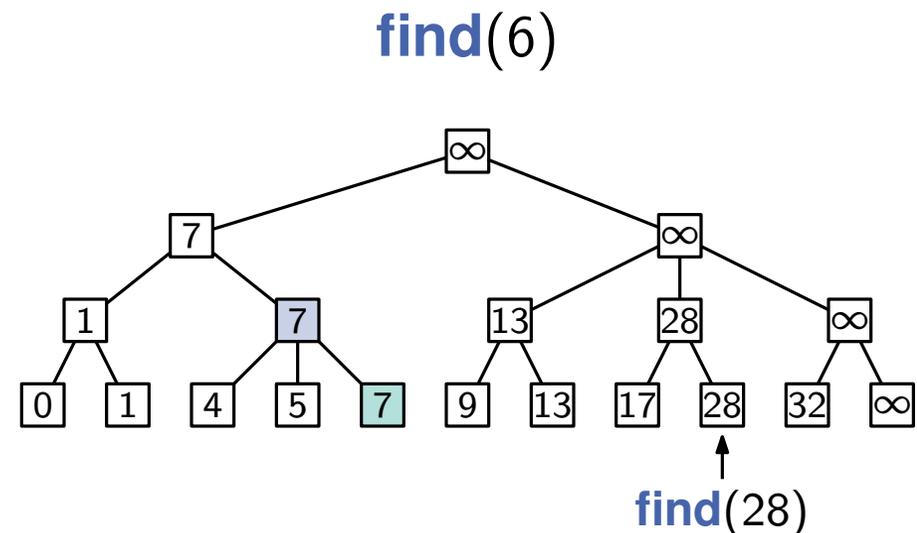
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

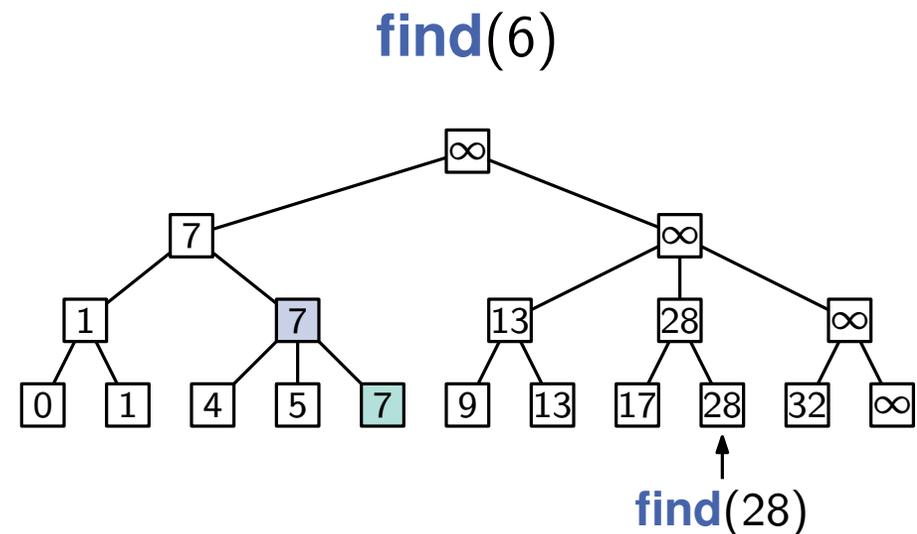
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

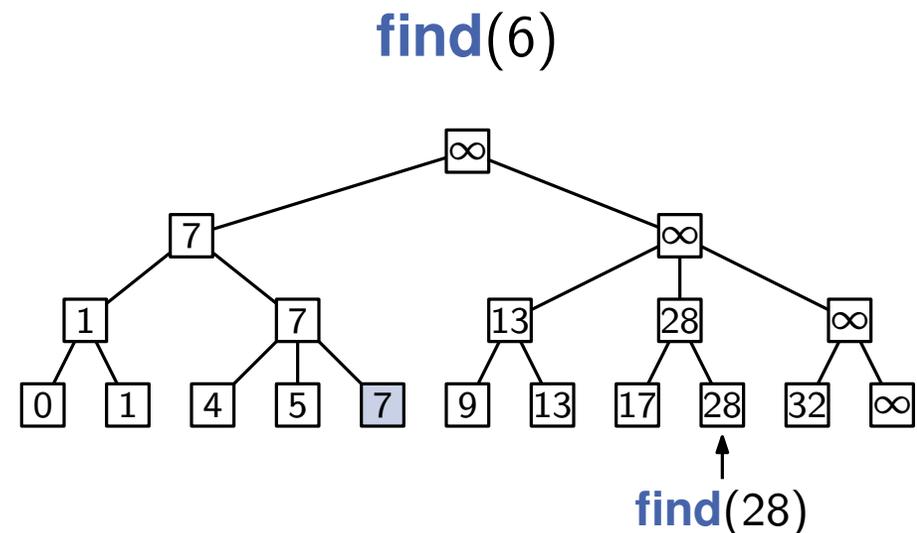
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

