

Kapitel 4.6: AVL-Bäume

*Algorithmen und Datenstrukturen
WS 2025/26*

Prof. Dr. Sándor Fekete

Prof. Michael Bender, Stony Brook University, New York



Technische
Universität
Braunschweig

Sándor Fekete — AuD-Vorlesung 17 — 06.01.2026

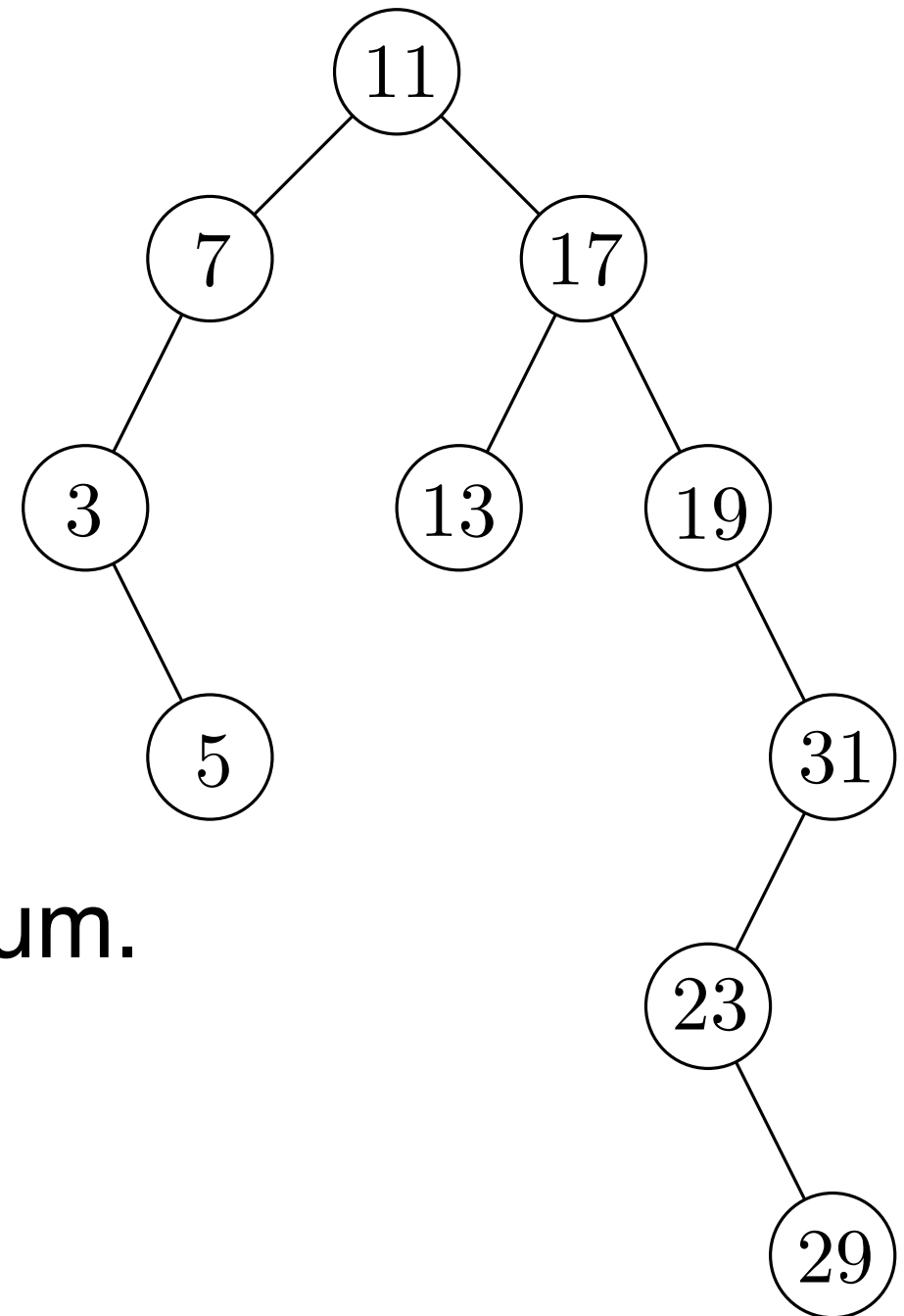
Agenda

- Binäre Suchbäume / AVL-Bäume
- 4.8 Rot-Schwarz-Bäume
- 4.9 B-Bäume
- 4.10 Heaps
- 4.11 Andere Strukturen

Binäre Bäume (Wiederholung)

Seien folgende Elemente gegeben:
11, 17, 13, 19, 7, 3, 31, 23, 5, 29.

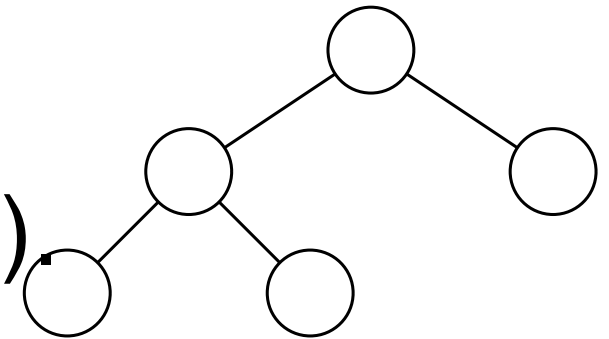
Das Einfügen dieser Elemente von
links nach rechts in einen binären
Suchbaum ergibt den folgenden Baum.



Binäre Bäume (Wiederholung)

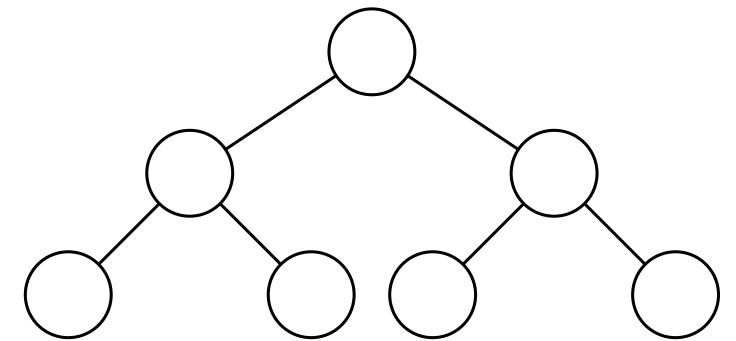
Voller binärer Baum:

- Jeder Knoten hat kein oder zwei Kind(er).



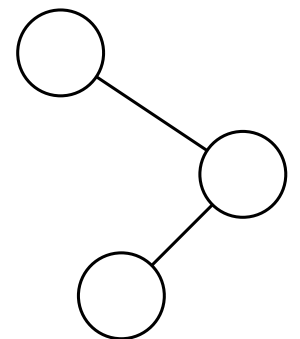
Vollständiger binärer Baum:

- Voller Baum und alle Blätter haben den gleichen Abstand zur Wurzel.

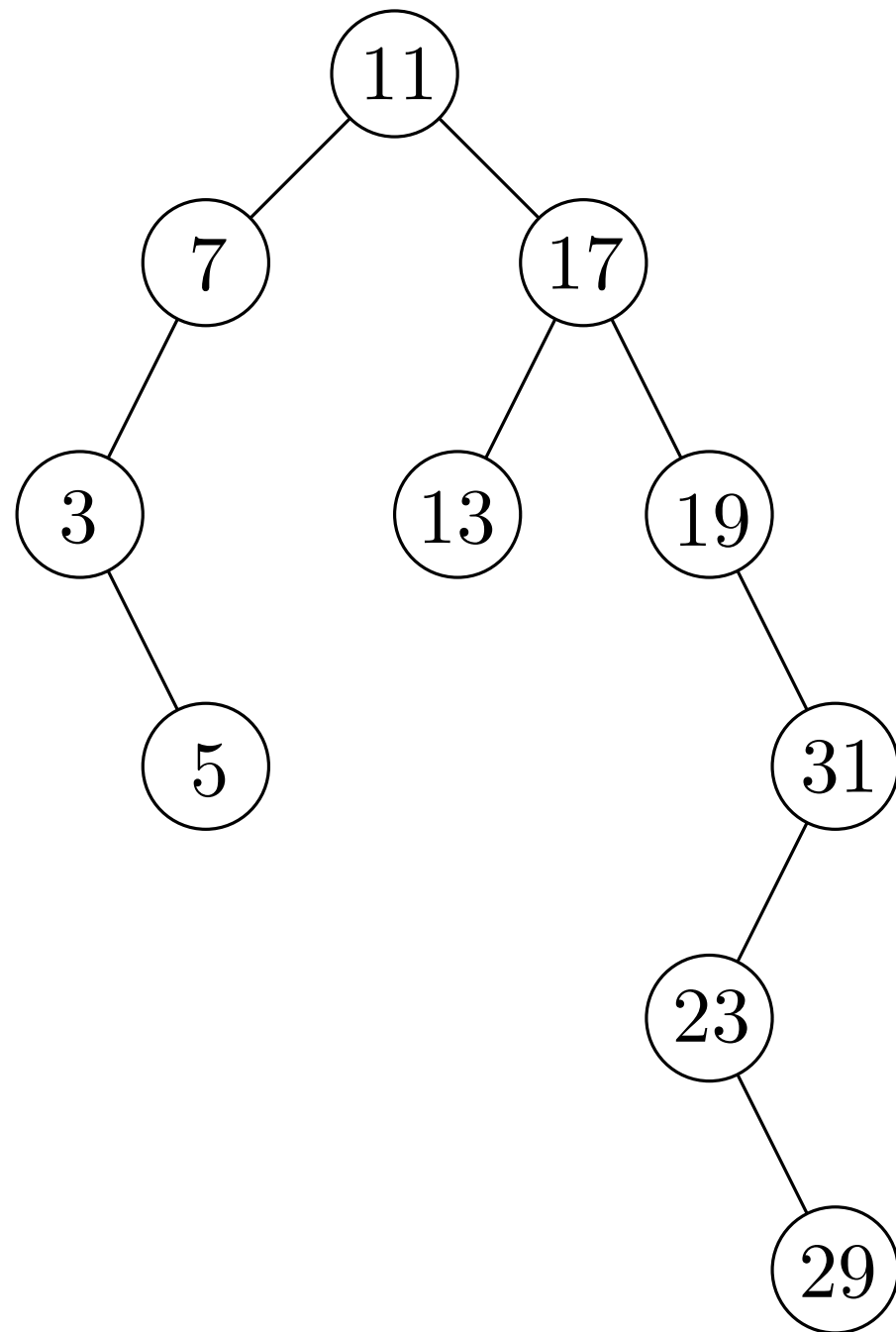


Degenerierter binärer Baum:

- Jeder Knoten hat maximal ein Kind.



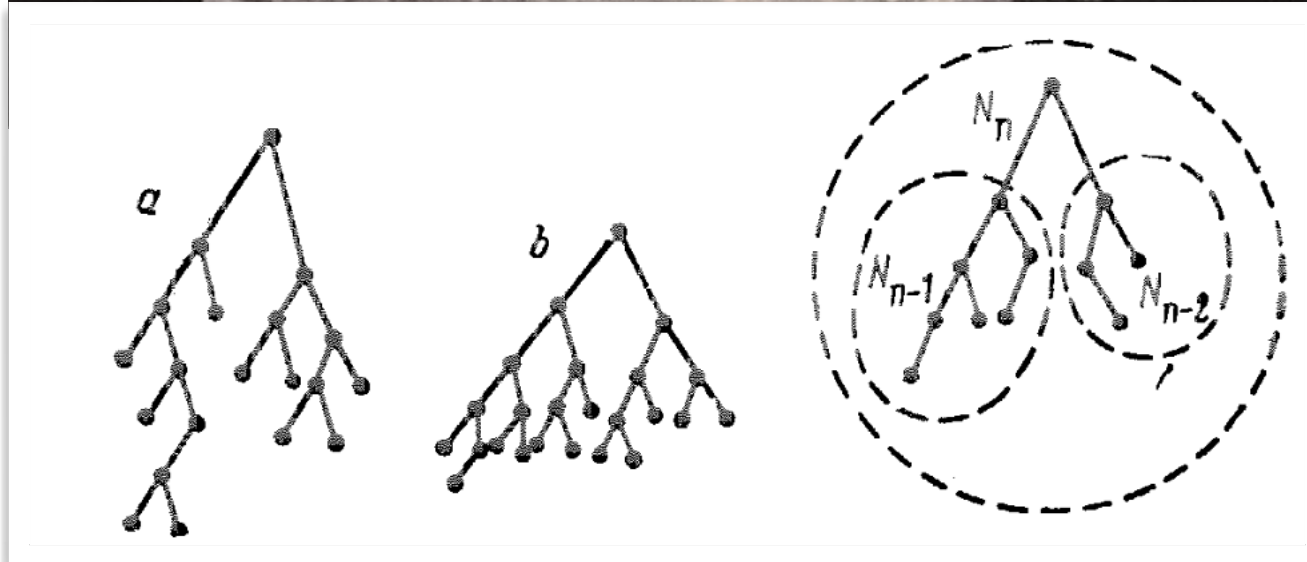
Binäre Bäume (Wiederholung)



- Suchen
 - Minimum
 - Maximum
 - Nachfolger
 - Vorgänger
 - Einfügen
 - Löschen
- Satz 4.4
- Satz 4.5
- Satz 4.6
- $O(h)$

AVL-Bäume (Wiederholung)

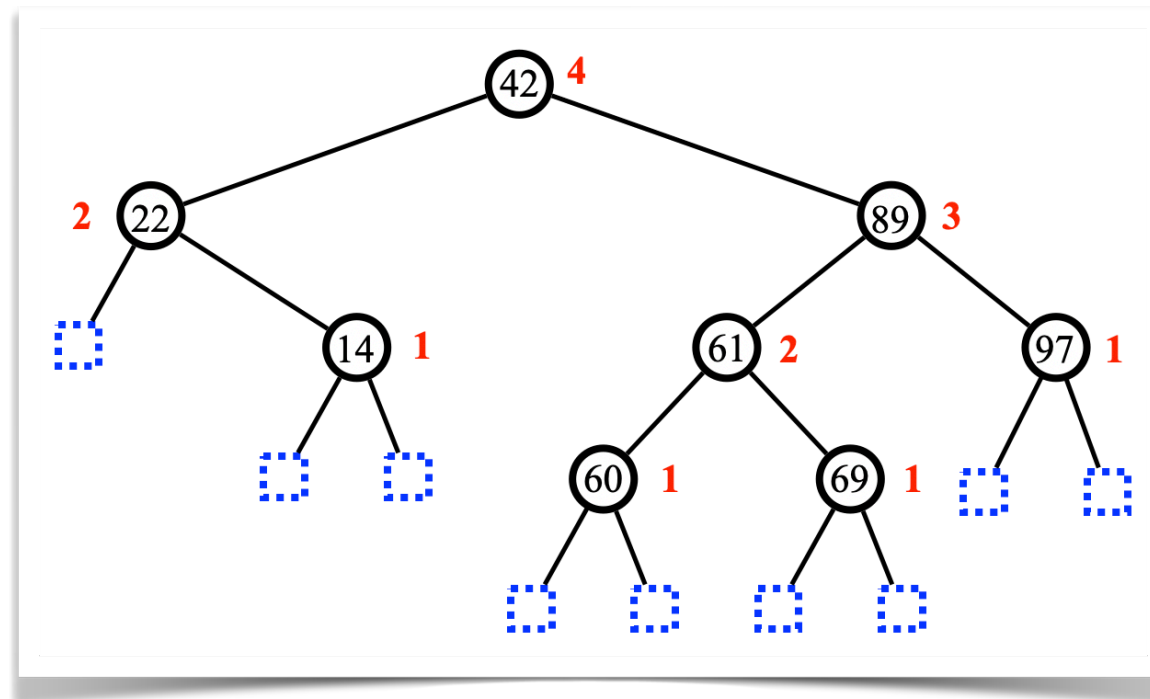
Definition 4.7 (Nach Adelson-Velski und Landis, 1962)



AVL-Bäume (Wiederholung)

Definition 4.7 (Nach Adelson-Velski und Landis, 1962)

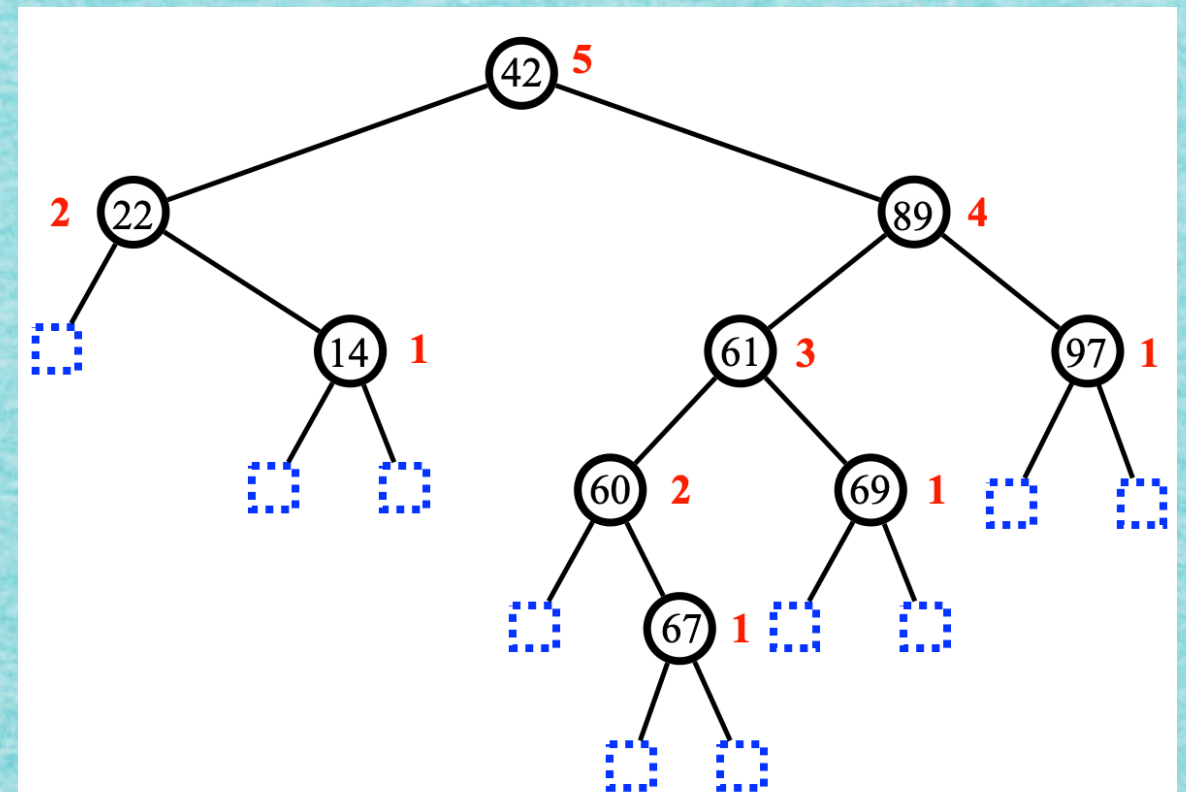
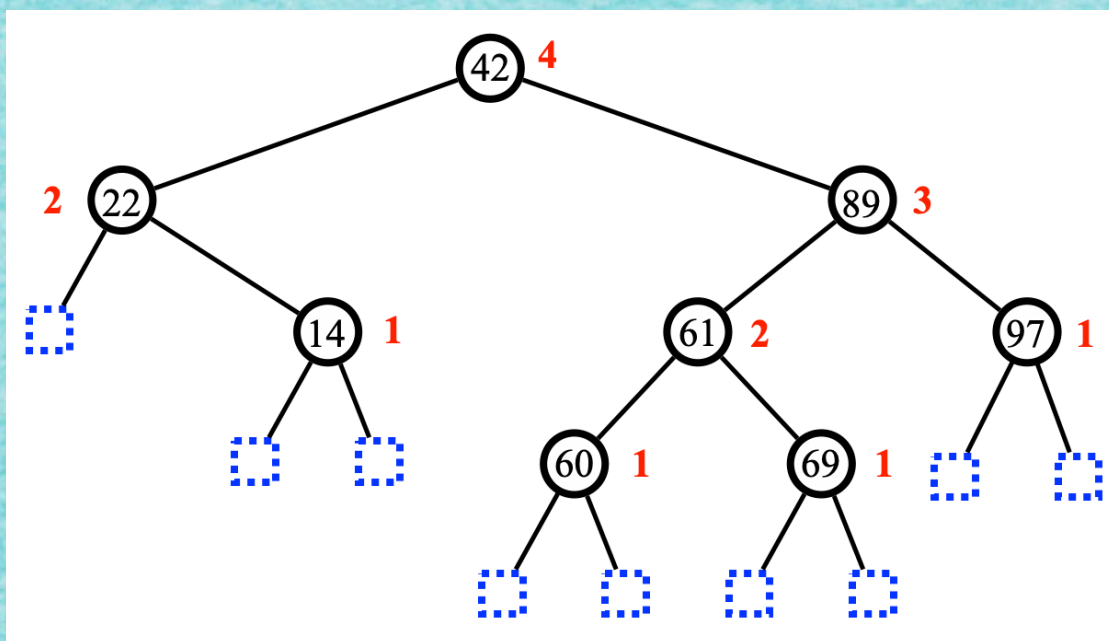
1. Ein binärer Suchbaum ist **höhenbalanciert**, wenn sich für jeden inneren Knoten v die Höhe der beiden Kinder von v um höchstens 1 unterscheidet.
2. Ein höhenbalancierter Suchbaum heißt auch AVL-Baum.



Einfügen („INSERT“)

Aufgabe:

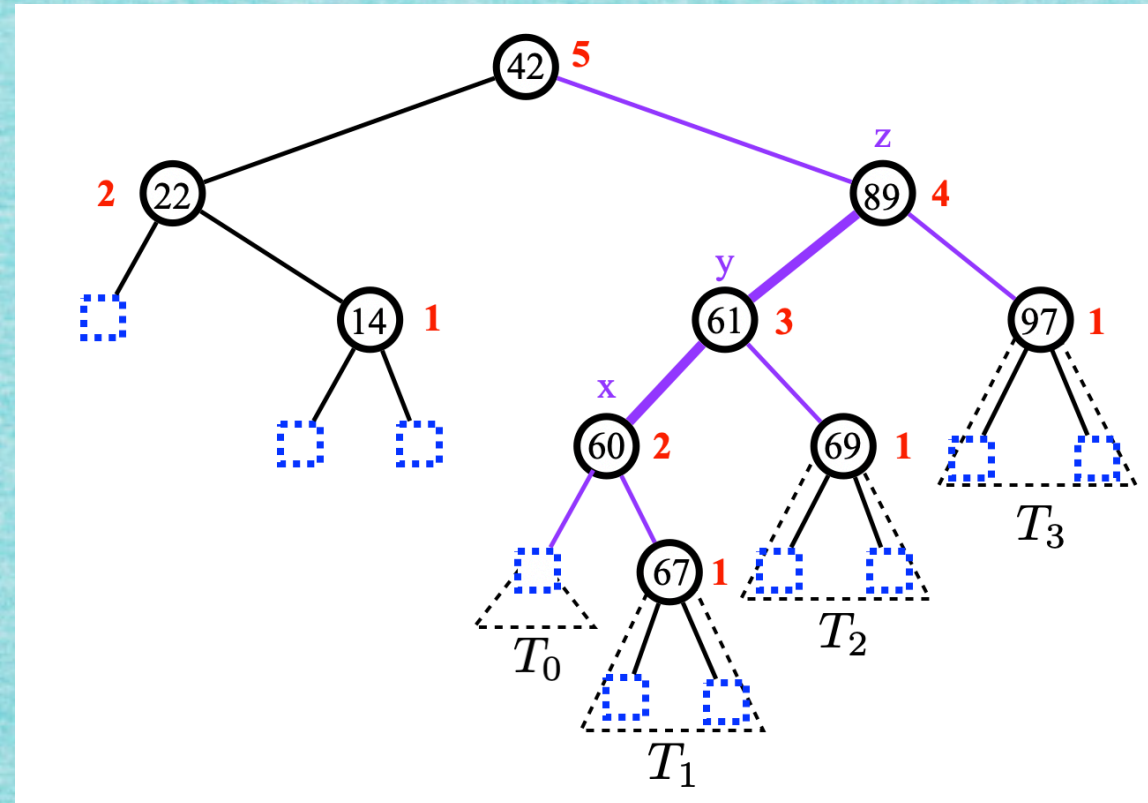
- *Füge 67 ein!*



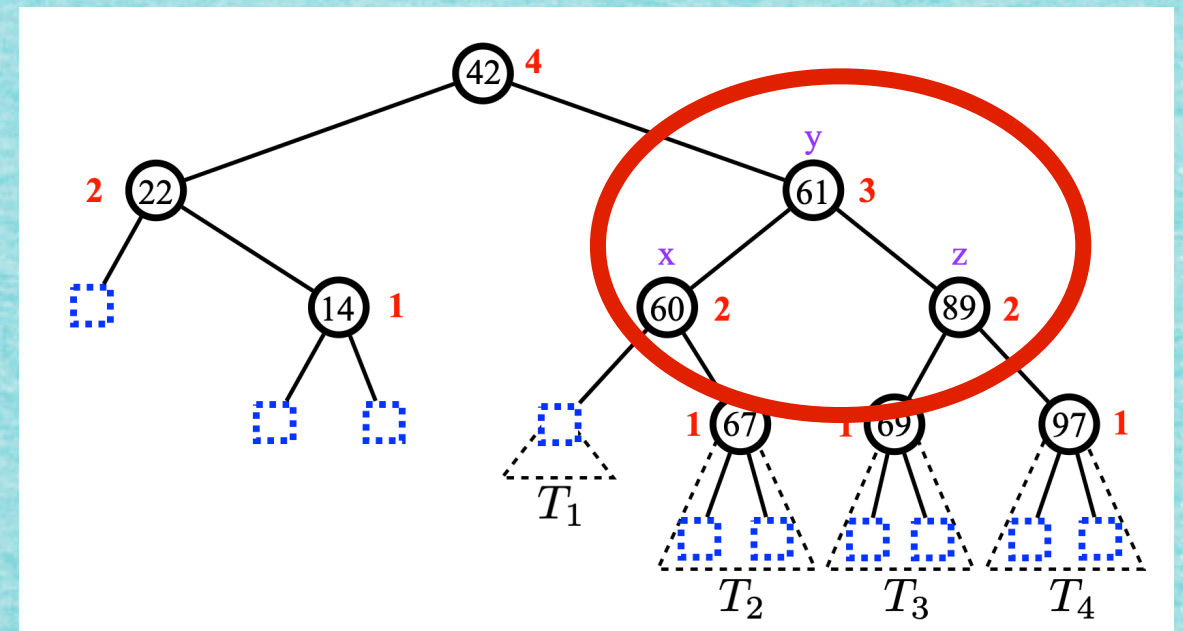
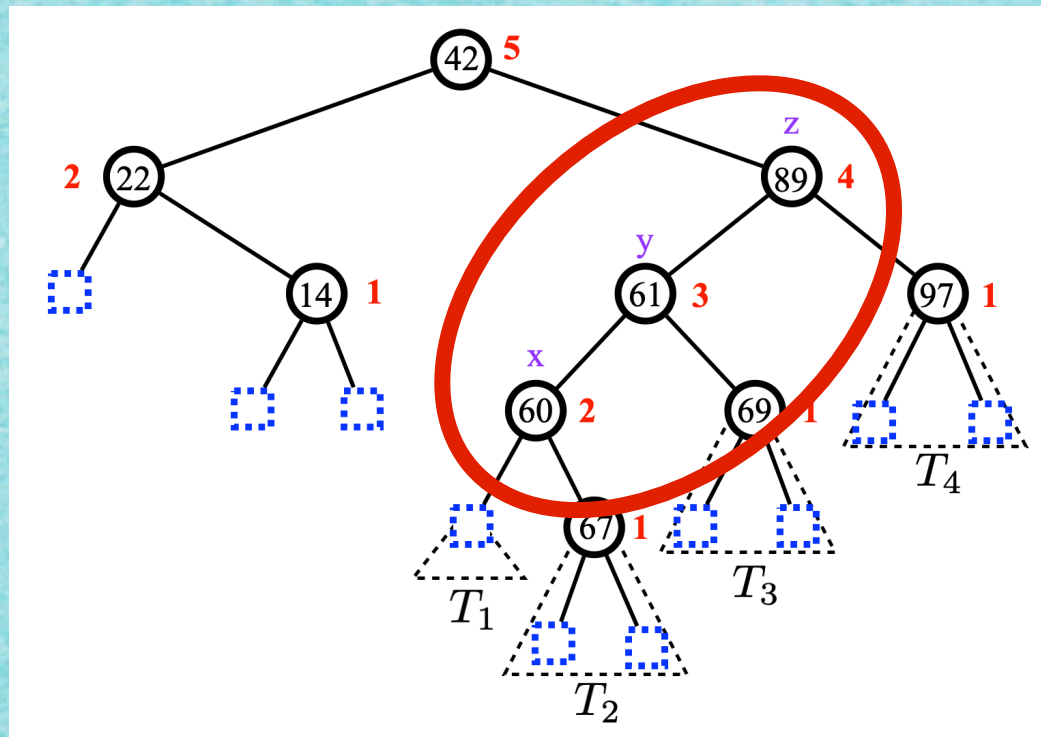
Einfügen

Idee:

- *Höhenbalanciertheit ändert sich beim Einfügen einzelner Elemente nur wenig - und lokal!*



Einfügen



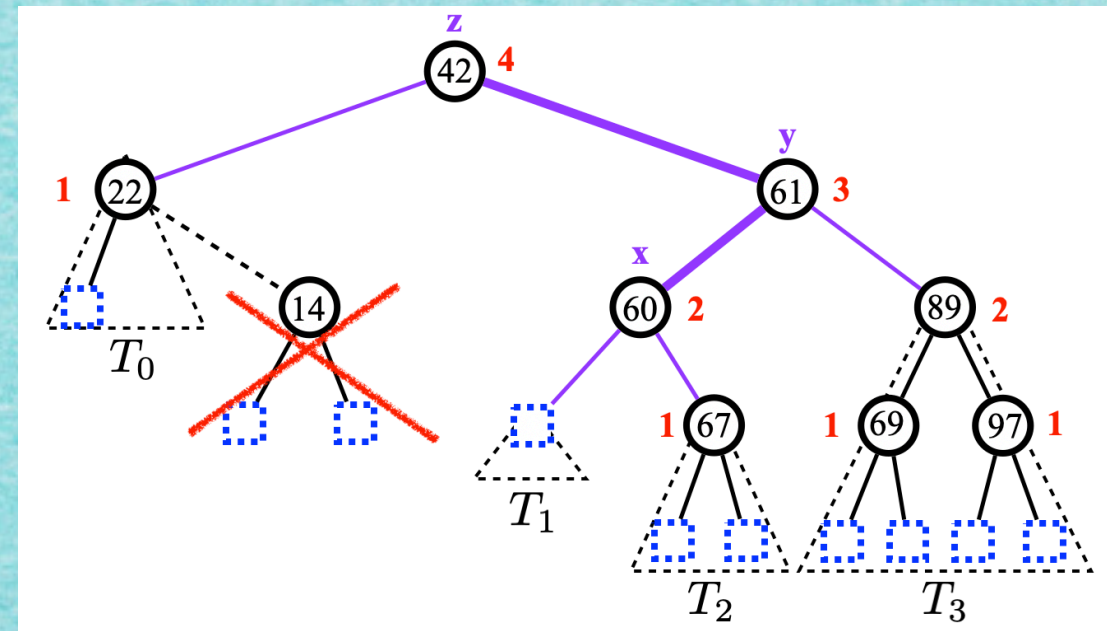
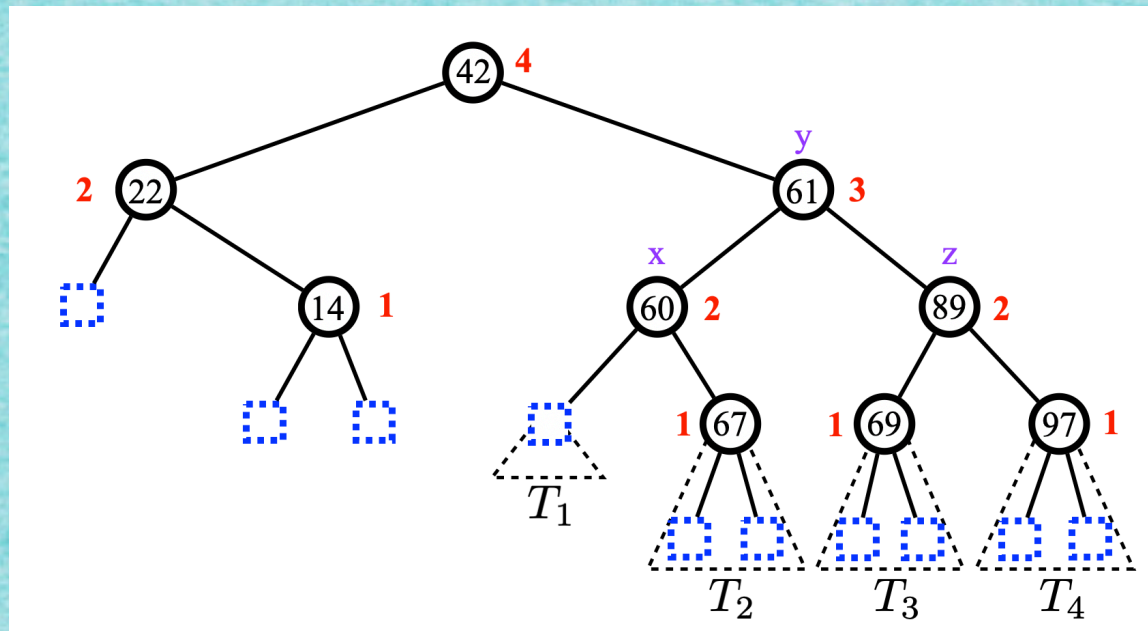
Neuer Baum!

- *Höhenbalanciert*
- *Nur lokale Umsetzung der Knoten 60, 61, 89*
- *Vorher drei Knoten untereinander, jetzt der mittlere über zwei anderen.*
- „Rotation“

Löschen („DELETE“)

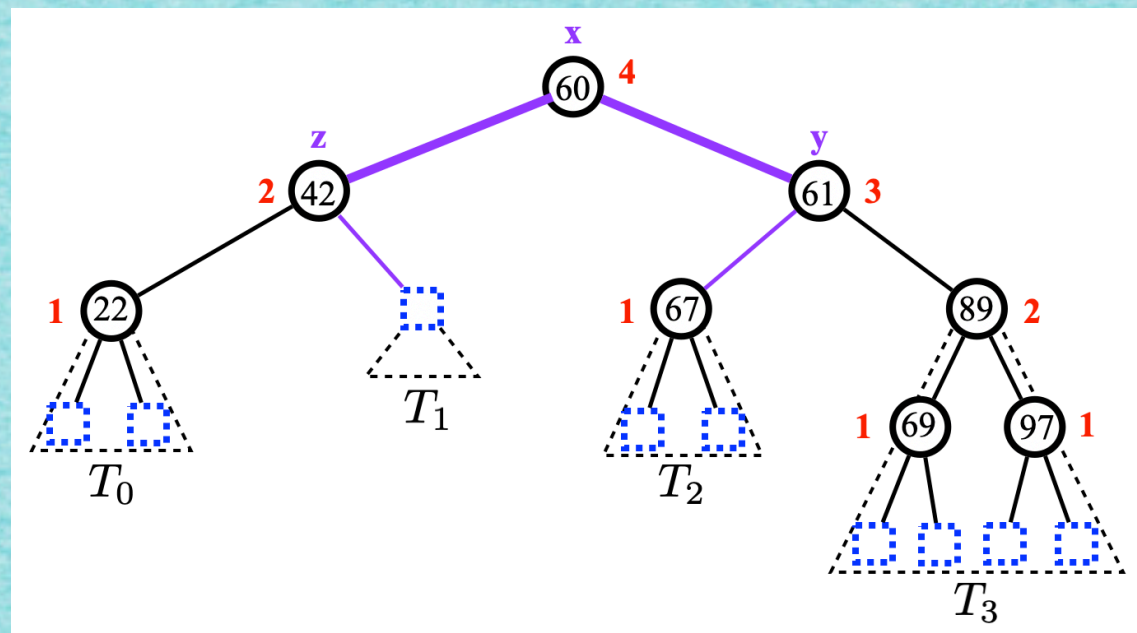
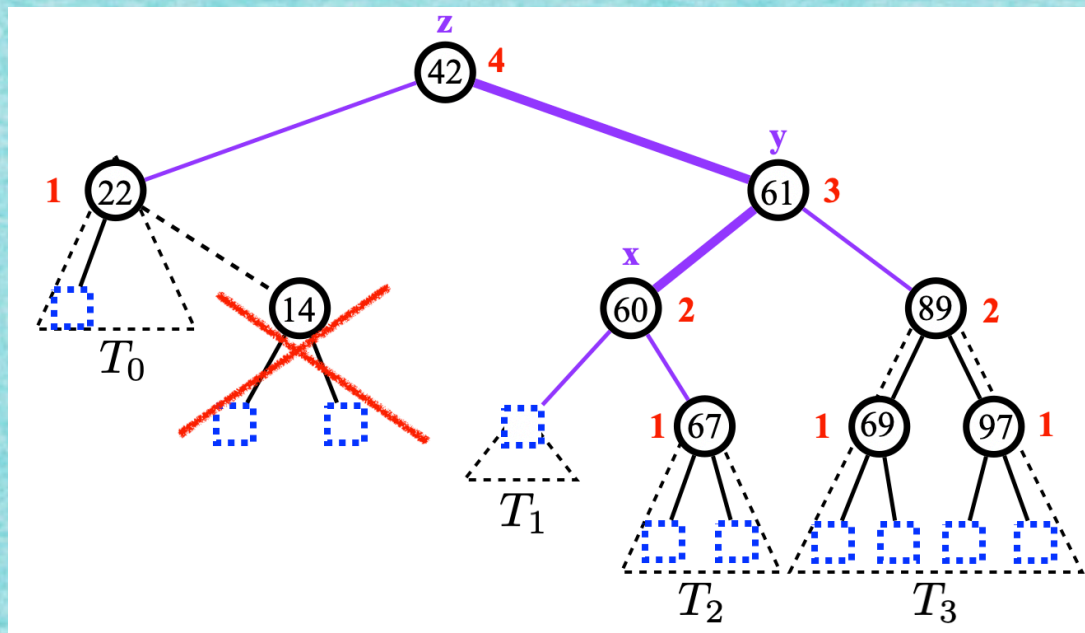
Aufgabe:

- *Lösche 14!*



Wieder:

- ***Verwende RESTRUCTURE!***



Das reicht in diesem Beispiel!

***Allerdings kann im allgemeinen ein neues Problem auftauchen:
Der neu höhenbalancierte Teilbaum von b kann niedriger sein als
der vorher von z. Dadurch wird eventuell der Vater von z
unbalanciert!***

Löschen

Satz 4.11

Satz 4.11

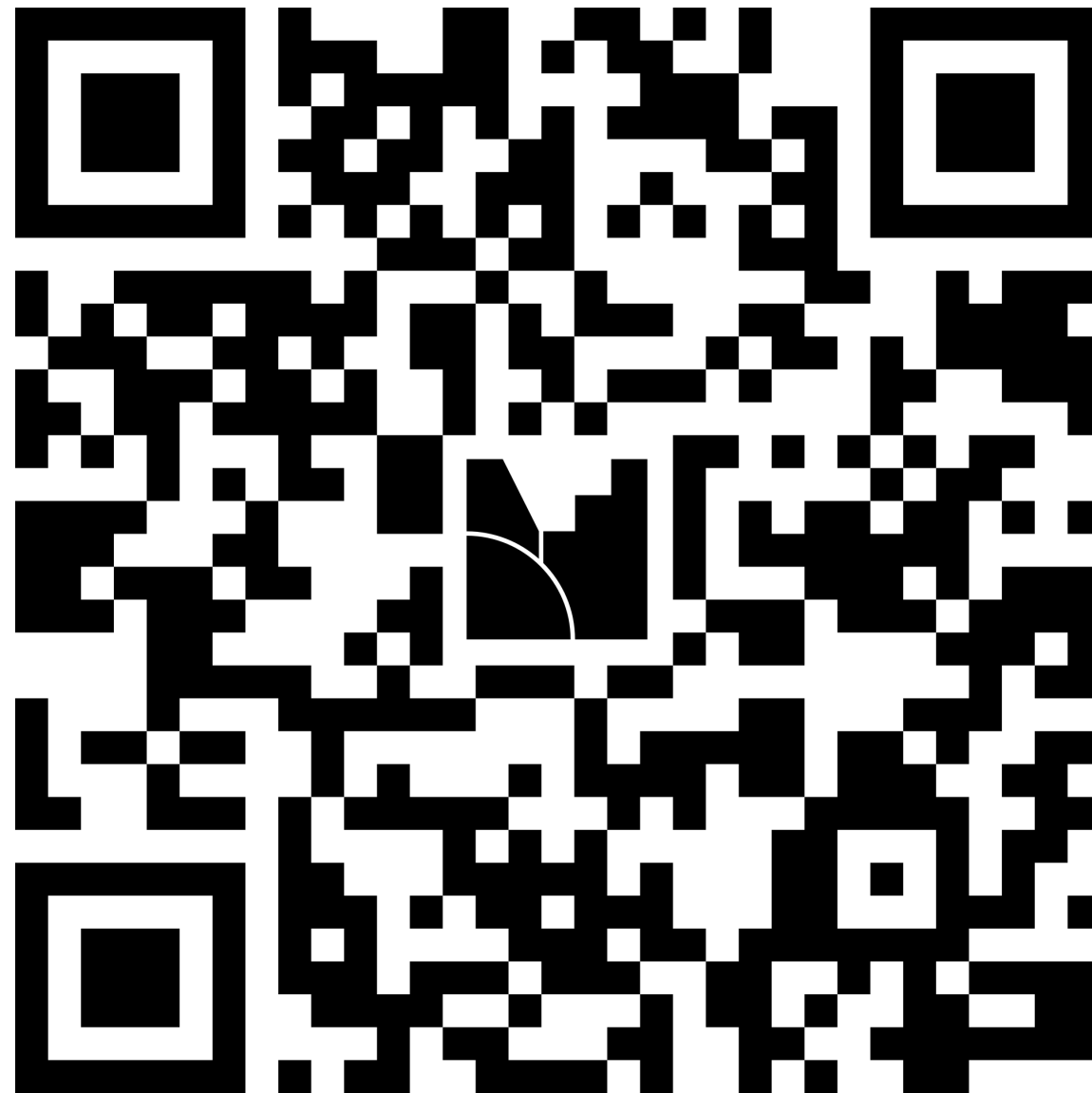
Mithilfe von RESTRUCTURE kann man einen AVL-Baum auch nach einer Lösch-Operation höhenbalanciert halten.

Satz 4.11

*Mithilfe von RESTRUCTURE kann man einen AVL-Baum auch nach einer Lösch-Operation höhenbalanciert halten.
Die Zeit dafür ist $O(\log n)$.*

QUIZ!





