

Algorithmen und Datenstrukturen

Wintersemester 2023/24

14. Vorlesung

Rot-Schwarz-Bäume

Dynamische Menge

verwaltet Elemente einer
sich ändernden Menge M



Abstrakter Datentyp	<i>Funktionalität</i>
ptr Insert(key k , info i) Delete(ptr x)	} Änderungen
ptr Search(key k) ptr Minimum() ptr Maximum() ptr Predecessor(ptr x) ptr Successor(ptr x)	} Anfragen

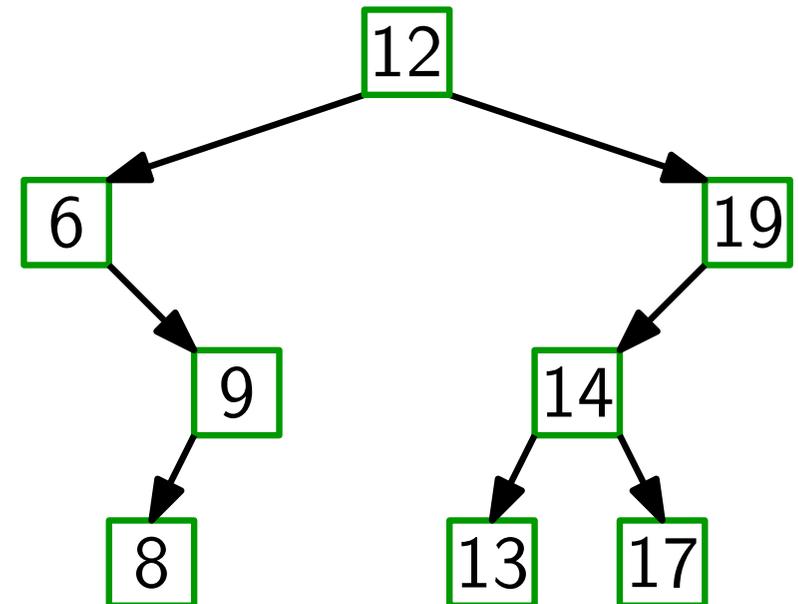
Implementierung: je nachdem...

Binäre Suchbäume

Satz. Binäre Suchbäume implementieren alle dynamische-Menge-Operationen in $O(h)$ Zeit, wobei h die momentane Höhe des Baums ist.

Aber: Im schlechtesten Fall gilt $h \in \Theta(n)$.

Ziel: Suchbäume *balancieren!*
 $\Rightarrow h \in O(\log n)$



Binärer-Suchbaum-Eigenschaft:

Für jeden Knoten v gilt:

alle Knoten im linken Teilbaum von v haben Schlüssel $\leq v.key$
 rechten \geq

Balanciermethoden

Beispiele

nach **Gewicht**

BB[α]-Bäume

für jeden Knoten ist das Gewicht
(= Anzahl der Knoten) von linkem
u. rechtem Teilbaum ungefähr gleich.

nach **Höhe**

AVL-Bäume*

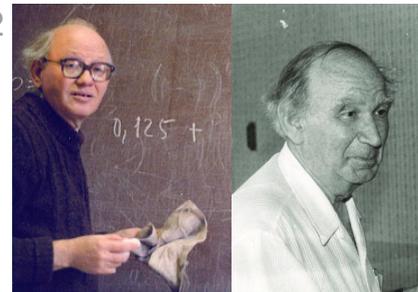
für jeden Knoten ist die Höhe
von linkem und rechtem Teilbaum ungefähr gleich.

*) Georgi M. Adelson-Velski & Jewgeni M. Landis, Doklady Akademii Nauk SSSR, 1962

nach **Grad**

(2, 3)-Bäume

alle Blätter haben dieselbe Tiefe, aber innere
Knoten können verschieden viele Kinder haben.



1922–2014 1921–1997

nach **Knotenfarbe**

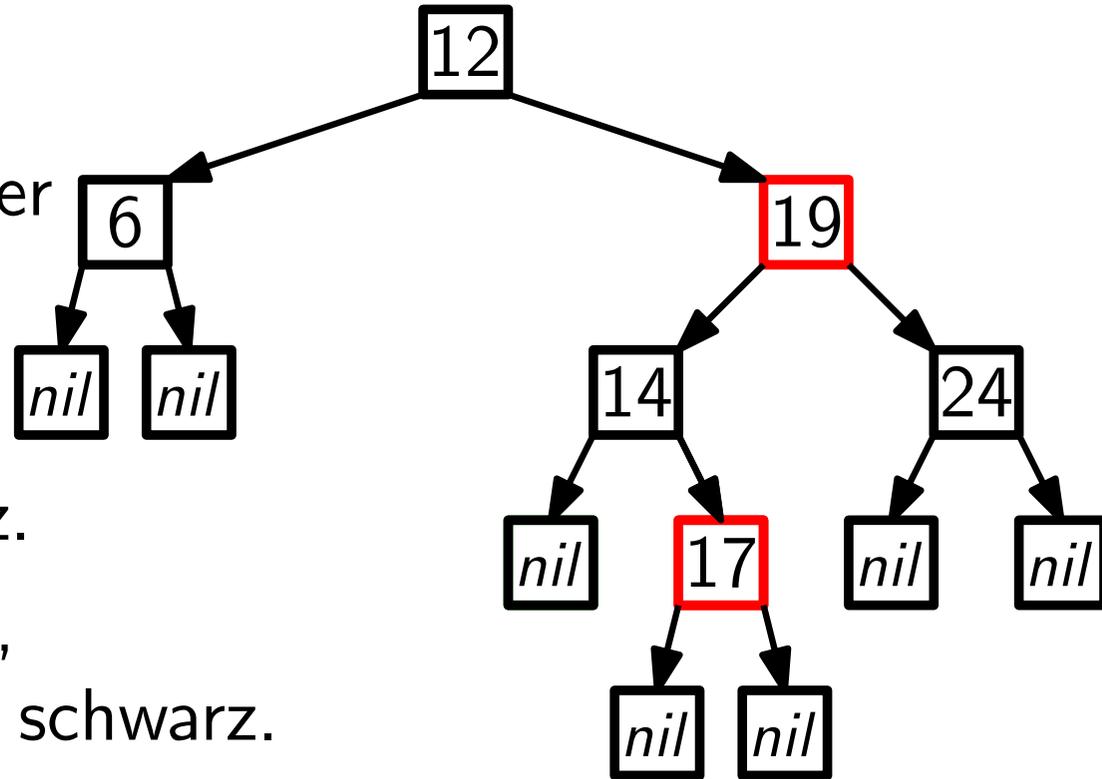
Rot-Schwarz-Bäume

jeder Knoten ist entw. „gut“ oder „schlecht“; der Anteil
schlechter Knoten darf in keinem Teilbaum zu groß sein.

Rot-Schwarz-Bäume: Eigenschaften

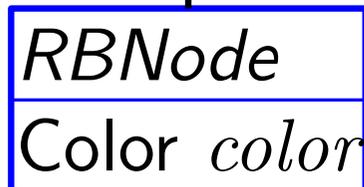
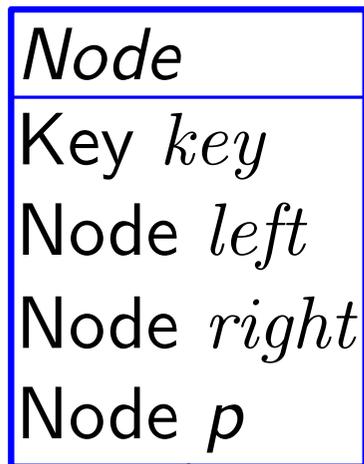
Rot-Schwarz-Bäume sind binäre Suchbäume mit folgenden *Rot-Schwarz-Eigenschaften*:

- (E1) Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
- (E2) Die Wurzel ist schwarz.
- (E3) Alle Blätter sind schwarz.
- (E4) Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.
- (E5) Für jeden Teilbaum gilt: alle Wurzel-Blatt-Pfade enthalten dieselbe Anzahl schwarzer Knoten.



Aus (E4) folgt: Auf keinem Wurzel-Blatt-Pfad folgen zwei rote Knoten direkt auf einander.