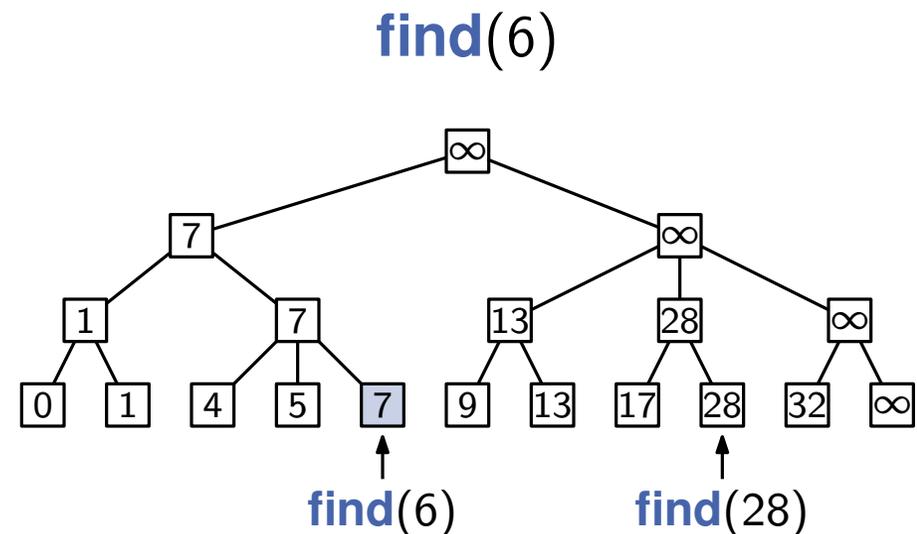
Node  $a := \text{root}$

**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 $k$ )

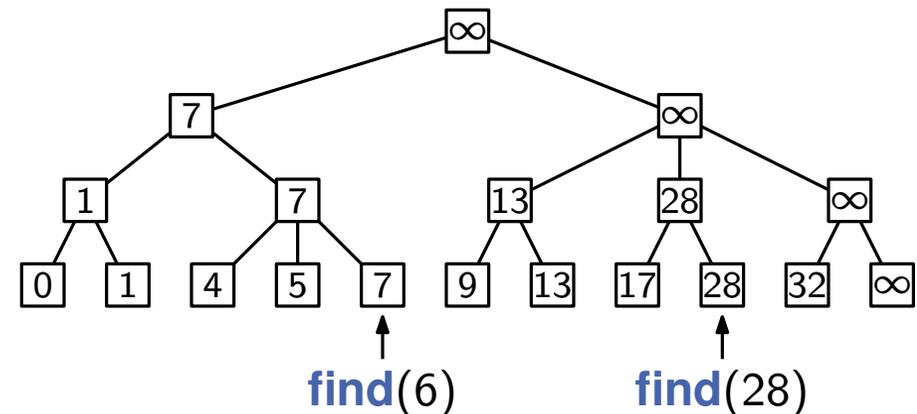
Node  $a := \text{root}$

**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

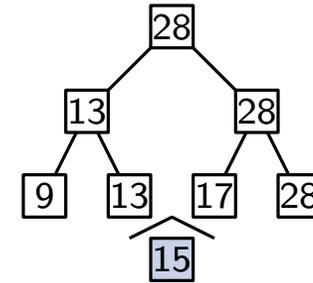
## Heute

- 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

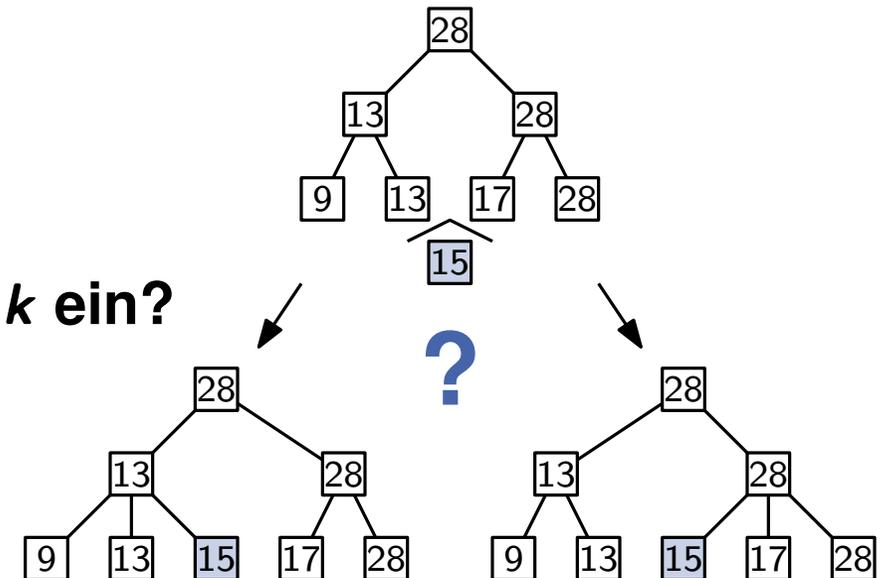


# Einfügen – Vorüberlegung

## 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?



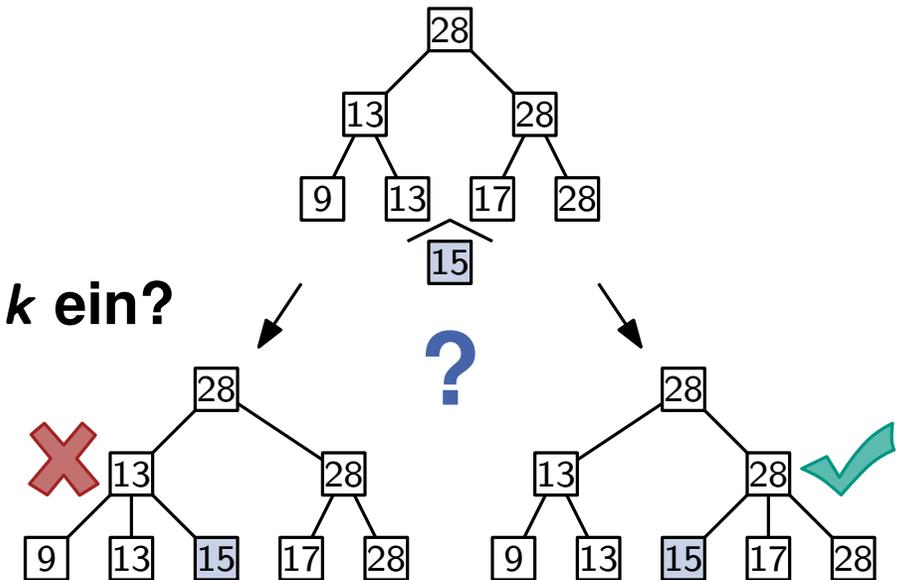
# Einfügen – Vorüberlegung

## 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

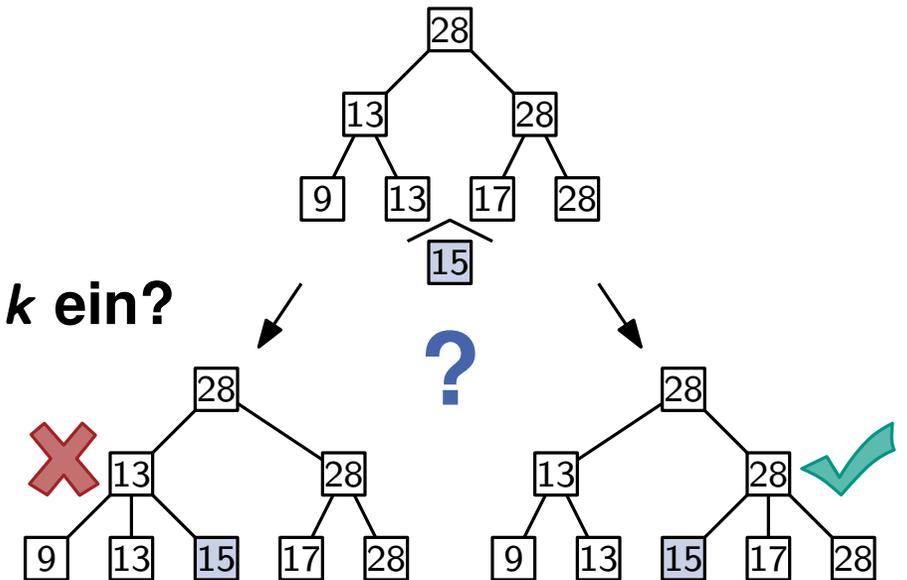
- Schritt 1: neues Blatt an der richtigen Stelle einfügen
- Schritt 2: Knoten mit 4 Kindern aufspalten

## 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  $\infty$ -Knotens  $\rightarrow$  kein Sonderfall
  - Schlüssel der inneren Knoten bleiben korrekt  $\rightarrow$  kein Update nötig

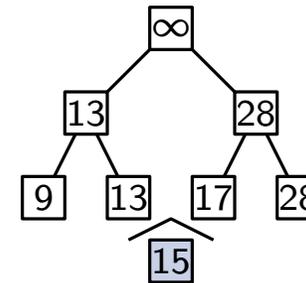


# Einfügen

## Erinnerung: Neues Blatt einfügen

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

**insert**(*Key k*)



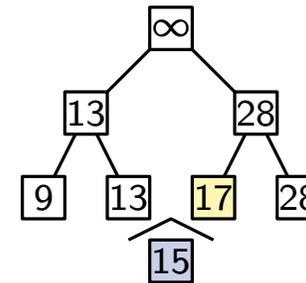
# Einfügen

## 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

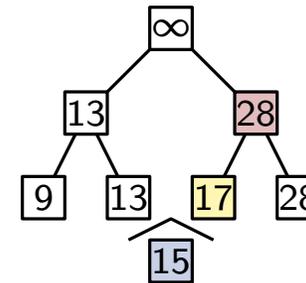
## Erinnerung: Neues Blatt einfügen

- 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

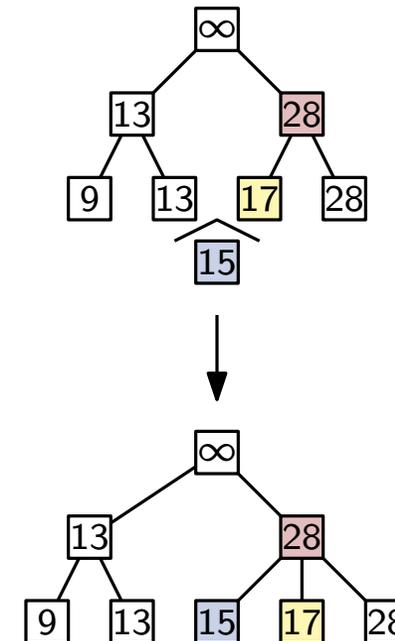
**insert**(Key  $k$ )

**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  $k$ )

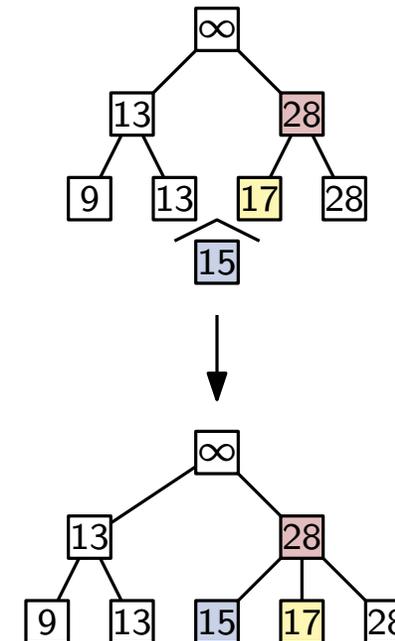
**if**  $\text{find}(k).\text{key} = k$  **then return**

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

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

insert  $b$  into  $a.\text{child}$  // 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**

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

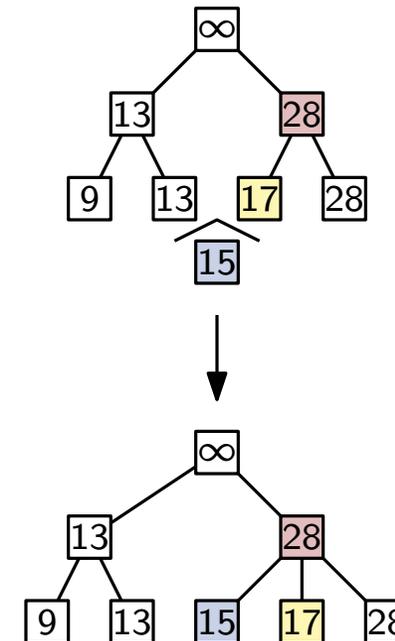
$\text{Node } b := \{key : k, parent : a\}$  // new leaf