BÄLÄNCE TREE

1/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

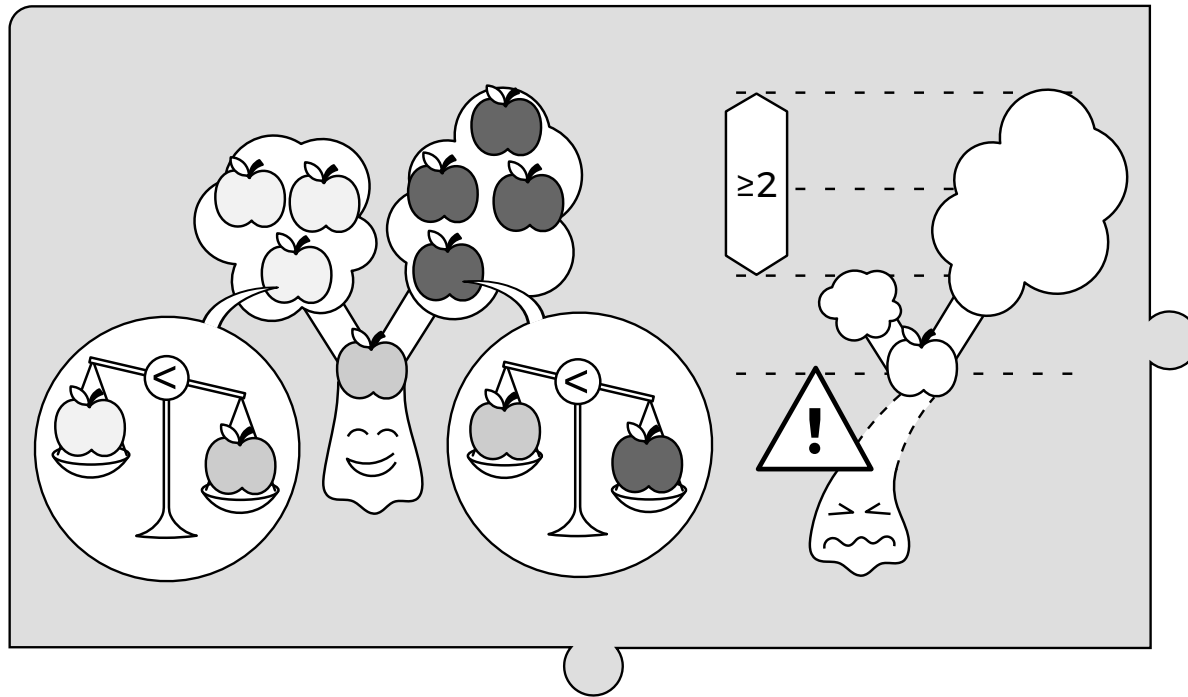
IDEA

BÄLÄNCE TREE

1/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

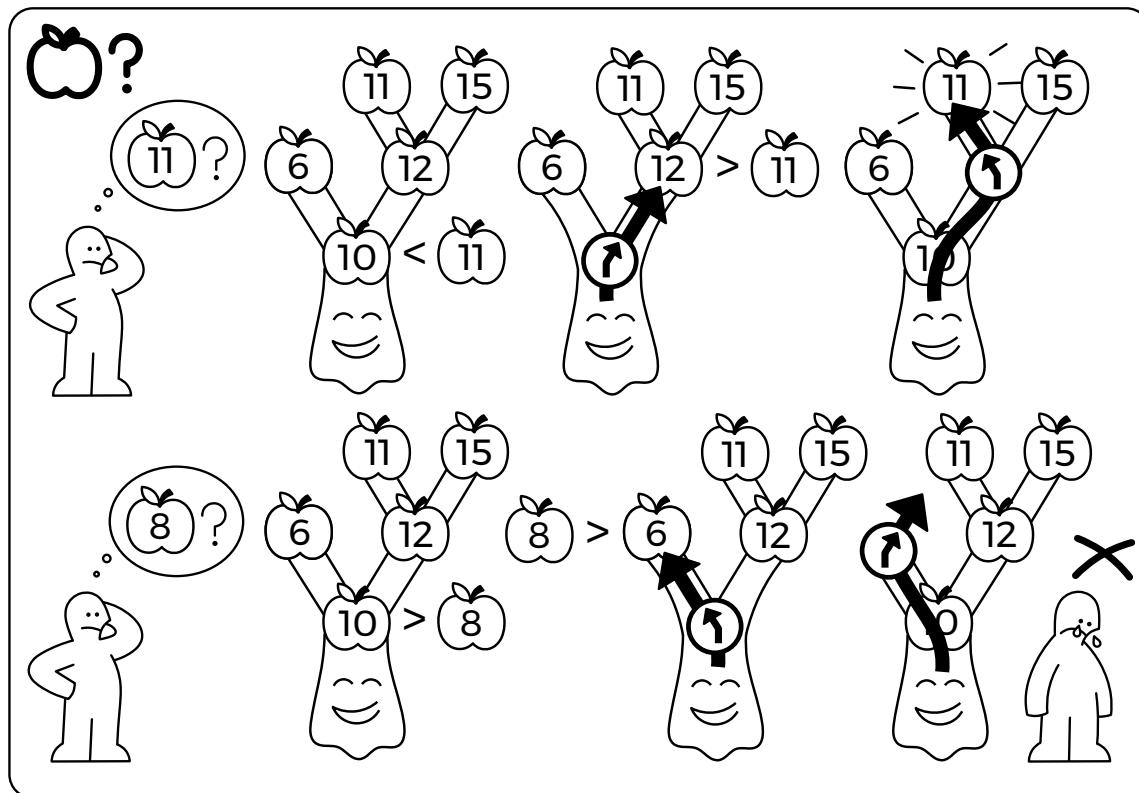
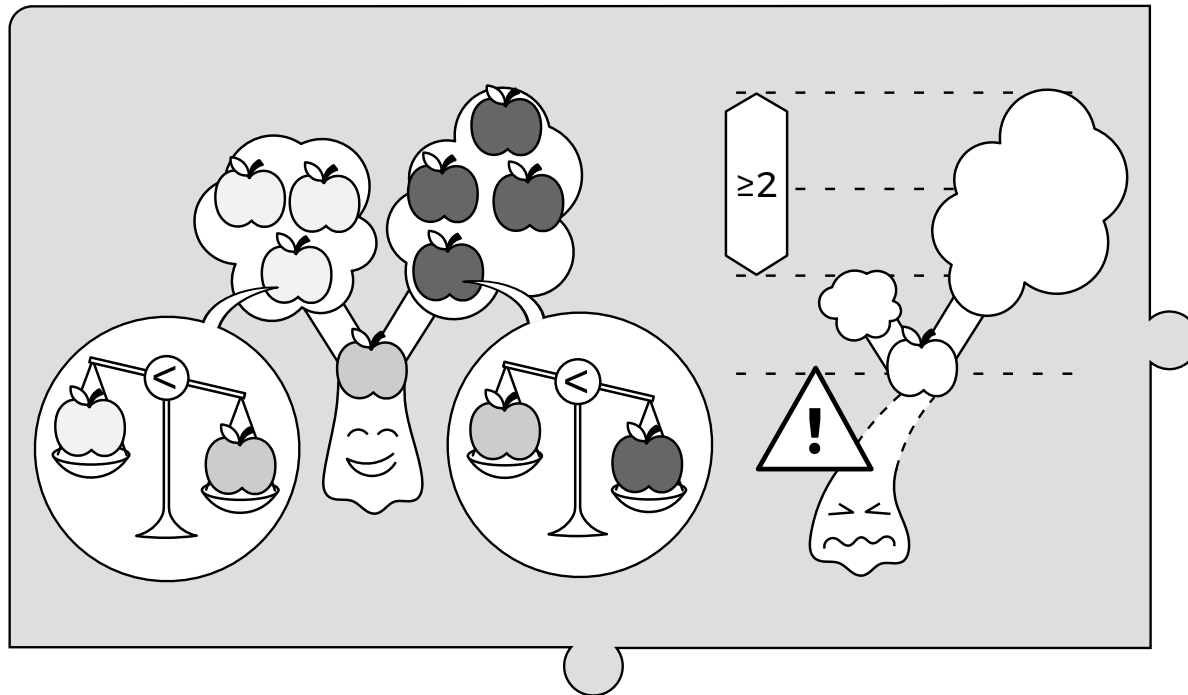


BÄLÄNCE TREE

1/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

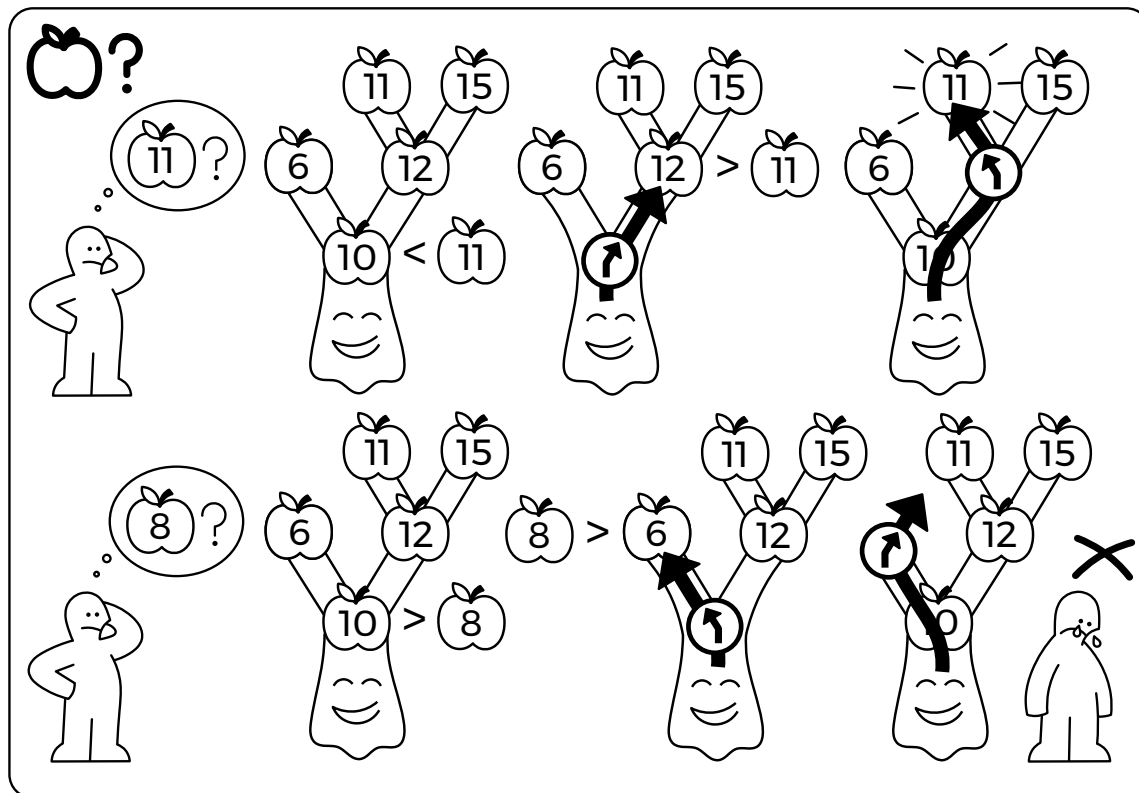
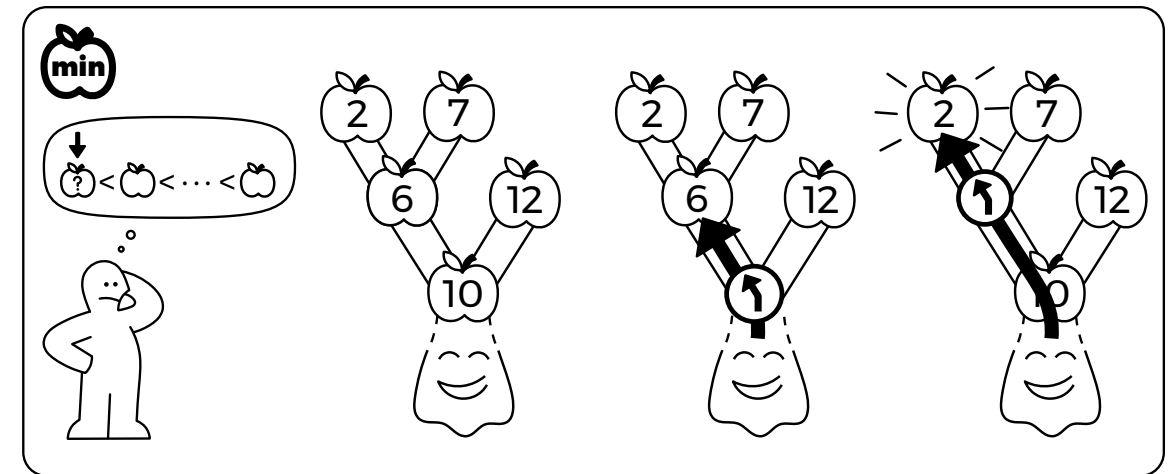
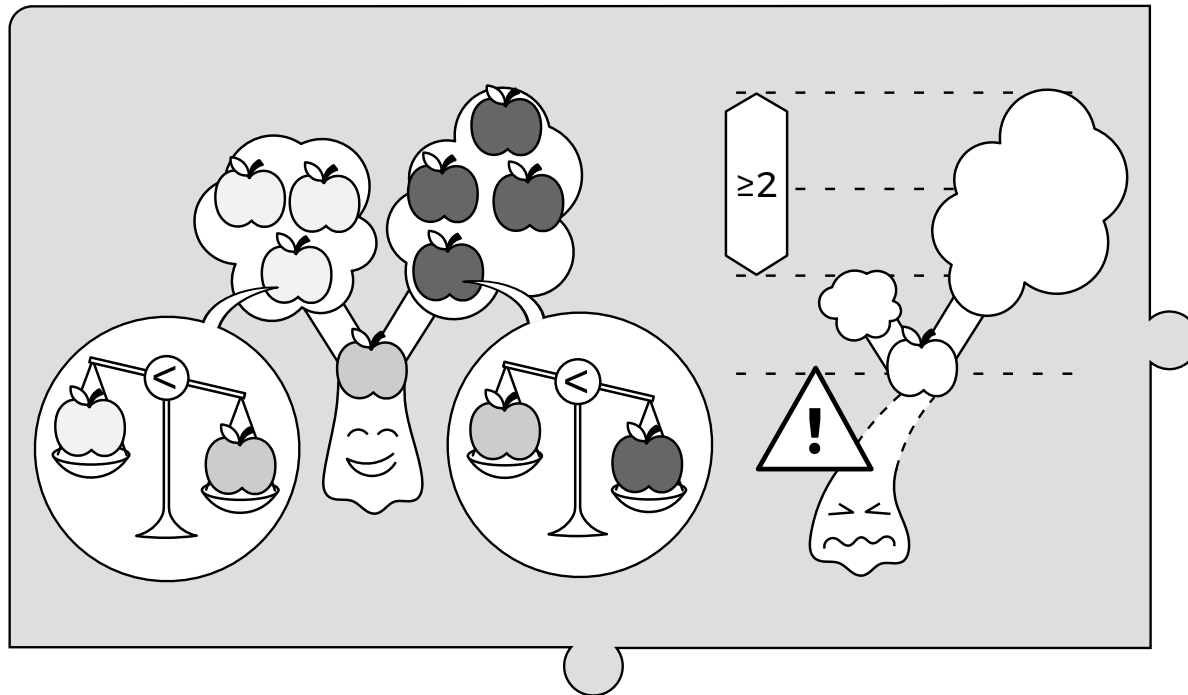


BÄLÄNCE TREE

1/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

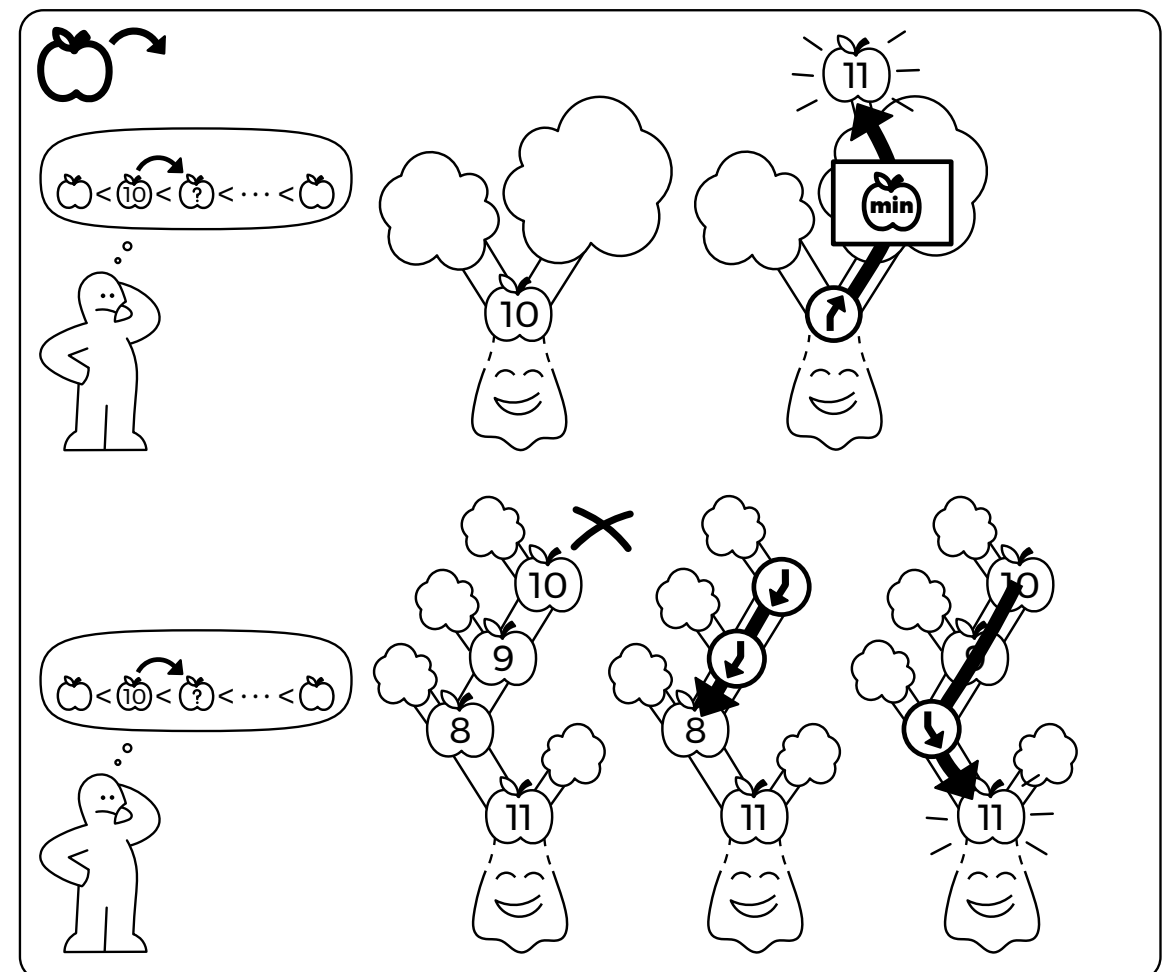
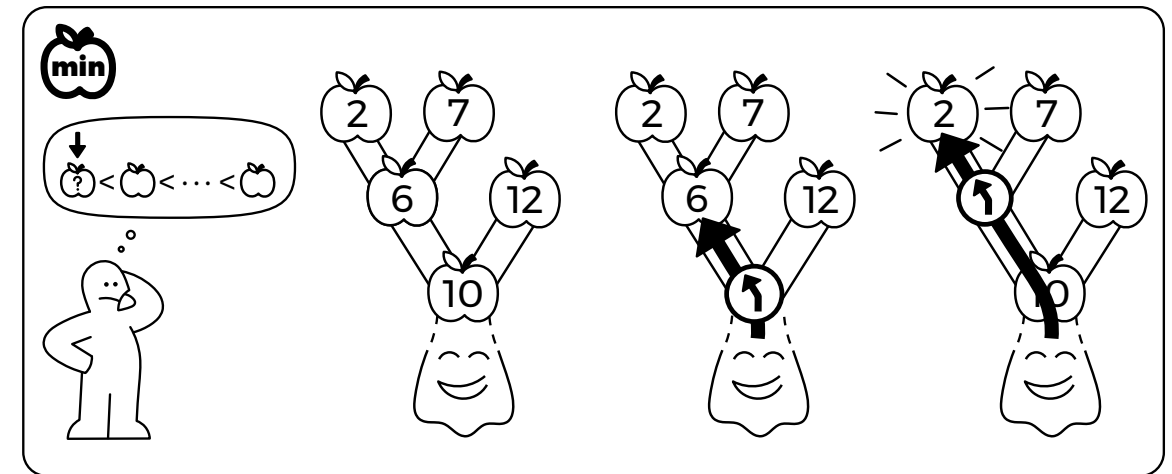
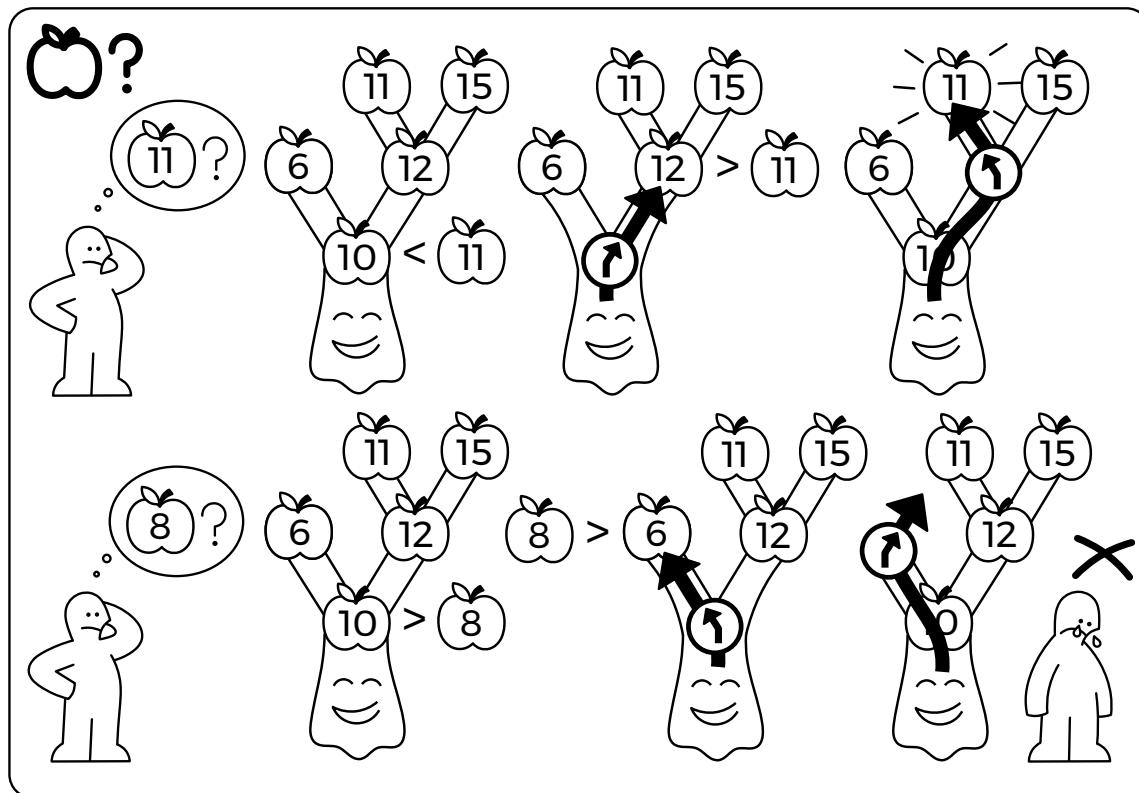
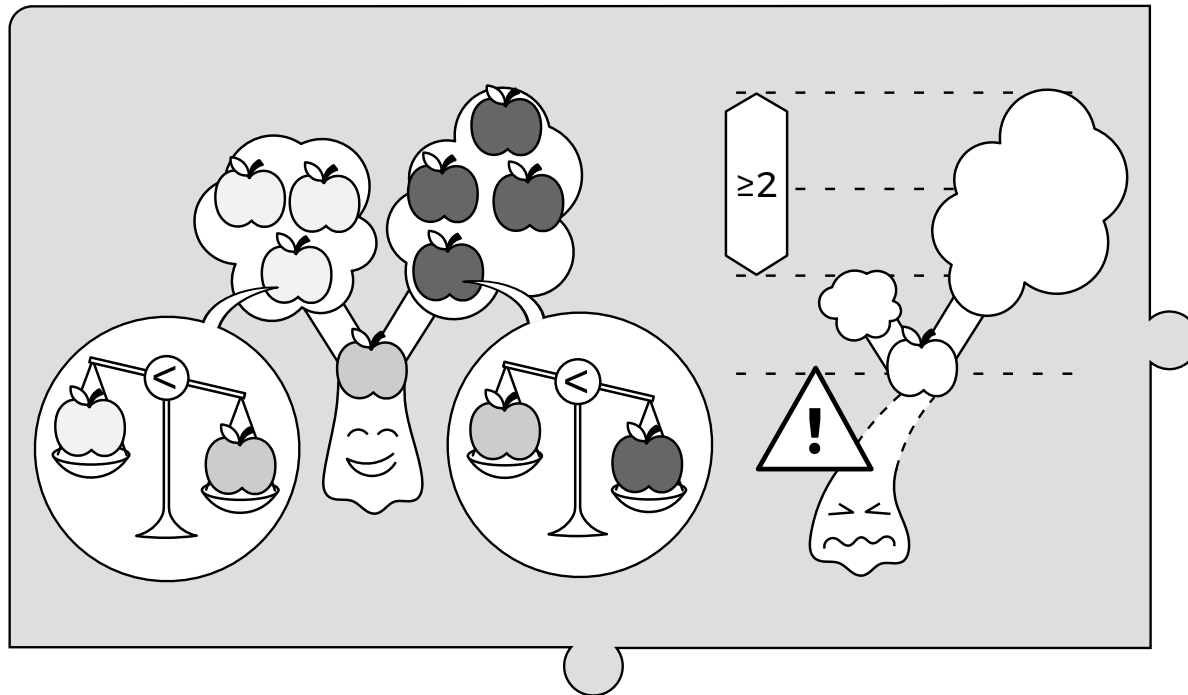


BÄLÄNCE TREE

1/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA



BÄLÄNCE TREE

2/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

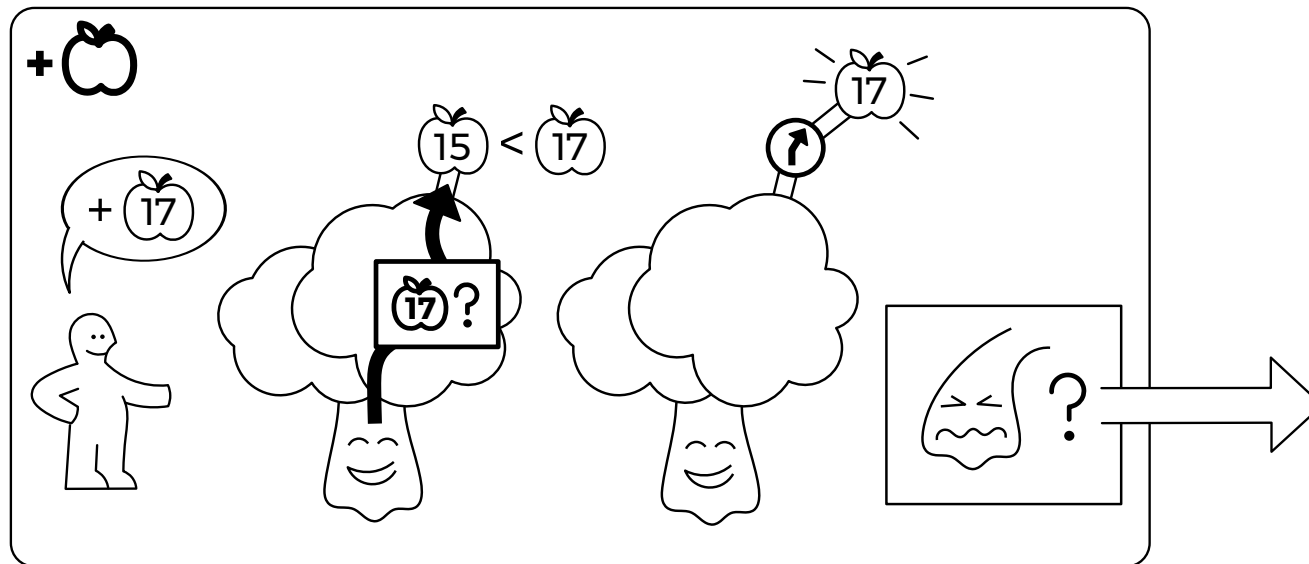
IDEA

BÄLÄNCE TREE

2/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

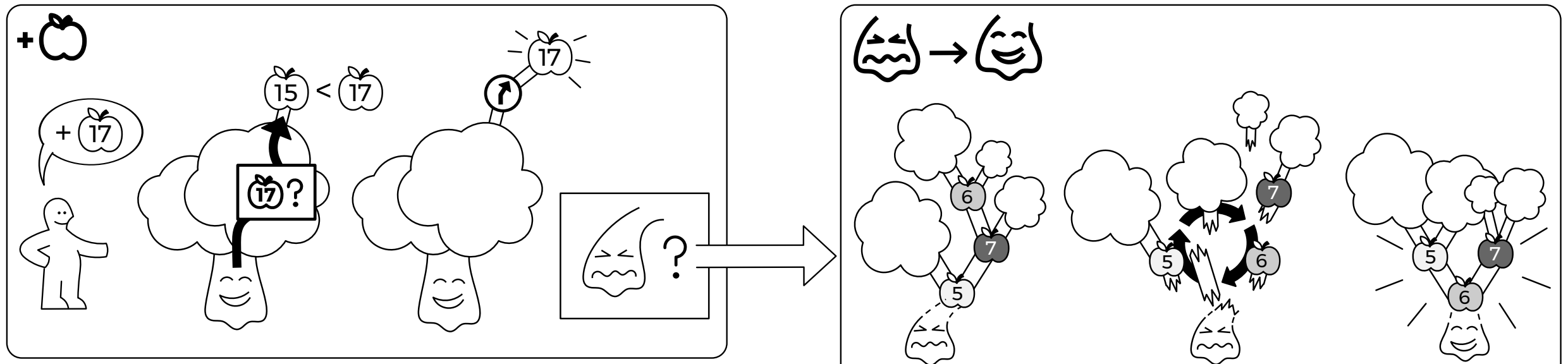


BÄLÄNCE TREE

2/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

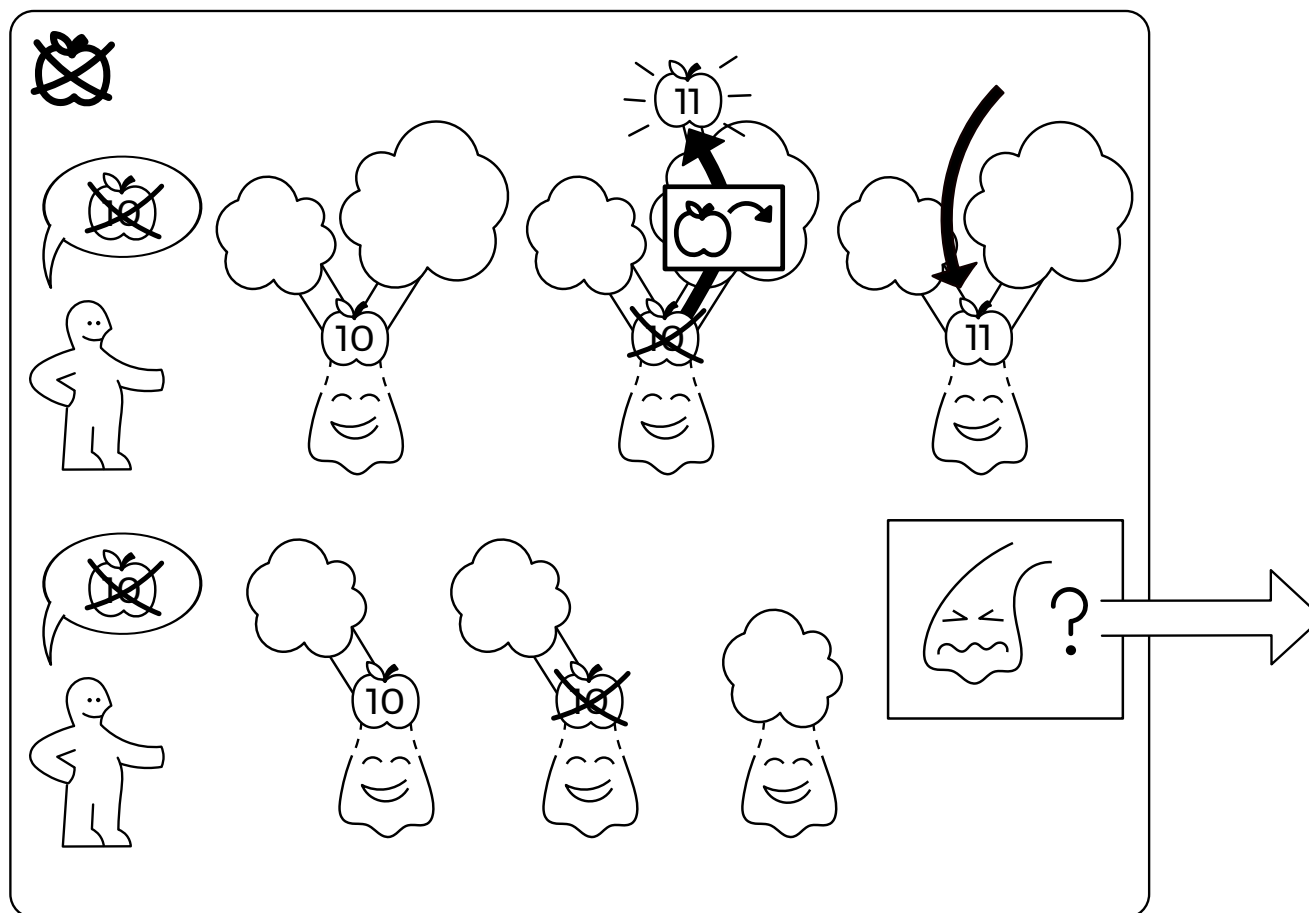
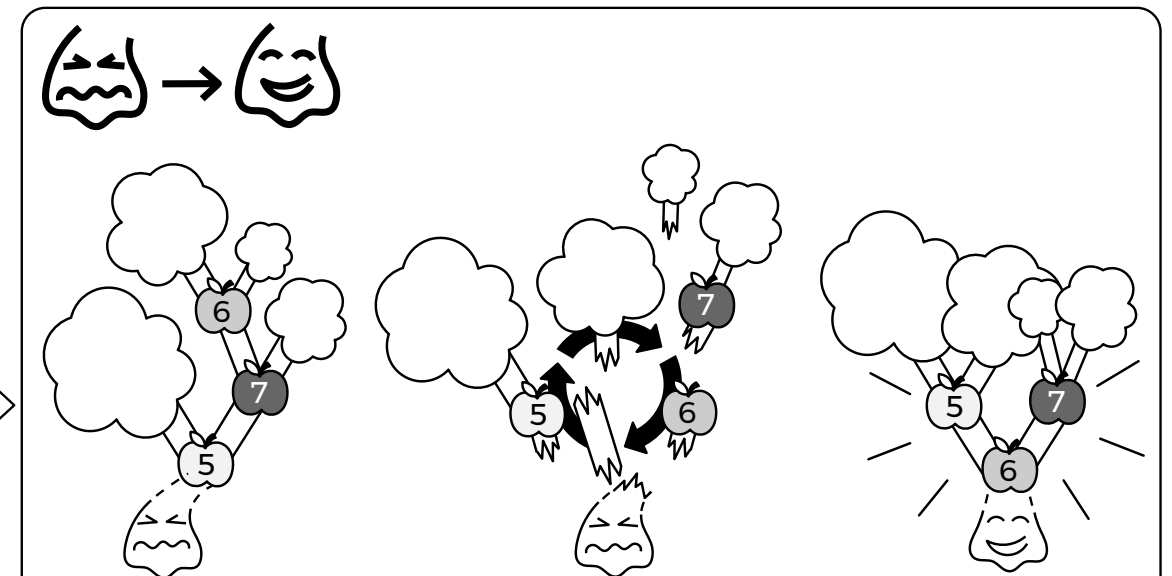
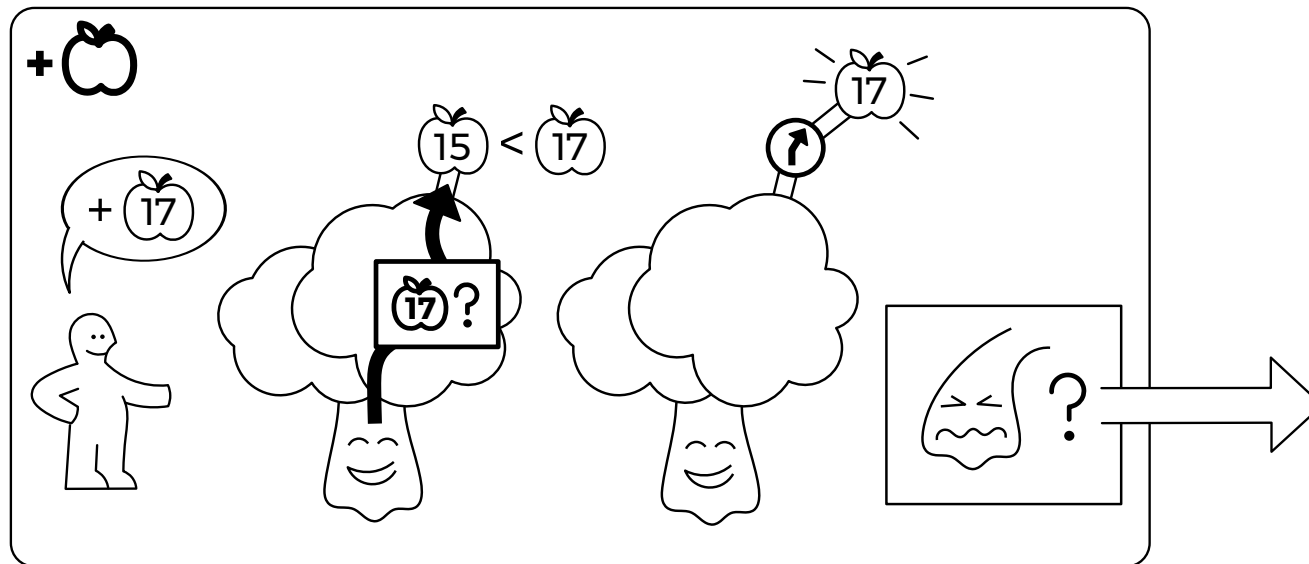


BÄLÄNCE TREE

2/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA

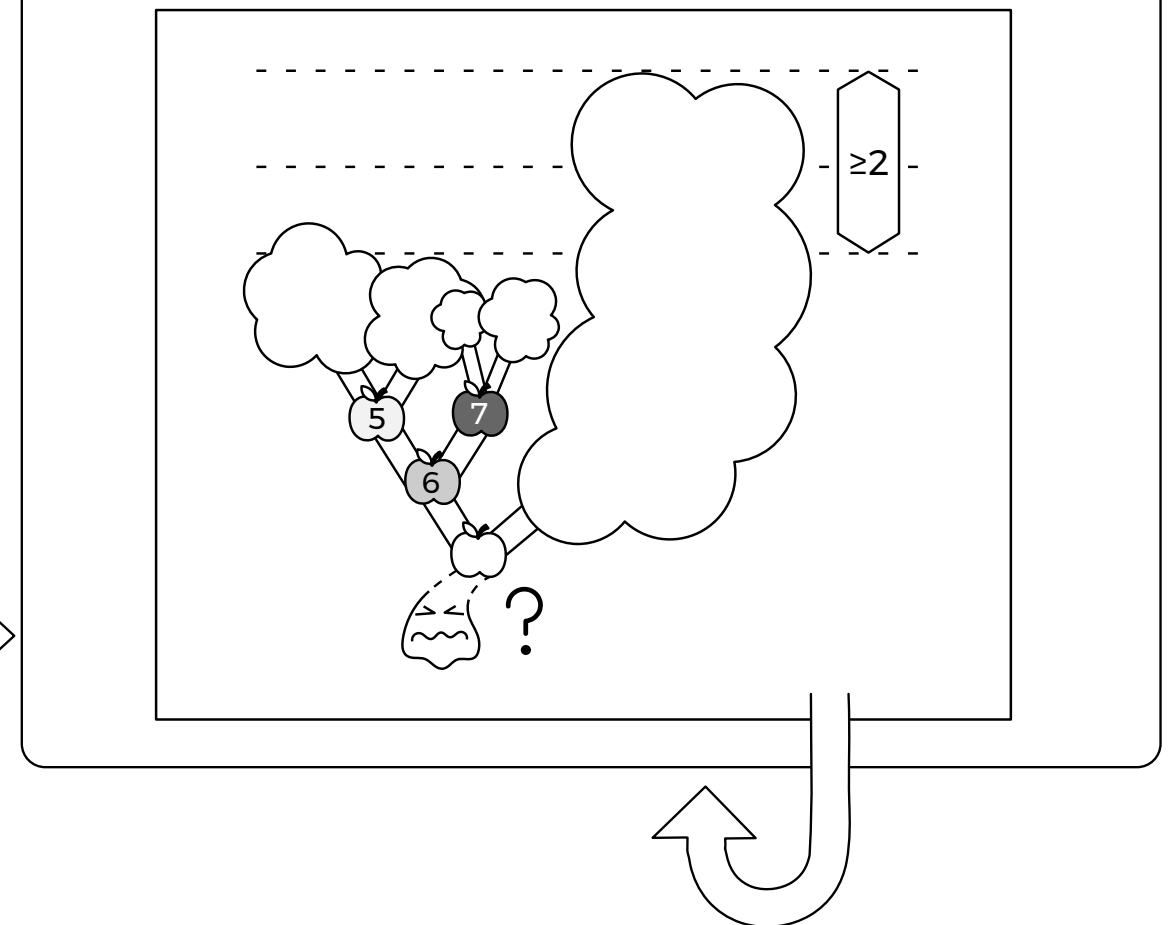
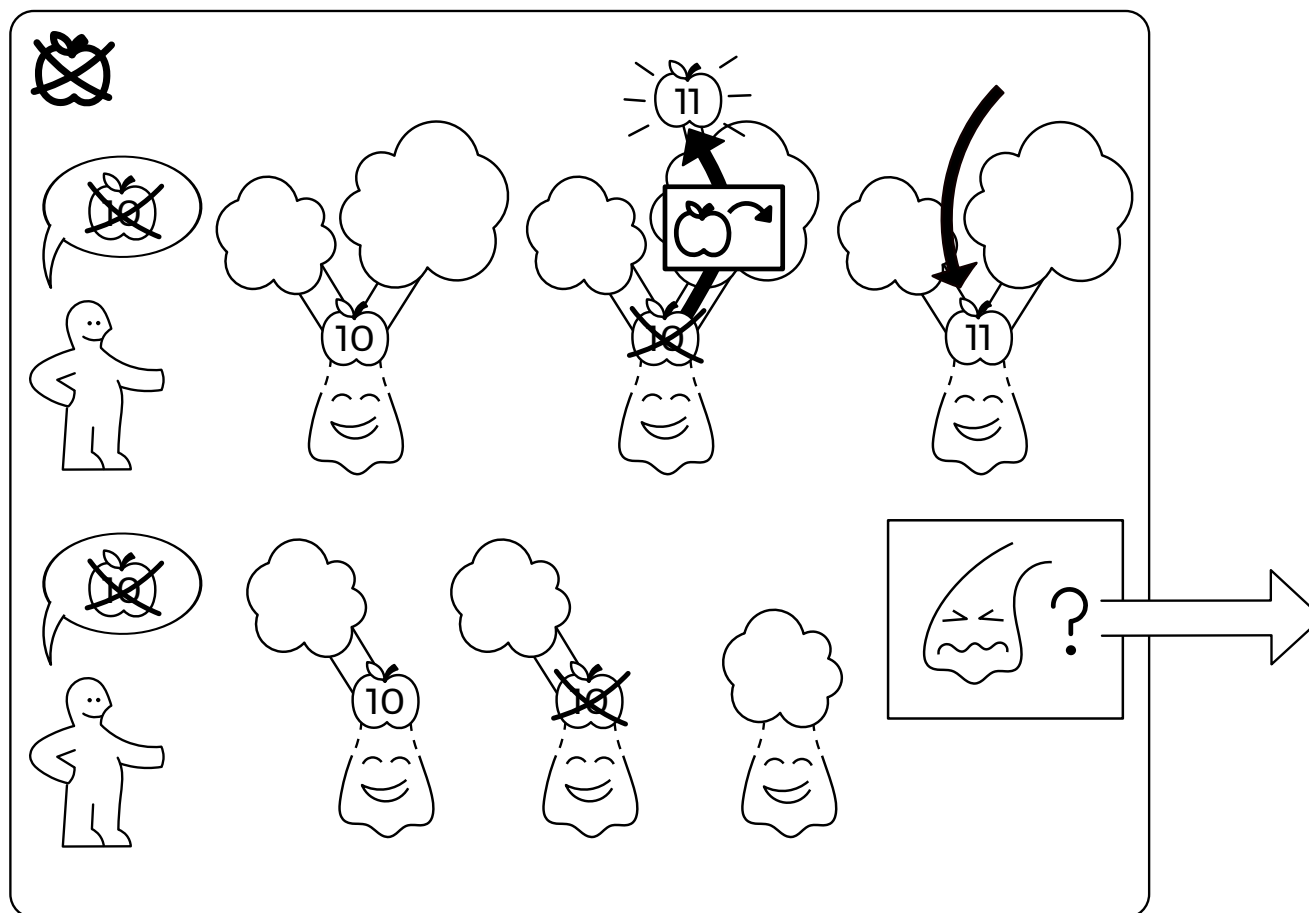
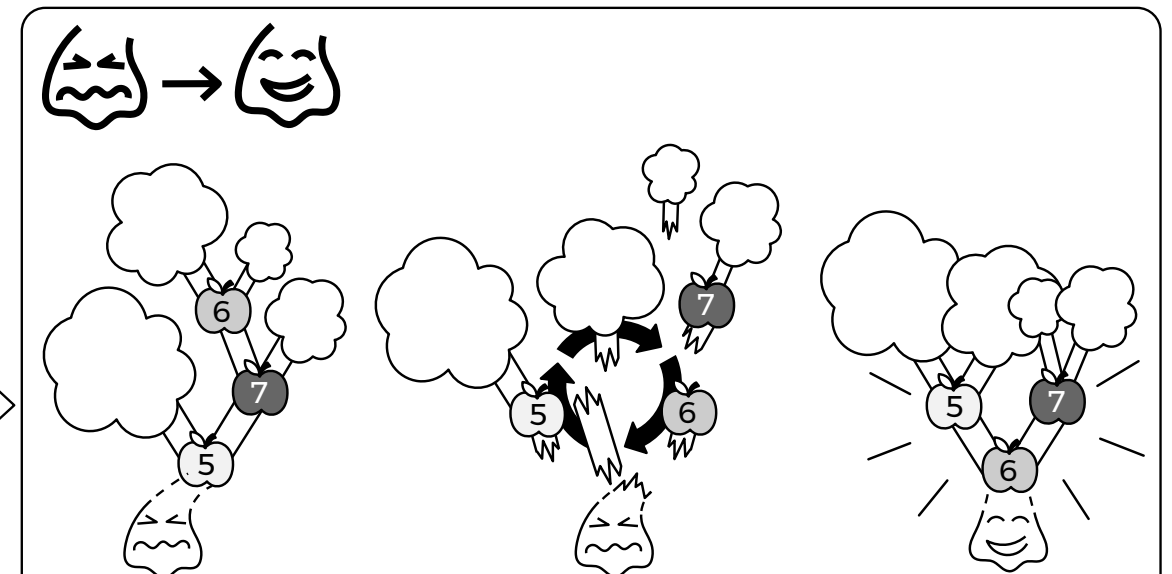
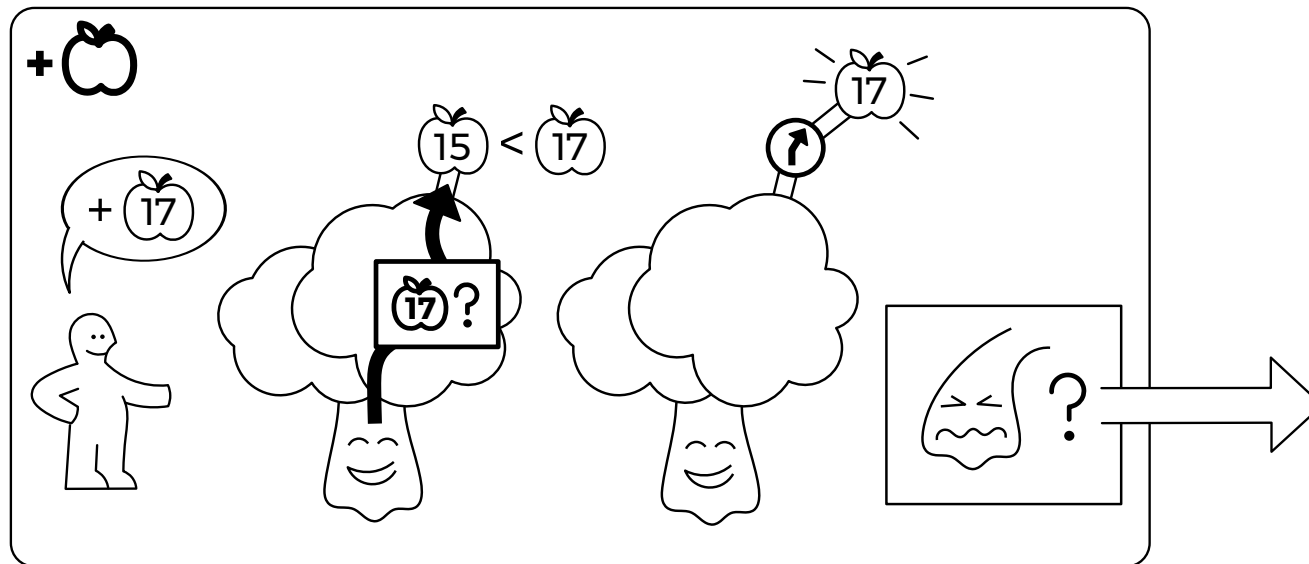


BÄLÄNCE TREE

2/2

idea-instructions.com/avl-tree/
v1.0, CC by-nc-sa 4.0

IDEA





Kapitel 4.8 - 4.11

Andere dynamische Datenstrukturen

Algorithmen und Datenstrukturen
Wintersemester 2025/26

Sándor Fekete, Ramin Kosfeld, Chek-Manh Loi

4.8 Rot-Schwarz-Bäume

4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)



4.8 Rot-Schwarz-Bäume

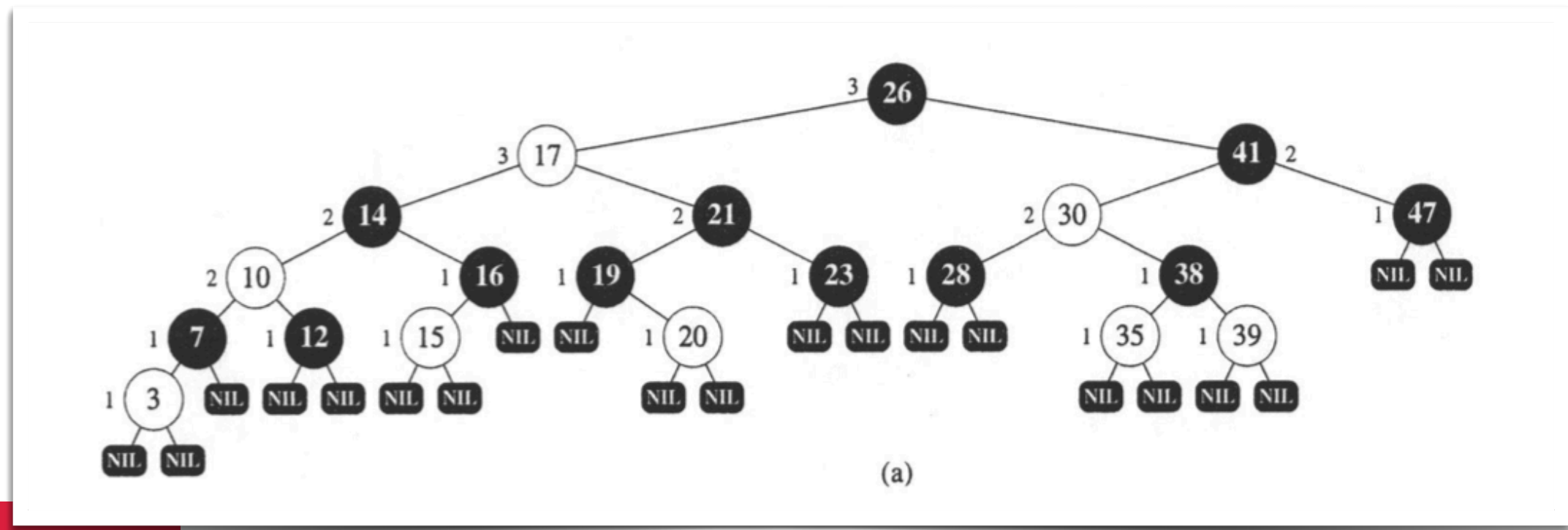
Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

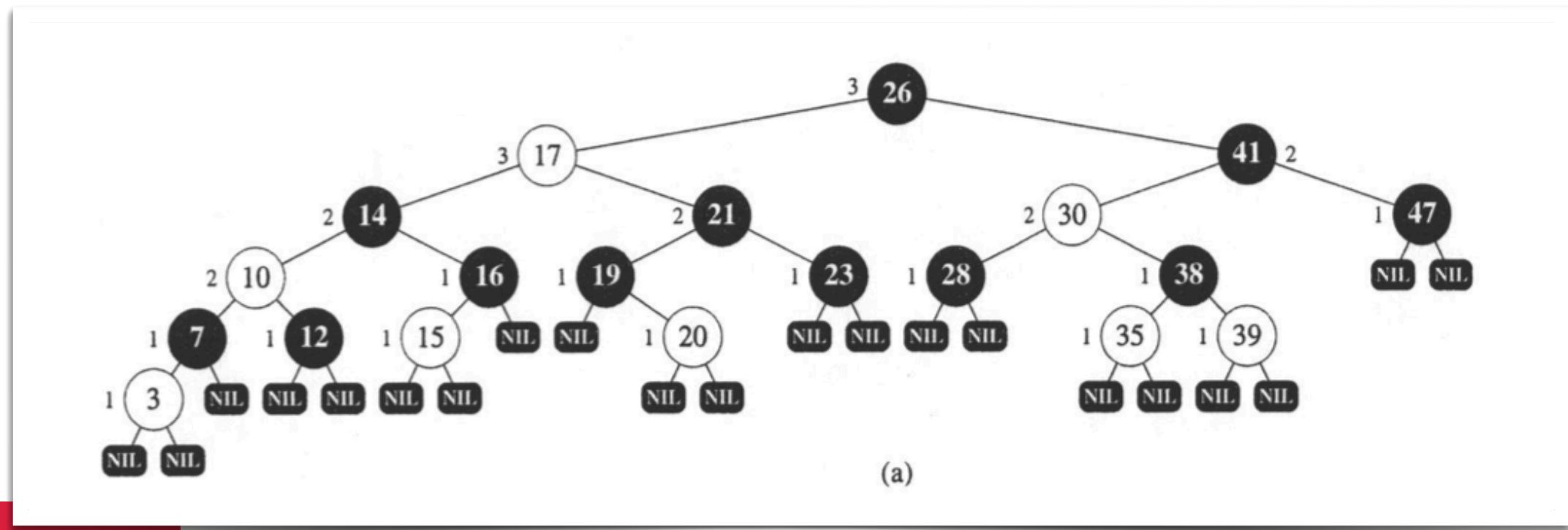


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.

