

# Grundlagen: Algorithmen und Datenstrukturen

Hanjo Täubig

Lehrstuhl für Effiziente Algorithmen  
(Prof. Dr. Ernst W. Mayr)  
Institut für Informatik  
Technische Universität München

Sommersemester 2012



# Übersicht

## 1 Organisatorisches

# Vorlesungsdaten

- Modul: IN0007
- Titel: “Grundlagen: Algorithmen und Datenstrukturen”
- 3 SWS Vorlesung + 2 SWS Übung
- ECTS: 6 Credit Points
- Vorlesungszeiten:
  - Dienstag 14:15 – 15:45 Uhr (MI Hörsaal 1 + Int. Hs. 1)
  - Donnerstag 12:15 – 13:00 Uhr (MI Hörsaal 1 + Int. Hs. 1)
- Webseite:  
<http://www14.in.tum.de/lehre/2012SS/gad/>
- Voraussetzung:  
Modul IN0001: Einführung in die Informatik 1
- Klausur: Gesamtklausur am 28.07.2012 (12:00–14:30 Uhr)

# Zielgruppe

- Bachelor Informatik
  - Bachelor Wirtschaftsinformatik
  - Bachelor Bioinformatik
  - Bachelor Informatik: Games Engineering
  - Andere Studiengänge mit Neben-/Zweifach Informatik
  - Masterstudiengang Angewandte Informatik
  - Aufbaustudium Informatik
- 
- planmäßig im 2. Fachsemester  
(für Wirtschaftsinformatik im 4. Fachsemester)

## Dozent / Kontaktdaten

- Hanjo Täubig

Lehrstuhl für Effiziente Algorithmen  
(Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr. Ernst W. Mayr)

- eMail: [taeubig@in.tum.de](mailto:taeubig@in.tum.de)
- Web: <http://www14.in.tum.de/personen/taeubig/>
- Telefon: 089 / 289-17740
- Raum: 03.09.039
- Sprechstunde: Mittwoch 13-14 Uhr  
(oder nach Vereinbarung)

# Übung

- 2 SWS Tutorübungen
- 48 Gruppen an 14 verschiedenen Terminen
- jeweils maximal 16-20 Teilnehmer
- Anmeldung über TUMonline:  
<https://campus.tum.de/>
- Übungsleitung:  
Jeremias Weihmann ([weihmann@in.tum.de](mailto:weihmann@in.tum.de))
- Webseite:  
<http://www14.in.tum.de/lehre/2012SS/gad/uebung/>

# Inhalt

- Grundlagen der Komplexitätsanalyse
- Sequenzrepräsentation durch dynamische Felder und Listen
- binäre Bäume und Algorithmen
- binäre Suchbäume und balancierte Suchbäume
- Prioritätswarteschlangen
- Hashing
- Sortieren und sortierbasierte Algorithmen
- Graph-Repräsentation und einfache Graphalgorithmen
- Pattern Matching
- Datenkompression

# Grundlage

- Inhalt der Vorlesung basiert auf dem Buch

K. MEHLHORN, P. SANDERS:

**Algorithms and Data Structures – The Basic Toolbox**  
(Springer, 2008)

<http://www.mpi-inf.mpg.de/~mehlhorn/Toolbox.html>

- Vorlage für die Slides:

Slides aus SS'08 von Prof. Dr. Christian Scheideler bzw.

Slides aus SS'09 von Prof. Dr. Helmut Seidl

## Weitere Literatur

- CORMEN, LEISERSON, RIVEST, STEIN:  
Introduction to Algorithms
- GOODRICH, TAMASSIA:  
Algorithm Design: Foundations, Analysis, and Internet Examples
- HEUN:  
Grundlegende Algorithmen  
Einführung in den Entwurf und die Analyse effizienter Algorithmen
- KLEINBERG, TARDOS:  
Algorithm Design
- SCHÖNING:  
Algorithmik
- SEDGEWICK:  
Algorithmen in Java. Teil 1-4

# Übersicht

## 2 Einführung

- Begriffsklärung: Algorithmen und Datenstrukturen
- Beispiele

# Übersicht

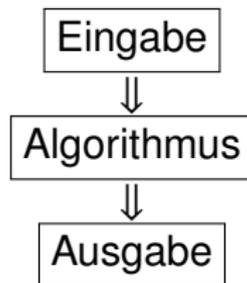
## 2 Einführung

- Begriffsklärung: Algorithmen und Datenstrukturen
- Beispiele

# Algorithmus - Definition

## Definition

Ein **Algorithmus** ist eine formale Handlungsvorschrift zur Lösung von Instanzen eines Problems in endlich vielen Schritten.



# Algorithmus - Analogien und Beispiele

- Kochrezept
  - ▶ Eingabe: Zutaten
  - ▶ Algorithmus: Rezept
  - ▶ Ausgabe: Essen
  
- Bauanleitung
  - ▶ Eingabe: Einzelteile
  - ▶ Algorithmus: Bauanleitung
  - ▶ Ausgabe: Fertiges Möbelstück
  
- Weitere Beispiele
  - ▶ Weg aus dem Labyrinth
  - ▶ Zeichnen eines Kreises

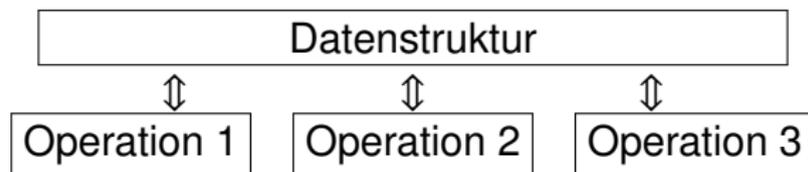
# Datenstruktur - Definition

## Definition

Eine **Datenstruktur** ist ein formalisiertes Objekt, das

- der Speicherung und
- der Verwaltung von bzw.
- dem Zugriff auf Daten

in geeigneter Weise dient, wobei die Daten dabei zweckdienlich angeordnet, kodiert und miteinander verknüpft werden.



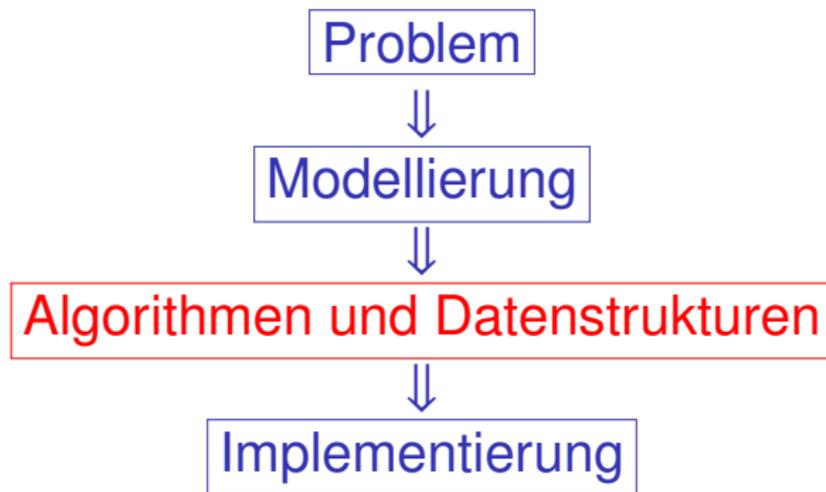
# Datenstruktur - Beispiele

- Lexikon  
Operation: **Suche(Name)**  
(Algorithmus mit Eingabe  $\langle \text{Name} \rangle$ ,  
Ausgabe Information zu  $\langle \text{Name} \rangle$ )
- Kalender  
Operation: **Wochentag(Datum)**  
(Algorithmus mit Eingabe  $\langle \text{Datum} \rangle$ ,  
Ausgabe Wochentag zum  $\langle \text{Datum} \rangle$ )

Abstrakter Datentyp:

- legt fest, welche Operationen was tun (Semantik),
  - aber nicht wie (konkrete Implementierung)
- ⇒ Kapselung durch Definition einer **Schnittstelle**

# Softwareentwicklung



- Abstraktion vom genauen Problem (Vereinfachung)
- geeignete Auswahl von Algorithmen / Datenstrukturen
- Grundsätzliche Probleme: Korrektheit, Komplexität, Robustheit / Sicherheit, aber vor allem **Effizienz**

# Effizienz

im Sinn von

- Laufzeit
- Speicheraufwand
- Festplattenzugriffe
- Energieverbrauch

Kritische Beispiele:

- Riesige Datenmengen (Bioinformatik)
- Echtzeitanwendungen (Spiele, Flugzeugsteuerung)

Ziel der Vorlesung:

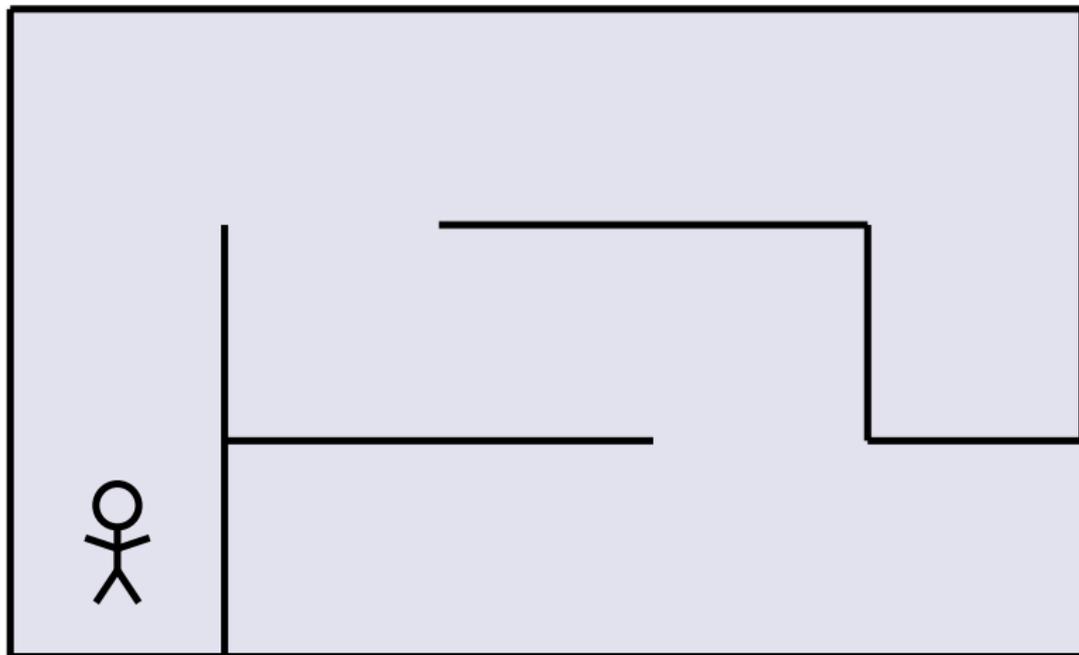
Grundstock an effizienten Algorithmen und Datenstrukturen für  
**Standardprobleme**

# Übersicht

## 2 Einführung

- Begriffsklärung: Algorithmen und Datenstrukturen
- Beispiele

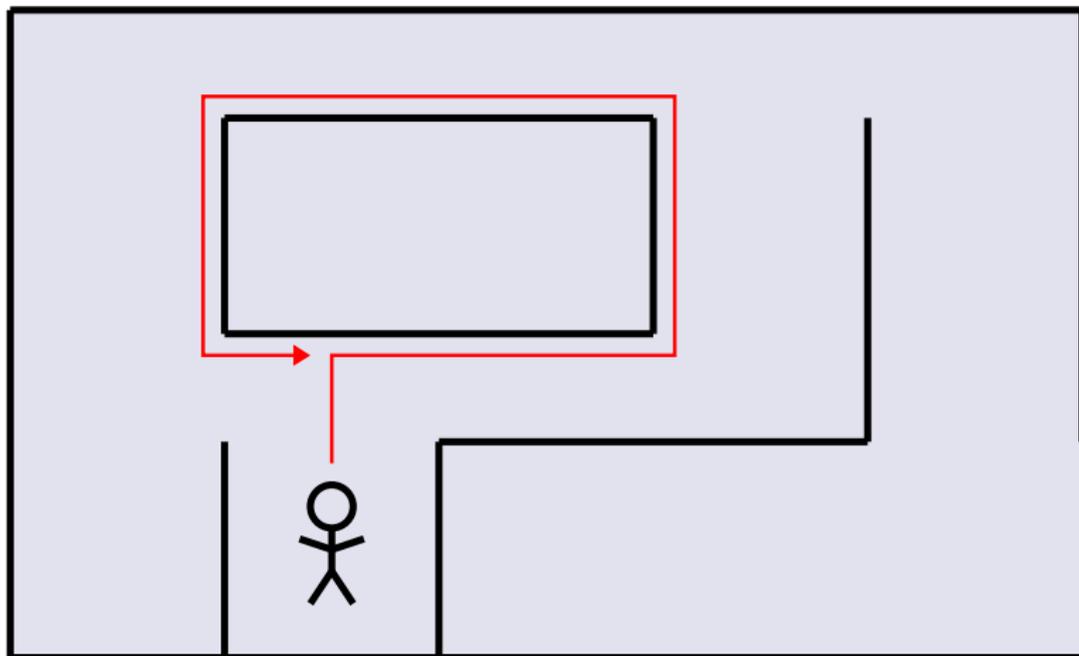
# Weg aus dem Labyrinth



Problem: Es ist dunkel!

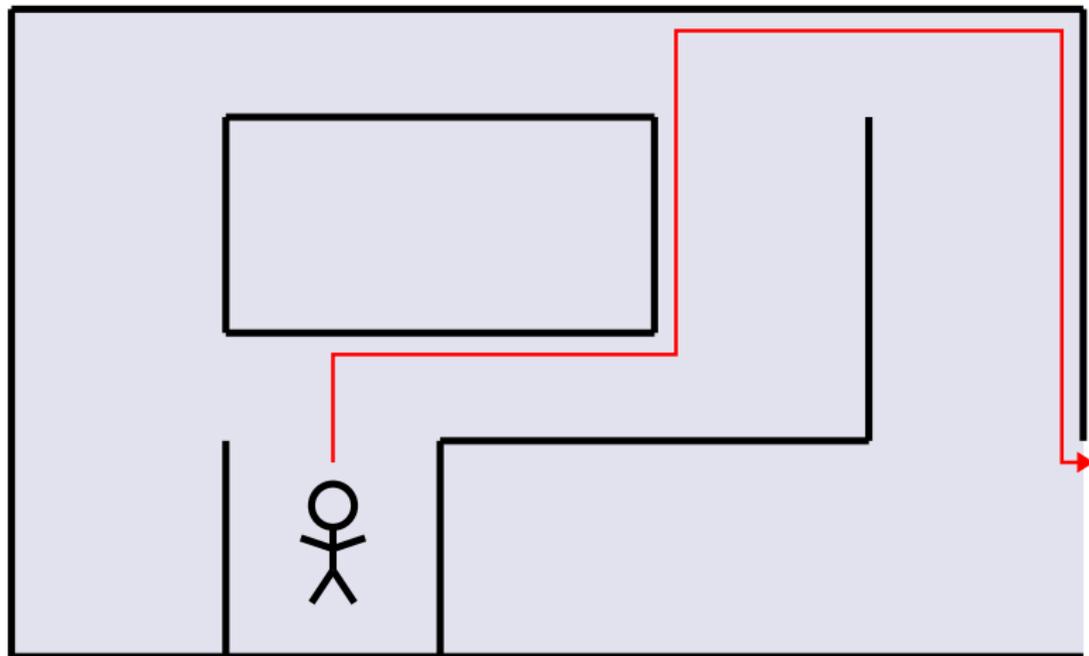


# Weg aus dem Labyrinth



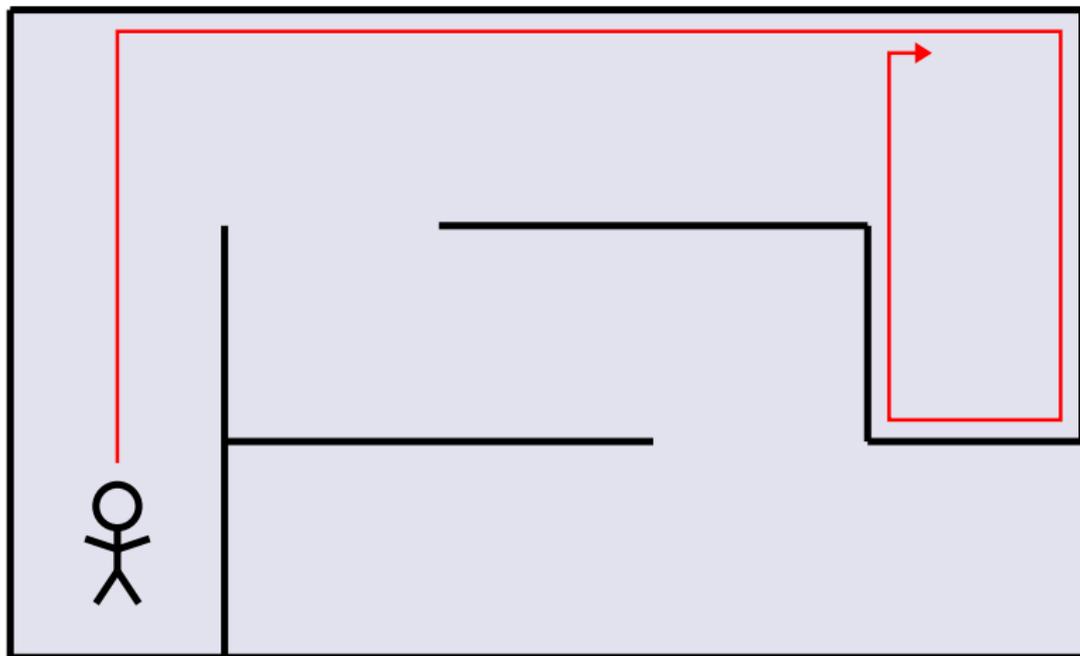
Problem: Inseln werden endlos umkreist

# Weg aus dem Labyrinth



2. Versuch: gerade bis zur Wand, der Wand folgen bis man wieder in dieselbe Richtung läuft, dann wieder gerade bis zur Wand usw.

# Weg aus dem Labyrinth



Problem: Jetzt laufen wir im ersten Beispiel im Kreis

# Pledge-Algorithmus

---

## Labyrinth-Suche

---

Setze Umdrehungszähler auf 0;

**repeat**

**repeat**

        | Gehe geradeaus;

**until** *Wand erreicht*;

    Drehe nach rechts;

    Inkrementiere Umdrehungszähler;

**repeat**

        | Folge dem Hindernis mit einer Hand;

        | dabei: je nach Drehrichtung Umdrehungszähler

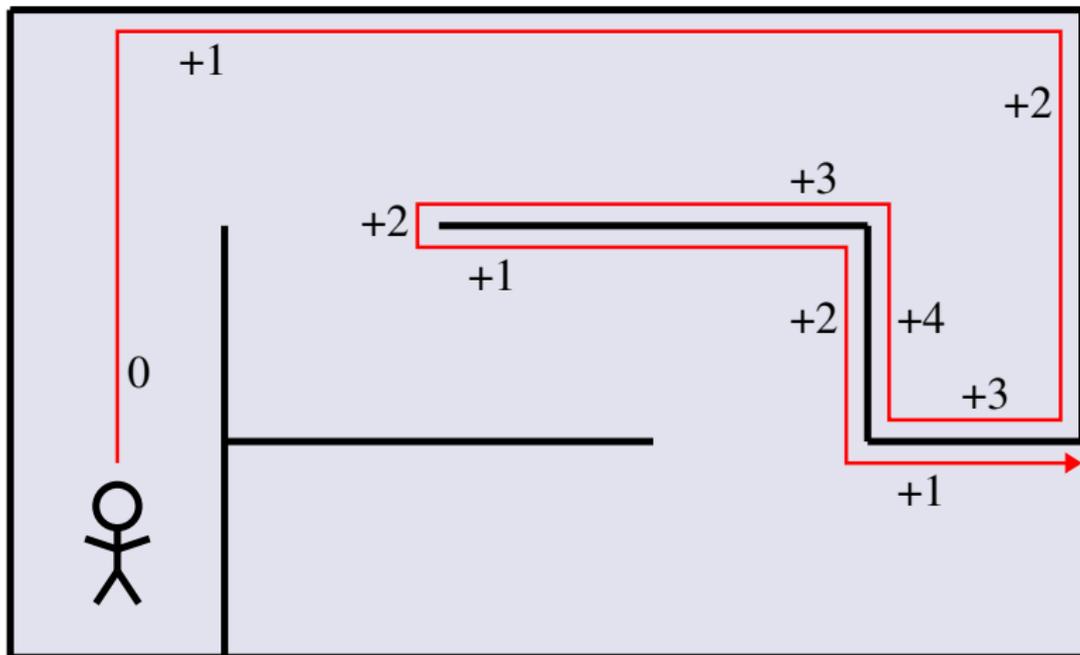
        | inkrementieren / dekrementieren;

**until** *Umdrehungszähler=0*;

**until** *Ausgang erreicht*;

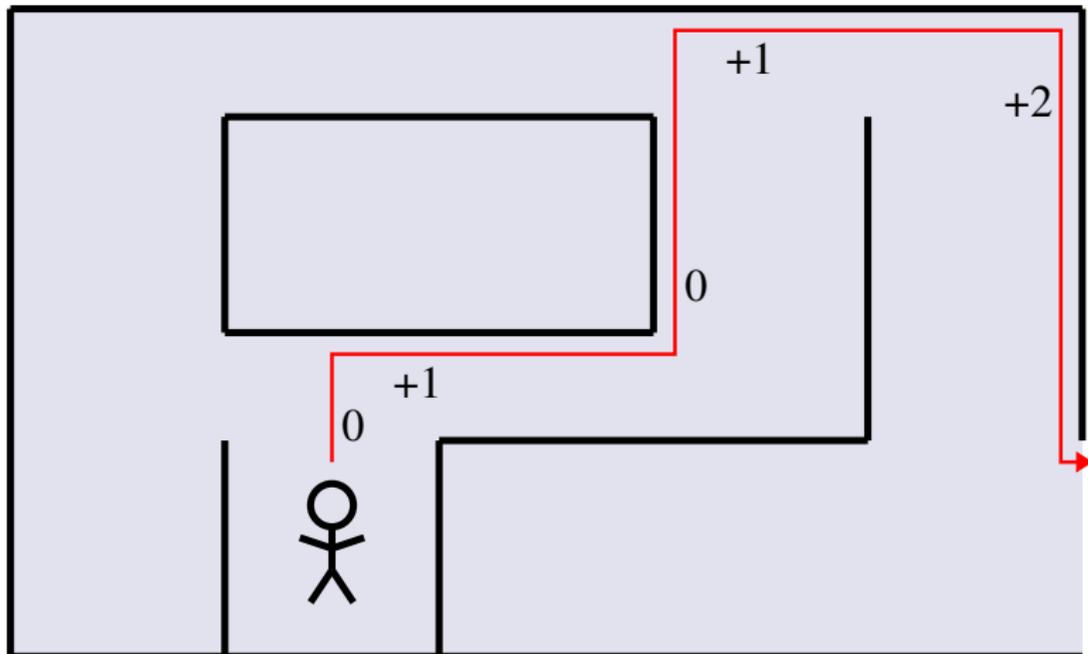
---

# Weg aus dem Labyrinth



1. Beispiel funktioniert

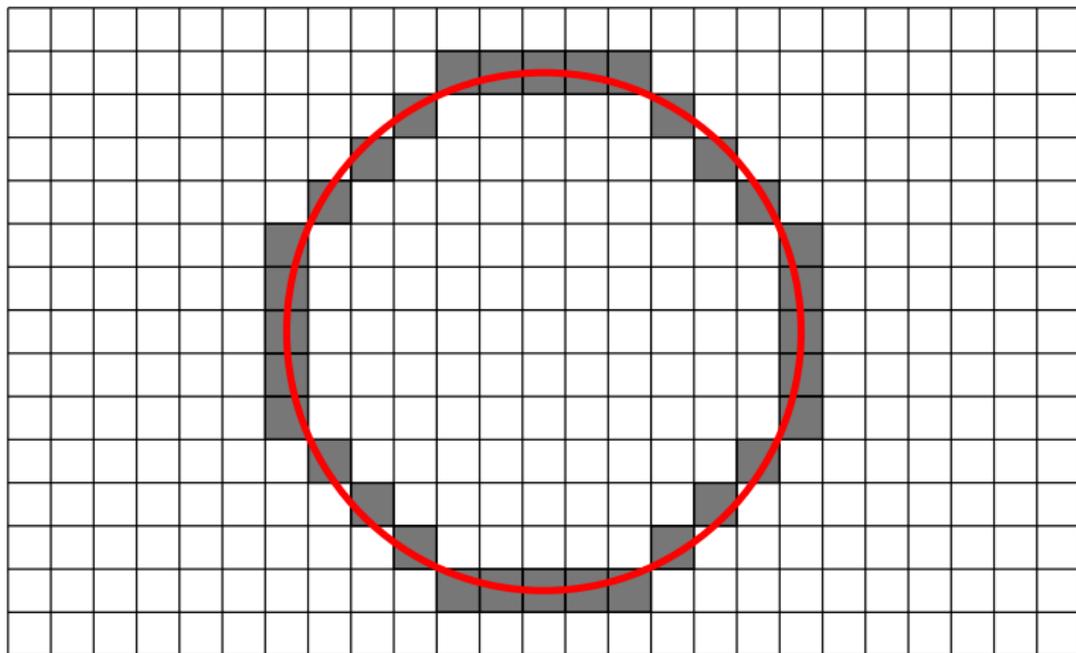
# Weg aus dem Labyrinth



2. Beispiel funktioniert auch

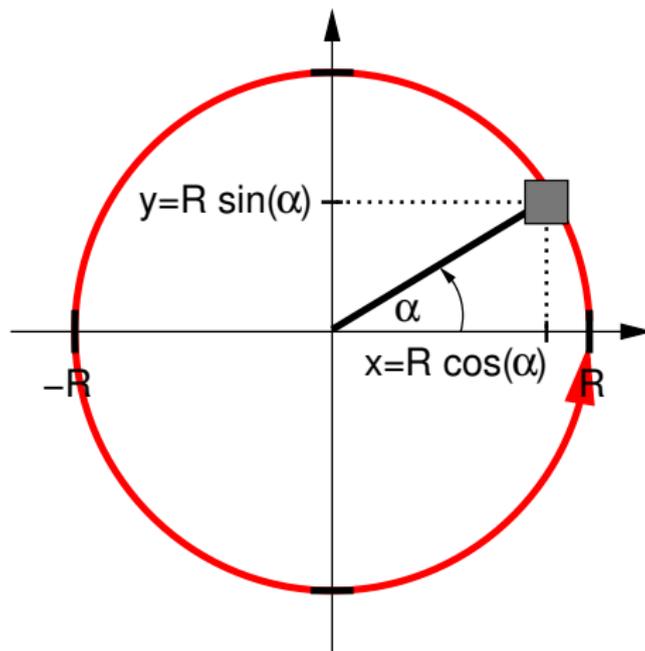
# Kreis zeichnen

Wie kann ein Computer einen Kreis zeichnen?



# Kreis zeichnen: mit Winkelfunktionen

Naiver Ansatz: eine Runde wie mit dem Zirkel



Verwendung von  $\sin$  und  $\cos$  für  $\alpha = 0 \dots 2\pi$

# Kreis zeichnen: mit Winkelfunktionen

---

Kreis1

---

**Eingabe** : Radius  $R$   
Pixelanzahl  $n$

```
for  $i = 0; i < n; i++$  do  
  | plot( $R * \cos(2\pi * i/n)$ ,  $R * \sin(2\pi * i/n)$ );
```

---

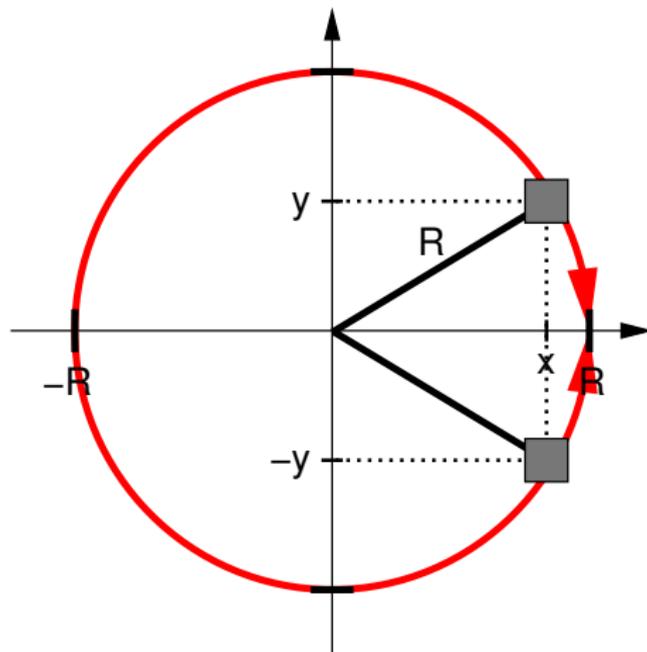
Kreisumfang:  $u = 2\pi \cdot R$

⇒ Bei Pixelbreite von 1 Einheit reicht  $n = \lceil 2\pi R \rceil$ .

Problem: sin und cos sind teuer!

# Kreis zeichnen: mit Wurzelfunktion

Schnellerer Ansatz:  $x^2 + y^2 = R^2$  bzw.  $y = \pm \sqrt{R^2 - x^2}$



1 Pixel pro Spalte für oberen / unteren Halbkreis

# Kreis zeichnen: mit Wurzelfunktion

---

Kreis2

---

**Eingabe** : radius  $R$

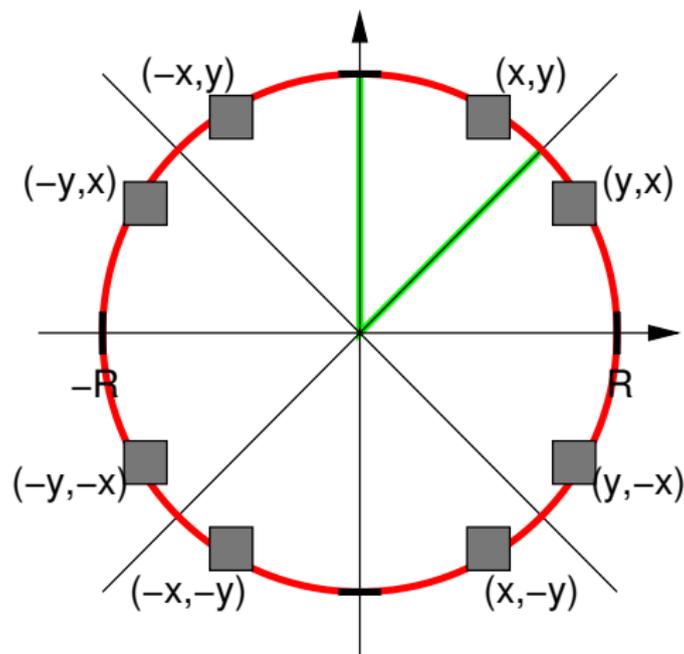
```
for  $x = -R; x \leq R; x++$  do  
   $y = \text{sqrt}(R * R - x * x);$   
  plot(x, y);  
  plot(x, -y);
```

---

Problem: sqrt ist auch noch relativ teuer!

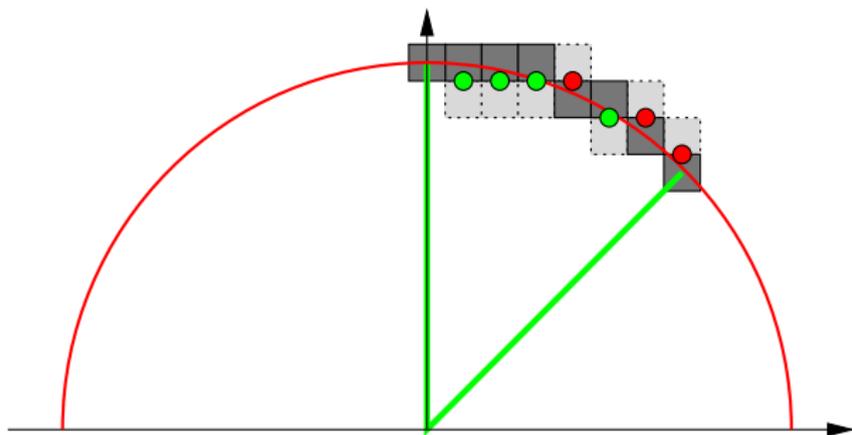
# Kreis zeichnen: mit Multiplikation

Besserer Ansatz: Ausnutzung von Spiegelachsen



## Kreis zeichnen: mit Multiplikation

- betrachtetes Kreissegment: Anstieg zwischen 0 und  $-1$
- 2 Fälle für nächstes Pixel: nur rechts oder rechts unten
- Entscheidungskriterium:  
Grundlinienmittelpunkt des rechten Nachbarpixels innerhalb vom Kreis? ja:  $x++$ , nein:  $x++; y--$



## Kreis zeichnen: mit Multiplikation

- Test, ob  $(x, y)$  innerhalb des Kreises:

$$F(x, y) := x^2 + y^2 - R^2 < 0$$

- Mittelpunkt des ersten Quadrats:  $(x, y) = (0, R)$
- Position seines Grundlinienmittelpunkts:  $(0, R - \frac{1}{2})$
- Grundlinienmittelpunkt rechts daneben:  
 $F(1, R - \frac{1}{2}) = 1^2 + (R - \frac{1}{2})^2 - R^2 = \frac{5}{4} - R < 0?$
- Update:

$$F(x + 1, y) = (x + 1)^2 + y^2 - R^2 = (x^2 + 2x + 1) + y^2 - R^2$$

$$F(x + 1, y) = F(x, y) + 2x + 1$$

$$\begin{aligned} F(x + 1, y - 1) &= (x + 1)^2 + (y - 1)^2 - R^2 \\ &= (x^2 + 2x + 1) + (y^2 - 2y + 1) - R^2 \end{aligned}$$

$$F(x + 1, y - 1) = F(x, y) + 2x - 2y + 2$$

# Kreis zeichnen: mit Multiplikation

---

## Bresenham1

---

$x = 0;$   $y = R;$

$\text{plot}(0, R);$   $\text{plot}(R, 0);$   $\text{plot}(0, -R);$   $\text{plot}(-R, 0);$

$F = \frac{5}{4} - R;$

**while**  $x < y$  **do**

**if**  $F < 0$  **then**

$F = F + 2 * x + 1;$

**else**

$F = F + 2 * x - 2 * y + 2;$

$y = y - 1;$

$x = x + 1;$

$\text{plot}(x, y);$   $\text{plot}(-x, y);$   $\text{plot}(-y, x);$   $\text{plot}(-y, -x);$

$\text{plot}(y, x);$   $\text{plot}(y, -x);$   $\text{plot}(x, -y);$   $\text{plot}(-x, -y);$

---

Es geht sogar noch etwas schneller!

## Kreis zeichnen: mit Addition / Subtraktion

- Ersetzung der Korrekturterme für  $F$ :

$$F = F + 2x + 1 \quad \rightarrow \quad F = F + d_E$$

$$F = F + 2x - 2y + 2 \quad \rightarrow \quad F = F + d_{SE}$$

mit  $d_E = 2x + 1$  und  $d_{SE} = 2x - 2y + 2$

- Anfangswerte:

$$d_E(0, R) = 2 \cdot 0 + 1 = 1$$

$$d_{SE}(0, R) = 2 \cdot 0 - 2 \cdot R + 2 = 2 - 2 \cdot R$$

- Updates nach rechts (E) und nach unten rechts (SE):

$$d_E(x + 1, y) = 2 \cdot (x + 1) + 1 = d_E(x, y) + 2$$

$$d_{SE}(x + 1, y) = 2 \cdot (x + 1) - 2 \cdot y + 2 = d_{SE}(x, y) + 2$$

$$d_E(x + 1, y - 1) = 2 \cdot (x + 1) + 1 = d_E(x, y) + 2$$

$$d_{SE}(x + 1, y - 1) = 2 \cdot (x + 1) - 2 \cdot (y - 1) + 2 = d_{SE}(x, y) + 4$$

# Kreis zeichnen: mit Addition / Subtraktion

- Der Bruch  $\frac{5}{4}$  kann durch 1 ersetzt werden, weil sich  $F$  immer um eine ganze Zahl ändert.
- D.h.

$$F = \frac{5}{4} - R + k < 0$$

ist äquivalent zu

$$F = 1 - R + k < 0$$

- Vorteil:  
nur noch **ganze** Zahlen!