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

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

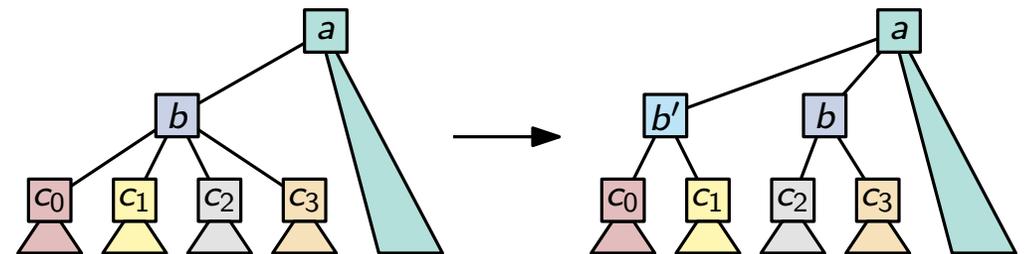
**if**  $a$  has four children **then**

**split**( $a$ )



# Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

`split(Node b)`

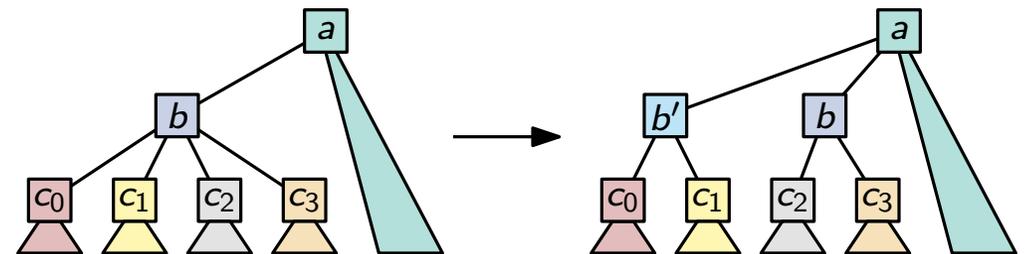


# Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

**split**(Node  $b$ )

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

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



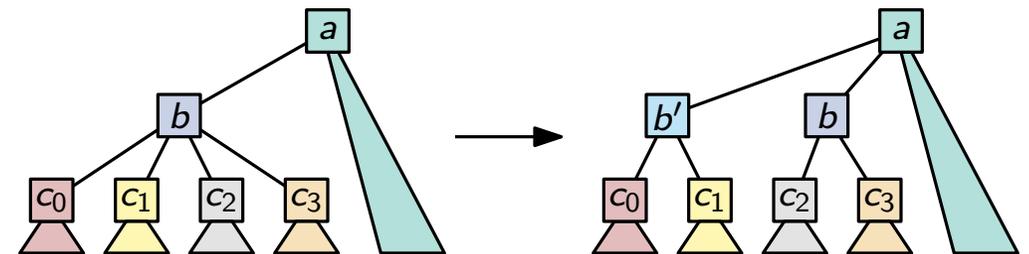
# Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

**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

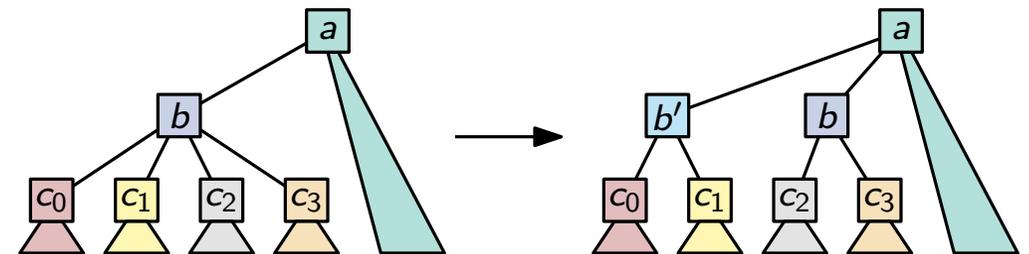
**split**(Node  $b$ )

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

$c_i := b.\text{child}[i]$  (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  $b$ )

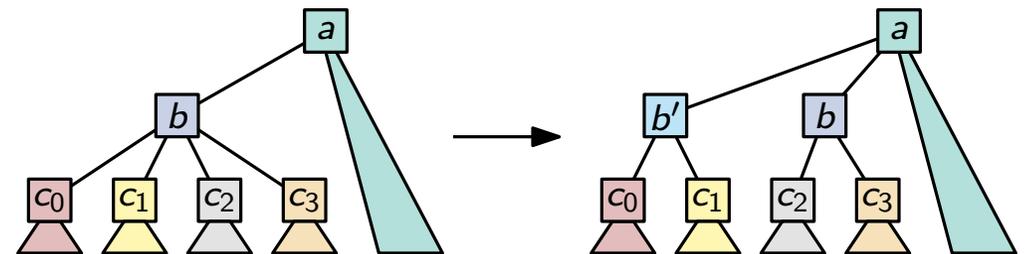
$a := b.parent$

$c_i := b.child[i]$  (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  $b$ )

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

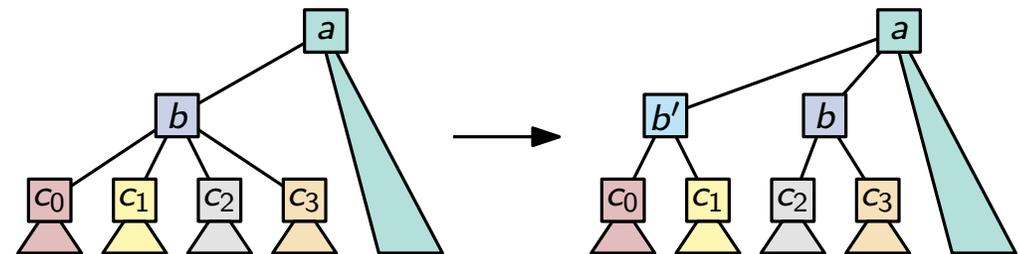
$c_i := b.\text{child}[i]$  (for  $i \in \{0, 1\}$ )

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

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

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

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





# Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

Was haben wir da noch vergessen?

**split**(Node  $b$ )

$a := b.parent$

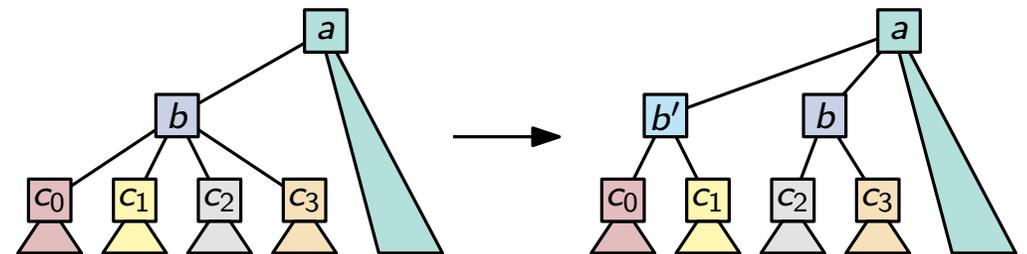
$c_i := b.child[i]$  (for  $i \in \{0, 1\}$ )