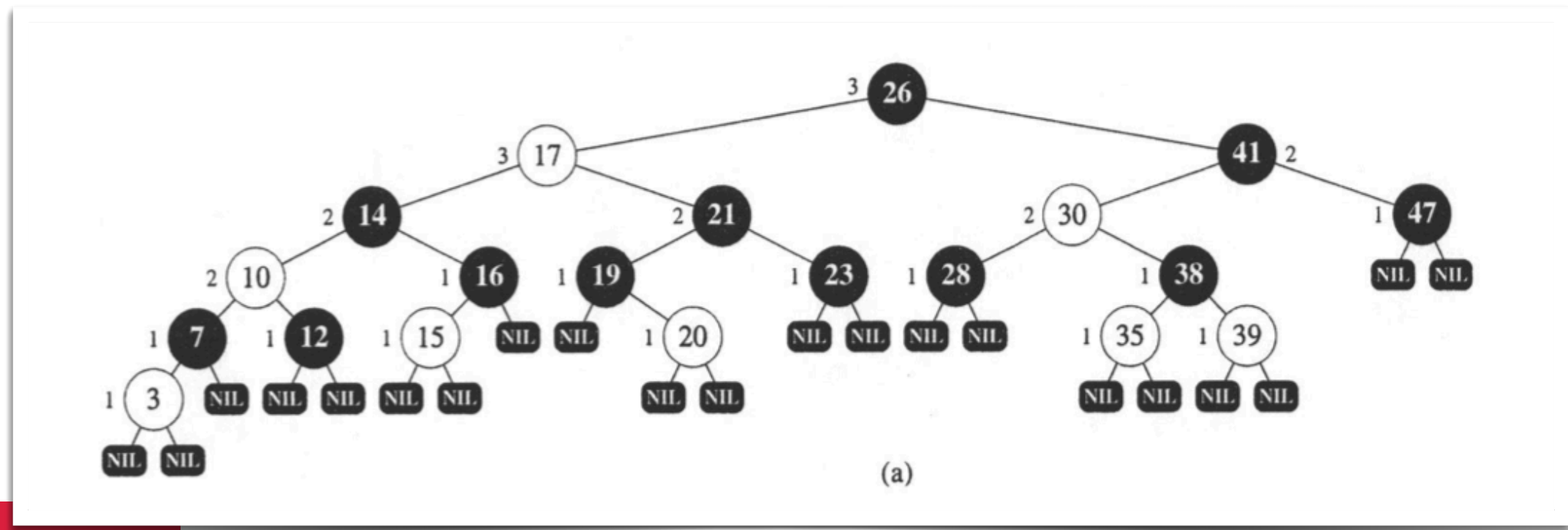


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.

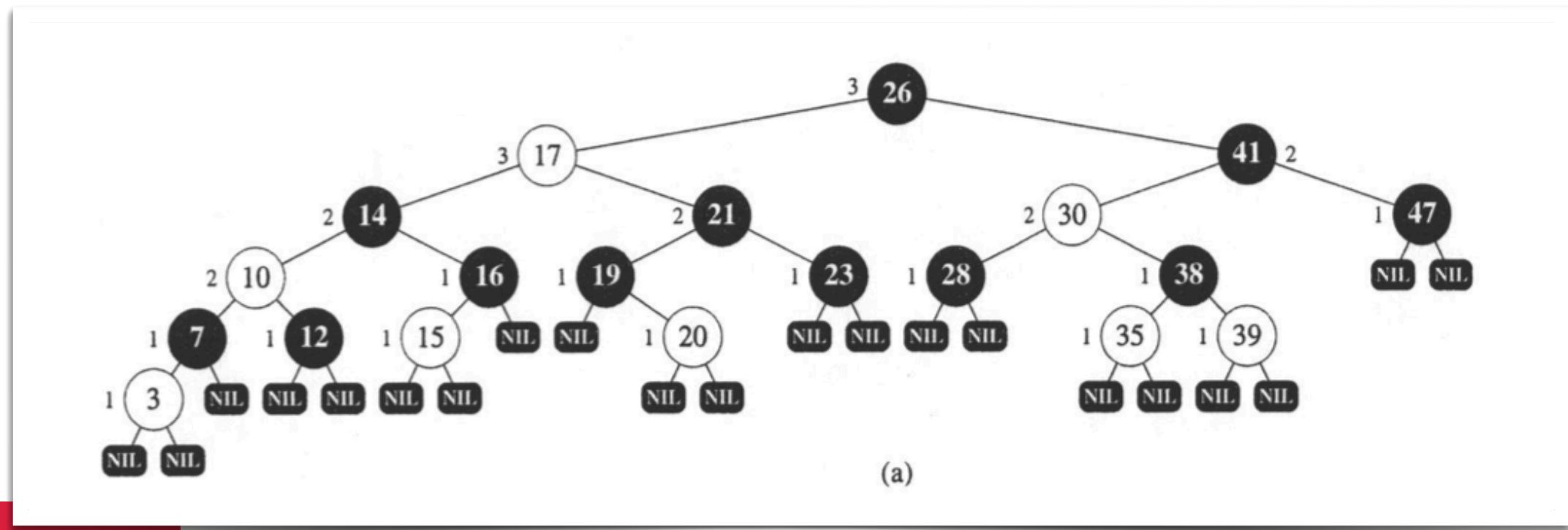


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.

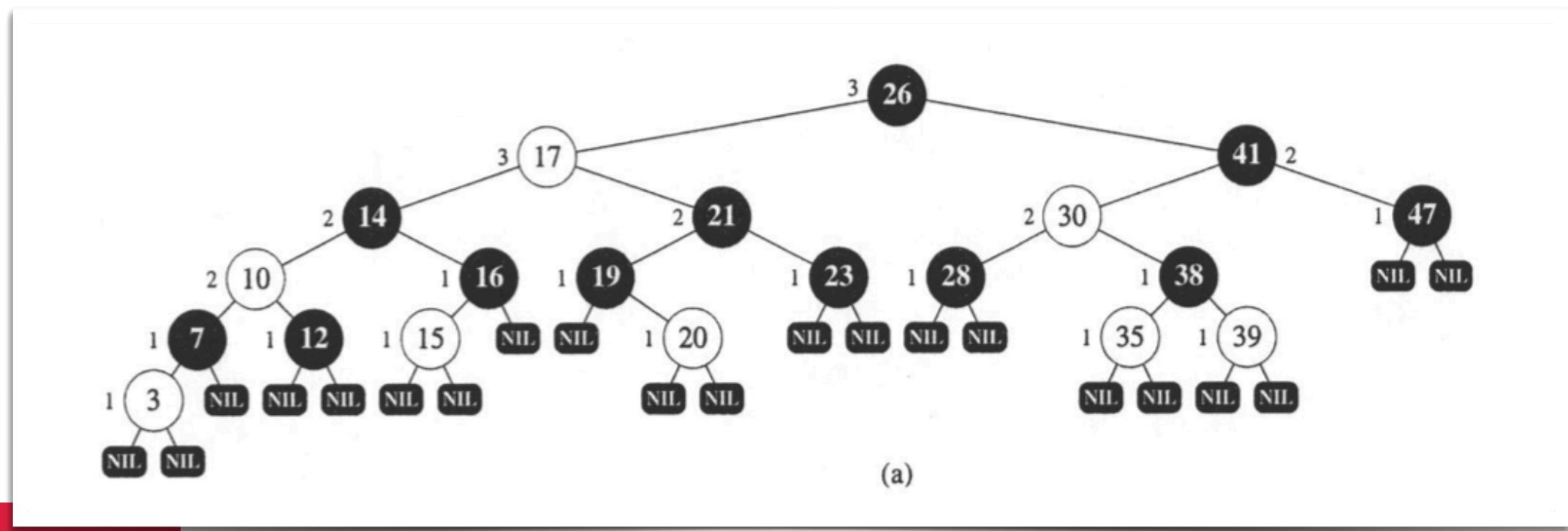


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.
4. Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.

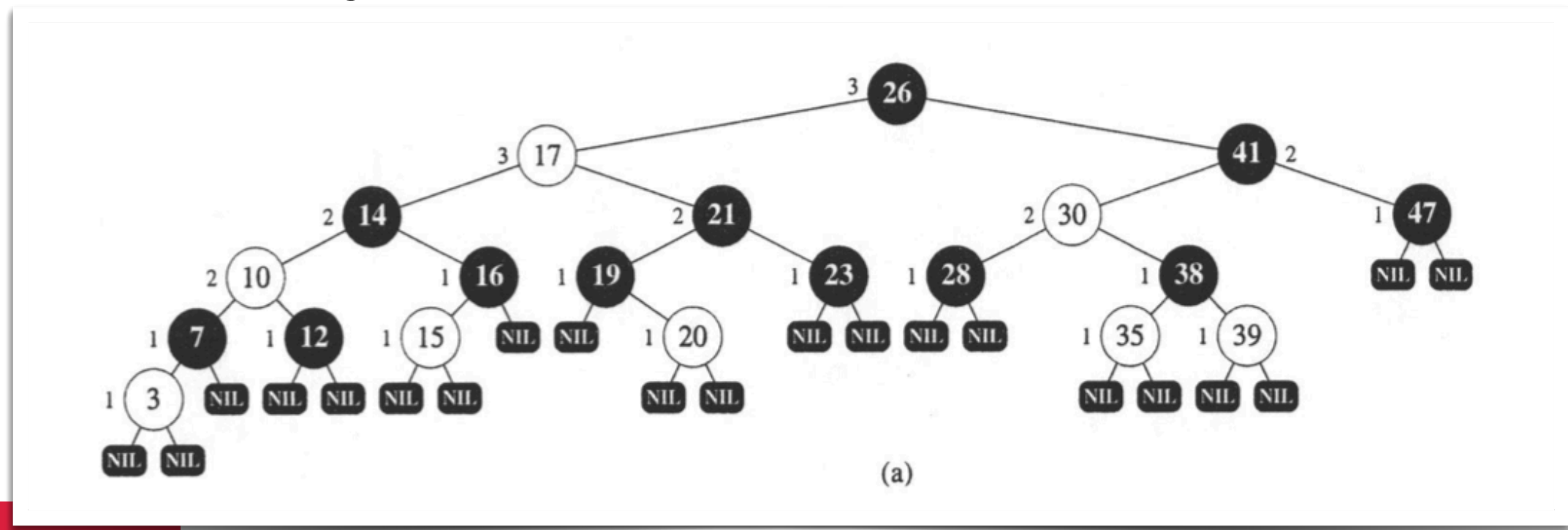


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.
4. Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.
5. Für jeden Knoten enthalten alle Pfade nach unten zu einem Blatt des Teilbaumes die gleiche Anzahl schwarzer Knoten.

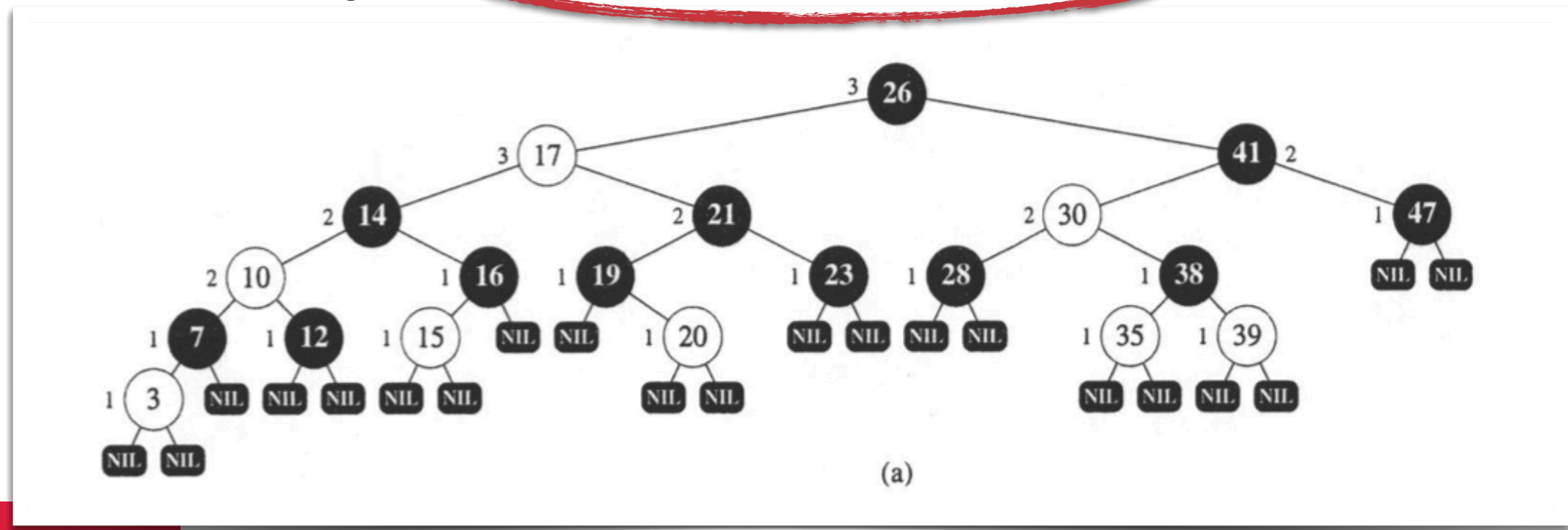


4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn er die folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.
4. Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.
5. Für jeden Knoten enthalten alle Pfade nach unten zu einem Blatt des Teilbaumes die gleiche Anzahl schwarzer Knoten.



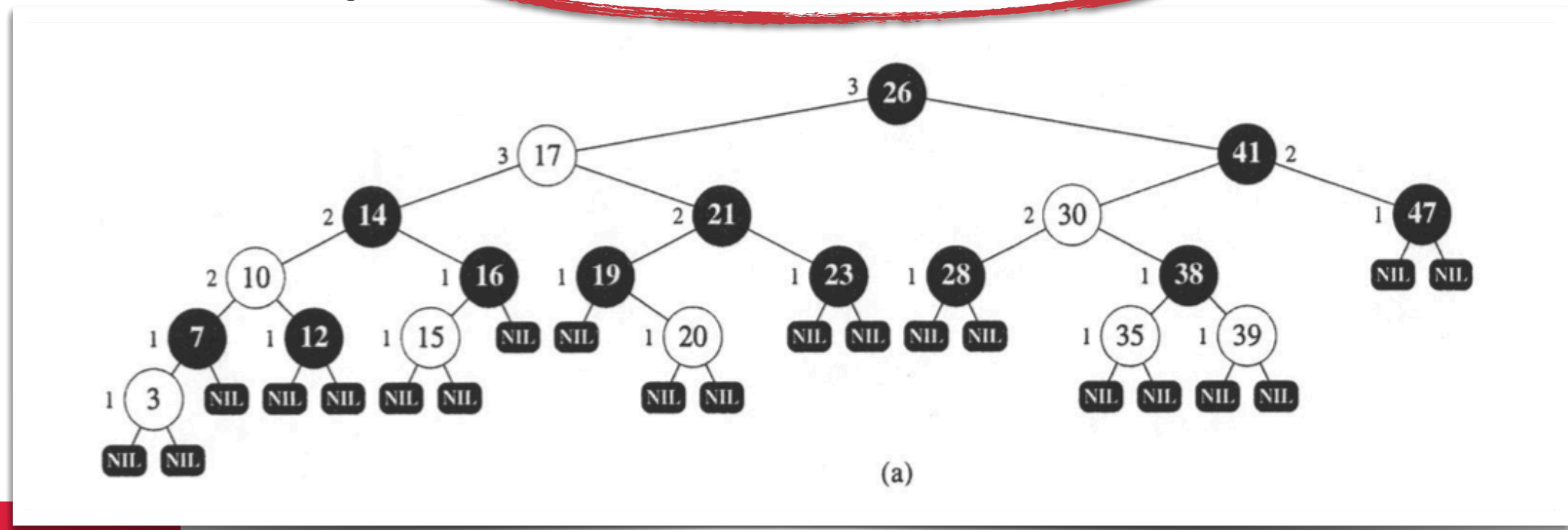
4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.
4. Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.
5. Für jeden Knoten enthalten alle Pfade nach unten zu einem Blatt des Teilbaumes die gleiche Anzahl schwarzer Knoten.

Schwarz-Höhe!



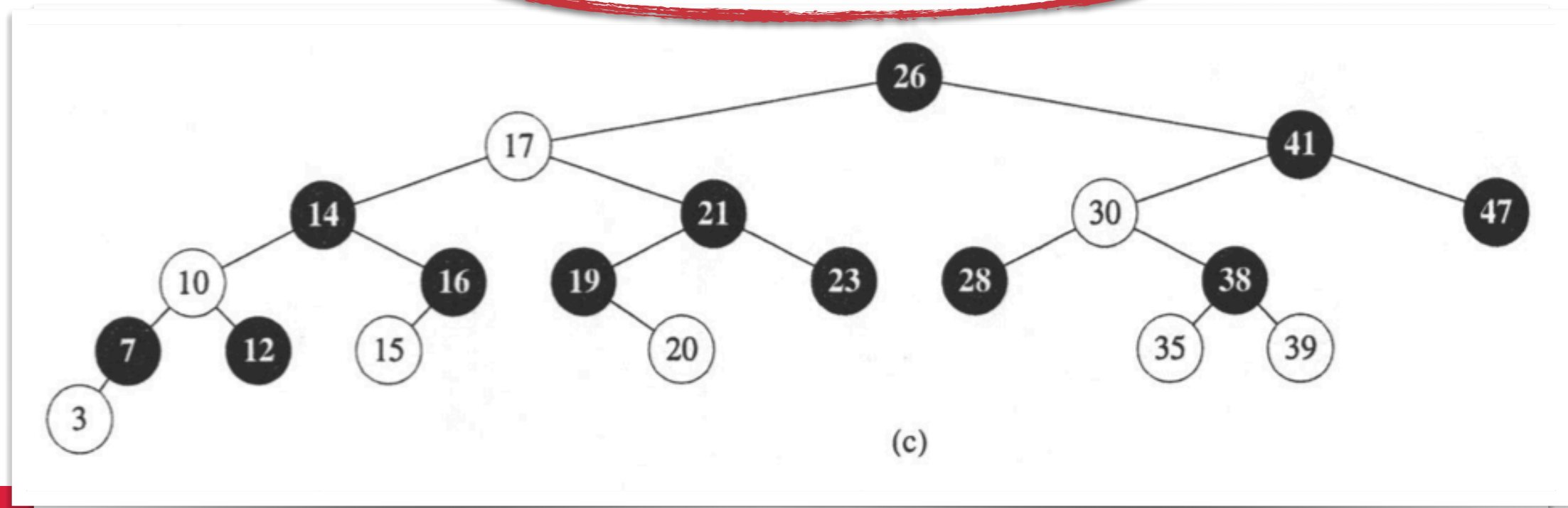
4.8 Rot-Schwarz-Bäume

Definition 4.12 (Rot-Schwarz-Baum)

Ein binärer Suchbaum heißt Rot-Schwarz-Baum, wenn folgenden Eigenschaften erfüllt:

1. Jeder Knoten ist entweder rot oder schwarz.
2. Die Wurzel ist schwarz.
3. Jedes Blatt (NIL) ist schwarz.
4. Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.
5. Für jeden Knoten enthalten alle Pfade nach unten zu einem Blatt des Teilbaumes die gleiche Anzahl schwarzer Knoten.

Schwarz-Höhe!



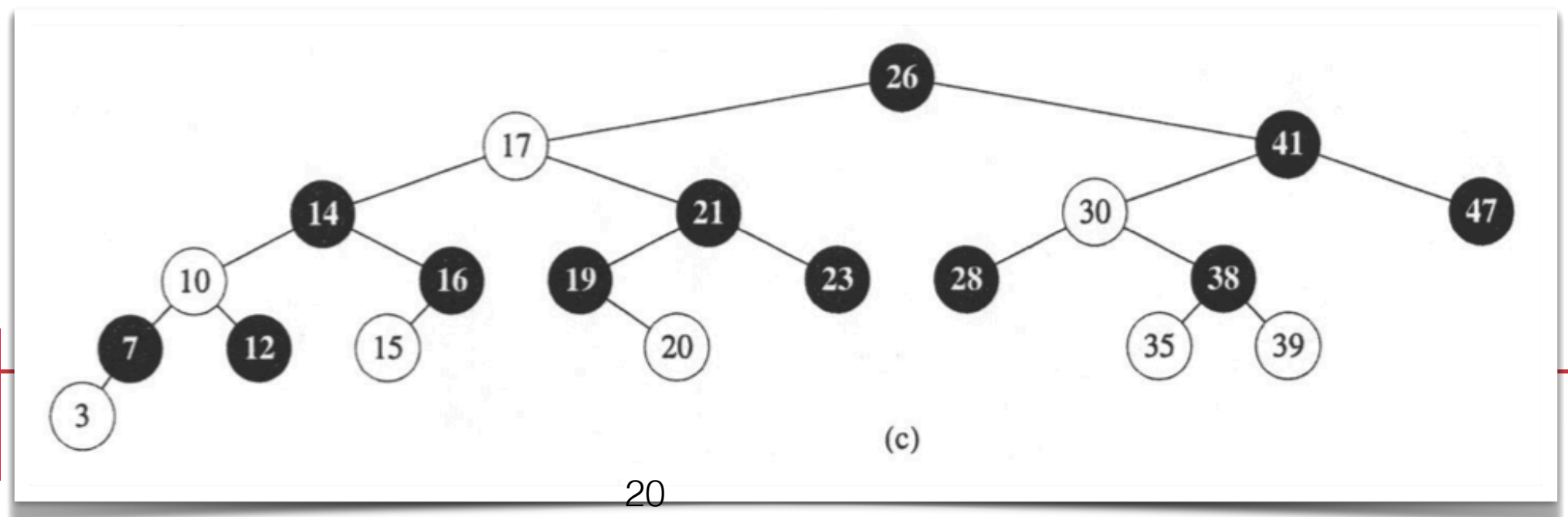
Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?



Rot-Schwarz-Bäume

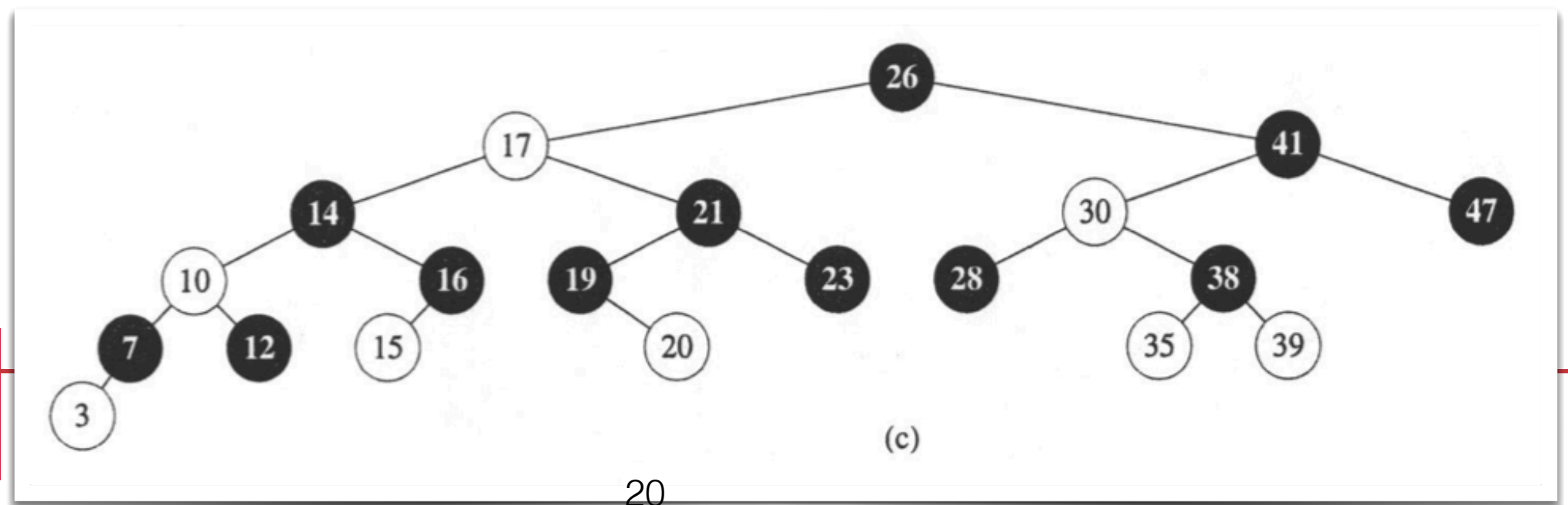
Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.

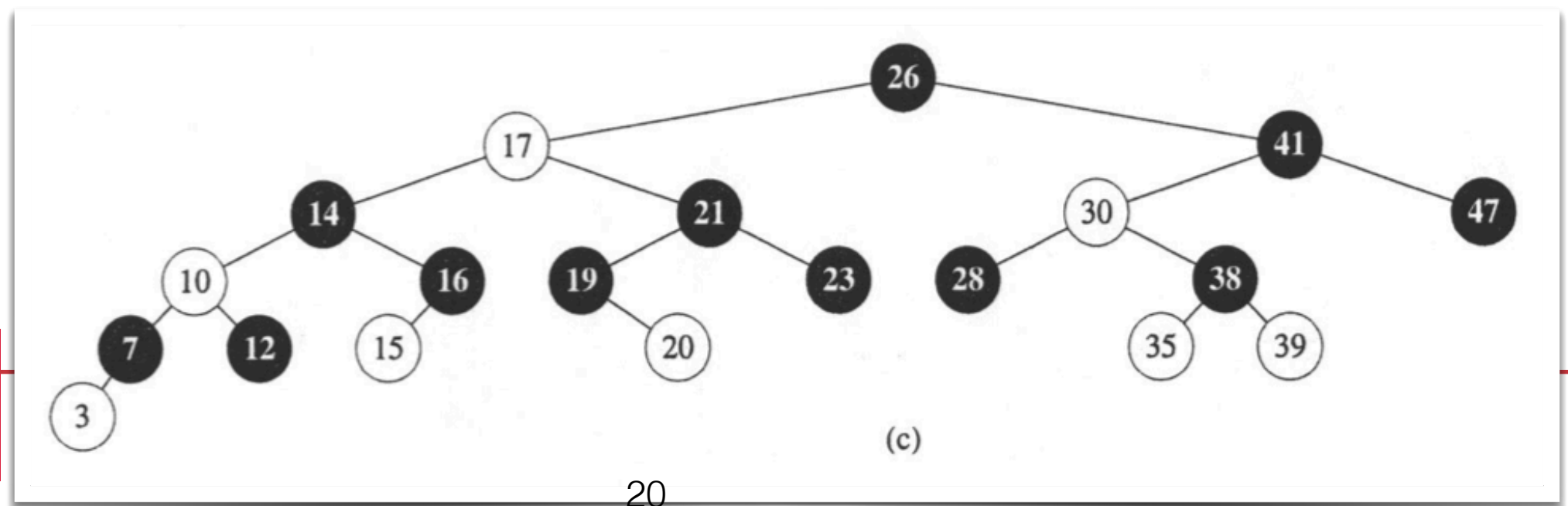


Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.

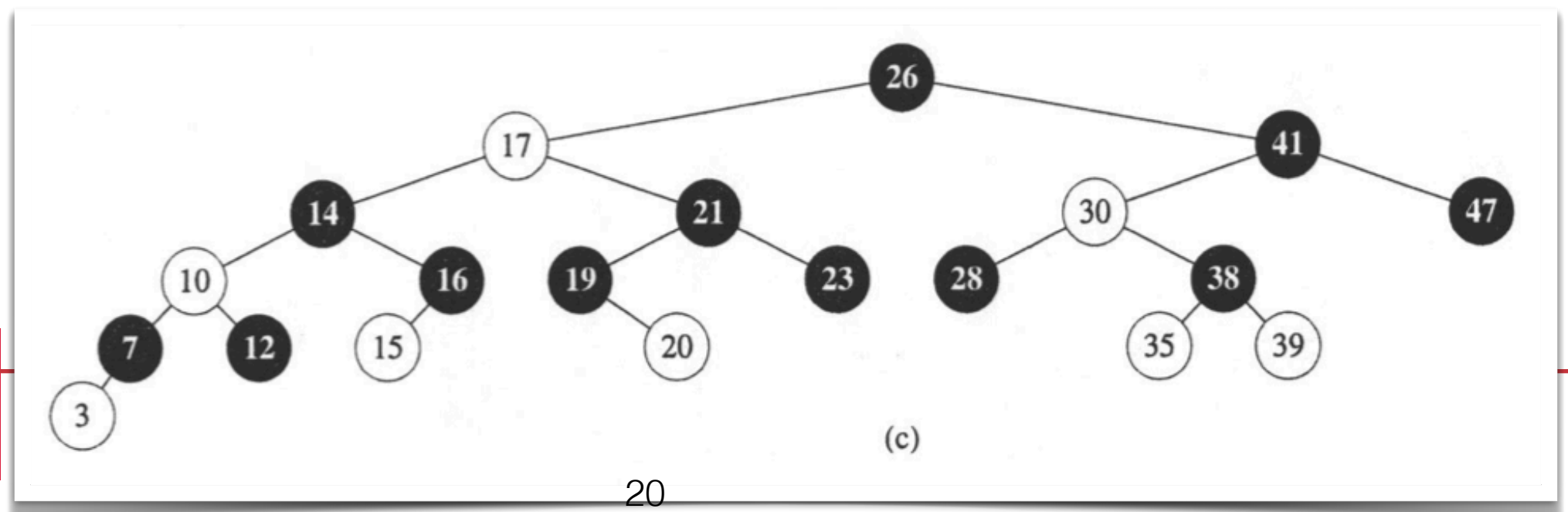
Wenn ein Knoten rot ist, sind seine beiden Kinder schwarz.



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

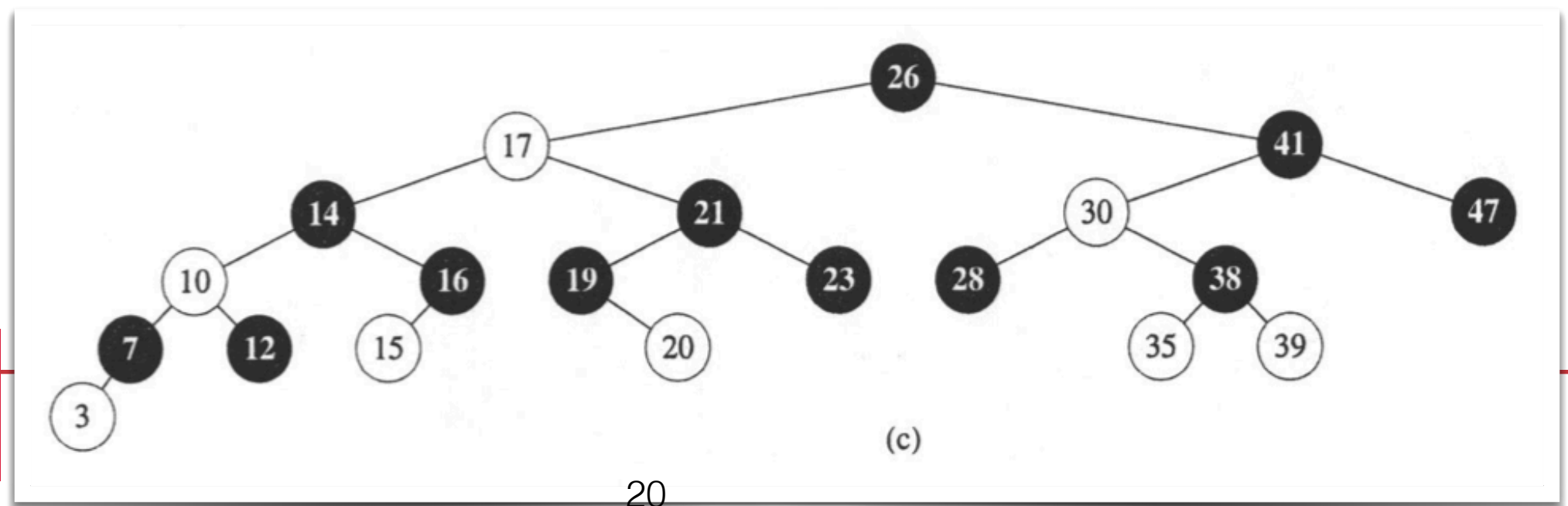
- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

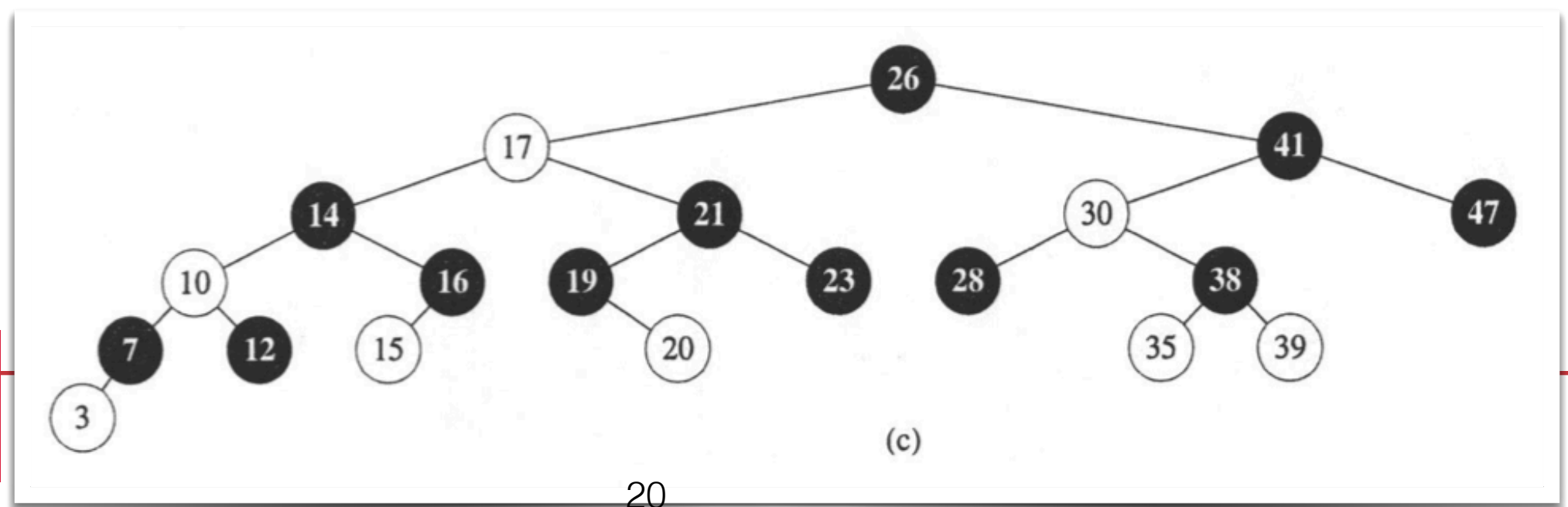
- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.
- Auf dem kürzesten Pfad können nur schwarze Knoten vorkommen.



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.
- Auf dem kürzesten Pfad können nur schwarze Knoten vorkommen.
- Wegen 5. können auf einem Pfad bei dem schwarze und rote Knoten vorkommen, maximal doppelt so viele Knoten liegen, wie auf dem mit nur schwarzen Knoten.

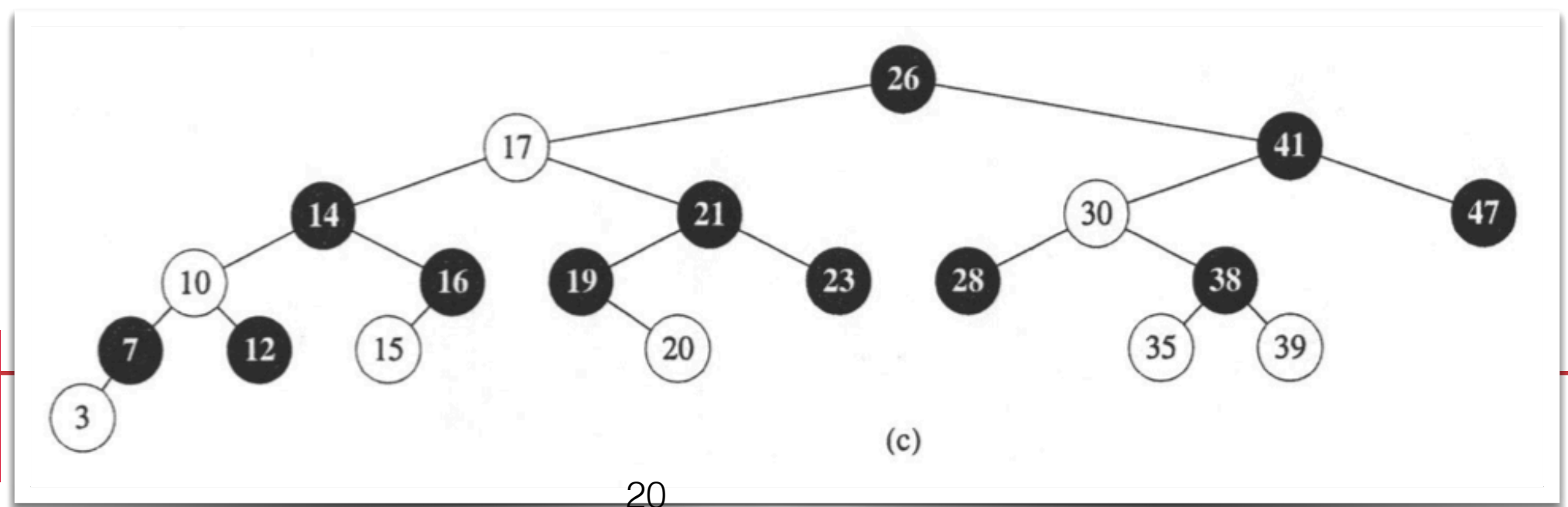


Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

Für jeden Knoten enthalten alle Pfade, die in diesem Knoten starten und in einem Blatt des Teilbaumes dieses Knotens enden, die gleiche Anzahl schwarzer Knoten.

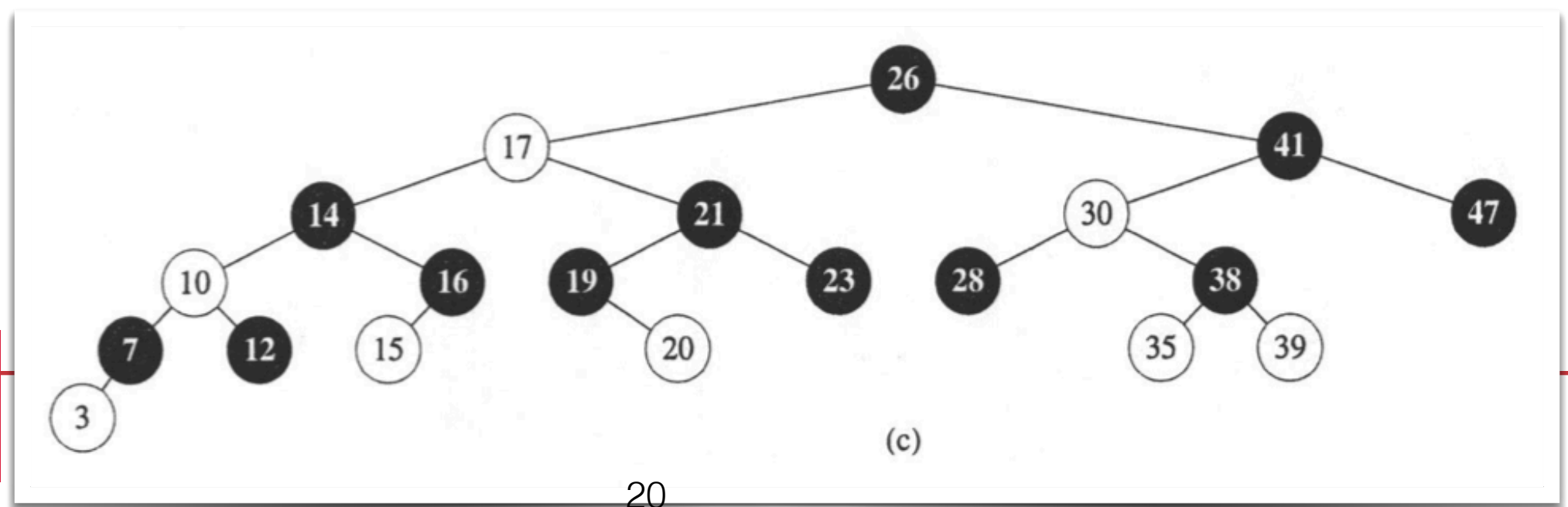
- Auf dem kürzesten Pfad können nur schwarze Knoten vorkommen.
- Wegen 5. können auf einem Pfad bei dem schwarze und rote Knoten vorkommen, maximal doppelt so viele Knoten liegen, wie auf dem mit nur schwarzen Knoten.



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

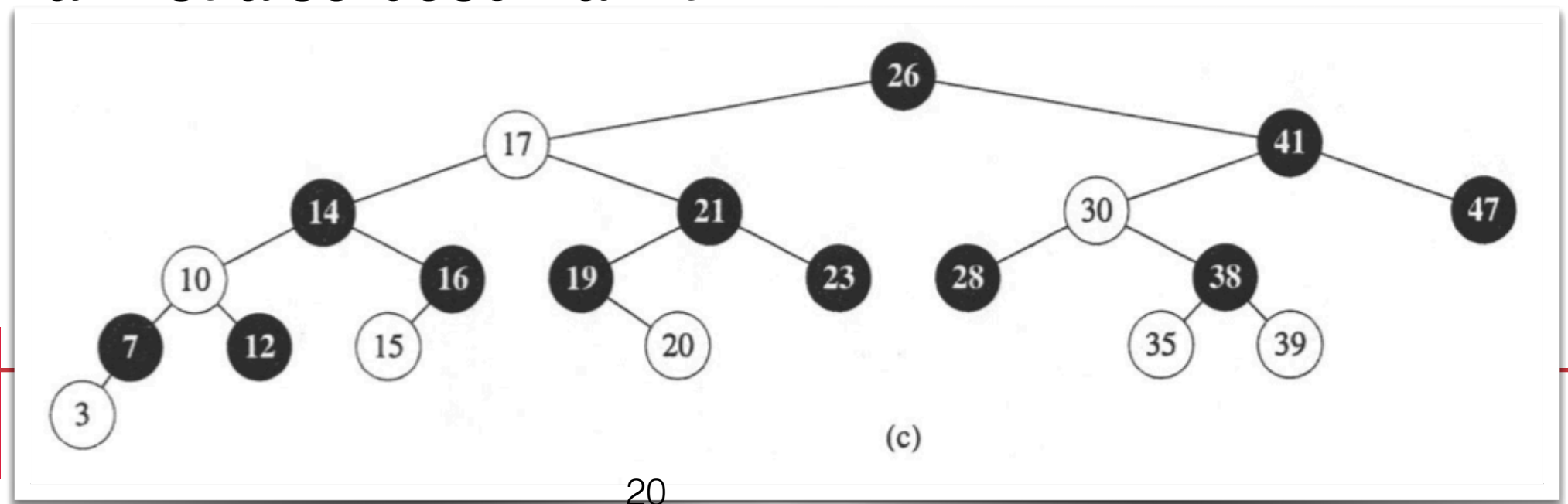
- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.
- Auf dem kürzesten Pfad können nur schwarze Knoten vorkommen.
- Wegen 5. können auf einem Pfad bei dem schwarze und rote Knoten vorkommen, maximal doppelt so viele Knoten liegen, wie auf dem mit nur schwarzen Knoten.



Rot-Schwarz-Bäume

Warum sorgt dies dafür, dass der Baum balanciert ist?

- Wegen 4. kann es auf keinem Pfad von der Wurzel bis zum Blatt mehr rote als schwarze Knoten geben.
- Auf dem kürzesten Pfad können nur schwarze Knoten vorkommen.
- Wegen 5. können auf einem Pfad bei dem schwarze und rote Knoten vorkommen, maximal doppelt so viele Knoten liegen, wie auf dem mit nur schwarzen Knoten.
- Das Verhältnis der Höhe und dem Logarithmus der Knotenanzahl ist also beschränkt.



Satz 4.13

Ein Rot-Schwarz-Baum mit n Knoten hat Höhe $O(\log n)$.

Satz 4.13

Ein Rot-Schwarz-Baum mit n Knoten hat Höhe $O(\log n)$.

Satz 4.13

Ein Rot-Schwarz-Baum mit n Knoten hat Höhe $O(\log n)$.

Beweis

Durch Induktion: Jeder Teilbaum zu einem Knoten v mit der Schwarz-Höhe $bh(v)$ hat mindestens $2^{bh(v)} - 1$ innere Knoten.

Satz 4.13

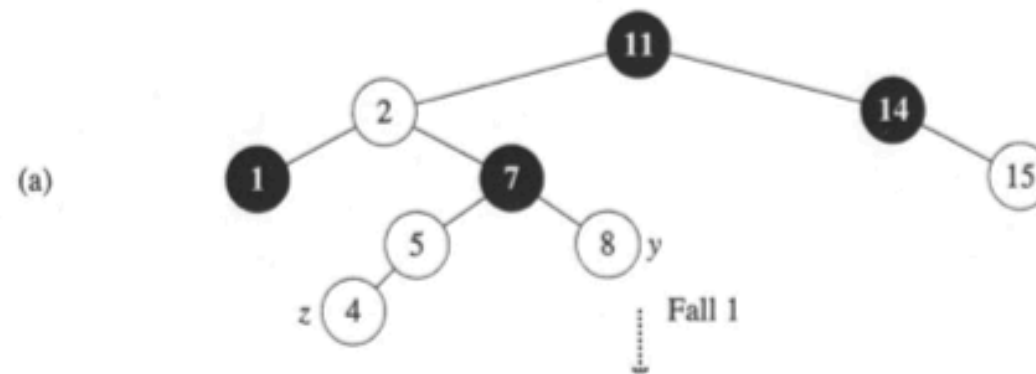
Ein Rot-Schwarz-Baum mit n Knoten hat Höhe $O(\log n)$.