# Kreis zeichnen: mit Addition / Subtraktion

## Bresenham2

```
x = 0;  y = R;  plot(0, R); plot(R, 0); plot(0, -R); plot(-R, 0);
```

```
F = 1 - R;
```

```
dE = 1;  dSE = 2 - R - R;
```

```
while x < y do
```

```
  if F < 0 then
```

```
    F = F + dE;
```

```
    dSE = dSE + 2;
```

```
  else
```

```
    F = F + dSE;
```

```
    y = y - 1;
```

```
    dSE = dSE + 4;
```

```
  x = x + 1;  dE = dE + 2;
```

```
  plot(x, y);  plot(-x, y);  plot(-y, x);  plot(-y, -x);
```

```
  plot(y, x);  plot(y, -x);  plot(x, -y);  plot(-x, -y);
```

# Bresenham-Algorithmus

- Ab Anfang der 1960er Jahre hat JACK BRESENHAM Algorithmen zur Linien- und Kreisdarstellung entwickelt.
- Diese verwenden nur einfache Additionen ganzer Zahlen.
- Sie sind damit deutlich schneller als die naiven Ansätze.
  
- Diese und weitere Beispiele:

Taschenbuch der Algorithmen (Springer, 2008)



# Übersicht

3

## Effizienz

- Effizienzmaße
- Rechenregeln für  $O$ -Notation
- Maschinenmodell / Pseudocode
- Laufzeitanalyse
- Durchschnittliche Laufzeit

# Übersicht

## 3 Effizienz

- **Effizienzmaße**
- Rechenregeln für  $O$ -Notation
- Maschinenmodell / Pseudocode
- Laufzeitanalyse
- Durchschnittliche Laufzeit

# Effizienzmessung

Exakte Spezifikation der Laufzeit eines Algorithmus  
(bzw. einer DS-Operation):

- Menge  $\mathcal{I}$  der Instanzen
- Laufzeit des Algorithmus  $T : \mathcal{I} \mapsto \mathbb{N}$

Problem:  $T$  sehr schwer exakt bestimmbar

Lösung: Gruppierung der Instanzen (meist nach Größe)

# Eingabekodierung

Was ist die **Größe** einer Instanz?

- Speicherplatz in Bits oder Wörtern

Aber Vorsicht bei der **Kodierung**!

Beispiel: Primfaktorisation

Gegeben: Zahl  $x \in \mathbb{N}$

Gesucht: Primfaktoren von  $x$  (Primzahlen  $p_1, \dots, p_k$  mit  $x = \prod_i p_i^{e_i}$ )

Bekannt als hartes Problem (wichtig für RSA!)

# Eingabekodierung - Beispiel Primfaktorisierung

## Trivialer Algorithmus

Teste von  $y = 2$  bis  $\lfloor \sqrt{x} \rfloor$  alle Zahlen, ob diese  $x$  teilen und wenn ja, dann bestimme wiederholt das Ergebnis der Division bis die Teilung nicht mehr ohne Rest möglich ist

Laufzeit:  $\sqrt{x}$  Teilbarkeitstests und höchstens  $\log_2 x$  Divisionen

- **Unäre** Kodierung von  $x$  ( $x$  Einsen als Eingabe): Laufzeit **linear**, Anzahl der Teilbarkeitstests und Divisionen ist sogar sublinear, aber die Eingabe muss einmal ganz gelesen werden
- **Binäre** Kodierung von  $x$  ( $\lceil \log_2 x \rceil$  Bits): Laufzeit **exponentiell** (bezüglich der Länge der Eingabe)

# Eingabekodierung

Betrachtete Eingabegröße:

- Größe von Zahlen: **binäre** Kodierung
- Größe von Mengen / Folgen von Zahlen:  
Hier wird oft nur die **Anzahl** der Elemente betrachtet(!)

## Beispiel (Sortieren)

Gegeben: Folge von Zahlen  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{N}$

Gesucht: sortierte Folge der Zahlen

Größe der Eingabe:  $n$

# Effizienzmessung

Für ein gegebenes Problem sei  $\mathcal{I}_n$  die Menge der Instanzen der Größe  $n$ .

Effizienzmaße:

- Worst case:

$$t(n) = \max\{T(i) : i \in \mathcal{I}_n\}$$

- Average case:

$$t(n) = \frac{1}{|\mathcal{I}_n|} \sum_{i \in \mathcal{I}_n} T(i)$$

# Effizienzmaße: Vor- und Nachteile

- worst case:  
liefert Garantie für die Effizienz des Algorithmus  
(auch wichtig für Robustheit)
  - average case:  
nicht unbedingt übereinstimmend mit dem “typischen Fall” in der Praxis (evt. schwer formal zu erfassen), kann durch Wahrscheinlichkeitsverteilung noch verallgemeinert werden
  - exakte Formeln für  $t(n)$  meist sehr aufwendig
- ⇒ betrachte **asymptotisches Wachstum**

# Asymptotische Notation

- $f(n)$  und  $g(n)$  haben **gleiche** Wachstumsrate, falls für große  $n$  das Verhältnis der beiden nach oben und unten durch Konstanten beschränkt ist, d.h.,

$$\exists c, d \in \mathbb{R}_+ \quad \exists n_0 \in \mathbb{N} \quad \forall n \geq n_0 : \quad c \leq \frac{f(n)}{g(n)} \leq d$$

- $f(n)$  wächst **schneller** als  $g(n)$ , wenn es für alle positiven Konstanten  $c$  ein  $n_0$  gibt, ab dem  $f(n) \geq c \cdot g(n)$  für  $n \geq n_0$  gilt, d.h.,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)} = 0$$

## Beispiel

$n^2$  und  $5n^2 - 7n$  haben das gleiche Wachstum, da für alle  $n \geq 2$   
 $\frac{1}{5} < \frac{(5n^2 - 7n)}{n^2} < 5$  und  $\frac{1}{5} < \frac{n^2}{(5n^2 - 7n)} < 5$  gilt.

# Asymptotische Notation

- Warum die Betrachtung der Wachstumsrate und die Forderung nur für **genügend große  $n$** ?

Ziel effizienter Algorithmen: Lösung großer Probleminstanzen gesucht: Verfahren, die für große Instanzen noch effizient sind  
Für große  $n$  sind Verfahren mit kleinerer Wachstumsrate besser.

- Warum Verzicht auf **konstante Faktoren**?

Unser Maschinenmodell ist nur eine Abstraktion von echten Computern und kann die eigentliche Rechenzeit sowieso nur bis auf konstante Faktoren bestimmen.

Deshalb ist es in den meisten Fällen sinnvoll, Algorithmen mit gleichem Wachstum erstmal als gleichwertig zu betrachten.

- Außerdem: Laufzeitangabe durch einfache Funktionen

# Asymptotische Notation

Mengen zur Formalisierung des asymptotischen Verhaltens:

$$O(f(n)) = \{g(n) : \exists c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

$$\Omega(f(n)) = \{g(n) : \exists c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

$$\Theta(f(n)) = O(f(n)) \cap \Omega(f(n))$$

$$o(f(n)) = \{g(n) : \forall c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

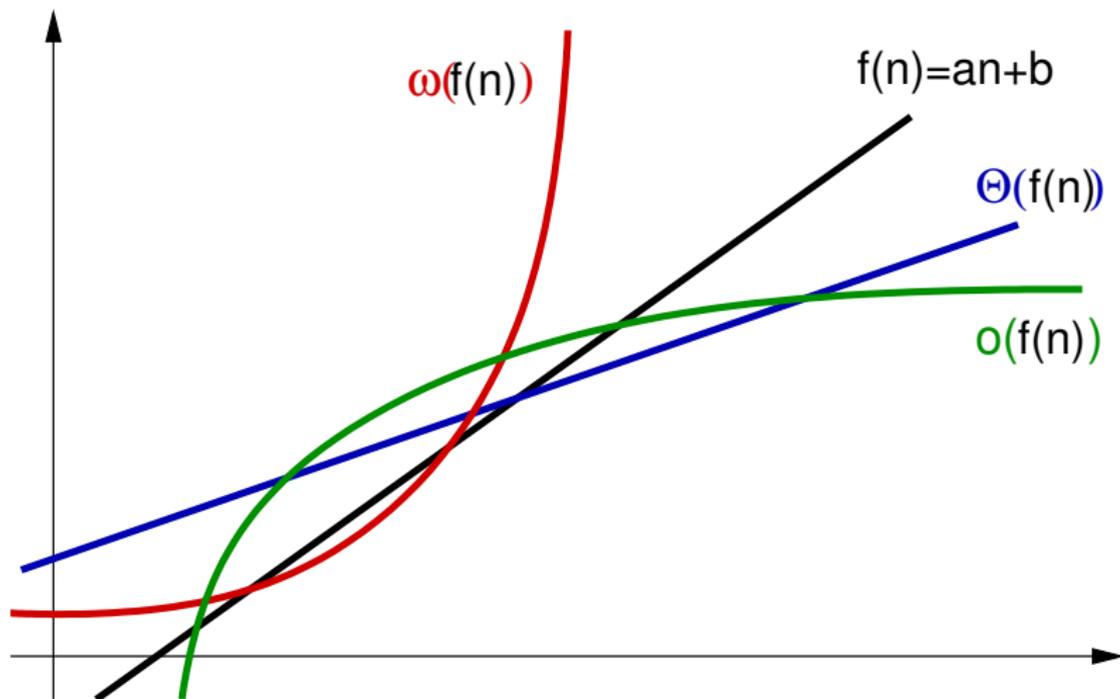
$$\omega(f(n)) = \{g(n) : \forall c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

Funktionen sollen Laufzeit bzw. Speicherplatz beschreiben

⇒ Forderung:  $\exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : f(n) > 0$

Manchmal auch:  $\forall n : f(n) \geq 0$

# Asymptotische Notation



# Asymptotische Notation

## Beispiel

- $5n^2 - 7n \in O(n^2)$ ,  $n^2/10 + 100n \in O(n^2)$ ,  $4n^2 \in O(n^3)$
- $5n^2 - 7n \in \Omega(n^2)$ ,  $n^3 \in \Omega(n^2)$ ,  $n \log n \in \Omega(n)$
- $5n^2 - 7n \in \Theta(n^2)$
- $\log n \in o(n)$ ,  $n^3 \in o(2^n)$
- $n^5 \in \omega(n^3)$ ,  $2^{2n} \in \omega(2^n)$

# Asymptotische Notation als Platzhalter

- statt  $g(n) \in O(f(n))$  schreibt man auch oft  $g(n) = O(f(n))$
- für  $f(n) + g(n)$  mit  $g(n) \in o(h(n))$  schreibt man auch  $f(n) + g(n) = f(n) + o(h(n))$
- statt  $O(f(n)) \subseteq O(g(n))$  schreibt man auch  $O(f(n)) = O(g(n))$

## Beispiel

$$n^3 + n = n^3 + o(n^3) = (1 + o(1))n^3 = O(n^3)$$

$O$ -Notations"gleichungen" sollten nur **von links nach rechts** gelesen werden!

# Übersicht

## 3 Effizienz

- Effizienzmaße
- **Rechenregeln für  $O$ -Notation**
- Maschinenmodell / Pseudocode
- Laufzeitanalyse
- Durchschnittliche Laufzeit

# Wachstum von Polynomen

## Lemma

Sei  $p$  ein Polynom der Ordnung  $k$  bzgl. der Variable  $n$ , also

$$p(n) = \sum_{i=0}^k a_i \cdot n^i \quad \text{mit} \quad a_k > 0.$$

Dann ist

$$p(n) \in \Theta(n^k).$$

# Wachstum von Polynomen

## Beweis.

Zu zeigen:  $p(n) \in O(n^k)$  und  $p(n) \in \Omega(n^k)$

$p(n) \in O(n^k)$ :

Für  $n \geq 1$  gilt:

$$p(n) \leq \sum_{i=0}^k |a_i| \cdot n^i \leq n^k \sum_{i=0}^k |a_i|$$

Also ist die Definition

$$O(f(n)) = \{g(n) : \exists c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \leq c \cdot f(n)\}$$

mit  $c = \sum_{i=0}^k |a_i|$  und  $n_0 = 1$  erfüllt.

# Wachstum von Polynomen

## Beweis.

$p(n) \in \Omega(n^k)$ :

Sei  $A = \sum_{i=0}^{k-1} |a_i|$ .

Für positive  $n$  gilt dann:

$$p(n) \geq a_k n^k - A n^{k-1} = \frac{a_k}{2} n^k + n^{k-1} \left( \frac{a_k}{2} n - A \right)$$

Also ist die Definition

$$\Omega(f(n)) = \{g(n) : \exists c > 0 : \exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : g(n) \geq c \cdot f(n)\}$$

mit  $c = a_k/2$  und  $n_0 > 2A/a_k$  erfüllt. □

# Rechenregeln für $O$ -Notation

Für Funktionen  $f(n)$  (bzw.  $g(n)$ ) mit der Eigenschaft  
 $\exists n_0 > 0 : \forall n \geq n_0 : f(n) > 0$  gilt:

## Lemma

- $c \cdot f(n) \in \Theta(f(n))$  für jede Konstante  $c > 0$
- $O(f(n)) + O(g(n)) = O(f(n) + g(n))$
- $O(f(n)) \cdot O(g(n)) = O(f(n) \cdot g(n))$
- $O(f(n) + g(n)) = O(f(n))$  falls  $g(n) \in O(f(n))$

Die Ausdrücke sind auch korrekt für  $\Omega$  statt  $O$ .

Vorsicht, der letzte heißt dann

- $\Omega(f(n) + g(n)) = \Omega(f(n))$  falls  $g(n) \in O(f(n))$

Aber: **Vorsicht bei induktiver Anwendung!**

## Induktions"beweis"

Behauptung:

$$\sum_{i=1}^n i = O(n)$$

"Beweis": Sei  $f(n) = n + f(n-1)$  und  $f(1) = 1$ .

Ind.anfang:  $f(1) = O(1)$

Ind.vor.: Es gelte  $f(n-1) = O(n-1)$

Ind.schritt: Dann gilt

$$f(n) = n + f(n-1) = n + O(n-1) = O(n)$$

Also ist

$$f(n) = \sum_{i=1}^n i = O(n)$$

**FALSCH!**

# Rechenregeln für $O$ -Notation

## Lemma

Seien  $f$  und  $g$  *differenzierbar*.

Dann gilt

- falls  $f'(n) \in O(g'(n))$ , dann auch  $f(n) \in O(g(n))$
- falls  $f'(n) \in \Omega(g'(n))$ , dann auch  $f(n) \in \Omega(g(n))$
- falls  $f'(n) \in o(g'(n))$ , dann auch  $f(n) \in o(g(n))$
- falls  $f'(n) \in \omega(g'(n))$ , dann auch  $f(n) \in \omega(g(n))$

**Umgekehrt** gilt das im Allgemeinen **nicht!**

# Rechenbeispiele für $O$ -Notation

## Beispiel

- 1. Lemma:

- ▶  $n^3 - 3n^2 + 2n \in O(n^3)$
- ▶  $O(\sum_{i=1}^n i) = O(n^2/2 + n/2) = O(n^2)$

- 2. Lemma:

Aus  $\log n \in O(n)$  folgt  $n \log n \in O(n^2)$ .

- 3. Lemma:

- ▶  $(\log n)' = 1/n$ ,  $(n)' = 1$  und  $1/n \in O(1)$ .  
 $\Rightarrow \log n \in O(n)$

# Übersicht

- 3 Effizienz
  - Effizienzmaße
  - Rechenregeln für  $O$ -Notation
  - **Maschinenmodell / Pseudocode**
  - Laufzeitanalyse
  - Durchschnittliche Laufzeit

# von Neumann / Princeton-Architektur



John von Neumann

Quelle: <http://wikipedia.org/>

1945 János / Johann / John von Neumann:  
Entwurf eines Rechnermodells: EDVAC  
(Electronic Discrete Variable Automatic Computer)

Programm und Daten teilen sich  
einen **gemeinsamen** Speicher

Besteht aus

- Arithmetic Logic Unit (ALU):  
Rechenwerk / Prozessor
- Control Unit: Steuerwerk (Befehlsinterpret)
- Memory: eindimensional adressierbarer  
Speicher
- I/O Unit: Ein-/Ausgabewerk

# Random Access Machine (RAM)

Was ist eigentlich ein Rechenschritt?

⇒ **Abstraktion** mit Hilfe von Rechner**modellen**

Bsp. Turingmaschine:

kann aber nicht auf beliebige Speicherzellen zugreifen,  
nur an der aktuellen Position des Lese-/Schreibkopfs

1963 John Shepherdson, Howard Sturgis (u.a.):

## Random Access Machine (RAM)

(beschränkte Registeranzahl)

Prozessor



Linear adressierbarer Speicher

(unbeschränkt)

# RAM: Speicher

- Unbeschränkt viele Speicherzellen (words)  $S[0], S[1], S[2], \dots$ , von denen zu jedem Zeitpunkt nur endlich viele benutzt werden
  - aber: Speicherung beliebig großer Zahlen würde zu unrealistischen Algorithmen führen
  - Jede Speicherzelle kann bei Eingabegröße  $n$  eine Zahl mit  $O(\log n)$  Bits speichern (angemessen: für konstant große Zellen würde man nur einen Faktor  $O(\log n)$  bei der Rechenzeit erhalten).
- ⇒ Gespeicherte Werte stellen polynomiell in  $n$  (Eingabegröße) beschränkte Zahlen dar.
- sinnvoll für Speicherung von Array-Indizes

## Begrenzter Parallelismus:

- sequentielles Maschinenmodell, aber
- Verknüpfung logarithmisch vieler Bits in konstanter Zeit

# RAM: Aufbau

Prozessor:

- Beschränkte Anzahl an Registern  $R_1, \dots, R_k$
- Instruktionszeiger zum nächsten Befehl

Programm:

- Nummerierte Liste von Befehlen  
(Adressen in Sprungbefehlen entsprechen dieser Nummerierung)

Eingabe:

- steht in Speicherzellen  $S[1], \dots, S[R_1]$

Modell / Reale Rechner:

- unendlicher / endlicher Speicher
- Abhängigkeit / Unabhängigkeit der Größe der Speicherzellen von der Eingabegröße

# RAM: Befehle

Annahme:

- Jeder Befehl dauert genau eine Zeiteinheit.
- Laufzeit ist Anzahl ausgeführter Befehle

Befehlssatz:

- Registerzuweisung:

$R_i := c$  Registerzuweisung für eine Konstante  $c$

$R_i := R_j$  Zuweisung von einem Register an ein anderes

- Speicherzugriff: (alle Zugriffe benötigen gleich viel Zeit)

$R_i := S[R_j]$  lesend: lädt Inhalt von  $S[R_j]$  in  $R_i$

$S[R_j] := R_i$  schreibend: speichert Inhalt von  $R_i$  in  $S[R_j]$

# RAM: Befehle

- Arithmetische / logische Operationen:

$R_i := R_j \text{ op } R_k$  binäre Rechenoperation

$\text{op} \in \{+, -, \cdot, \oplus, /, \%, \wedge, \vee, \dots\}$  oder

$\text{op} \in \{<, \leq, =, \geq, >\}$ : 1  $\hat{=}$  wahr, 0  $\hat{=}$  falsch

$R_i := \text{op } R_j$  unäre Rechenoperation

$\text{op} \in \{-, \neg\}$

- Sprünge:

$\text{jump } x$  Springe zu Position  $x$

$\text{jumpz } x R_i$  Falls  $R_i = 0$ , dann springe zu Position  $x$

$\text{jumpi } R_j$  Springe zur Adresse aus  $R_j$

Das entspricht Assembler-Code von realen Maschinen!

# Maschinenmodell

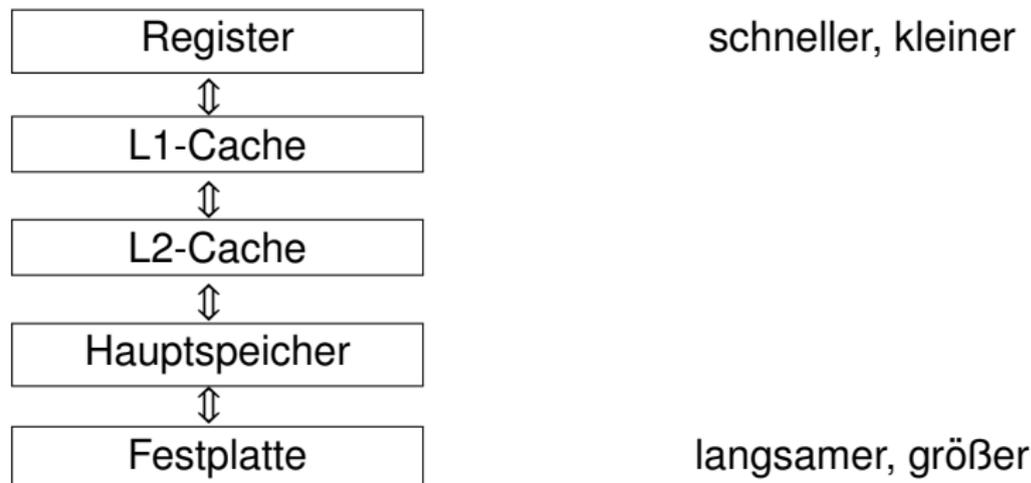
## RAM-Modell

- Modell für die ersten Computer
- entspricht eigentlich der Harvard-Architektur (separater Programmspeicher)
- Sein Äquivalent zur Universellen Turing-Maschine, das Random Access Stored Program (RASP) Modell entspricht der von Neumann-Architektur und hat große Ähnlichkeit mit üblichen Rechnern.

**Aber:** Speicherhierarchien und Multicore-Prozessoren erfordern Anpassung des RAM-Modells

⇒ Algorithm Engineering, z.B. External-Memory Model

# Speicherhierarchie



⇒ **External-Memory Model**

- begrenzter schneller Speicher mit  $M$  Zellen
- unbegrenzter (langsamer) externer Speicher
- I/O-Operationen transferieren  $B$  aufeinanderfolgende Worte

# Pseudocode

Maschinencode / Assembler umständlich

⇒ besser: Programmiersprache wie Pascal, C++, Java, ...

Variablendeklarationen:

`T v;` Variable  $v$  vom Typ  $T$

`T v=x;` initialisiert mit Wert  $x$

Variablentypen:

- `int`, `boolean`, `char`, `double`, ...
- Klassen  $T$ , Interfaces  $I$
- `T[n]`: Feld von Elementen vom Typ  $T$   
(indexiert von  $0$  bis  $n - 1$ )

# Pseudocode-Programme

Allokation und Deallokation von Speicherobjekten:

- $v = \text{new } T(v_1, \dots, v_k);$  // implizit wird Konstruktor für  $T$  aufgerufen

Sprachkonstrukte: (C: Bedingung, I,J: Anweisungen)

- $v = A;$  // Ergebnis von Ausdruck  $A$  wird an Variable  $v$  zugewiesen
- **if** (C) | **else** J
- **do** | **while** (C);    **while**(C) |
- **for**( $v = a; v < e; v++$ ) |
- **return**  $v;$

# Übersetzung in RAM-Befehle

- Zuweisungen lassen sich in konstant viele RAM-Befehle übersetzen, z.B.

$a := a + bc$

$R_1 := R_b * R_C;$

$R_a := R_a + R_1$

- ▶  $R_a, R_b, R_C$ : Register, in denen  $a, b$  und  $c$  gespeichert sind

- **if (C) | else J**

eval(C); jumpz sElse  $R_C$ ; trans(I); jump sEnd; trans(J)

- ▶ eval(C): Befehle, die die Bedingung C auswerten und das Ergebnis in Register  $R_C$  hinterlassen
- ▶ trans(I), trans(J): übersetzte Befehlsfolge für I und J
- ▶ sElse: Adresse des 1. Befehls in trans(J)
- ▶ sEnd: Adresse des 1. Befehls nach trans(J)

# Übersetzung in RAM-Befehle

- **repeat I until C**

trans(I); eval(C); jumpz sl  $R_c$

- ▶ trans(I): übersetzte Befehlsfolge für I
- ▶ eval(C): Befehle, die die Bedingung C auswerten und das Ergebnis in Register  $R_c$  hinterlassen
- ▶ sl: Adresse des ersten Befehls in trans(I)

- andere Schleifen lassen sich damit simulieren:

**while(C) I**       $\longrightarrow$       **if C then repeat I until  $\neg C$**

**for( $i = a; i \leq b; i++$ ) I**       $\longrightarrow$        $i := a; \mathbf{while}(i \leq b) I; i++$

# Übersicht

## 3 Effizienz

- Effizienzmaße
- Rechenregeln für  $O$ -Notation
- Maschinenmodell / Pseudocode
- **Laufzeitanalyse**
- Durchschnittliche Laufzeit

# Laufzeitanalyse

Was wissen wir?

- $O$ -Kalkül  
( $O(f(n))$ ,  $\Omega(f(n))$ ,  $\Theta(f(n))$ , ...)
- RAM-Modell  
(load, store, jump, ...)
- Pseudocode  
(if-else, while, new, ...)

Wie analysieren wir damit Programme?

## worst case

Berechnung der worst-case-Laufzeit:

- $T(I)$  sei worst-case-Laufzeit für Konstrukt  $I$
- $T(\text{elementare Zuweisung}) = O(1)$
- $T(\text{elementarer Vergleich}) = O(1)$
- $T(\text{return } x) = O(1)$
- $T(\text{new Typ}(\dots)) = O(1) + O(T(\text{Konstruktor}))$
- $T(I_1; I_2) = T(I_1) + T(I_2)$
- $T(\text{if } (C) I_1 \text{ else } I_2) = O(T(C) + \max\{T(I_1), T(I_2)\})$
- $T(\text{for}(i = a; i < b; i++) I) = O\left(\sum_{i=a}^{b-1} (1 + T(I))\right)$
- $T(e.m(\dots)) = O(1) + T(ss)$ , wobei  $ss$  Rumpf von  $m$

## Beispiel: Vorzeichenausgabe

---

signum( $x$ )

---

**Input** : Zahl  $x \in \mathbb{R}$

**Output** :  $-1, 0$  bzw.  $1$  entsprechend dem Vorzeichen von  $x$

**if**  $x < 0$  **then**

**return**  $-1$

**if**  $x > 0$  **then**

**return**  $1$

**return**  $0$

---

Wir wissen:

$$T(x < 0) = \mathcal{O}(1)$$

$$T(\text{return } -1) = \mathcal{O}(1)$$

$$T(\text{if } (C) I) = \mathcal{O}(T(C) + T(I))$$

Also:  $T(\text{if } (x < 0) \text{ return } -1) = \mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(1) = \mathcal{O}(1)$

## Beispiel: Vorzeichenausgabe

---

`signum(x)`

---

**Input** : Zahl  $x \in \mathbb{R}$

**Output** :  $-1, 0$  bzw.  $1$  entsprechend  
dem Vorzeichen von  $x$

**if**  $x < 0$  **then**

$\perp$  **return**  $-1$

$O(1)$

**if**  $x > 0$  **then**

$\perp$  **return**  $1$

$O(1)$

**return**  $0$

$O(1)$

---

$$O(1 + 1 + 1) = O(1)$$

## Beispiel: Minimumsuche

---

`minimum(A, n)`

---

**Input** : Zahlenfolge in  $A[0], \dots, A[n-1]$

$n$ : Anzahl der Zahlen

**Output** : Minimum der Zahlen

`min = A[0];`

**for** ( $i = 1; i < n; i++$ ) **do**

`if`  $A[i] < \text{min}$  **then** `min = A[i]`

**return** min

---

$O(1)$

$O(\sum_{i=1}^{n-1} (1 + T(i)))$

$O(1)$      ↗

$O(1)$

---

$$O(1 + (\sum_{i=1}^{n-1} 1) + 1) = O(n)$$

# Beispiel: BubbleSort

Sortieren durch Aufsteigen

Vertausche in jeder Runde in der (verbleibenden) Eingabesequenz (hier vom Ende in Richtung Anfang) jeweils zwei benachbarte Elemente, die nicht in der richtigen Reihenfolge stehen

## Beispiel

5	10	19	1	14	3
5	10	19	1	3	14
5	10	1	19	3	14
5	1	10	19	3	14
1	5	10	19	3	14

1	5	10	3	19	14
1	5	3	10	19	14
1	3	5	10	19	14
1	3	5	10	14	19
1	3	5	10	14	19

## Beispiel: Sortieren

---

BubbleSort( $A, n$ )

---

**Input** :  $n$ : Anzahl der Zahlen  
 $A[0], \dots, A[n-1]$ : Zahlenfolge

**Output** : Sortierte Zahlenfolge  $A$

```

for ( $i = 0; i < n - 1; i++$ ) do
  for ( $j = n - 2; j \geq i; j--$ ) do
    if  $A[j] > A[j + 1]$  then
       $x = A[j];$ 
       $A[j] = A[j + 1];$ 
       $A[j + 1] = x;$ 
  
```

$$\begin{aligned}
 &O(\sum_{i=0}^{n-2} T(i)) \\
 &O(\sum_{j=i}^{n-2} T(i)) \\
 &O(1 + T(i)) \\
 &O(1) \\
 &O(1) \\
 &O(1)
 \end{aligned}$$

---


$$O\left(\sum_{i=0}^{n-2} \sum_{j=i}^{n-2} 1\right)$$

# Beispiel: Sortieren

$$\begin{aligned} O\left(\sum_{i=0}^{n-2} \sum_{j=i}^{n-2} 1\right) &= \sum_{i=0}^{n-2} (n - i - 1) \\ &= \sum_{i=1}^{n-1} i \\ &= \frac{n(n-1)}{2} \\ &= \frac{n^2}{2} - \frac{n}{2} \\ &= O(n^2) \end{aligned}$$

## Beispiel: Binäre Suche

---

BinarySearch( $A, n, x$ )

---

**Input** :  $n$ : Anzahl der (sortierten) Zahlen  
 $A[0], \dots, A[n-1]$ : Zahlenfolge  
 $x$ : gesuchte Zahl

**Output** : Index der gesuchten Zahl

$\ell = 0;$

$r = n - 1;$

**while** ( $\ell \leq r$ ) **do**

$m = \lfloor (r + \ell) / 2 \rfloor;$

**if**  $A[m] == x$  **then return**  $m;$

**if**  $A[m] < x$  **then**  $\ell = m + 1;$

**else**  $r = m - 1;$

**return**  $-1$

---

$O(1)$

$O(1)$

$O(\sum_{i=1}^k T(l))$

$O(1) \uparrow$

$O(1)$

$O(1)$

$O(1)$

$O(1)$

---

$$O\left(\sum_{i=1}^k 1\right) = O(k)$$

# Beispiel: Binäre Suche

Aber: Wie groß ist die Anzahl der Schleifendurchläufe  $k$ ?

Größe des verbliebenen Suchintervalls  $(r - \ell + 1)$  nach Iteration  $i$ :

$$\begin{aligned}s_0 &= n \\ s_{i+1} &\leq \lfloor s_i/2 \rfloor\end{aligned}$$

Bei  $s_i < 1$  endet der Algorithmus.

$$\Rightarrow k \leq \log_2 n$$

Gesamtkomplexität:  $O(\log n)$

# Beispiel: Bresenham-Algorithmus

## Bresenham1

$x = 0; \quad y = R;$

$\text{plot}(0, R); \text{plot}(R, 0); \text{plot}(0, -R); \text{plot}(-R, 0);$

$F = \frac{5}{4} - R;$

**while**  $x < y$  **do**

**if**  $F < 0$  **then**

$F = F + 2 * x + 1;$

**else**

$F = F + 2 * x - 2 * y + 2;$

$y = y - 1;$

$x = x + 1;$

$\text{plot}(x, y); \text{plot}(-x, y); \text{plot}(-y, x); \text{plot}(-y, -x);$

$\text{plot}(y, x); \text{plot}(y, -x); \text{plot}(x, -y); \text{plot}(-x, -y);$

$O(1)$

$O(1)$

$O(1)$

$O(\sum_{i=1}^k T(l))$

alles  $O(1)$

Wie groß ist Anzahl Schleifendurchläufe  $k$ ?

$O(\sum_{i=1}^k 1) = O(k)$

# Beispiel: Bresenham-Algorithmus

- Betrachte dazu die Entwicklung der Wert der Funktion

$$\varphi(x, y) = y - x$$

- Anfangswert:  $\varphi_0(x, y) = R$
- Monotonie: verringert sich pro Durchlauf um mindestens 1
- Beschränkung: durch die **while**-Bedingung  $x < y$   
bzw.  $0 < y - x$

⇒ maximal  $R$  Runden

## Beispiel: Fakultätsfunktion

---

fakultaet( $n$ )

---

**Input** :  $n \in \mathbb{N}_+$

**Output** :  $n!$

**if** ( $n == 1$ ) **then**

**return** 1

**else**

**return**  $n * \text{fakultaet}(n - 1)$

---

$O(1)$

$O(1)$

$O(1 + \dots?)$

- $T(n)$ : Laufzeit von fakultaet( $n$ )
  - $T(1) = O(1)$
  - $T(n) = T(n - 1) + O(1)$
- $\Rightarrow T(n) = O(n)$

# Übersicht

- 3 Effizienz
  - Effizienzmaße
  - Rechenregeln für  $O$ -Notation
  - Maschinenmodell / Pseudocode
  - Laufzeitanalyse
  - **Durchschnittliche Laufzeit**

# Average Case Complexity

Uniforme Verteilung:  
(alle Instanzen gleichwahrscheinlich)

$$t(n) = \frac{1}{|\mathcal{I}_n|} \sum_{i \in \mathcal{I}_n} T(i)$$

Tatsächliche Eingabeverteilung kann in der Praxis aber stark von uniformer Verteilung abweichen.

Dann

$$t(n) = \sum_{i \in \mathcal{I}_n} p_i \cdot T(i)$$

Aber: meist schwierig zu berechnen!

## Beispiel: Binärzahl-Inkrementierung

---

increment( $A$ )

---

**Input** : Array  $A$  mit Binärzahl in  $A[0] \dots A[n-1]$ ,  
in  $A[n]$  steht eine 0

**Output** : inkrementierte Binärzahl in  $A[0] \dots A[n]$

$i = 0$ ;

**while** ( $A[i] == 1$ ) **do**

┌  $A[i] = 0$ ;

└  $i = i + 1$ ;

$A[i] = 1$ ;

---

Durchschnittliche Laufzeit für Zahl mit  $n$  Bits?

# Beispiel: Binärzahl-Inkrementierung

Analyse:

- Sei  $\mathcal{I}_n$  die Menge der  $n$ -Bit-Instanzen.
- Für die Hälfte ( $1/2$ ) der Zahlen  $x_{n-1} \dots x_0 \in \mathcal{I}_n$  ist  $x_0 = 0$   
⇒ 1 Schleifendurchlauf
- Für die andere Hälfte gilt für die Hälfte (also insgesamt  $1/4$ ) der Zahlen  $x_1 x_0 = 01$   
⇒ 2 Schleifendurchläufe
- Für den Anteil  $(1/2)^k$  der Zahlen gilt  $x_{k-1} x_{k-2} \dots x_0 = 01 \dots 1$   
⇒  $k$  Schleifendurchläufe

# Beispiel: Binärzahl-Inkrementierung

Durchschnittliche Laufzeit:

$$\begin{aligned}t(n) &= \frac{1}{|\mathcal{I}_n|} \sum_{i \in \mathcal{I}_n} T(i) \\&= \frac{1}{|\mathcal{I}_n|} \sum_{k=1}^n \frac{|\mathcal{I}_n|}{2^k} \cdot O(k) \\&= \sum_{k=1}^n O\left(\frac{k}{2^k}\right) \\&= O\left(\sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k}\right) \stackrel{?}{=} O(1)\end{aligned}$$

# Beispiel: Binärzahl-Inkrementierung

## Lemma

$$\sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} \leq 2 - \frac{n+2}{2^n}$$

## Beweis.

Induktionsanfang: Für  $n = 1$  gilt:

$$\sum_{k=1}^1 \frac{k}{2^k} = \frac{1}{2} \leq 2 - \frac{1+2}{2^1} \quad \checkmark$$

Induktionsvoraussetzung: Für  $n$  gilt:

$$\sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} \leq 2 - \frac{n+2}{2^n}$$

# Beispiel: Binärzahl-Inkrementierung

## Beweis.

Induktionsschritt:  $n \rightarrow n + 1$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n+1} \frac{k}{2^k} &= \left( \sum_{k=1}^n \frac{k}{2^k} \right) + \frac{n+1}{2^{n+1}} \\ &\leq 2 - \frac{n+2}{2^n} + \frac{n+1}{2^{n+1}} \quad (\text{laut Ind.vor.}) \\ &= 2 - \frac{2n+4}{2^{n+1}} + \frac{n+1}{2^{n+1}} = 2 - \frac{2n+4-n-1}{2^{n+1}} \\ &= 2 - \frac{n+3}{2^{n+1}} \\ &= 2 - \frac{(n+1)+2}{2^{n+1}} \end{aligned}$$



# Zufallsvariable

## Definition

Für einen Wahrscheinlichkeitsraum mit Ergebnismenge  $\Omega$  nennt man eine Abbildung  $X : \Omega \mapsto \mathbb{R}$  (numerische) **Zufallsvariable**.