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  $b.child$



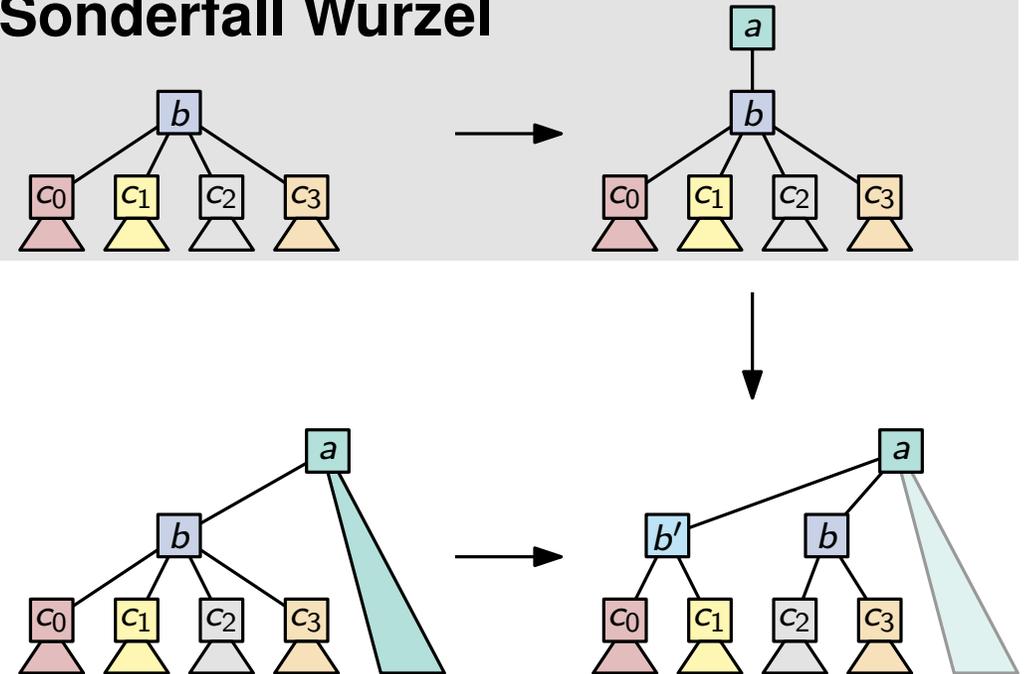
# Aufspalten: Knoten mit 4 Kindern

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

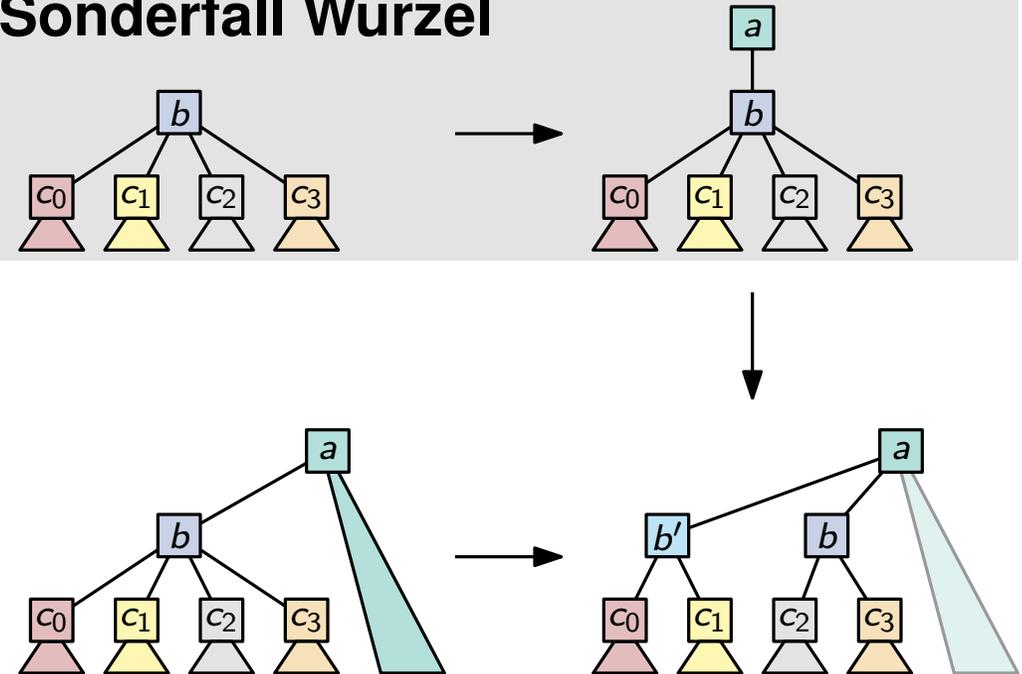
insert  $b'$  into  $a.\text{child}$

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

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  $a.\text{child}$

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

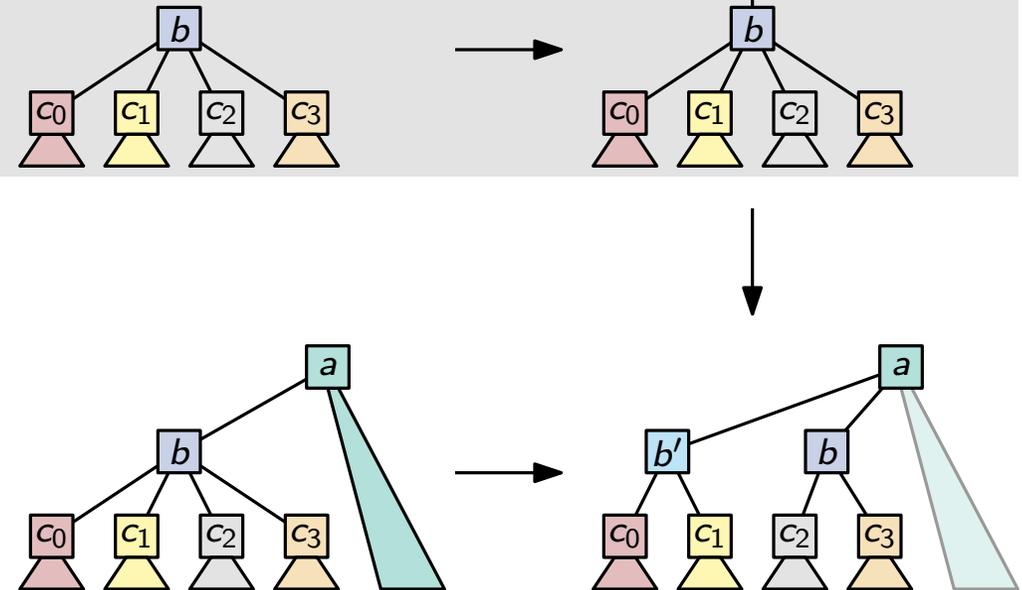
remove  $c_0$  and  $c_1$  from  $b.\text{child}$

// 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:  $\langle c_0, c_1 \rangle$ }

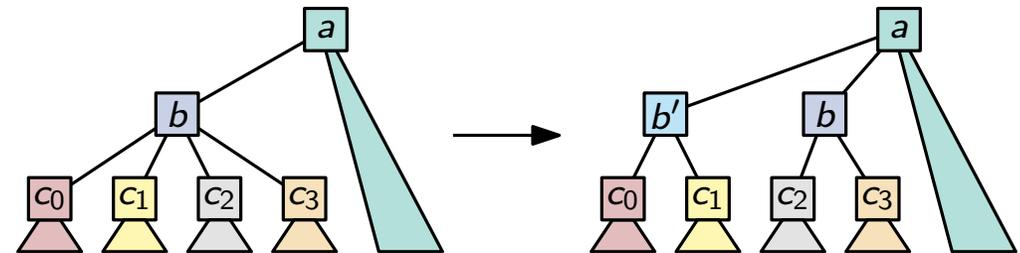
insert  $b'$  into  $a$ .child

$c_0$ .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?

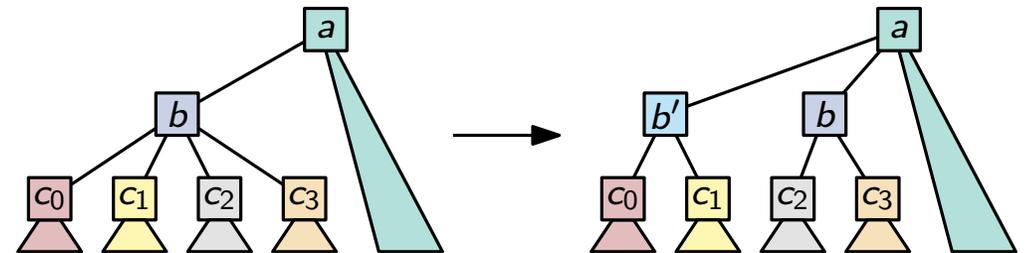
$Node\ b' := \{key: c_1.key, parent: a, child: \langle c_0, c_1 \rangle\}$   
 insert  $b'$  into  $a.child$   
 $c_0.parent, c_1.parent := b'$   
 remove  $c_0$  and  $c_1$  from  $b.child$

## 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?

```

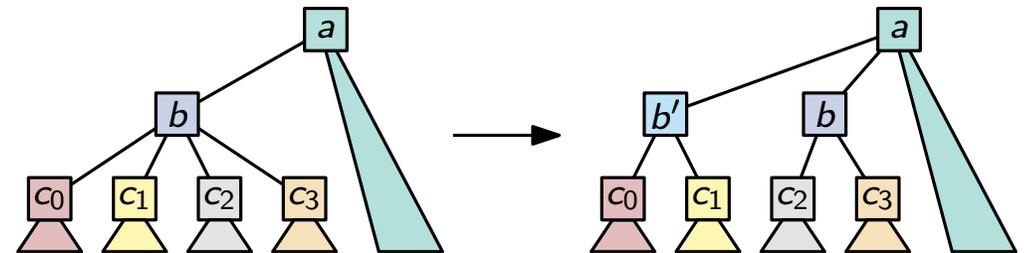
Node b' := {key: c1.key, parent: a, child: <c0, c1>}
insert b' into a.child
c0.parent, c1.parent := b'
remove c0 and c1 from b.child
  
```

## 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

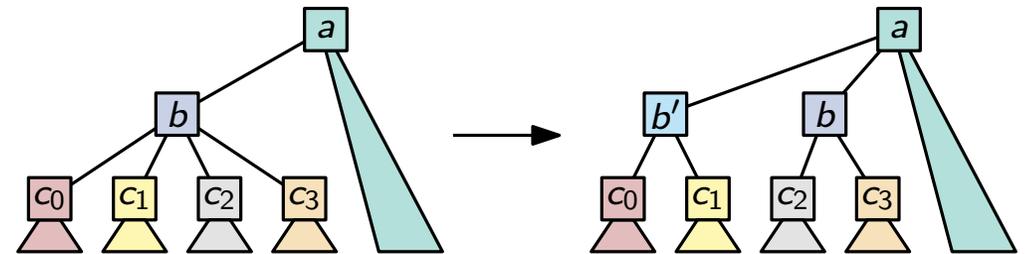
## Probleme

- 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  $a$



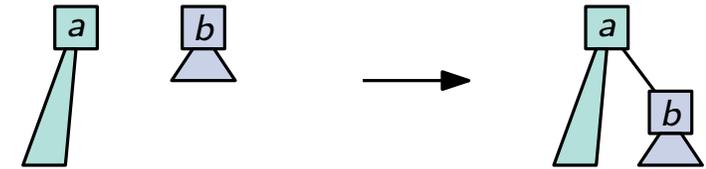
## Besser

- lagere grundlegende Operationen in Subroutinen aus

# Grundlegende Subroutinen

## ***b* als Kind von *a* einfügen**

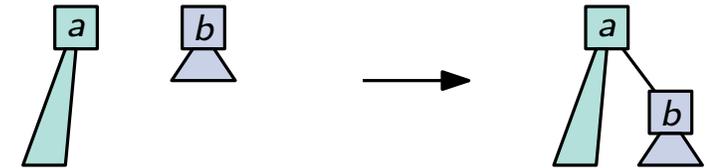
- *b* an der richtigen Position von *a.child* einfügen
- *b.parent* auf *a* setzen
- *a.key* auf *b.key* setzen, falls *b* das rechte Kind ist