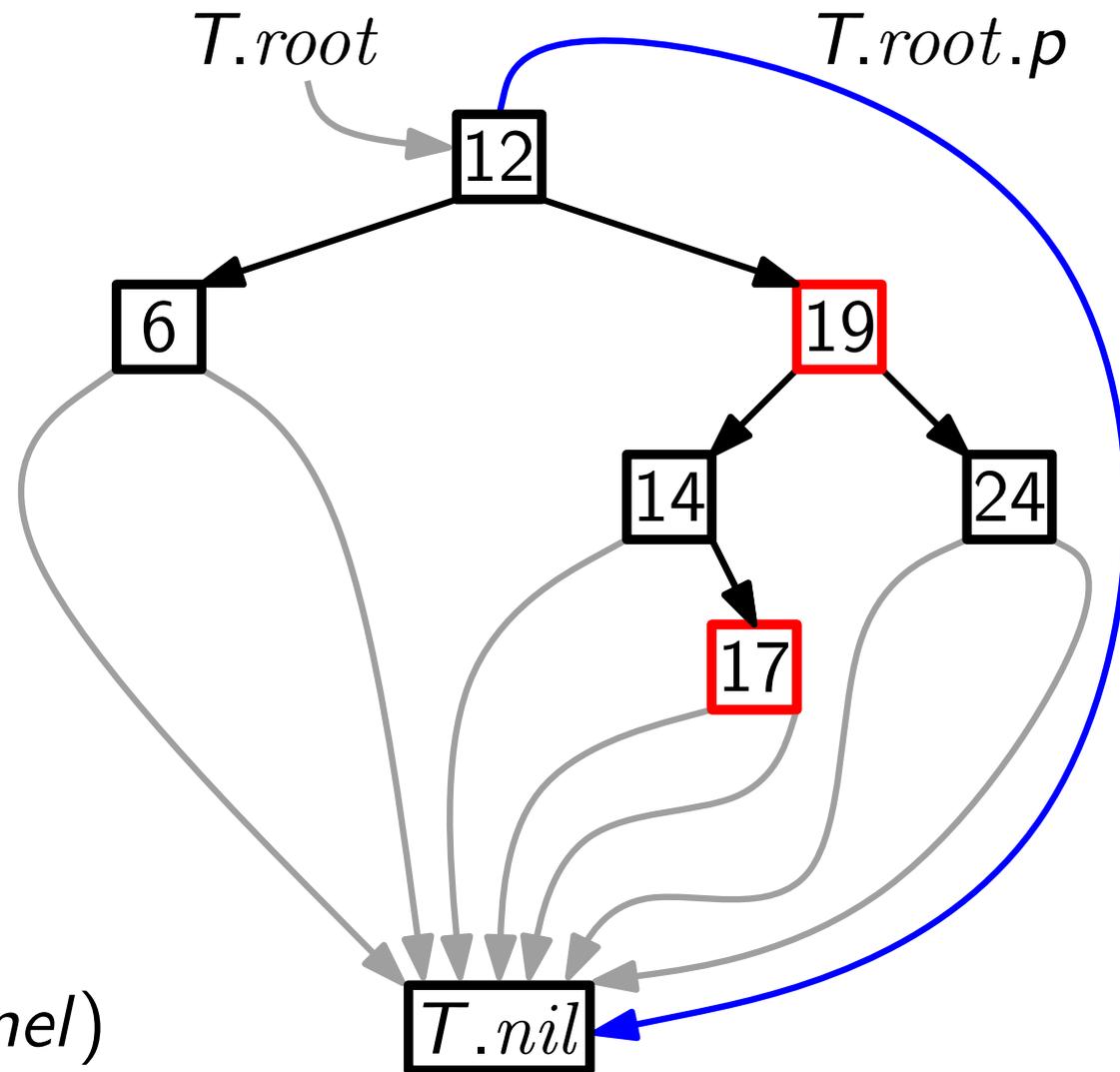
Technisches Detail



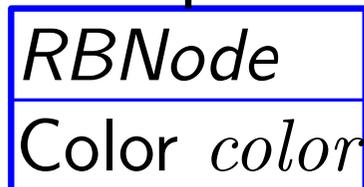
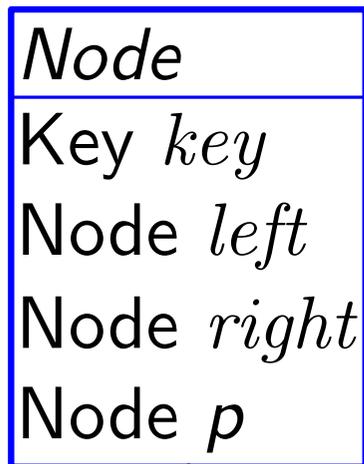
T.root, T.nil

Dummy-Knoten (engl. *sentinel*)

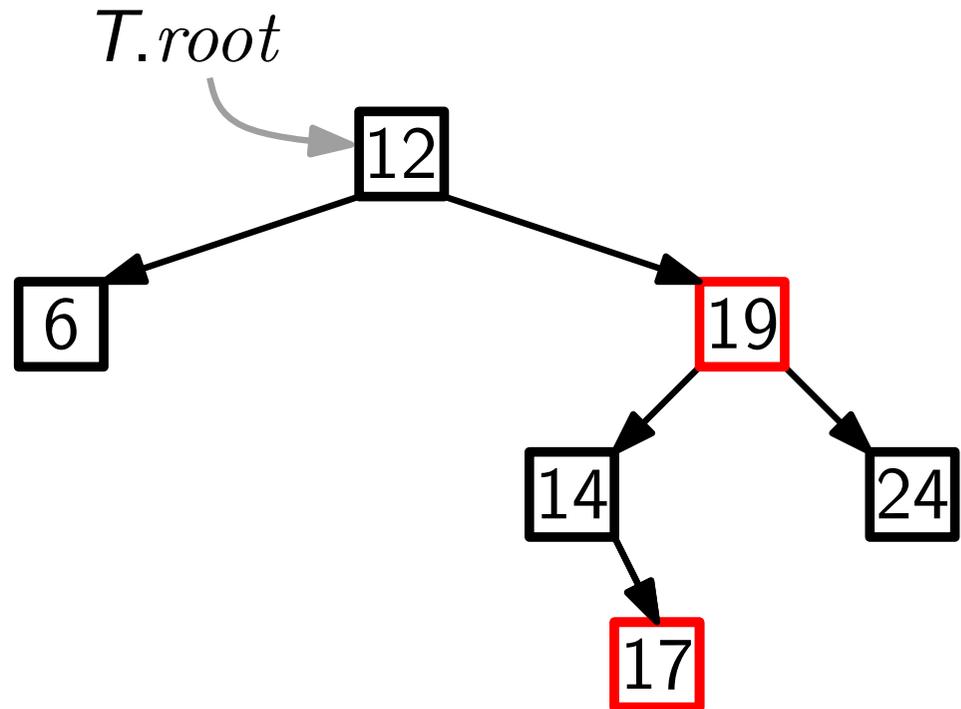
Zweck: um Baum-Operationen prägnanter aufschreiben zu können. (Wir zeichnen den Dummy-Knoten i.A. nicht.)



Technisches Detail

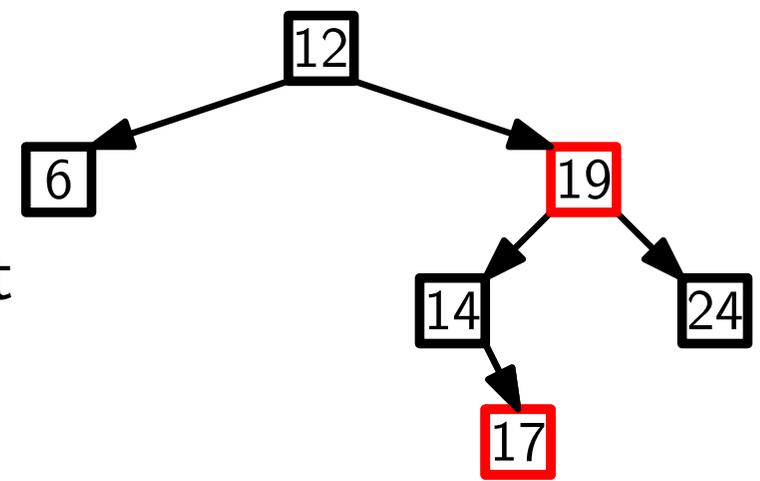


T.root, T.nil



Zweck: um Baum-Operationen prägnanter aufschreiben zu können. (Wir zeichnen den Dummy-Knoten i.A. nicht.)

(Schwarz-) Höhe



Definition: Die *Länge* eines Pfades ist die Anz. seiner Kanten.

Definition: Sei B ein Baum.

Knoten u ist *unter* Knoten v , wenn u in dem Teilbaum B_v von B mit Wurzel v enthalten ist.

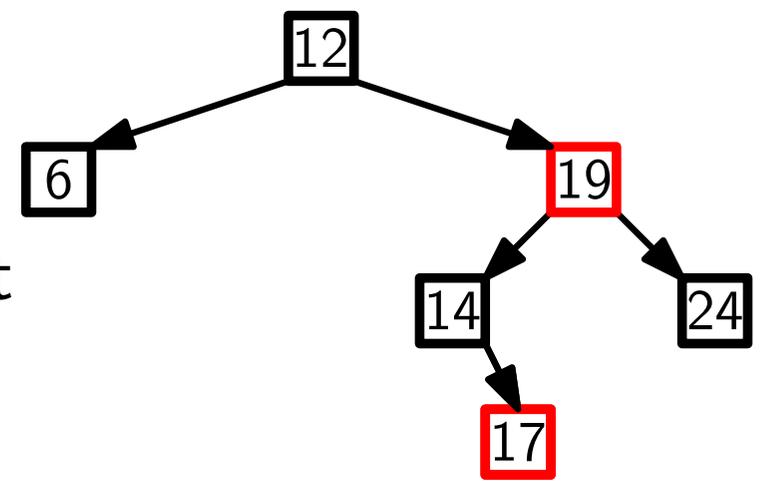
Beispiel: „17“ ist unter „19“, „14“ ist *nicht* unter „6“.