Beweis

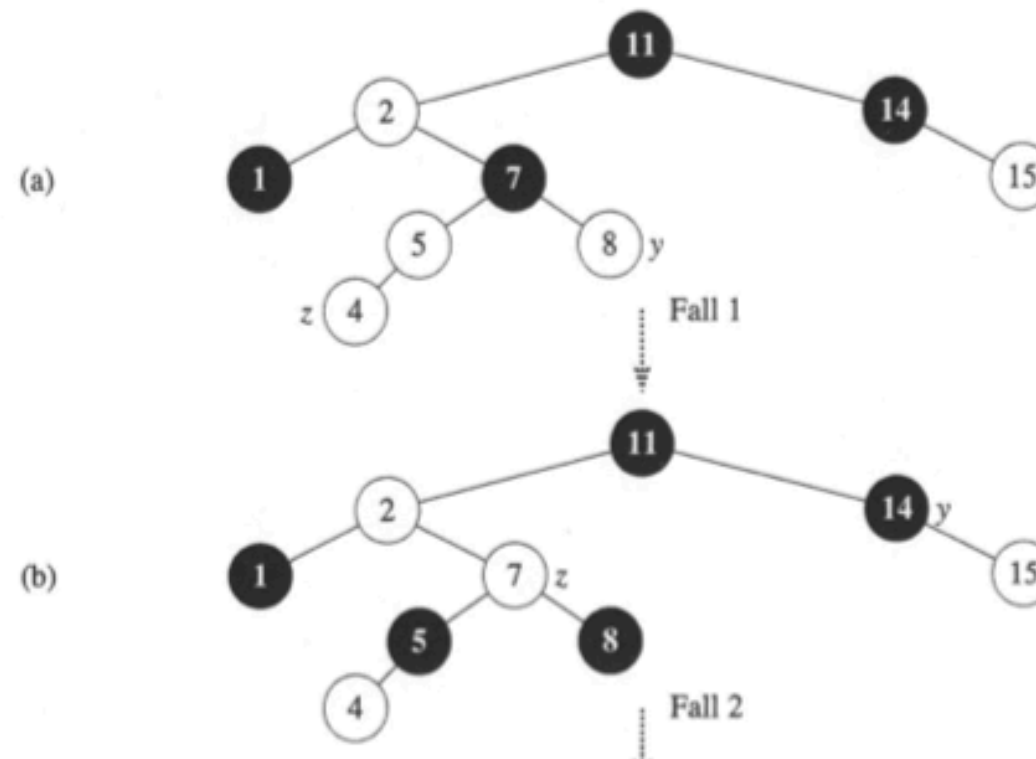
Durch Induktion: Jeder Teilbaum zu einem Knoten v mit der Schwarz-Höhe $bh(v)$ hat mindestens $2^{bh(v)} - 1$ innere Knoten.

Induktion als Übung!

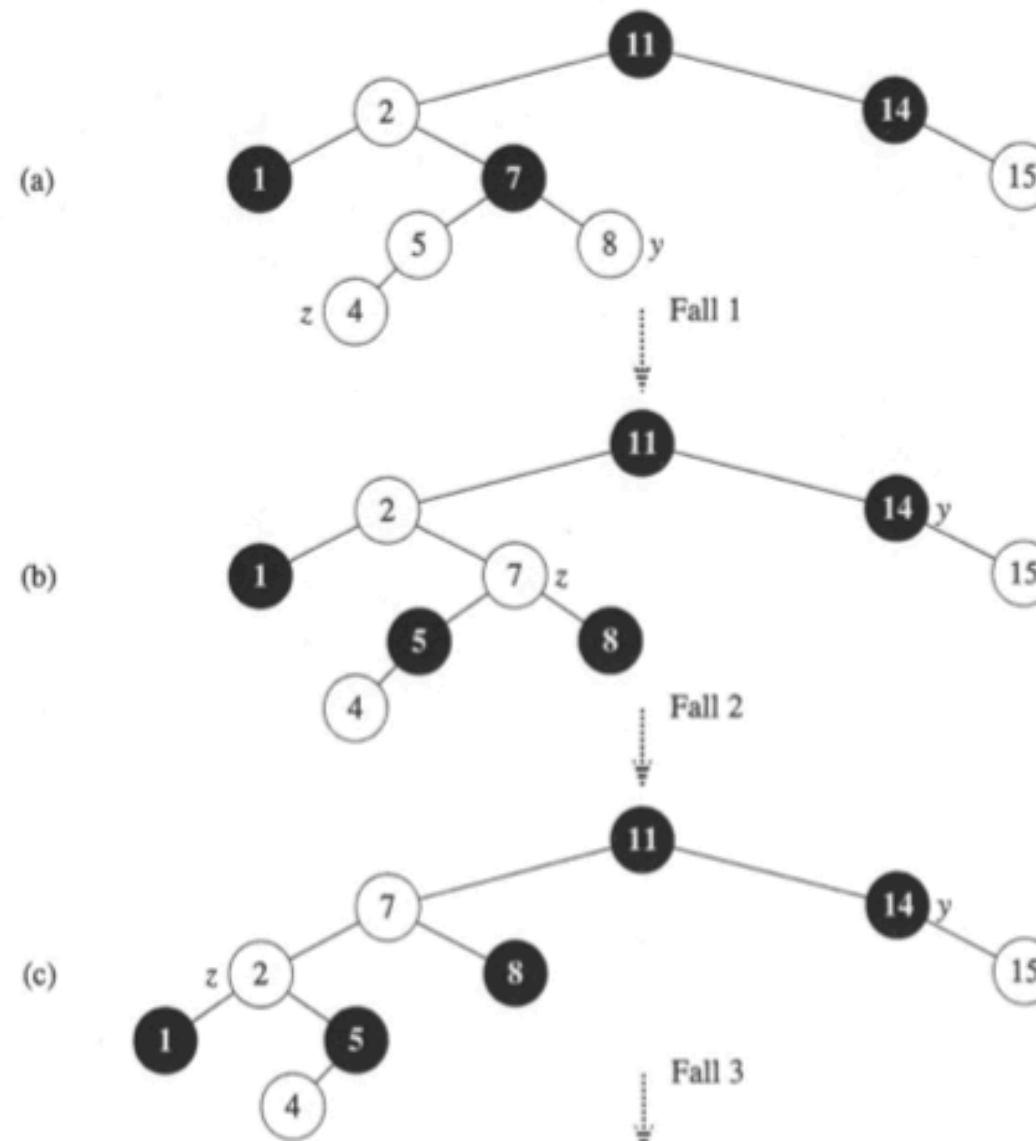
Rot-Schwarz-Bäume — Einfügen



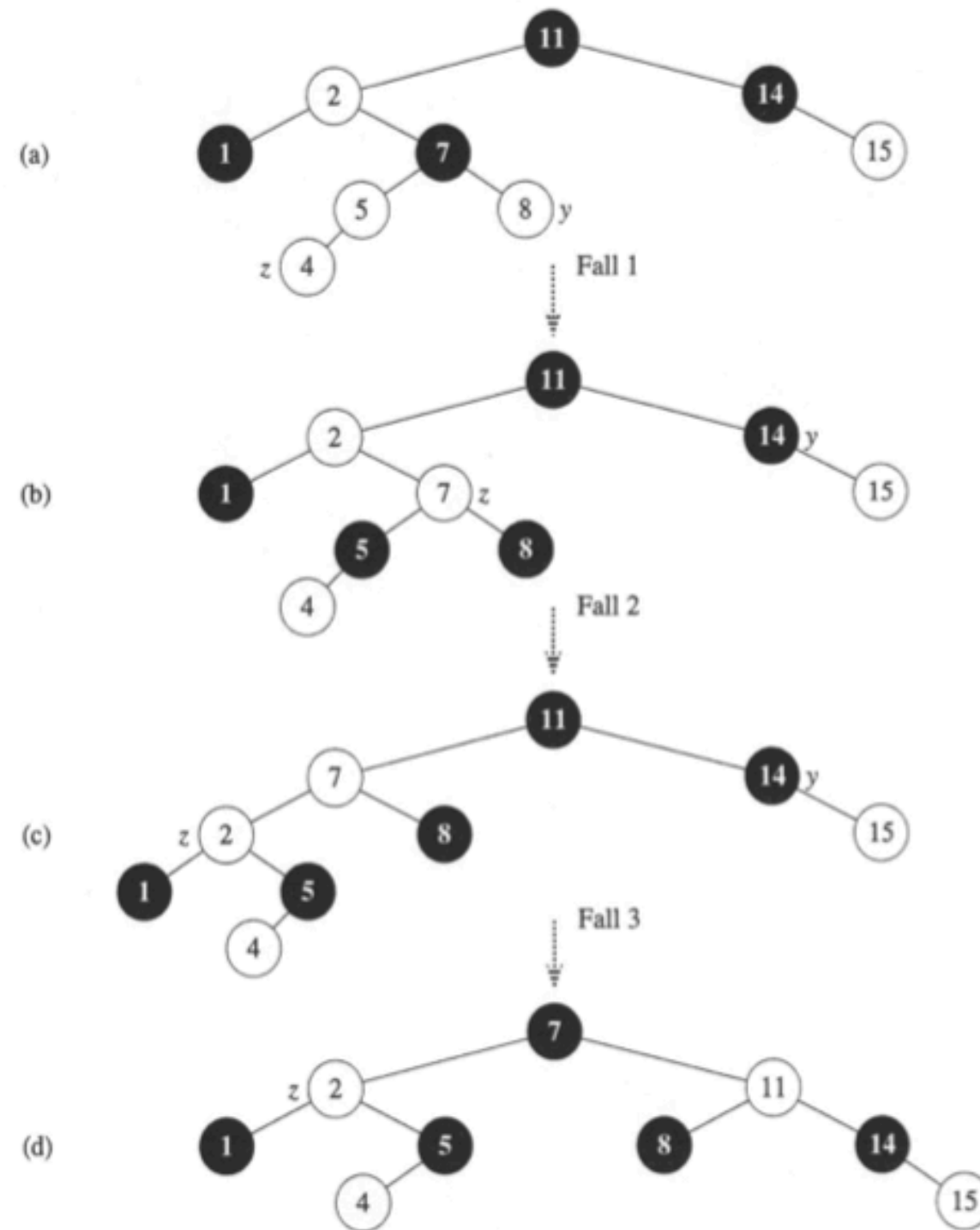
Rot-Schwarz-Bäume — Einfügen



Rot-Schwarz-Bäume — Einfügen



Rot-Schwarz-Bäume – Einfügen



Satz 4.14

Ein Rot-Schwarz-Baum benötigt $O(\log n)$ für dynamische Operationen auf Datenmengen mit n Objekten.

Satz 4.14

Ein Rot-Schwarz-Baum benötigt $O(\log n)$ für dynamische Operationen auf Datenmengen mit n Objekten.

(d.h. genauso lange wie ein AVL-Baum)

4.9 B-Bäume



4.9 B-Bäume

4.9 B-Bäume

(Balancierte) Binäre Bäume haben viele gute Eigenschaften. Wie sieht das in der Praxis aus, zum Beispiel für den Einsatz als Index bei Datenbanken?

4.9 B-Bäume

(Balancierte) Binäre Bäume haben viele gute Eigenschaften. Wie sieht das in der Praxis aus, zum Beispiel für den Einsatz als Index bei Datenbanken?

- Gut bei internen Speicher (Hauptspeicher, Cache,...)

4.9 B-Bäume

(Balancierte) Binäre Bäume haben viele gute Eigenschaften. Wie sieht das in der Praxis aus, zum Beispiel für den Einsatz als Index bei Datenbanken?

- Gut bei internen Speicher (Hauptspeicher, Cache,...)
- Sehr schlecht bei externem Speicher (HDDs)

4.9 B-Bäume

(Balancierte) Binäre Bäume haben viele gute Eigenschaften. Wie sieht das in der Praxis aus, zum Beispiel für den Einsatz als Index bei Datenbanken?

- Gut bei internen Speicher (Hauptspeicher, Cache,...)
- Sehr schlecht bei externem Speicher (HDDs)

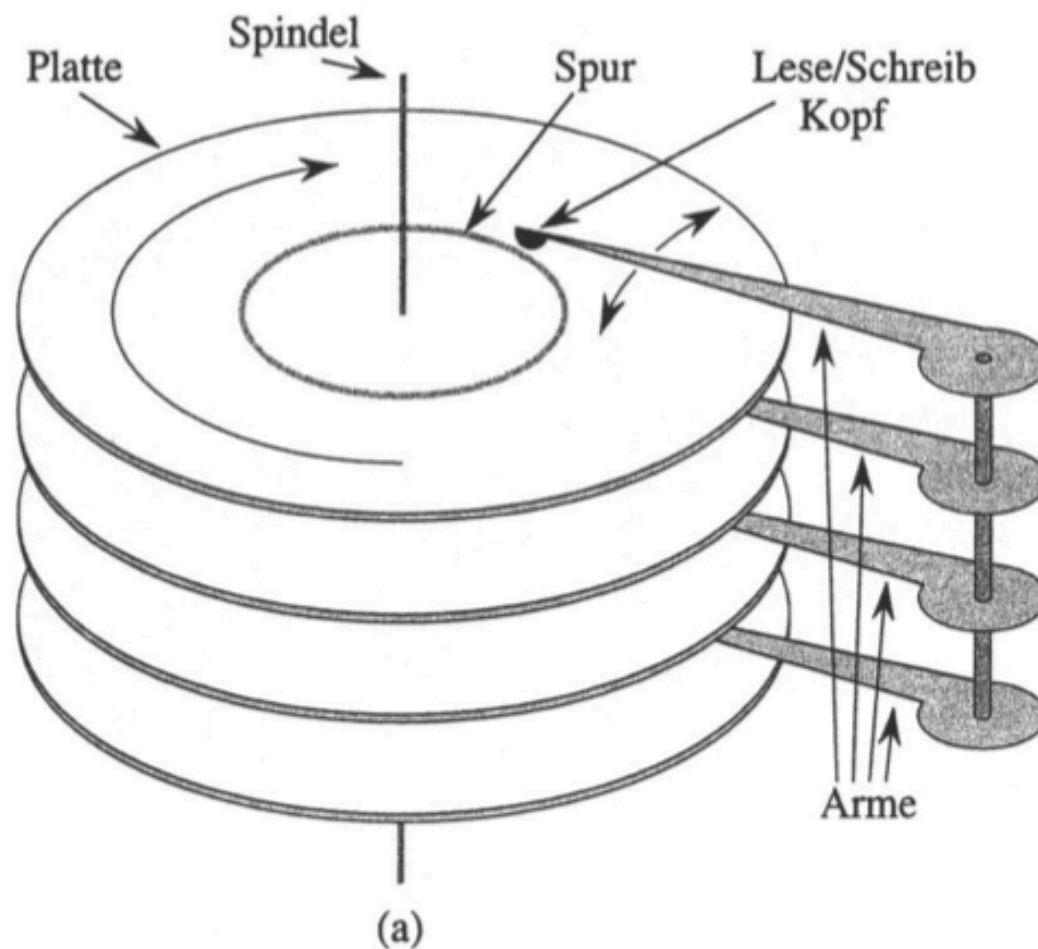
Die Knoten werden hintereinander auf die Platte geschrieben. Wenn der Baum groß ist, muss man ggf. für jeden Knoten einen neuen Block lesen; das dauert!

B-Bäume



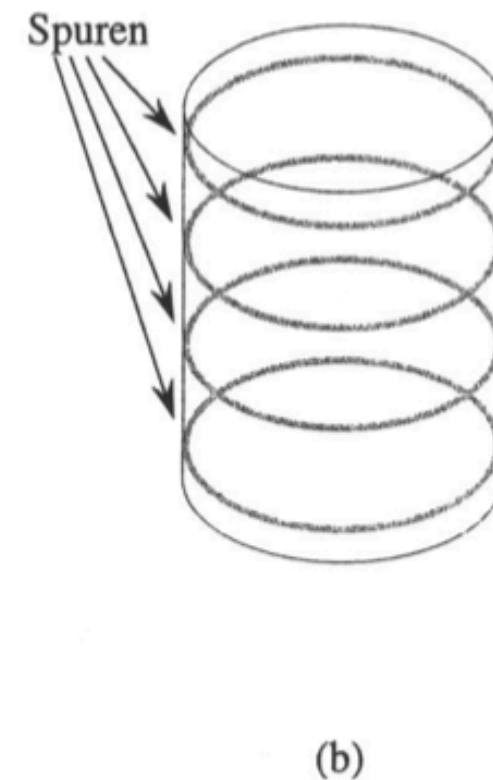
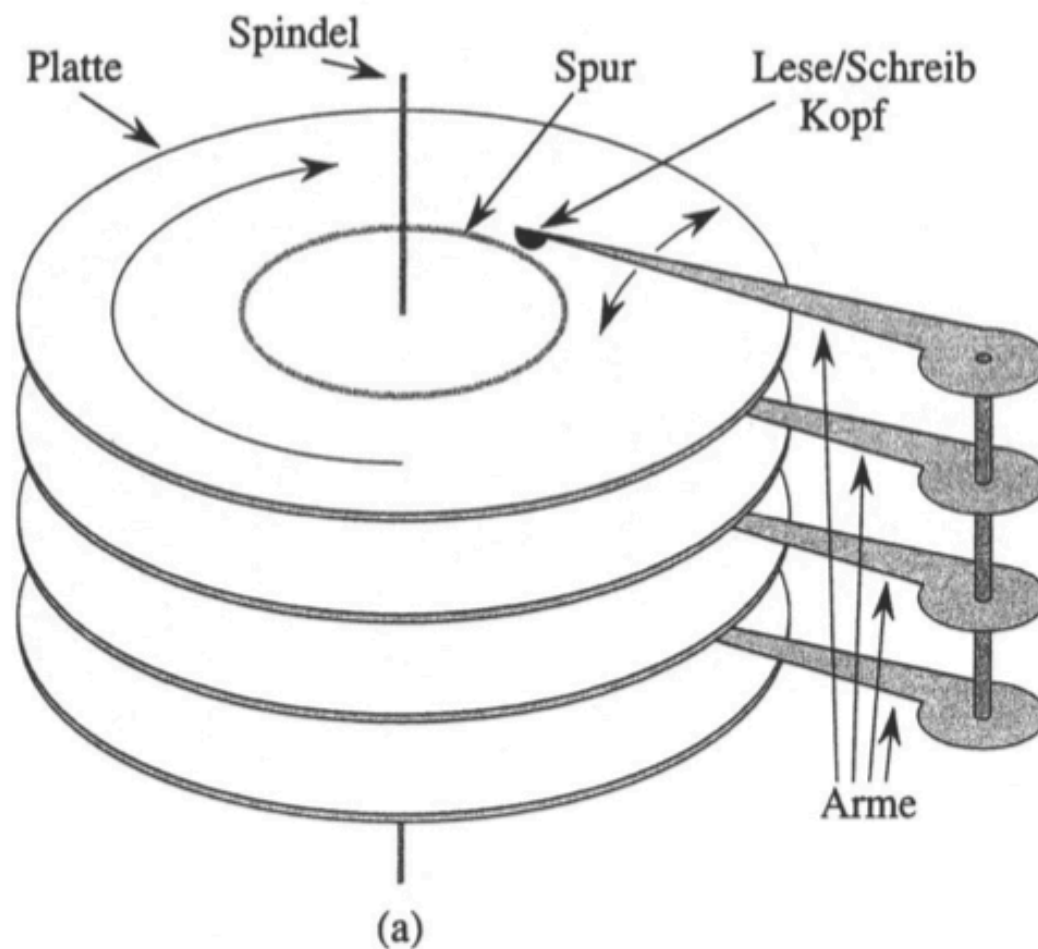
Kontext: Speicherhierarchien!

B-Bäume



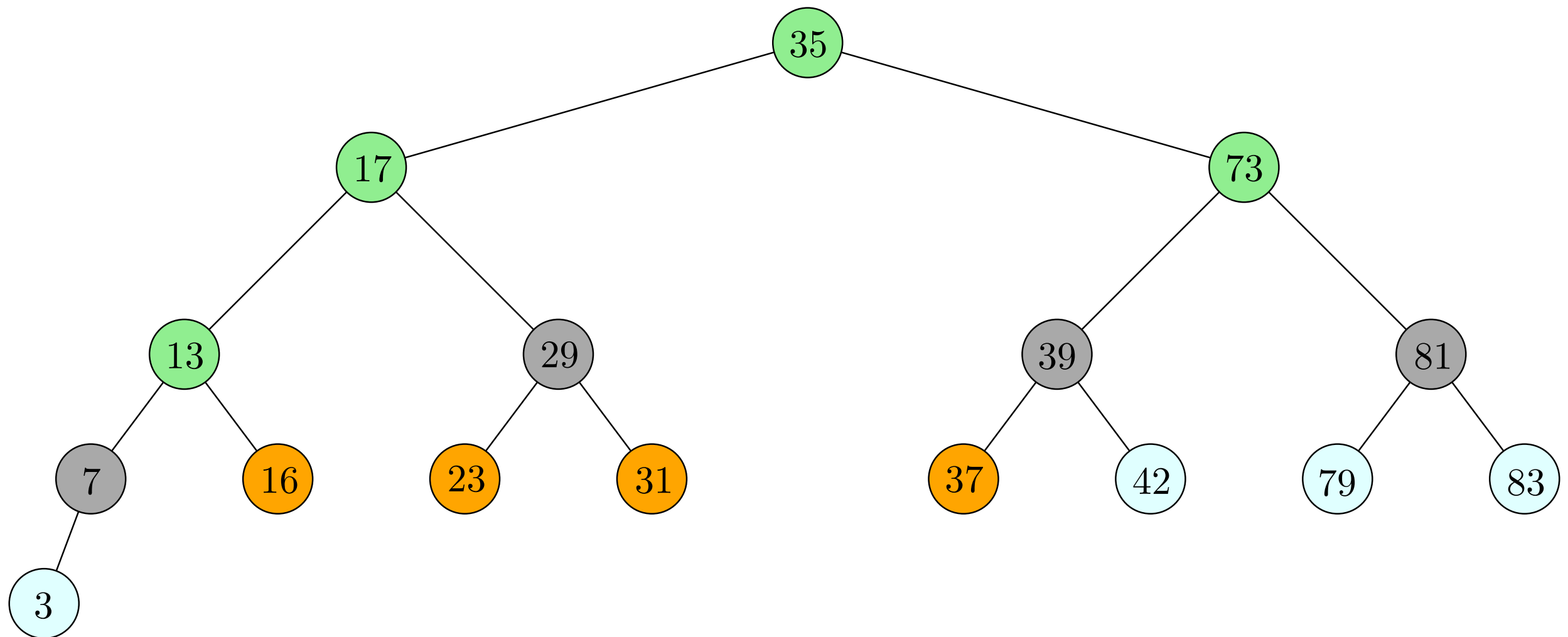
Kontext: Speicherhierarchien!

B-Bäume



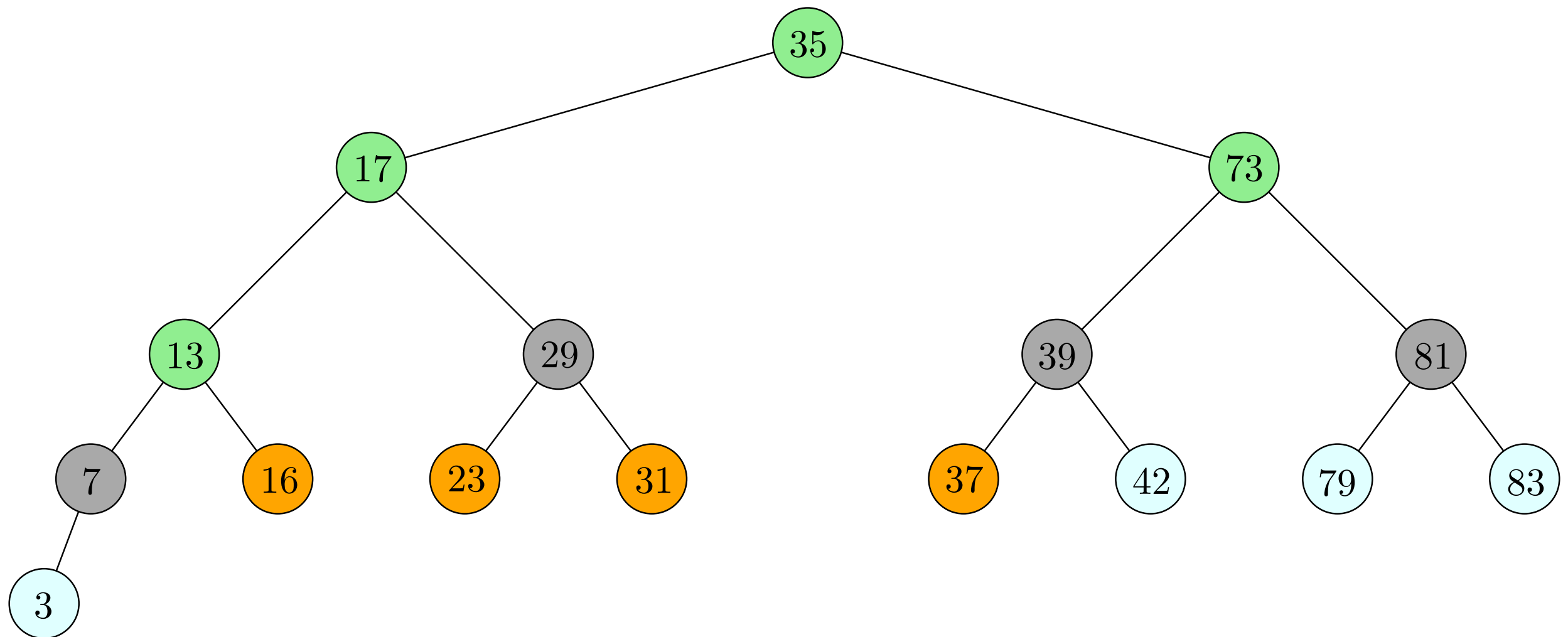
Kontext: Speicherhierarchien!

B-Bäume



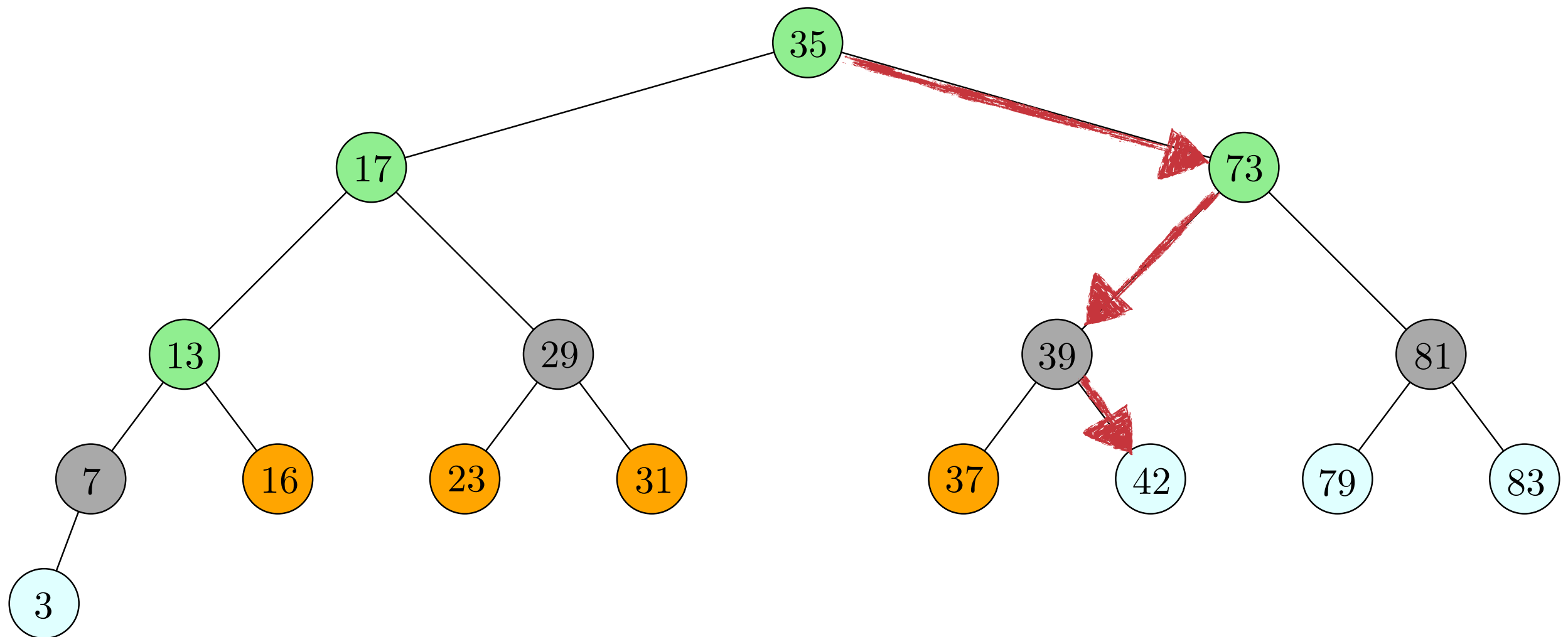
B-Bäume

Angenommen, wir suchen die 42.



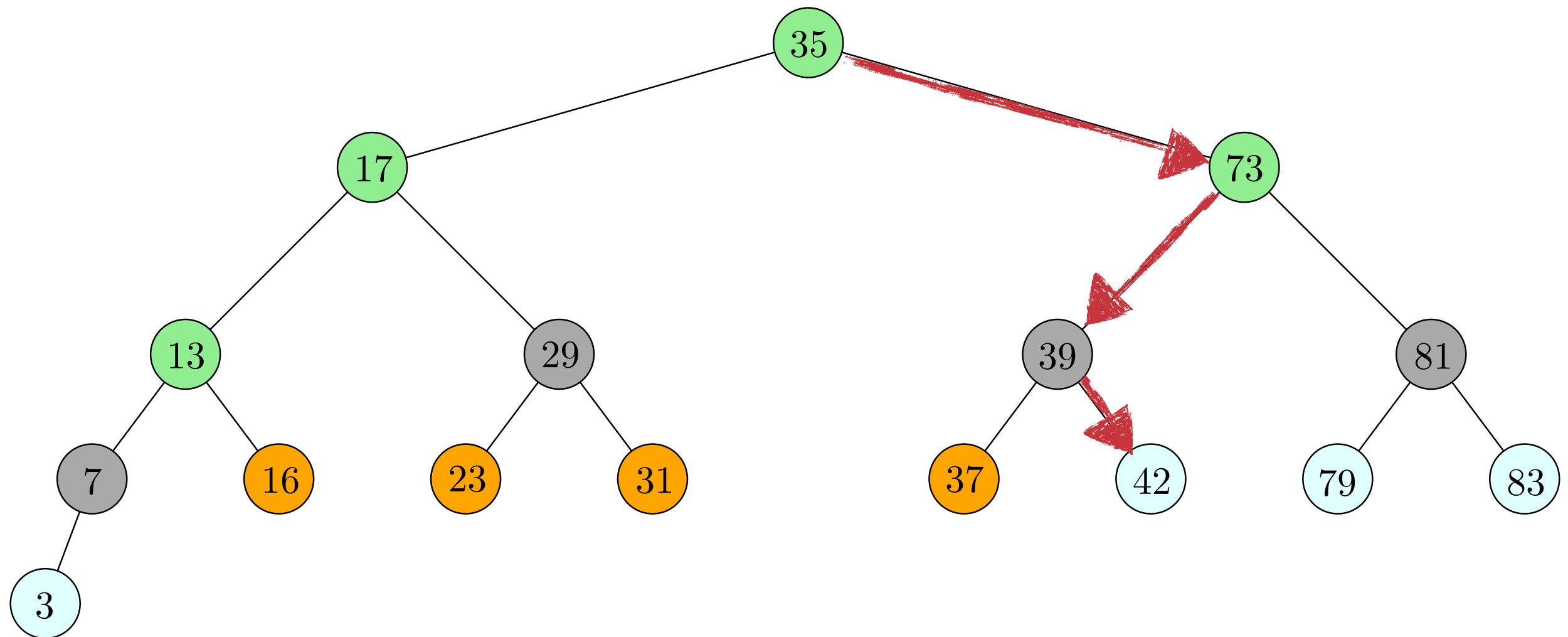
B-Bäume

Angenommen, wir suchen die 42.



B-Bäume

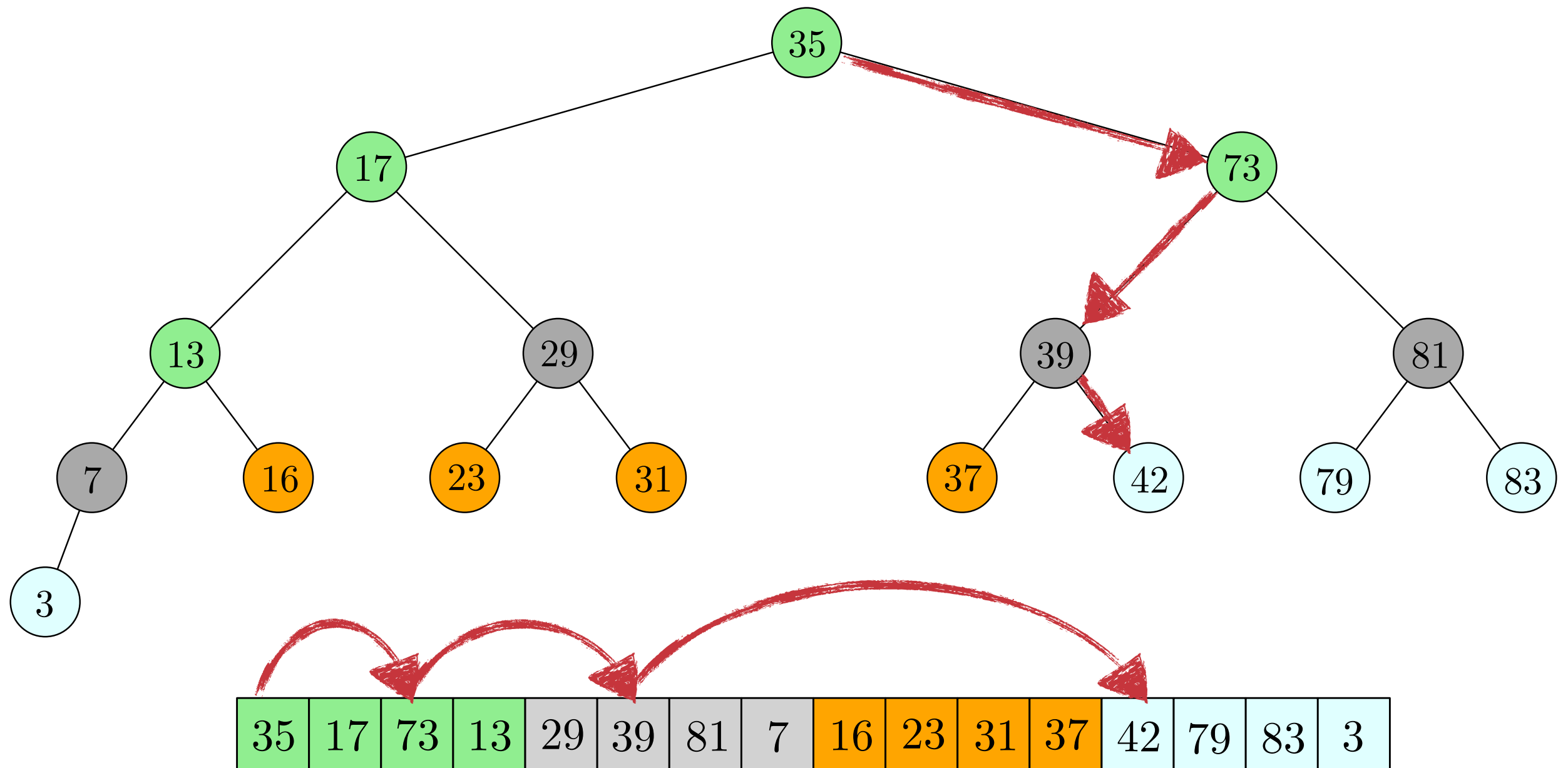
Angenommen, wir suchen die 42.



35	17	73	13	29	39	81	7	16	23	31	37	42	79	83	3
----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	---

B-Bäume

Angenommen, wir suchen die 42.



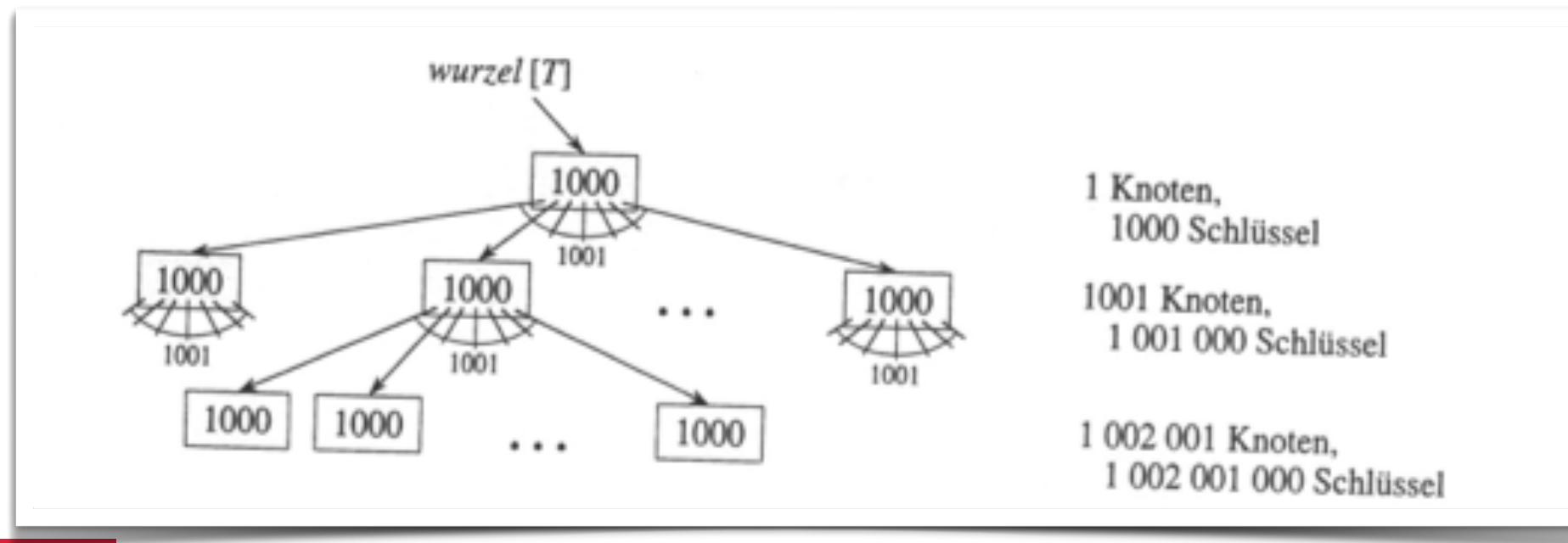
- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen

- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren

- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren
 - ...

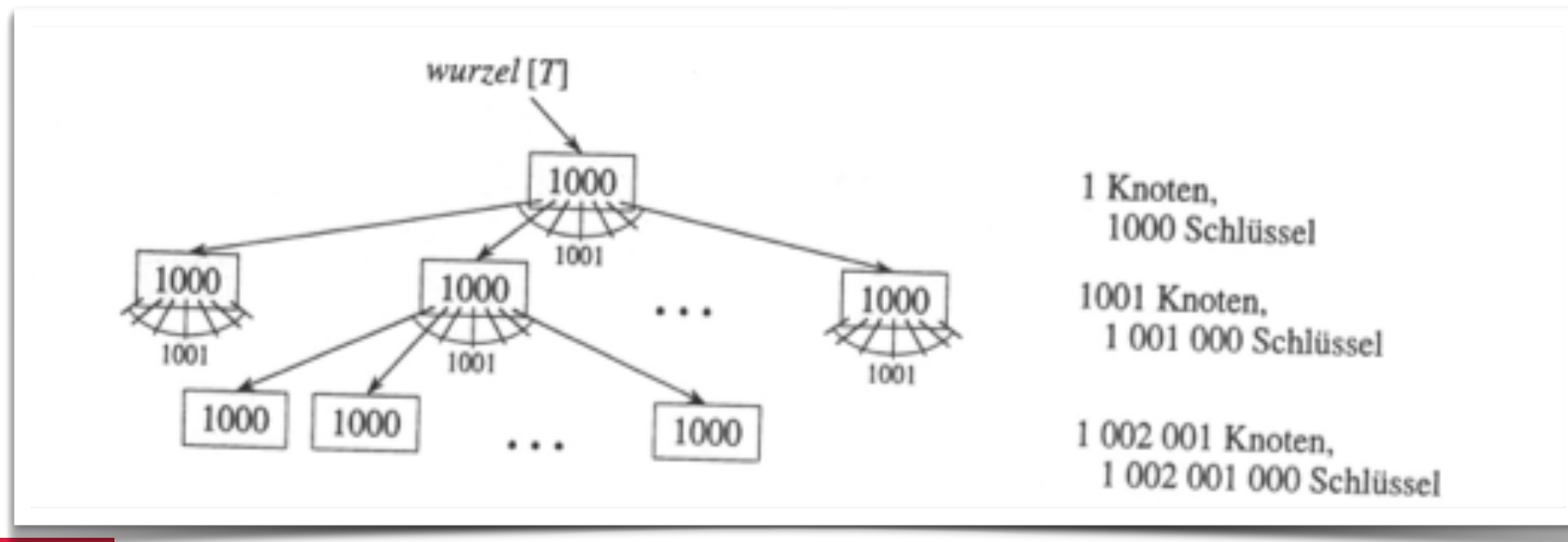
B-Bäume

- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren
 - ...