# Grundlegende Subroutinen

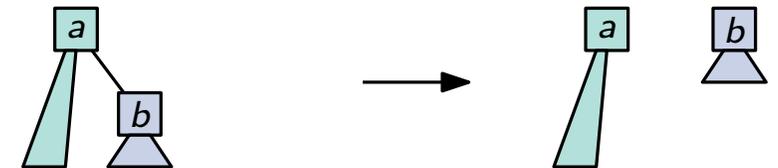
## ***b* als Kind von *a* einfügen**

- *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**

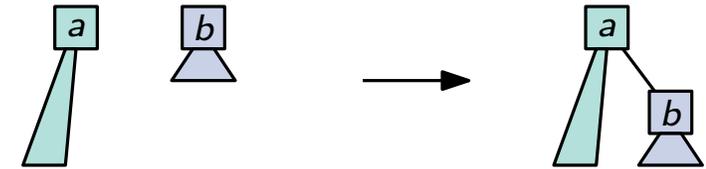
- *b* aus *a.child* entfernen
- *b.parent* auf  $\perp$  setzen
- *a.key* aktualisieren, falls *b* das rechte Kind war



# Grundlegende Subroutinen

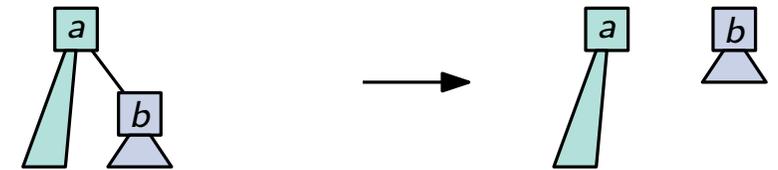
## ***b* als Kind von *a* einfügen**

- *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

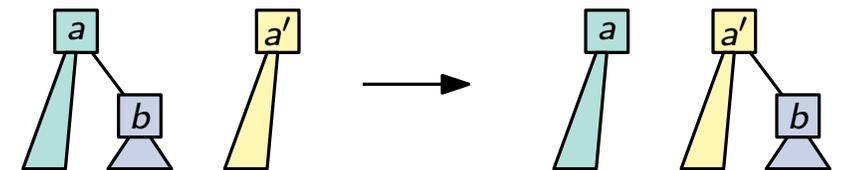


## **Kind *b* von *a* löschen**

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



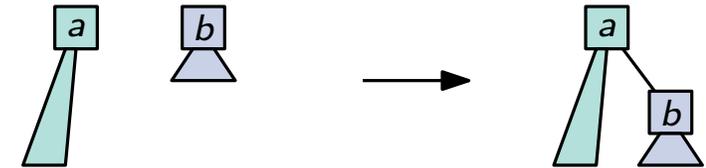
## **Kind *b* von Elter *a* zu *a'* schieben: löschen + einfügen**



# Grundlegende Subroutinen

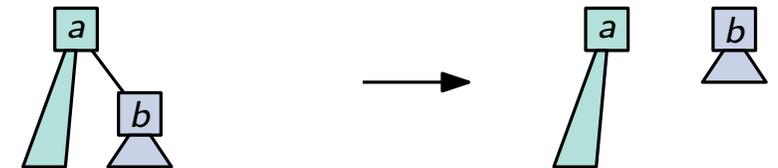
## ***b* als Kind von *a* einfügen**

- *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

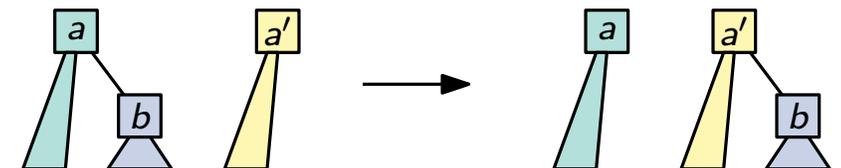


## **Kind *b* von *a* löschen**

- *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**



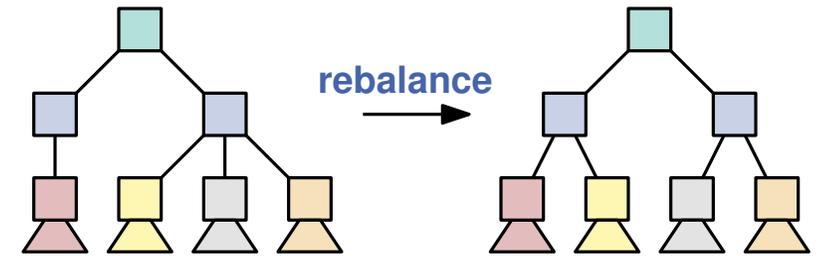
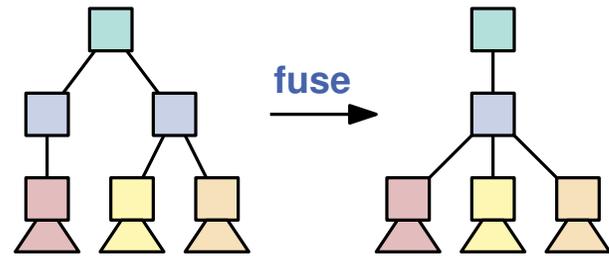
## **Anmerkung: Aktualisierung des Schlüssels**

- 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

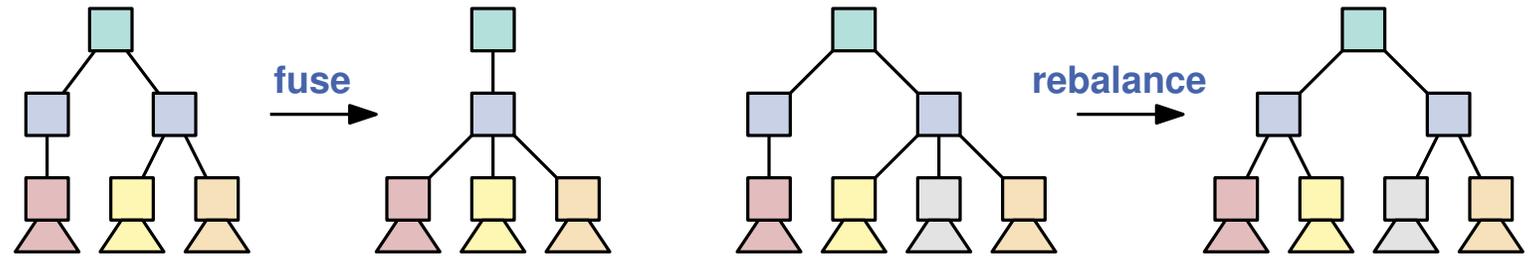
- Schritt 1: entsprechendes Blatt einfach löschen
- Schritt 2: Knoten mit nur einem Kind aufräumen  
(Versmelzen oder Ausbalancieren)



# Löschen – Vorüberlegung

## Erinnerung

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



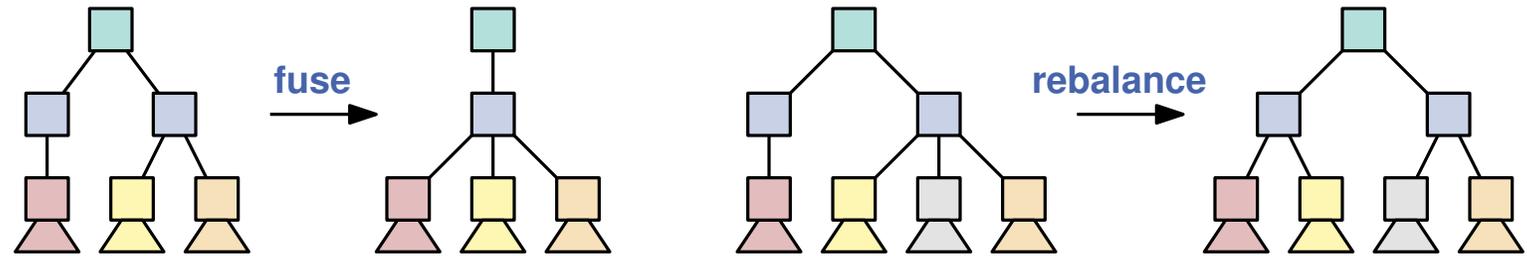
## Rekursive Aufrufe

- 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

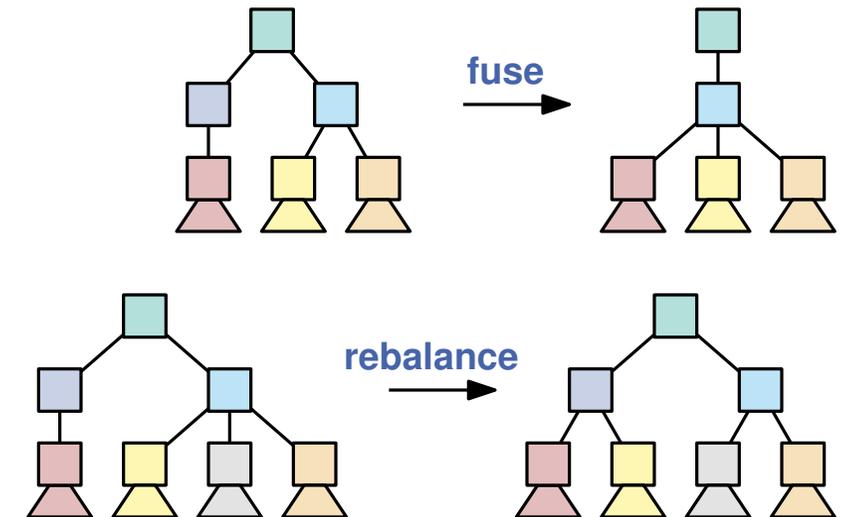
## Aktualisierung der Schlüssel

- 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  $k$ )