Eine Zufallsvariable über einer endlichen oder abzählbar unendlichen Ergebnismenge heißt **diskret**.

Der Wertebereich diskreter Zufallsvariablen

$$W_X := X(\Omega) = \{x \in \mathbb{R} \mid \exists \omega \in \Omega \text{ mit } X(\omega) = x\}$$

ist ebenfalls endlich bzw. abzählbar unendlich.

Schreibweise:  $\Pr[X = x] := \Pr[X^{-1}(x)] = \sum_{\omega \in \Omega \mid X(\omega) = x} \Pr[\omega]$

# Zufallsvariable

## Beispiel

Wir ziehen aus einem Poker-Kartenspiel mit 52 Karten (13 von jeder Farbe) eine Karte.

Wir bekommen bzw. bezahlen einen bestimmten Betrag, je nachdem welche Farbe die Karte hat, z.B. 4 Euro für Herz, 7 Euro für Karo, -5 Euro für Kreuz und -3 Euro für Pik.

Wenn wir ein As ziehen, bekommen wir zusätzlich 1 Euro.

$$\Omega = \{\heartsuit A, \heartsuit K, \dots, \heartsuit 2, \diamondsuit A, \diamondsuit K, \dots, \diamondsuit 2, \clubsuit A, \clubsuit K, \dots, \clubsuit 2, \spadesuit A, \spadesuit K, \dots, \spadesuit 2\}.$$

$X$  sei der Geldbetrag den wir bekommen bzw. bezahlen.

$$W_X = \{-5, -4, -3, -2, 4, 5, 7, 8\}$$

$$\Pr[X = -3] = \Pr[\spadesuit K] + \dots + \Pr[\spadesuit 2] = 12/52 = 3/13$$

# Erwartungswert

## Definition

Für eine (diskrete) Zufallsvariable  $X$  ist der **Erwartungswert** definiert als

$$\mathbb{E}[X] := \sum_{x \in W_X} x \cdot \Pr[X = x] = \sum_{x \in W_X} x \cdot f_X(x)$$

sofern  $\sum_{x \in W_X} |x| \cdot \Pr[X = x]$  konvergiert.

## Beispiel

(Beispiel wie zuvor)

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X] &= 4 \cdot \frac{12}{52} + 5 \cdot \frac{1}{52} + 7 \cdot \frac{12}{52} + 8 \cdot \frac{1}{52} \\ &\quad + (-5) \cdot \frac{12}{52} + (-4) \cdot \frac{1}{52} + (-3) \cdot \frac{12}{52} + (-2) \cdot \frac{1}{52} = \frac{43}{52} \end{aligned}$$

# Erwartungswert zusammengesetzter Zufallsvariablen

## Satz (Linearität des Erwartungswerts)

Für Zufallsvariablen  $X_1, \dots, X_n$  und

$$X := a_1 X_1 + \dots + a_n X_n$$

mit  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{R}$  gilt

$$\mathbb{E}[X] = a_1 \mathbb{E}[X_1] + \dots + a_n \mathbb{E}[X_n].$$

Interessant ist für uns vor allem der einfache Fall:

$$X := X_1 + \dots + X_n$$

mit

$$\mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[X_1] + \dots + \mathbb{E}[X_n].$$

## Beispiel: Suche in statischer Liste



- gegeben: Liste mit Elementen  $1, \dots, m$
- $\text{search}(i)$ : lineare Suche nach Element  $i$  ab Listenanfang
  - $s_i$  Position von Element  $i$  in der Liste ( $1 \hat{=}$  Anfang)
  - $p_i$  Wahrscheinlichkeit für Zugriff auf Element  $i$

Erwartete Laufzeit der Operation  $\text{search}(i)$  mit zufälligem  $i$ :

$$\mathbb{E}[T(\text{search}(i))] = O\left(\sum_i p_i s_i\right)$$

Erwartete Laufzeit  $t(n)$  für  $n$  Zugriffe bei **statischer** Liste:

$$t(n) = \mathbb{E}[T(n \times \text{search}(i))] = n \cdot \mathbb{E}[T(\text{search}(i))] = O\left(n \sum_i p_i s_i\right)$$

# Beispiel: Suche in statischer Liste

## Optimale Anordnung?

⇒ wenn für alle Elemente  $i, j$  mit  $p_i > p_j$  gilt, dass  $s_i < s_j$ , d.h. die Elemente nach Zugriffswahrscheinlichkeit sortiert sind

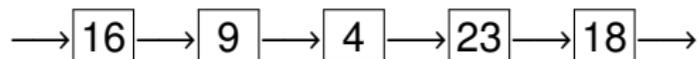
o.B.d.A. seien die Indizes so, dass  $p_1 \geq p_2 \geq \dots \geq p_m$

- Optimale Anordnung:  $s_i = i$
- Optimale erwartete Laufzeit:  $\text{opt} = \sum_i p_i \cdot i$

Einfach: wenn die Zugriffswahrscheinlichkeiten bekannt sind  
⇒ optimale erwartete Laufzeit durch absteigende Sortierung nach  $p_i$

Problem: was wenn die Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  unbekannt sind?

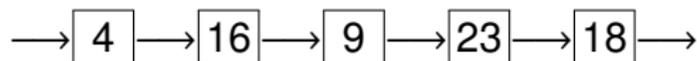
# Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste



## Move-to-Front Rule:

Verschiebe nach jeder erfolgreichen Suche das gefundene Element an den Listenanfang

Bsp.: Ausführung von `search(4)` ergibt



## Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste

Erwartete Laufzeit  $t(n)$  bei **dynamischer** Liste:

$$\mathbb{E}[T(1 \times \text{search}(i))] = \mathcal{O}\left(\sum_i p_i \cdot \mathbb{E}[s_i]\right)$$

$$t(n) = \mathbb{E}[T(n \times \text{search}(i))] = \mathcal{O}\left(\sum_{j=1}^n \sum_i p_i \cdot \mathbb{E}[s_i]\right)$$

### Satz

Die erwartete Laufzeit für  $n$  search-Operationen bei Verwendung der **Move-to-Front** Rule ist maximal  **$2 \cdot \text{opt}$**  für genügend große  $n$ .

# Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste

## Beweis.

Betrachte zwei feste Elemente  $i$  und  $j$

$t_0$  Zeitpunkt der letzten Suchoperation auf  $i$  oder  $j$

- bedingte Wahrscheinlichkeit:  $\Pr[A | B] = \frac{\Pr[A \wedge B]}{\Pr[B]}$
- $\Pr[C | (C \vee D)] = \frac{\Pr[C \wedge (C \vee D)]}{\Pr[C \vee D]} = \frac{\Pr[C]}{\Pr[C \vee D]}$
- $\Pr[\text{search}(j) \text{ bei } t_0 | \text{search}(i \vee j) \text{ bei } t_0] = \frac{p_j}{p_i + p_j}$
- mit Wsk.  $\frac{p_i}{p_i + p_j}$  steht  $i$  vor  $j$  und mit Wsk.  $\frac{p_j}{p_i + p_j}$  steht  $j$  vor  $i$

# Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste

## Beweis.

Betrachte nun nur ein festes Element  $i$

- Definiere Zufallsvariablen  $X_j \in \{0, 1\}$  für  $j \neq i$ :

$$X_j = 1 \quad \Leftrightarrow \quad j \text{ vor } i \text{ in der Liste}$$

- Erwartungswert:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X_j] &= 0 \cdot \Pr[X_j = 0] + 1 \cdot \Pr[X_j = 1] \\ &= \Pr[\text{letzte Suche nach } i / j \text{ war nach } j] \\ &= \frac{p_j}{p_i + p_j} \end{aligned}$$

# Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste

## Beweis.

- Listenposition von Element  $i$ :  $1 + \sum_{j \neq i} X_j$
- Erwartungswert der Listenposition von Element  $i$ :

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[s_i] &= \mathbb{E}\left[1 + \sum_{j \neq i} X_j\right] \\ &= 1 + \mathbb{E}\left[\sum_{j \neq i} X_j\right] = 1 + \sum_{j \neq i} \mathbb{E}[X_j] \\ \mathbb{E}[s_{i,MTF}] &= 1 + \sum_{j \neq i} \frac{p_j}{p_i + p_j}\end{aligned}$$

# Beispiel: Suche in selbstorganisierender Liste

## Beweis.

Erwartete Laufzeit für Operation  $t$  für genügend großes  $t$ :

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[T_{\text{MTF}}] &= \sum_i p_i \left( 1 + \sum_{j \neq i} \frac{p_j}{p_i + p_j} \right) \\
 &= \sum_i \left( p_i + \sum_{j \neq i} \frac{p_i p_j}{p_i + p_j} \right) = \sum_i \left( p_i + 2 \sum_{j < i} \frac{p_i p_j}{p_i + p_j} \right) \\
 &= \sum_i p_i \left( 1 + 2 \sum_{j < i} \frac{p_j}{p_i + p_j} \right) \leq \sum_i p_i \left( 1 + 2 \sum_{j < i} 1 \right) \\
 &\leq \sum_i p_i \cdot (2i - 1) < \sum_i p_i \cdot 2i = 2 \cdot \text{opt}
 \end{aligned}$$



# Übersicht

## 4 Datenstrukturen für Sequenzen

- Felder
- Listen
- Stacks und Queues
- Diskussion: Sortierte Sequenzen

# Sequenzen

Sequenz: lineare Struktur

$$s = \langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle$$

(Gegensatz: verzweigte Struktur in Graphen, fehlende Struktur in Hashtab.)

Klassische Repräsentation:

- (Statisches) Feld / Array:  
**direkter** Zugriff über  $s[i]$ 
  - ▶ Vorteil: Zugriff über Index, homogen im Speicher
  - ▶ Nachteil: dynamische Größenänderung schwierig
- Liste:  
**indirekter** Zugriff über Nachfolger / Vorgänger
  - ▶ Vorteil: Einfügen / Löschen von Teilsequenzen
  - ▶ Nachteil: kein Zugriff per Index, Elemente über Speicher verteilt

# Sequenzen

## Operationen:

- $\langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle[i]$  liefert Referenz auf  $e_i$
- $\langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle.get(i) = e_i$
- $\langle e_0, \dots, e_{i-1}, e_i, \dots, e_{n-1} \rangle.set(i, e) = \langle e_0, \dots, e_{i-1}, e, \dots, e_{n-1} \rangle$
- $\langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle.pushBack(e) = \langle e_0, \dots, e_{n-1}, e \rangle$
- $\langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle.popBack() = \langle e_0, \dots, e_{n-2} \rangle$
- $\langle e_0, \dots, e_{n-1} \rangle.size() = n$

# Übersicht

## 4 Datenstrukturen für Sequenzen

- **Felder**
- Listen
- Stacks und Queues
- Diskussion: Sortierte Sequenzen

# Sequenz als Feld

Problem: beschränkter Speicher

- Feld:

andere Daten	8	3	9	7	4				andere Daten
--------------	---	---	---	---	---	--	--	--	--------------

- `pushBack(1)`, `pushBack(5)`, `pushBack(2)`:

andere Daten	8	3	9	7	4	1	5	2	andere Daten
--------------	---	---	---	---	---	---	---	---	--------------

- `pushBack(6)`: **voll!**

# Sequenz als Feld

Problem:

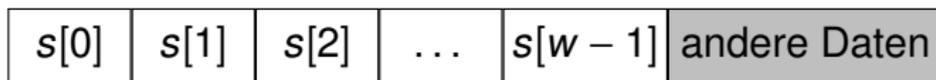
- Beim Anlegen des Felds ist nicht bekannt, wieviele Elemente es enthalten wird
- Nur Anlegen von **statischen** Feldern möglich  
(`s = new ElementTyp[w]`)

Lösung: Datenstruktur für **dynamisches** Feld

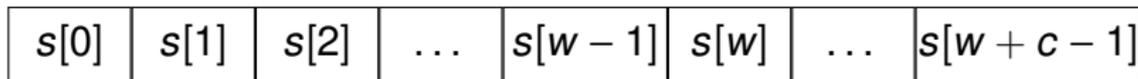
# Dynamisches Feld

Erste Idee:

- Immer dann, wenn Feld  $s$  nicht mehr ausreicht:  
generiere neues Feld der Größe  $w + c$  für ein festes  $c$



⇓ **Kopieren** in neues größeres Feld



# Dynamisches Feld

Zeitaufwand für Erweiterung:  $O(w + c) = O(w)$

s[0]	s[1]	s[2]	...	s[w - 1]	andere Daten
------	------	------	-----	----------	--------------

⇓ **Kopieren** in neues größeres Feld

s[0]	s[1]	s[2]	...	s[w - 1]	s[w]	...	s[w + c - 1]
------	------	------	-----	----------	------	-----	--------------

Zeitaufwand für  $n$  pushBack Operationen:

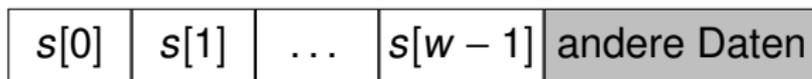
- Aufwand von  $O(w)$  nach jeweils  $c$  Operationen
- Gesamtaufwand:

$$O\left(\sum_{i=1}^{n/c} c \cdot i\right) = O(n^2)$$

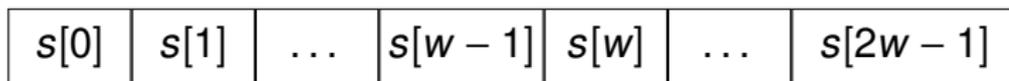
# Dynamisches Feld

Bessere Idee:

- Immer dann, wenn Feld  $s$  nicht mehr ausreicht:  
generiere neues Feld der **doppelten** Größe  $2w$



↓ **Kopieren** in neues größeres Feld



- Immer dann, wenn Feld  $s$  zu groß ist ( $n \leq w/4$ ):  
generiere neues Feld der **halben** Größe  $w/2$

# Dynamisches Feld

## Implementierung

Klasse **UArray** mit den Methoden:

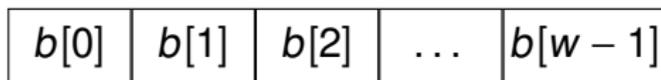
- ElementTyp **get**(int i)
  - **set**(int i, ElementTyp& e)
  - int **size**()
  - void **pushBack**(ElementTyp e)
  - void **popBack**()
  - void **reallocate**(int new\_w)
- 
- ElementTyp& [int i]  
auch möglich, aber Referenz nur bis zur nächsten Größenänderung des Felds gültig

# Dynamisches Feld

## Implementierung

Klasse **UArray** mit den Elementen:

- $\beta = 2$  // Wachstumsfaktor
- $\alpha = 4$  // max. Speicheroverhead
- $w = 1$  // momentane Feldgröße
- $n = 0$  // momentane Elementanzahl
- $\mathbf{b} = \text{new ElementTyp}[w]$  // statisches Feld



# Dynamisches Feld

## Implementierung

```
ElementTyp get(int i) {  
    assert(0 ≤ i < n);  
    return b[i];  
}
```

```
set(int i, ElementTyp& e) {  
    assert(0 ≤ i < n);  
    b[i] = e;  
}
```

```
int size() {  
    return n;  
}
```

# Dynamisches Feld

## Implementierung

```
void pushBack(ElementTyp e) {  
    if (n==w)  
        reallocate( $\beta * n$ );  
    b[n]=e;  
    n++;  
}
```

n=4, w=4

0	1	2	3
---	---	---	---

0	1	2	3				
---	---	---	---	--	--	--	--

0	1	2	3	e			
---	---	---	---	---	--	--	--

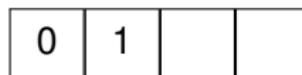
n=5, w=8

# Dynamisches Feld

## Implementierung

```
void popBack() {  
    assert(n>0);  
    n--;  
    if ( $\alpha * n \leq w \wedge n > 0$ )  
        reallocate( $\beta * n$ );  
}
```

$n=3, w=8$



$n=2, w=4$

# Dynamisches Feld

## Implementierung

```
void reallocate(int new_w) {  
    w = new_w;  
    ElementType[] new_b = new ElementType[new_w];  
    for (i=0; i<n; i++)  
        new_b[i] = b[i];  
    b = new_b;  
}
```

# Dynamisches Feld

Wieviel Zeit kostet eine Folge von  $n$  pushBack-/popBack-Operationen?

Erste Idee:

- einzelne Operation kostet  $O(n)$
- Schranke kann nicht weiter gesenkt werden, denn reallocate-Aufrufe kosten jeweils  $\Theta(n)$

⇒ also Gesamtkosten für  $n$  Operationen beschränkt durch  $n \cdot O(n) = O(n^2)$

# Dynamisches Feld

Wieviel Zeit kostet eine Folge von  $n$  pushBack-/popBack-Operationen?

Zweite Idee:

- betrachtete Operationen sollen direkt aufeinander folgen
  - zwischen Operationen mit reallocate-Aufruf gibt es immer auch welche ohne
- ⇒ vielleicht ergibt sich damit gar nicht die  $n$ -fache Laufzeit einer Einzeloperation

## Lemma

*Betrachte ein anfangs leeres dynamisches Feld  $s$ .*

*Jede Folge  $\sigma = \langle \sigma_1, \dots, \sigma_n \rangle$  von pushBack- und popBack-Operationen auf  $s$  kann in Zeit  $O(n)$  bearbeitet werden.*

# Dynamisches Feld

- ⇒ nur **durchschnittlich konstante** Laufzeit pro Operation
- Kosten teurer Operationen werden mit Kosten billiger Operationen verrechnet.
  - Man nennt das dann **amortisierte Kosten** bzw. amortisierte Analyse.

# Dynamisches Feld: Analyse

- Feldverdopplung:



- Feldhalbierung:



- nächste Verdopplung: nach  $\geq n$  pushBack-Operationen
- nächste Halbierung: nach  $\geq n/2$  popBack-Operationen

# Dynamisches Feld: Analyse

Formale Verrechnung: **Zeugenzuordnung**

- reallocate kann eine Vergrößerung oder Verkleinerung sein
  - reallocate als Vergrößerung auf  $n$  Speicherelemente:  
es werden die  $n/2$  vorangegangenen pushBack-Operationen zugeordnet
  - reallocate als Verkleinerung auf  $n$  Speicherelemente:  
es werden die  $n$  vorangegangenen popBack-Operationen zugeordnet
- ⇒ kein pushBack / popBack wird mehr als einmal zugeordnet

# Dynamisches Feld: Analyse

- Idee: verrechne reallocate-Kosten mit pushBack/popBack-Kosten (ohne reallocate)
  - ▶ Kosten für pushBack / popBack:  $O(1)$
  - ▶ Kosten für reallocate( $k*n$ ):  $O(n)$
- Konkret:
  - ▶  $\Theta(n)$  Zeugen pro reallocate( $k*n$ )
  - ▶ verteile  $O(n)$ -Aufwand gleichmäßig auf die Zeugen
- Gesamtaufwand:  $O(m)$  bei  $m$  Operationen

# Dynamisches Feld: Analyse

## Kontenmethode

- günstige Operationen zahlen Tokens ein
- teure Operationen entnehmen Tokens
- Tokenkonto darf **nie negativ** werden!

# Dynamisches Feld: Analyse

## Kontenmethode

- günstige Operationen zahlen Tokens ein
  - pro pushBack 2 Tokens
  - pro popBack 1 Token
- teure Operationen entnehmen Tokens
  - pro reallocate( $k \cdot n$ )  $-n$  Tokens
- Tokenkonto darf nie negativ werden!
  - Nachweis über Zeugenargument

# Dynamisches Feld: Analyse

## Tokenlaufzeit (Reale Kosten + Ein-/Auszahlungen)

- Ausführung von pushBack/popBack kostet 1 Token
  - ▶ Tokenkosten für pushBack:  $1+2=3$  Tokens
  - ▶ Tokenkosten für popBack:  $1+1=2$  Tokens
- Ausführung von reallocate( $k*n$ ) kostet  $n$  Tokens
  - ▶ Tokenkosten für reallocate( $k*n$ ):  $n-n=0$  Tokens



- Gesamtlaufzeit =  $O(\text{Summe der Tokenlaufzeiten})$

# Übersicht

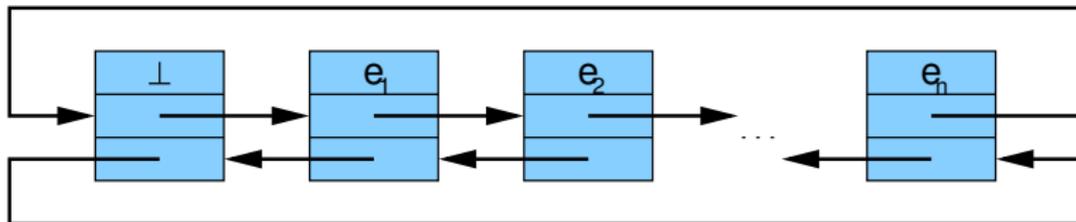
## 4 Datenstrukturen für Sequenzen

- Felder
- **Listen**
- Stacks und Queues
- Diskussion: Sortierte Sequenzen

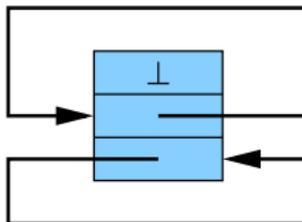
# Doppelt verkettete Liste

Einfache Verwaltung:

durch **Dummy**-Element  $h$  ohne Inhalt ( $\perp$ ):



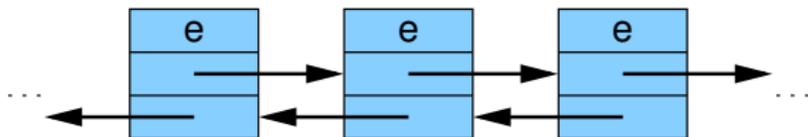
Anfangs:



# Doppelt verkettete Liste

```
type Handle: pointer  $\rightarrow$  Item<Elem>;
```

```
type Item<Elem> {
  Elem e;
  Handle next;
  Handle prev;
}
```



```
class List<Elem> {
  Item<Elem> h; // initialisiert mit  $\perp$  und Zeigern auf sich selbst
  ... weitere Variablen und Methoden ...
}
```

## Invariante:

$\text{next} \rightarrow \text{prev} == \text{prev} \rightarrow \text{next} == \text{this}$

## Doppelt verkettete Liste

Zentrale statische Methode: `splice(Handle a, Handle b, Handle t)`

- Bedingung:
  - ▶  $\langle a, \dots, b \rangle$  muss Teilsequenz sein (a=b erlaubt)
  - ▶ b nicht vor a (also Dummy h nicht zwischen a und b)
  - ▶ t nicht in Teilliste  $\langle a, \dots, b \rangle$ , aber evt. in anderer Liste
- splice entfernt  $\langle a, \dots, b \rangle$  aus der Sequenz und fügt sie hinter Item t an

Für

$$\langle e_1, \dots, a', a, \dots, b, b', \dots, t, t', \dots, e_n \rangle$$

liefert splice(a,b,t)

$$\langle e_1, \dots, a', b', \dots, t, a, \dots, b, t', \dots, e_n \rangle$$

# Doppelt verkettete Liste

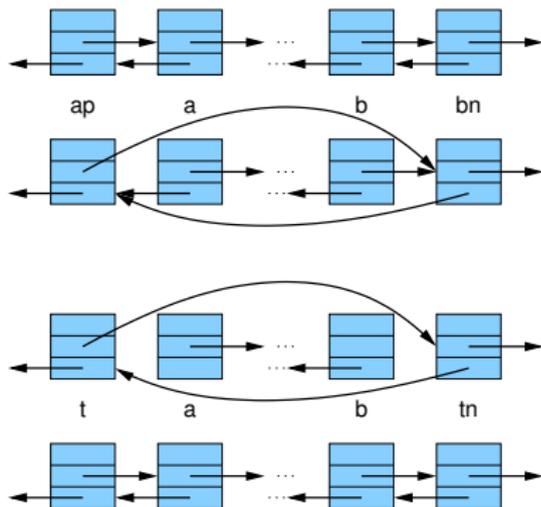
## Methoden

```

(static) splice(Handle a, b, t) {
  // schneide  $\langle a, \dots, b \rangle$  heraus
  Handle ap = a → prev;
  Handle bn = b → next;
  ap → next = bn;
  bn → prev = ap;

  // füge  $\langle a, \dots, b \rangle$  hinter t ein
  Handle tn = t → next;
  b → next = tn;
  a → prev = t;
  t → next = a;
  tn → prev = b;
}

```



# Doppelt verkettete Liste

## Methoden

```

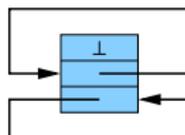
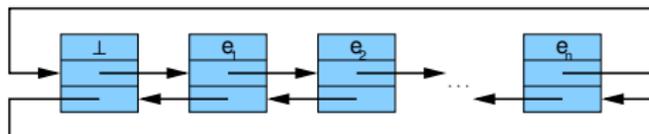
Handle head() {
    return address of h;
}

boolean isEmpty() {
    return (h.next == head());
}

Handle first() {
    return h.next;    // evt.  $\perp$ 
}

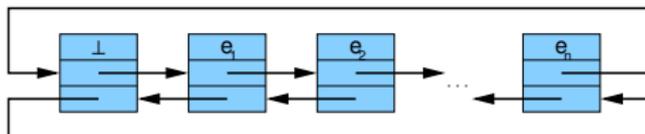
Handle last() {
    return h.prev;   // evt.  $\perp$ 
}

```



# Doppelt verkettete Liste

## Methoden



```
(static) moveAfter (Handle b, Handle a) {  
    splice(b, b, a);    // schiebe b hinter a  
}
```

```
moveToFront (Handle b) {  
    moveAfter(b, head());    // schiebe b ganz nach vorn  
}
```

```
moveToBack (Handle b) {  
    moveAfter(b, last());    // schiebe b ganz nach hinten  
}
```

# Doppelt verkettete Liste

## Methoden

Löschen und Einfügen von Elementen:

mittels separater Liste **freeList**

⇒ bessere Laufzeit (Speicherallokation teuer)

```
(static) remove(Handle b) {  
    moveAfter(b, freeList.head());  
}
```

```
popFront() {  
    remove(first());  
}
```

```
popBack() {  
    remove(last());  
}
```

# Doppelt verkettete Liste

## Methoden

```
(static) Handle insertAfter(Elem x, Handle a) {  
    checkFreeList();    // u.U. Speicher allokieren  
    Handle b = freeList.first();  
    moveAfter(b, a);  
    b→e = x;  
    return b;  
}
```

```
(static) Handle insertBefore(Elem x, Handle b) {  
    return insertAfter(x, b→prev);  
}
```

```
pushFront(Elem x) {    insertAfter(x, head()); } }
```

```
pushBack(Elem x) {    insertAfter(x, last()); } }
```

# Doppelt verkettete Liste

Manipulation ganzer Listen:

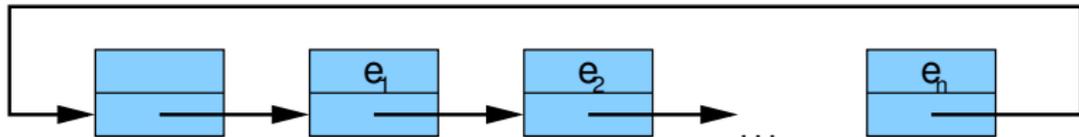
Trick: verwende Dummy-Element

```
Handle findNext(Elem x, Handle from) {  
    h.e = x;  
    while (from→e != x)  
        from = from→next;  
    [h.e = ⊥;]  
    return from;  
}
```

# Einfach verkettete Liste

```
type SHandle: pointer  $\rightarrow$  SItem<Elem>;
```

```
type SItem<Elem> {
  Elem e;
  SHandle next;
}
```

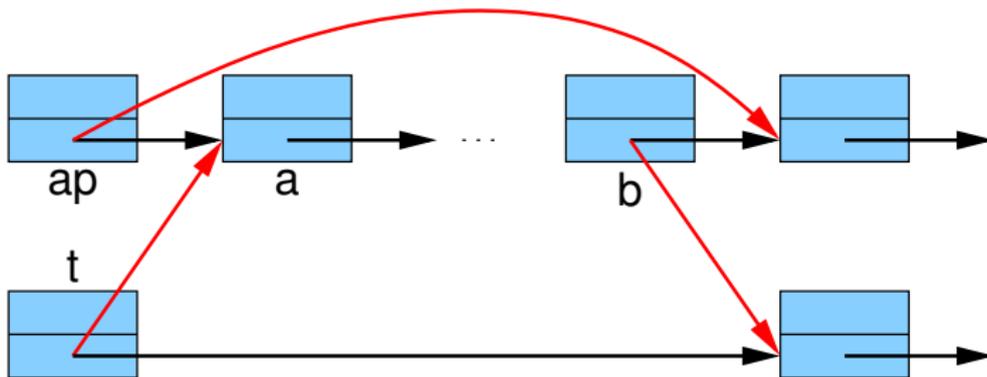


```
class SList<Elem> {
  SItem<Elem> h;
  ... weitere Variablen und Methoden ...
}
```

## Einfach verkettete Liste

```
(static) splice(SHandle ap, SHandle b, SHandle t) {  
    SHandle a = ap→next;  
    ap→next = b→next;  
    b→next = t→next;  
    t→next = a;  
}
```

Wir brauchen hier den Vorgänger ap von a!



# Einfach verkettete Liste

- findNext sollte evt. auch nicht den nächsten Treffer, sondern dessen **Vorgänger** liefern  
(damit man das gefundene SItem auch löschen kann, Suche könnte dementsprechend erst beim Nachfolger des gegebenen SItems starten)
  - auch einige andere Methoden brauchen ein modifiziertes Interface
  - sinnvoll: Pointer zum letzten Item
- ⇒ pushBack in  $O(1)$

# Übersicht

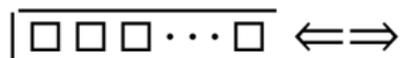
## 4 Datenstrukturen für Sequenzen

- Felder
- Listen
- **Stacks und Queues**
- Diskussion: Sortierte Sequenzen

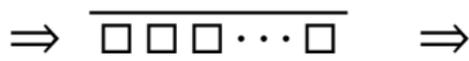
# Stacks und Queues

Grundlegende sequenzbasierte Datenstrukturen:

- Stack (Stapel)



- (FIFO-)Queue (Schlange)



- Deque (double-ended queue)



# Stacks und Queues

## Stack-Methoden:

- pushBack (bzw. push)
- popBack (bzw. pop)
- last (bzw. top)

## Queue-Methoden:

- pushBack
- popFront
- first

# Stacks und Queues

Warum spezielle Sequenz-Typen betrachten, wenn wir mit der bekannten Datenstruktur für Listen schon alle benötigten Operationen in  $O(1)$  haben?

- Programme werden **lesbarer** und **einfacher zu debuggen**, wenn spezialisierte Zugriffsmuster explizit gemacht werden.
- Einfachere Interfaces erlauben eine größere Breite von konkreten Implementationen (hier z.B. **platzsparendere** als Listen).
- Listen sind ungünstig, wenn die Operationen auf dem Sekundärspeicher (Festplatte) ausgeführt werden.

Sequentielle Zugriffsmuster können bei entsprechender Implementation (hier z.B. als Arrays) stark vom **Cache** profitieren.

# Stacks und Queues

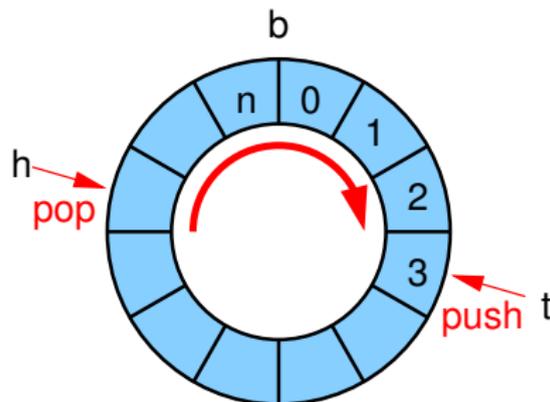
## Spezielle Umsetzungen:

- Stacks mit beschränkter Größe  $\Rightarrow$  Bounded Arrays
- Stacks mit unbeschränkter Größe  $\Rightarrow$  Unbounded Arrays
- oder: Stacks als einfach verkettete Listen  
(top of stack = front of list)
- (FIFO-)Queues: einfach verkettete Listen mit Zeiger auf letztes Element (eingefügt wird am Listenende, entnommen am Listenanfang, denn beim Entnehmen muss der Nachfolger bestimmt werden)
- Deques  $\Rightarrow$  doppelt verkettete Listen  
(einfach verkettete reichen nicht)

# Beschränkte Queues

```
class BoundedFIFO<Elem> {
  const int n; // Maximale Anzahl
  Elem[n+1] b;
  int h=0; // erstes Element
  int t=0; // erster freier Eintrag
}
```

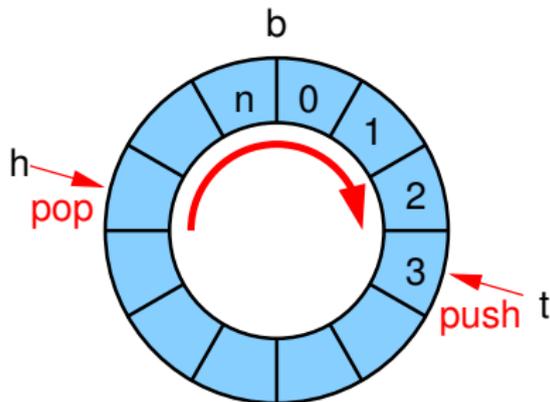
- Queue besteht aus den Feldelementen  $h \dots t-1$
- Es bleibt immer mindestens ein Feldelement frei (zur Unterscheidung zwischen voller und leerer Queue)



# Beschränkte Queues

## Methoden

```
boolean isEmpty() {  
    return (h==t);  
}  
  
Elem first() {  
    assert(! isEmpty());  
    return b[h];  
}  
  
int size() {  
    return (t-h+n+1)%(n+1);  
}
```



# Beschränkte Queues

## Methoden

```

pushBack(Elem x) {
    assert(size()<n);
    b[t]=x;
    t=(t+1)%(n+1);
}

```

```

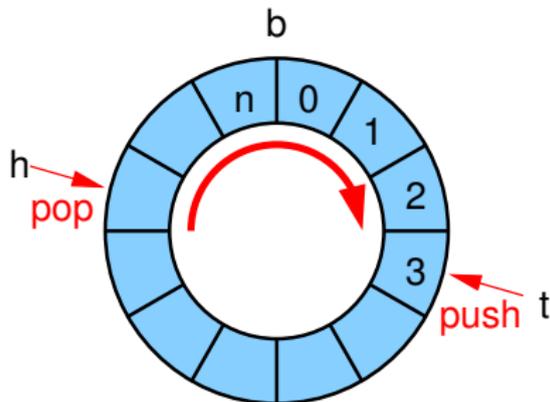
popFront() {
    assert(!isEmpty());
    h=(h+1)%(n+1);
}

```

```

int size() {
    return (t-h+n+1)%(n+1);
}

```



# Beschränkte Queues

- Struktur kann auch als **Deque** verwendet werden
- Zirkuläre Arrays erlauben auch den indexierten Zugriff:

```
Elem Operator [int i] {  
    return b[(h+i)%(n+1)];  
}
```

- Bounded Queues / Deques können genauso zu **Unbounded Queues / Deques** erweitert werden wie Bounded Arrays zu Unbounded Arrays

# Übersicht

## 4 Datenstrukturen für Sequenzen

- Felder
- Listen
- Stacks und Queues
- **Diskussion: Sortierte Sequenzen**

# Sortierte Sequenz

S: sortierte Sequenz

Jedes Element  $e$  identifiziert über  $\text{key}(e)$

Operationen:

- $\langle e_1, \dots, e_n \rangle.\text{insert}(e) = \langle e_1, \dots, e_i, e, e_{i+1}, \dots, e_n \rangle$   
für das  $i$  mit  $\text{key}(e_i) < \text{key}(e) < \text{key}(e_{i+1})$
- $\langle e_1, \dots, e_n \rangle.\text{remove}(k) = \langle e_1, \dots, e_{i-1}, e_{i+1}, \dots, e_n \rangle$   
für das  $i$  mit  $\text{key}(e_i) = k$
- $\langle e_1, \dots, e_n \rangle.\text{find}(k) = e_i$   
für das  $i$  mit  $\text{key}(e_i) = k$

# Sortierte Sequenz

Problem:

Aufrechterhaltung der Sortierung nach jeder Einfügung / Löschung



insert(5)



remove(14)



# Sortierte Sequenz

## Realisierung als Liste

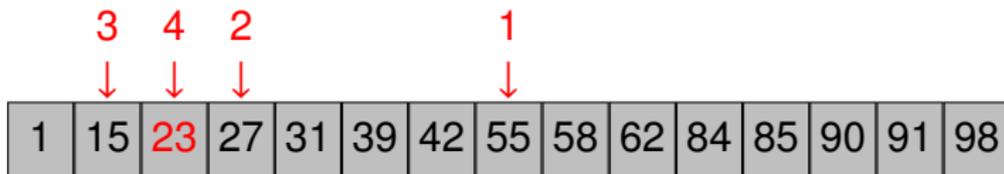
- insert und remove kosten zwar eigentlich nur konstante Zeit, müssen aber wie find zunächst die richtige Position finden
- find auf Sequenz der Länge  $n$  kostet  $O(n)$  Zeit, damit ebenso insert und remove

## Realisierung als Feld

- find kann mit binärer Suche in Zeit  $O(\log n)$  realisiert werden
- insert und remove kosten  $O(n)$  Zeit für das Verschieben der nachfolgenden Elemente

# Binäre Suche

find(23):

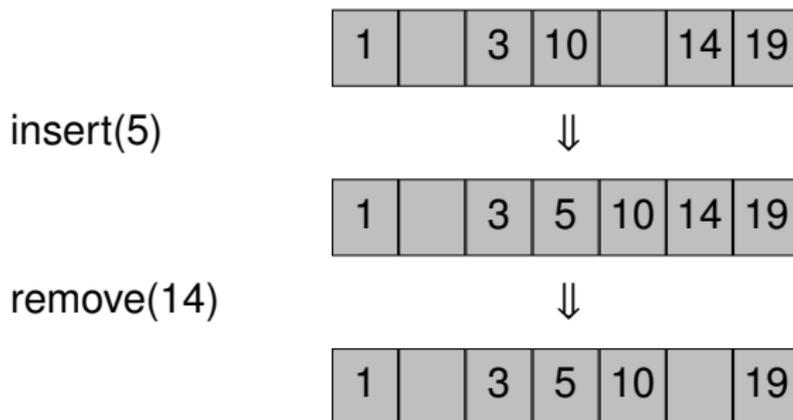


In einer  $n$ -elementigen Sequenz kann ein beliebiges Element in maximal  $2 + \lfloor \log_2 n \rfloor$  Schritten gefunden werden.