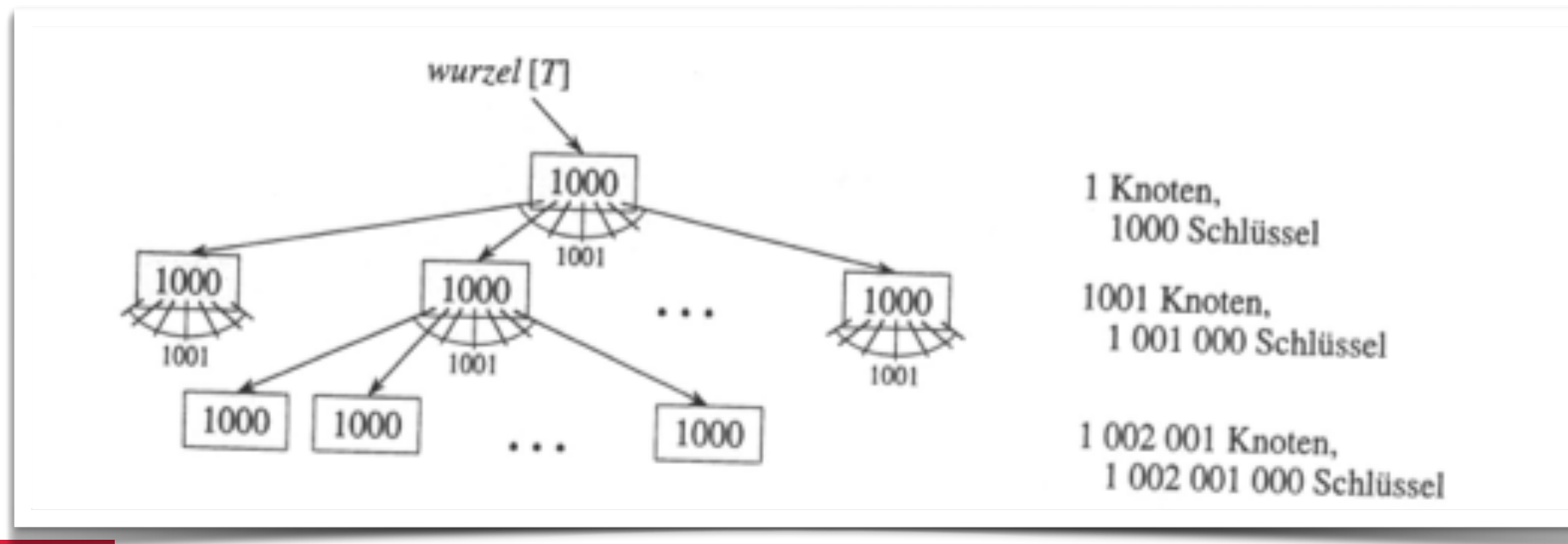
B-Bäume

- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren
 - ...
- Für den Einsatz auf HDDs optimieren



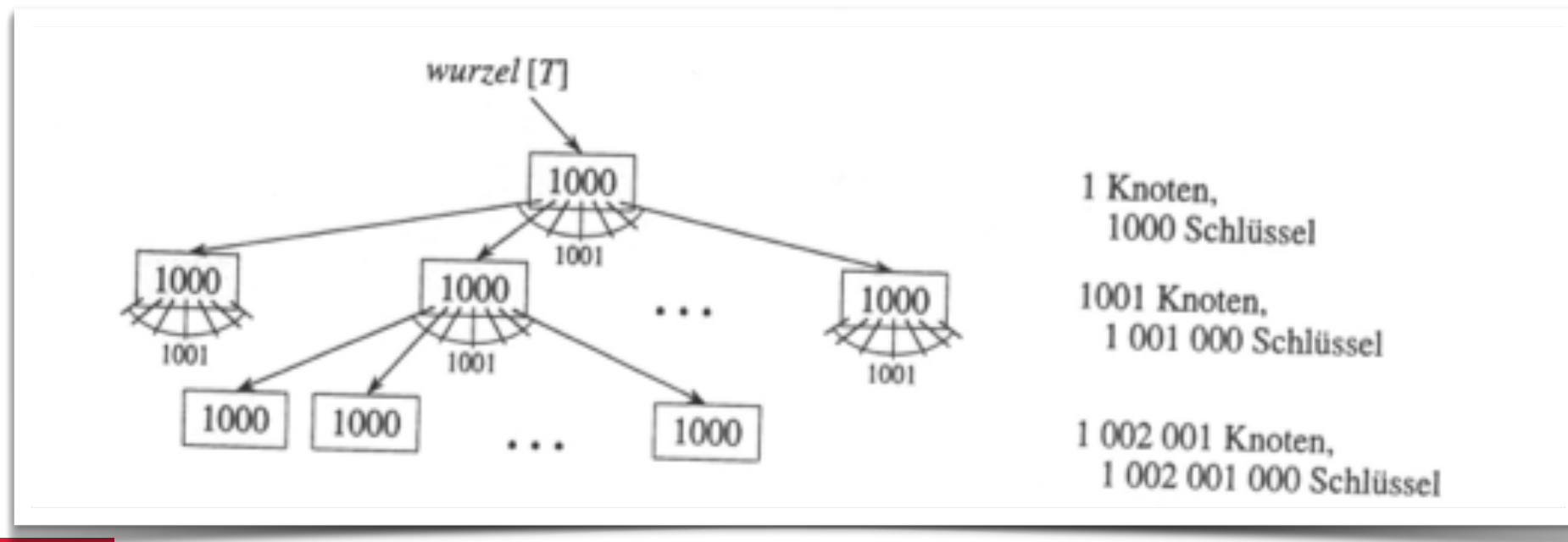
B-Bäume

- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren
 - ...
- Für den Einsatz auf HDDs optimieren
 - Höhe des Baumes minimieren



B-Bäume

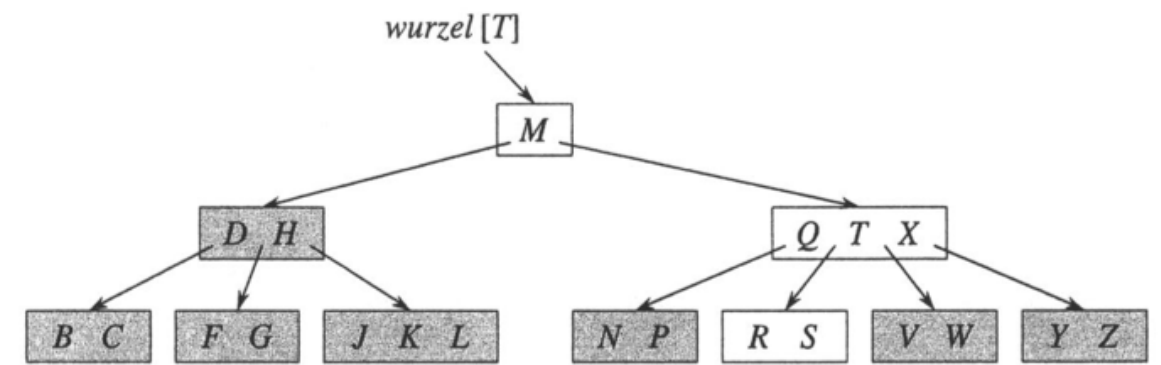
- Konzepte von binären Suchbäumen übernehmen
 - balancieren
 - ...
- Für den Einsatz auf HDDs optimieren
 - Höhe des Baumes minimieren
 - mehr Schlüssel pro Knoten



Definition 4.13 (B-Baum)

B-Bäume

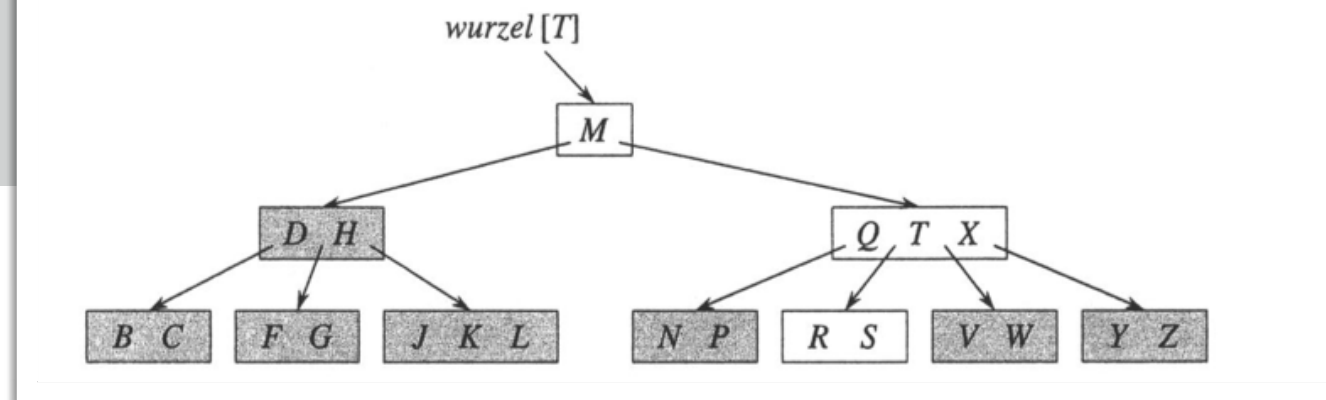
Definition 4.13 (B-Baum)



B-Bäume

Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

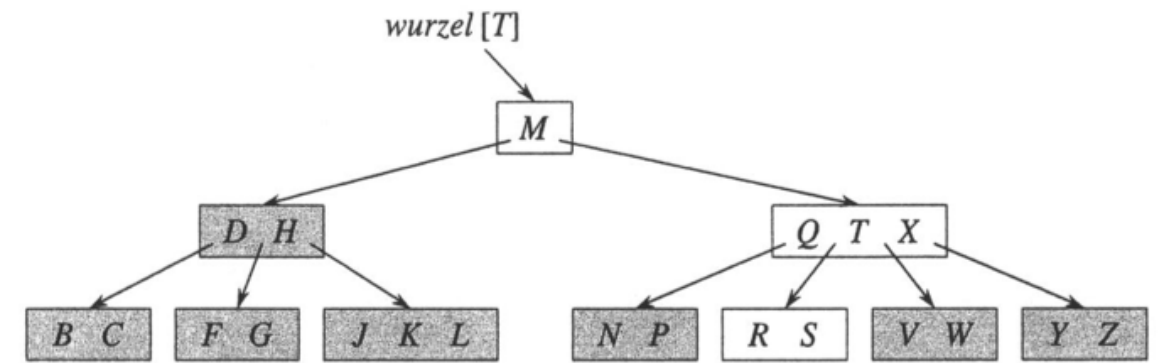


B-Bäume

Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

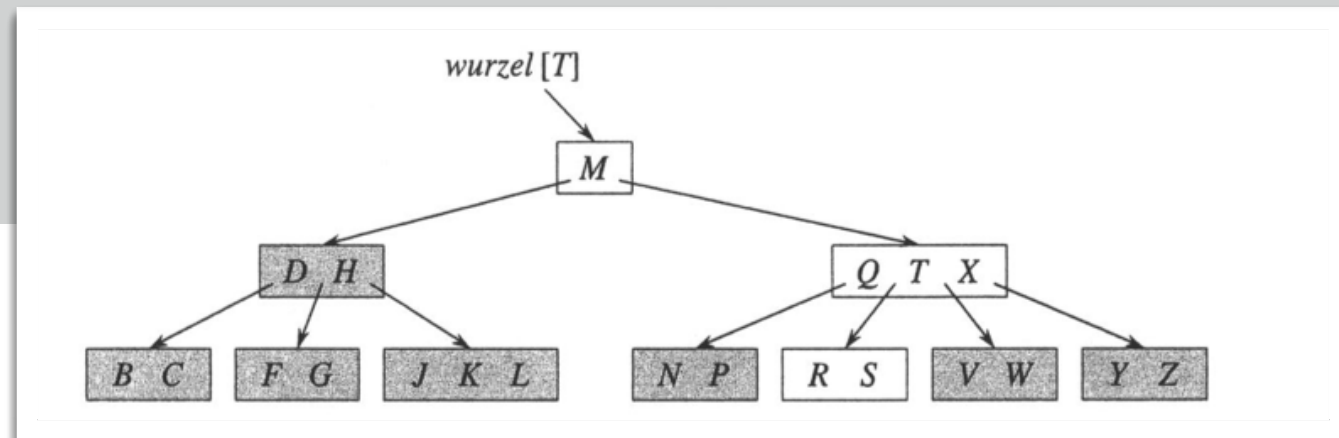
1. Jeder Knoten hat die folgenden Attribute:
 - a. die Anzahl $n[x]$ der in x gespeicherten Schlüssel
 - b. die sortiert gespeicherten Schlüssel
 - c. ein boolscher Wert, der anzeigt, ob x ein Blatt ist



Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

1. Jeder Knoten hat die folgenden Attribute:
 - a. die Anzahl $n[x]$ der in x gespeicherten Schlüssel
 - b. die sortiert gespeicherten Schlüssel
 - c. ein boolscher Wert, der anzeigt, ob x ein Blatt ist
2. Jeder innere Knoten enthält $n[x]+1$ Zeiger auf seine Kinder

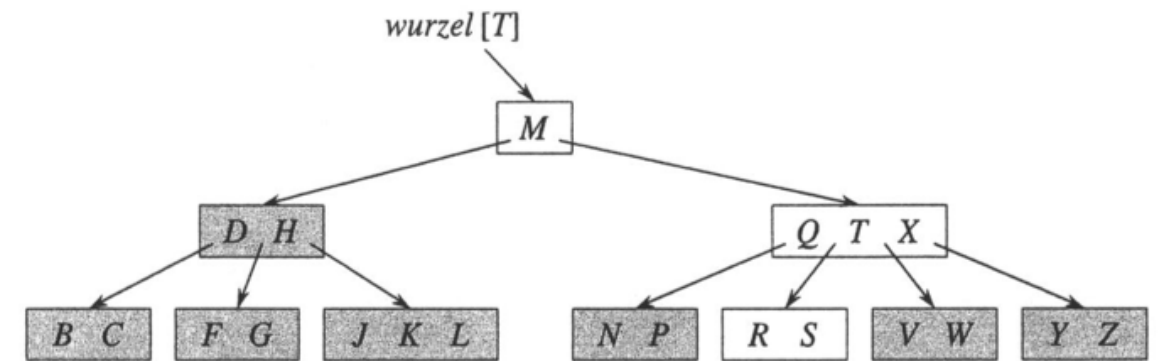


B-Bäume

Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

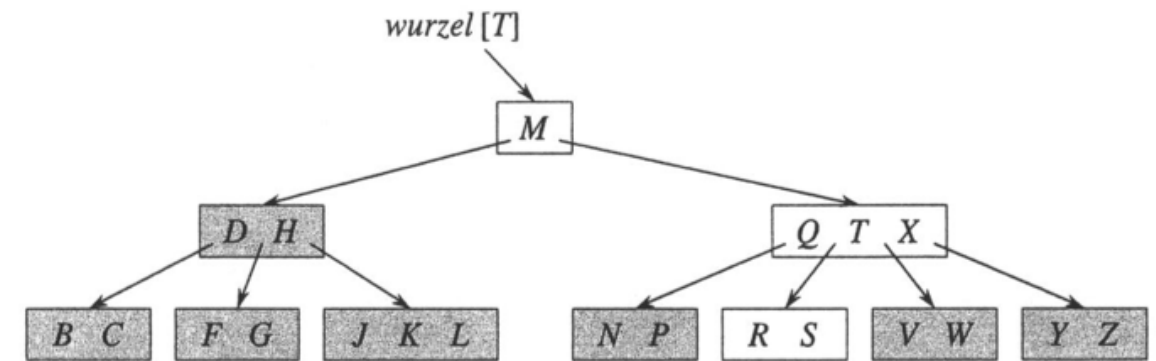
1. Jeder Knoten hat die folgenden Attribute:
 - a. die Anzahl $n[x]$ der in x gespeicherten Schlüssel
 - b. die sortiert gespeicherten Schlüssel
 - c. ein boolscher Wert, der anzeigt, ob x ein Blatt ist
2. Jeder innere Knoten enthält $n[x]+1$ Zeiger auf seine Kinder
3. Die Schlüssel unterteilen die darunter stehenden Teilbäume nach Größe



Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

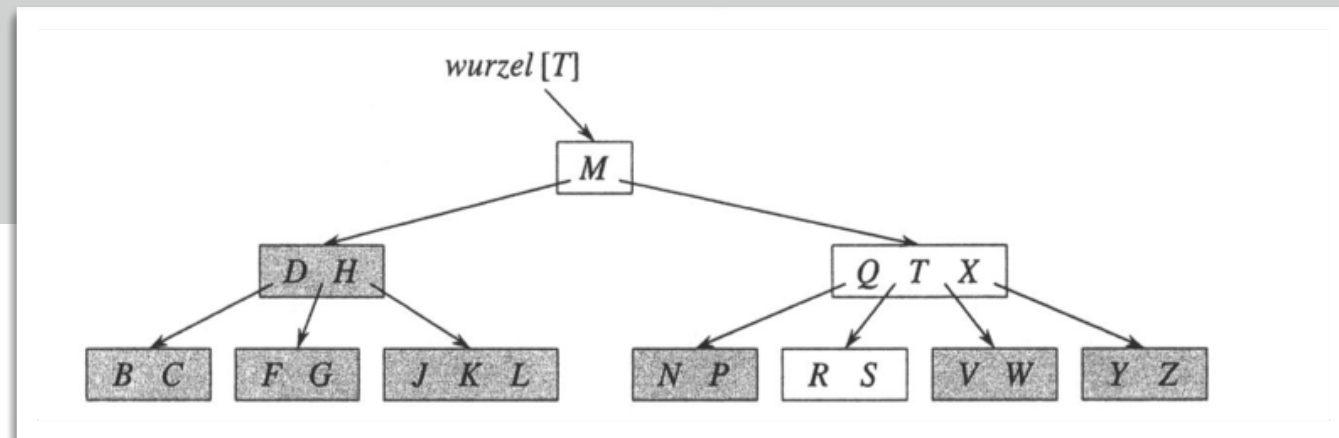
1. Jeder Knoten hat die folgenden Attribute:
 - a. die Anzahl $n[x]$ der in x gespeicherten Schlüssel
 - b. die sortiert gespeicherten Schlüssel
 - c. ein boolscher Wert, der anzeigt, ob x ein Blatt ist
2. Jeder innere Knoten enthält $n[x]+1$ Zeiger auf seine Kinder
3. Die Schlüssel unterteilen die darunter stehenden Teilbäume nach Größe
4. Alle Blätter haben gleiche Tiefe



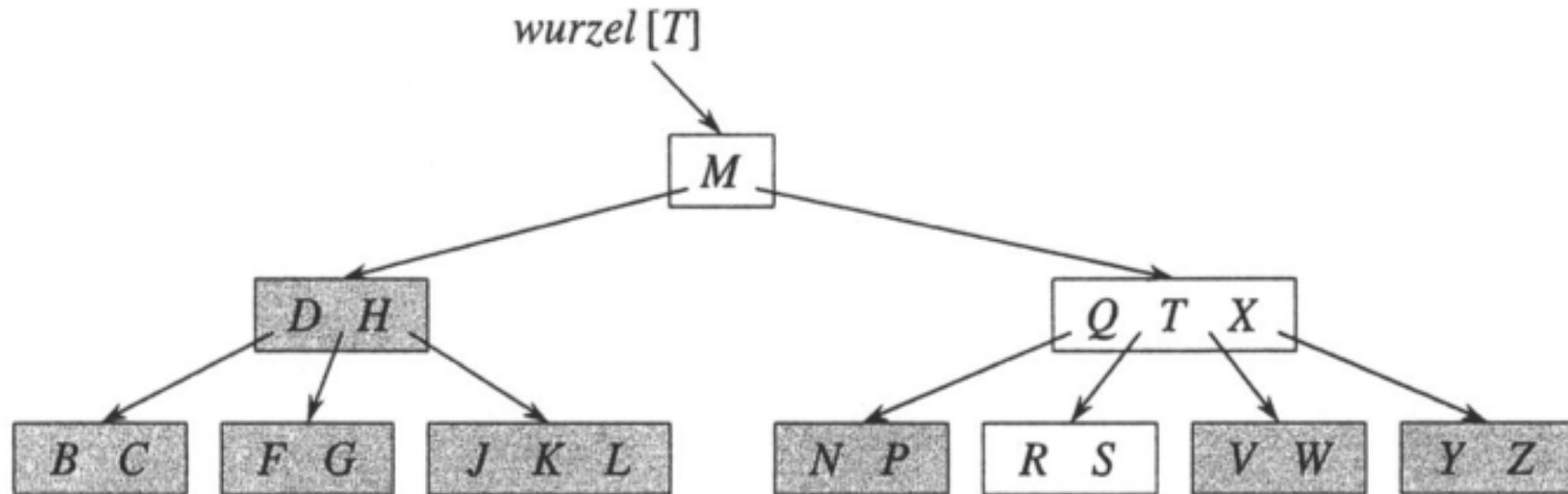
Definition 4.13 (B-Baum)

Ein B-Baum ist ein gerichteter Baum mit den Eigenschaften:

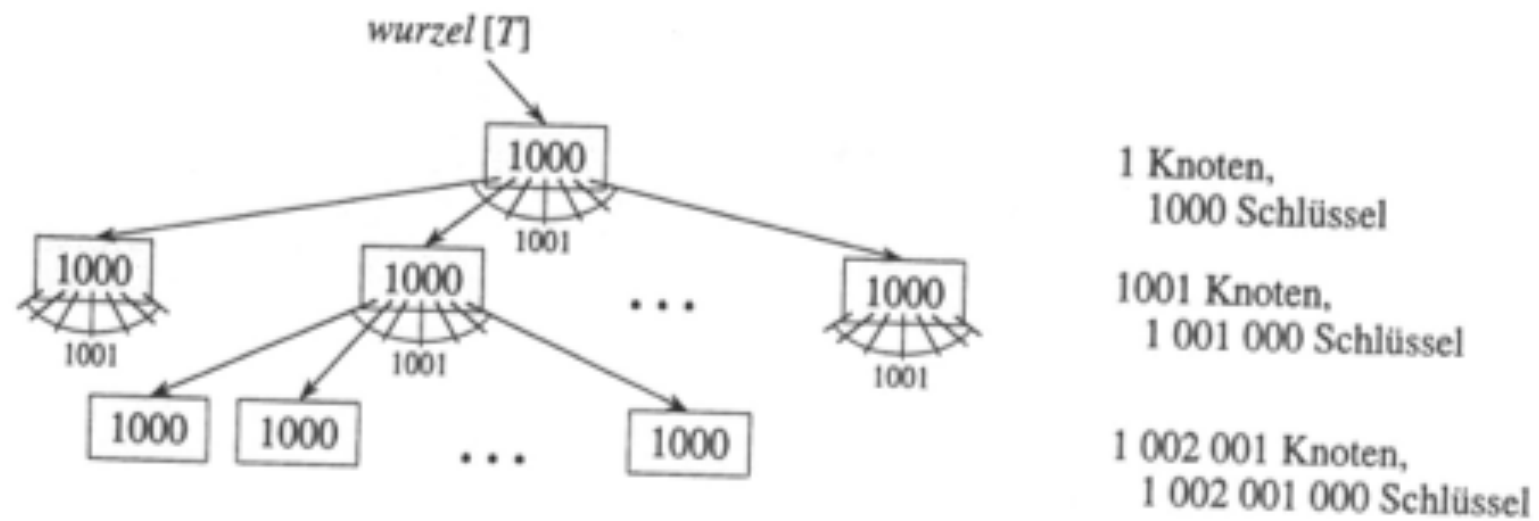
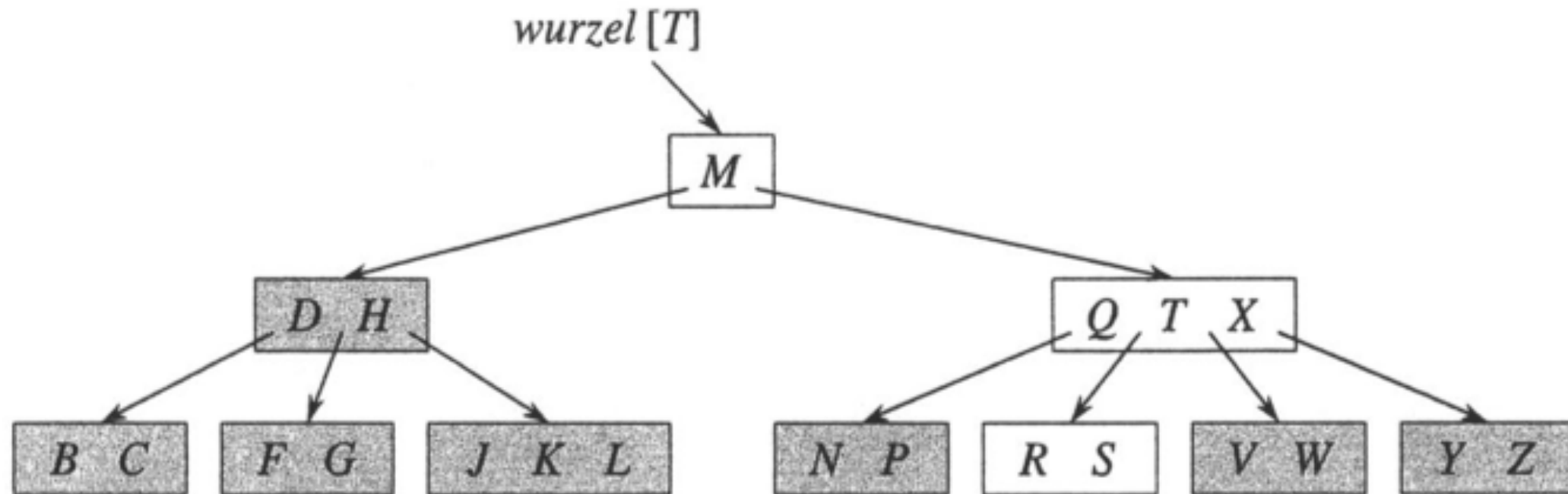
1. Jeder Knoten hat die folgenden Attribute:
 - a. die Anzahl $n[x]$ der in x gespeicherten Schlüssel
 - b. die sortiert gespeicherten Schlüssel
 - c. ein boolscher Wert, der anzeigt, ob x ein Blatt ist
2. Jeder innere Knoten enthält $n[x]+1$ Zeiger auf seine Kinder
3. Die Schlüssel unterteilen die darunter stehenden Teilbäume nach Größe
4. Alle Blätter haben gleiche Tiefe
5. Jeder Knoten hat Mindest- und Maximalzahl von Schlüsseln
 - a. Jeder Knoten (außer der Wurzel) hat mindestens $t-1$ Schlüssel (Also hat jeder innere Knoten mindestens t Kinder)
 - b. Jeder Knoten hat höchstens $2t-1$ Schlüssel, also höchstens $2t$ Kinder



B-Bäume



B-Bäume



B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$
- balanciert: $n \geq 4000000$

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$
- balanciert: $n \geq 4000000$

Binärer Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2$

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$
- balanciert: $n \geq 4000000$

Binärer Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2$

- jeder Knoten speichert 1 Schlüssel und 2 Links

B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$
- balanciert: $n \geq 4000000$

Binärer Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2$

- jeder Knoten speichert 1 Schlüssel und 2 Links
- vollständig: $n = 7$

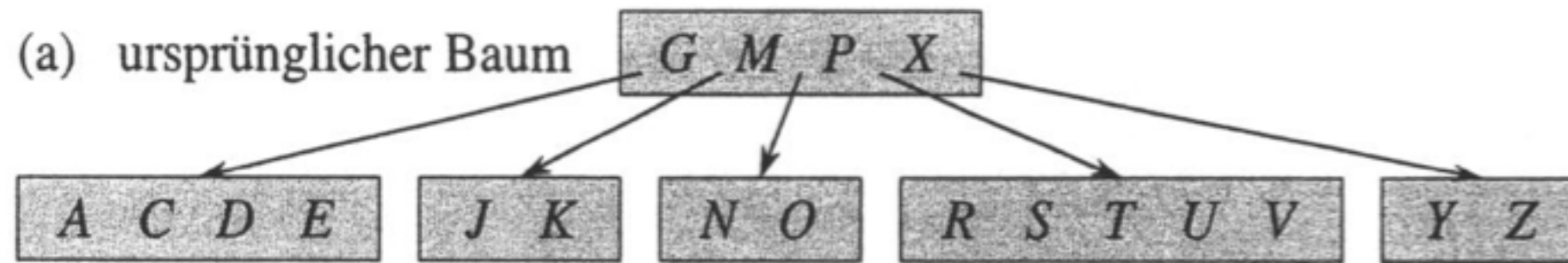
B-Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2048$

- jeder Knoten speichert bis zu 2047 Schlüssel und 2048 Links
- vollständig: $n = 8581000000$
- balanciert: $n \geq 4000000$

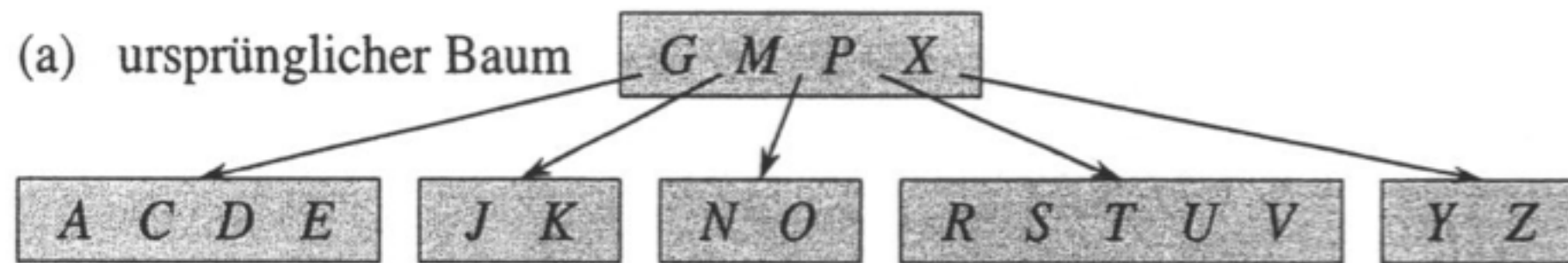
Binärer Baum der Höhe $h=3$ und Fan-Out-Factor $q = 2$

- jeder Knoten speichert 1 Schlüssel und 2 Links
- vollständig: $n = 7$
- balanciert: $n \geq 4$

B-Bäume — Einfügen

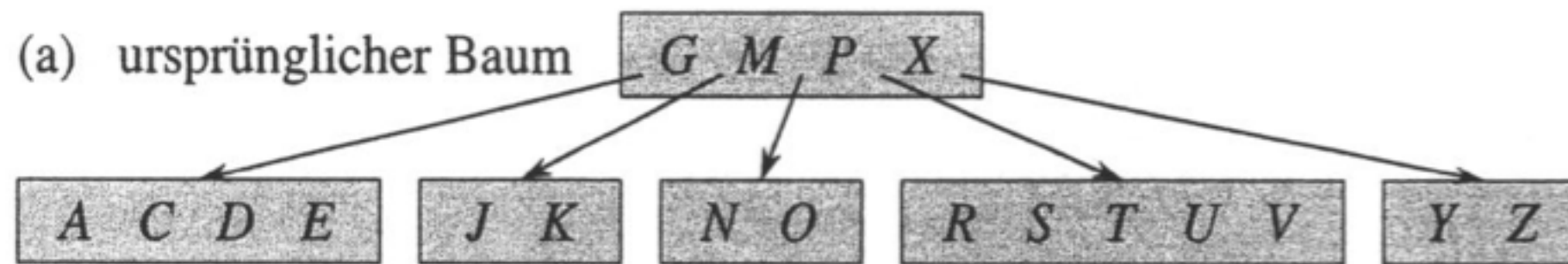


B-Bäume — Einfügen

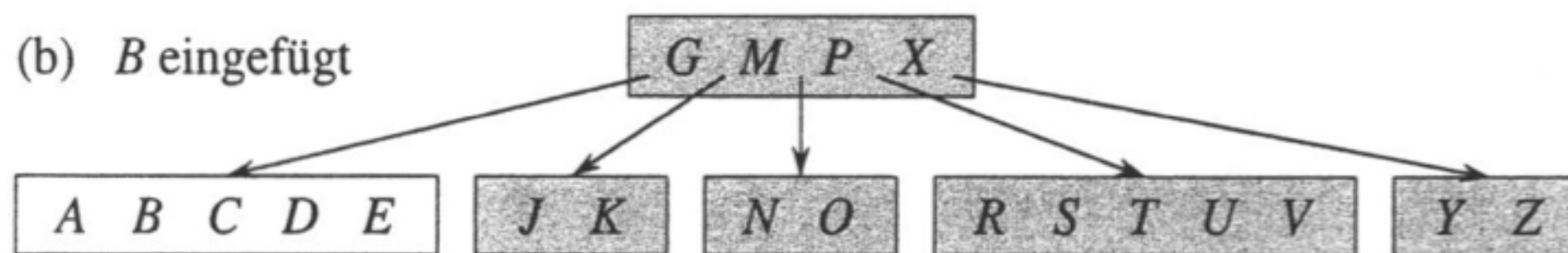


Füge B ein!

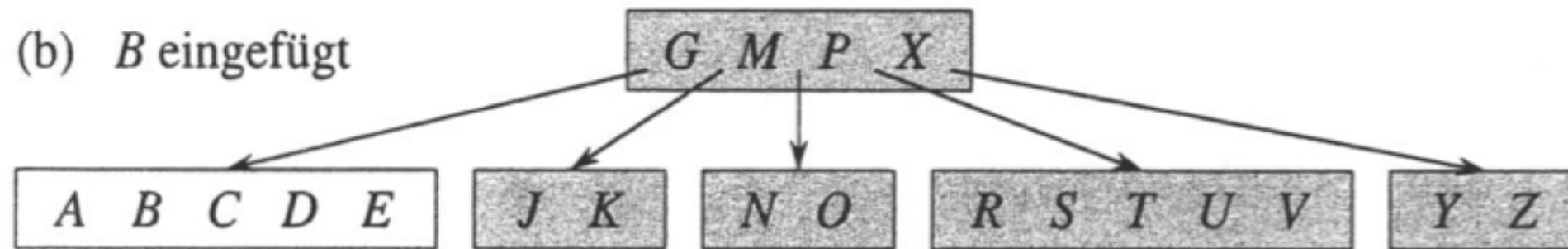
B-Bäume — Einfügen



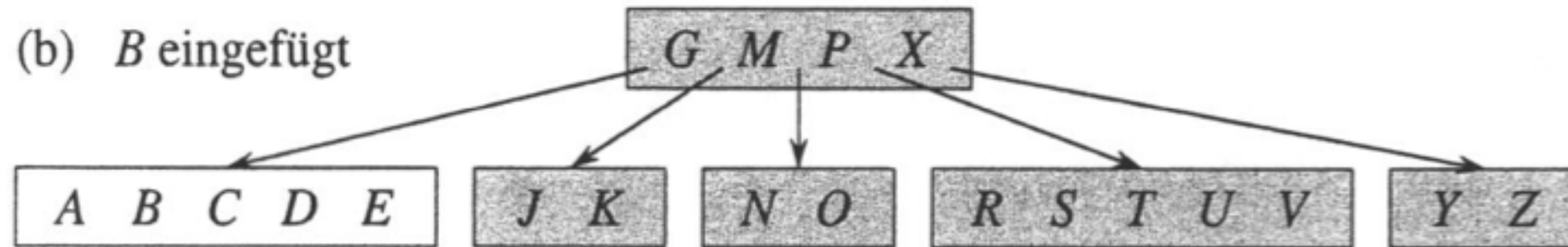
Füge B ein!



B-Bäume — Einfügen



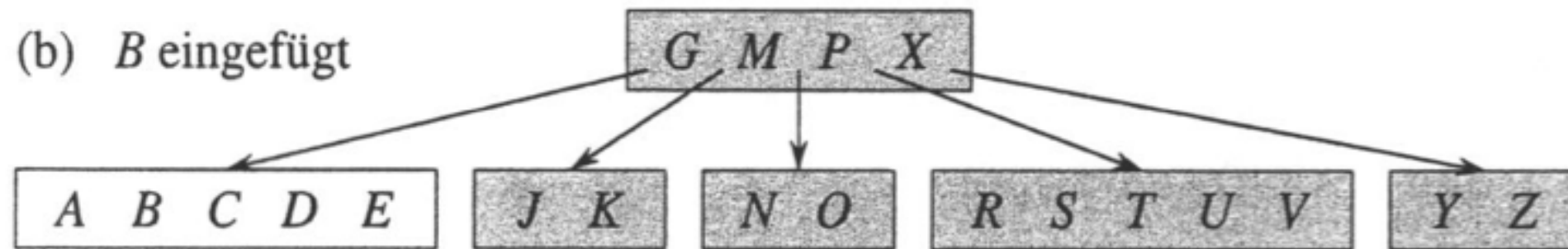
B-Bäume — Einfügen



Füge Q ein!

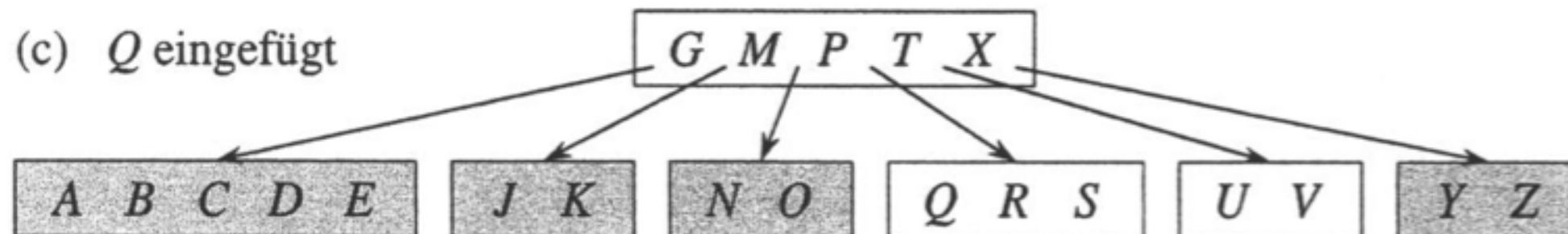
B-Bäume — Einfügen

(b) *B* eingefügt

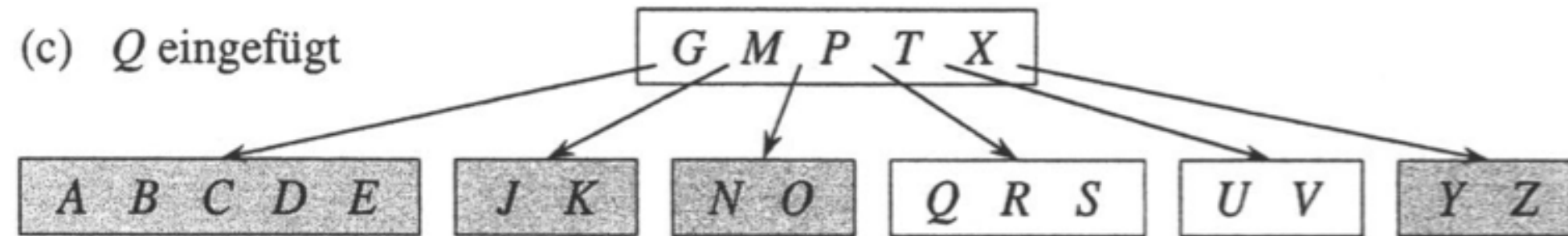


Füge *Q* ein!

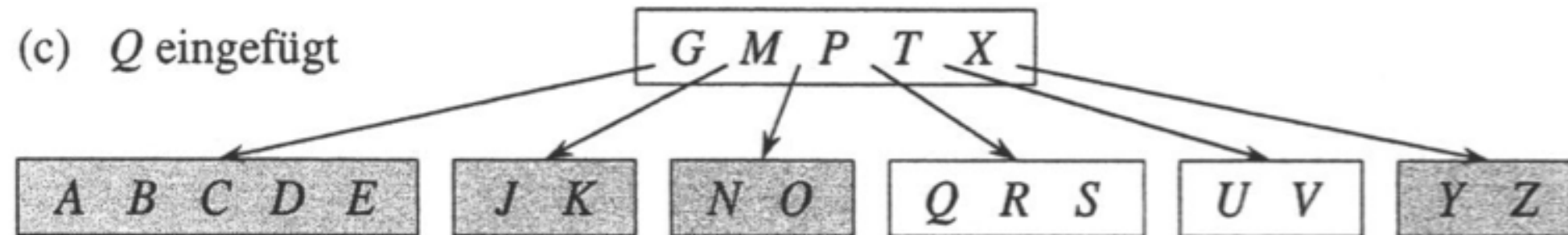
(c) *Q* eingefügt



B-Bäume — Einfügen

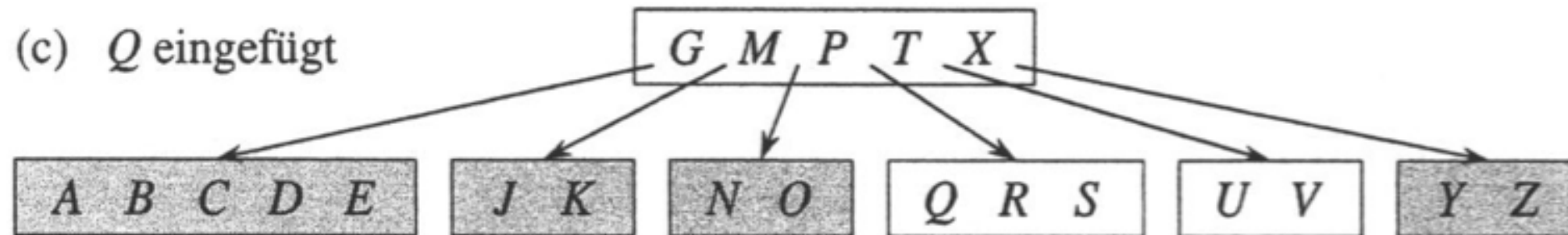


B-Bäume — Einfügen

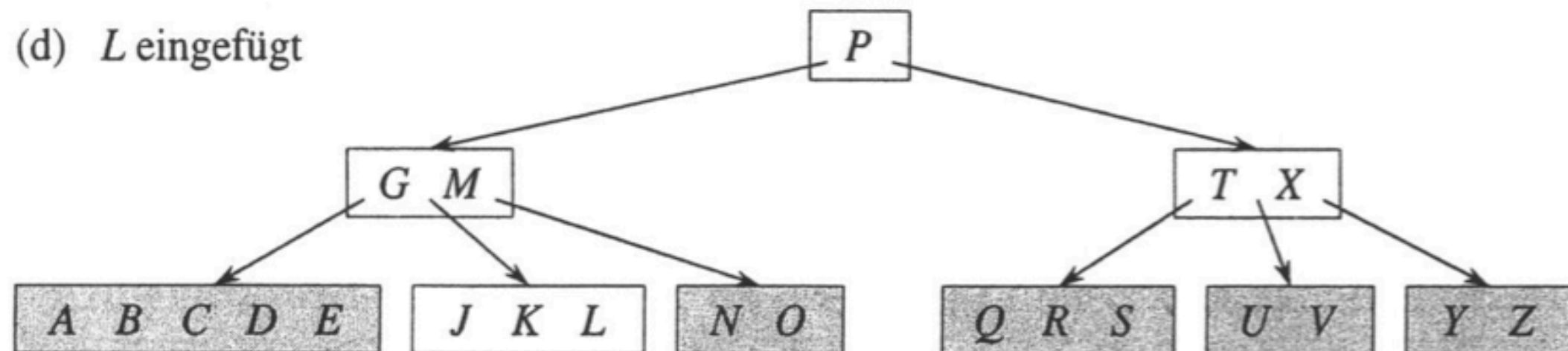


Füge L ein!

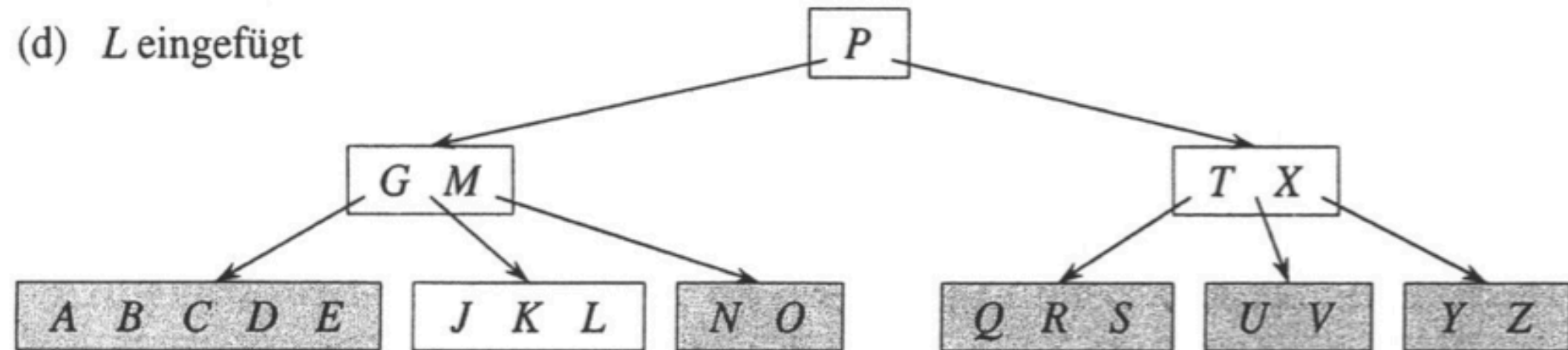
B-Bäume — Einfügen



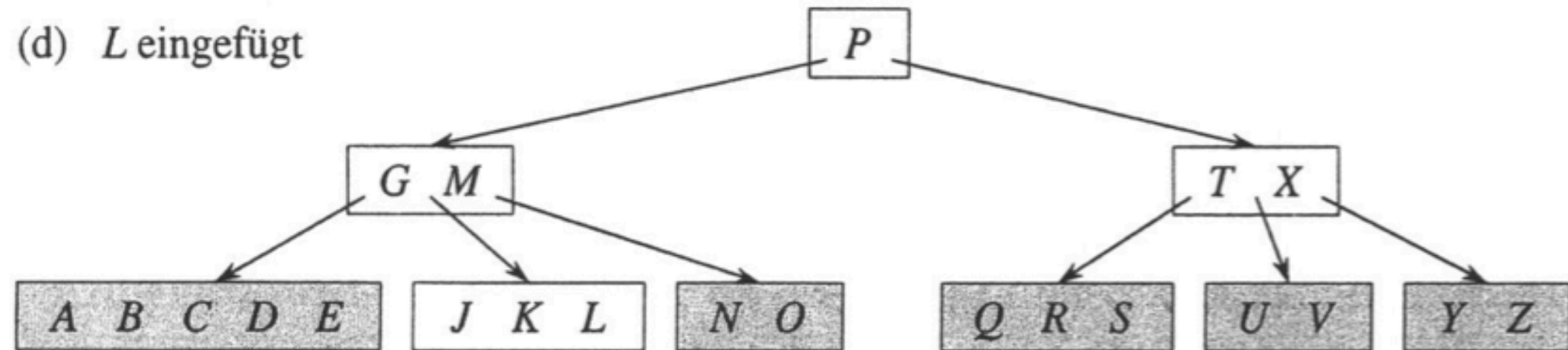
Füge *L* ein!



B-Bäume — Einfügen

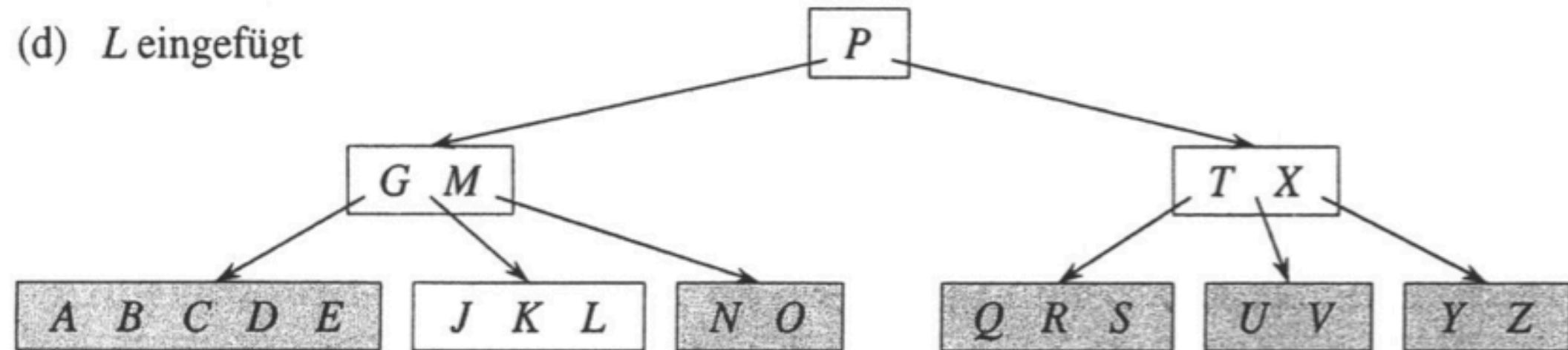


B-Bäume — Einfügen

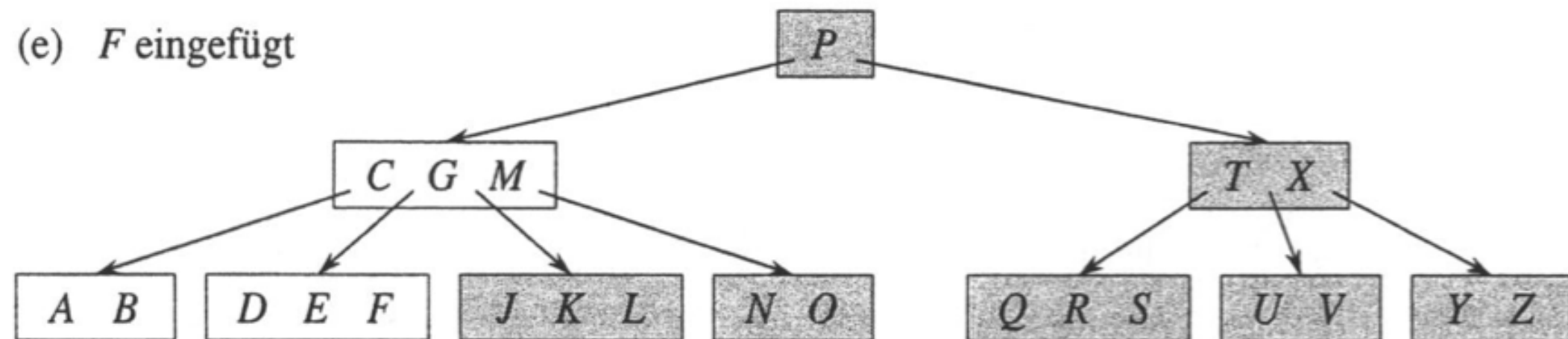


Füge *F* ein!

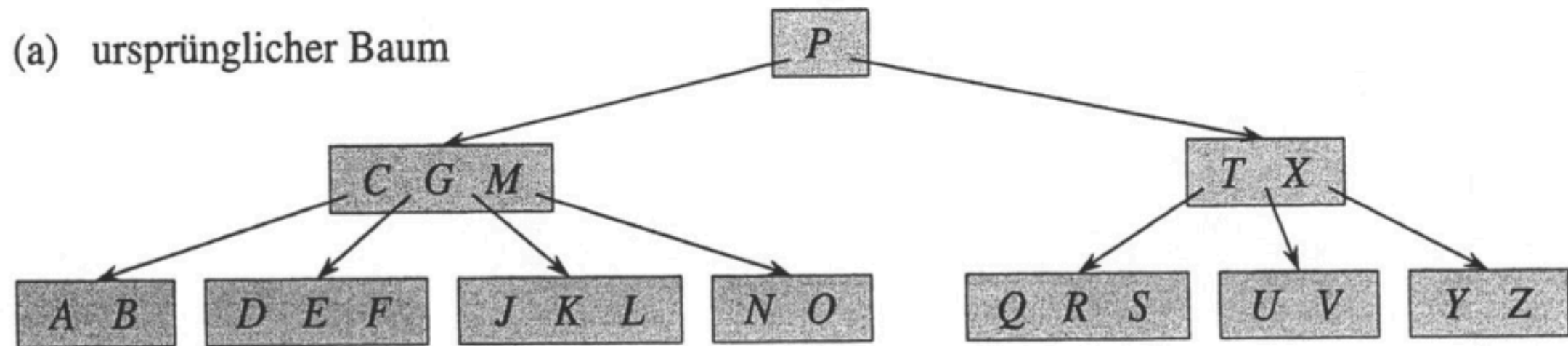
B-Bäume — Einfügen



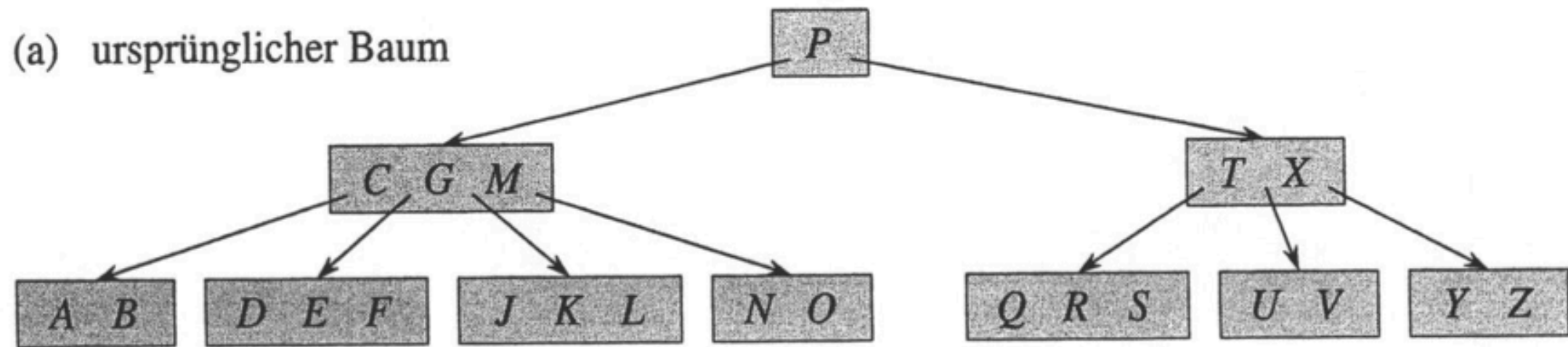
Füge *F* ein!