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

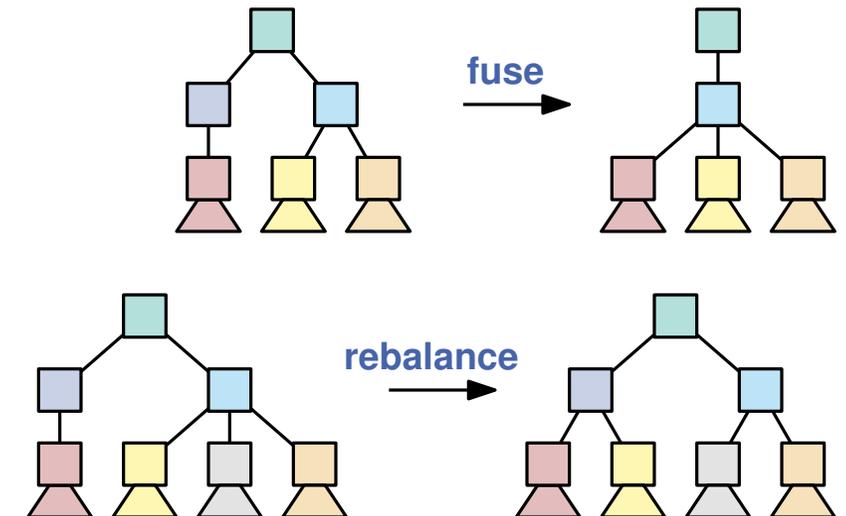
**if**  $b.\text{key} \neq k$  **then return**

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

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**

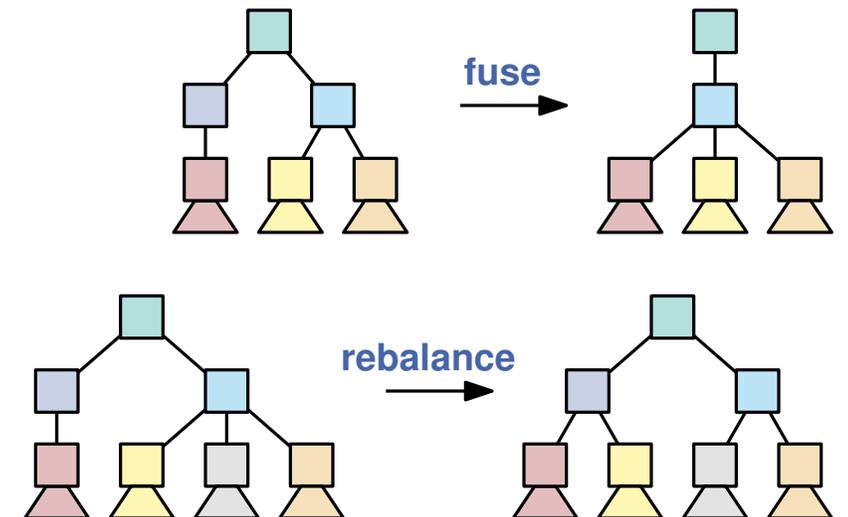
$a := b.\text{parent}$

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

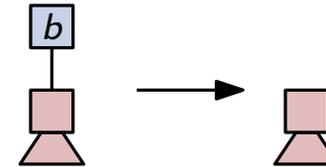
## Erinnerung

- 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)`

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

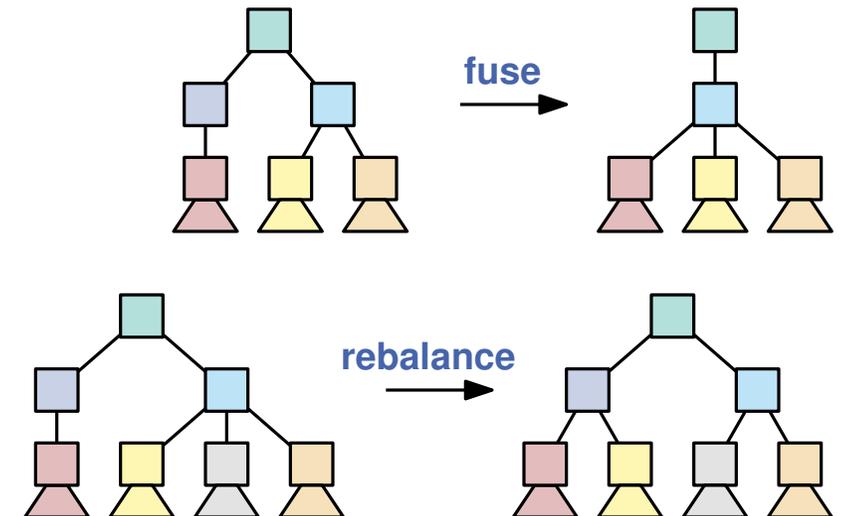
```
if  $b.\text{key} \neq k$  then return
```

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

```
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 $k$ )

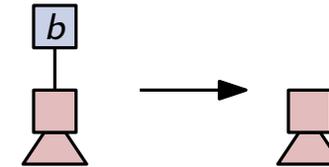
```

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



```

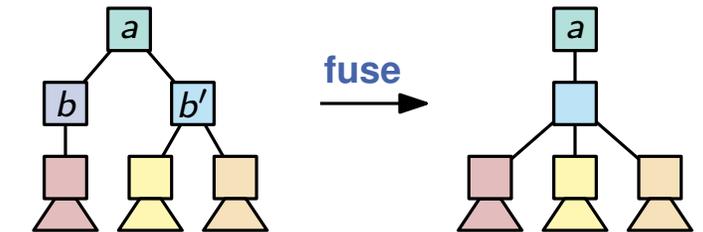
Node  $a := b.\text{parent}$ 
  
```

```

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

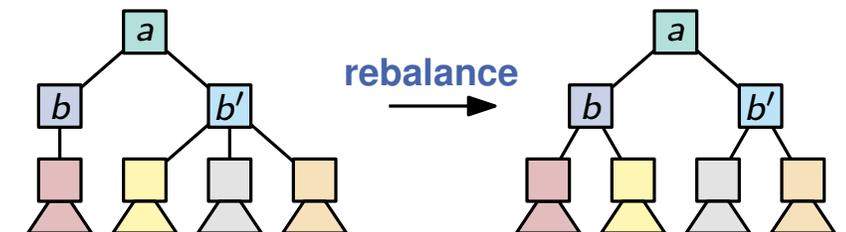
```

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

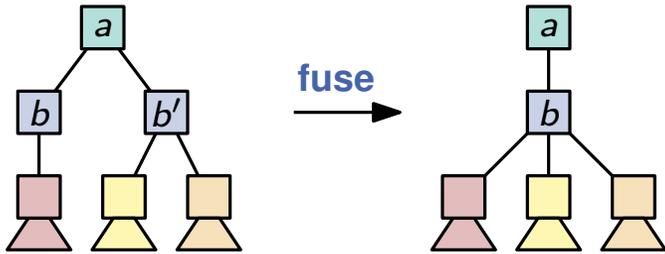


```

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**

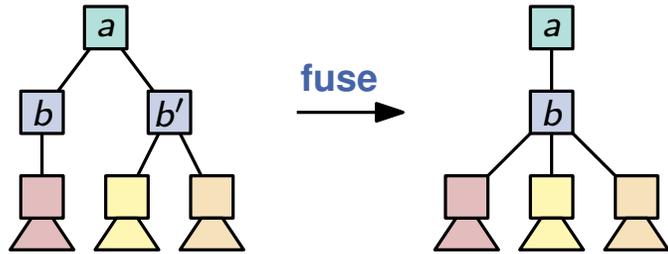
  | move child  $c$  from  $b'$  to  $b$

  remove  $b'$  as child from  $a$

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

  | **fuseOrRebalance**( $a$ )

# fuse und rebalance



**fuse**(Node  $b$ , Node  $b'$ )

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

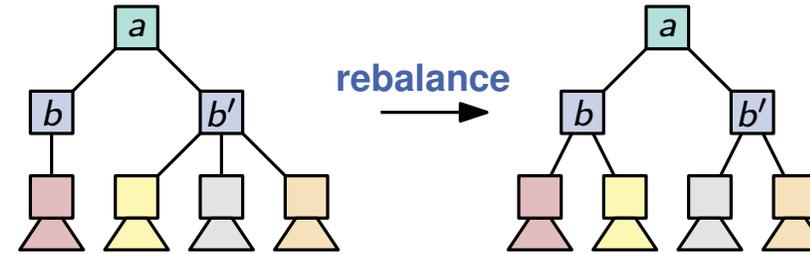
**for** Node  $c \in b'.\text{child}$  **do**

  | 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**  $\ell$  has three children **do**

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

**else**

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

## fixKeysOnPathToRoot

**fixKeysOnPathToRoot**(*Node a*)

// only ancestors of *a* have incorrect keys

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

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

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

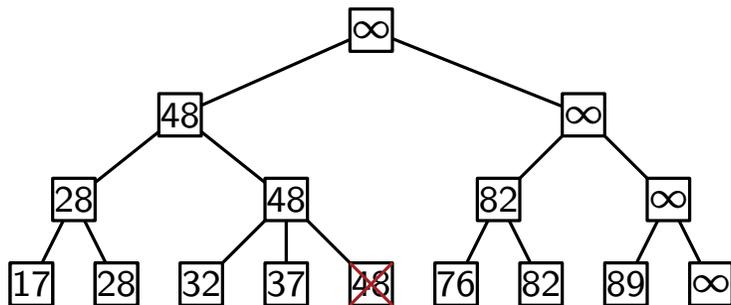
// all keys are correct

# 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)
  