# Sortierte Sequenz

Kann man **insert** und **remove** besser mit einem Feld realisieren?

⇒ Vorbild Bibliothek: **Lücken** lassen



Durch geschickte Verteilung der Lücken:

⇒ amortisierte Kosten für insert und remove  $\Theta(\log^2 n)$

# Übersicht

- 5 Hashing
  - Hashtabellen
  - Hashing with Chaining
  - Universelles Hashing
  - Hashing with Linear Probing
  - Anpassung der Tabellengröße
  - Perfektes Hashing
  - Diskussion / Alternativen

# Übersicht

- 5 Hashing
  - **Hashtabellen**
  - Hashing with Chaining
  - Universelles Hashing
  - Hashing with Linear Probing
  - Anpassung der Tabellengröße
  - Perfektes Hashing
  - Diskussion / Alternativen

# Assoziative Arrays / Wörterbücher

- Assoziatives Array / Wörterbuch (dictionary)  $S$ : speichert eine Menge von Elementen
- Element  $e$  wird identifiziert über eindeutigen Schlüssel  $\text{key}(e)$

Operationen:

- $S.\text{insert}(\text{Elem } e)$ :  $S := S \cup \{e\}$
- $S.\text{remove}(\text{Key } k)$ :  $S := S \setminus \{e\}$ ,  
wobei  $e$  das Element mit  $\text{key}(e) = k$  ist
- $S.\text{find}(\text{Key } k)$ :  
gibt das Element  $e \in S$  mit  $\text{key}(e) = k$  zurück, falls es existiert,  
sonst  $\perp$  (entspricht Array-Indexoperator  $[ ]$ , daher der Name)

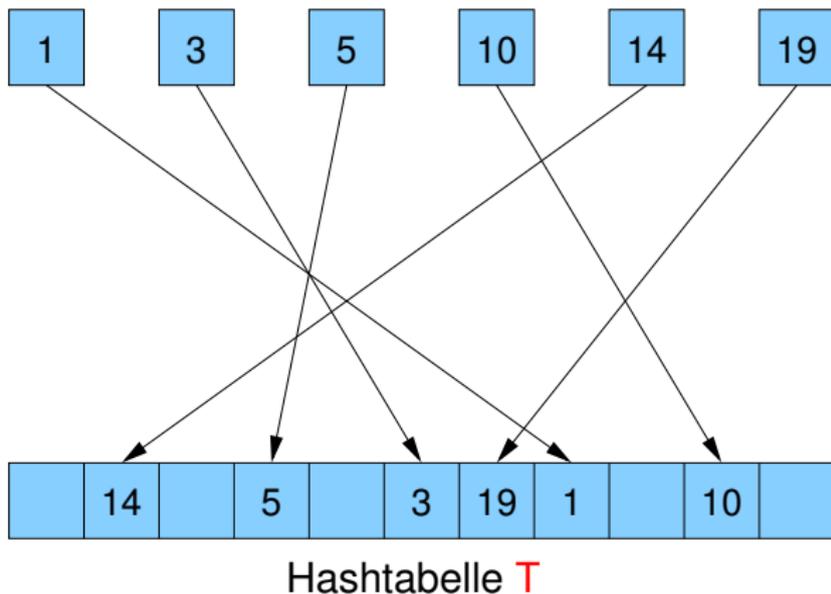
# Hashfunktion und Hashtabelle

Hashfunktion  $h$  :

Key  $\mapsto \{0, \dots, m-1\}$

$|\text{Key}| = N$

gespeicherte  
Elemente:  $n$



# Hashfunktion

Anforderungen:

- schneller Zugriff (Zeiteffizienz)
  - platzsparend (Speichereffizienz)
  - **gute Streuung** bzw. Verteilung der Elemente über die ganze Tabelle
  - Idealfall: Element  $e$  direkt in Tabelleneintrag  $t[h(\text{key}(e))]$
- ⇒ find, insert und remove in **konstanter Zeit**  
(genauer: plus Zeit für Berechnung der Hashfunktion)

# Hashing

Annahme: perfekte Streuung

```
insert(Elem e) {  
    T[h(key(e))] = e;  
}
```

```
remove(Key k) {  
    T[h(k)] = null;  
}
```

```
Elem find(Key k) {  
    return T[h(k)];  
}
```

statisches Wörterbuch: nur find

dynamisches Wörterbuch: insert, remove und find

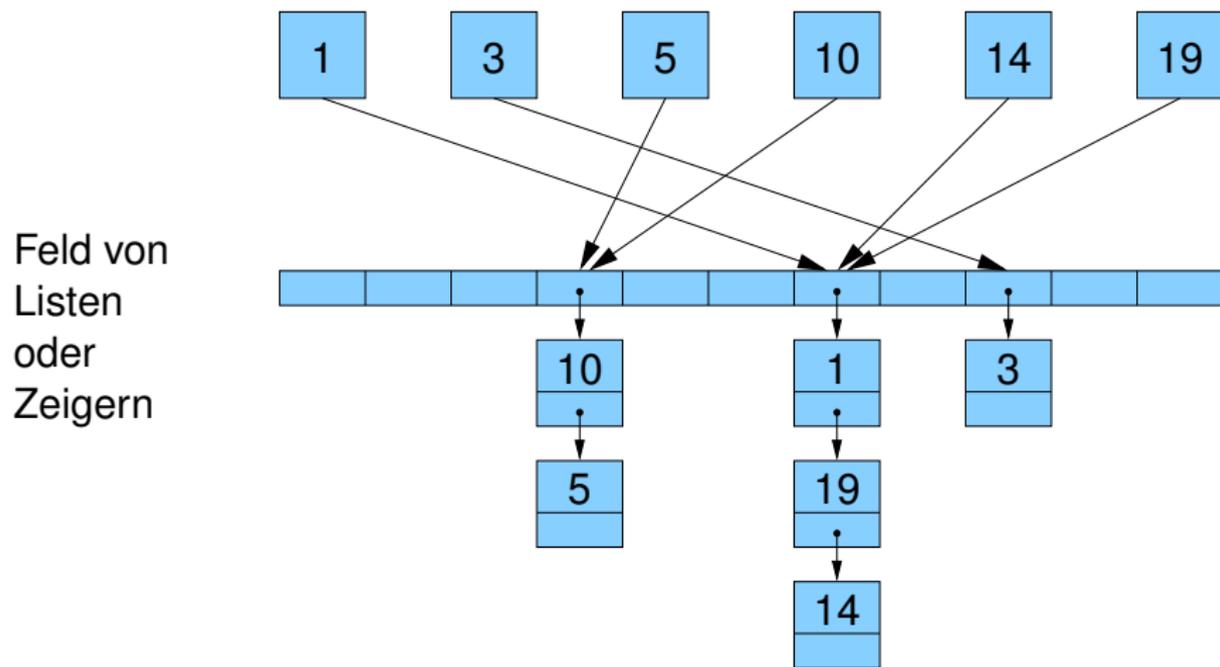
# Übersicht

## 5 Hashing

- Hashtabellen
- **Hashing with Chaining**
- Universelles Hashing
- Hashing with Linear Probing
- Anpassung der Tabellengröße
- Perfektes Hashing
- Diskussion / Alternativen

# Dynamisches Wörterbuch

Hashing with **Chaining**:



unsortierte verkettete Listen  
(Ziel: Listen möglichst kurz)

# Dynamisches Wörterbuch

Hashing with **Chaining**:

List<Elem>[m] T;

```
insert(Elem e) {  
    T[h(key(e))].insert(e);  
}
```

```
remove(Key k) {  
    T[h(k)].remove(k);  
}
```

```
find(Key k) {  
    T[h(k)].find(k);  
}
```

# Hashing with Chaining

- Platzverbrauch:  $O(n + m)$
  - insert benötigt konstante Zeit
  - remove und find müssen u.U. eine ganze Liste scannen
  - im worst case sind alle Elemente in dieser Liste
- ⇒ im **worst case** ist Hashing with chaining nicht besser als eine **normale Liste**

# Hashing with Chaining

Gibt es Hashfunktionen, die garantieren, dass alle Listen kurz sind?

- **nein**, für jede Hashfunktion gibt es eine Menge von mindestens  $N/m$  Schlüsseln, die demselben Tabelleneintrag zugeordnet werden
- meistens ist  $n < N/m$  und in diesem Fall kann die Suche immer zum Scan aller Elemente entarten

⇒ Auswege

- Average-case-Analyse
- Randomisierung
- Änderung des Algorithmus  
(z.B. Hashfunktion abhängig von aktuellen Schlüsseln)

# Hashing with Chaining

Betrachte als Hashfunktionsmenge die Menge aller Funktionen, die die Schlüsselmenge (mit Kardinalität  $N$ ) auf die Zahlen  $0, \dots, m - 1$  abbilden.

## Satz

*Falls  $n$  Elemente in einer Hashtabelle  $T$  der Größe  $m$  mittels einer zufälligen Hashfunktion  $h$  gespeichert werden, dann ist die erwartete Laufzeit von `remove` bzw. `find` in  $O(1 + n/m)$ .*

Unrealistisch: es gibt  $m^N$  solche Funktionen und man braucht  $\log_2(m^N) = N \log_2 m$  Bits, um eine Funktion zu spezifizieren.

⇒ widerspricht dem Ziel, den Speicherverbrauch von  $N$  auf  $n$  zu senken!

# Hashing with Chaining

## Beweis.

- Betrachte feste Position  $i = h(k)$  bei  $\text{remove}(k)$  oder  $\text{find}(k)$
- Laufzeit ist Konstante plus Zeit zum Scan der Liste  
also  $O(1 + \mathbb{E}[X])$ , wobei  $X$  Zufallsvariable für Länge von  $T[i]$
- Zufallsvariable  $X_e \in \{0, 1\}$  für jedes  $e \in S$
- $X_e = 1 \Leftrightarrow h(\text{key}(e)) = i$
- Listenlänge  $X = \sum_{e \in S} X_e$
- Erwartete Listenlänge  $\mathbb{E}[X]$

$$\begin{aligned} &= \mathbb{E} \left[ \sum_{e \in S} X_e \right] = \sum_{e \in S} \mathbb{E}[X_e] = \sum_{e \in S} 0 \cdot \Pr[X_e = 0] + 1 \cdot \Pr[X_e = 1] \\ &= \sum_{e \in S} \Pr[X_e = 1] = \sum_{e \in S} 1/m = n/m \end{aligned}$$



# Übersicht

## 5 Hashing

- Hashtabellen
- Hashing with Chaining
- **Universelles Hashing**
- Hashing with Linear Probing
- Anpassung der Tabellengröße
- Perfektes Hashing
- Diskussion / Alternativen

# c-universelle Familien von Hashfunktionen

Wie konstruiert man zufällige Hashfunktionen?

## Definition

Sei  $c$  eine positive Konstante.

Eine Familie  $H$  von Hashfunktionen auf  $\{0, \dots, m-1\}$  heißt **c-universell**, falls für jedes Paar  $x \neq y$  von Schlüsseln gilt, dass

$$|\{h \in H : h(x) = h(y)\}| \leq \frac{c}{m} |H|$$

D.h. für eine zufällige Hashfunktion  $h \in H$  gilt

$$\Pr[h(x) = h(y)] \leq \frac{c}{m}$$

1-universelle Familien nennt man **universell**.

# c-Universal Hashing with Chaining

## Satz

Falls  $n$  Elemente in einer Hashtabelle der Größe  $m$  mittels einer zufälligen Hashfunktion  $h$  aus einer **c-universellen** Familie gespeichert werden, dann ist die erwartete Laufzeit von `remove` bzw. `find` in  $O(1 + c \cdot n/m)$ .

## Beweis.

- Betrachte festen Schlüssel  $k$
- Zugriffszeit  $X$  ist  $O(1 + \text{Länge der Liste } T[h(k)])$
- Zufallsvariable  $X_e \in \{0, 1\}$  für jedes  $e \in S$  zeigt an, ob  $e$  auf die gleiche Position wie  $k$  gehasht wird

# c-Universal Hashing with Chaining

## Beweis.

- $X_e = 1 \Leftrightarrow h(\text{key}(e)) = h(k)$
- Listenlänge  $X = \sum_{e \in S} X_e$
- Erwartete Listenlänge

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[X] &= \mathbb{E}\left[\sum_{e \in S} X_e\right] \\ &= \sum_{e \in S} \mathbb{E}[X_e] = \sum_{e \in S} 0 \cdot \Pr[X_e = 0] + 1 \cdot \Pr[X_e = 1] \\ &= \sum_{e \in S} \Pr[X_e = 1] \leq \sum_{e \in S} c/m = n \cdot c/m\end{aligned}$$



# Beispiele für $c$ -universelles Hashing

Einfache  $c$ -universelle Hashfunktionen?

Annahme: Schlüssel sind Bitstrings einer bestimmten Länge

Wähle als Tabellengröße  $m$  eine **Primzahl**

⇒ dann ist der Restklassenring modulo  $m$  (also  $\mathbb{Z}_m$ ) ein Körper, d.h. es gibt zu jedem Element außer für die Null **genau ein** Inverses bzgl. Multiplikation

- Sei  $w = \lfloor \log_2 m \rfloor$ .
- unterteile die Bitstrings der Schlüssel in Teile zu je  $w$  Bits
- Anzahl der Teile sei  $k$
- interpretiere jeden Teil als Zahl aus dem Intervall  $[0, \dots, 2^w - 1]$
- interpretiere Schlüssel  $x$  als  $k$ -Tupel solcher Zahlen:

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)$$

# Familie für universelles Hashing

Definiere für jeden Vektor

$$\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_k) \in \{0, \dots, m-1\}^k$$

mittels Skalarprodukt

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{x} = \sum_{i=1}^k a_i x_i$$

eine Hashfunktion von der Schlüsselmenge  
in die Menge der Zahlen  $\{0, \dots, m-1\}$

$$h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} \pmod{m}$$

# Familie für universelles Hashing

## Satz

$$H = \{h_{\mathbf{a}} : \mathbf{a} \in \{0, \dots, m-1\}^k\}$$

ist eine **(1-)universelle** Familie von Hashfunktionen falls  $m$  prim ist.

Oder anders:

das Skalarprodukt zwischen einer Tupeldarstellung des Schlüssels und einem Zufallsvektor modulo  $m$  definiert eine gute Hashfunktion.

# Familie für universelles Hashing

## Beispiel

- 32-Bit-Schlüssel, Hashtabellengröße  $m = 269$
- ⇒ Schlüssel unterteilt in  $k = 4$  Teile mit  $w = \lfloor \log_2 m \rfloor = 8$  Bits
- Schlüssel sind also 4-Tupel von Integers aus dem Intervall  $[0, 2^8 - 1] = \{0, \dots, 255\}$ , z.B.  $\mathbf{x} = (11, 7, 4, 3)$
- Die Hashfunktion wird auch durch ein 4-Tupel von Integers, aber aus dem Intervall  $[0, 269 - 1] = \{0, \dots, 268\}$ , spezifiziert z.B.  $\mathbf{a} = (2, 4, 261, 16)$
- ⇒ Hashfunktion:

$$h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = (2x_1 + 4x_2 + 261x_3 + 16x_4) \bmod 269$$

$$h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = (2 \cdot 11 + 4 \cdot 7 + 261 \cdot 4 + 16 \cdot 3) \bmod 269 = 66$$

# Eindeutiges $a_j$

## Beweis.

- Betrachte zwei beliebige verschiedene Schlüssel  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_k\}$  und  $\mathbf{y} = \{y_1, \dots, y_k\}$
- Wie groß ist  $\Pr[h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = h_{\mathbf{a}}(\mathbf{y})]$ ?
- Sei  $j$  ein Index (von evt. mehreren möglichen) mit  $x_j \neq y_j$  (muss es geben, sonst wäre  $\mathbf{x} = \mathbf{y}$ )  
 $\Rightarrow (x_j - y_j) \not\equiv 0 \pmod{m}$   
d.h., es gibt genau ein multiplikatives Inverses  $(x_j - y_j)^{-1}$
- $\Rightarrow$  gegeben Primzahl  $m$  und Zahlen  $x_j, y_j, b \in \{0, \dots, m-1\}$  hat jede Gleichung der Form

$$a_j(x_j - y_j) \equiv b \pmod{m}$$

eine **eindeutige** Lösung:  $a_j \equiv (x_j - y_j)^{-1} b \pmod{m}$

# Wann wird $h(\mathbf{x}) = h(\mathbf{y})$ ?

## Beweis.

Wenn man alle Variablen  $a_i$  außer  $a_j$  festlegt, gibt es **exakt eine Wahl für  $a_j$** , so dass  $h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = h_{\mathbf{a}}(\mathbf{y})$ , denn

$$\begin{aligned}
 h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = h_{\mathbf{a}}(\mathbf{y}) &\Leftrightarrow \sum_{i=1}^k a_i x_i \equiv \sum_{i=1}^k a_i y_i \pmod{m} \\
 &\Leftrightarrow a_j(x_j - y_j) \equiv \sum_{i \neq j} a_i(y_i - x_i) \pmod{m} \\
 &\Leftrightarrow a_j \equiv (x_j - y_j)^{-1} \sum_{i \neq j} a_i(y_i - x_i) \pmod{m}
 \end{aligned}$$

# Wie oft wird $h(\mathbf{x}) = h(\mathbf{y})$ ?

## Beweis.

- Es gibt  $m^{k-1}$  Möglichkeiten, Werte für die Variablen  $a_i$  mit  $i \neq j$  zu wählen.
- Für jede solche Wahl gibt es genau eine Wahl für  $a_j$ , so dass  $h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = h_{\mathbf{a}}(\mathbf{y})$ .
- Für  $\mathbf{a}$  gibt es insgesamt  $m^k$  Auswahlmöglichkeiten.
- Also

$$\Pr[h_{\mathbf{a}}(\mathbf{x}) = h_{\mathbf{a}}(\mathbf{y})] = \frac{m^{k-1}}{m^k} = \frac{1}{m}$$



## Familie für $k$ -universelles Hashing

Definiere für  $a \in \{1, \dots, m-1\}$  die Hashfunktion

$$h'_a(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k a^{i-1} x_i \bmod m$$

(mit  $x_i \in \{0, \dots, m-1\}$ )

### Satz

Für jede Primzahl  $m$  ist

$$H' = \{h'_a : a \in \{1, \dots, m-1\}\}$$

eine  **$k$ -universelle** Familie von Hashfunktionen.

# Familie für $k$ -universelles Hashing

Beweisidee:

Für Schlüssel  $\mathbf{x} \neq \mathbf{y}$  ergibt sich folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}h'_a(\mathbf{x}) &= h'_a(\mathbf{y}) \\h'_a(\mathbf{x}) - h'_a(\mathbf{y}) &\equiv 0 \pmod{m} \\ \sum_{i=1}^k a^{i-1}(x_i - y_i) &\equiv 0 \pmod{m}\end{aligned}$$

Anzahl der Nullstellen des Polynoms in  $a$  ist durch den Grad des Polynoms beschränkt (Fundamentalsatz der Algebra), also durch  $k - 1$ .

Falls  $k \leq m$  können also höchstens  $k - 1$  von  $m - 1$  möglichen Werten für  $a$  zum gleichen Hashwert für  $\mathbf{x}$  und  $\mathbf{y}$  führen.

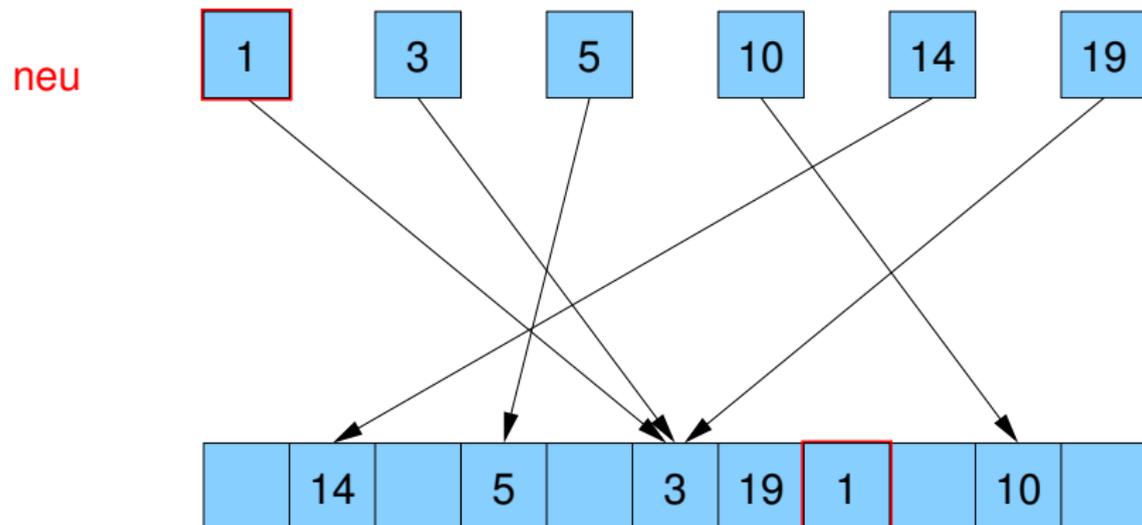
Aus  $\Pr[h(\mathbf{x}) = h(\mathbf{y})] \leq \frac{\min\{k-1, m-1\}}{m-1} \leq \frac{k}{m}$  folgt, dass  $H'$   $k$ -universell ist.

# Übersicht

- 5 Hashing
  - Hashtabellen
  - Hashing with Chaining
  - Universelles Hashing
  - **Hashing with Linear Probing**
  - Anpassung der Tabellengröße
  - Perfektes Hashing
  - Diskussion / Alternativen

# Dynamisches Wörterbuch

Hashing with **Linear Probing**:



Speichere Element  $e$  im ersten freien  
 Ort  $T[i]$ ,  $T[i + 1]$ ,  $T[i + 2]$ , ... mit  $i == h(\text{key}(e))$   
 (Ziel: Folgen besetzter Positionen möglichst kurz)

# Hashing with Linear Probing

Elem[m] T; // Feld sollte genügend groß sein

```
insert(Elem e) {  
    i = h(key(e));  
    while (T[i] ≠ null ∧ T[i] ≠ e)  
        i = (i+1) % m;  
    T[i] = e;  
}
```

```
find(Key k) {  
    i = h(k);  
    while (T[i] ≠ null ∧ key(T[i]) ≠ k)  
        i = (i+1) % m;  
    return T[i];  
}
```

# Hashing with Linear Probing

Vorteil:

Es werden im Gegensatz zu Hashing with Chaining (oder auch im Gegensatz zu anderen Probing-Varianten) nur **zusammenhängende** Speicherzellen betrachtet.

⇒ Cache-Effizienz!

# Hashing with Linear Probing

Problem: **Löschen** von Elementen

1 Löschen verbieten

2 Markiere Positionen als gelöscht  
(mit speziellem Zeichen  $\neq \perp$ )

Suche endet bei  $\perp$ , aber nicht bei markierten Zellen

Problem: Anzahl echt freier Zellen sinkt monoton

$\Rightarrow$  Suche wird evt. langsam oder periodische Reorganisation

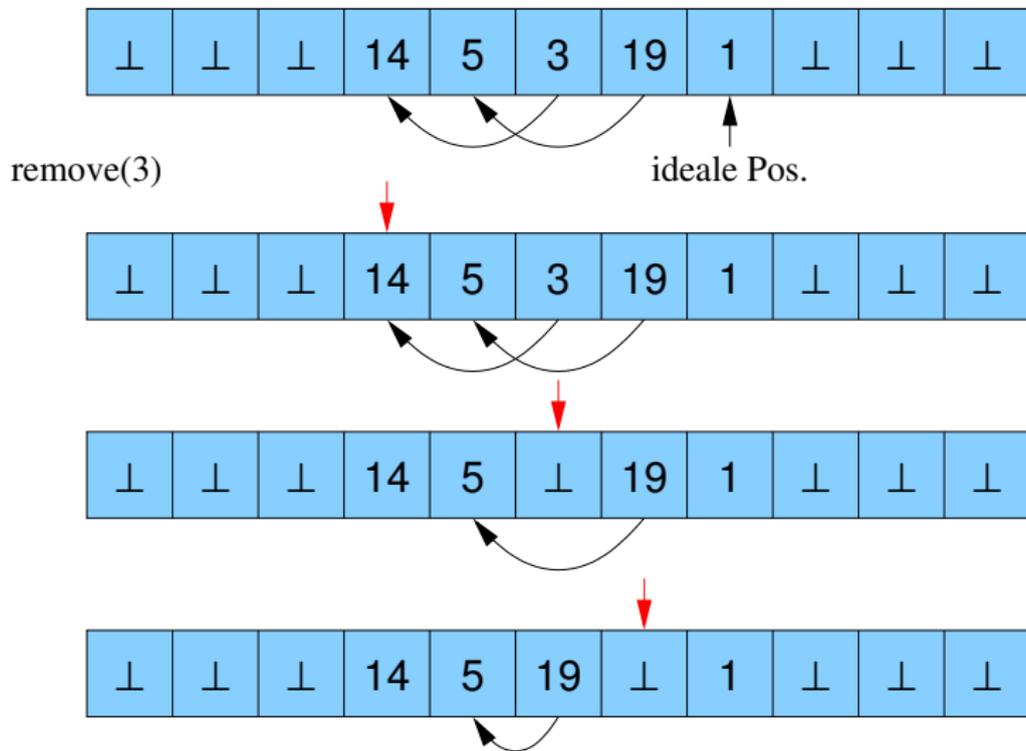
3 Invariante sicherstellen:

Für jedes  $e \in S$  mit idealer Position  $i = h(\text{key}(e))$  und aktueller Position  $j$  gilt:

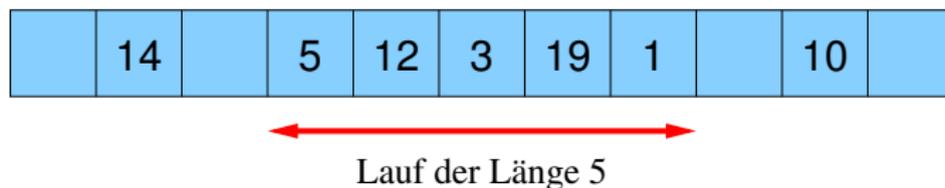
**$T[i], T[i+1], \dots, T[j]$  sind besetzt**

# Hashing with Linear Probing

## Löschen / Aufrechterhaltung der Invariante



# Hashing with Linear Probing



## Satz

Wenn  $n$  Elemente in einer Hashtabelle  $T$  der Größe  $m > 2en$  mittels einer zufälligen Hashfunktion  $h$  gespeichert werden, dann ist für jedes  $T[i]$  die erwartete Länge eines Laufes in  $T$ , der  $T[i]$  enthält,  $O(1)$ .

( $e$  ist hier die Eulersche Zahl)

# Hashing with Linear Probing

Beweis.

Vorbetrachtung:

$$\frac{k^k}{k!} < \sum_{i \geq 0} \frac{k^i}{i!} = e^k$$

$$\Rightarrow k! > \left(\frac{k}{e}\right)^k$$

$$\begin{aligned} \binom{n}{k} &= \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot (n-k+1)}{k!} \\ &\leq \frac{n^k}{k!} < \left(\frac{en}{k}\right)^k \end{aligned}$$

# Hashing with Linear Probing

## Beweis.

- $n$ : Anzahl der Elemente
- $m > 2en$ : Größe der Hashtabelle
- Lauf der Länge  $k$ :  $k$  aufeinanderfolgende besetzte Zellen
- Anzahl Möglichkeiten zur Wahl von  $k$  Elementen:  $\binom{n}{k} \leq \left(\frac{en}{k}\right)^k$
- Wahrscheinlichkeit, dass Hashwerte in Lauf:  $\left(\frac{k}{m}\right)^k$
- Es gibt aber  $k$  verschiedene Anfangspositionen des Laufs der Länge  $k$ , so dass  $T[i]$  darin liegt.

$$\Rightarrow p_k = \Pr[T[i] \text{ in Lauf der Länge } k] < \left(\frac{en}{k}\right)^k k \left(\frac{k}{m}\right)^k < k \left(\frac{1}{2}\right)^k$$

# Hashing with Linear Probing

## Beweis.

- Erwartete Länge des Laufs:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[\text{Länge des Laufs um } T[i]] &= \sum_{k \geq 1} k \cdot p_k \\ &< \sum_{k \geq 1} k^2 \left(\frac{1}{2}\right)^k \\ &= O(1)\end{aligned}$$

D.h. also die erwartete Laufzeit der Operationen insert, remove und find ist eine Konstante.



# Übersicht

- 5 Hashing
  - Hashtabellen
  - Hashing with Chaining
  - Universelles Hashing
  - Hashing with Linear Probing
  - **Anpassung der Tabellengröße**
  - Perfektes Hashing
  - Diskussion / Alternativen

# Dynamisches Wörterbuch

Problem: Hashtabelle ist **zu groß** oder **zu klein**  
(sollte nur um konstanten Faktor von Anzahl der Elemente abweichen)

Lösung: Reallokation

- Wähle geeignete Tabellengröße
- Wähle neue Hashfunktion
- Übertrage Elemente auf die neue Tabelle

# Dynamisches Wörterbuch

Problem: Tabellengröße  $m$  sollte **prim** sein  
(für eine gute Verteilung der Schlüssel)

Lösung:

- Für jedes  $k$  gibt es eine Primzahl in  $[k^3, (k + 1)^3]$
- Jede Zahl  $z \leq (k + 1)^3$ , die nicht prim ist, muss einen Teiler  $t \leq \sqrt{(k + 1)^3} = (k + 1)^{3/2}$  haben.
- Für eine gewünschte ungefähre Tabellengröße  $m'$  (evt. nicht prim) bestimme  $k$  so, dass  $k^3 \leq m' \leq (k + 1)^3$
- Größe des Intervalls:  

$$(k + 1)^3 - k^3 + 1 = (k^3 + 3k^2 + 3k + 1) - k^3 + 1 = 3k^2 + 3k + 2$$
- Für jede Zahl  $j = 2, \dots, (k + 1)^{3/2}$ :  
 streiche die Vielfachen von  $j$  in  $[k^3, (k + 1)^3]$
- Für jedes  $j$  kostet das Zeit  $((k + 1)^3 - k^3) / j = O(k^2 / j)$

# Dynamisches Wörterbuch

- Hilfsmittel: Wachstum der harmonischen Reihe

$$\ln n \leq H_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \leq 1 + \ln n$$

- insgesamt:

$$\begin{aligned} \sum_{j \leq (k+1)^{3/2}} O\left(\frac{k^2}{j}\right) &= k^2 \sum_{j \leq (k+1)^{3/2}} O\left(\frac{1}{j}\right) \\ &\in k^2 \cdot O\left(1 + \ln\left((k+1)^{3/2}\right)\right) \\ &\in O(k^2 \ln k) \\ &\in \mathbf{o(m)} \end{aligned}$$

⇒ Kosten zu vernachlässigen im Vergleich zur Initialisierung der Tabelle der Größe  $m$  (denn  $m$  ist kubisch in  $k$ )

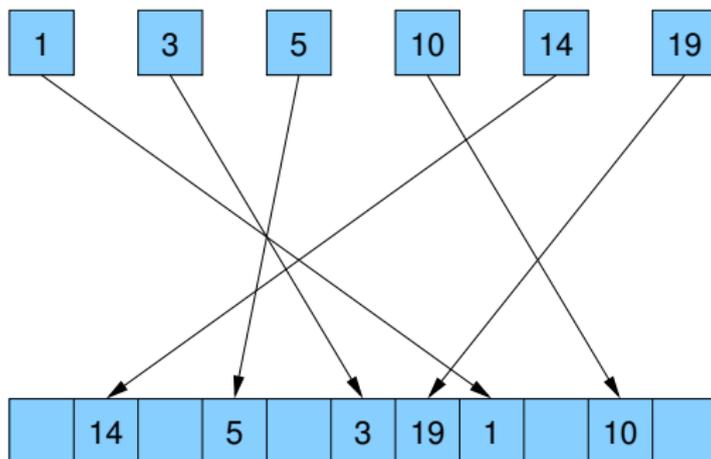
# Übersicht

## 5 Hashing

- Hashtabellen
- Hashing with Chaining
- Universelles Hashing
- Hashing with Linear Probing
- Anpassung der Tabellengröße
- **Perfektes Hashing**
- Diskussion / Alternativen

# Perfektes Hashing für statisches Wörterbuch

- bisher: konstante *erwartete* Laufzeit  
(nicht ausreichend für Real Time Scenario)
- Ziel: konstante Laufzeit im **worst case** für find()  
durch perfekte Hashtabelle ohne Kollisionen
- Annahme: statische Menge  $S$  von  $n$  Elementen



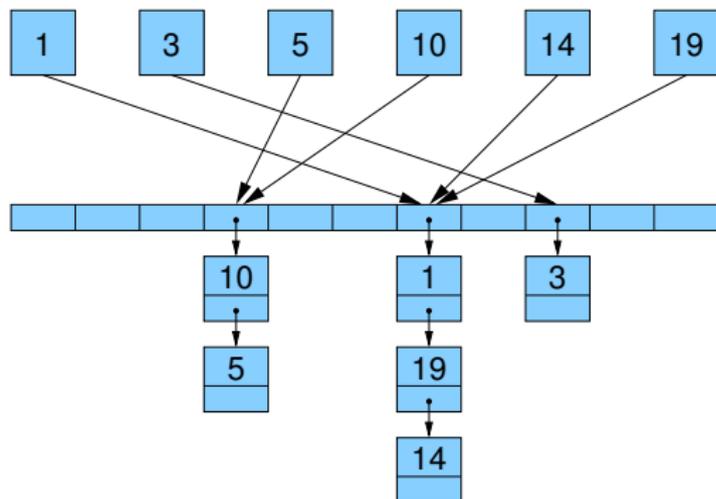
# Statisches Wörterbuch

- $S$ : feste Menge von  $n$  Elementen mit Schlüsseln  $k_1$  bis  $k_n$
- $H_m$ :  $c$ -universelle Familie von Hashfunktionen auf  $\{0, \dots, m-1\}$   
(Hinweis: 2-universelle Familien existieren für alle  $m$ )
- $C(h)$  für  $h \in H_m$ : Anzahl Kollisionen in  $S$  für  $h$ , d.h.

$$C(h) = |\{(x, y) : x, y \in S, x \neq y, h(x) = h(y)\}|$$

Beispiel:

$$C(h) = 2 + 6 = 8$$



# Statisches Wörterbuch

## Lemma

Es gilt

$$\mathbb{E}[C(h)] \leq cn(n-1)/m$$

## Beweis.

- Definiere  $n(n-1)$  Indikator-Zufallsvariablen  $X_{ij}(h)$ :  
Für  $i \neq j$  sei  $X_{ij}(h) = 1 \Leftrightarrow h(k_i) = h(k_j)$ .
- Dann ist  $C(h) = \sum_{i \neq j} X_{ij}(h)$

$$\mathbb{E}[C] = \mathbb{E}\left[\sum_{i \neq j} X_{ij}\right] = \sum_{i \neq j} \mathbb{E}[X_{ij}] = \sum_{i \neq j} \Pr[X_{ij} = 1] \leq n(n-1) \cdot c/m$$

⇒ Für **quadratische Tabellengröße** ist die erwartete Anzahl von Kollisionen (und damit die erwartete worst-case-Laufzeit für find) eine **Konstante**. □

# Markov-Ungleichung

## Satz (Markov-Ungleichung)

Für jede nichtnegative Zufallsvariable  $X$  und Konstante  $k$  gilt:

$$\Pr[X \geq k \cdot \mathbb{E}[X]] \leq \frac{1}{k}$$

## Beweis.

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[X] &= \sum_{z \in \mathbb{R}} z \cdot \Pr[X = z] \\ &\geq \sum_{z \geq k \cdot \mathbb{E}[X]} z \cdot \Pr[X = z] \geq \sum_{z \geq k \cdot \mathbb{E}[X]} k \cdot \mathbb{E}[X] \cdot \Pr[X = z] \\ &\geq k \cdot \mathbb{E}[X] \cdot \Pr[X \geq k \cdot \mathbb{E}[X]] \end{aligned}$$

□

# Statisches Wörterbuch

## Lemma

Für mindestens **die Hälfte** der Funktionen  $h \in H_m$  gilt:

$$C(h) \leq 2cn(n-1)/m$$

## Beweis.

- Aus Markov-Ungleichung  $\Pr[X \geq k \cdot \mathbb{E}[X]] \leq \frac{1}{k}$  folgt:

$$\Pr[C(h) \geq 2cn(n-1)/m] \leq \Pr[C(h) \geq 2\mathbb{E}[C(h)]] \leq \frac{1}{2}$$

⇒ Für höchstens die Hälfte der Funktionen ist  $C(h) \geq 2cn(n-1)/m$

⇒ Für mindestens die Hälfte der Funktionen ist

$$C(h) \leq 2cn(n-1)/m$$

□

# Statisches Wörterbuch

## Lemma

Wenn  $m \geq cn(n-1) + 1$ , dann bildet mindestens die Hälfte der Funktionen  $h \in H_m$  die Schlüssel *injektiv* in die Indexmenge der Hashtabelle ab.