Definition: Die *Höhe* eines Knotens v ist die Länge eines längsten Pfades von v zu einem Blatt unter v .

Definition! Die *Höhe* $\text{Höhe}(v)$ eines Knotens v ist die Anz. der Knoten (ohne v) auf dem längsten Pfad zu einem Blatt (inkl. Blatt) in B_v .

Beispiel: „12“ hat Höhe

(Schwarz-) Höhe



Definition: Die *Länge* eines Pfades ist die Anz. seiner Kanten.

Definition: Sei B ein Baum.

Knoten u ist *unter* Knoten v , wenn u in dem Teilbaum B_v von B mit Wurzel v enthalten ist.

Beispiel: „17“ ist unter „19“, „14“ ist *nicht* unter „6“.

Definition: Die *Höhe* eines Knotens v ist die Länge eines längsten Pfades von v zu einem Blatt unter v .

wohl-
definiert
wg. (E5)

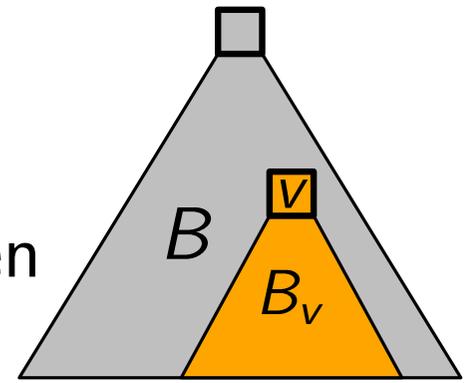
Definition: Die *Schwarz-Höhe* $s\text{Höhe}(v)$ eines Knotens v ist die Anz. der *schwarzen* Knoten (ohne v) auf *jedem* ~~längsten~~ Pfad zu einem Blatt (inkl. Blatt) in B_v .

Beispiel: „12“ hat Höhe 4 (!) und Schwarz-Höhe 2.

Folgerung: v Knoten $\Rightarrow s\text{Höhe}(v) \leq \text{Höhe}(v) \leq 2 \cdot s\text{Höhe}(v)$.

Höhe $\in \Theta(\log n)!!$

Lemma. Ein Rot-Schwarz-Baum B mit n inneren Knoten hat Höhe $\leq 2 \log_2(n + 1)$.



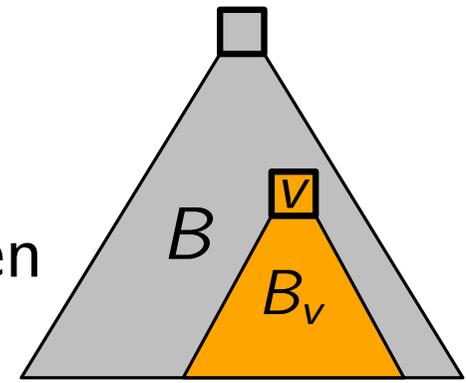
Beweis.

Behauptung: Für jeden Knoten v von B gilt:

B_v hat $\geq 2^{\text{Höhe}(v)} - 1$ innere Knoten.

Höhe $\in \Theta(\log n)!!$

Lemma. Ein Rot-Schwarz-Baum B mit n inneren Knoten hat Höhe $\leq 2 \log_2(n + 1)$.



Beweis.

Behauptung: Für jeden Knoten v von B gilt:

B_v hat $\geq 2^{\text{sHöhe}(v)} - 1$ innere Knoten.

Beweis durch vollständige Induktion über Höhe(v).

Höhe(v) = 0. Dann $B_v = B.\text{nil}$ und sHöhe(v) = 0.

B_v hat $2^0 - 1 = 0$ innere Knoten. ✓

Höhe(v) > 0. Beide Kinder von v haben Höhe < Höhe(v).

⇒ können Ind.-Annahme anwenden.

⇒ Anz. innere Knoten von B_v ist mind.

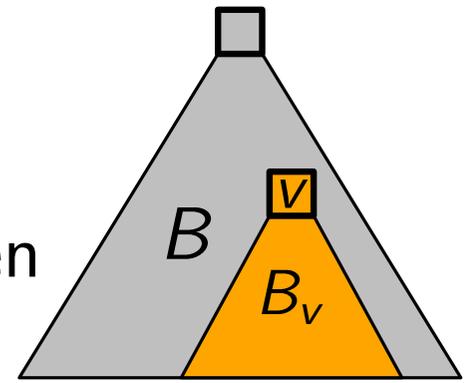
$2 \cdot (2^{\text{sHöhe}(v)-1} - 1) + 1 = 2^{\text{sHöhe}(v)} - 1$. ✓

sHöhe der Kinder von v ist mind.

Anz. innerer Knoten unter einem Kind von v

Höhe $\in \Theta(\log n)!!$

Lemma. Ein Rot-Schwarz-Baum B mit n inneren Knoten hat Höhe $\leq 2 \log_2(n + 1)$.



Beweis.

Behauptung: Für jeden Knoten v von B gilt:

B_v hat $\geq 2^{\text{sHöhe}(v)} - 1$ innere Knoten.

$v := B.\text{root} \Rightarrow \underbrace{\# \text{ innere Knoten}(B)}_n \geq 2^{\text{sHöhe}(B)} - 1.$

$\Rightarrow \text{sHöhe}(B) \leq \log_2(n + 1)$

Wegen R-S-Eig. (E4) gilt: Höhe(B) $\leq 2 \cdot \text{sHöhe}(B)$.

$\Rightarrow \text{Höhe}(B) \leq 2 \log_2(n + 1)$ □

Also: Rot-Schwarz-Bäume sind *balanciert!* Fertig?!

Nee: **Insert & Delete können R-S-Eig. verletzen!**

Einfügen

Node Insert(key k)

$y = nil$

$x = root$

while $x \neq nil$ **do**

$y = x$

if $k < x.key$ **then**

$x = x.left$

else $x = x.right$

$z = \text{new Node}(k, y)$

if $y == nil$ **then** $root = z$

else

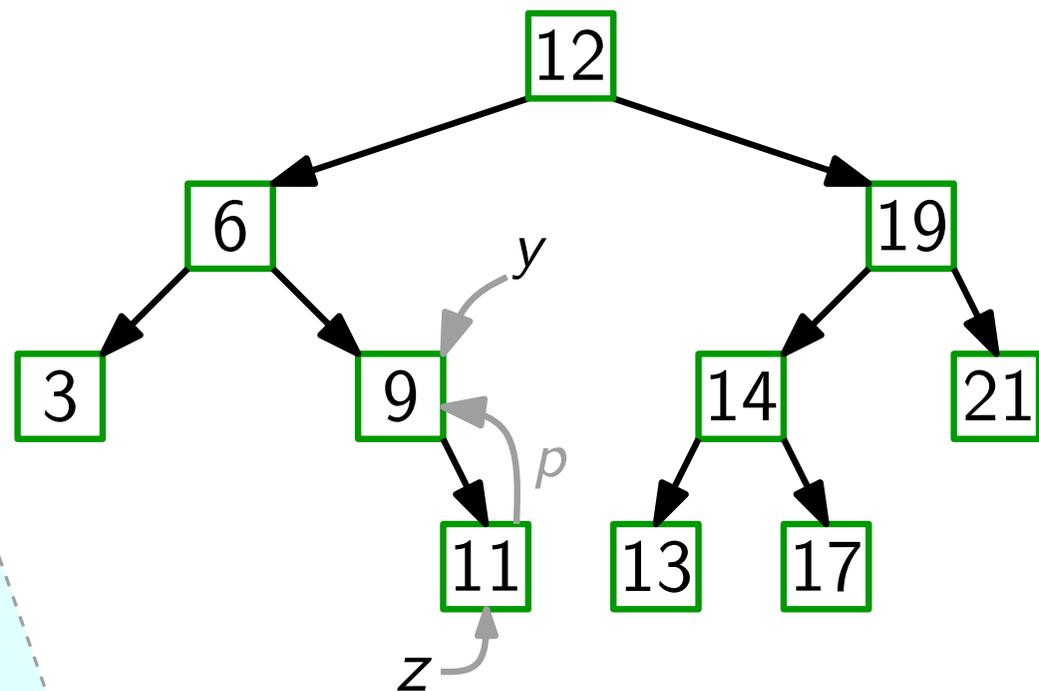
if $k < y.key$ **then** $y.left = z$

else $y.right = z$

return z

Insert(11)

$x == nil$



Node(Key k , Node par)

$key = k$

$p = par$

$right = left = nil$

Einfügen

Laufzeit? (ohne RBInsertFixup) $O(h) = O(\log n)$

RB RB

Node Insert(key k)