B-Bäume — Löschen

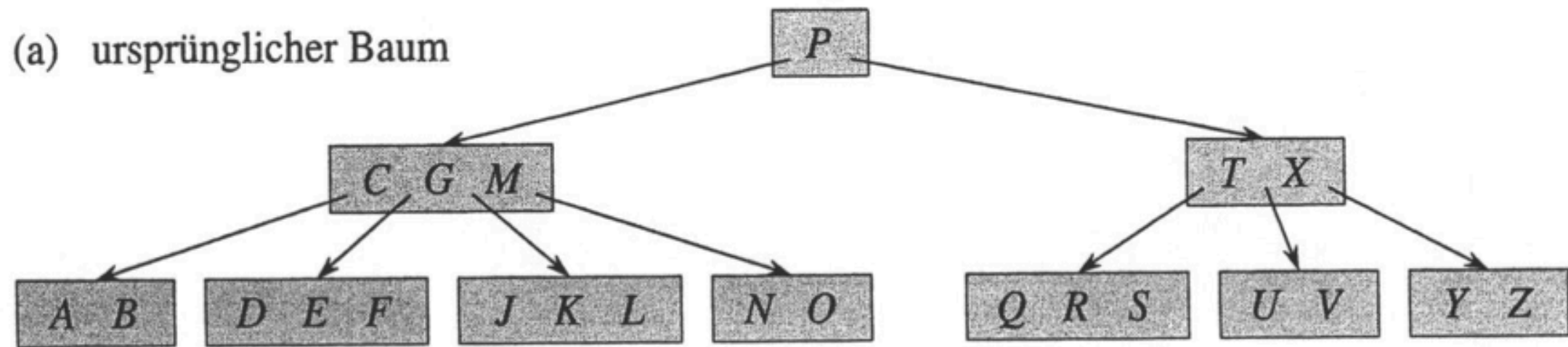


B-Bäume — Löschen

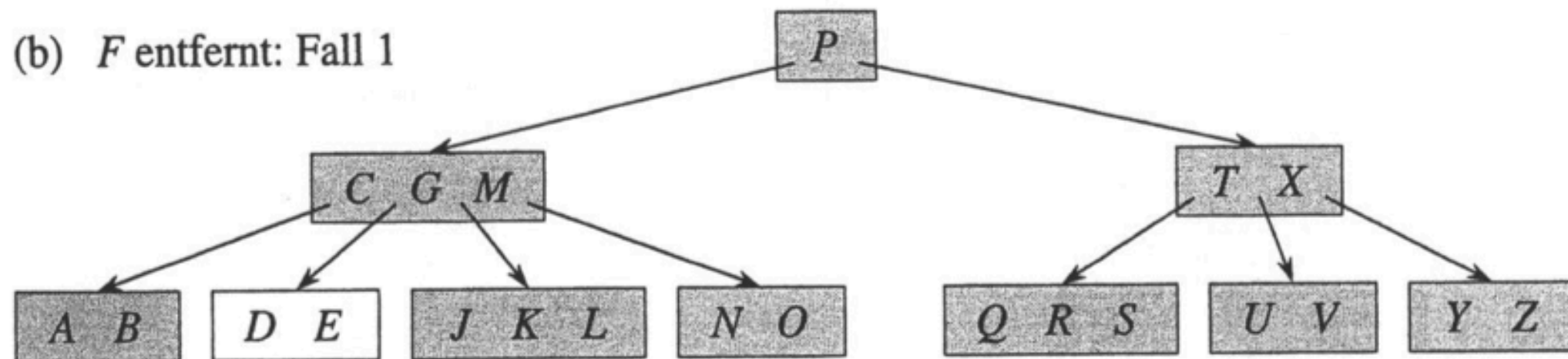


Lösche F!

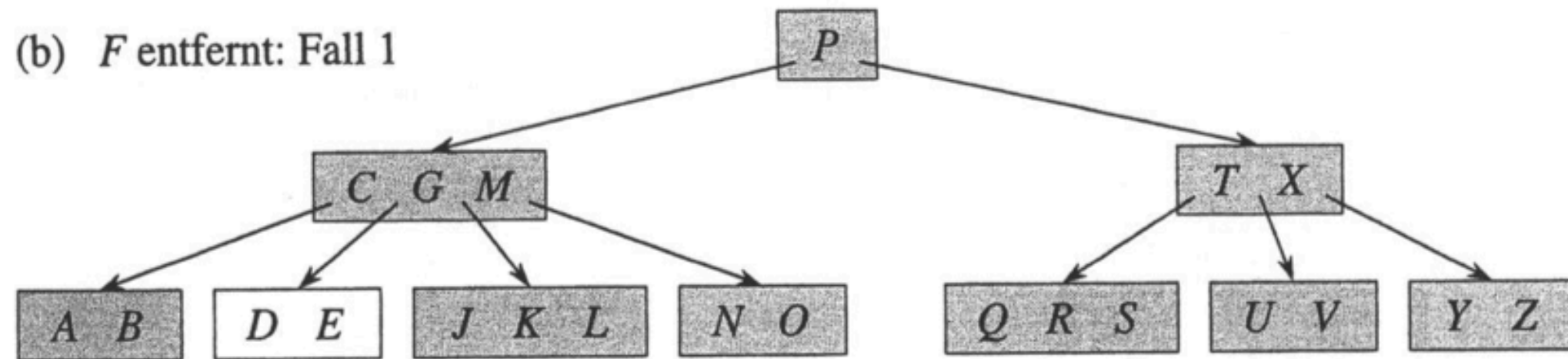
B-Bäume — Löschen



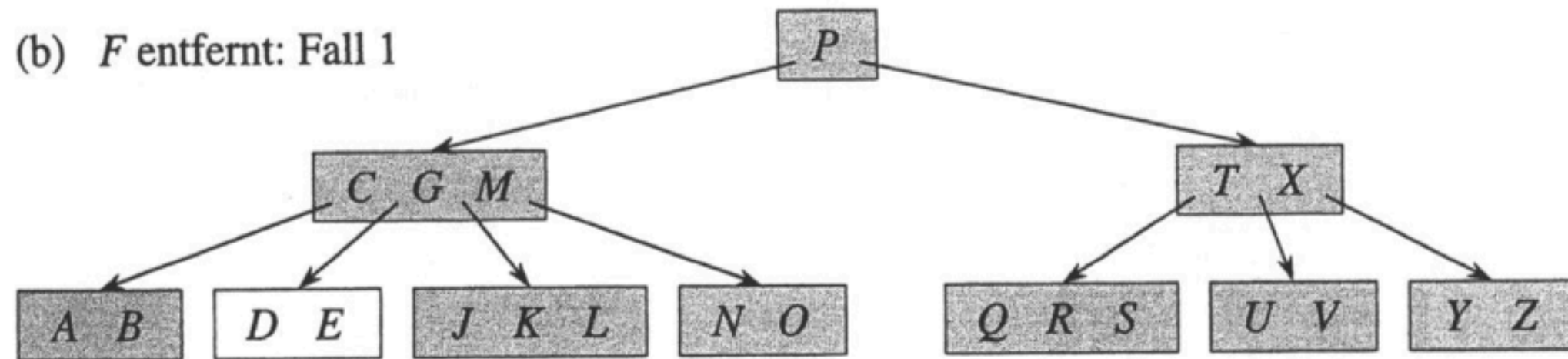
Lösche F!



B-Bäume — Löschen



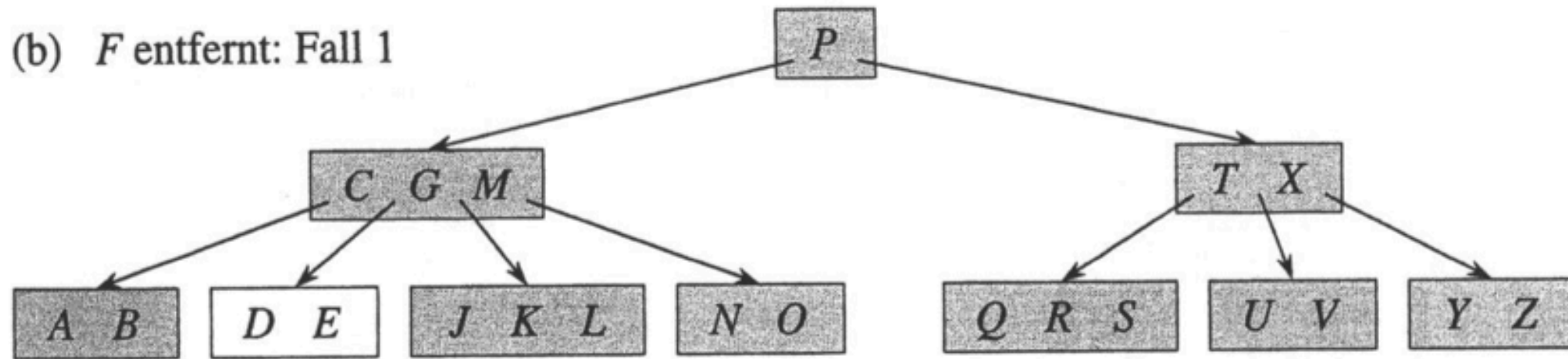
B-Bäume — Löschen



Lösche M!

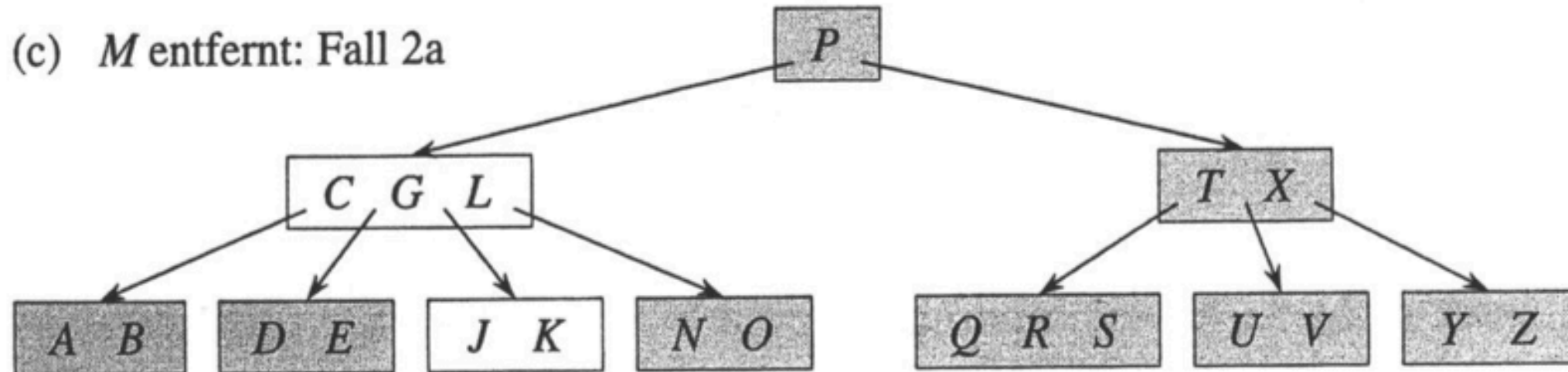
B-Bäume — Löschen

(b) F entfernt: Fall 1

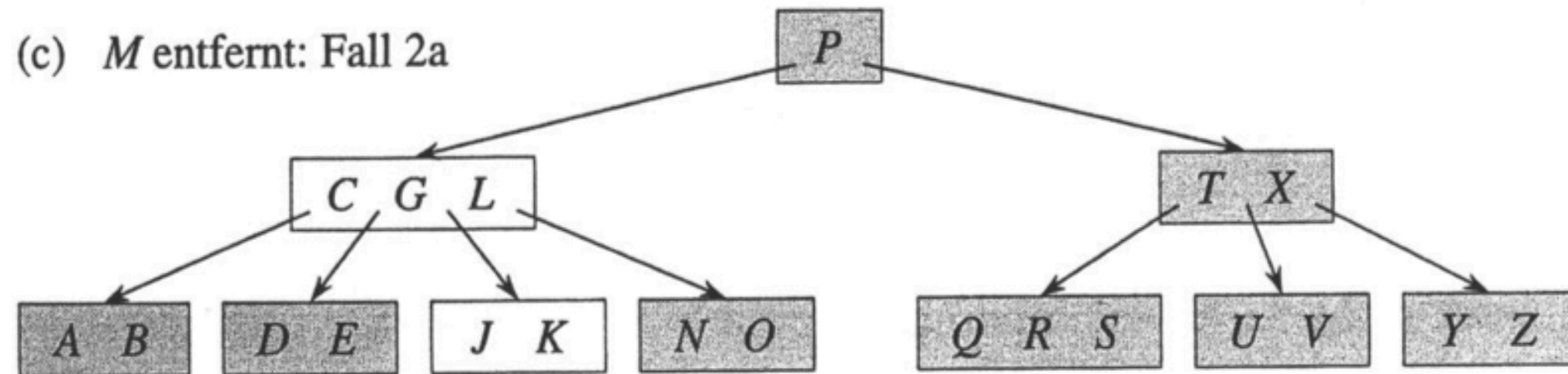


Lösche M !

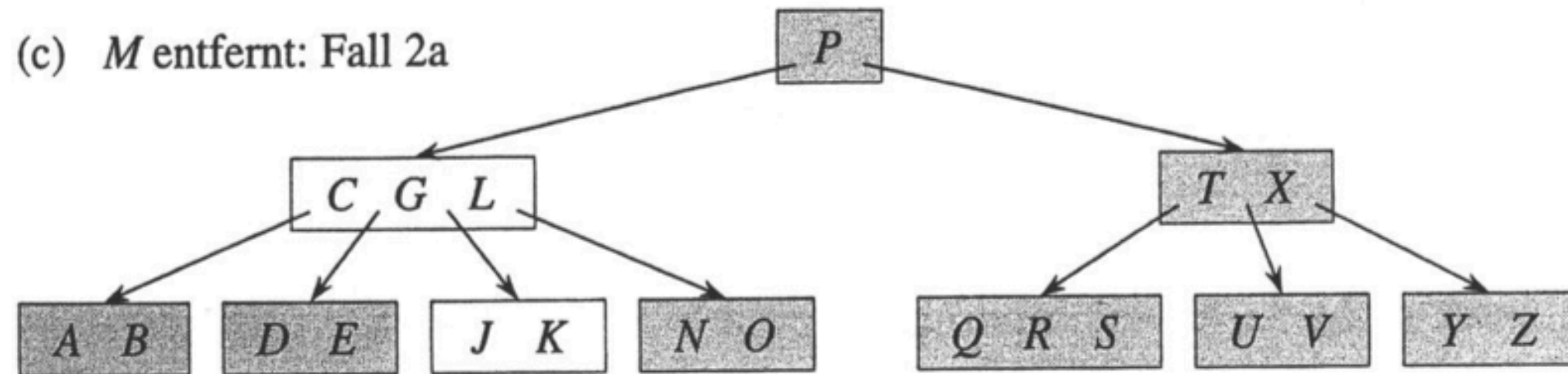
(c) M entfernt: Fall 2a



B-Bäume — Löschen



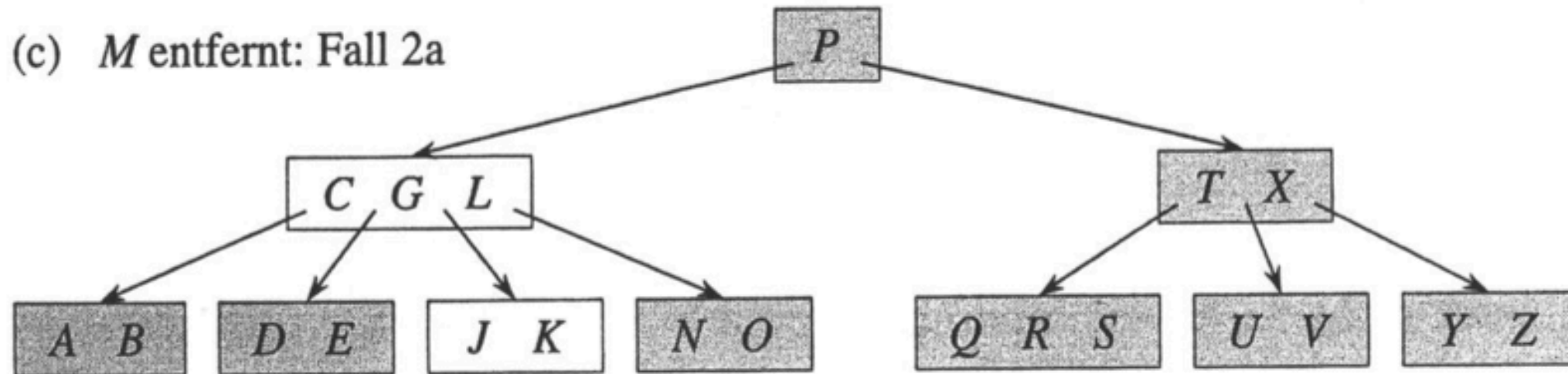
B-Bäume — Löschen



Lösche G!

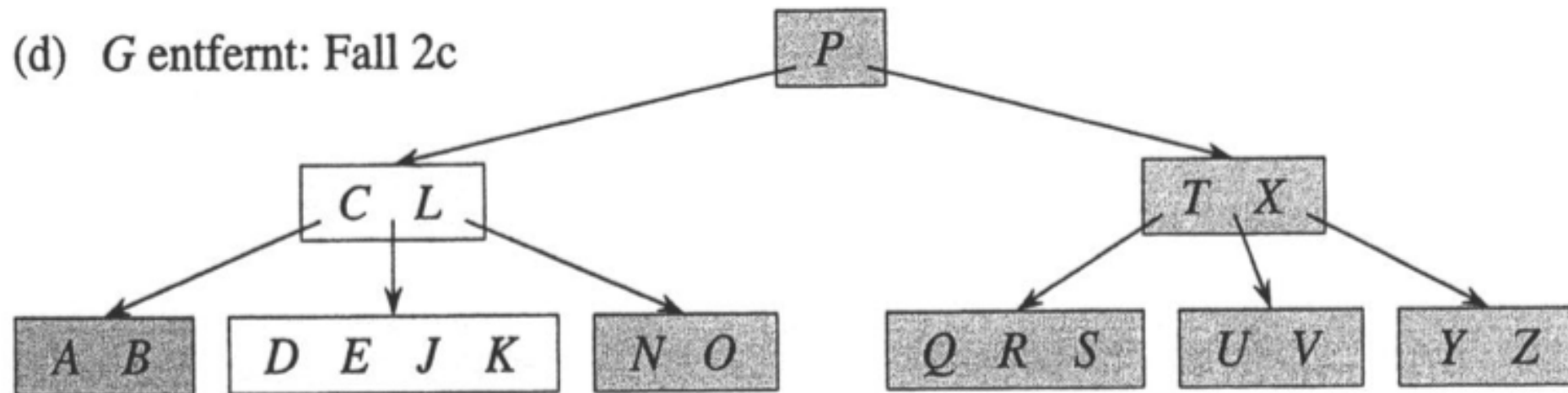
B-Bäume — Löschen

(c) M entfernt: Fall 2a

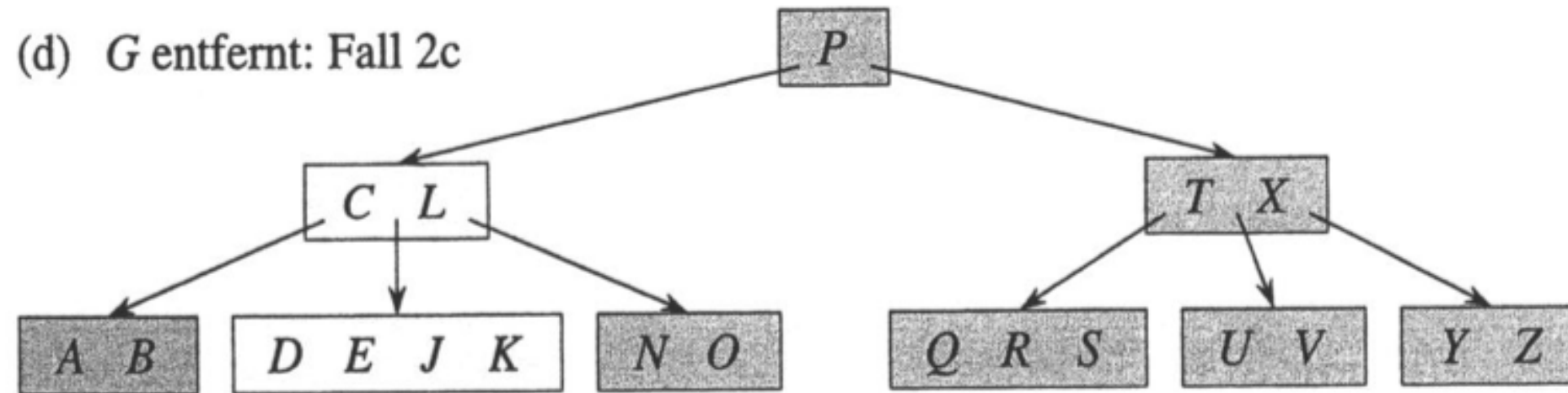


Lösche G!

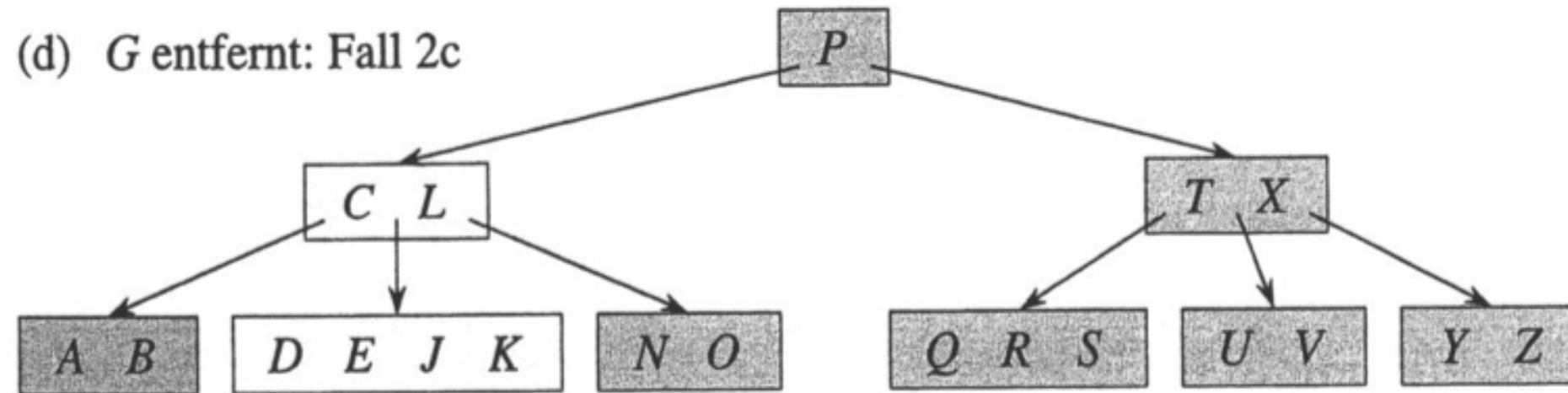
(d) G entfernt: Fall 2c



B-Bäume — Löschen

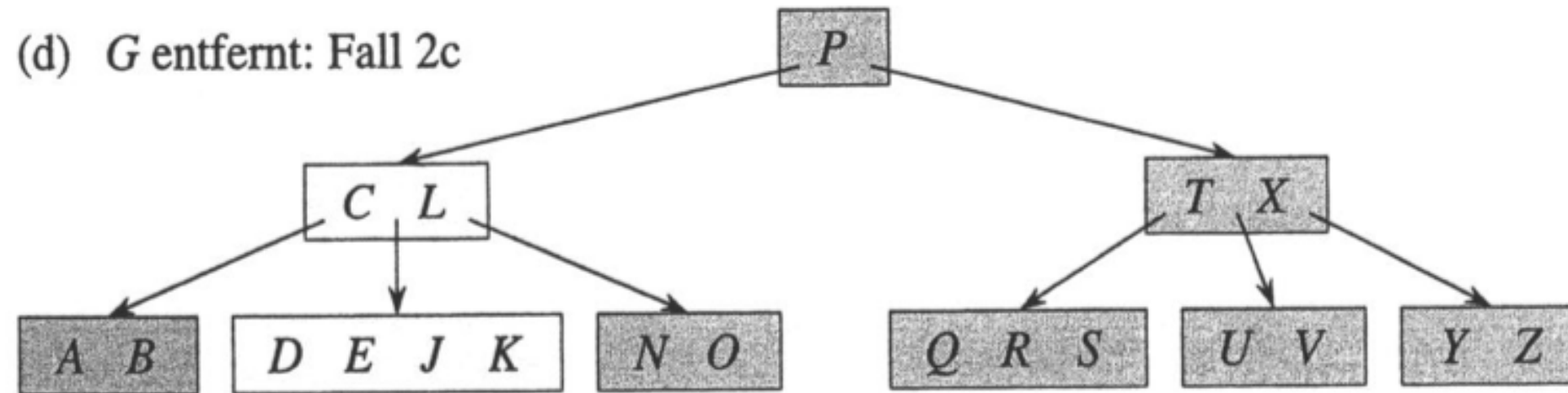


B-Bäume — Löschen

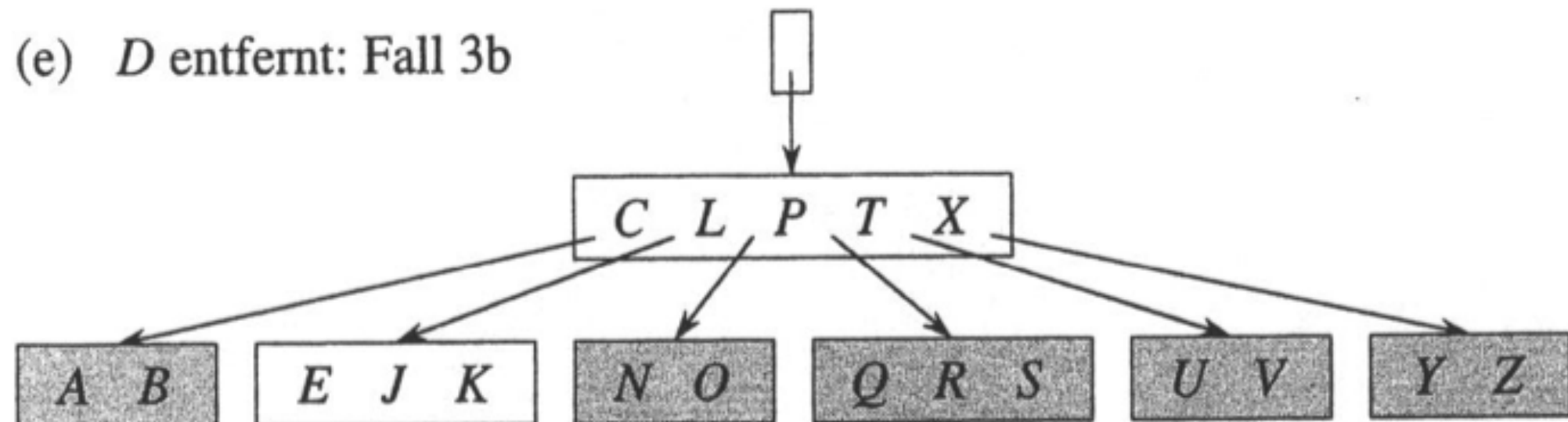


Lösche D!

B-Bäume — Löschen

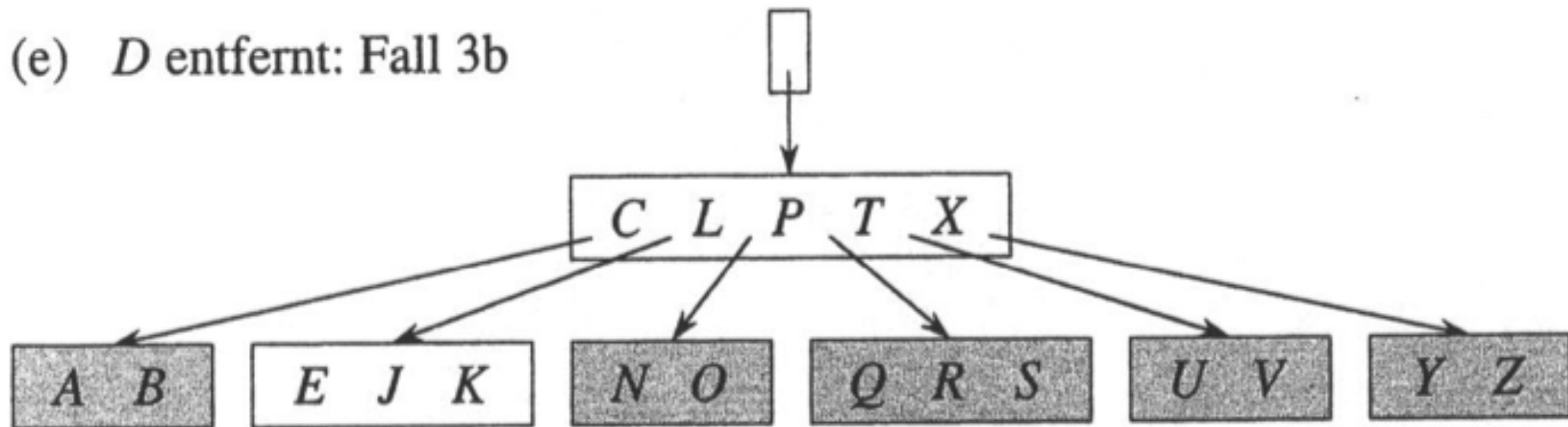


Lösche D!



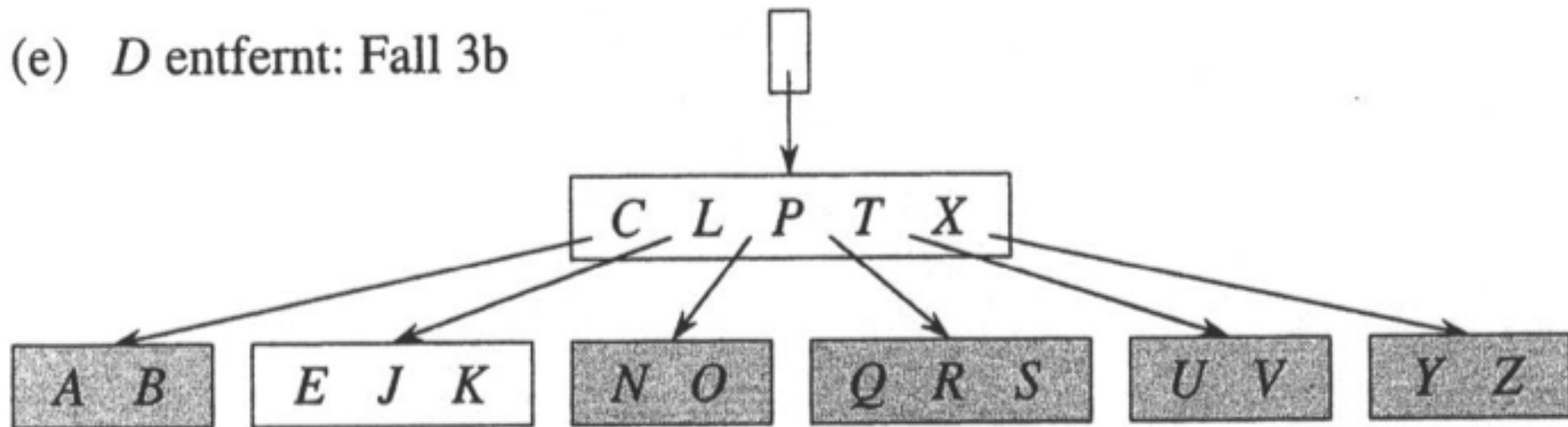
B-Bäume — Löschen

(e) *D* entfernt: Fall 3b

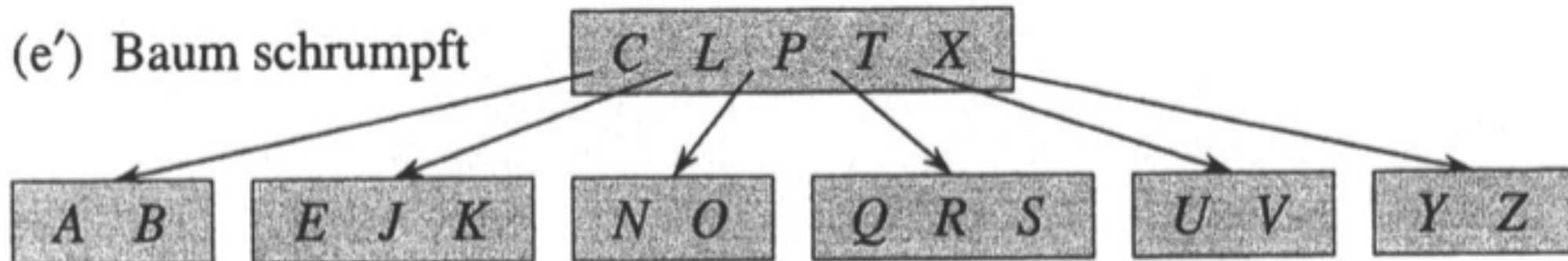


B-Bäume — Löschen

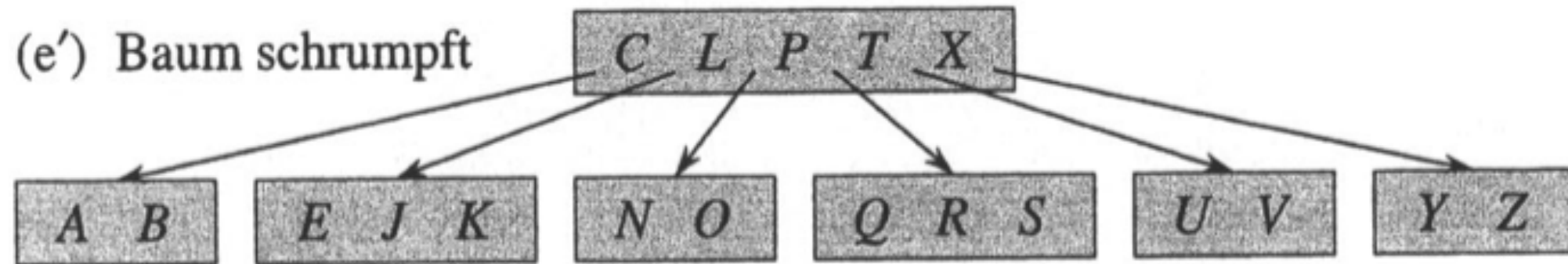
(e) *D* entfernt: Fall 3b



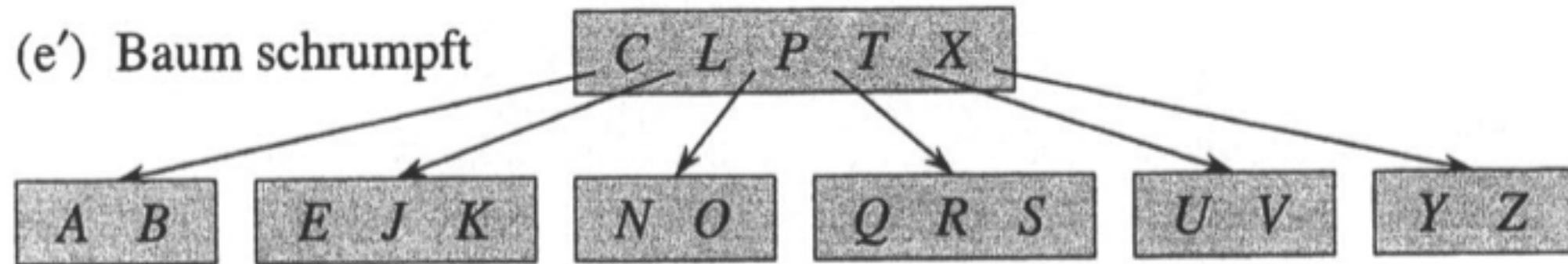
(e') Baum schrumpft



B-Bäume — Löschen

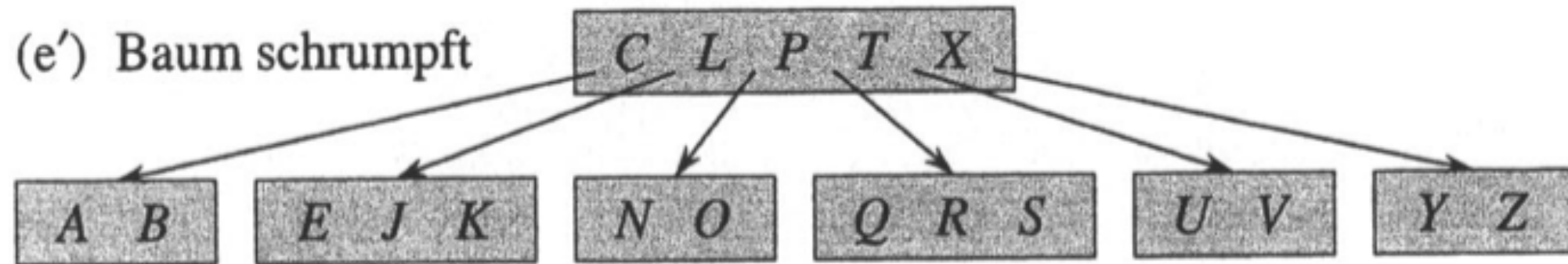


B-Bäume — Löschen

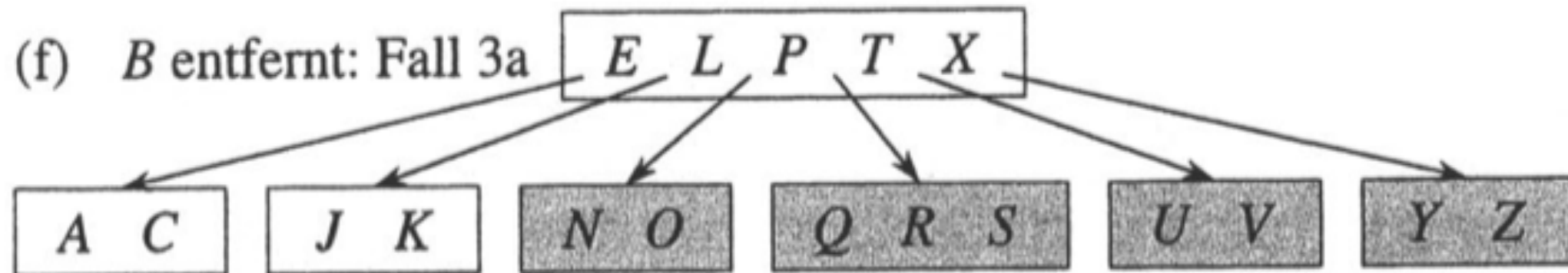


Lösche B!

B-Bäume — Löschen



Lösche B!



Satz 4.14

Ein B-Baum der Höhe h benötigt zur dynamischen Datenverwaltung im schlimmsten Fall $O(h)$ Plattenoperationen und $O(t \log_t n)$ CPU-Zeit.

Satz 4.14

Ein B-Baum der Höhe h benötigt zur dynamischen Datenverwaltung im schlimmsten Fall $O(h)$ Plattenoperationen und $O(t \log_t n)$ CPU-Zeit.



mehr dazu: Cormen, Kapitel 18.

Satz 4.14

Ein B-Baum der Höhe h benötigt zur dynamischen Datenverwaltung im schlimmsten Fall $O(h)$ Plattenoperationen und $O(t \log_t n)$ CPU-Zeit.



mehr dazu: Cormen, Kapitel 18.



Relationale Datenbanksysteme 2

4.10 Heaps

4.10 Heaps

4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.

4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente
immer oben/unten stehen.

4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente
immer oben/unten stehen.

Max-Heap

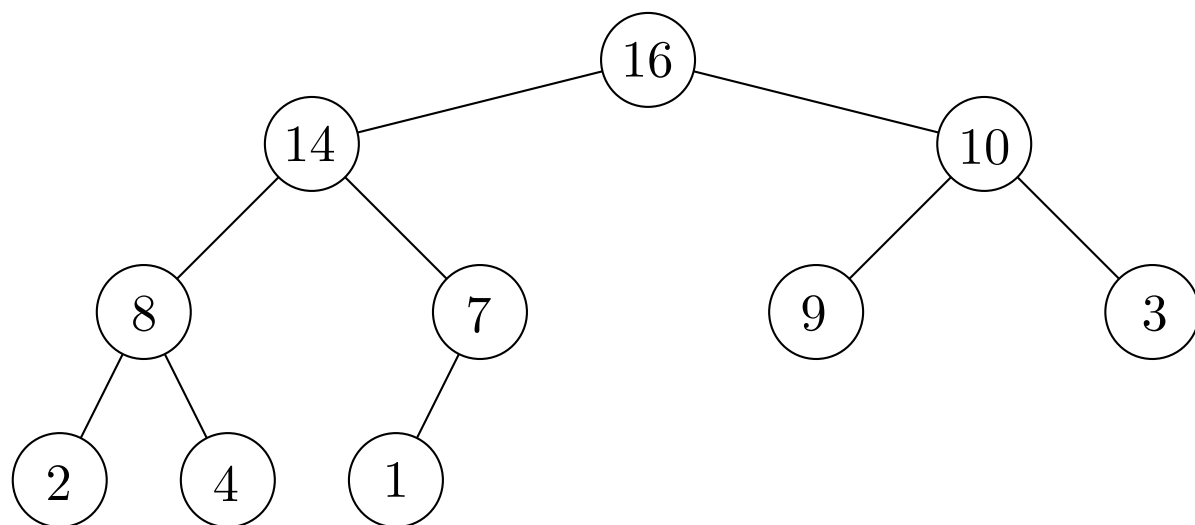


4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.



Max-Heap

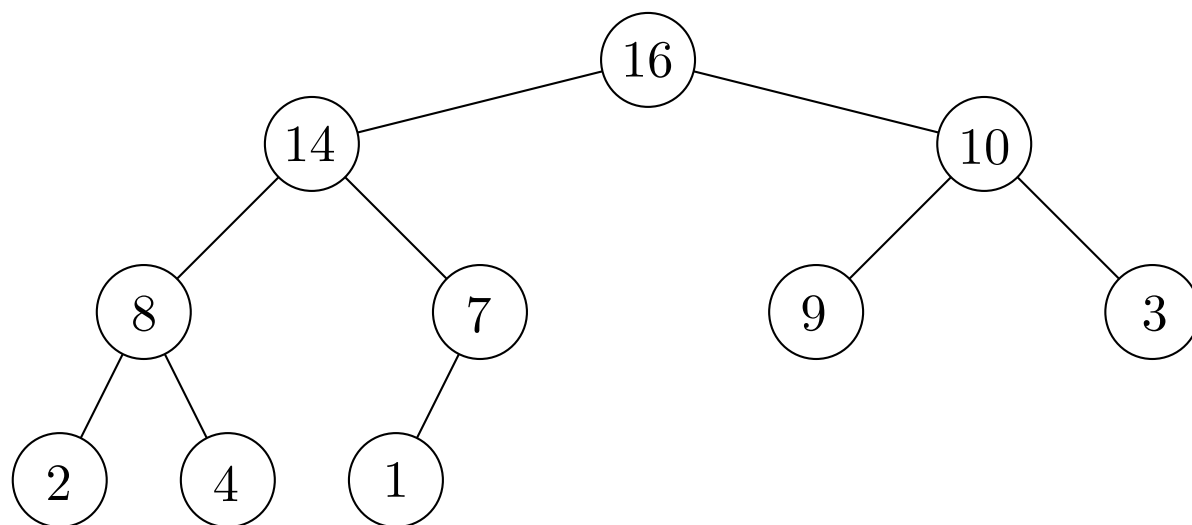


4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.



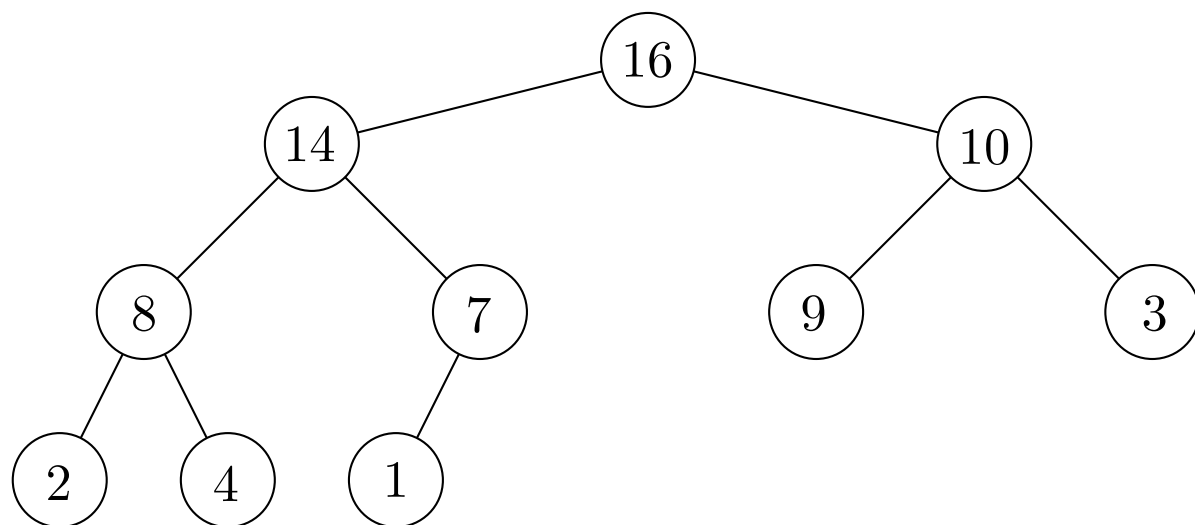
Max-Heap



4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.