## Beweis.

- Für mindestens die Hälfte der Funktionen  $h \in H_m$  gilt  $C(h) < 2$ .
  - Da  $C(h)$  immer eine gerade Zahl sein muss, folgt aus  $C(h) < 2$  direkt  $C(h) = 0$
- ⇒ keine Kollisionen (bzw. injektive Abbildung)



- Wähle zufällig  $h \in H_m$  mit  $m \geq cn(n-1) + 1$
  - Prüfe, ob injektiv ⇒ behalten oder erneut wählen
- ⇒ Nach durchschnittlich 2 Versuchen erfolgreich

# Statisches Wörterbuch

Ziel: lineare Tabellengröße

Idee: zweistufige Abbildung der Schlüssel

- 1. Stufe bildet Schlüssel auf Buckets von konstanter durchschnittlicher Größe ab
- 2. Stufe benutzt quadratisch viel Platz für jedes Bucket
- Benutze Information über  $C(h)$ , um die Anzahl Schlüssel zu beschränken, die auf jede Tabellenposition abgebildet werden

# Statisches Wörterbuch

- $B_\ell^h$ : Menge der Elemente in  $S$ , die  $h$  auf  $\ell$  abbildet,  $\ell \in \{0, \dots, m-1\}$  und  $h \in H_m$
- $b_\ell^h$ : Kardinalität von  $B_\ell^h$ , also  $b_\ell^h := |B_\ell^h|$
- Für jedes  $\ell$  führen die Schlüssel in  $B_\ell^h$  zu  $b_\ell^h(b_\ell^h - 1)$  Kollisionen
- Also gilt:

$$C(h) = \sum_{\ell \in \{0, \dots, m-1\}} b_\ell^h(b_\ell^h - 1)$$

# Perfektes statisches Hashing: 1. Stufe

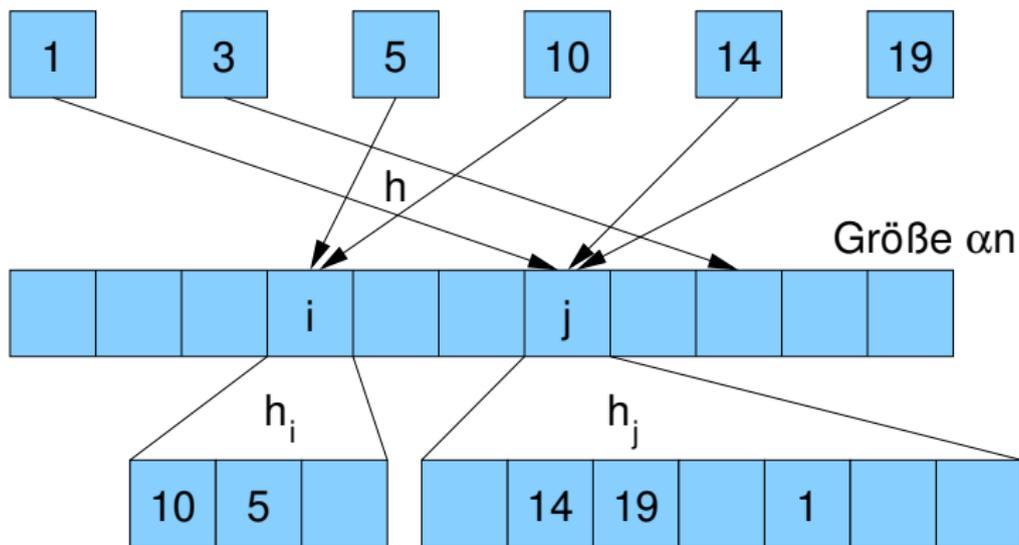
Konstruktion der Hashtabelle:

- Sei  $\alpha$  eine (später festzulegende) Konstante
- Wähle Funktion  $h \in H_{\lceil \alpha n \rceil}$ , um  $S$  in Teilmengen  $B_\ell$  aufzuspalten.
- Wähle  $h$  dabei aus dem Teil von  $H_{\lceil \alpha n \rceil}$ , für den gilt

$$C(h) \leq \frac{2cn(n-1)}{\lceil \alpha n \rceil} \leq \frac{2cn}{\alpha} \quad (\text{vorletztes Lemma})$$

- Für jedes  $\ell \in \{0, \dots, \lceil \alpha n \rceil - 1\}$  seien  $B_\ell$  die Elemente, die auf  $\ell$  abgebildet werden und  $b_\ell = |B_\ell|$  deren Anzahl

# Perfektes statisches Hashing



## Perfektes statisches Hashing: 2. Stufe

- Für jedes  $B_\ell$ :

$$\text{Sei } m_\ell = cb_\ell(b_\ell - 1) + 1$$

Wähle eine Funktion  $h_\ell \in H_{m_\ell}$ , die  $B_\ell$  injektiv in  $\{0, \dots, m_\ell - 1\}$  abbildet

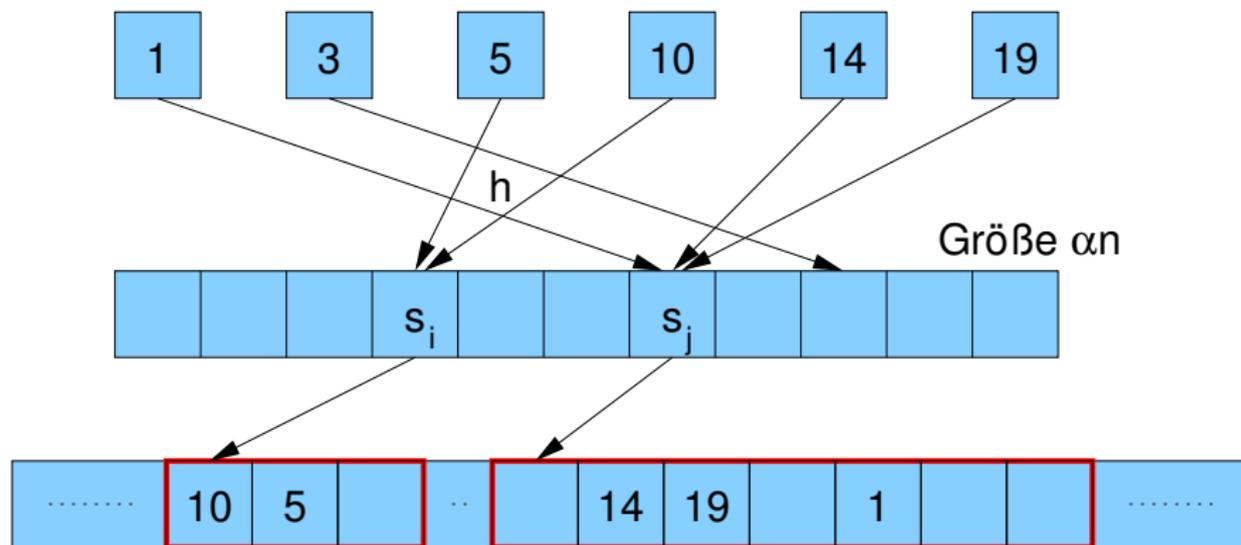
(mindestens die Hälfte der Funktionen in  $H_{m_\ell}$  tun das)

- Hintereinanderreihung der einzelnen Tabellen ergibt eine Gesamtgröße der Tabelle von  $\sum_\ell m_\ell$
- Die Teiltabelle für  $B_\ell$  beginnt dabei an Position  $s_\ell = m_0 + m_1 + \dots + m_{\ell-1}$
- Die Anweisungen

$$\ell = h(x); \quad \text{return } s_\ell + h_\ell(x);$$

berechnen dann eine injektive Funktion auf  $S$ .

# Perfektes statisches Hashing



# Perfektes statisches Hashing

- Die Funktion ist begrenzt durch:

$$\begin{aligned}
 \sum_{\ell=0}^{\lceil \alpha n \rceil - 1} m_{\ell} &= \sum_{\ell=0}^{\lceil \alpha n \rceil - 1} (c \cdot b_{\ell} (b_{\ell} - 1) + 1) && \text{(siehe Def. der } m_{\ell} \text{'s)} \\
 &\leq \lceil \alpha n \rceil + c \cdot C(h) \\
 &\leq 1 + \alpha n + c \cdot 2cn/\alpha \\
 &\leq 1 + (\alpha + 2c^2/\alpha)n
 \end{aligned}$$

- $\alpha = \sqrt{2}c$  minimiert diese Schranke
- Für  $c = 1$  ergibt sich  $2\sqrt{2}n$  als größter Adresswert

## Satz

*Für eine beliebige Menge von  $n$  Schlüsseln kann eine perfekte Hashfunktion mit Zielmenge  $\{0, \dots, 2\sqrt{2}n\}$  in linearer erwarteter Laufzeit konstruiert werden.*

# Perfektes dynamisches Hashing

Kann man perfekte Hashfunktionen auch **dynamisch** konstruieren?

ja, z.B. mit **Cuckoo** Hashing

- 2 Hashfunktionen  $h_1$  und  $h_2$
- 2 Hashtabellen  $T_1$  und  $T_2$
- bei find und remove jeweils in beiden Tabellen nachschauen
- bei insert abwechselnd beide Tabellen betrachten, das zu speichernde Element an die Zielposition der aktuellen Tabelle schreiben und wenn dort schon ein anderes Element stand, dieses genauso in die andere Tabelle verschieben usw.
- evt. Anzahl Verschiebungen durch  $2 \log n$  beschränken, um Endlosschleife zu verhindern  
(ggf. kompletter Rehash mit neuen Funktionen  $h_1, h_2$ )

# Übersicht

## 5 Hashing

- Hashtabellen
- Hashing with Chaining
- Universelles Hashing
- Hashing with Linear Probing
- Anpassung der Tabellengröße
- Perfektes Hashing
- **Diskussion / Alternativen**

# Probleme beim linearen Sondieren

- Offene Hashverfahren allgemein:

Erweiterte Hashfunktion  $h(k, i)$  gibt an, auf welche Adresse ein Schlüssel  $k$  abgebildet werden soll, wenn bereits  $i$  Versuche zu einer Kollision geführt haben

- Lineares Sondieren (Linear Probing):

$$h(k, i) = (h(k) + i) \bmod m$$

- **Primäre Häufung** (primary clustering):  
tritt auf, wenn für Schlüssel  $k_1, k_2$  mit unterschiedlichen Hashwerten  $h(k_1) \neq h(k_2)$  ab einem bestimmten Punkt  $i_1$  bzw.  $i_2$  die gleiche Sondierfolge auftritt:

$$\exists i_1, i_2 \quad \forall j: \quad h(k_1, i_1 + j) = h(k_2, i_2 + j)$$

## Probleme beim quadratischen Sondieren

- Quadratisches Sondieren (Quadratic Probing):

$$h(k, i) = (h(k) + c_1 i + c_2 i^2) \bmod m \quad (c_2 \neq 0)$$

$$\text{oder: } h(k, i) = (h(k) - (-1)^i \lceil i/2 \rceil^2) \bmod m$$

- $h(k, i)$  soll möglichst **surjektiv** auf die Adressmenge  $\{0, \dots, m-1\}$  abbilden, um freie Positionen auch **immer** zu finden. Bei

$$h(k, i) = (h(k) - (-1)^i \lceil i/2 \rceil^2) \bmod m$$

z.B. durch Wahl von  $m$  prim  $\wedge m \equiv 3 \pmod{4}$

- **Sekundäre Häufung** (secondary clustering): tritt auf, wenn für Schlüssel  $k_1, k_2$  mit gleichem Hashwert  $h(k_1) = h(k_2)$  auch die nachfolgende Sondierfolge gleich ist:

$$\forall i: h(k_1, i) = h(k_2, i)$$

# Double Hashing

- Auflösung der Kollisionen der Hashfunktion  $h$  durch eine zweite Hashfunktion  $h'$ :

$$h(k, i) = [h(k) + i \cdot h'(k)] \bmod m$$

wobei für alle  $k$  gelten soll, dass  $h'(k)$  teilerfremd zu  $m$  ist,

$$\text{z.B. } h'(k) = 1 + k \bmod m - 1$$

$$\text{oder } h'(k) = 1 + k \bmod m - 2$$

für Primzahl  $m$

- primäre und sekundäre Häufung werden weitgehend vermieden, aber nicht komplett ausgeschlossen

# Verteiltes Wörterbuch / konsistentes Hashing

- Hashing kann für **verteiltes Speichern** von Daten benutzt werden (z.B. auf mehreren Festplatten oder Knoten in einem Netzwerk)
- Problem: Änderung bei Speichermedien (Erweiterungen, Ausfälle)

⇒ Konsistentes Hashing

- benutze eine zufällige Hashfunktion, um die Schlüssel auf eine Zahl im Intervall  $[0, 1)$  abzubilden
- benutze eine zweite zufällige Hashfunktion, um jedem Speichermedium ein Intervall in  $[0, 1)$  zuzuordnen, für das dieser Speicher dann zuständig ist

# Übersicht

- 6 Sortieren
  - Einfache Verfahren
  - MergeSort
  - Untere Schranke
  - QuickSort
  - Selektieren
  - Schnelleres Sortieren
  - Externes Sortieren

# Statisches Wörterbuch

## Lösungsmöglichkeiten:

- Perfektes Hashing
  - ▶ Vorteil: Suche in konstanter Zeit
  - ▶ Nachteil: keine Ordnung auf Elementen, d.h. Bereichsanfragen (z.B. alle Namen, die mit 'A' anfangen) teuer
- Speicherung der Daten in sortiertem Feld
  - ▶ Vorteil: **Bereichsanfragen** möglich
  - ▶ Nachteil: Suche teurer (logarithmische Zeit)

# Sortierproblem

- gegeben: Ordnung  $\leq$  auf der Menge möglicher Schlüssel
- Eingabe: Sequenz  $s = \langle e_1, \dots, e_n \rangle$

Beispiel:



- Ausgabe: Permutation  $s' = \langle e'_1, \dots, e'_n \rangle$  von  $s$ ,  
so dass  $\text{key}(e'_i) \leq \text{key}(e'_{i+1})$  für alle  $i \in \{1, \dots, n\}$

Beispiel:



# Übersicht

- 6 **Sortieren**
  - **Einfache Verfahren**
  - MergeSort
  - Untere Schranke
  - QuickSort
  - Selektieren
  - Schnelleres Sortieren
  - Externes Sortieren

# SelectionSort

## Sortieren durch Auswählen

Wähle das kleinste Element aus der (verbleibenden) Eingabesequenz und verschiebe es an das Ende der Ausgabesequenz

### Beispiel

5	10	19	1	14	3
1	10	19	5	14	3
1	5	19	10	14	3
1	3	19	10	14	5
1	3	10	19	14	5

1	3	5	19	14	10
1	3	5	14	19	10
1	3	5	10	19	14
1	3	5	10	14	19
1	3	5	10	14	19

# SelectionSort

Sortieren durch Auswählen

```
selectionSort(Element[] a, int n) {  
    for (int i = 0; i < n; i++)  
        // verschiebe min{a[i], ..., a[n - 1]} nach a[i]  
        for (int j = i + 1; j < n; j++)  
            if (a[i] > a[j])  
                swap(a[i], a[j]);  
}
```

Zeitaufwand:

- Minimumsuche in Feld der Größe  $i$ :  $\Theta(i)$
- Gesamtzeit:  $\sum_{i=1}^n \Theta(i) = \Theta(n^2)$
- Vorteil: einfach zu implementieren
- Nachteil: quadratische Laufzeit

# InsertionSort

## Sortieren durch Einfügen

Nimm ein Element aus der Eingabesequenz und füge es an der richtigen Stelle in die Ausgabesequenz ein

### Beispiel

5	10	19	1	14	3
5	10	19	1	14	3
5	10	19	1	14	3
5	10	19	1	14	3
5	10	1	19	14	3

5	1	10	19	14	3
1	5	10	19	14	3
1	5	10	14	19	3
1	...	←	...	3	19
1	3	5	10	14	19

# InsertionSort

## Sortieren durch Einfügen

```
insertionSort(Element[] a, int n) {  
    for (int i = 1; i < n; i++)  
        // verschiebe  $a_i$  an die richtige Stelle  
        for (int j = i - 1; j ≥ 0; j --)  
            if ( $a[j] > a[j + 1]$ )  
                swap( $a[j], a[j + 1]$ );  
}
```

Zeitaufwand:

- Einfügung des  $i$ -ten Elements an richtiger Stelle:  $O(i)$
- Gesamtzeit:  $\sum_{i=1}^n O(i) = O(n^2)$
- Vorteil: einfach zu implementieren
- Nachteil: quadratische Laufzeit

# Einfache Verfahren

## SelectionSort

- mit besserer Minimumstrategie worst case Laufzeit  $O(n \log n)$  erreichbar  
(mehr dazu in einer späteren Vorlesung)

## InsertionSort

- mit besserer Einfügestrategie worst case Laufzeit  $O(n \log^2 n)$  erreichbar  
(→ ShellSort)

# Übersicht

## 6 Sortieren

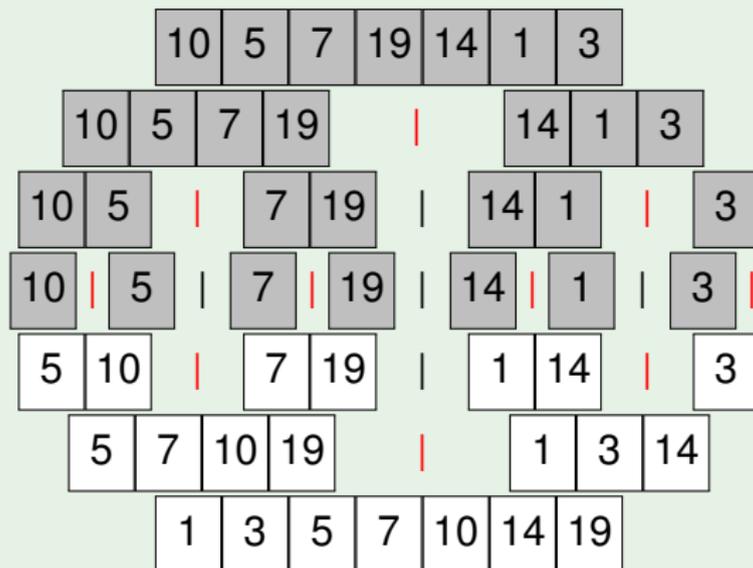
- Einfache Verfahren
- **MergeSort**
- Untere Schranke
- QuickSort
- Selektieren
- Schnelleres Sortieren
- Externes Sortieren

# MergeSort

## Sortieren durch Verschmelzen

Zerlege die Eingabesequenz rekursiv in Teile, die separat sortiert und dann zur Ausgabesequenz verschmolzen werden

### Beispiel



# MergeSort

## Sortieren durch Verschmelzen

```
mergeSort(Element[] a, int l, int r) {  
    if (l == r) return;           // nur ein Element  
    m =  $\lfloor (r + l) / 2 \rfloor$ ;    // Mitte  
    mergeSort(a, l, m);          // linken Teil sortieren  
    mergeSort(a, m + 1, r);      // rechten Teil sortieren  
    j = l; k = m + 1;           // verschmelzen  
    for i = 0 to r - l do  
        if (j > m) { b[i] = a[k]; k++; }           // linker Teil leer  
        else  
            if (k > r) { b[i] = a[j]; j++; }       // rechter Teil leer  
            else  
                if (a[j] ≤ a[k]) { b[i] = a[j]; j++; }  
                else { b[i] = a[k]; k++; }  
    for i = 0 to r - l do a[l + i] = b[i];         // zurückkopieren  
}
```

# MergeSort

Sortieren durch Verschmelzen

## Beispiel (Verschmelzen)



# MergeSort

## Sortieren durch Verschmelzen

Zeitaufwand:

- $T(n)$ : Laufzeit bei Feldgröße  $n$
- $T(1) = \Theta(1)$   
 $T(n) = T(\lceil n/2 \rceil) + T(\lfloor n/2 \rfloor) + \Theta(n)$

$\Rightarrow T(n) \in O(n \log n)$   
(folgt aus dem sogenannten Master-Theorem)

# Analyse rekursiver Funktionen

## Divide-and-Conquer-Algorithmen

- nichtrekursive Unterprogrammaufrufe sind einfach zu analysieren (separate Analyse des Funktionsaufrufs und Einsetzen)
  - rekursive Aufrufstrukturen liefern **Rekursionsgleichungen**
- ⇒ Funktionswert wird in Abhängigkeit von Funktionswerten für kleinere Argumente bestimmt
- gesucht: nichtrekursive / geschlossene Form

Anwendung: **Divide-and-Conquer**-Algorithmen

- gegeben: Problem der Größe  $n = b^k$  ( $k \in \mathbb{N}_0$ )
- falls  $k \geq 1$ :
  - ▶ zerlege das Problem in  $d$  Teilprobleme der Größe  $n/b$
  - ▶ löse die Teilprobleme ( $d$  rekursive Aufrufe)
  - ▶ setze aus den Teillösungen die Lösung zusammen
- falls  $k = 0$  bzw.  $n = 1$ : investiere Aufwand  $a$  zur Lösung

# Analyse rekursiver Funktionen

## Divide-and-Conquer-Algorithmen

- Betrachte den Aufwand für jede Rekursionstiefe
- Anfang: Problemgröße  $n$
- Level für Rekursionstiefe  $i$ :  $d^i$  Teilprobleme der Größe  $n/b^i$

⇒ Gesamtaufwand auf Rekursionslevel  $i$ :

$$d^i c \frac{n}{b^i} = cn \left(\frac{d}{b}\right)^i \quad (\text{geometrische Reihe})$$

- $d < b$  Aufwand sinkt mit wachsender Rekursionstiefe; *erstes* Level entspricht konstantem Anteil des Gesamtaufwands
- $d = b$  Gesamtaufwand für jedes Level gleich groß; maximale Rekursionstiefe logarithmisch, Gesamtaufwand  $\Theta(n \log n)$
- $d > b$  Aufwand steigt mit wachsender Rekursionstiefe; *letztes* Level entspricht konstantem Anteil des Gesamtaufwands

# Analyse rekursiver Funktionen

## Divide-and-Conquer-Algorithmen

Geometrische Folge:  $(a_i)_{i \in \mathbb{N}}$

Verhältnis benachbarter Folgenglieder konstant:  $q = a_{i+1}/a_i$

$n$ -te Partialsumme der geometrischen Reihe:

$$s_n = \sum_{i=0}^n a_i = a_0 + \dots + a_n = a_0 + a_0q + a_0q^2 + \dots + a_0q^n$$

Wert:

$$s_n = a_0 \frac{q^{n+1} - 1}{q - 1} = a_0 \frac{q^{n+1} - 1}{q - 1} \quad \text{für } q \neq 1$$

bzw.

$$s_n = a_0(n + 1) \quad \text{für } q = 1$$

# Master-Theorem

## Lösung von Rekursionsgleichungen

### Satz (vereinfachtes Master-Theorem)

Seien  $a, b, c, d$  positive Konstanten und  $n = b^k$  mit  $k \in \mathbb{N}$ .

Betrachte folgende Rekursionsgleichung:

$$r(n) = \begin{cases} a & \text{falls } n = 1, \\ cn + d \cdot r(n/b) & \text{falls } n > 1. \end{cases}$$

Dann gilt:

$$r(n) = \begin{cases} \Theta(n) & \text{falls } d < b, \\ \Theta(n \log n) & \text{falls } d = b, \\ \Theta(n^{\log_b d}) & \text{falls } d > b. \end{cases}$$

# Übersicht

## 6 Sortieren

- Einfache Verfahren
- MergeSort
- **Untere Schranke**
- QuickSort
- Selektieren
- Schnelleres Sortieren
- Externes Sortieren

# Untere Schranke

MergeSort hat Laufzeit  $O(n \log n)$  im worst case.

insertionSort kann so implementiert werden, dass es im best case nur lineare Laufzeit hat

Gibt es Sortierverfahren mit Laufzeit **besser als  $O(n \log n)$**  im worst case, z.B.  $O(n)$  oder  $O(n \log \log n)$ ?

⇒ nicht auf der Basis **einfacher Schlüsselvergleiche**

Entscheidungen:  $x_i < x_j \rightarrow$  ja/nein

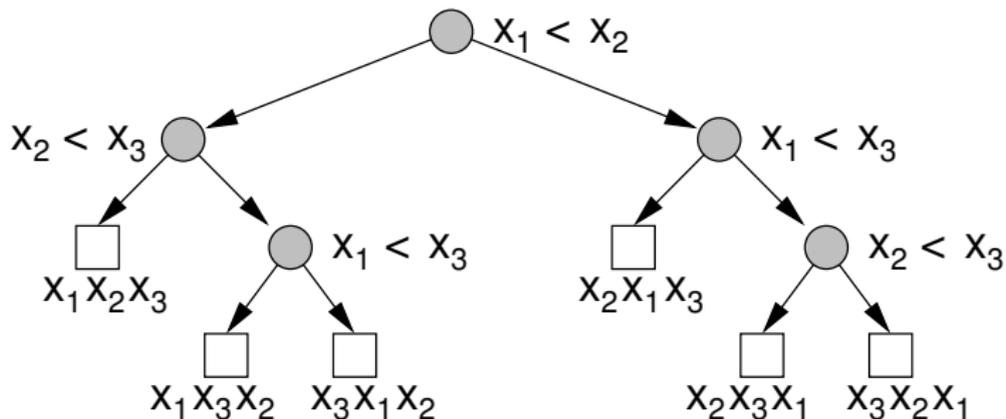
## Satz

*Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt im worst case mindestens  $n \log n - O(n) \in \Theta(n \log n)$  Vergleiche.*

# Untere Schranke

## Vergleichsbasiertes Sortieren

**Entscheidungsbaum** mit Entscheidungen an den Knoten:



# Untere Schranke

## Vergleichsbasiertes Sortieren

muss insbesondere auch funktionieren, wenn alle  $n$  Schlüssel verschieden sind

⇒ Annahme: alle verschieden

Wieviele verschiedene Ergebnisse gibt es?

⇒ alle Permutationen:

$$n! = \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n \left(1 + O\left(\frac{1}{n}\right)\right) \geq \frac{n^n}{e^n} \sqrt{2\pi n}$$

Binärbaum der Höhe  $h$  hat höchstens  $2^h$  Blätter bzw.  
Binärbaum mit  $b$  Blättern hat mindestens Höhe  $\log_2 b$

⇒  $h \geq \log_2(n!) \geq n \log n - n \log e + \frac{1}{2} \log(2\pi n)$

# Untere Schranke

## Vergleichsbasiertes Sortieren

### Average-case complexity

- gleiche Schranke gilt auch für randomisierte Sortieralgorithmen und durchschnittliche Laufzeit (hier ohne Beweis)
  
- ebenso für das scheinbar einfachere Problem festzustellen, ob ein Element in einer Sequenz doppelt vorkommt

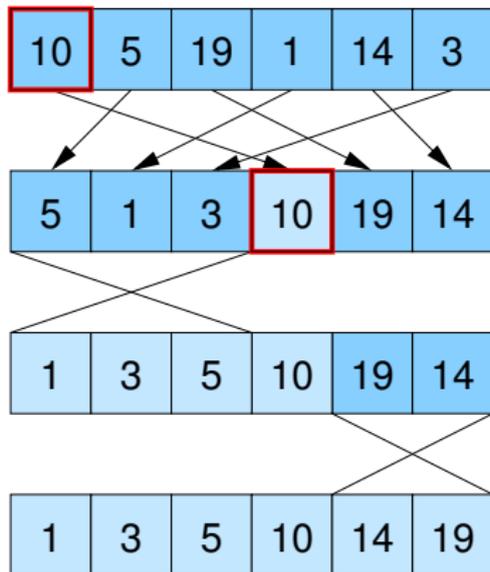
# Übersicht

- 6 Sortieren
  - Einfache Verfahren
  - MergeSort
  - Untere Schranke
  - **QuickSort**
  - Selektieren
  - Schnelleres Sortieren
  - Externes Sortieren

# QuickSort

Idee:

Aufspaltung in zwei Teilmengen, aber nicht in der Mitte der Sequenz wie bei MergeSort, sondern getrennt durch ein **Pivotelement**



# QuickSort

```
quickSort(Element[] a, int l, int r) {  
    // a[l...r]: zu sortierendes Feld  
    if (r > l) {  
        v = a[r];  
        int i = l - 1;  int j = r;  
        do { // spalte Elemente in a[l, ..., r - 1] nach Pivot v  
            do { i + + } while (a[i] < v);  
            do { j - - } while (j ≥ l ∧ a[j] > v);  
            if (i < j) swap(a[i], a[j]);  
        } while (i < j);  
        swap (a[i], a[r]); // Pivot an richtige Stelle  
        quickSort(a, l, i - 1);  
        quickSort(a, i + 1, r);  
    }  
}
```

# QuickSort

## Problem:

- im Gegensatz zu MergeSort kann die Aufteilung in Teilprobleme unbalanciert sein (also nur im Optimalfall eine Halbierung)
- im worst case **quadratische** Laufzeit  
(z.B. wenn Pivotelement immer kleinstes oder größtes aller Elemente ist)

## Lösungen:

- wähle **zufälliges** Pivotelement:  
Laufzeit  $O(n \log n)$  mit hoher Wahrscheinlichkeit
- berechne Median (mittleres Element):  
mit Selektionsalgorithmus, spätere Vorlesung

# QuickSort

Laufzeit bei zufälligem Pivot-Element

- Zähle Anzahl Vergleiche (Rest macht nur konstanten Faktor aus)
- $\bar{C}(n)$ : erwartete Anzahl Vergleiche bei  $n$  Elementen

## Satz

*Die erwartete Anzahl von Vergleichen für QuickSort ist*

$$\bar{C}(n) \leq 2n \ln n \leq 1.39n \log n$$

# QuickSort

## Beweis.

- Betrachte für die Analyse die **sortierte** Sequenz  $s' = \langle e'_1, \dots, e'_n \rangle$
  - nur Vergleiche mit Pivotelement
  - Pivotelement ist nicht in den rekursiven Aufrufen enthalten
- ⇒  $e'_i$  und  $e'_j$  werden höchstens einmal verglichen und zwar dann, wenn  $e'_i$  oder  $e'_j$  Pivotelement ist

# QuickSort

## Beweis.

- Zufallsvariable  $X_{ij} \in \{0, 1\}$
- $X_{ij} = 1 \iff e'_i$  und  $e'_j$  werden verglichen

$$\begin{aligned}\bar{C}(n) &= \mathbb{E} \left[ \sum_{i < j} X_{ij} \right] = \sum_{i < j} \mathbb{E} [X_{ij}] \\ &= \sum_{i < j} 0 \cdot \Pr[X_{ij} = 0] + 1 \cdot \Pr[X_{ij} = 1] \\ &= \sum_{i < j} \Pr[X_{ij} = 1]\end{aligned}$$

# QuickSort

## Lemma

$$\Pr[X_{ij} = 1] = 2/(j - i + 1)$$

## Beweis.

- Sei  $M = \{e'_i, \dots, e'_j\}$
- Irgendwann wird ein Element aus  $M$  als Pivot ausgewählt.
- Bis dahin bleibt  $M$  immer zusammen.
- $e'_i$  und  $e'_j$  werden genau dann *direkt* verglichen, wenn eines der beiden als Pivot ausgewählt wird
- Wahrscheinlichkeit:

$$\Pr[e'_i \text{ oder } e'_j \text{ aus } M \text{ ausgewählt}] = \frac{2}{|M|} = \frac{2}{j - i + 1}$$



# QuickSort

## Beweis.

$$\begin{aligned}
 \bar{C} &= \sum_{i < j} \Pr[X_{ij} = 1] = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{1}{k} \\
 &\leq 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = 2(n-1) \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = 2(n-1)(H_n - 1) \\
 &\leq 2(n-1)(1 + \ln n - 1) \leq 2n \ln n
 \end{aligned}$$



# QuickSort

Verbesserte Version ohne Check für Array-Grenzen

```

qSort(Element[] a, int l, int r) {
  while ( $r - l \geq n_0$ ) {
    j = pickPivotPos(a, l, r);
    swap(a[l], a[j]);  p = a[l];
    int i = l;  int j = r;
    repeat {
      while (a[i] < p) do i ++;
      while (a[j] > p) do j --;
      if (i ≤ j) { swap(a[i], a[j]);  i ++;  j --; }
    } until (i > j);
    if (i < (l + r)/2) { qSort(a, l, j);  l = i; }
    else                { qSort(a, i, r);  r = j; }
  }
  insertionSort(a, l, r);
}

```

# Übersicht

## 6 Sortieren

- Einfache Verfahren
- MergeSort
- Untere Schranke
- QuickSort
- **Selektieren**
- Schnelleres Sortieren
- Externes Sortieren

# Rang-Selektion

- Bestimmung des kleinsten und größten Elements ist mit einem einzigen Scan über das Array in Linearzeit möglich
- Aber wie ist das beim  $k$ -kleinsten Element, z.B. beim  $\lfloor n/2 \rfloor$ -kleinsten Element (Median)?

Problem:

Finde  **$k$ -kleinstes** Element in einer Menge von  $n$  Elementen

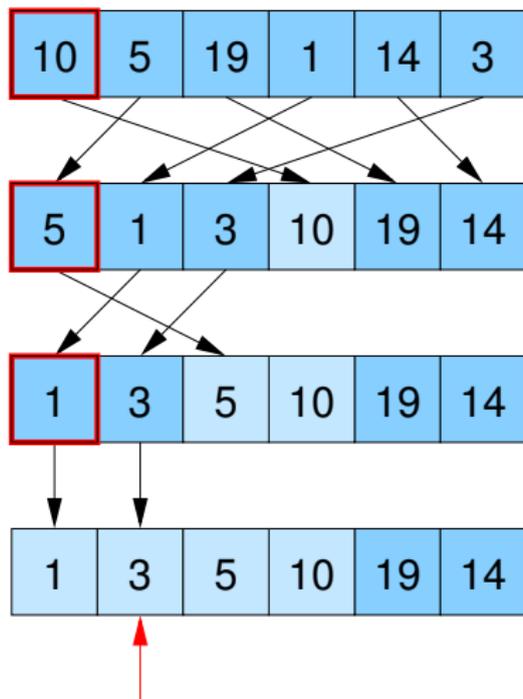
Naive Lösung: Sortieren und  $k$ -tes Element ausgeben

⇒ Zeit  $O(n \log n)$

Geht das auch **schneller**?