$y = T.nil$

$x = root$

while $x \neq T.nil$ **do**

$y = x$

if $k < x.key$ **then**

$x = x.left$

else $x = x.right$

$z = \text{new Node}(k, y, \text{red})$

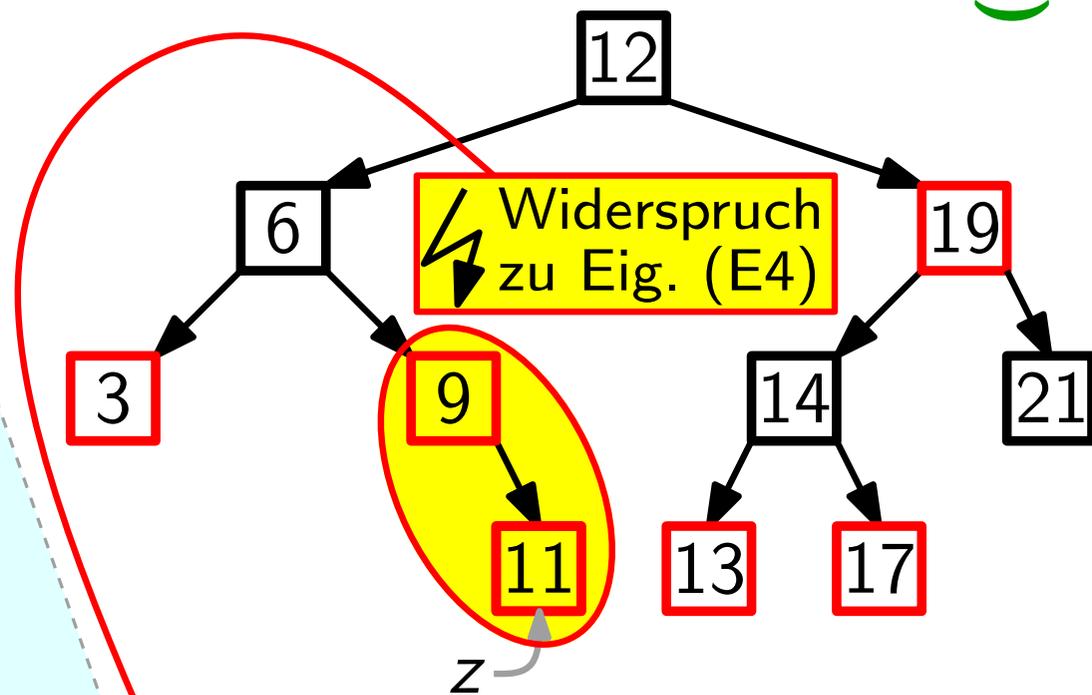
if $y == T.nil$ **then** $root = z$

else

if $k < y.key$ **then** $y.left = z$

else $y.right = z$

 RBInsertFixup(z)
return z



Node(Key k , Node par)

$key = k$

$p = par$

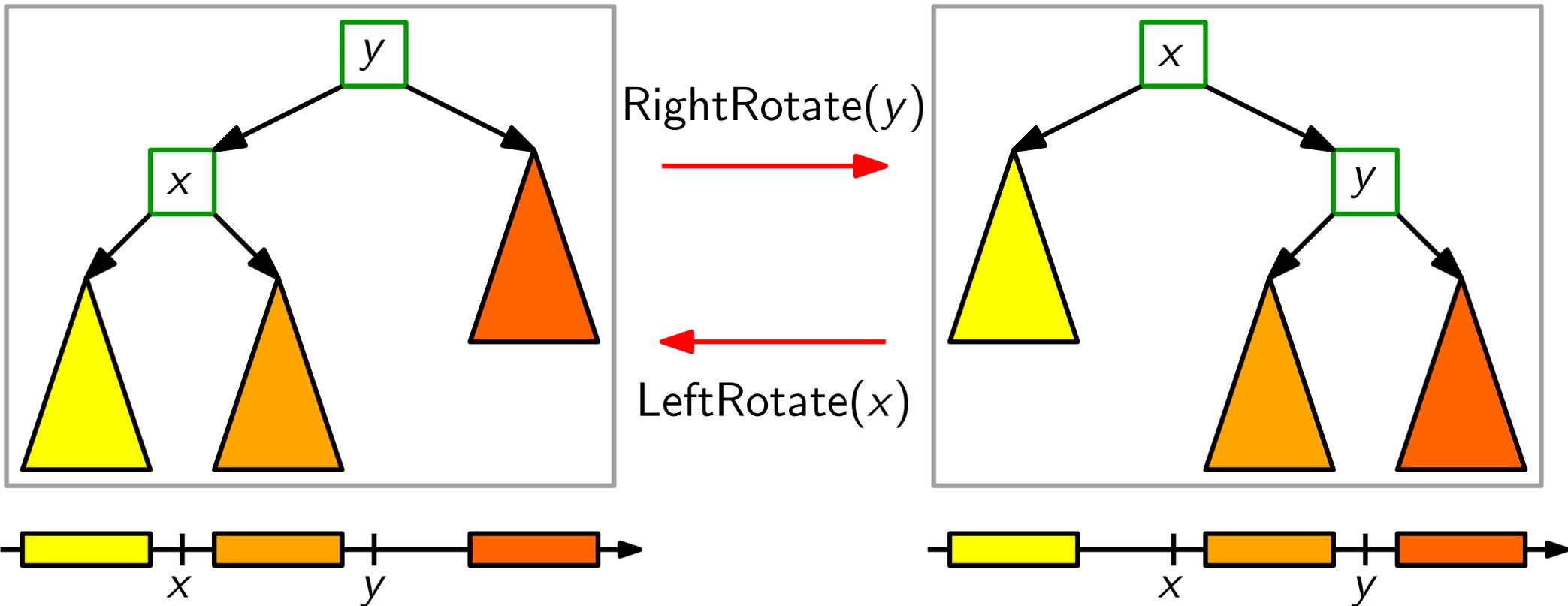
$right = left = T.nil$

RBNode(..., Color c)

$super(k, par)$

$color = c$

Exkurs: Rotationen



Also: Binärer-Suchbaum-Eig. bleibt beim Rotieren erhalten!

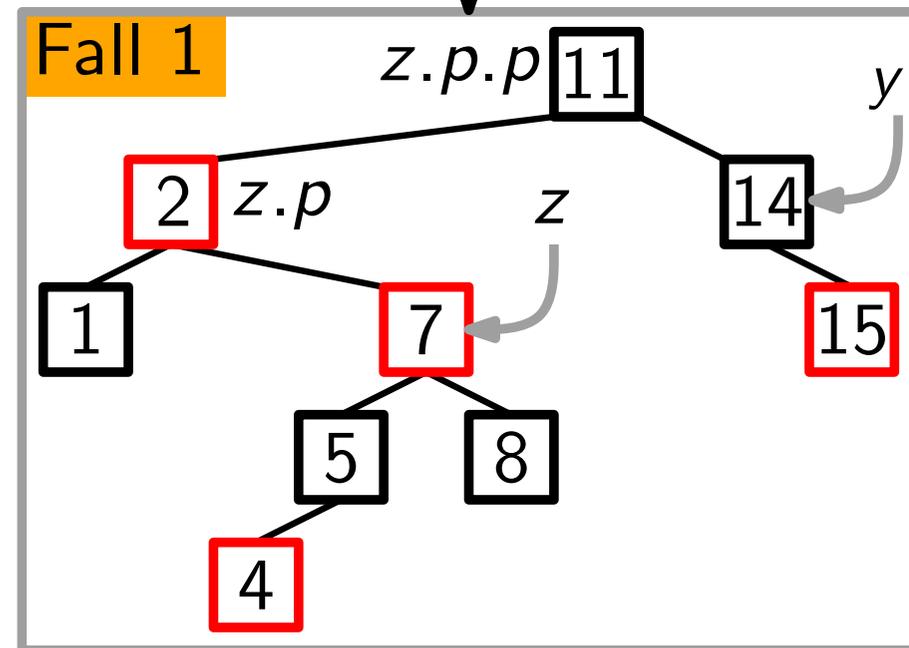
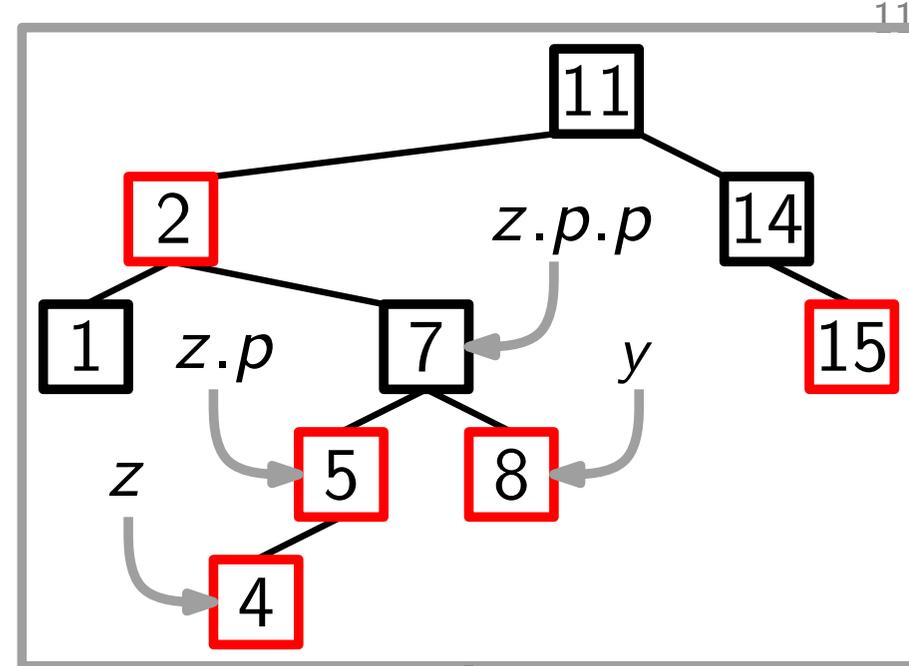
Aufgabe: Schreiben Sie Pseudocode für $\text{LeftRotate}(x)$!