```

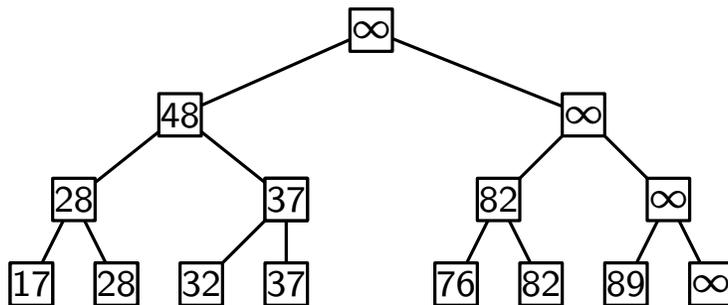
# fixKeysOnPathToRoot

## 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)

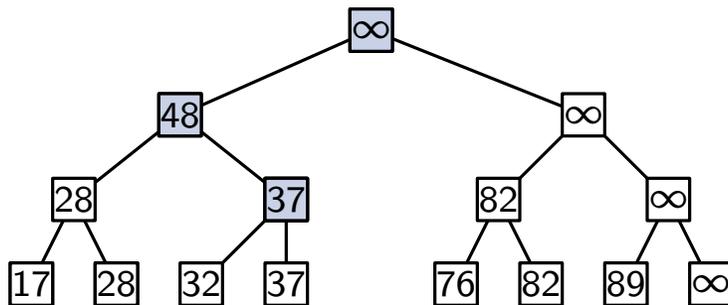
```

# 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)

```

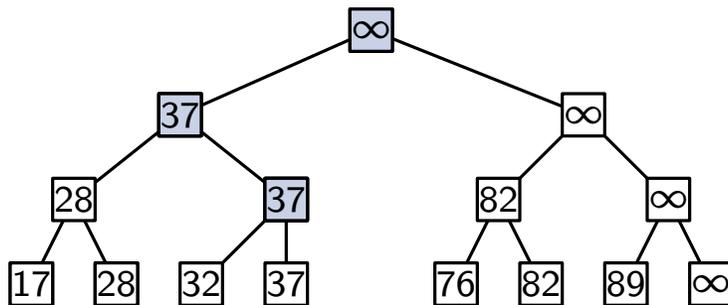
// all keys are correct
b := find(k)
if b.key ≠ k then return
a := b.parent
remove b as child from a
// only ancestors of a have incorrect keys
if a has only one child then
  fuseOrRebalance(a)
else
  fixKeysOnPathToRoot(a)
  
```

# 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)

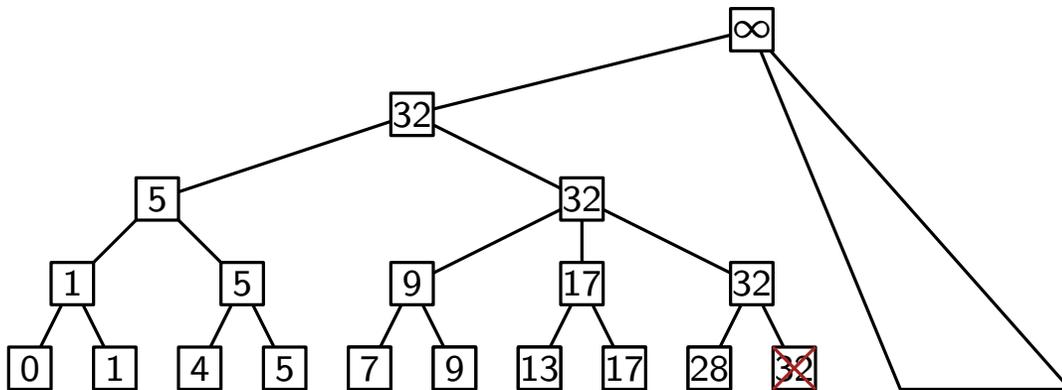
```

// 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)

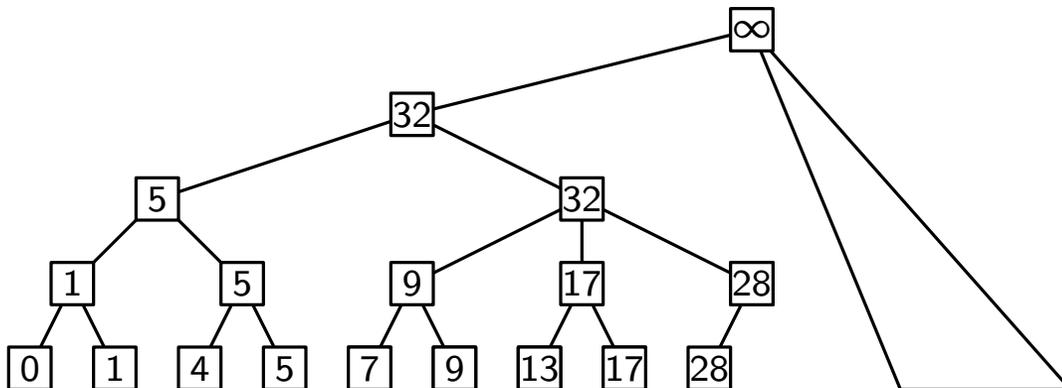
```

// 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)

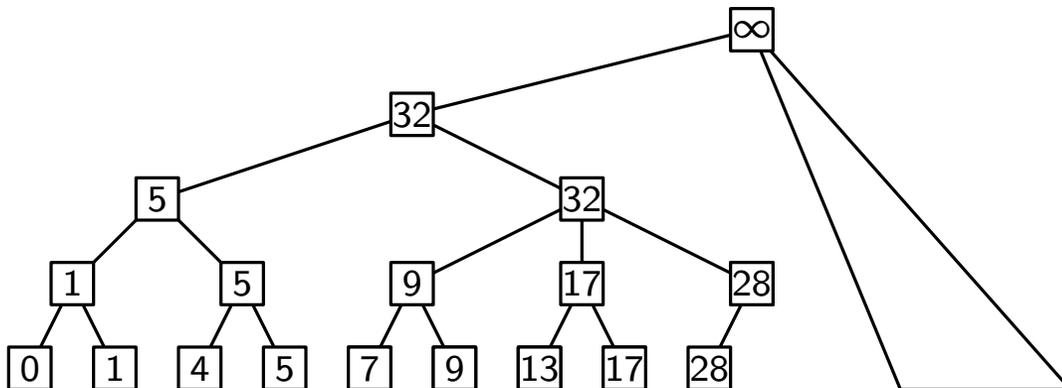
```

// 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

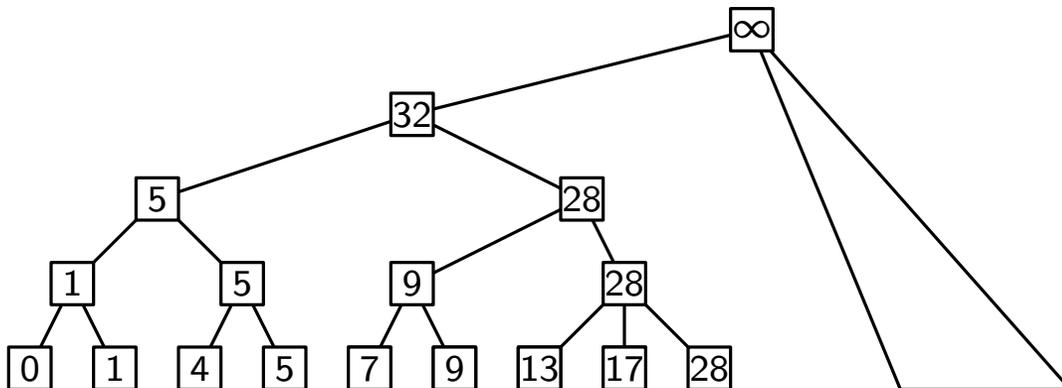
```

## 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)

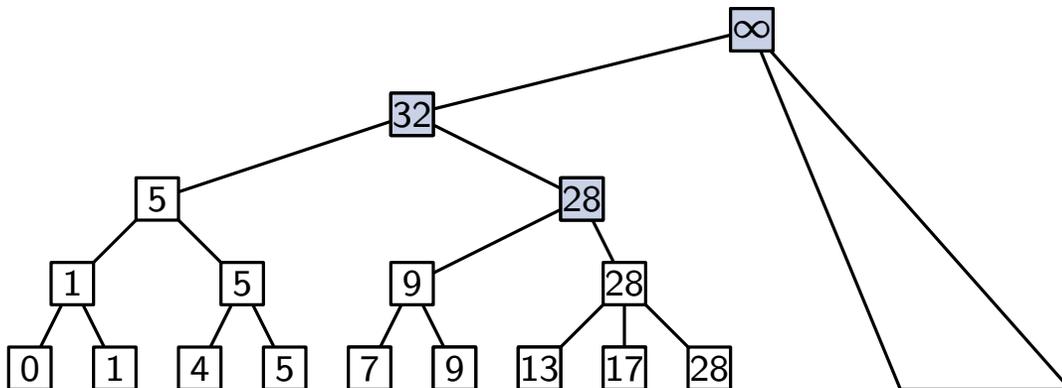
```