Max-Heap

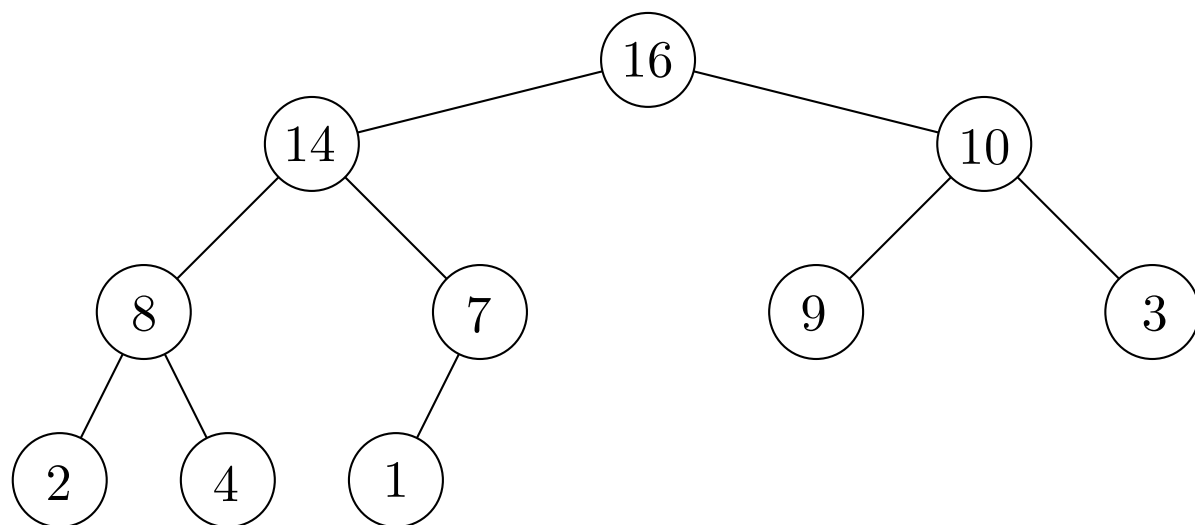


Min-Heap

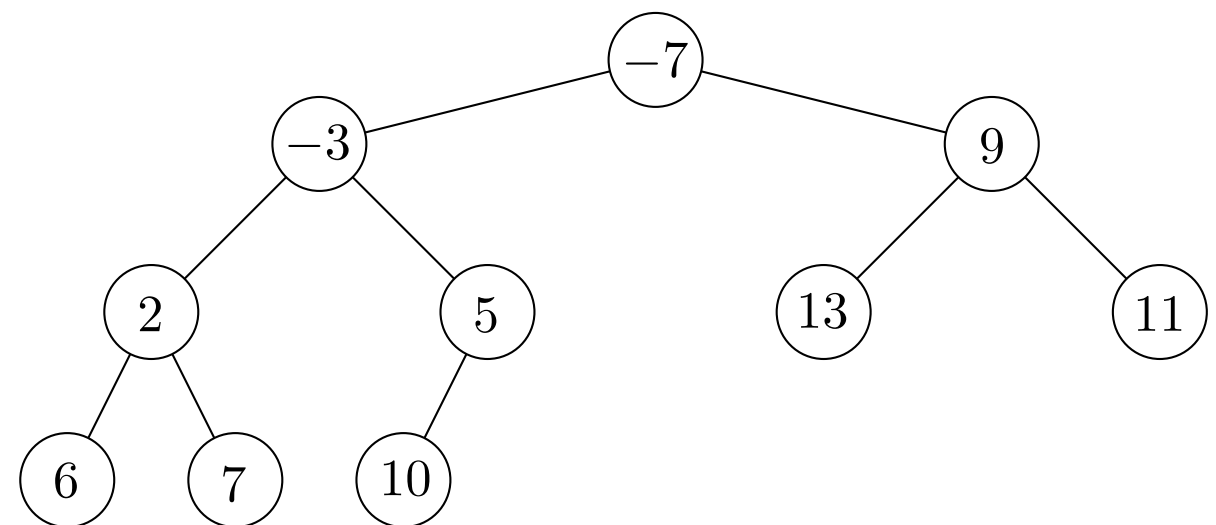
4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.

Max-Heap



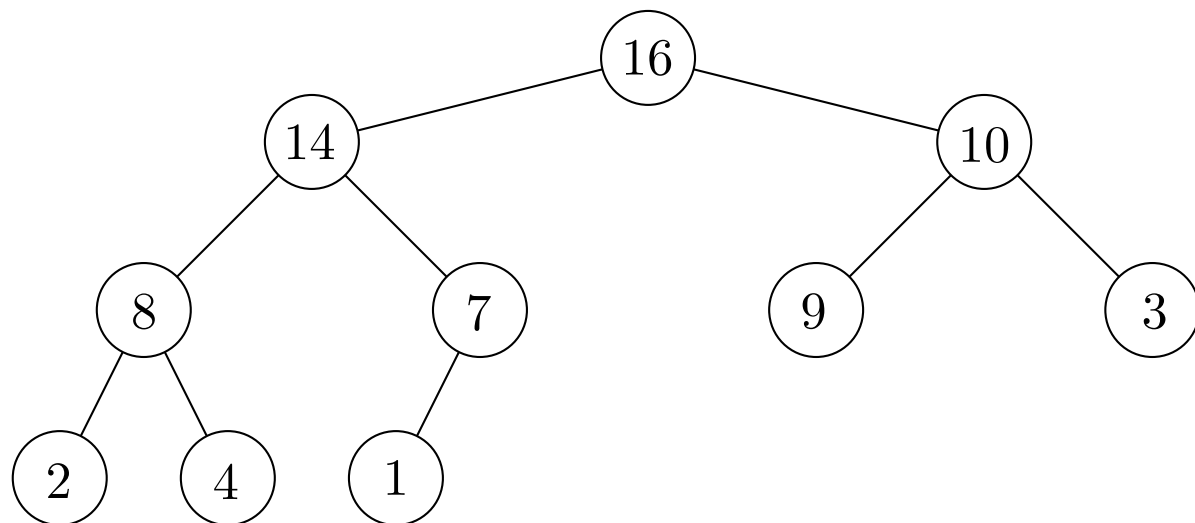
Min-Heap



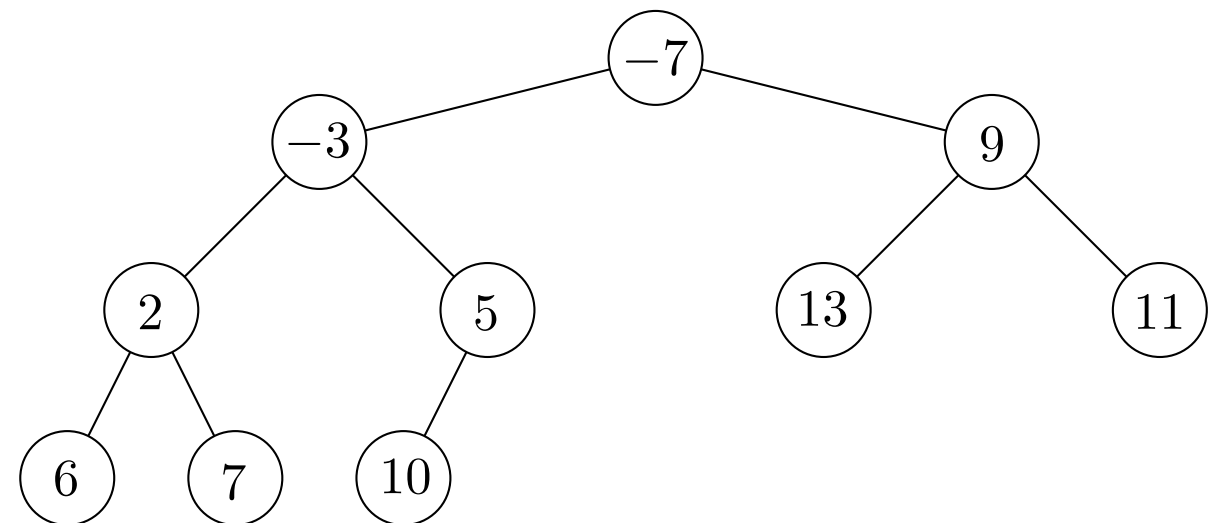
4.10 Heaps

Idee: Ordne Baum so, dass größere Elemente immer oben/unten stehen.

Max-Heap

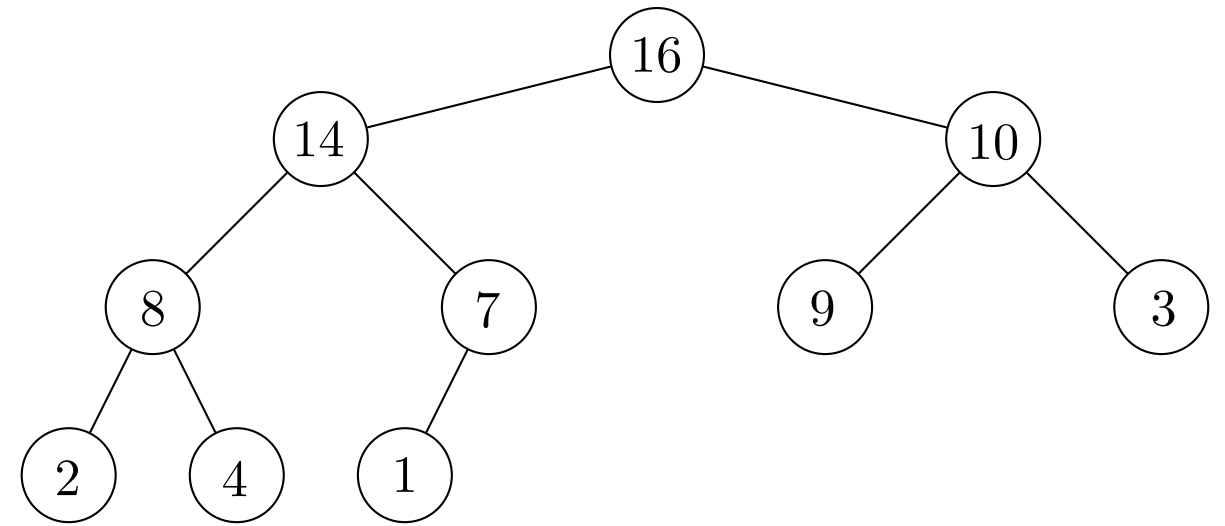


Min-Heap



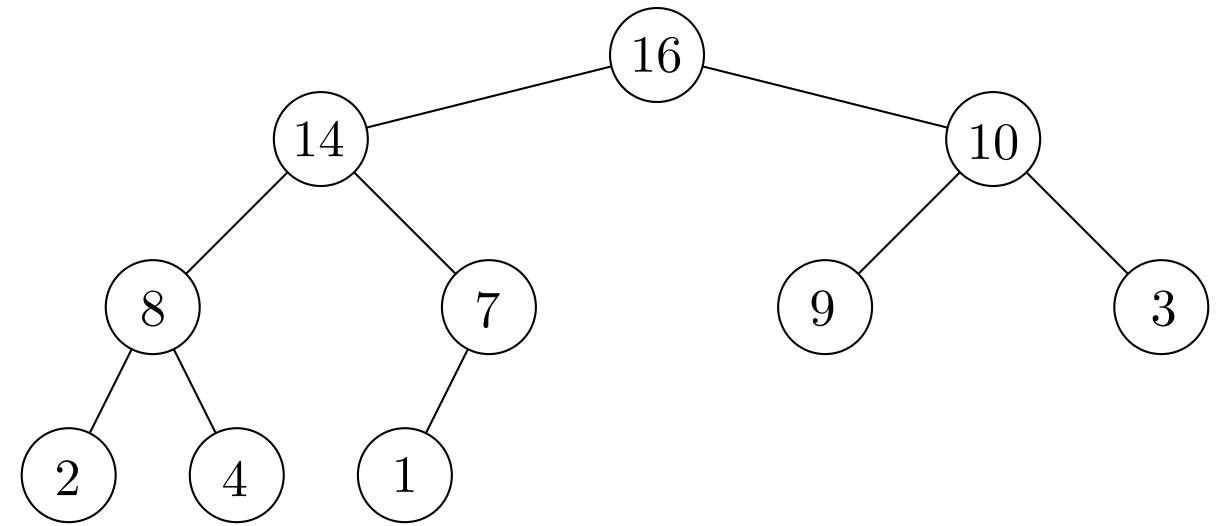
Eine Beziehung zwischen den Teilbäumen existiert nicht!

Heaps



Heaps

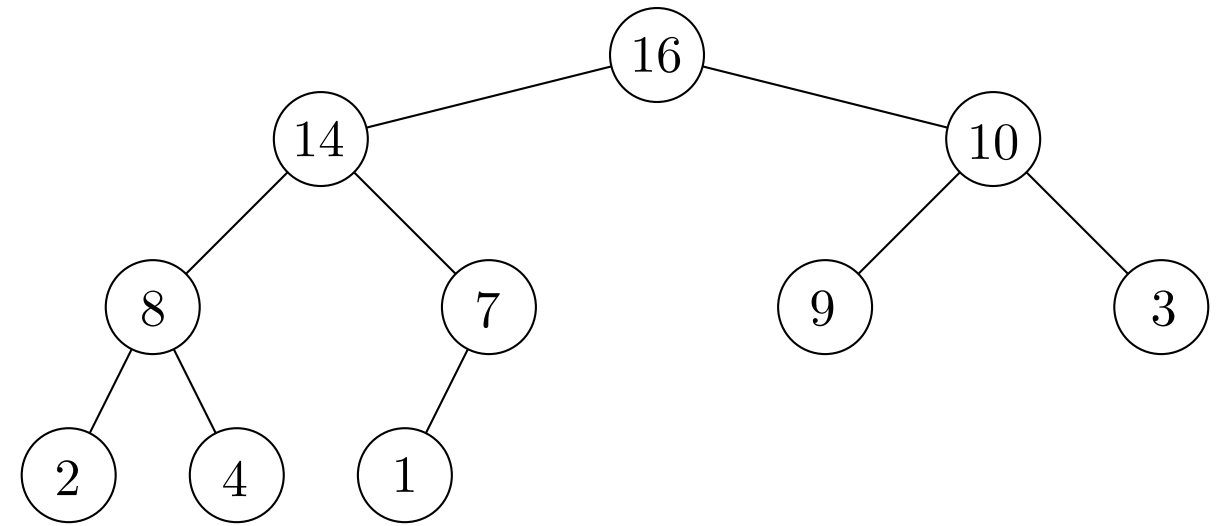
Definition 4.14 (Heap)

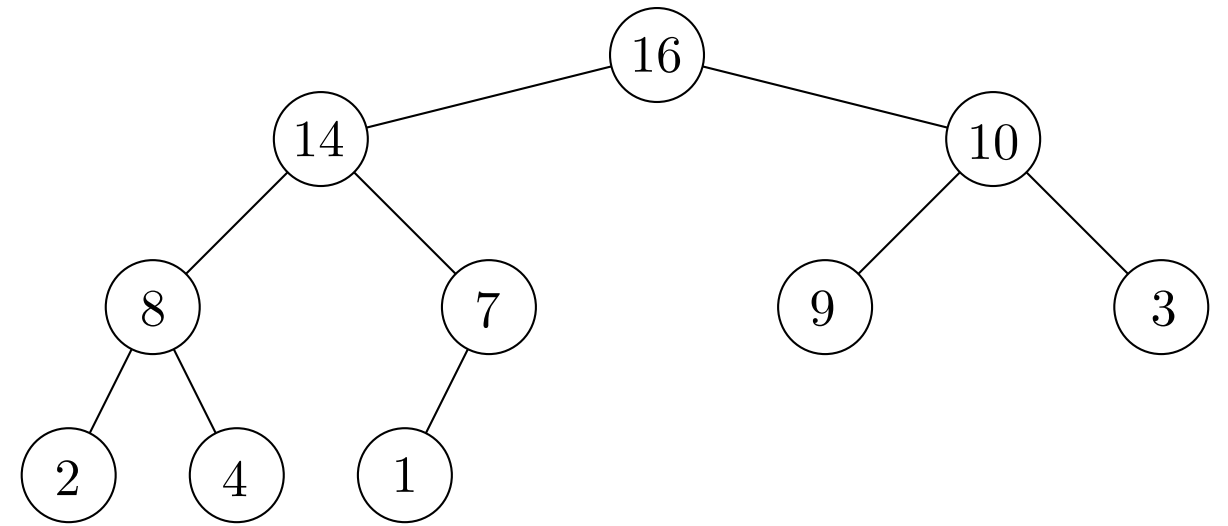


Heaps

Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

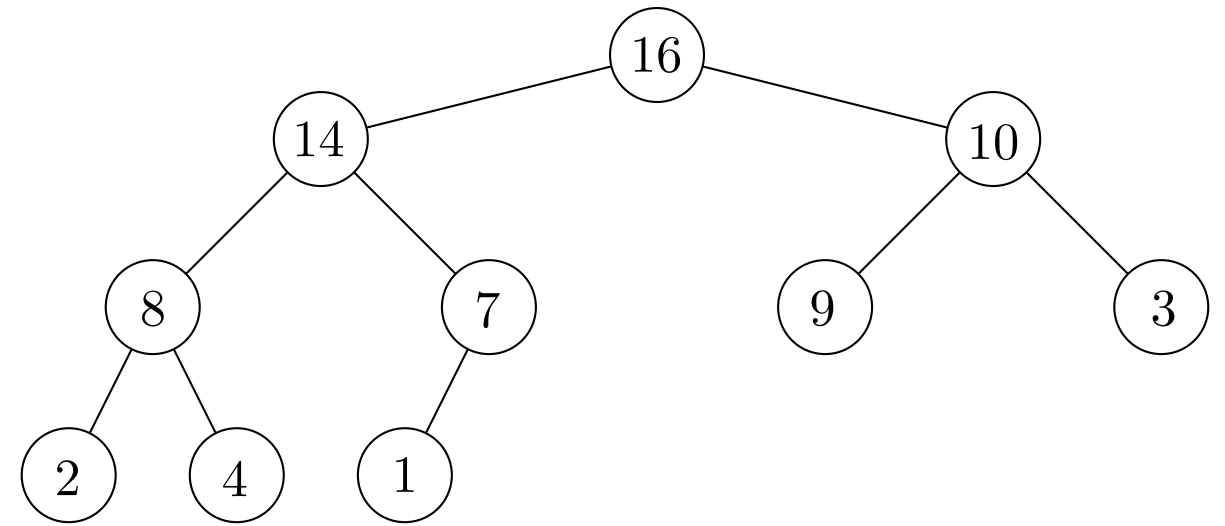




Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

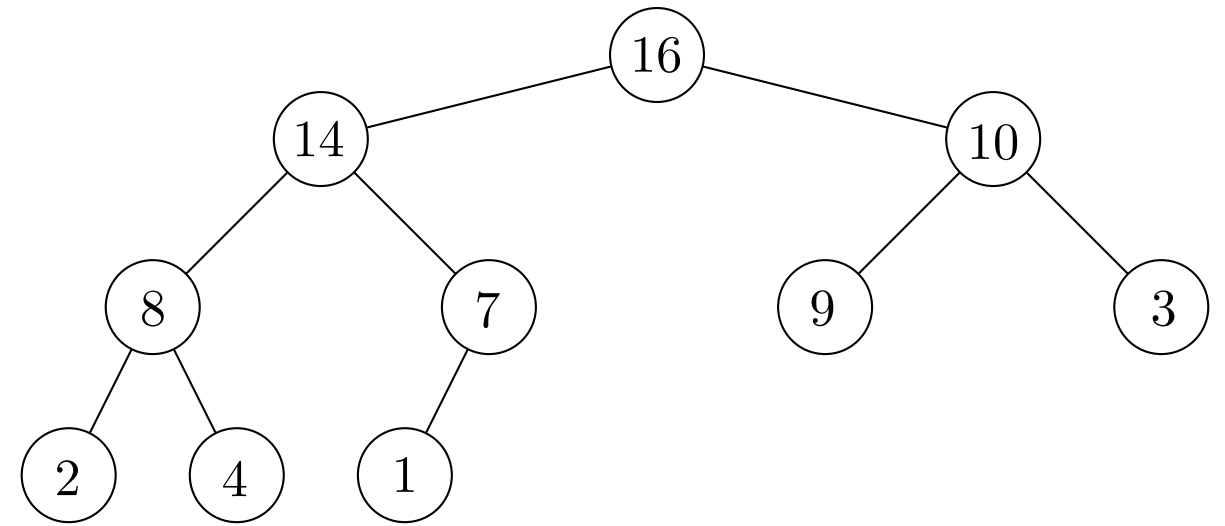
1. Jeder Knoten hat einen Schlüssel.



Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

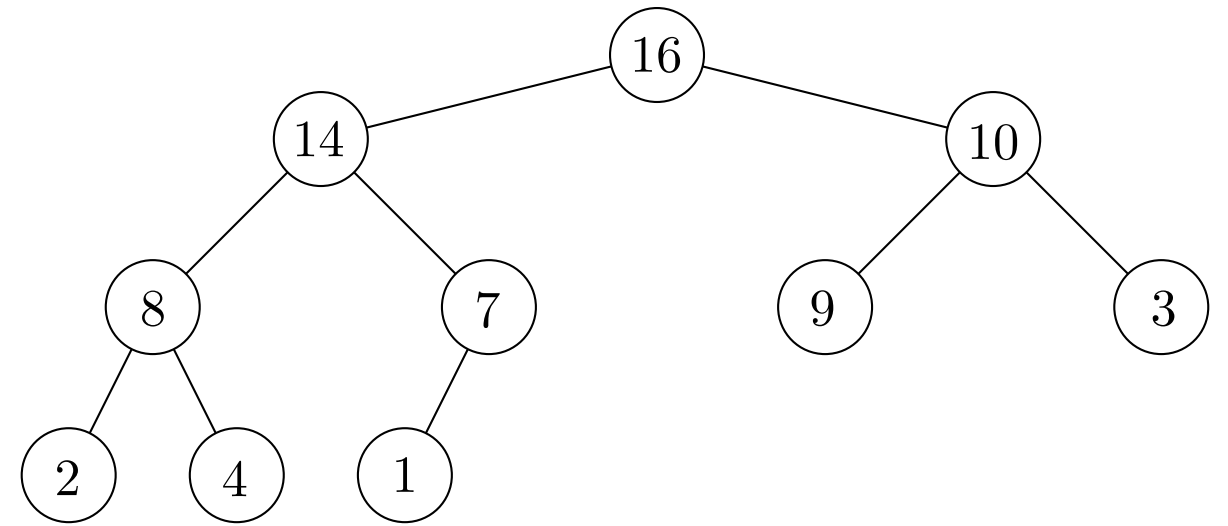
1. Jeder Knoten hat einen Schlüssel.
2. Ist h die maximale Distanz von der Wurzel, dann haben alle Ebenen $i < h$ genau zwei Knoten.



Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

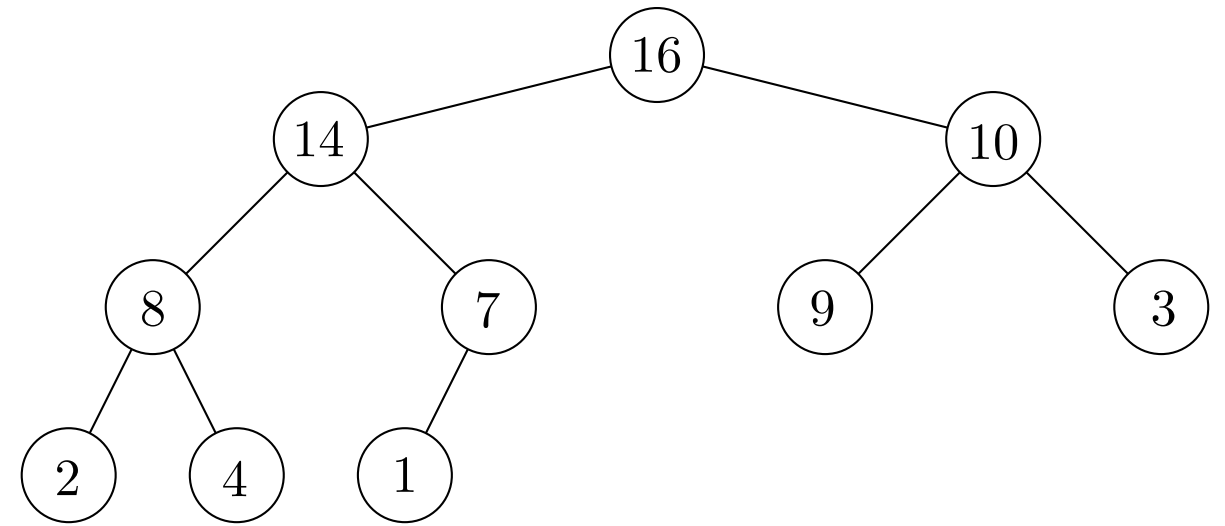
1. Jeder Knoten hat einen Schlüssel.
2. Ist h die maximale Distanz von der Wurzel, dann haben alle Ebenen $i < h$ genau zwei Knoten.
3. Auf Ebene h sind die linken $n - 2^h + 1$ Positionen besetzt.



Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

1. Jeder Knoten hat einen Schlüssel.
2. Ist h die maximale Distanz von der Wurzel, dann haben alle Ebenen $i < h$ genau zwei Knoten.
3. Auf Ebene h sind die linken $n - 2^h + 1$ Positionen besetzt.
4. Der Schlüssel jedes Knotens ist mindestens so groß wie die seiner Kinder.



Definition 4.14 (Heap)

Ein gerichteter binärer Baum heißt binärer Max-Heap, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

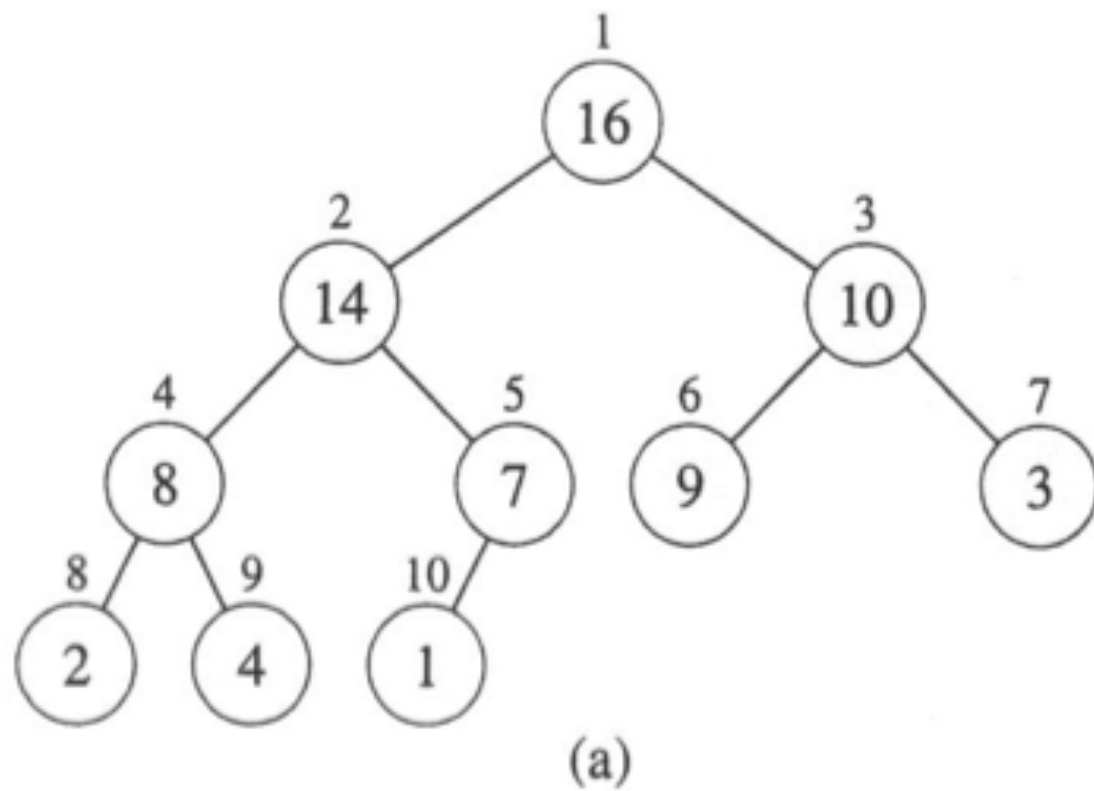
1. Jeder Knoten hat einen Schlüssel.
2. Ist h die maximale Distanz von der Wurzel, dann haben alle Ebenen $i < h$ genau zwei Knoten.
3. Auf Ebene h sind die linken $n - 2^h + 1$ Positionen besetzt.
4. Der Schlüssel jedes Knotens ist mindestens so groß wie die seiner Kinder.

Bei einem Min-Heap sind die Schlüssel eines Knotens höchstens so groß wie die seiner Kinder.

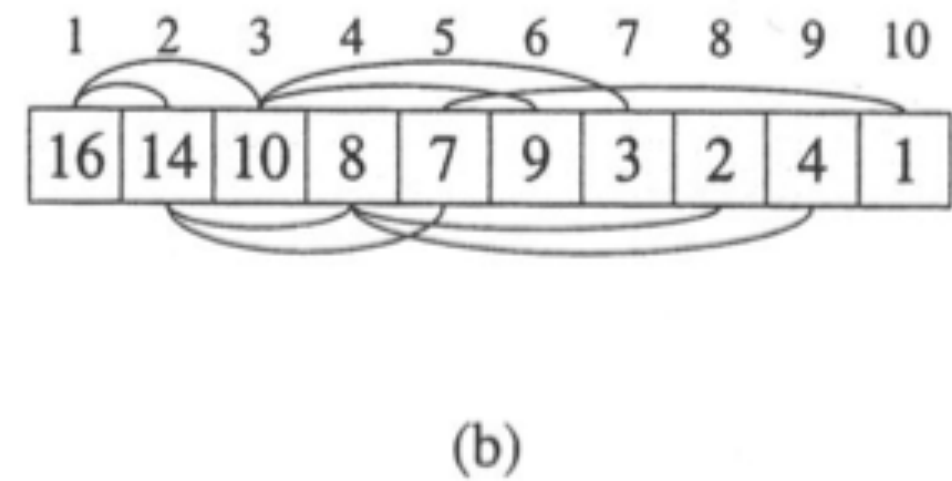
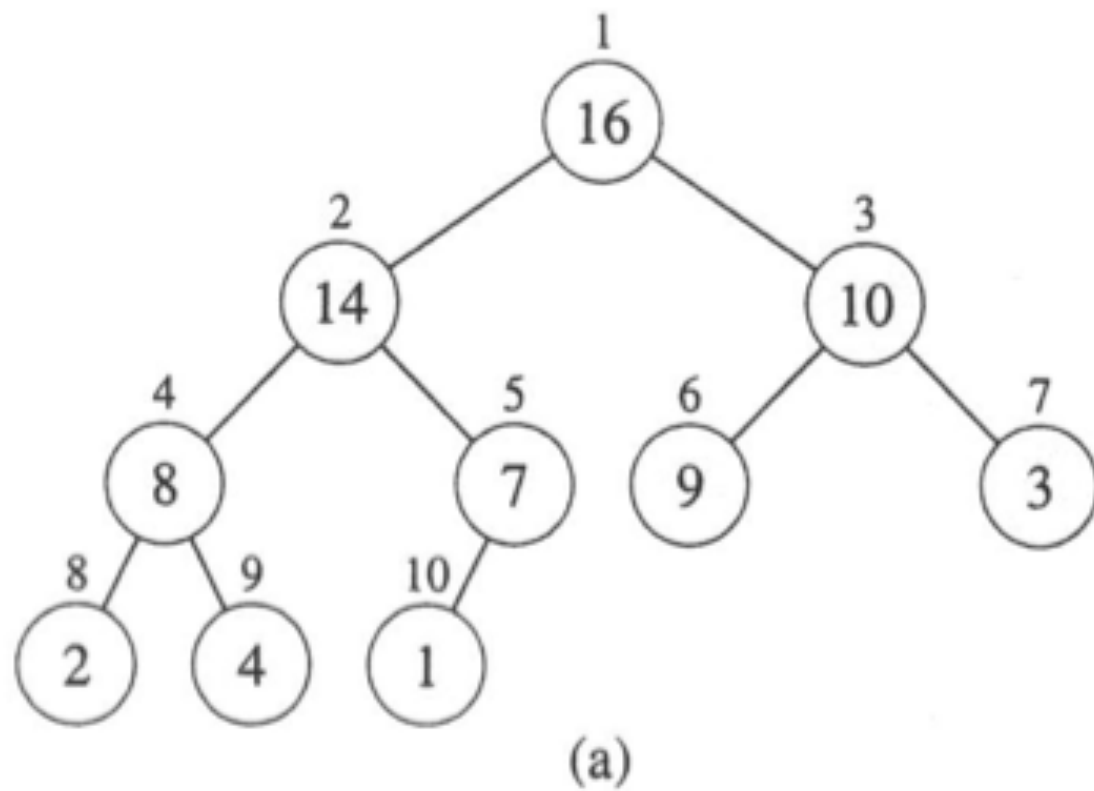
Heaps



Heaps



Heaps



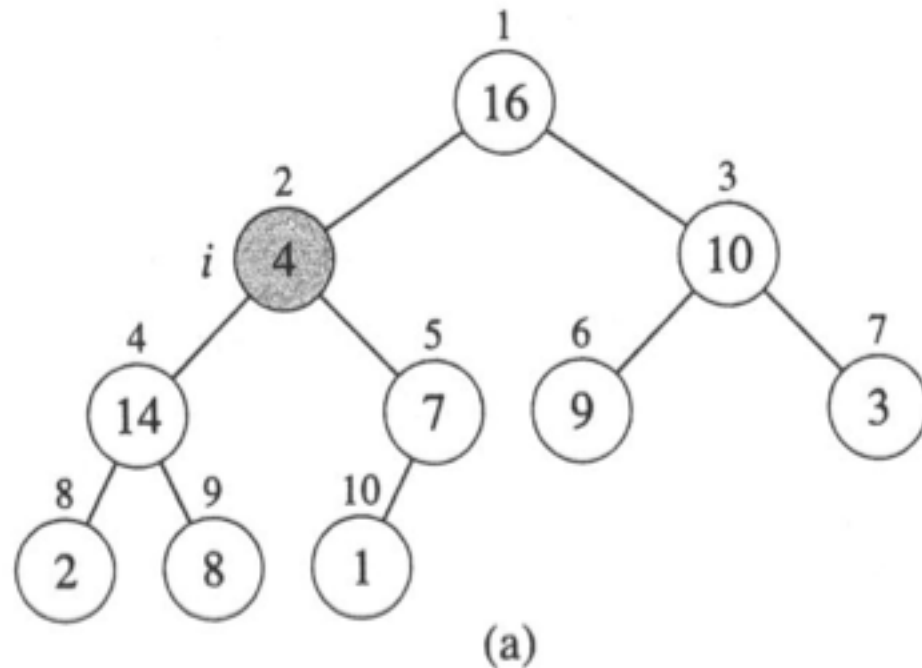
Heaps — Umordnen



Heaps — Umordnen

```
MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
1   $l \leftarrow \text{LEFT}(i)$ 
2   $r \leftarrow \text{RIGHT}(i)$ 
3  if  $l \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[l] > A[i]$ 
4    then  $\text{maximum} \leftarrow l$ 
5    else  $\text{maximum} \leftarrow i$ 
6  if  $r \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[r] > A[\text{maximum}]$ 
7    then  $\text{maximum} \leftarrow r$ 
8  if  $\text{maximum} \neq i$ 
9    then vertausche  $A[i] \leftrightarrow A[\text{maximum}]$ 
10     MAX-HEAPIFY( $A, \text{maximum}$ )
```

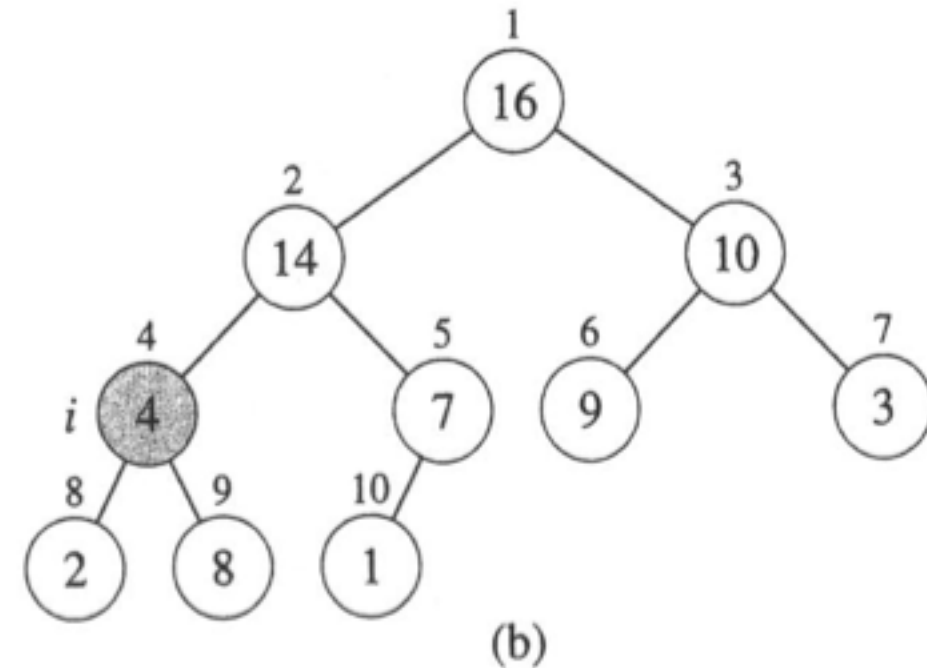
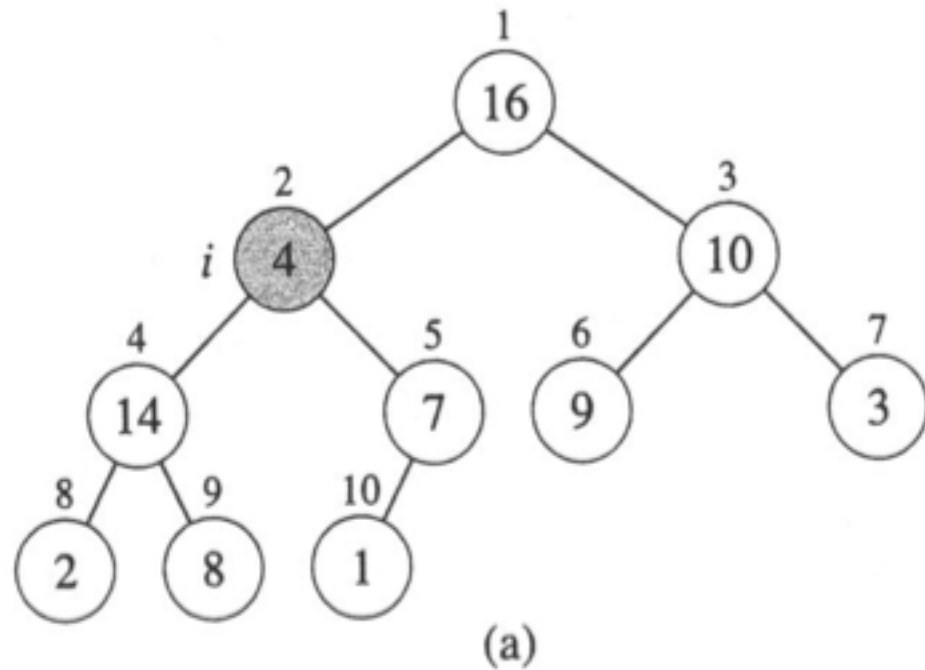

Heaps – Umordnen



MAX-HEAPIFY(A, i)

```
1  $l \leftarrow \text{LEFT}(i)$ 
2  $r \leftarrow \text{RIGHT}(i)$ 
3 if  $l \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[l] > A[i]$ 
4   then  $\text{maximum} \leftarrow l$ 
5   else  $\text{maximum} \leftarrow i$ 
6 if  $r \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[r] > A[\text{maximum}]$ 
7   then  $\text{maximum} \leftarrow r$ 
8 if  $\text{maximum} \neq i$ 
9   then vertausche  $A[i] \leftrightarrow A[\text{maximum}]$ 
10    MAX-HEAPIFY( $A, \text{maximum}$ )
```

Heaps – Umordnen

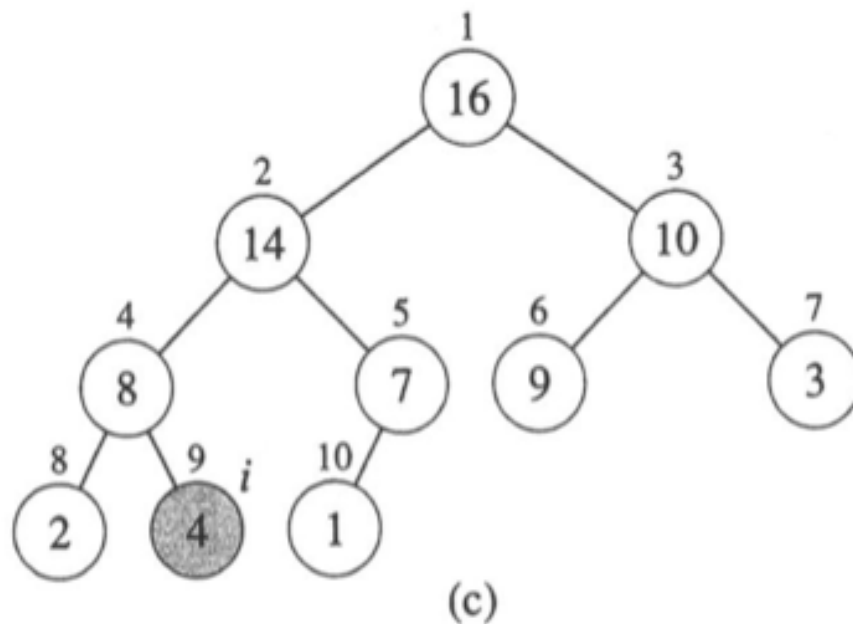
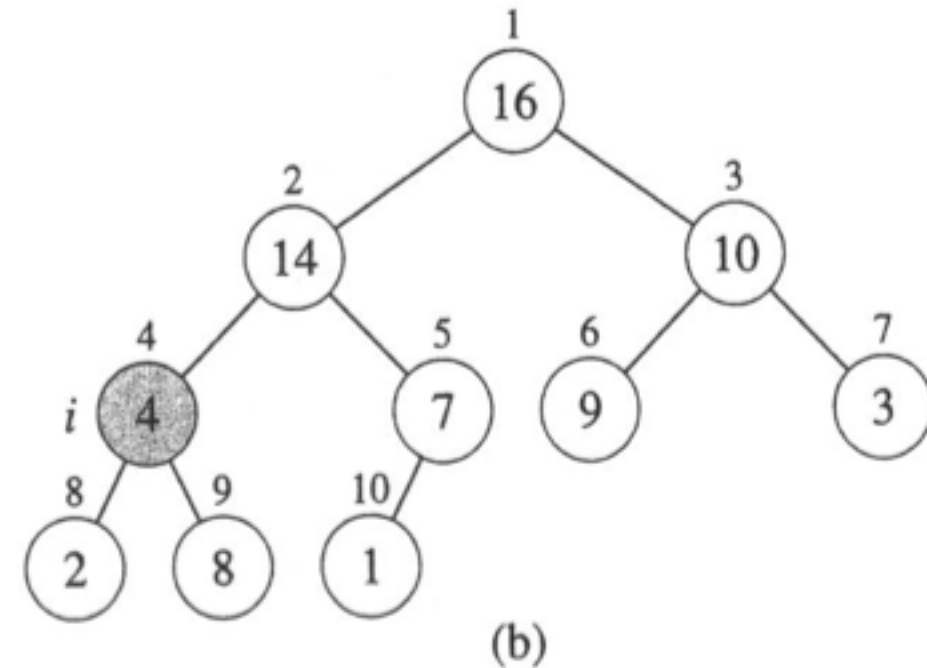
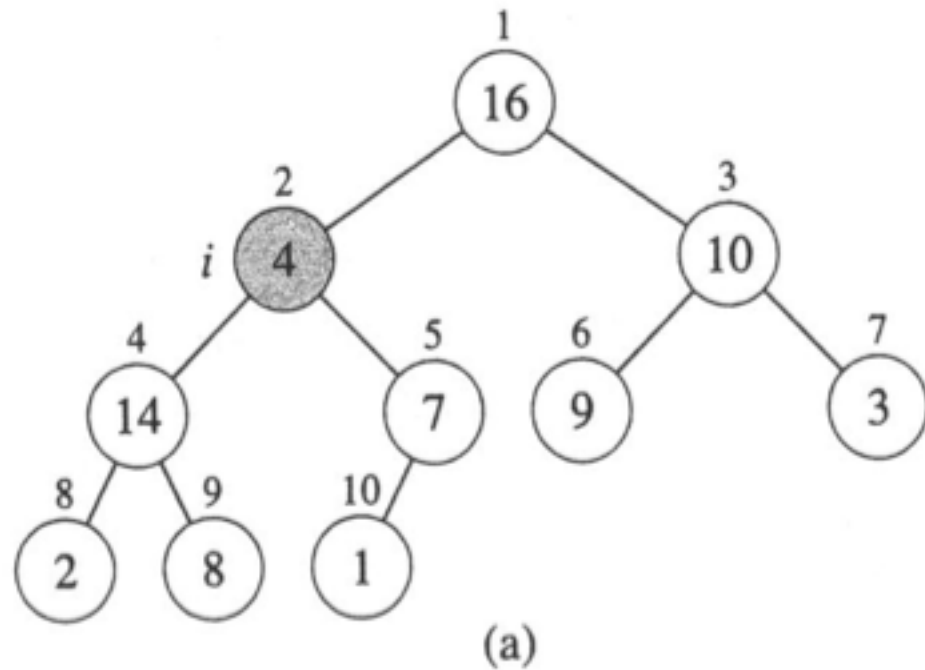


MAX-HEAPIFY(A, i)

```

1   $l \leftarrow \text{LEFT}(i)$ 
2   $r \leftarrow \text{RIGHT}(i)$ 
3  if  $l \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[l] > A[i]$ 
4    then  $\text{maximum} \leftarrow l$ 
5    else  $\text{maximum} \leftarrow i$ 
6  if  $r \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[r] > A[\text{maximum}]$ 
7    then  $\text{maximum} \leftarrow r$ 
8  if  $\text{maximum} \neq i$ 
9    then vertausche  $A[i] \leftrightarrow A[\text{maximum}]$ 
10   MAX-HEAPIFY( $A, \text{maximum}$ )
    
```

Heaps – Umordnen



MAX-HEAPIFY(A, i)

```

1   $l \leftarrow \text{LEFT}(i)$ 
2   $r \leftarrow \text{RIGHT}(i)$ 
3  if  $l \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[l] > A[i]$ 
4    then  $\text{maximum} \leftarrow l$ 
5    else  $\text{maximum} \leftarrow i$ 
6  if  $r \leq \text{heap-größe}[A]$  und  $A[r] > A[\text{maximum}]$ 
7    then  $\text{maximum} \leftarrow r$ 
8  if  $\text{maximum} \neq i$ 
9    then vertausche  $A[i] \leftrightarrow A[\text{maximum}]$ 
10   MAX-HEAPIFY( $A, \text{maximum}$ )
    
```

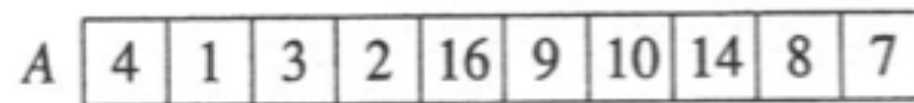
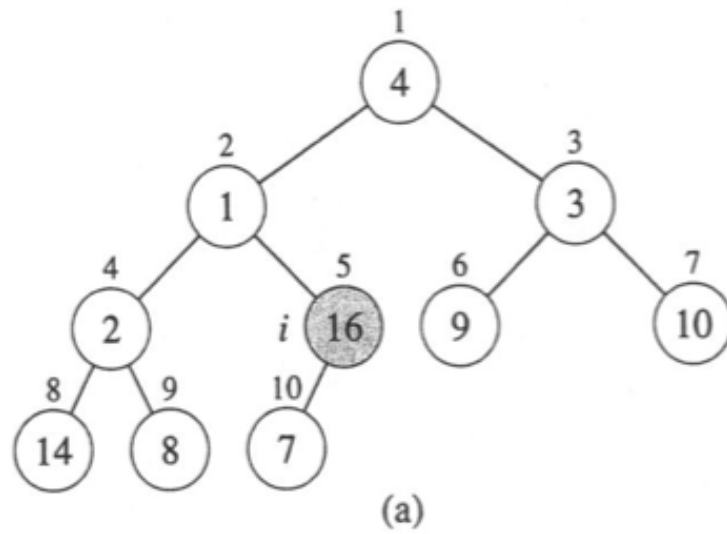
Heaps — Bauen

<i>A</i>	4	1	3	2	16	9	10	14	8	7
----------	---	---	---	---	----	---	----	----	---	---

BUILD-MAX-HEAP(*A*)

```
1  heap-größe[A] ← länge[A]  
2  for i ← ⌊länge[A]/2⌋ downto 1  
3      do MAX-HEAPIFY(A, i)
```