Laufzeit: $O(1)$.



RBInsertFixup(Node z)

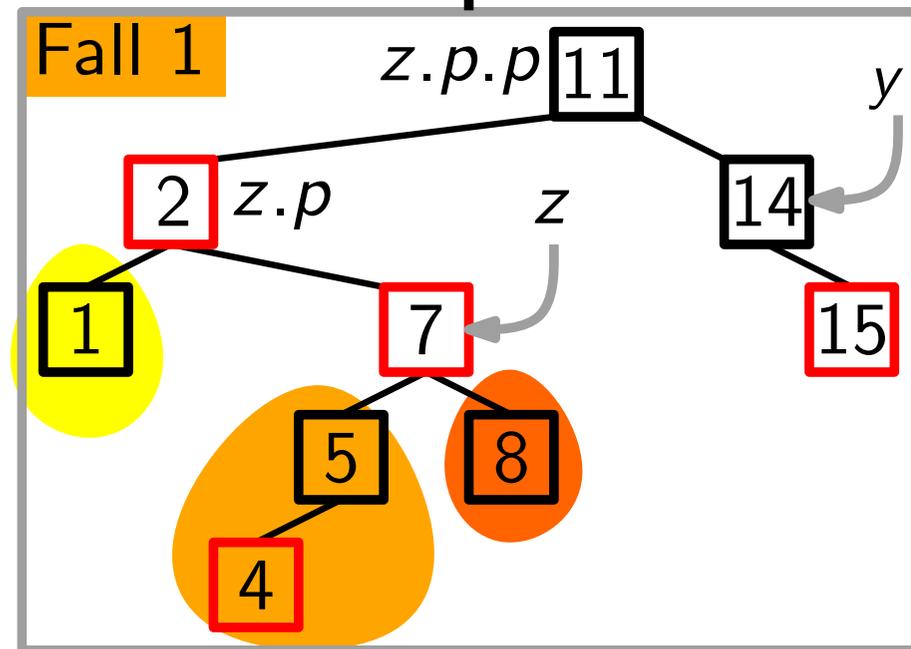
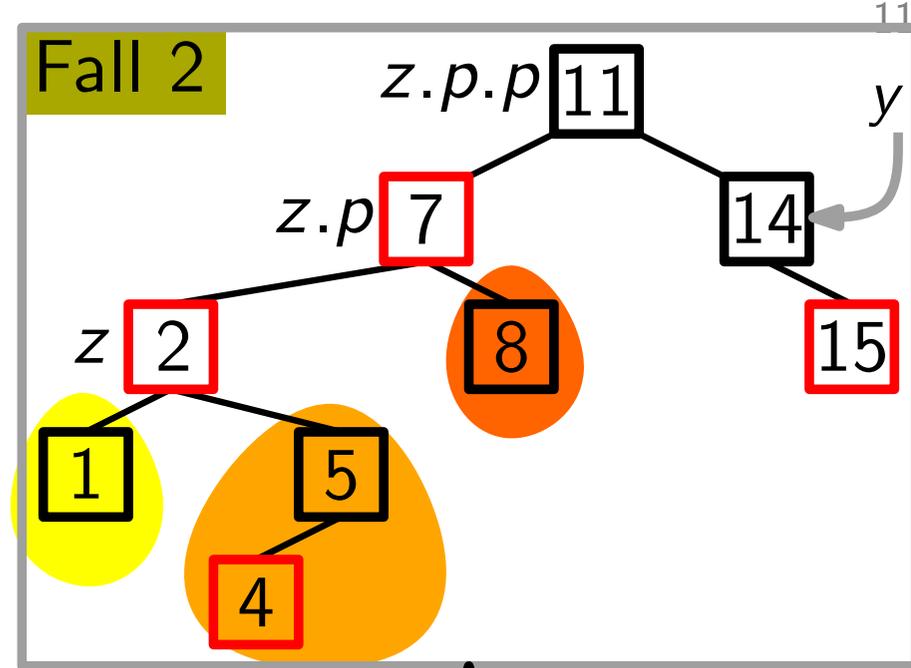
```
while z.p.color == red do
  if z.p == z.p.p.left then
    y = z.p.p.right // Tante von z
    if y.color == red then
      z.p.color = black
      z.p.p.color = red
      y.color = black
      z = z.p.p
    else
      if z == z.p.right then
        z = z.p
        LeftRotate(z)
        z.p.color = black
        z.p.p.color = red
        RightRotate(z.p.p)
      else ... // wie oben, aber re. & li. vertauscht
  root.color = black
```



RBInsertFixup(Node z)

```

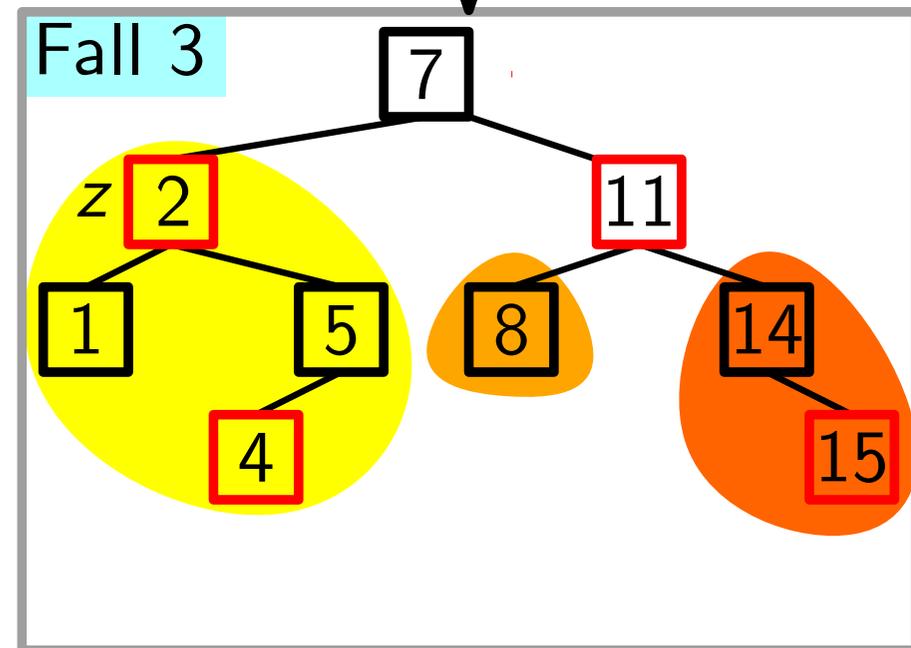
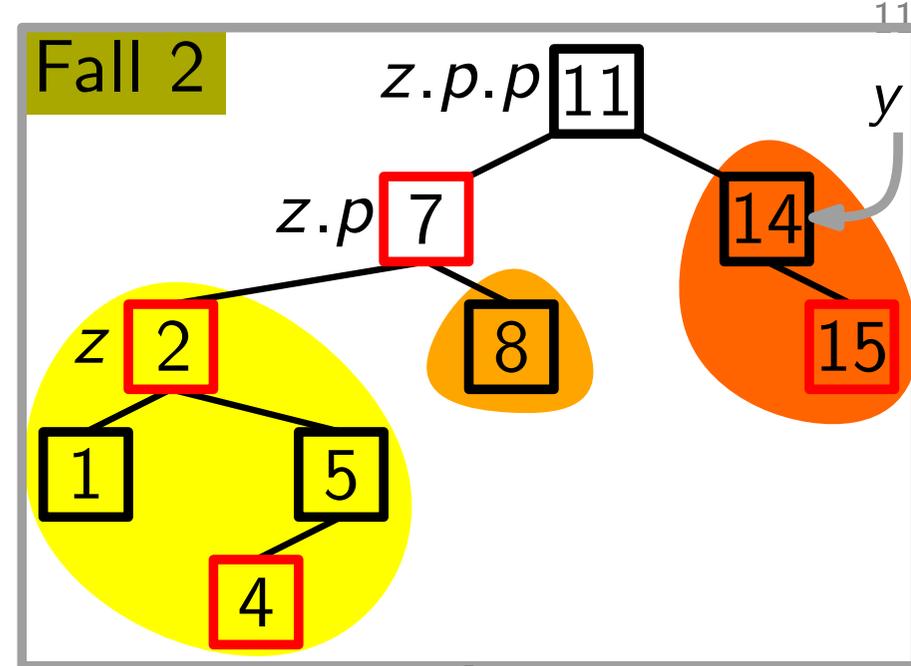
while z.p.color == red do
  if z.p == z.p.p.left then
    y = z.p.p.right // Tante von z
    if y.color == red then
      z.p.color = black
      z.p.p.color = red
      y.color = black
      z = z.p.p
    else
      if z == z.p.right then
        z = z.p
        LeftRotate(z)
        z.p.color = black
        z.p.p.color = red
        RightRotate(z.p.p)
      else ... // wie oben, aber re. & li. vertauscht
  root.color = black
  
```



RBInsertFixup(Node z)

```

while z.p.color == red do
  if z.p == z.p.p.left then
    y = z.p.p.right // Tante von z
    if y.color == red then
      z.p.color = black
      z.p.p.color = red
      y.color = black
      z = z.p.p
    else
      if z == z.p.right then
        z = z.p
        LeftRotate(z)
        z.p.color = black
        z.p.p.color = red
        RightRotate(z.p.p)
      else ... // wie oben, aber re. & li. vertauscht
  root.color = black
  
```



Korrektheit

Zu zeigen: RBInsertFixup stellt R-S-Eigenschaft wieder her.