# QuickSelect

Ansatz: ähnlich zu QuickSort, aber nur eine Seite betrachten



# QuickSelect

Methode analog zu QuickSort

```
Element quickSelect(Element[] a, int l, int r, int k) {  
    // a[l...r]: Restfeld, k: Rang des gesuchten Elements  
    if (r == l) return a[l];  
    int z = zufällige Position in {l, ..., r}; swap(a[z], a[r]);  
    Element v = a[r]; int i = l - 1; int j = r;  
    do { // spalte Elemente in a[l, ..., r - 1] nach Pivot v  
        do i ++ while (a[i] < v);  
        do j -- while (a[j] > v && j ≠ l);  
        if (i < j) swap(a[i], a[j]);  
    } while (i < j);  
    swap (a[i], a[r]); // Pivot an richtige Stelle  
    if (k < i) return quickSelect(a, l, i - 1, k);  
    if (k > i) return quickSelect(a, i + 1, r, k);  
    else return a[k]; // k == i  
}
```

# QuickSelect

## Alternative Methode

```
Element select(Element[] s, int k) {  
    assert(|s| ≥ k);  
    Wähle  $p \in s$  zufällig (gleichverteilt);  
  
    Element[] a := {e ∈ s : e < p};  
    if (|a| ≥ k)  
        return select(a,k);  
  
    Element[] b := {e ∈ s : e = p};  
    if (|a| + |b| ≥ k)  
        return p;  
  
    Element[] c := {e ∈ s : e > p};  
    return select(c,k - |a| - |b|);  
}
```

# QuickSelect

## Alternative Methode

### Beispiel

s	k	a b c
$\langle 3, 1, 4, 1, 5, 9, 2, 6, 5, 3, 5, 8, 9 \rangle$	7	$\langle 1, 1 \rangle \langle 2 \rangle \langle 3, 4, 5, 9, 6, 5, 3, 5, 8, 9 \rangle$
$\langle 3, 4, 5, 9, 6, 5, 3, 5, 8, 9 \rangle$	4	$\langle 3, 4, 5, 5, 3, 5 \rangle \langle 6 \rangle \langle 9, 8, 9 \rangle$
$\langle 3, 4, 5, 5, 3, 5 \rangle$	4	$\langle 3, 4, 3 \rangle \langle 5, 5, 5 \rangle \langle \rangle$

In der sortierten Sequenz würde also an 7. Stelle das Element 5 stehen.

Hier wurde das mittlere Element als Pivot verwendet.

# QuickSelect

teilt das Feld jeweils in 3 Teile:

- a* Elemente kleiner als das Pivot
- b* Elemente gleich dem Pivot
- c* Elemente größer als das Pivot

$T(n)$ : erwartete Laufzeit bei  $n$  Elementen

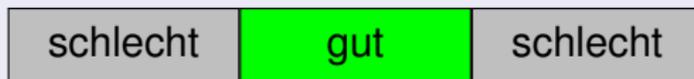
## Satz

*Die erwartete Laufzeit von QuickSelect ist linear:  $T(n) \in O(n)$ .*

# QuickSelect

## Beweis.

- Pivot ist **gut**, wenn weder  $a$  noch  $c$  länger als  $2/3$  der aktuellen Feldgröße sind:



⇒ Pivot ist gut, falls es im mittleren Drittel liegt

$$p = \Pr[\text{Pivot ist gut}] = 1/3$$

## Erwartete Zeit bei $n$ Elementen

- linearer Aufwand außerhalb der rekursiven Aufrufe:  $cn$
- Pivot **gut** (Wsk.  $1/3$ ): Restaufwand  $\leq T(2n/3)$
- Pivot **schlecht** (Wsk.  $2/3$ ): Restaufwand  $\leq T(n-1) < T(n)$

# QuickSelect

## Beweis.

$$\begin{aligned}T(n) &\leq cn + p \cdot T(n \cdot 2/3) + (1 - p) \cdot T(n) \\p \cdot T(n) &\leq cn + p \cdot T(n \cdot 2/3) \\T(n) &\leq cn/p + T(n \cdot 2/3) \\&\leq cn/p + c \cdot (n \cdot 2/3)/p + T(n \cdot (2/3)^2) \\&\dots \text{wiederholtes Einsetzen} \\&\leq (cn/p)(1 + 2/3 + 4/9 + 8/27 + \dots) \\&\leq \frac{cn}{p} \cdot \sum_{i \geq 0} (2/3)^i \\&\leq \frac{cn}{1/3} \cdot \frac{1}{1 - 2/3} = 9cn \in O(n)\end{aligned}$$



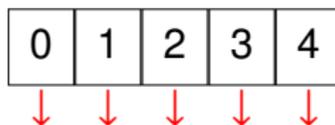
# Übersicht

- 6 Sortieren
  - Einfache Verfahren
  - MergeSort
  - Untere Schranke
  - QuickSort
  - Selektieren
  - **Schnelleres Sortieren**
  - Externes Sortieren

# Sortieren schneller als $O(n \log n)$

## Buckets

- mit paarweisen Schlüsselvergleichen: nie besser als  $O(n \log n)$
- Was aber, wenn die Schlüsselmenge mehr Struktur hat?
- z.B. Zahlen / Strings bestehend aus mehreren Ziffern / Zeichen
- Um zwei Zahlen / Strings zu vergleichen reicht oft schon die erste Ziffer bzw. das erste Zeichen. Nur bei Gleichheit des Anfangs kommt es auf weitere Ziffern / Zeichen an.
- Annahme: Elemente sind Zahlen im Bereich  $\{0, \dots, K - 1\}$
- Strategie: verwende Feld von  $K$  Buckets (z.B. Listen)



# Sortieren schneller als $O(n \log n)$

## Buckets

```

Sequence<Elem> kSort(Sequence<Elem> s) {
    Sequence<Elem>[] b = new Sequence<Elem>[K];
    foreach (e ∈ s)
        b[key(e)].pushBack(e);
    return concatenate(b); // Aneinanderreihung von b[0],...,b[k-1]
}

```

Laufzeit:  $\Theta(n + K)$       Problem: nur gut für  $K \in o(n \log n)$

Speicher:  $\Theta(n + K)$

- wichtig: kSort ist **stabil**, d.h. Elemente mit dem gleichen Schlüssel behalten ihre relative Reihenfolge
- ⇒ Elemente müssen im jeweiligen Bucket *hinten* angehängt werden

# RadixSort

- verwende  **$K$ -adische Darstellung** der Schlüssel
- Annahme:  
Schlüssel sind Zahlen aus  $\{0, \dots, K^d - 1\}$   
repräsentiert durch  $d$  Ziffern aus  $\{0, \dots, K - 1\}$
- sortiere zunächst entsprechend der niedrigstwertigen Ziffer mit  **$k$ Sort** und dann nacheinander für immer höherwertigere Stellen
- behalte Ordnung der Teillisten bei

# RadixSort

```
radixSort(Sequence<Elem> s) {  
    for (int i = 0; i < d; i++)  
        kSort(s,i); // sortiere gemäß  $\text{key}_i(x)$   
        // mit  $\text{key}_i(x) = (\text{key}(x)/K^i) \bmod K$   
}
```

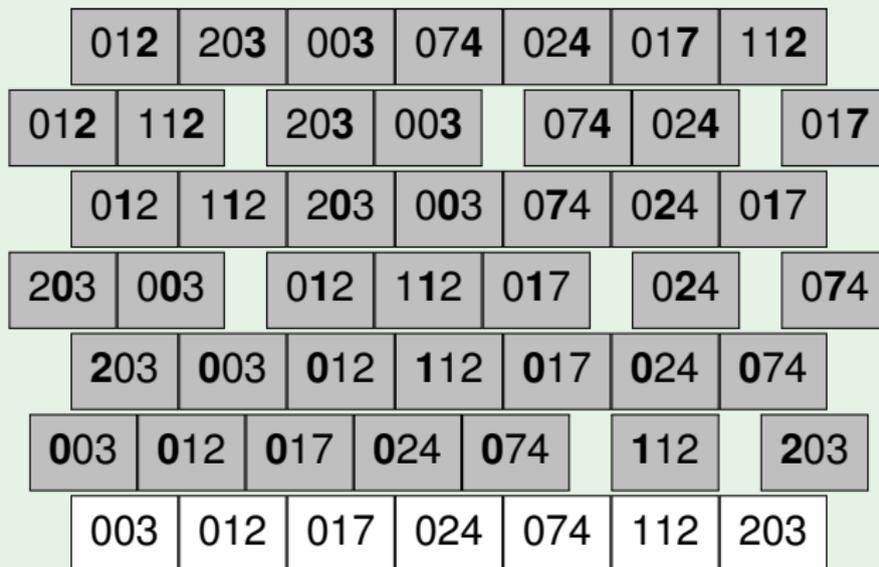
Verfahren funktioniert, weil kSort **stabil** ist:

Elemente mit gleicher  $i$ -ter Ziffer bleiben sortiert bezüglich der Ziffern  $i - 1 \dots 0$  während der Sortierung nach Ziffer  $i$

Laufzeit:  $O(d(n + K))$  für  $n$  Schlüssel aus  $\{0, \dots, K^d - 1\}$

# RadixSort

## Beispiel



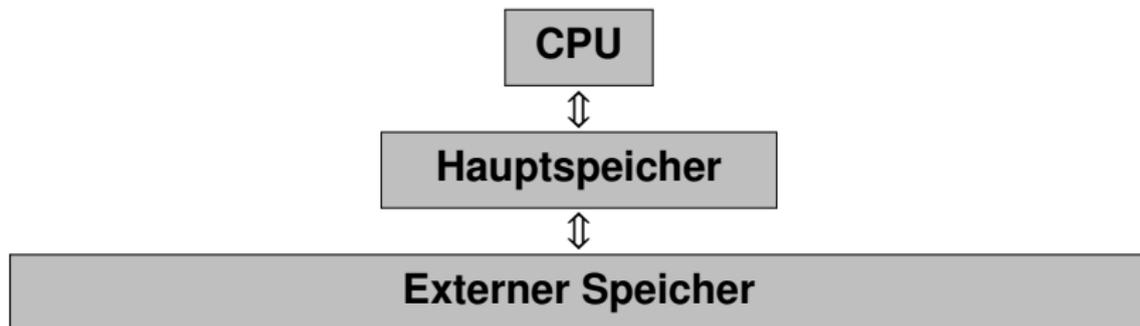
# Übersicht

## 6 Sortieren

- Einfache Verfahren
- MergeSort
- Untere Schranke
- QuickSort
- Selektieren
- Schnelleres Sortieren
- **Externes Sortieren**

# Externes Sortieren

Heutige Computer:



- Hauptspeicher hat Größe **M**
- Transfer zwischen Hauptspeicher und externem Speicher mit Blockgröße **B**

# Externes Sortieren

Problem:

Minimiere Anzahl **Blocktransfers** zwischen internem und externem Speicher

Anmerkung:

Gleiches Problem trifft auch auf anderen Stufen der Hierarchie zu (Cache)

Lösung: Verwende **MergeSort**

Vorteil: MergeSort verwendet oft konsekutive Elemente (**Scanning**)  
(geht auf Festplatte schneller als Random Access-Zugriffe)

# Externes Sortieren

- Eingabe: großes Feld auf der Festplatte
- Annahme: Anzahl der Elemente  $n$  ist durch  $B$  teilbar (sonst z.B. Auffüllen mit maximalem Schlüssel)

Run Formation Phase:

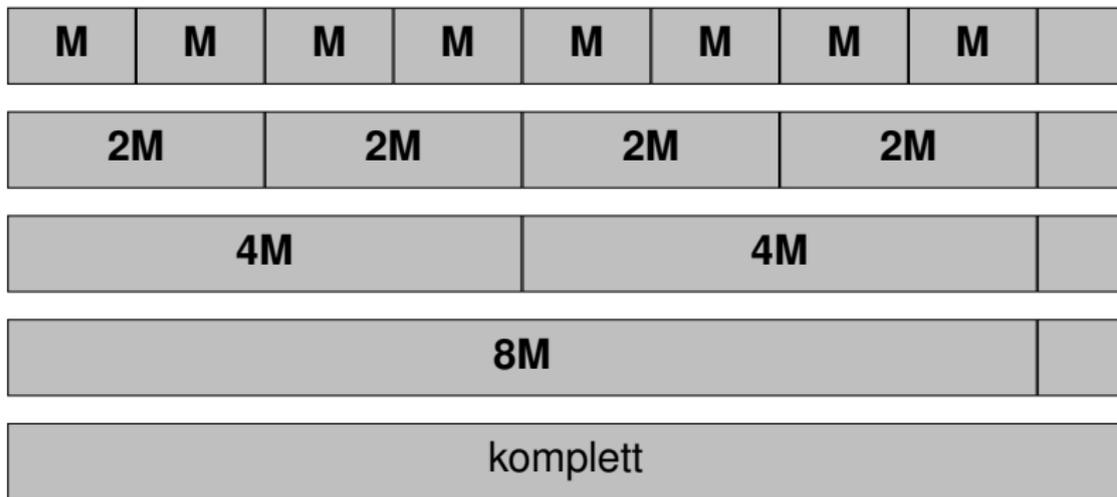
- Lade Teilfelder der Größe  $M$  in den Speicher (Annahme:  $B \mid M$ ),
- sortiere sie mit einem in-place-Sortierverfahren,
- schreibe das sortierte Teilfeld wieder zurück auf die Festplatte
- benötigt  $n/B$  Blocklese- und  $n/B$  Blockschreiboperationen
- Laufzeit:  $2n/B$  Transfers
- ergibt sortierte Bereiche (Runs) der Größe  $M$



# Externes Sortieren

## Merge Phasen

- Merge von jeweils 2 Teilfolgen in  $O(\lceil \log(n/M) \rceil)$  Phasen
- dabei jeweils Verdopplung der Größe der sortierten Teile



## Merge von zwei Runs

- von jedem der beiden Runs und von der Ausgabesequenz bleibt ein Block im Hauptspeicher (**3 Puffer**:  $2 \times$  Eingabe,  $1 \times$  Ausgabe)
  - Anfang: beide Eingabepuffer mit  $B$  Elementen (1 Block) laden, Ausgabepuffer leer
  - Dann: jeweils führende Elemente der beiden Eingabepuffer vergleichen und das kleinere in den Ausgabepuffer schreiben
  - Wenn Eingabepuffer leer  $\Rightarrow$  neuen Block laden
  - Wenn Ausgabepuffer voll  $\Rightarrow$  Block auf Festplatte schreiben und Ausgabepuffer leeren
  
  - In jeder Merge-Phase wird das ganze Feld einmal gelesen und geschrieben
- $\Rightarrow (2n/B)(1 + \lceil \log_2(n/M) \rceil)$  Block-Transfers

# Multiway-MergeSort

- Verfahren funktioniert, wenn 3 Blöcke in den Speicher passen
  - Wenn mehr Blöcke in den Speicher passen, kann man gleich mehr als zwei Runs ( $k$ ) mergen.
  - Benutze Prioritätswarteschlange (Priority Queue) zur Minimumermittlung, wobei die Operationen  $O(\log k)$  Zeit kosten
  - $(k + 1)$  Blocks und die PQ müssen in den Speicher passen
- ⇒  $(k + 1)B + O(k) \leq M$ , also  $k \in O(M/B)$
- Anzahl Merge-Phasen reduziert auf  $\lceil \log_k(n/M) \rceil$
- ⇒  $(2n/B) \left(1 + \lceil \log_{M/B}(n/M) \rceil\right)$  Block-Transfers
- In der Praxis: Anzahl Merge-Phasen gering
  - Wenn  $n \leq M^2/B$ : nur eine einzige Merge-Phase (erst  $M/B$  Runs der Größe  $M$ , dann einmal Merge)

# Übersicht

- 7 Priority Queues
  - Allgemeines
  - Heaps
  - Binomial Heaps

# Übersicht

7

## Priority Queues

- Allgemeines
- Heaps
- Binomial Heaps

# Prioritätswarteschlangen

**M**: Menge von Elementen

Jedes Element  $e$  hat eine zugeordnete Priorität  $\text{prio}(e)$

Operationen:

- $M.\text{build}(\{e_1, \dots, e_n\})$ :  $M = \{e_1, \dots, e_n\}$
- $M.\text{insert}(\text{Element } e)$ :  $M = M \cup e$
- Element  $M.\text{min}()$ : gib ein  $e$  mit minimaler Priorität  $\text{prio}(e)$  zurück
- Element  $M.\text{deleteMin}()$ : entferne Element  $e$  mit minimalem Wert  $\text{prio}(e)$  und gib es zurück

# Adressierbare Prioritätswarteschlangen

Zusätzliche Operationen für **adressierbare** PQs:

- Handle **insert**(Element  $e$ ): wie zuvor, gibt aber ein Handle (Referenz / Zeiger) auf das eingefügte Element zurück
- **remove**(Handle  $h$ ): lösche Element spezifiziert durch Handle  $h$
- **decreaseKey**(Handle  $h$ , int  $k$ ):  
reduziere Schlüssel / Priorität des Elements auf Wert  $k$   
(je nach Implementation evt. auch um Differenz  $k$ )
- **M.merge**( $Q$ ):  $M = M \cup Q$ ;  $Q = \emptyset$ ;

# Prioritätswarteschlangen mit Listen

Priority Queue mittels **unsortierter** Liste:

- $\text{build}(\{e_1, \dots, e_n\})$ : Zeit  $O(n)$
- $\text{insert}(\text{Element } e)$ : Zeit  $O(1)$
- $\text{min}(), \text{deleteMin}()$ : Zeit  $O(n)$

Priority Queue mittels **sortierter** Liste:

- $\text{build}(\{e_1, \dots, e_n\})$ : Zeit  $O(n \log n)$
- $\text{insert}(\text{Element } e)$ : Zeit  $O(n)$
- $\text{min}(), \text{deleteMin}()$ : Zeit  $O(1)$

⇒ Bessere Struktur als eine Liste notwendig!

# Übersicht

## 7 Priority Queues

- Allgemeines
- **Heaps**
- Binomial Heaps

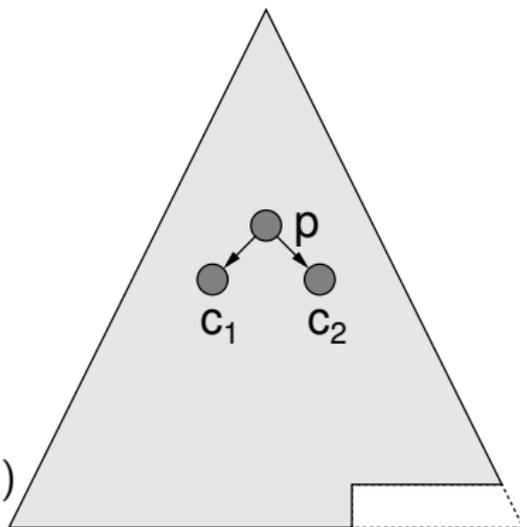
# Binärer Heap

Idee: verwende Binärbaum

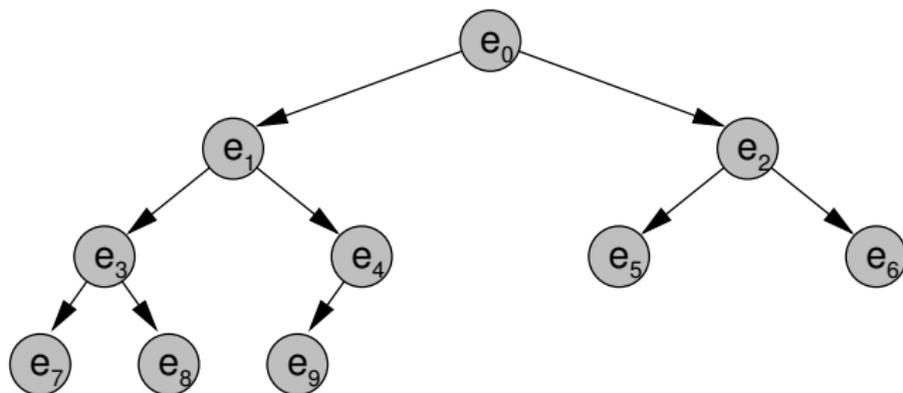
Bewahre zwei Invarianten:

- **Form-Invariante:** fast vollständiger Binärbaum
- **Heap-Invariante:**

$$\text{prio}(p) \leq \min \{ \text{prio}(c_1), \text{prio}(c_2) \}$$



# Binärer Heap als Feld



- Kinder von Knoten  $H[i]$  in  $H[2i + 1]$  und  $H[2i + 2]$
- Form-Invariante:  $H[0] \dots H[n - 1]$  besetzt
- Heap-Invariante:  $H[i] \leq \min\{H[2i + 1], H[2i + 2]\}$

# Binärer Heap als Feld

## insert(e)

- Form-Invariante:  $H[n] = e$ ; siftUp(n);  $n++$ ;

- Heap-Invariante:

vertausche  $e$  mit seinem Vater bis

$\text{prio}(H[\lfloor (k-1)/2 \rfloor]) \leq \text{prio}(e)$  für  $e$  in  $H[k]$  (oder  $e$  in  $H[0]$ )

siftUp( $i$ ) {

  while ( $i > 0 \wedge \text{prio}(H[\lfloor (i-1)/2 \rfloor]) > \text{prio}(H[i])$ ) {

    swap( $H[i]$ ,  $H[\lfloor (i-1)/2 \rfloor]$ );

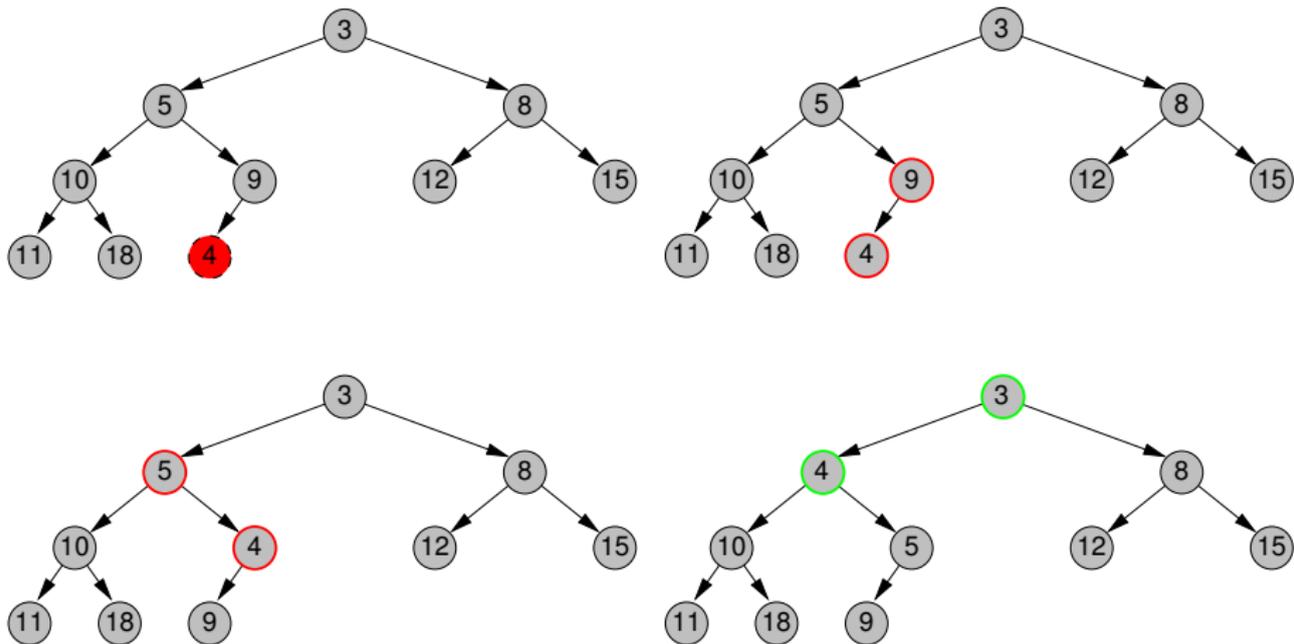
$i = \lfloor (i-1)/2 \rfloor$ ;

  }

}

- Laufzeit:  $O(\log n)$

## Heap - siftUp()



# Binärer Heap als Feld

## deleteMin()

- Form-Invariante:

$e = H[0];$

$n --;$

$H[0] = H[n];$

siftDown(0);

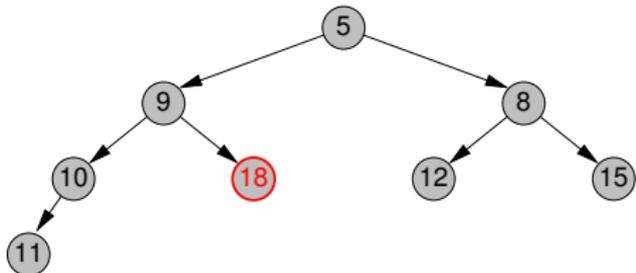
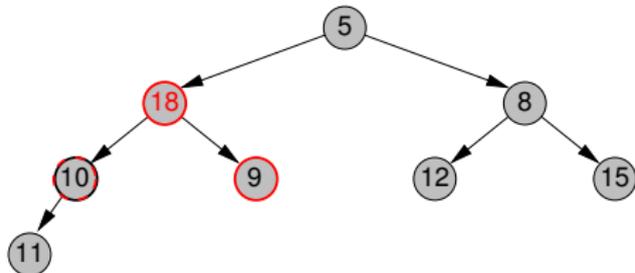
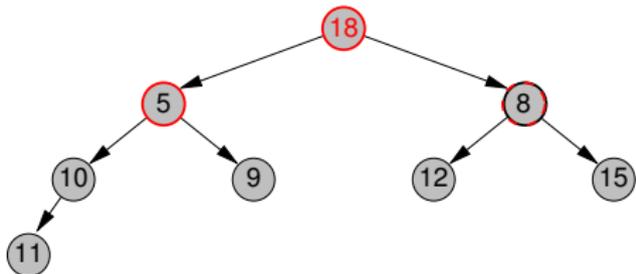
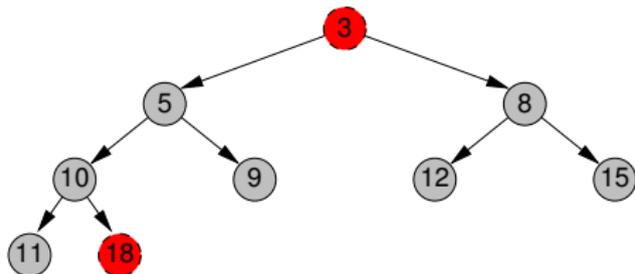
return e;

- Heap-Invariante: (siftDown)  
vertausche  $e$  (anfangs Element in  $H[0]$ ) mit dem Kind, das die kleinere Priorität hat, bis  $e$  ein Blatt ist oder  
 $\text{prio}(e) \leq \min\{\text{prio}(c_1(e)), \text{prio}(c_2(e))\}.$
- Laufzeit:  $O(\log n)$

# Binärer Heap als Feld

```
siftDown(i) {  
  int m;  
  while (2i + 1 < n) {  
    if (2i + 2 ≥ n)  
      m = 2i + 1;  
    else  
      if (prio(H[2i + 1]) < prio(H[2i + 2]))  
        m = 2i + 1;  
      else m = 2i + 2;  
    if (prio(H[i]) ≤ prio(H[m]))  
      return;  
    swap(H[i], H[m]);  
    i = m;  
  }  
}
```

## Heap - siftDown()



# Binärer Heap / Aufbau

**build**( $\{e_0, \dots, e_{n-1}\}$ )

- **naiv**:

Für alle  $i \in \{0, \dots, n-1\}$ :  
    **insert**( $e_i$ )

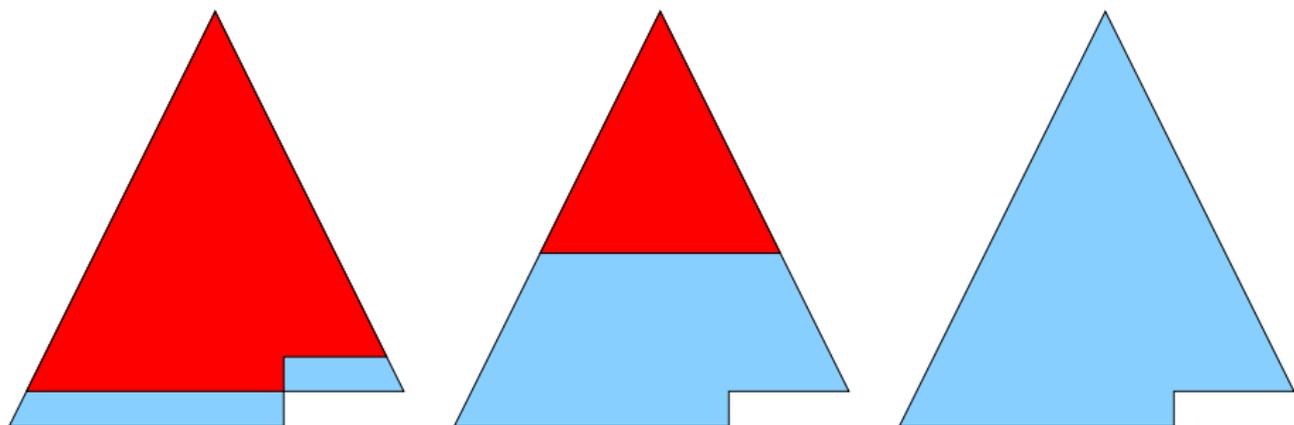
⇒ Laufzeit:  $\Theta(n \log n)$

# Binärer Heap / Aufbau

**build**( $\{e_0, \dots, e_{n-1}\}$ )

effizient:

- Für alle  $i \in \{0, \dots, n-1\}$ :  
 $H[i] := e_i$ .
- Für alle  $i \in \{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1, \dots, 0\}$ :  
 $\text{siftDown}(i)$



# Binärer Heap / Aufbau

Laufzeit:

- $k = \lfloor \log n \rfloor$ : Baumtiefe (gemessen in Kanten)
- siftDown-Kosten von Level  $\ell$  aus proportional zur Resttiefe  $(k - \ell)$
- Es gibt  $\leq 2^\ell$  Knoten in Tiefe  $\ell$ .

$$O\left(\sum_{0 \leq \ell < k} 2^\ell (k - \ell)\right) \subseteq O\left(2^k \sum_{0 \leq \ell < k} \frac{k - \ell}{2^{k-\ell}}\right) \subseteq O\left(2^k \sum_{j \geq 1} \frac{j}{2^j}\right) \subseteq O(n)$$

---


$$\begin{aligned} \sum_{j \geq 1} j \cdot 2^{-j} &= \sum_{j \geq 1} 2^{-j} + \sum_{j \geq 2} 2^{-j} + \sum_{j \geq 3} 2^{-j} + \dots \\ &= 1 \cdot \sum_{j \geq 1} 2^{-j} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{j \geq 1} 2^{-j} + \frac{1}{4} \cdot \sum_{j \geq 1} 2^{-j} + \dots \\ &= (1 + 1/2 + 1/4 + \dots) \sum_{j \geq 1} 2^{-j} = 2 \cdot 1 = 2 \end{aligned}$$

# Laufzeiten des Binären Heaps

- **min()**:  $O(1)$
- **insert(e)**:  $O(\log n)$
- **deleteMin()**:  $O(\log n)$
- **build( $e_0, \dots, e_{n-1}$ )**:  $O(n)$
- **M.merge(Q)**:  $\Theta(n)$

Adressen bzw. Feldindizes in array-basierten Binärheaps können nicht als Handles verwendet werden, da die Elemente bei den Operationen verschoben werden

⇒ ungeeignet als adressierbare PQs (kein remove bzw. decreaseKey)

# HeapSort

Verbesserung von SelectionSort:

- erst  $\text{build}(e_0, \dots, e_{n-1})$ :  $O(n)$
  - dann  $n \times \text{deleteMin}()$ :  
vertausche in jeder Runde erstes und letztes Heap-Element,  
dekrementiere Heap-Größe und führe  $\text{siftDown}(0)$  durch:  
 $O(n \log n)$
- ⇒ sortiertes Array entsteht von hinten,  
ansteigende Sortierung kann mit Max-Heap erzeugt werden
- in-place, aber nicht stabil
  - Gesamtlaufzeit:  $O(n \log n)$

# Übersicht

7

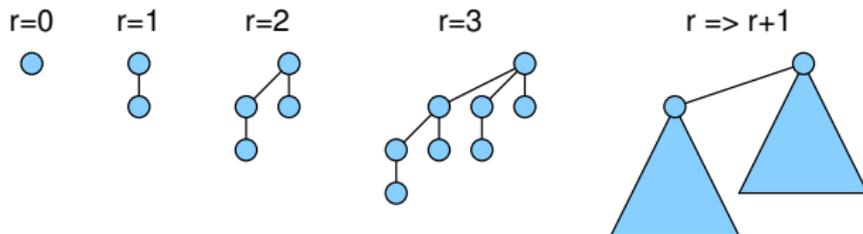
## Priority Queues

- Allgemeines
- Heaps
- **Binomial Heaps**

# Binomial Heaps

basieren auf **Binomial-Bäumen**

- Form-Invariante:



- Heap-Invariante:

$$\text{prio}(\text{Vater}) \leq \text{prio}(\text{Kind})$$

wichtig: Elemente der Priority Queue werden in Heap Items gespeichert, die eine feste Adresse im Speicher haben und damit als Handles dienen können (im Gegensatz zu array-basierten Binärheaps)

# Binomial-Bäume

## Beispiel

Korrekte Binomial-Bäume:

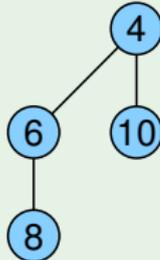
$r=0$



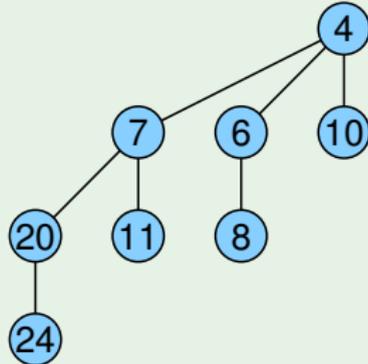
$r=1$



$r=2$

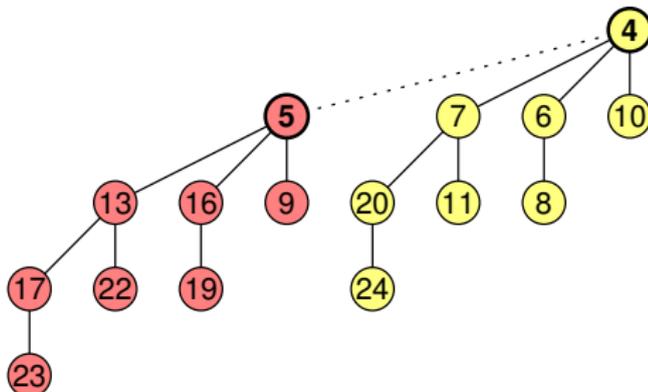


$r=3$

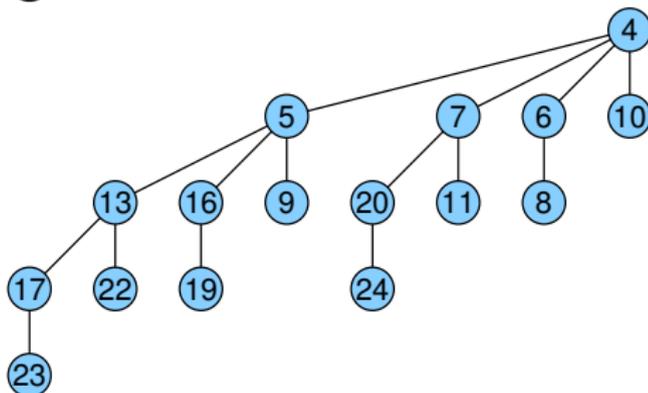


# Binomial-Baum: Merge

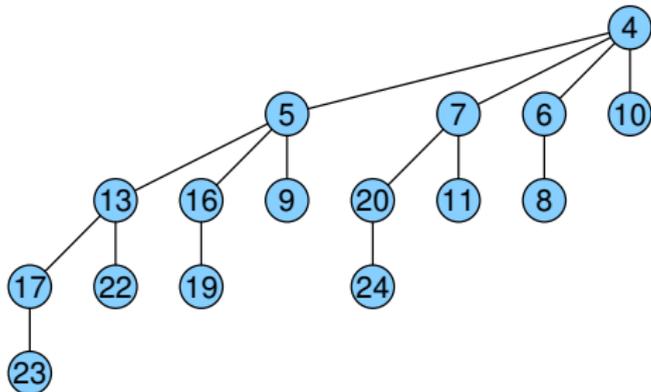
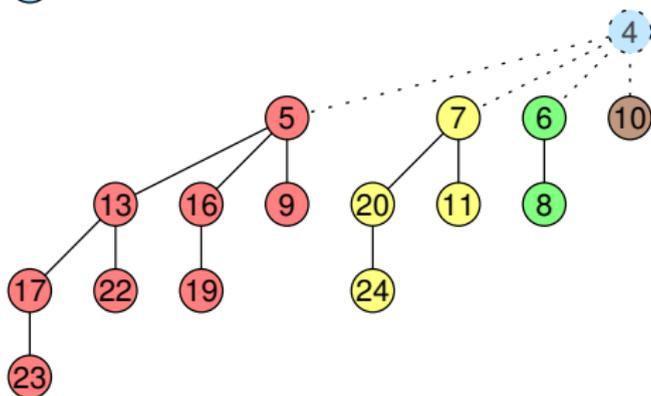
Wurzel mit größerem Wert  
wird neues Kind der Wurzel  
mit kleinerem Wert!  
(Heap-Bedingung)



aus zwei  $B_{r-1}$  wird ein  $B_r$



## Binomial-Baum: Löschen der Wurzel (deleteMin)

aus einem  $B_r$ werden  $B_{r-1}, \dots, B_0$ 

# Binomial-Baum: Knotenanzahl

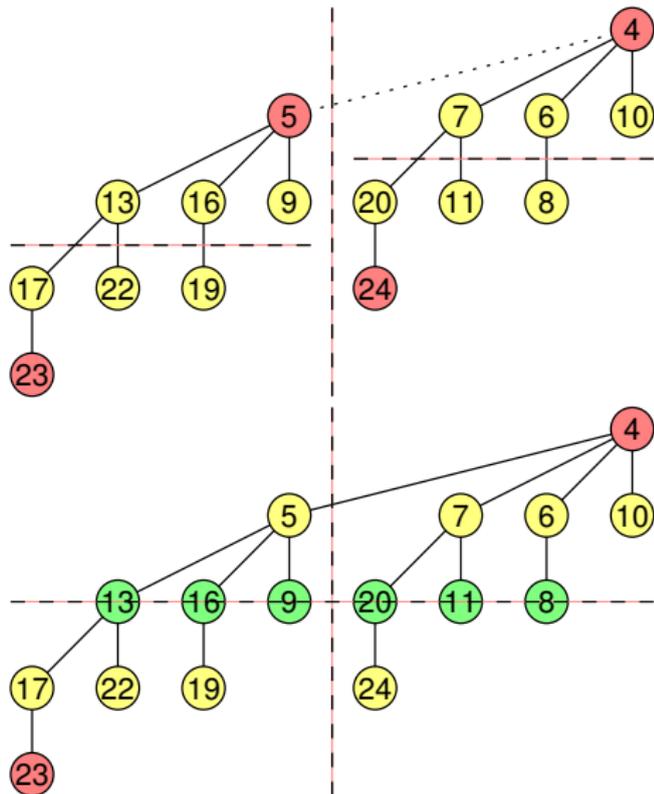
$B_r$  hat auf Level  $k \in \{0, \dots, r\}$   
genau  $\binom{r}{k}$  Knoten

Warum?