// 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)

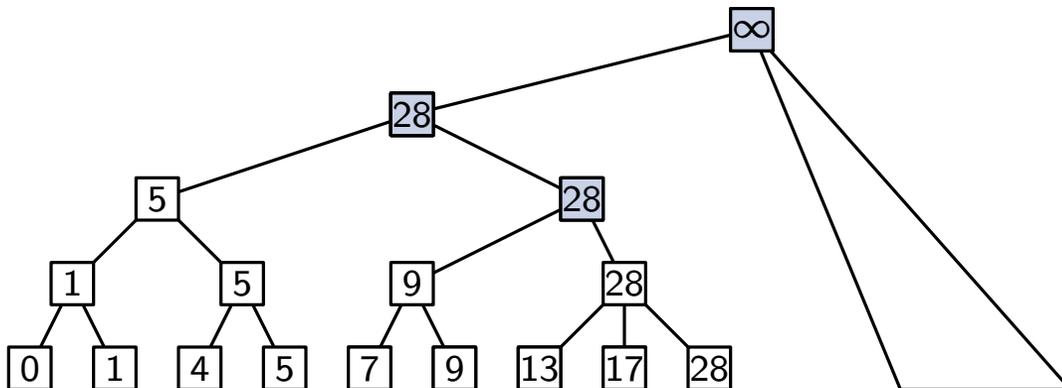
```

// 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)

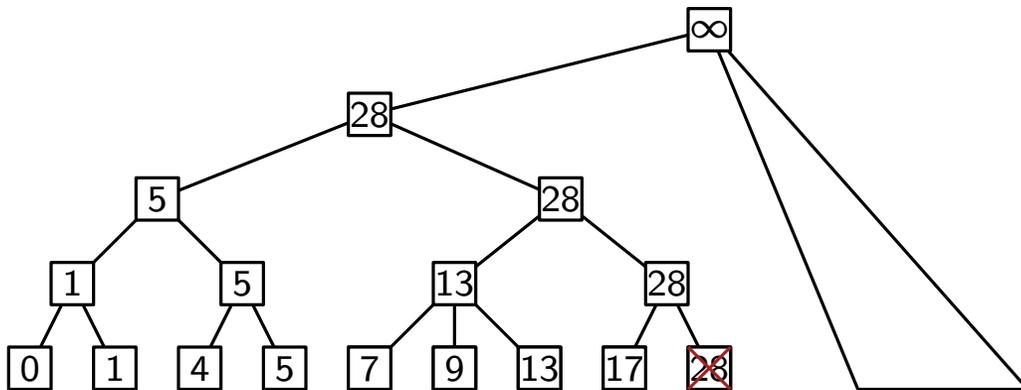
```

// 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)
  
```



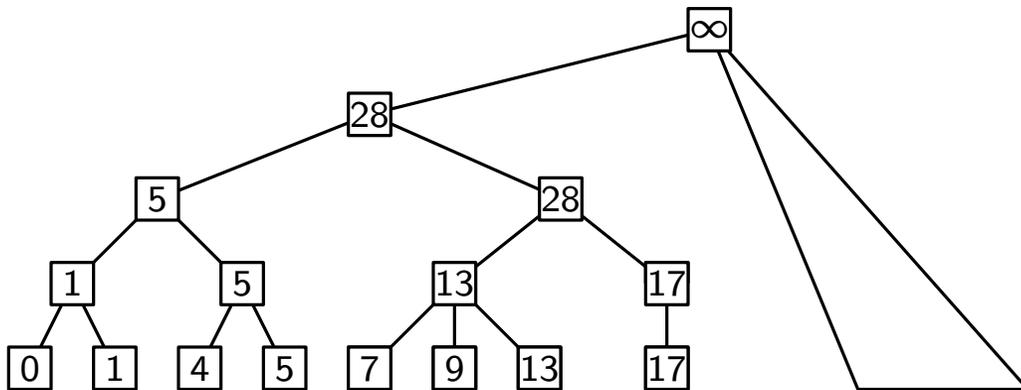
# fixKeysOnPathToRoot

## 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)

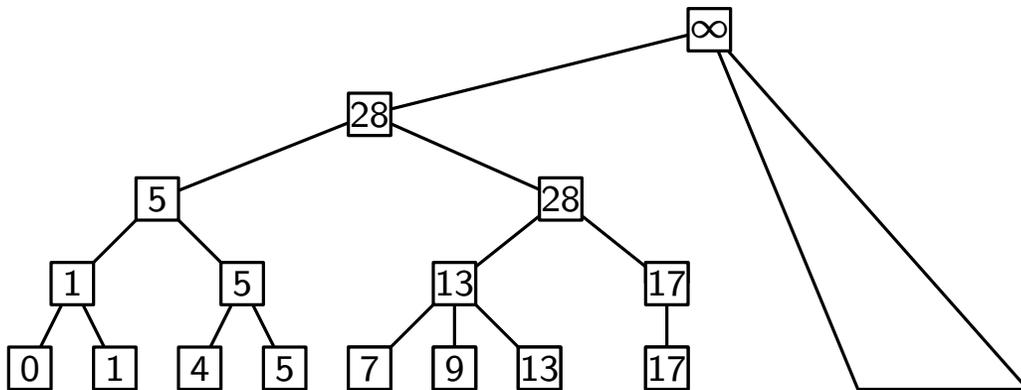
```

# 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)
  
```

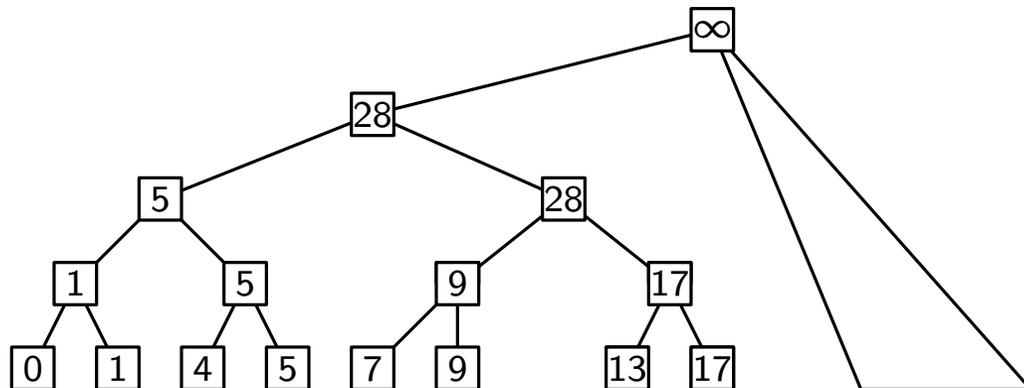
# fixKeysOnPathToRoot

## 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)

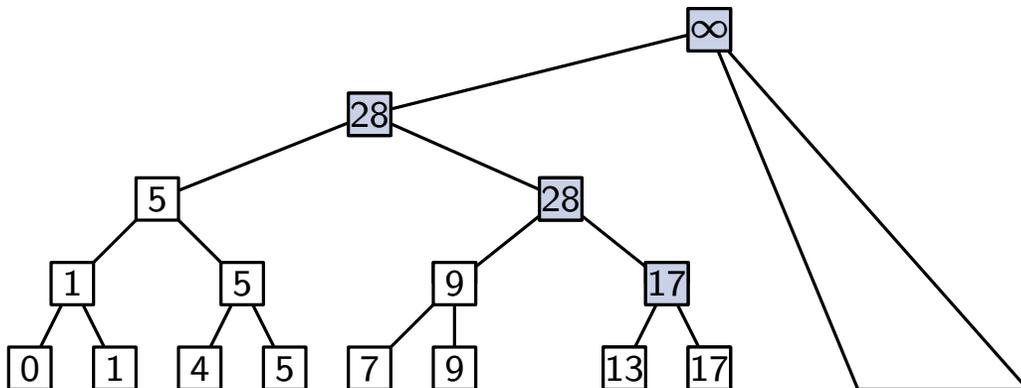
```

# 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

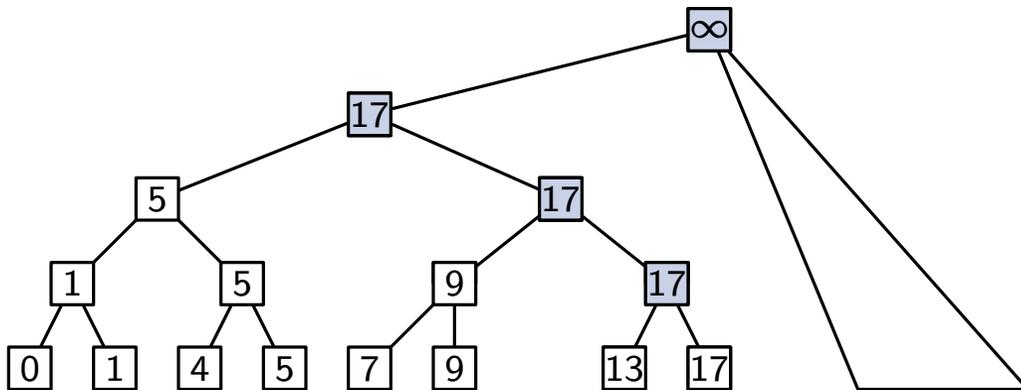
```

## 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 ( $\infty$ -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 ( $\infty$ -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