Schleifeninvariante (gültig am Anfang der while-Schleife)

- z ist rot.
- Falls $z.p$ die Wurzel ist, dann ist $z.p$ schwarz.
- Falls R-S-Eig. verletzt sind, dann entweder (E2) oder (E4).
 - Falls (E2) verletzt ist, dann weil $z = root$ und z rot ist.
 - Falls (E4) verletzt ist, dann weil z und $z.p$ rot sind.

Zeige:

- Initialisierung
- Aufrechterhaltung
- Terminierung

Viel Arbeit! Siehe [CLRS, Kapitel 13.3].

Laufzeit RBInsertFixup

```

while z.p.color == red do
  if z.p == z.p.p.left then
    y = z.p.p.right
    if y.color == red then
      z.p.color = black
      z.p.p.color = red
      y.color = black
      z = z.p.p
    else
      if z == z.p.p.right then
        z = z.p.p
        LeftRotate(z)
        z.p.color = black
        z.p.p.color = red
        RightRotate(z.p.p)
      else ... // wie oben, aber re. & li. vertauscht
  root.color = black
  
```

Insgesamt:

- Fall 1 $O(h)$ mal
- Fall 2 ≤ 1 mal
- Fall 3 ≤ 1 mal

$O(\log n)$ Umfärbungen
und ≤ 2 Rotationen

$O(1)$

Klettert im Baum
2 Ebenen nach oben.

$O(1)$

Führt zum Abbruch
der while-Schleife.

$O(1)$

Löschen in (farblosen) binären Suchbäumen

Sei z der zu löschende Knoten. Wir betrachten drei Fälle:

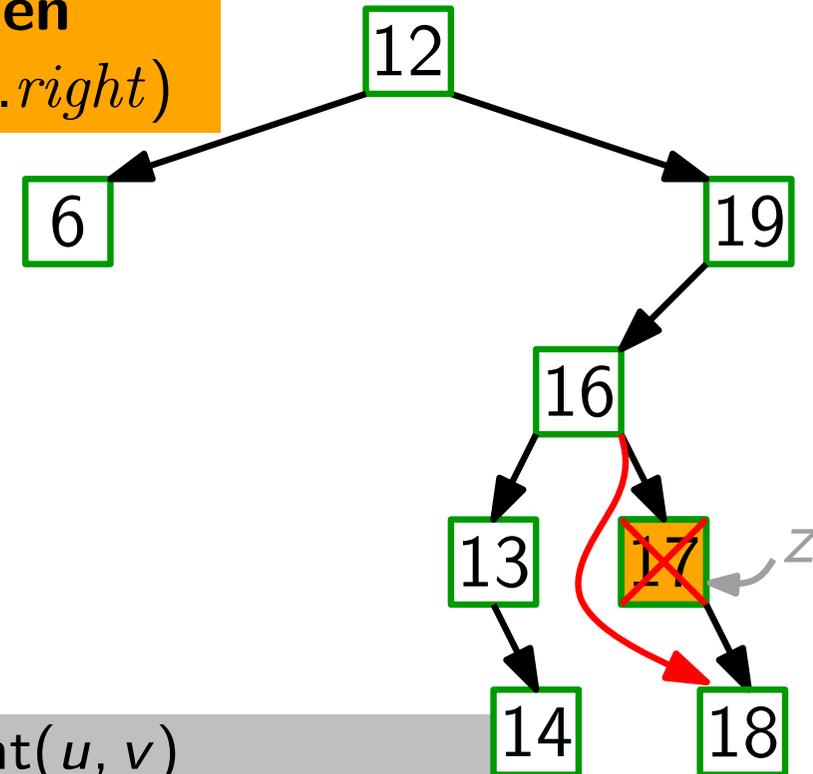
1. z hat kein li. Kind.

```
if z.left == nil then
  Transplant(z, z.right)
```

Setze $z.right$ an die Stelle von z .
Lösche z .

2. z hat kein re. Kind.

3. z hat zwei Kinder.



```
Transplant(u, v)
```

```
if u.p == nil then root = v
```

```
else
```

```
  if u == u.p.left then
```

```
    u.p.left = v
```

```
  else u.p.right = v
```

```
if v != nil then v.p = u.p
```

Setze v
an die
Stelle
von u .

Löschen (Übersicht)

Delete(Node z)

```
if z.left == nil then           // kein linkes Kind
|  Transplant(z, z.right)
else
|  if z.right == nil then      // kein rechtes Kind
|  |  Transplant(z, z.left)
|  else                          // zwei Kinder
|  |  y = Successor(z)
|  |  if y.p ≠ z then
|  |  |  Transplant(y, y.right)
|  |  |  y.right = z.right
|  |  |  y.right.p = y
|  |  Transplant(z, y)
|  |  y.left = z.left
|  |  y.left.p = y
```

RBDelete(Node z)

```
if z.left == T.nil then
    RBTransplant(z, z.right)
else
    if z.right == T.nil then
        RBTransplant(z, z.left)
    else
        y = Successor(z)

        if y.p == z then
            else
                RBTransplant(y, y.right)
                y.right = z.right
                y.right.p = y
            RBTransplant(z, y)
            y.left = z.left
            y.left.p = y
```

RBTransplant(u, v)

```
if u.p == T.nil then root = v
else
    if u == u.p.left then
        u.p.left = v
    else u.p.right = v
if v != nil then v.p = u.p
```

Achtung – Trick!

Das kann dazu führen, dass manchmal der Elternzeiger von $T.nil$ temporär auf den Elternknoten von u gesetzt wird.

```
RBDelete(Node z)
```

```
y = z; origcolor = y.color
```

```
if z.left == T.nil then
```

```
    x = z.right
```

```
    RBTransplant(z, z.right)
```

```
else
```

```
    if z.right == T.nil then
```

```
        x = z.left
```

```
        RBTransplant(z, z.left)
```

```
    else
```

```
        y = Successor(z)
```

```
        origcolor = y.color
```

```
        x = y.right
```

```
        if y.p == z then x.p = y
```

```
        else
```

```
            RBTransplant(y, y.right)
```

```
            y.right = z.right
```

```
            y.right.p = y
```

```
        RBTransplant(z, y)
```

```
        y.left = z.left
```

```
        y.left.p = y; y.color = z.color
```

y zeigt auf den Knoten, der entweder gelöscht oder verschoben wird.

x zeigt auf den Knoten, der die Stelle von *y* einnimmt – das ist entweder das einzige Kind von *y* oder *T.nil*.

➔ Falls *y* ursprünglich *rot* war, bleiben alle R-S-Eig. erhalten:

- Keine Schwarzhöhe hat sich verändert.
- Keine zwei roten Knoten sind Nachbarn geworden.
- *y* rot $\Rightarrow y \neq$ Wurzel \Rightarrow Wurzel bleibt schwarz.

```
if origcolor == black then RBDeleteFixup(x)
```

RBDeleteFixup

Was kann schief gehen, wenn y schwarz war?

- (E2) y war Wurzel, und ein rotes Kind von y wurde Wurzel.
- (E4) x und $x.p$ sind rot.
- (E5) Falls y verschoben wurde, haben jetzt alle Pfade, die vorher y enthielten, einen schwarzen Knoten zu wenig.

„Repariere“ Knoten x zählt eine schwarze Einheit extra
 (E5): (ist also „rot-schwarz“ oder „doppelt schwarz“)

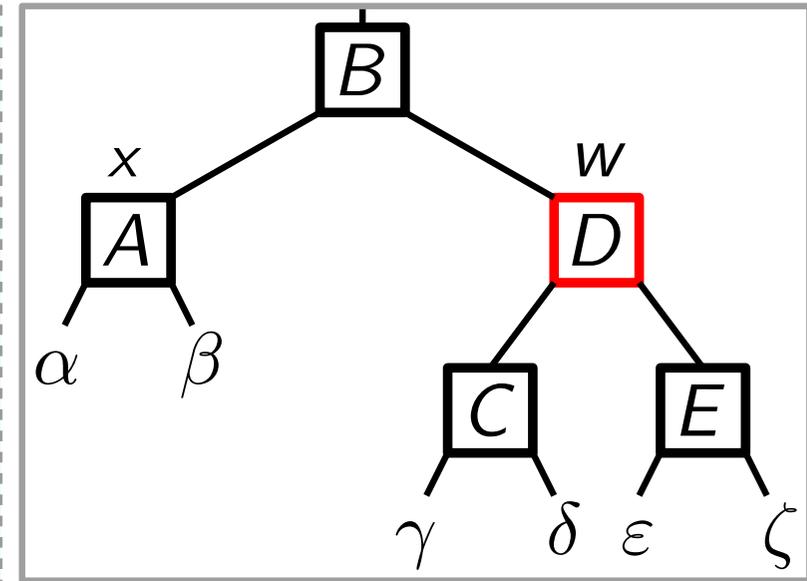
- Ziel:** Schiebe die überzählige schwarze Einheit nach oben, bis:
- x ist rot-schwarz \Rightarrow mach x schwarz.
 - x ist Wurzel \Rightarrow schwarze Extra-Einheit verfällt.
 - Problem wird lokal durch Umfärben & Rotieren gelöst.