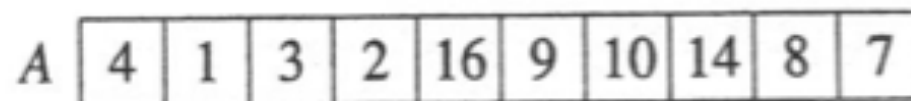
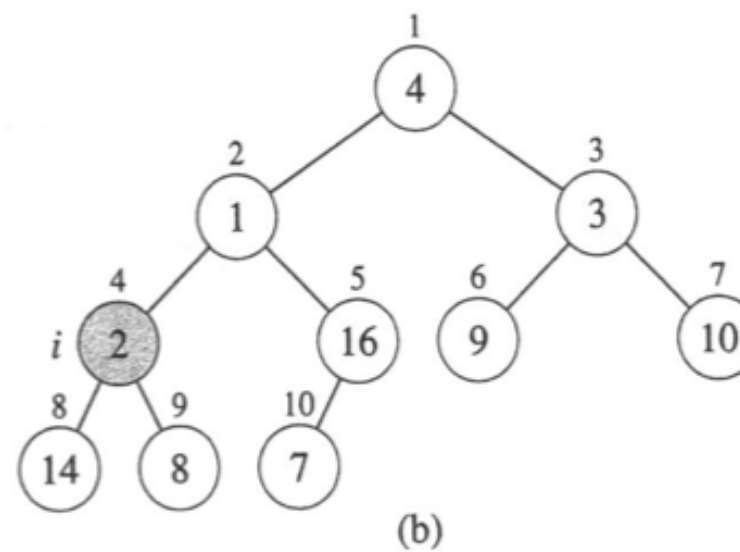
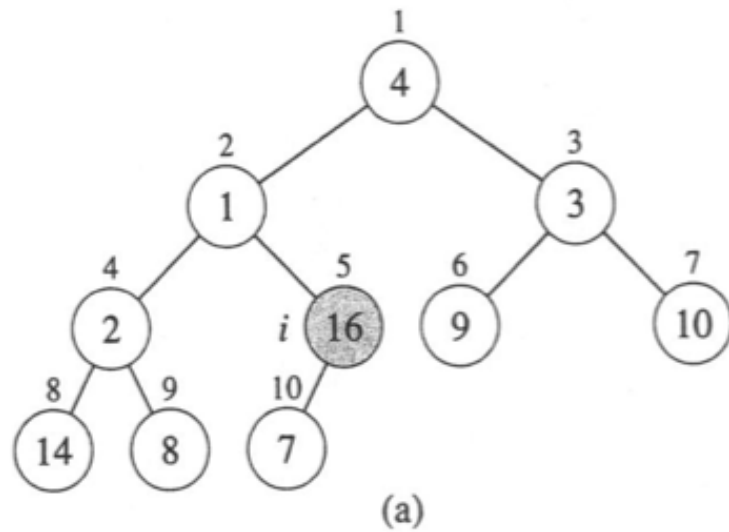
Heaps – Bauen



BUILD-MAX-HEAP(A)

```
1   $heap\text{-}grö\beta e[A] \leftarrow l\ddot{a}nge[A]$ 
2  for  $i \leftarrow \lfloor l\ddot{a}nge[A]/2 \rfloor$  downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
```

Heaps – Bauen

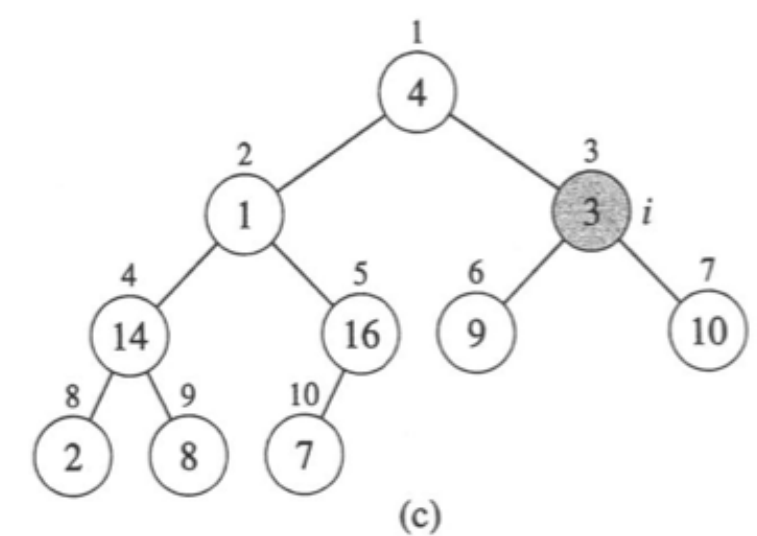
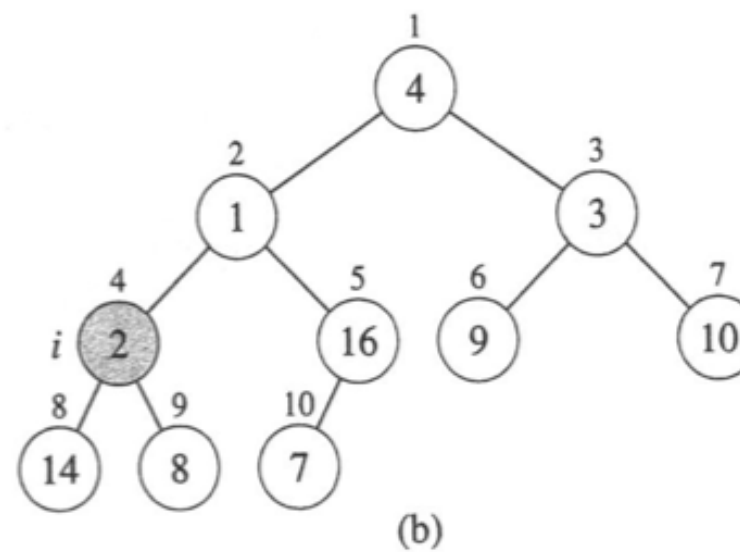
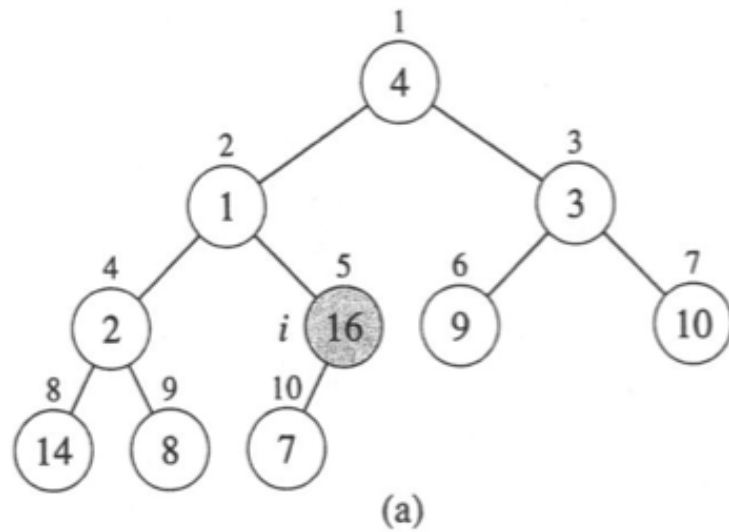


BUILD-MAX-HEAP(A)

```

1   $heap-größe[A] \leftarrow länge[A]$ 
2  for  $i \leftarrow \lfloor länge[A]/2 \rfloor$  downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
    
```


Heaps – Bauen



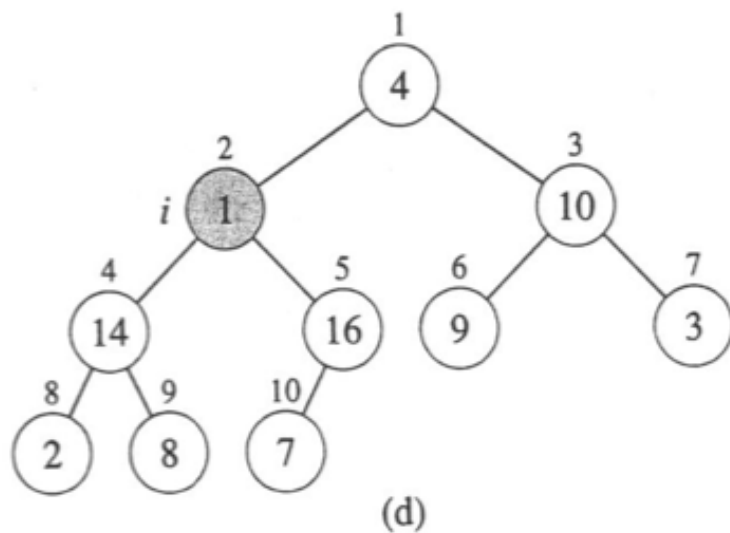
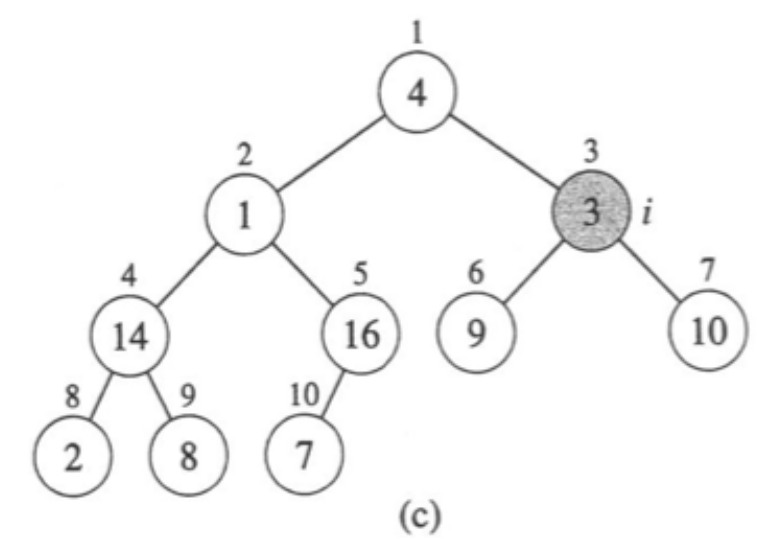
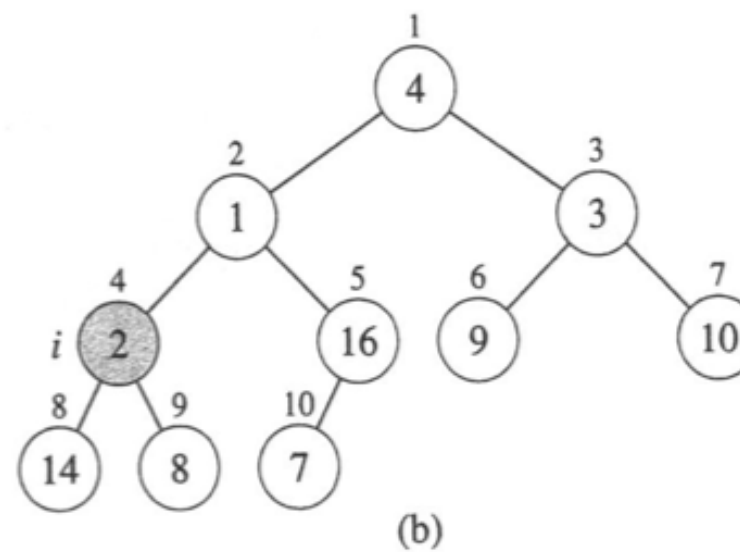
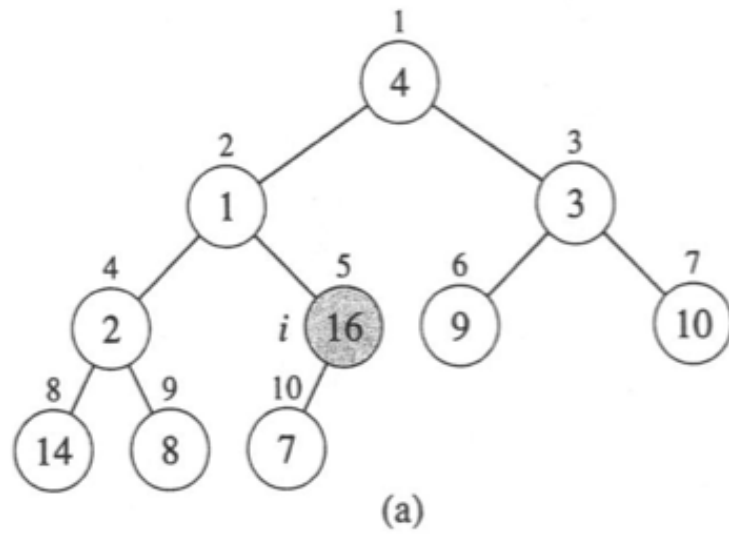
A	4	1	3	2	16	9	10	14	8	7
---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	---

BUILD-MAX-HEAP(A)

```

1   $heap-größe[A] \leftarrow länge[A]$ 
2  for  $i \leftarrow \lfloor länge[A]/2 \rfloor$  downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
    
```

Heaps – Bauen



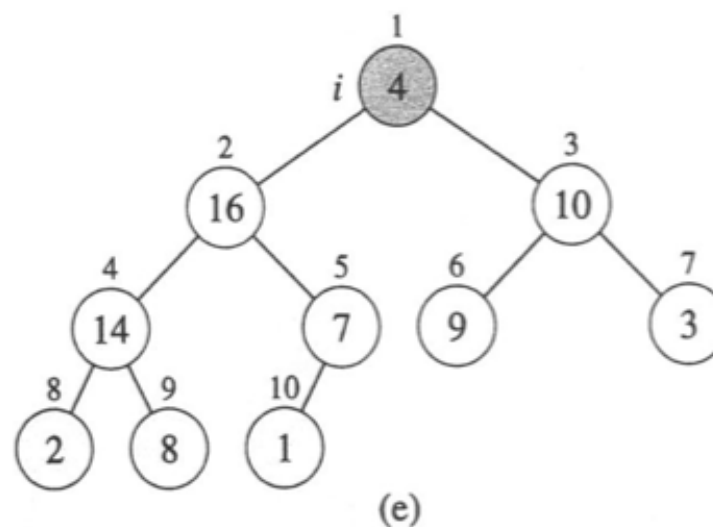
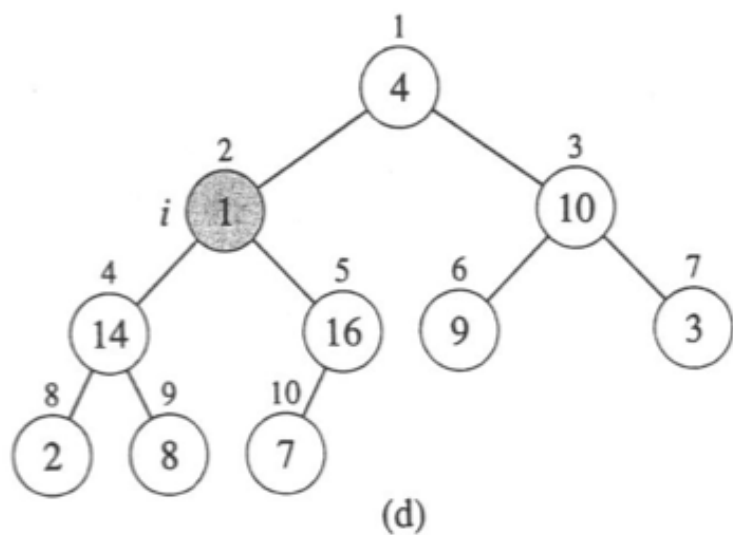
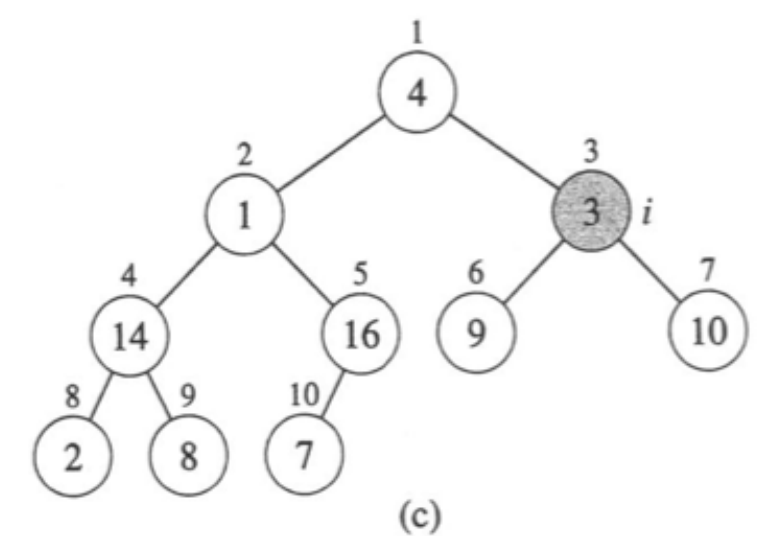
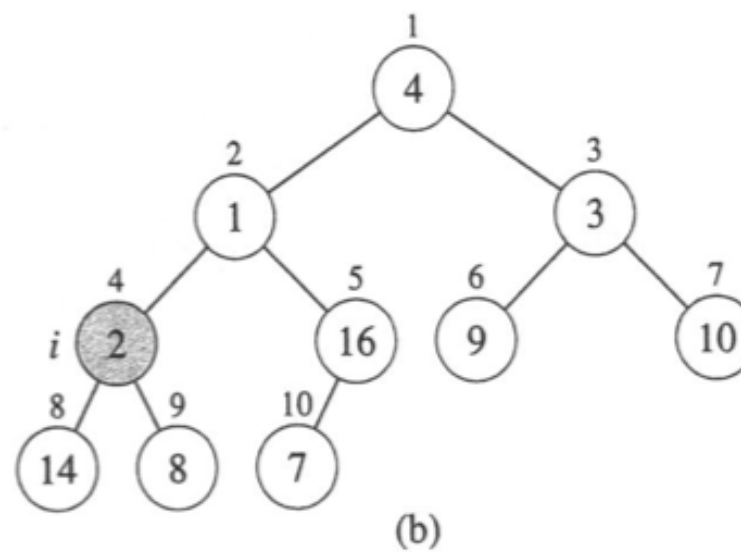
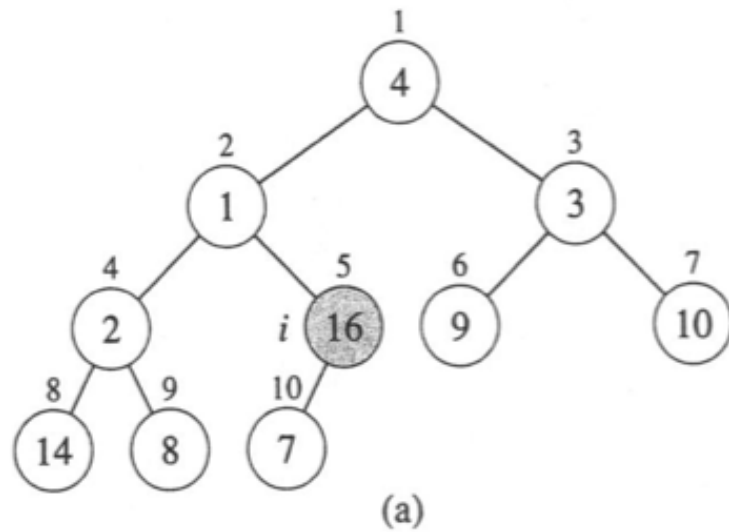
A	4	1	3	2	16	9	10	14	8	7
---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	---

BUILD-MAX-HEAP(A)

```

1   $heap\text{-}größe[A] \leftarrow länge[A]$ 
2  for  $i \leftarrow \lfloor länge[A]/2 \rfloor$  downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
    
```

Heaps – Bauen



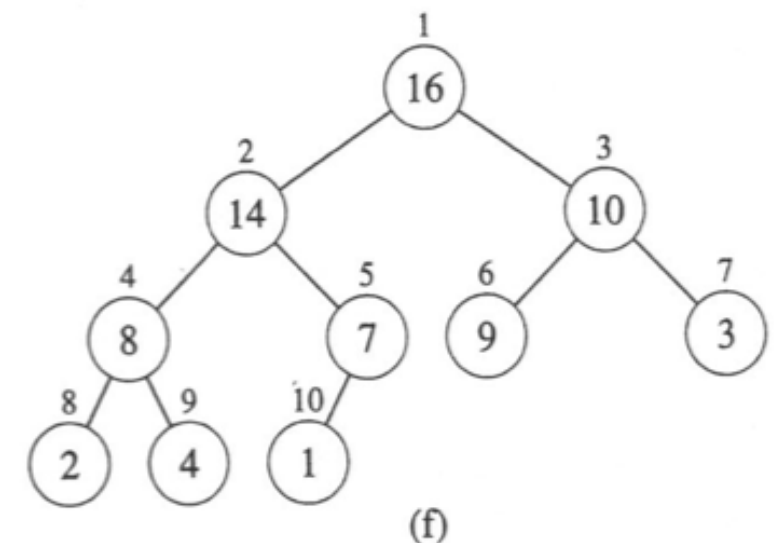
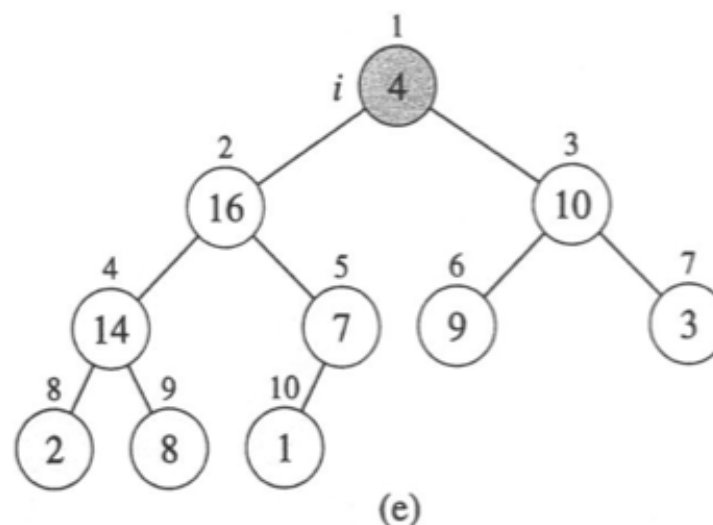
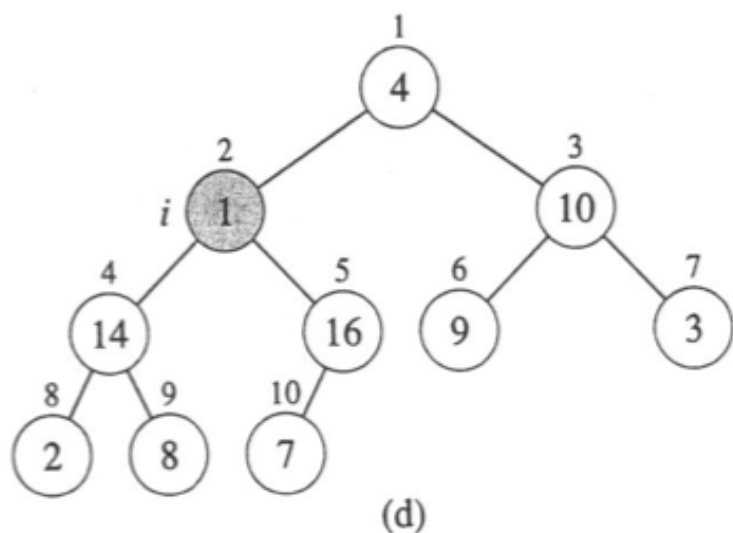
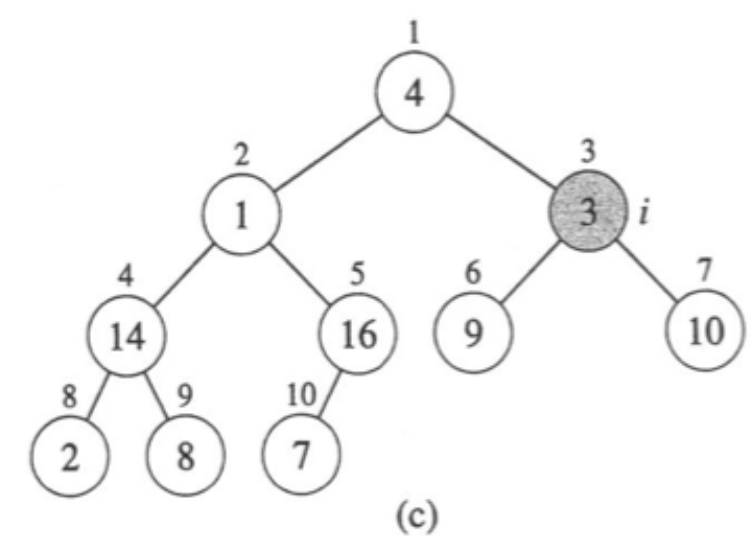
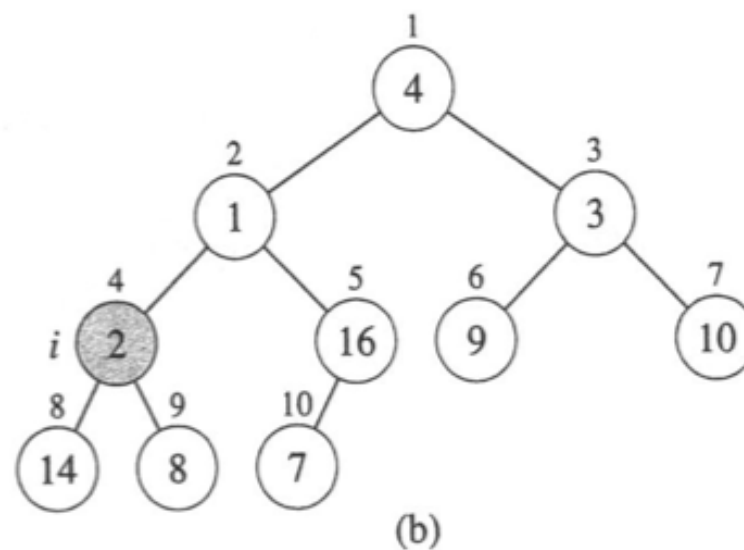
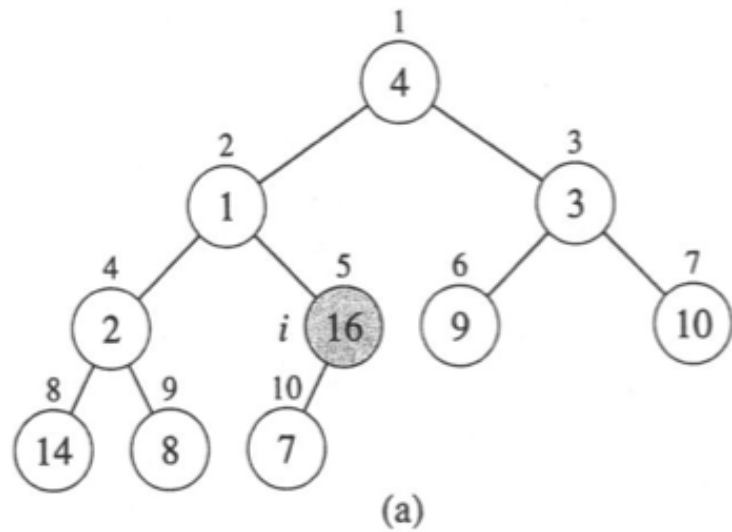
A	4	1	3	2	16	9	10	14	8	7
---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	---

BUILD-MAX-HEAP(A)

```

1   $heap-größe[A] \leftarrow länge[A]$ 
2  for  $i \leftarrow \lfloor länge[A]/2 \rfloor$  downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
    
```

Heaps – Bauen



A	4	1	3	2	16	9	10	14	8	7
---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	---

BUILD-MAX-HEAP(A)

```

1  heap-größe[A] ← länge[A]
2  for i ← ⌊länge[A]/2⌋ downto 1
3      do MAX-HEAPIFY( $A, i$ )
    
```


Da man $O(\log n)$ Operationen pro Level benötigt, ist klar, dass ein Max-Heap in $O(n \log n)$ gebaut werden kann.

Da man $O(\log n)$ Operationen pro Level benötigt, ist klar, dass ein Max-Heap in $O(n \log n)$ gebaut werden kann.

Da aber mehr Knoten auf niedrigerem Niveau sind, was weniger Arbeit erfordert, kann man diese Abschätzung noch verbessern:

Da man $O(\log n)$ Operationen pro Level benötigt, ist klar, dass ein Max-Heap in $O(n \log n)$ gebaut werden kann.

Da aber mehr Knoten auf niedrigerem Niveau sind, was weniger Arbeit erfordert, kann man diese Abschätzung noch verbessern:

Satz 4.15

Ein Max-Heap mit n Knoten kann in $O(n)$ gebaut werden.

4.11 Weitere Varianten

4.11.1 Fibonacci Heaps



4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

“durchschnittliche” Kosten

4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

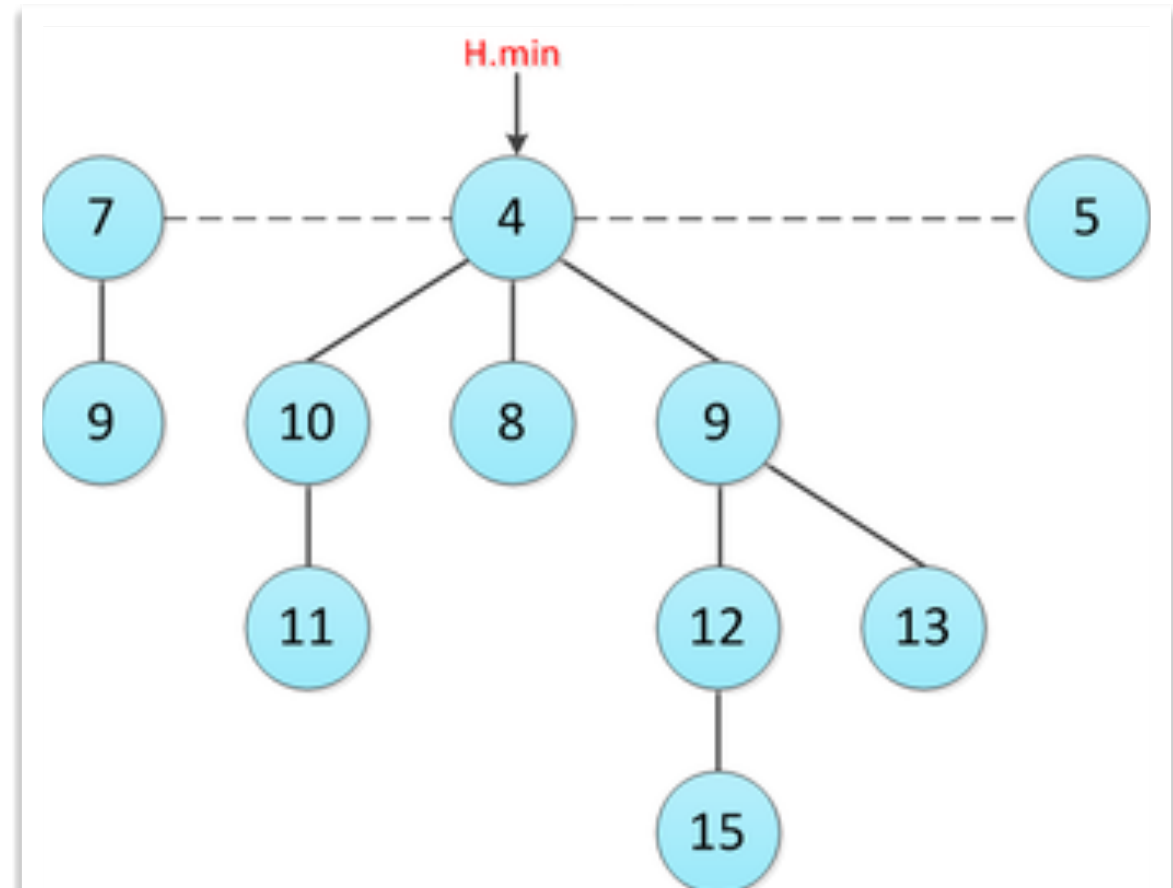
“durchschnittliche” Kosten



4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

“durchschnittliche” Kosten



4.11.1 Fibonacci Heaps

Heap-Struktur mit sehr schneller amortisierter Zugriffszeit.

“durchschnittliche” Kosten

			H.min		
Operation	Lineare Liste	Sortierte Liste	(Min-)Heap	Unbalancierter Binärbaum	Fibonacci-Heap
insert	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(\log n)$	$\mathcal{O}(\log n)^*$	$\mathcal{O}(1)$
getMin	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
extractMin	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(\log n)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(\log n)^*$
decreaseKey	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(\log n)$	$\mathcal{O}(\log n)^*$	$\mathcal{O}(1)^*$
remove	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(\log n)$	$\mathcal{O}(1)^{**}$	$\mathcal{O}(\log n)^*$
merge	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(n + m)$	$\mathcal{O}(m \cdot \log(n + m))$	$\mathcal{O}(n + m)$	$\mathcal{O}(1)$

15

4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umgang mit großen Datenmengen bei unbekannter Cache-Größe



4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umgang mit großen Datenmengen bei unbekannter Cache-Größe



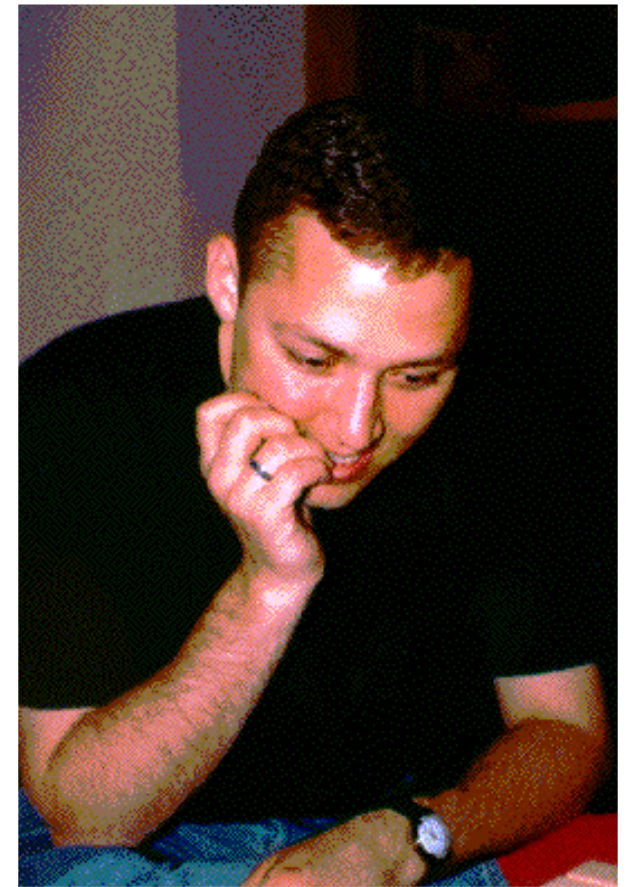
Michael Bender

4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umgang mit großen Datenmengen bei unbekannter Cache-Größe



Michael Bender



Martin Farach-Colton

4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

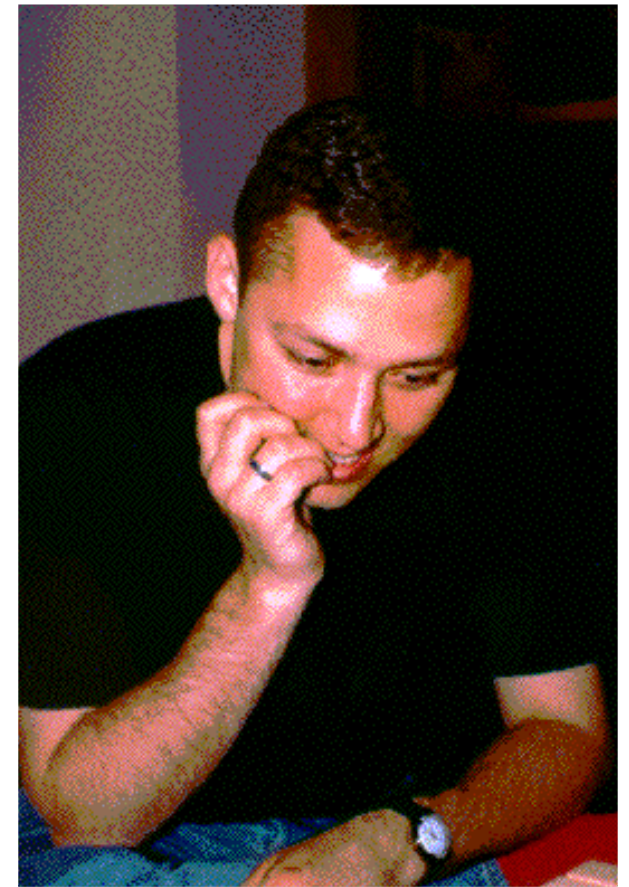
Umgang mit großen Datenmengen bei unbekannter Cache-Größe



Michael Bender



Erik Demaine



Martin Farach-Colton

4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umg

röße

CACHE-OBLIVIOUS B-TREES*

MICHAEL A. BENDER[†], ERIK D. DEMAINÉ[‡], AND MARTIN FARACH-COLTON[§]

Abstract. This paper presents two dynamic search trees attaining near-optimal performance on any hierarchical memory. The data structures are independent of the parameters of the memory hierarchy, e.g., the number of memory levels, the block-transfer size at each level, and the relative speeds of memory levels. The performance is analyzed in terms of the number of memory transfers between two memory levels with an arbitrary block-transfer size of B ; this analysis can then be applied to every adjacent pair of levels in a multilevel memory hierarchy. Both search trees match the optimal search bound of $\Theta(1 + \log_{B+1} N)$ memory transfers. This bound is also achieved by the classic B-tree data structure on a two-level memory hierarchy with a known block-transfer size B . The first search tree supports insertions and deletions in $\Theta(1 + \log_{B+1} N)$ amortized memory transfers, which matches the B-tree's worst-case bounds. The second search tree supports scanning S consecutive elements optimally in $\Theta(1 + S/B)$ memory transfers and supports insertions and deletions in $\Theta(1 + \log_{B+1} N + \frac{\log^2 N}{B})$ amortized memory transfers, matching the performance of the B-tree for $B = \Omega(\log N \log \log N)$.

Key words. Memory hierarchy, cache efficiency, data structures, search trees

AMS subject classifications. 68P05, 68P30, 68P20

DOI. 10.1137/S0097539701389956

ton



4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umg

röße

CACHE-OBLIVIOUS B-TREES*

MICHAEL A. BENDER[†], ERIK D. DEMAIN[‡], AND MARTIN FARACH-COLTON[§]

Tokutek PRODUCTS CUSTOMERS RESOURCES BLOG NEWS ABOUT CONTACT

Unmatched Speed:
Insert 20x to 80x Faster
Accelerate queries with Fractal Tree® indexing
FULL ACID Compliance

Unmatched Speed Maximum Scalability Exceptional Agility Optimized for Flash

DOI. 10.1137/S0097539701389956

ton

4.11.2 Cache-Oblivious B-Trees

Umg

röße

CACHE-OBLIVIOUS B-TREES*

MICHAEL A. BENDER[†], ERIK D. DEMAINÉ[‡], AND MARTIN FARACH-COLTON[§]

The image is a screenshot of the Tokutek website banner. At the top, there is a dark blue navigation bar with the Tokutek logo on the left and a list of links: PRODUCTS, CUSTOMERS, RESOURCES, BLOG, NEWS, ABOUT, and CONTACT. To the right of the links is a search bar. Below the navigation bar is a large banner with a blue background and a grid of orange cubes. The banner is divided into four sections by vertical lines. The first section on the left is titled 'Unmatched Speed' and lists features: 'Hot Column Addition', 'Hot Indexing', 'No Dump/Reload Downtime', and 'AVCC'. The second section is titled 'Maximum Scalability' and lists features: 'Grow to Multiple Terabytes', 'Deploy without Partitions', and 'No Index Fragmentation'. The third section is titled 'Exceptional Agility'. The fourth section on the right is titled 'Optimized for Flash'.

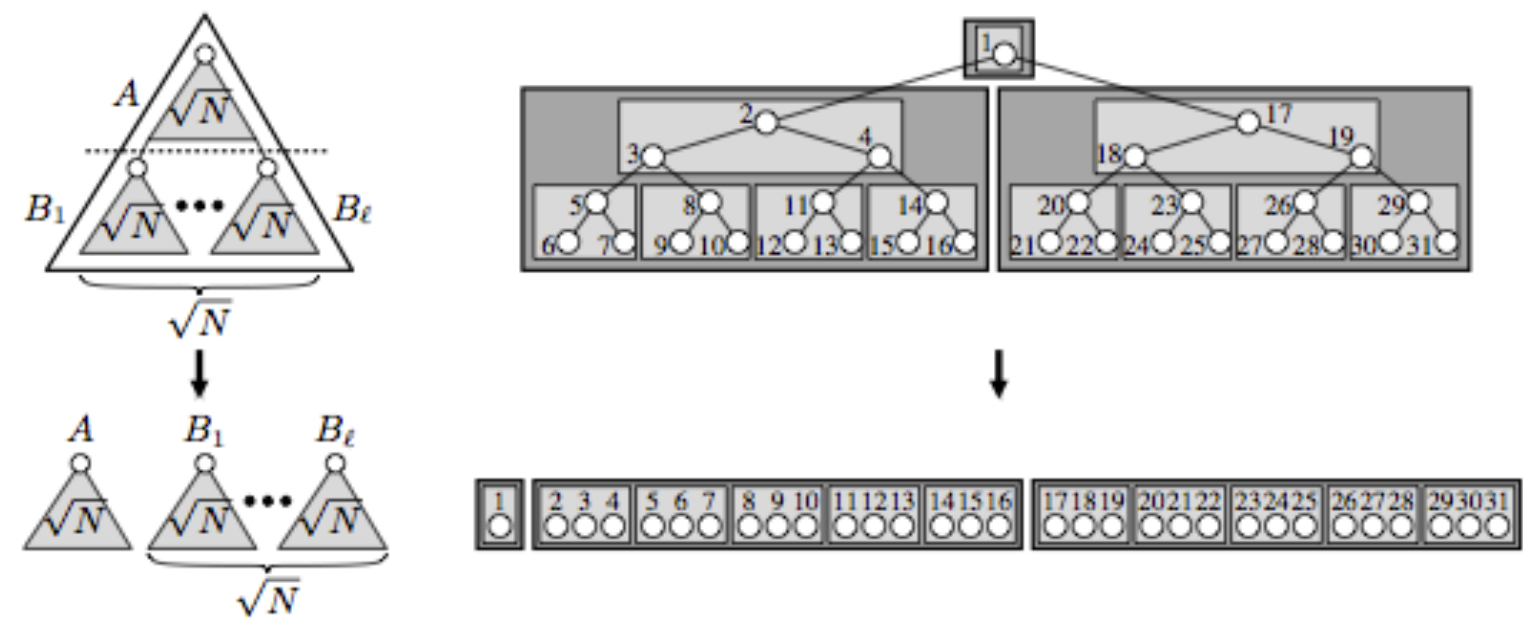
ton

DOI. 10.1137/S0097539701389956

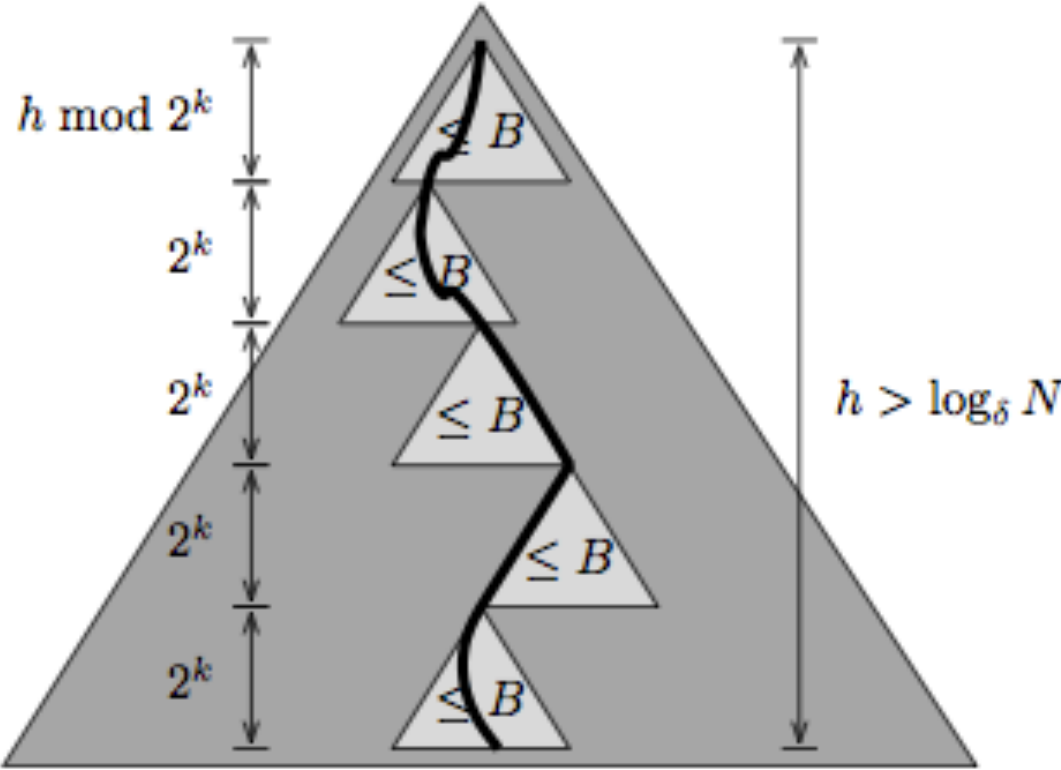
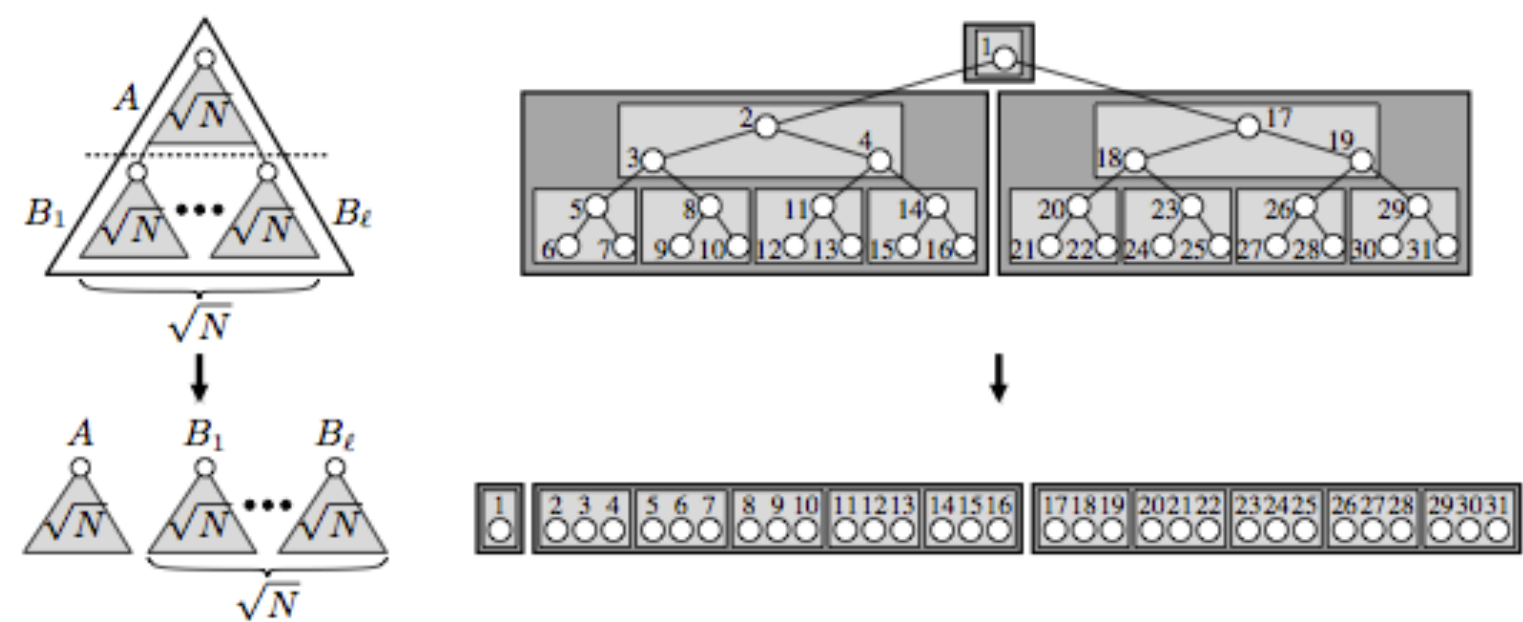
Cache-Oblivious B-Trees



Cache-Oblivious B-Trees



Cache-Oblivious B-Trees



Vielen Dank!