RBDeleteFixup(RBNode x)

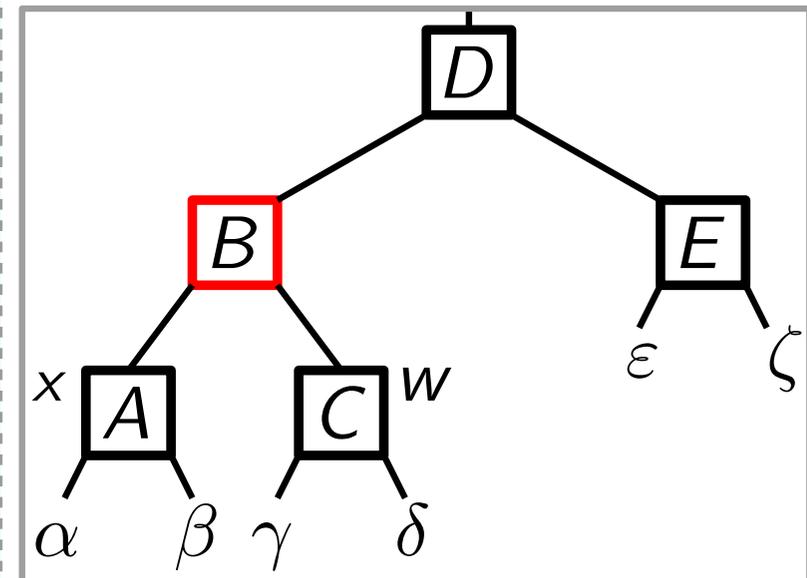
```

while x ≠ root and x.color == black do
  if x == x.p.left then
    w = x.p.right // Schwester von x
    if w.color == red then
      w.color = black
      x.p.color = red
      LeftRotate(x.p)
      w = x.p.right
    if w.left.color == black and
       w.right.color == black then
      w.color = red
      x = x.p
    else // kommt gleich!!
  else // wie oben; nur left ↔ right
x.color = black
  
```

Ziel:
 $w \rightarrow$ schwarz
 ohne R-S-Eig.
 zu verletzen.



↓ Fall 1



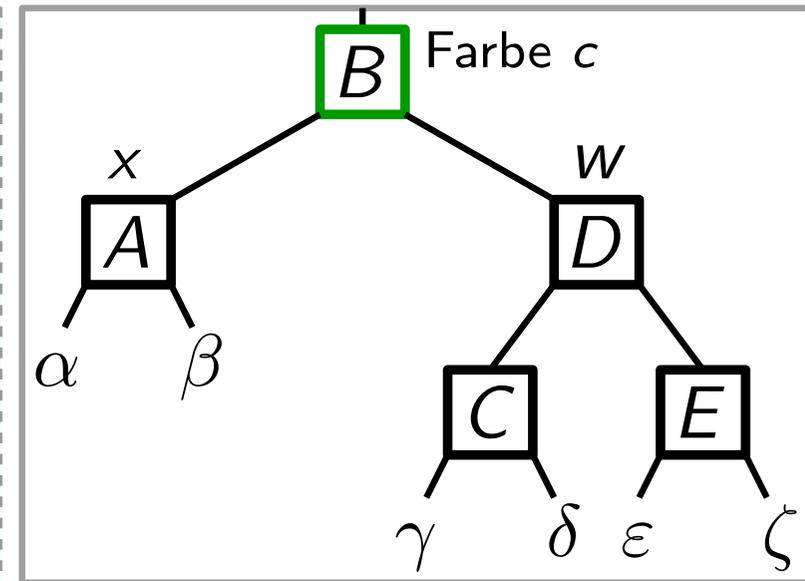
RBDeleteFixup(RBNode x)

```

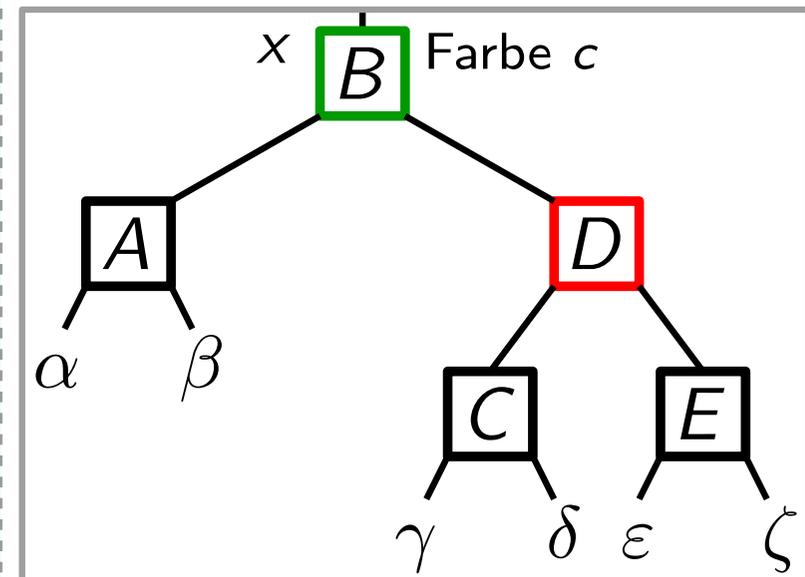
while x ≠ root and x.color == black do
  if x == x.p.left then
    w = x.p.right // Schwester von x
    if w.color == red then
      w.color = black
      x.p.color = red
      LeftRotate(x.p)
      w = x.p.right
      if w.left.color == black and
         w.right.color == black then
        w.color = red
        x = x.p
      else // kommt gleich!!
    else // wie oben; nur left ↔ right
  x.color = black
  
```

Ziel:
 $w \rightarrow$ schwarz
 ohne R-S-Eig.
 zu verletzen.

Schw. Einheit
 raufschieben.



↓ Fall 2



Bem.: Anz. der schw. Knoten (inkl. Extra-Einh. bei x) bleibt auf allen Pfaden gleich!

RBDeleteFixup (Forts.)

else

if $w.right.color == black$ **then**

$w.left.color = black$

$w.color = red$

RightRotate(w)

$w = x.p.right$

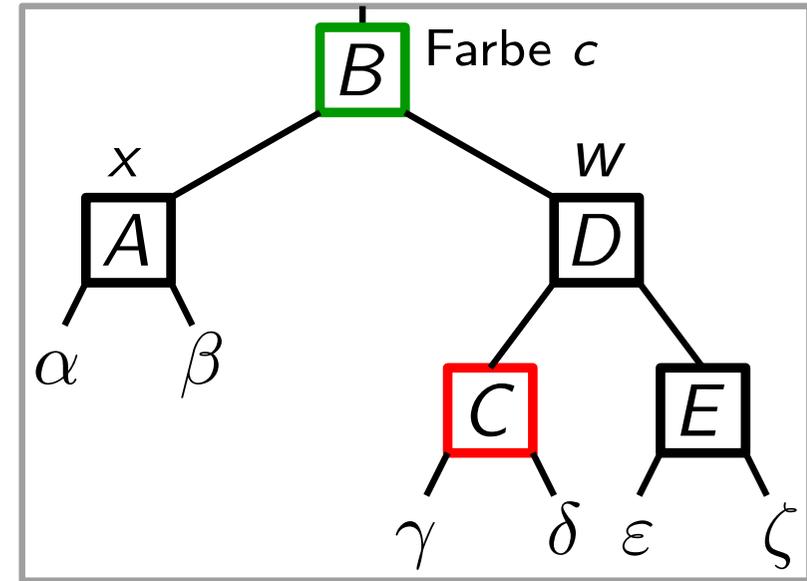
$w.color = x.p.color$

$x.p.color = black$

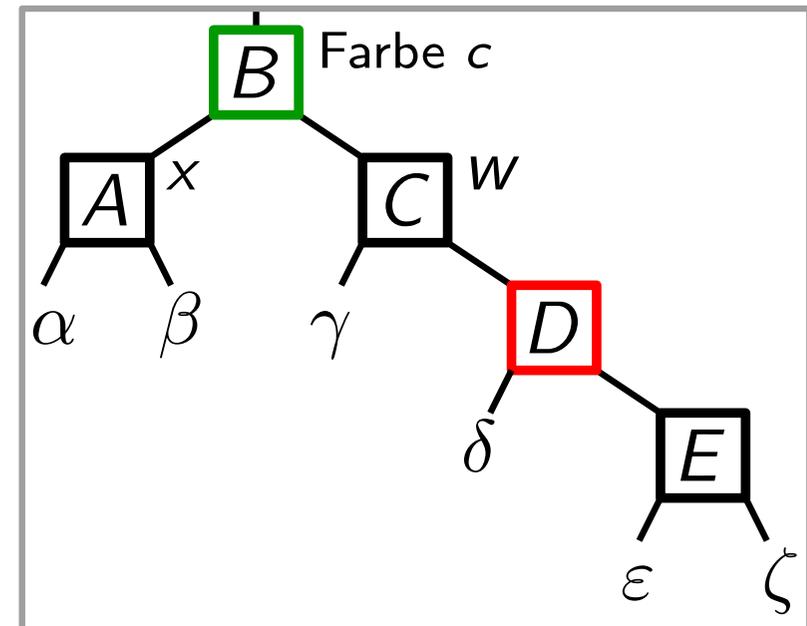
$w.right.color = black$

LeftRotate($x.p$)

$x = root$



Fall 3



RBDeleteFixup (Forts.)

else

if $w.right.color == black$ **then**

$w.left.color = black$

$w.color = red$

RightRotate(w)

$w = x.p.right$

$w.color = x.p.color$

$x.p.color = black$

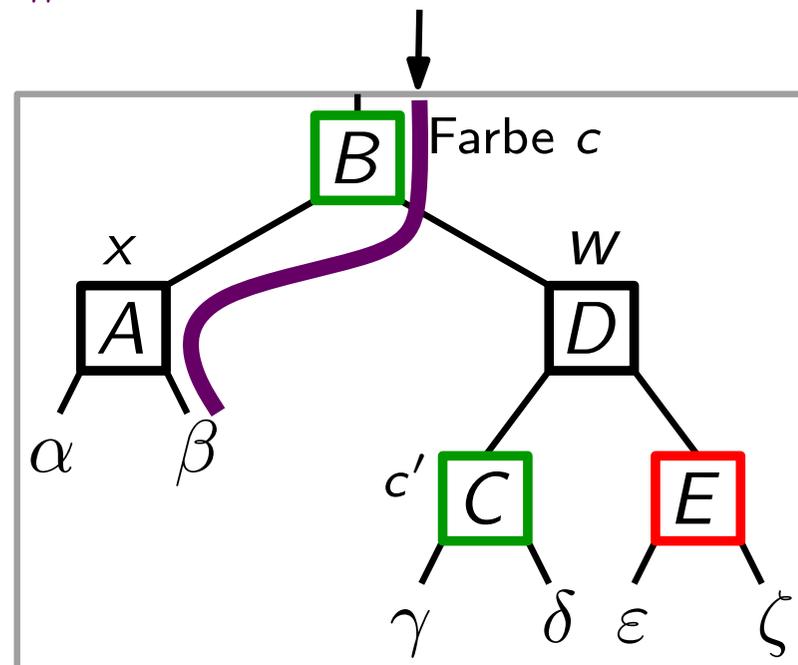
$w.right.color = black$

LeftRotate($x.p$)

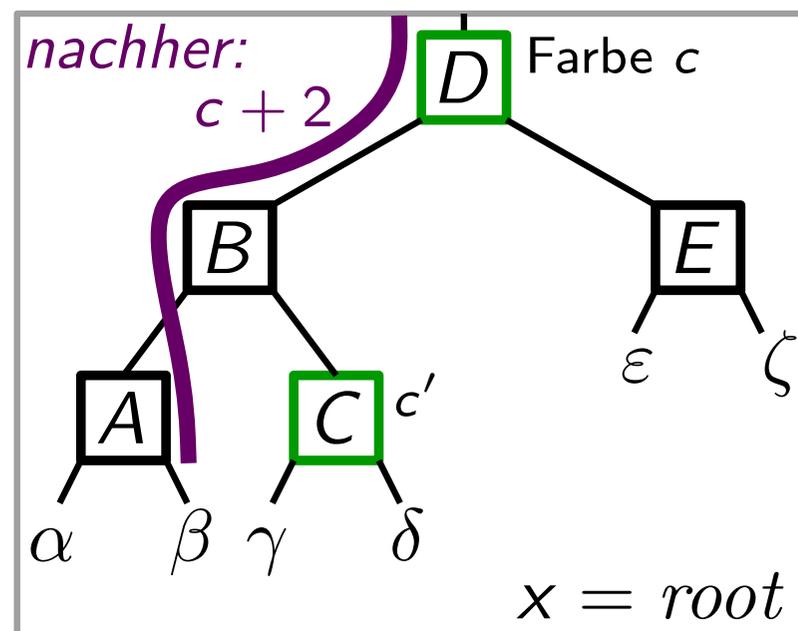
$x = root$

Bem.: Anz. der schwarzen Knoten
(inkl. der Extra-Einheit bei x)
bleibt auf allen Pfaden gleich!

vorher:
schwarze Einheiten = $c + 2$



Fall 4



RBDeleteFixup (Forts.)

else

if $w.right.color == black$ **then**

$w.left.color = black$

$w.color = red$

RightRotate(w)

$w = x.p.right$

$w.color = x.p.color$

$x.p.color = black$

$w.right.color = black$

LeftRotate($x.p$)

$x = root$

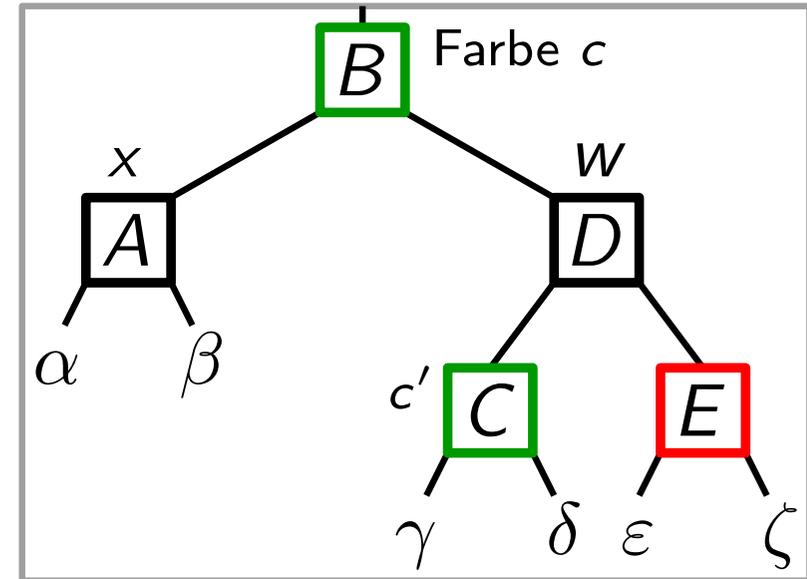
Laufzeit?

Fall 1: $O(h)$ Umfärbungen

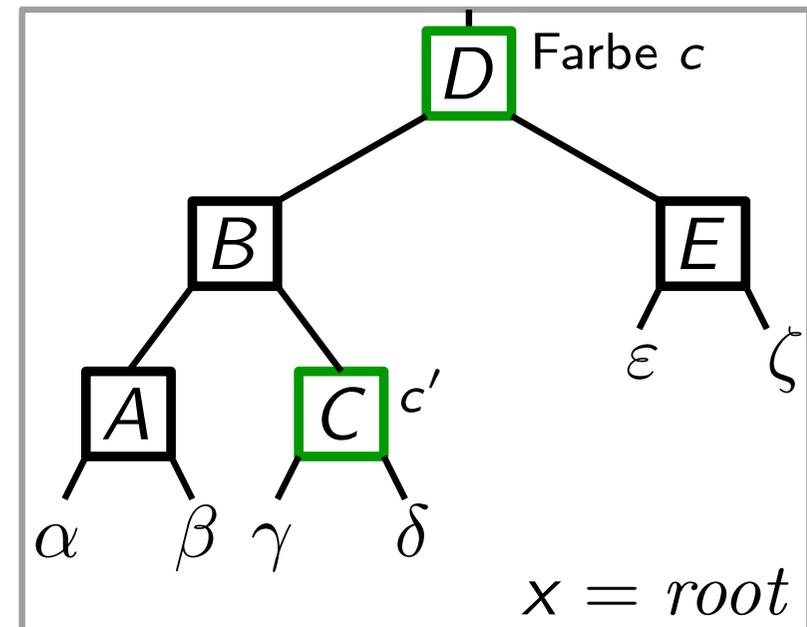
Fall 2: 1 Rotation + $O(1)$

Fall 3: 1 Rotation + $O(1)$

Fall 4: 1 Rotation + $O(1)$



↓ Fall 4



Zusammenfassung

$$\text{Laufzeit RBDelete} \in O(h) + \underbrace{\text{Laufzeit RBDeleteFixup}}_{O(h)} = O(h)$$

RBDelete erhält die Rot-Schwarz-Eigenschaften.

Also gilt (siehe Lemma): $h \in O(\log n)$



Laufzeit RBDelete $\in O(\log n)$

Satz.

Rot-Schwarz-Bäume implementieren alle dynamische-Menge-Operationen in $O(\log n)$ Zeit, wobei n die momentane Anz. der Schlüssel ist.