Bei Bau des  $B_r$  aus 2  $B_{r-1}$  gilt:

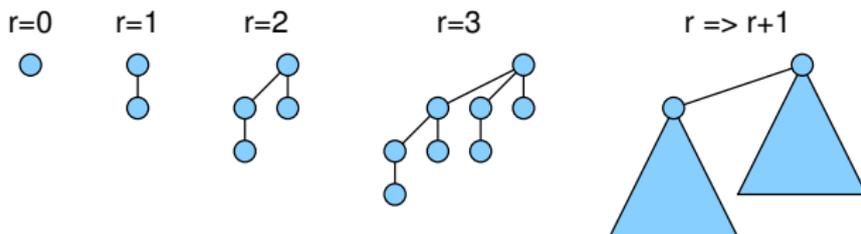
$$\binom{r}{k} = \binom{r-1}{k-1} + \binom{r-1}{k}$$

Insgesamt:  $B_r$  hat  $2^r$  Knoten



# Binomial-Bäume

Eigenschaften von Binomial-Bäumen:



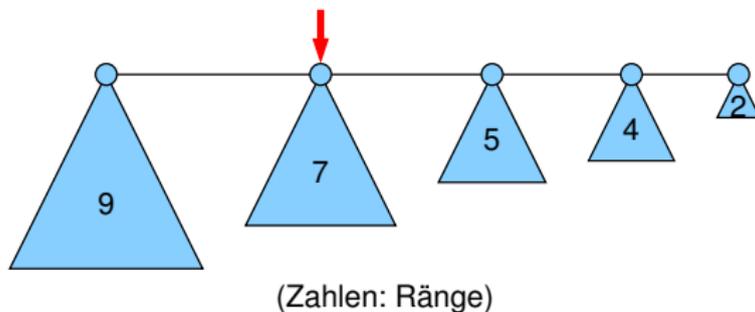
Binomial-Baum vom **Rang  $r$**

- hat Höhe  $r$  (gemessen in Kanten)
- hat maximalen Grad  $r$  (Wurzel)
- hat auf Level  $\ell \in \{0, \dots, r\}$  genau  $\binom{r}{\ell}$  Knoten
- hat  $\sum_{\ell=0}^r \binom{r}{\ell} = 2^r$  Knoten
- zerfällt bei Entfernen der Wurzel in  $r$  Binomial-Bäume von Rang 0 bis  $r - 1$

# Binomial Heap

Binomial Heap:

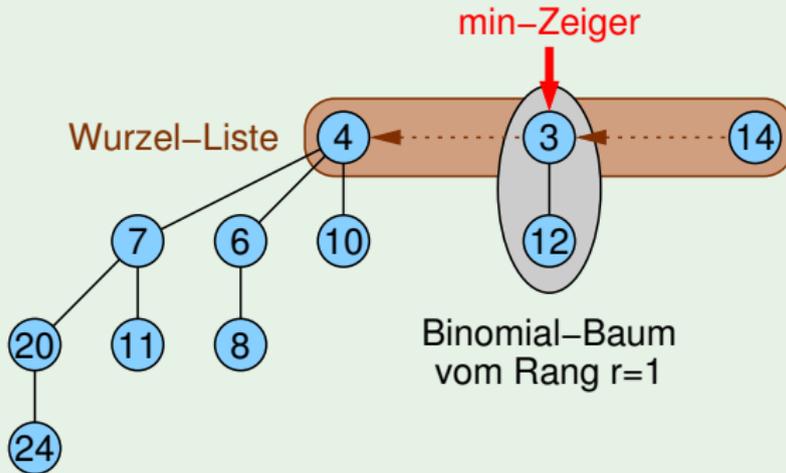
- verkettete Liste von Binomial-Bäumen
- pro Rang maximal 1 Binomial-Baum
- Zeiger auf Wurzel mit minimalem Prioritätswert



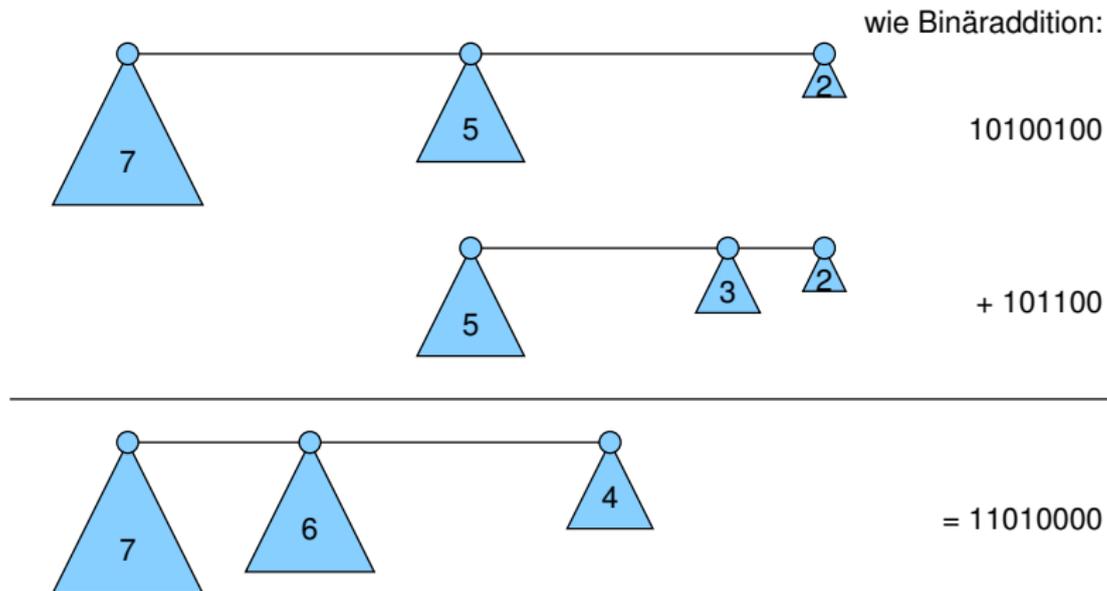
# Binomial Heap

## Beispiel

Korrektter Binomial Heap:



# Merge von zwei Binomial Heaps



Aufwand für Merge:  $O(\log n)$

# Binomial Heaps

$B_i$ : Binomial-Baum mit Rang  $i$

Operationen:

- **merge**:  $O(\log n)$
- **insert**( $e$ ): Merge mit  $B_0$ , Zeit  $O(\log n)$
- **min**(): spezieller Zeiger, Zeit  $O(1)$
- **deleteMin**():  
sei das Minimum in  $B_i$ ,  
durch Löschen der Wurzel zerfällt der Binomialbaum in  
 $B_0, \dots, B_{i-1}$   
Merge mit dem restlichen Binomial Heap kostet  $O(\log n)$

# Binomial Heaps

Weitere Operationen:

- **decreaseKey**( $h, k$ ): siftUp-Operation in Binomial-Baum für das Element, auf das  $h$  zeigt, dann ggf. noch min-Zeiger aktualisieren  
Zeit:  $O(\log n)$
- **remove**( $h$ ): Sei  $e$  das Element, auf das  $h$  zeigt. Setze  $\text{prio}(e) = -\infty$  und wende siftUp-Operation auf  $e$  an bis  $e$  in der Wurzel, dann weiter wie bei deleteMin  
Zeit:  $O(\log n)$

# Verbesserungen

- Fibonacci-Heap:

Verbesserung von Binomial Heaps mit folgenden Kosten:

- ▶ min, insert, merge:  $O(1)$  (worst case)
- ▶ decreaseKey:  $O(1)$  (amortisiert)
- ▶ deleteMin, remove:  $O(\log n)$  (amortisiert)

- ganzzahlige Werte:

Priority Queues bekannt, die für decreaseKey und insert Zeit  $O(1)$  und für deleteMin Zeit  $O(\log \log n)$  benötigen

# Übersicht

8

## Suchstrukturen

- Allgemeines
- Binäre Suchbäume
- AVL-Bäume
- $(a, b)$ -Bäume

# Übersicht

8

## Suchstrukturen

- **Allgemeines**
- Binäre Suchbäume
- AVL-Bäume
- $(a, b)$ -Bäume

# Vergleich Wörterbuch / Suchstruktur

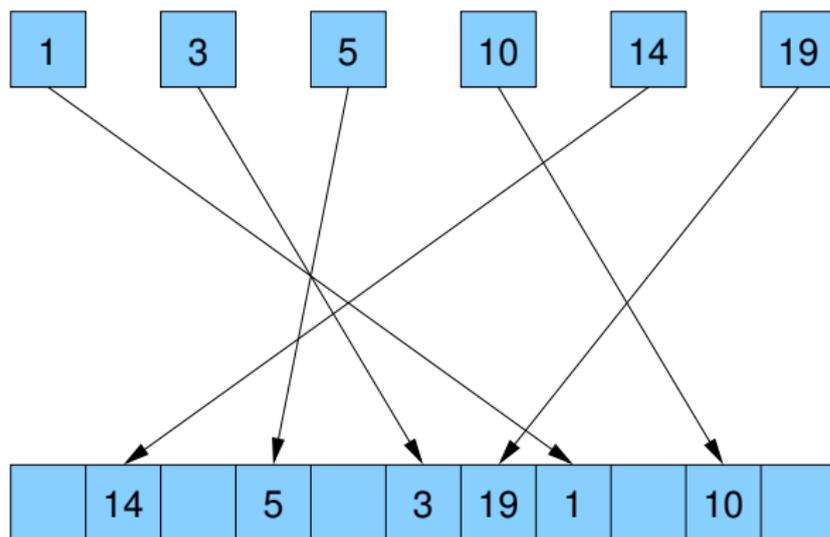
- **S**: Menge von Elementen
- Element  $e$  wird identifiziert über eindeutigen Schlüssel  $\text{key}(e)$

Operationen:

- **S.insert**(Elem  $e$ ):  $S = S \cup \{e\}$
- **S.remove**(Key  $k$ ):  $S = S \setminus \{e\}$ ,  
wobei  $e$  das Element mit  $\text{key}(e) == k$  ist
- **S.find**(Key  $k$ ): (Wörterbuch)  
gibt das Element  $e \in S$  mit  $\text{key}(e) == k$  zurück, falls es existiert,  
sonst null
- **S.locate**(Key  $k$ ): (Suchstruktur)  
gibt das Element  $e \in S$  mit minimalem Schlüssel  $\text{key}(e)$  zurück,  
für das  $\text{key}(e) \geq k$

# Vergleich Wörterbuch / Suchstruktur

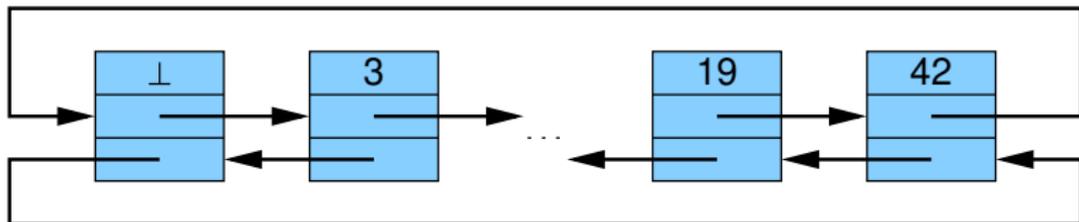
- Wörterbuch effizient über Hashing realisierbar



- Hashing **zerstört die Ordnung** auf den Elementen
- ⇒ keine effiziente locate-Operation
- ⇒ keine Intervallanfragen

# Suchstruktur

Erster Ansatz: **sortierte** Liste



Problem:

- insert, remove, locate kosten im worst case  $\Theta(n)$  Zeit

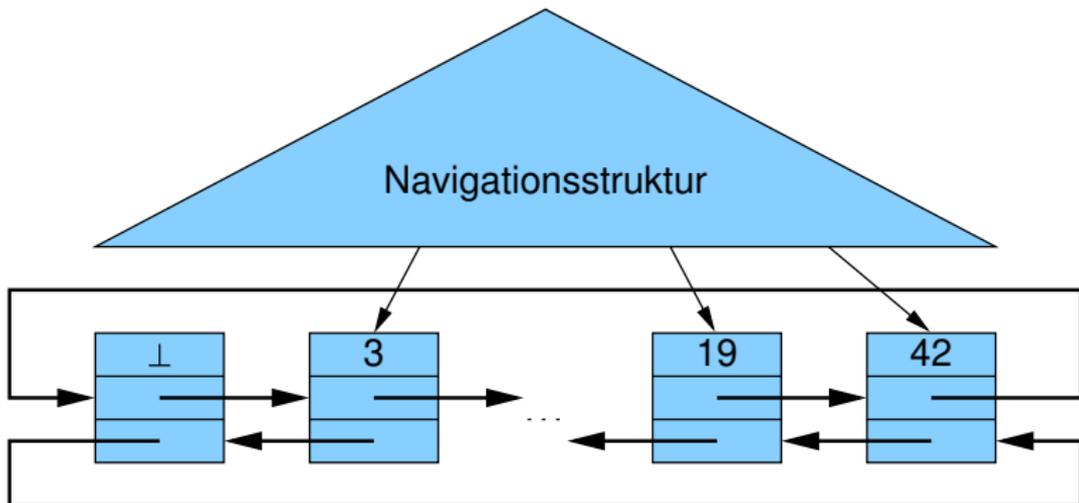
Einsicht:

- wenn locate effizient implementierbar, dann auch die anderen Operationen

# Suchstruktur

Idee:

- füge Navigationsstruktur hinzu, die locate effizient macht



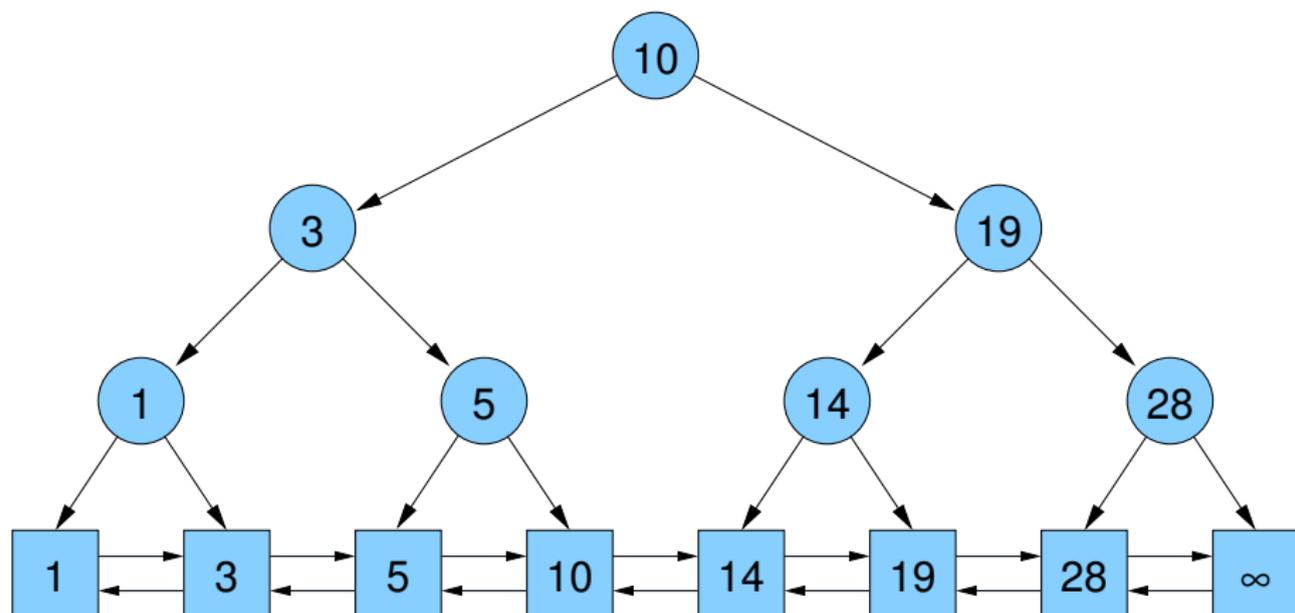
# Übersicht

8

## Suchstrukturen

- Allgemeines
- **Binäre Suchbäume**
- AVL-Bäume
- $(a, b)$ -Bäume

# Binärer Suchbaum (ideal)

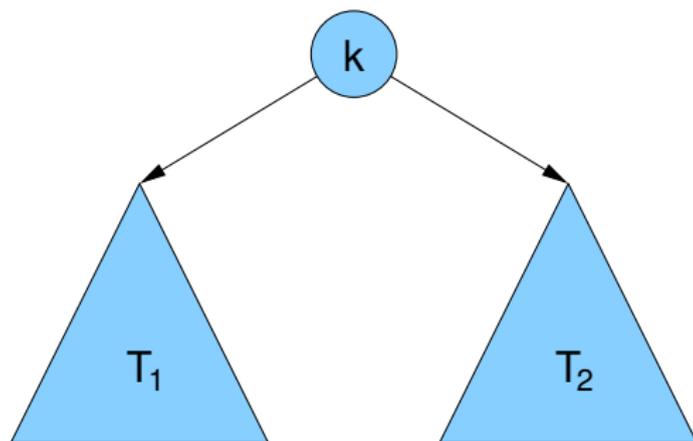


# Binärer Suchbaum

Suchbaum-Regel:

Für alle Schlüssel  
 $k_1$  in  $T_1$  und  $k_2$  in  $T_2$ :

$$k_1 \leq k < k_2$$



locate-Strategie:

- Starte in Wurzel des Suchbaums
- Für jeden erreichten Knoten  $v$ :

Falls  $\text{key}(v) \geq k_{\text{gesucht}}$ , gehe zum linken Kind von  $v$ ,  
sonst gehe zum rechten Kind

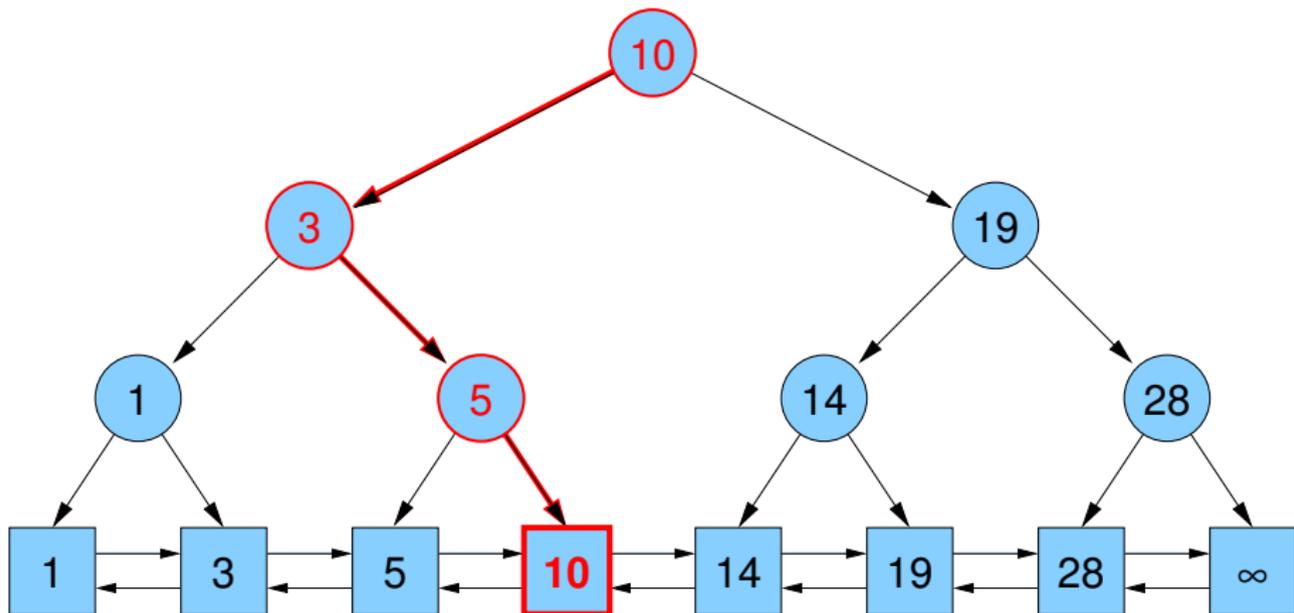
# Binärer Suchbaum

Formal: für einen Baumknoten  $v$  sei

- $\text{key}(v)$  der Schlüssel von  $v$
- $d(v)$  der Ausgangsgrad (Anzahl Kinder) von  $v$
  
- **Suchbaum**-Invariante:  $k_1 \leq k < k_2$   
(Sortierung der linken und rechten Nachfahren)
  
- **Grad**-Invariante:  $d(v) \leq 2$   
(alle Baumknoten haben höchstens 2 Kinder)
  
- **Schlüssel**-Invariante:  
(Für jedes Element  $e$  in der Liste gibt es *genau einen* Baumknoten  $v$  mit  $\text{key}(v) == \text{key}(e)$ )

# Binärer Suchbaum / locate

locate(9)

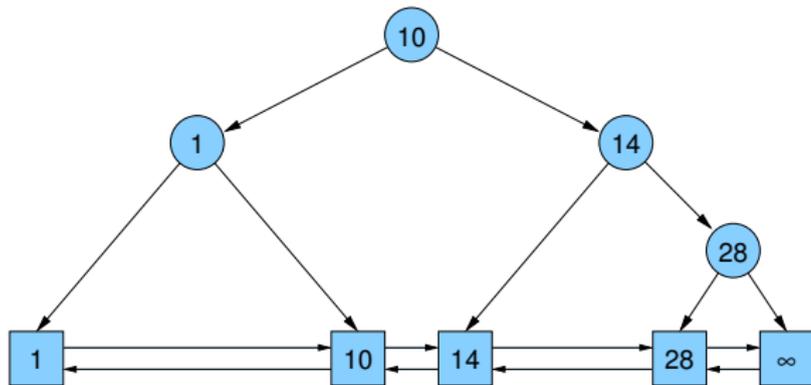


# Binärer Suchbaum / insert, remove

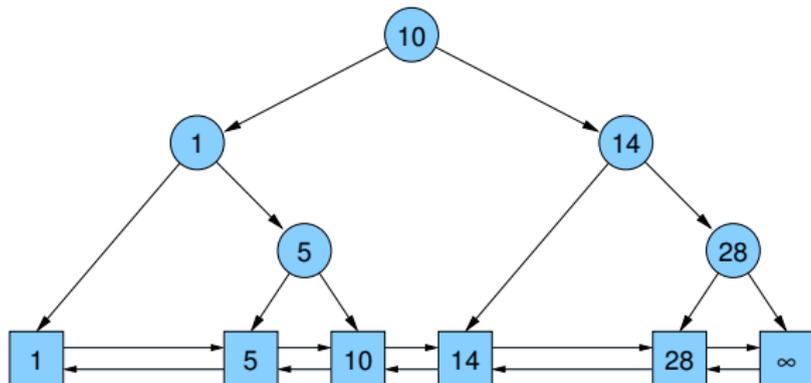
## Strategie:

- **insert**( $e$ ):
  - ▶ erst wie `locate(key(e))` bis Element  $e'$  in Liste erreicht
  - ▶ falls  $\text{key}(e') > \text{key}(e)$ :  
füge  $e$  vor  $e'$  ein, sowie ein neues Suchbaumblatt für  $e$  und  $e'$  mit  $\text{key}(e)$  als Splitter Key, so dass Suchbaum-Regel erfüllt
- **remove**( $k$ ):
  - ▶ erst wie `locate(k)` bis Element  $e$  in Liste erreicht
  - ▶ falls  $\text{key}(e) = k$ , lösche  $e$  aus Liste und Vater  $v$  von  $e$  aus Suchbaum und
  - ▶ setze in dem Baumknoten  $w$  mit  $\text{key}(w) = k$  den neuen Wert  $\text{key}(w) = \text{key}(v)$

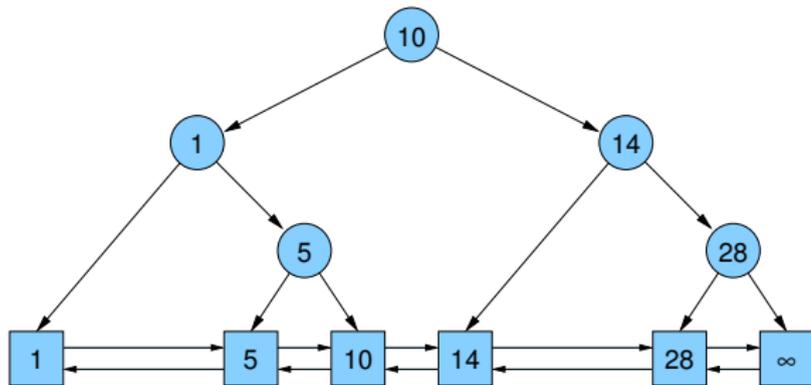
## Binärer Suchbaum / insert, remove



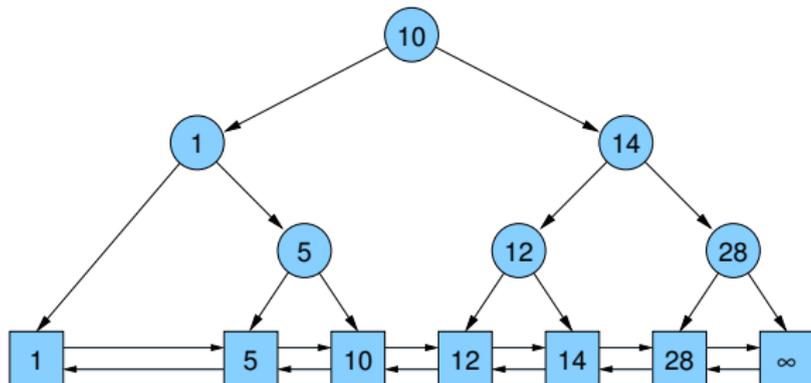
insert(5)



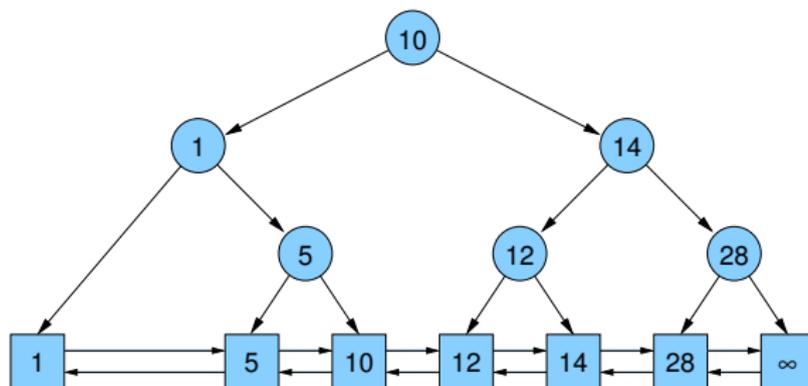
## Binärer Suchbaum / insert, remove



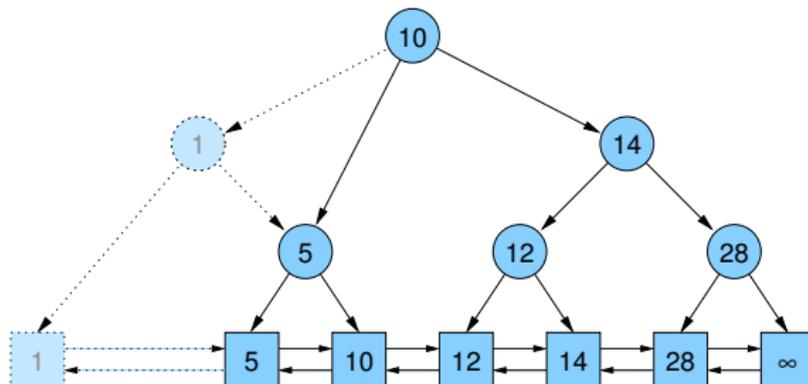
insert(12)



## Binärer Suchbaum / insert, remove



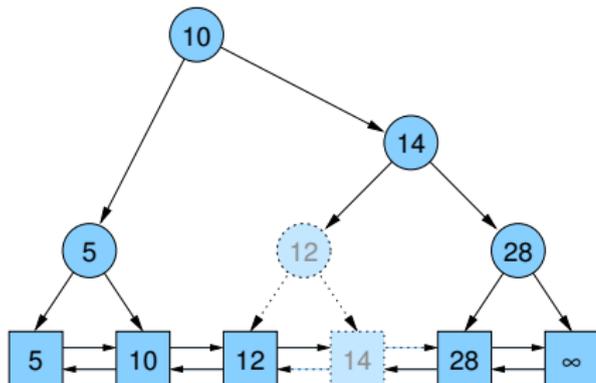
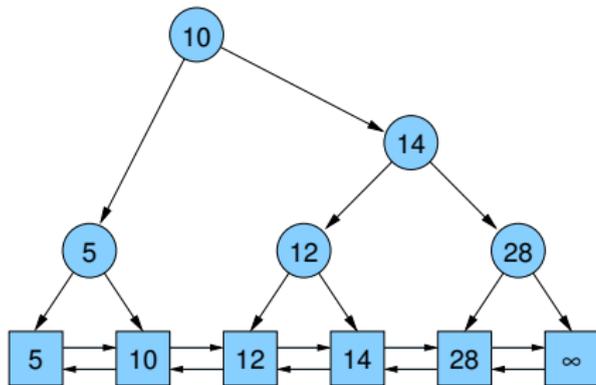
remove(1)



## Binärer Suchbaum / insert, remove

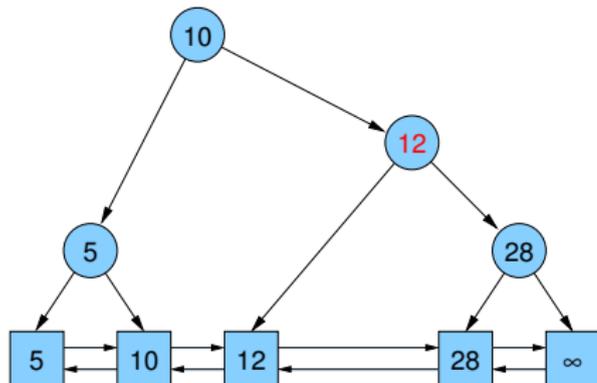
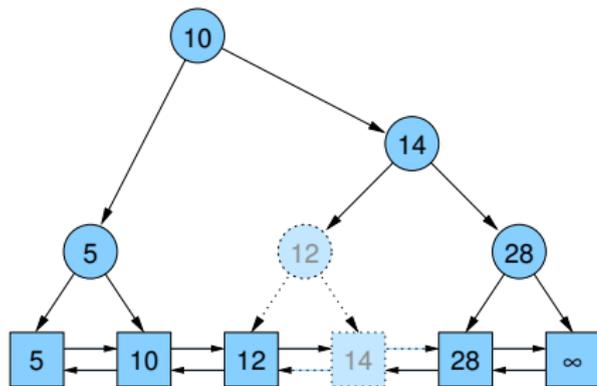
remove(14)

1



## Binärer Suchbaum / insert, remove

remove(14)

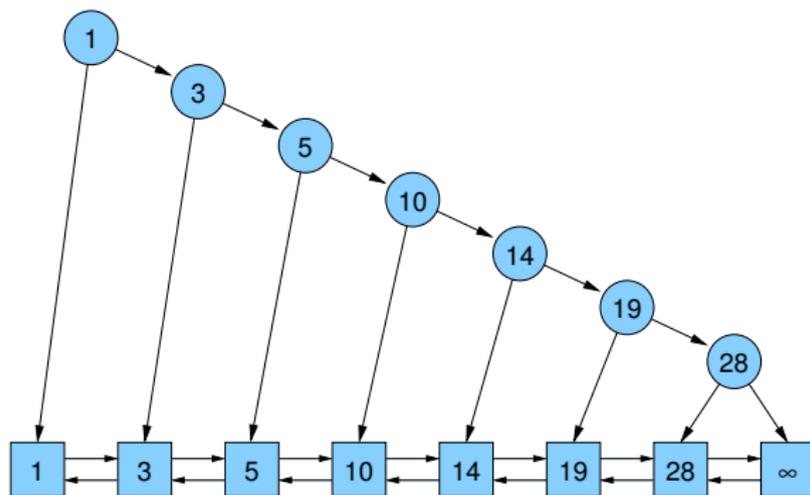


# Binärer Suchbaum / worst case

Problem:

- Baumstruktur kann zur **Liste** entarten
  - Höhe des Baums kann linear in der Anzahl der Elemente werden
- ⇒ **locate** kann im worst case Zeitaufwand  $\Theta(n)$  verursachen

Beispiel: Zahlen werden in sortierter Reihenfolge eingefügt



# Übersicht

8

## Suchstrukturen

- Allgemeines
- Binäre Suchbäume
- **AVL-Bäume**
- $(a, b)$ -Bäume

# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

Strategie zur Lösung des Problems:

- Balancierung des Baums

G. M. **Adelson-Velsky** & E. M. **Landis** (1962):

- Beschränkung der Höhenunterschiede für Teilbäume auf  $[-1, 0, +1]$
- ⇒ führt nicht unbedingt zu einem idealen unvollständigen Binärbaum (wie wir ihn von array-basierten Heaps kennen), aber zu einem hinreichenden Gleichgewicht

# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

### Worst Case: Fibonacci-Baum

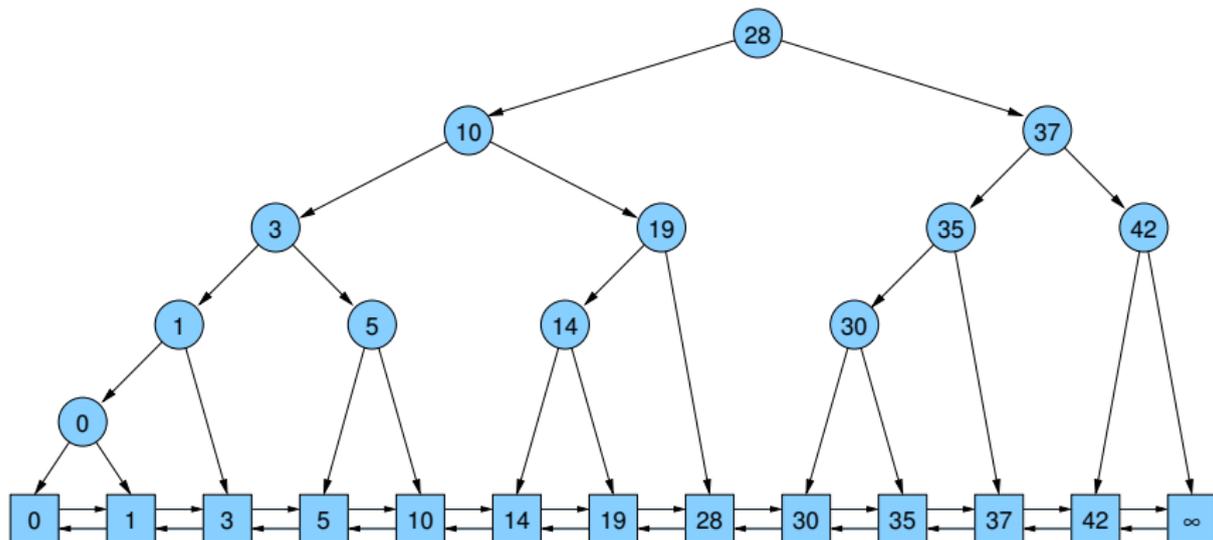
- Laufzeit der Operation hängt von der Baumhöhe ab
  - Was ist die schlimmste Höhe bei gegebener Anzahl von Elementen?
  - bzw: Wieviel Elemente hat ein Baum bei gegebener Höhe  $h$  mindestens?
- ⇒ Für mindestens ein Kind hat der Unterbaum Höhe  $h - 1$ .  
Im worst case hat das andere Kind Höhe  $h - 2$  (kleiner geht nicht wegen Höhendifferenzbeschränkung)
- ⇒ Anzahl der (inneren) Knoten entspricht den Fibonacci-Zahlen:

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$$

# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

Worst Case: Fibonacci-Baum



# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

### Worst Case: Fibonacci-Baum

- Fibonacci-Baum der Stufe 0 ist der leere Baum
- Fibonacci-Baum der Stufe 1 ist ein einzelner Knoten
- Fibonacci-Baum der Stufe  $h + 1$  besteht aus einer Wurzel, deren Kinder Fibonacci-Bäume der Stufen  $h$  und  $h - 1$  sind

Explizite Formel:

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[ \left( \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^n - \left( \frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^n \right]$$

⇒ Die Anzahl der Elemente ist exponentiell in der Höhe bzw. die Höhe ist logarithmisch in der Anzahl der Elemente.

# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

Operationen auf einem AVL-Baum:

- insert und remove können zunächst zu Binärbäumen führen, die die Balance-Bedingung für die Höhendifferenz der Teilbäume verletzen
- ⇒ Teilbäume müssen umgeordnet werden, um das Kriterium für AVL-Bäume wieder zu erfüllen (Rebalancierung / Rotation)
- Dazu wird an jedem Knoten die Höhendifferenz der beiden Unterbäume vermerkt ( $-1, 0, +1$ , mit 2 Bit / Knoten)

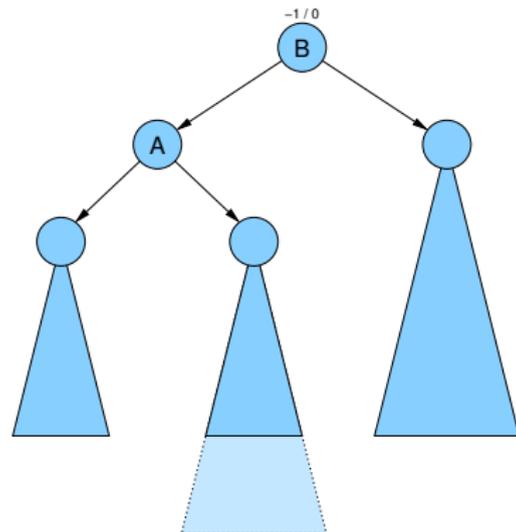
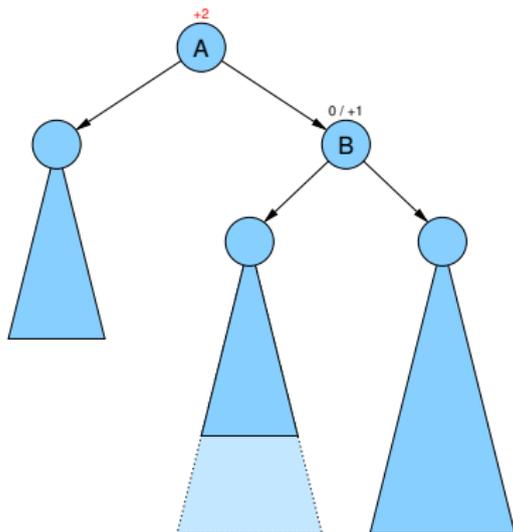
(Hausaufgabe ...)

- Operationen locate, insert und remove haben Laufzeit  $O(\log n)$

# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

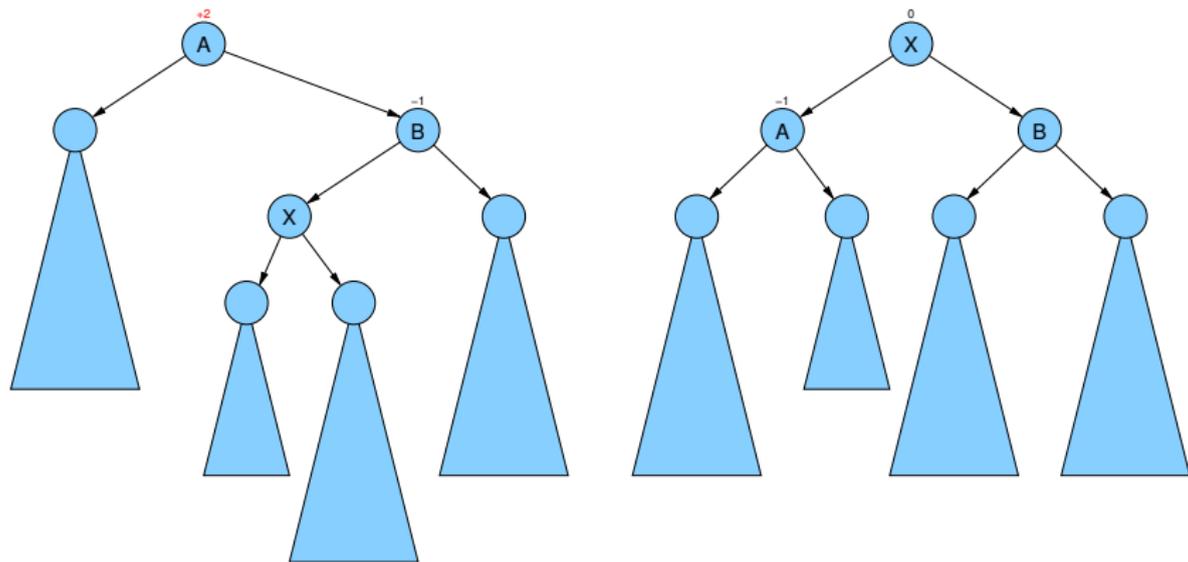
### Einfachrotation:



# AVL-Bäume

## Balancierte binäre Suchbäume

### Doppelrotation:



# Übersicht

8

## Suchstrukturen

- Allgemeines
- Binäre Suchbäume
- AVL-Bäume
- $(a, b)$ -Bäume

## $(a, b)$ -Baum

Problem: Baumstruktur kann zur **Liste** entarten

Lösung:  $(a, b)$ -Baum

Idee:

- $d(v)$ : Ausgangsgrad (Anzahl Kinder) von Knoten  $v$
- $t(v)$ : Tiefe (in Kanten) von Knoten  $v$
- Form-Invariante:  
alle **Blätter in derselben Tiefe**:  $t(v) = t(w)$  für Blätter  $v, w$
- Grad-Invariante:  
Für alle internen Knoten  $v$  (außer Wurzel) gilt:

$$a \leq d(v) \leq b \quad (\text{wobei } a \geq 2 \text{ und } b \geq 2a - 1)$$

Für Wurzel  $r$ :  $2 \leq d(r) \leq b$  (außer wenn nur 1 Blatt im Baum)

# (a, b)-Baum

## Lemma

Ein (a, b)-Baum für n Elemente hat Tiefe  $\leq 1 + \left\lfloor \log_a \frac{n+1}{2} \right\rfloor$ .

## Beweis.

- Baum hat  $n + 1$  Blätter (+1 wegen  $\infty$ -Dummy)
- Für  $n = 0$  gilt die Ungleichung (1 Dummy-Blatt, Höhe 1)
- sonst hat Wurzel Grad  $\geq 2$ ,  
die anderen inneren Knoten haben Grad  $\geq a$

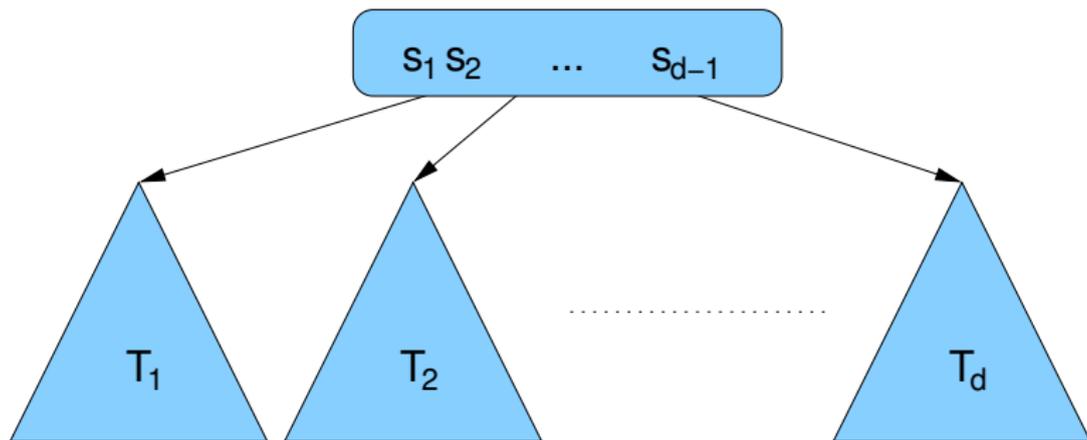
⇒ Bei Tiefe  $t$  gibt es  $\geq 2a^{t-1}$  Blätter

- $n + 1 \geq 2a^{t-1} \Leftrightarrow t \leq 1 + \left\lfloor \log_a \frac{n+1}{2} \right\rfloor$



## (a, b)-Baum: Split-Schlüssel

- Jeder Knoten  $v$  enthält ein sortiertes Array von  $d(v) - 1$  Split-Schlüsseln  $s_1, \dots, s_{d(v)-1}$

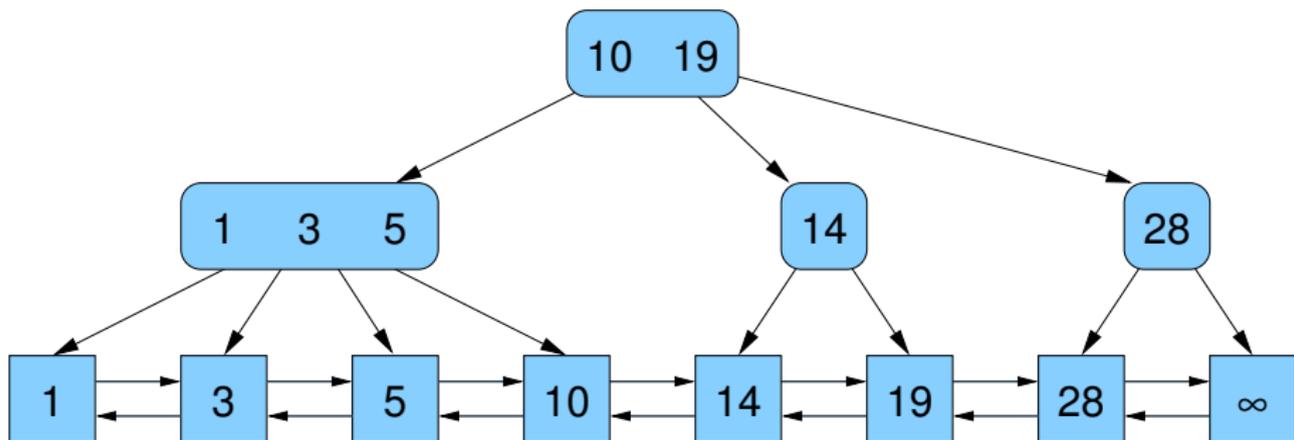


- (a, b)-Suchbaum-Regel:  
Für alle Schlüssel  $k$  in  $T_i$  und  $k'$  in  $T_{i+1}$  gilt:  
 $k \leq s_i < k'$  bzw.  $s_{i-1} < k \leq s_i$

$$(s_0 = -\infty, s_d = \infty)$$

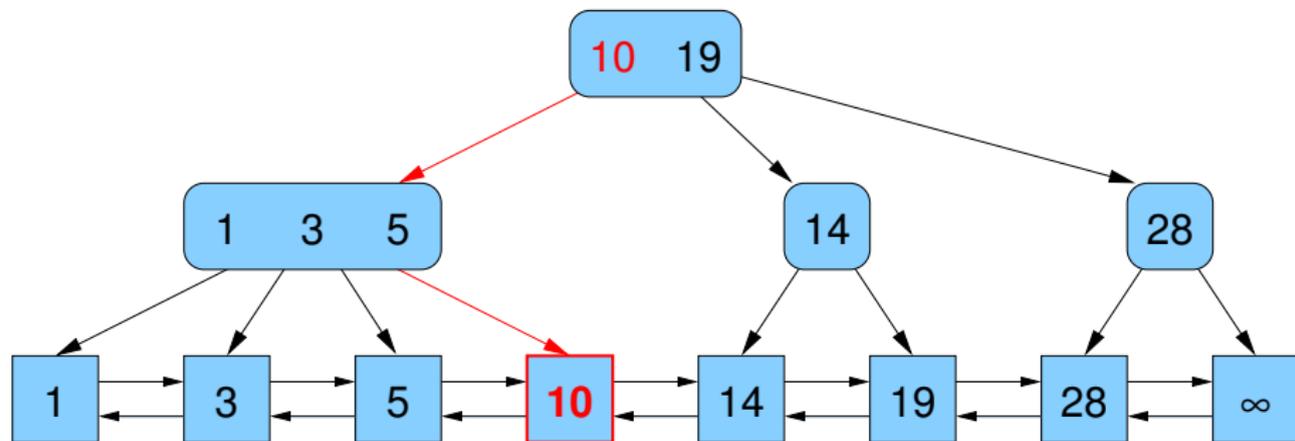
# (a, b)-Baum

Beispiel:



# (a, b)-Baum

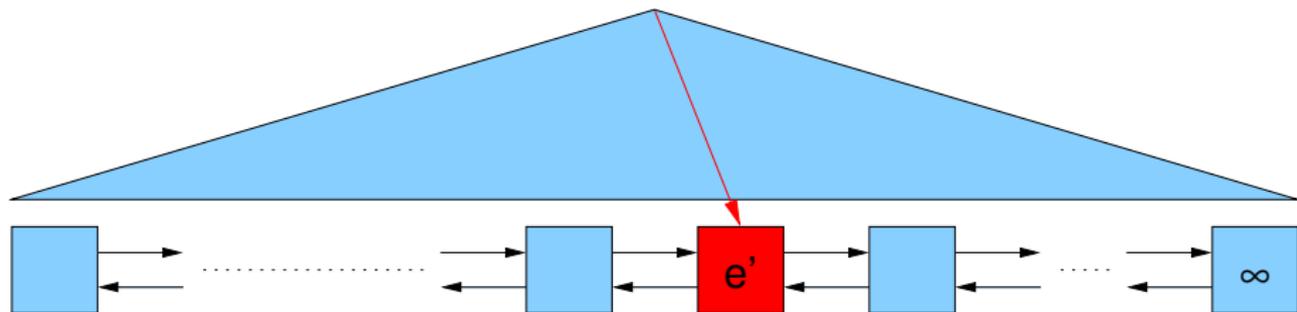
locate(9)



# (a, b)-Baum

insert( $e$ )

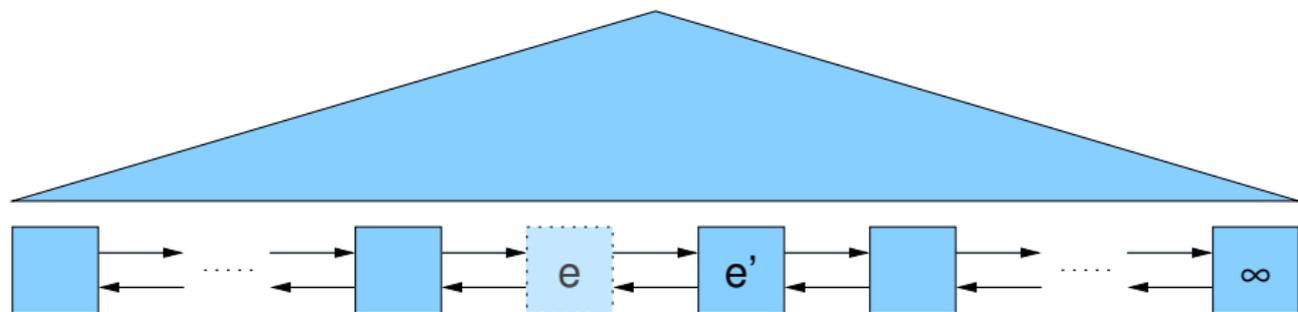
- Abstieg wie bei **locate**(key( $e$ )) bis Element  $e'$  in Liste erreicht
- falls  $\text{key}(e') > \text{key}(e)$ , füge  $e$  vor  $e'$  ein



# (a, b)-Baum

insert( $e$ )

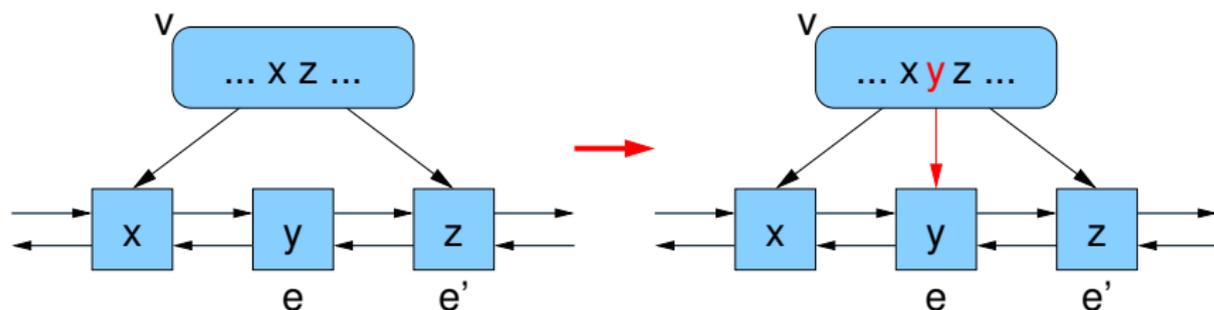
- Abstieg wie bei locate(key( $e$ )) bis Element  $e'$  in Liste erreicht
- falls  $\text{key}(e') > \text{key}(e)$ , füge  $e$  vor  $e'$  ein



# (a, b)-Baum

insert(*e*)

- füge  $\text{key}(e)$  und Handle auf *e* in Baumknoten *v* über *e* ein
- falls  $d(v) \leq b$ , dann fertig

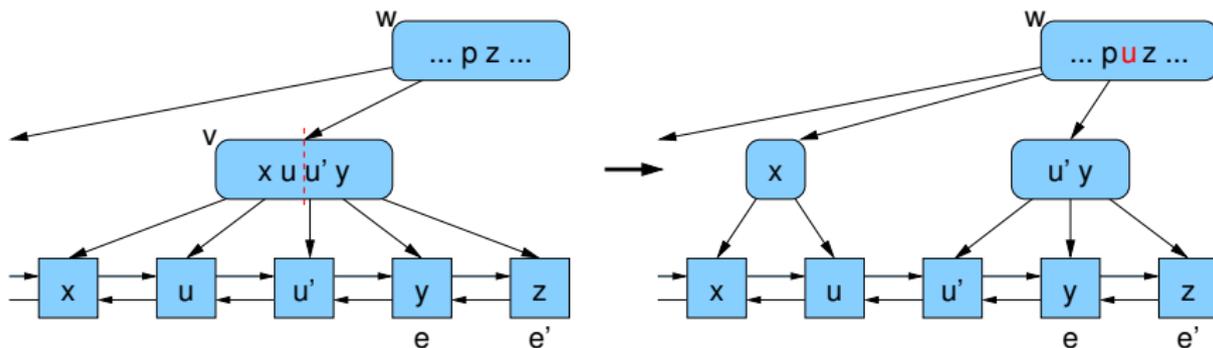


# (a, b)-Baum

insert( $e$ )

- füge  $\text{key}(e)$  und Handle auf  $e$  in Baumknoten  $v$  über  $e$  ein
- falls  $d(v) > b$ , dann teile  $v$  in zwei Knoten auf und
- verschiebe den Splitter (größter Key im linken Teil) in den Vaterknoten

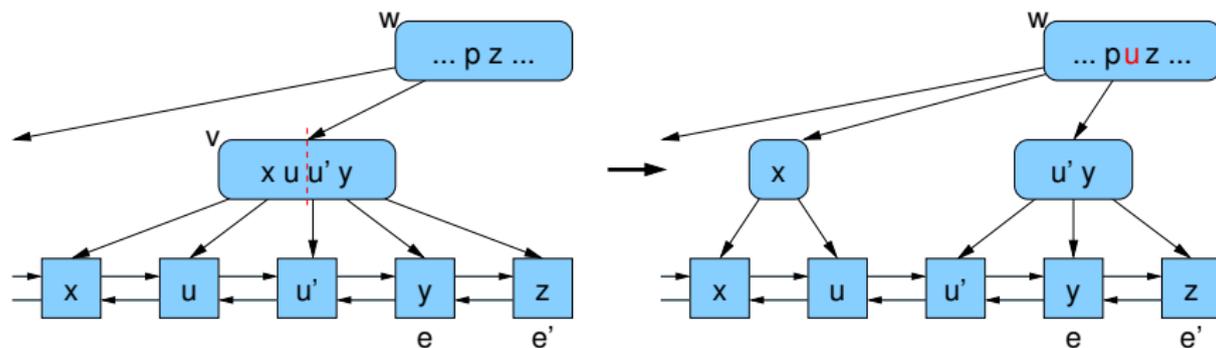
Beispiel: (2, 4)-Baum



# (a, b)-Baum

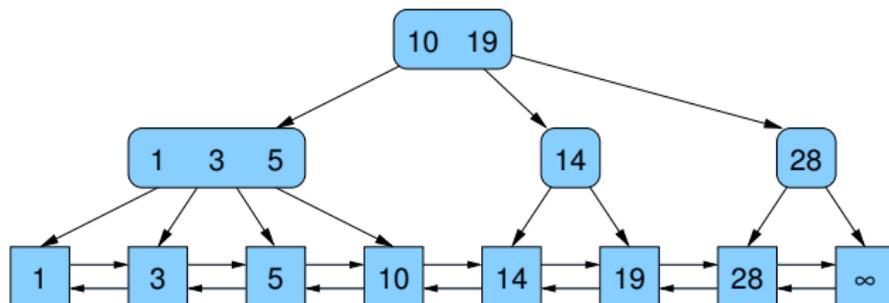
insert(*e*)

- falls  $d(w) > b$ , dann teile *w* in zwei Knoten auf usw.  
bis  $\text{Grad} \leq b$   
oder Wurzel aufgeteilt wurde



$(a, b)$ -Baum / insert $a = 2, b = 4$ 

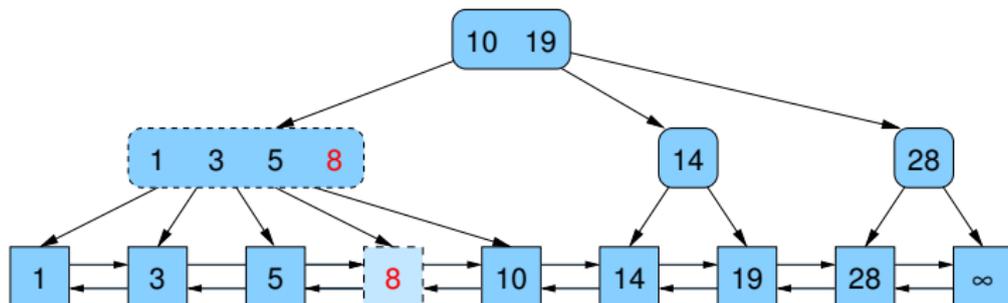
insert(8)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

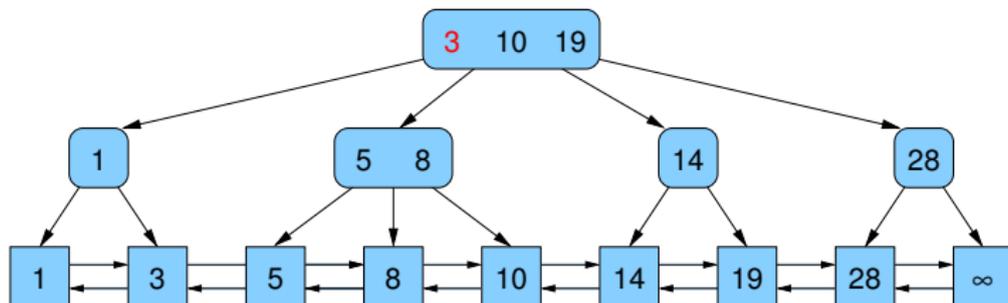
insert(8)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

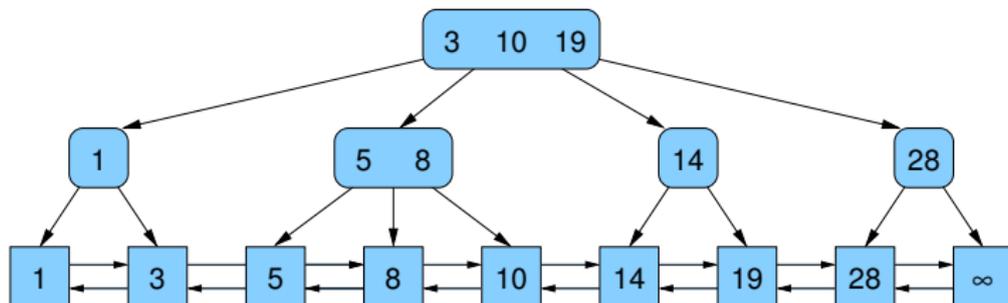
insert(8)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

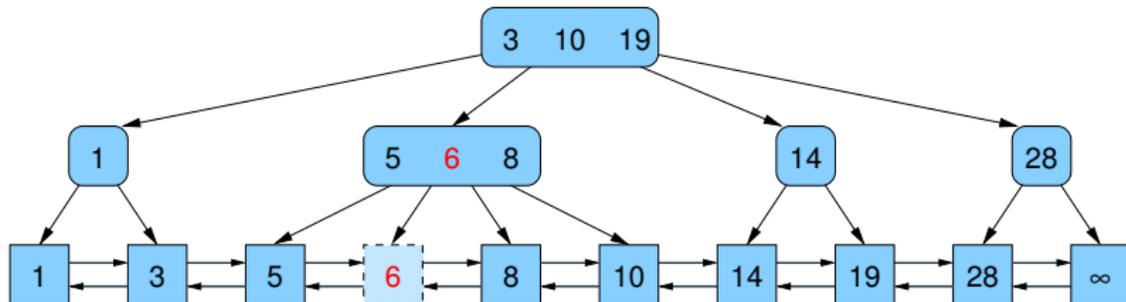
insert(6)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

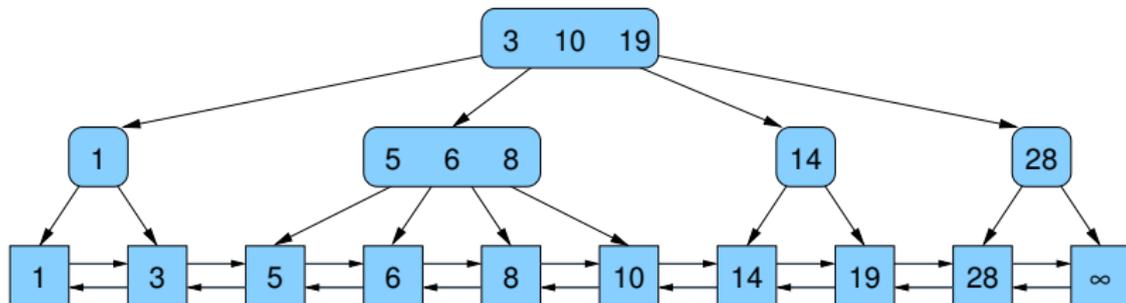
insert(6)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

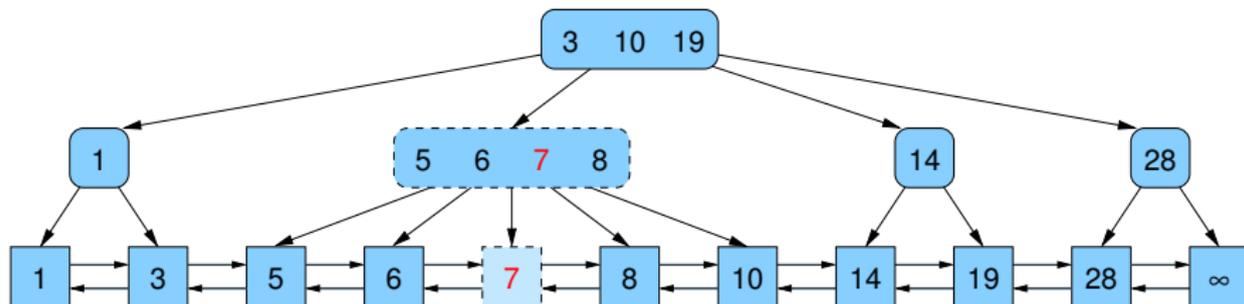
insert(7)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

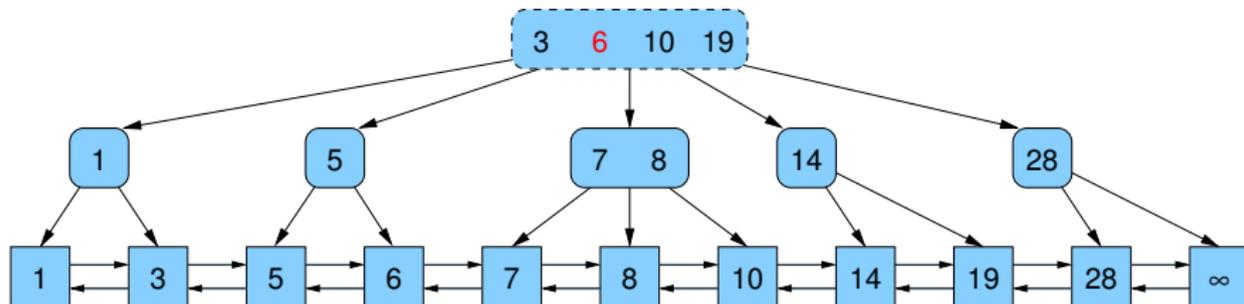
insert(7)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

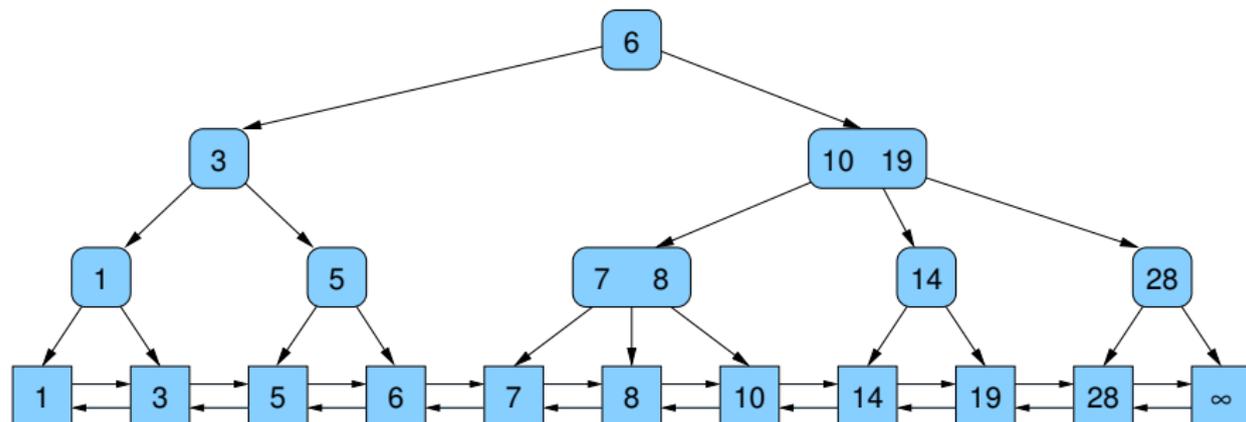
insert(7)



# (a, b)-Baum / insert

$a = 2, b = 4$

insert(7)



# (a, b)-Baum / insert

## Form-Invariante

- alle Blätter haben dieselbe Tiefe, denn neues Blatt wird auf der Ebene der anderen eingefügt und im Fall einer neuen Wurzel erhöht sich die Tiefe aller Blätter um 1

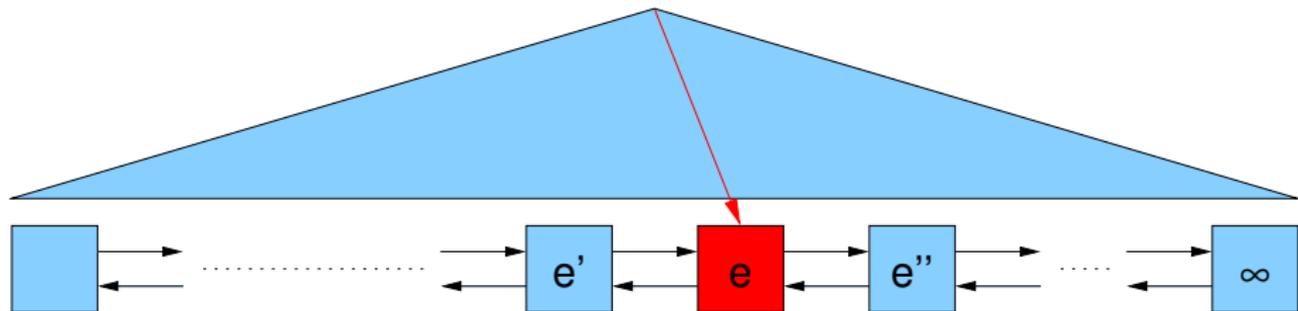
## Grad-Invariante

- insert splittet Knoten mit Grad  $b + 1$  in zwei Knoten mit Grad  $\lfloor (b + 1)/2 \rfloor$  und  $\lceil (b + 1)/2 \rceil$
- wenn  $b \geq 2a - 1$ , dann sind beide Werte  $\geq a$
- wenn Wurzel Grad  $b + 1$  erreicht und gespalten wird, wird neue Wurzel mit Grad 2 erzeugt

# (a, b)-Baum

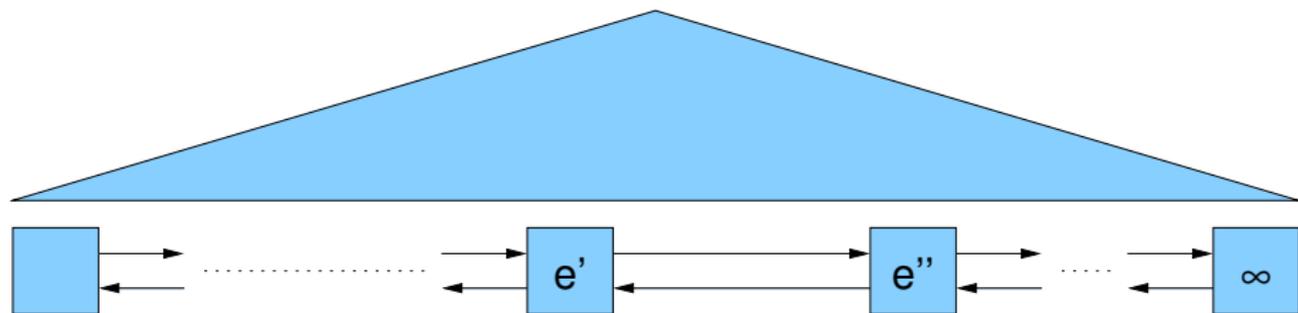
remove( $k$ )

- Abstieg wie bei **locate**( $k$ ) bis Element  $e$  in Liste erreicht
- falls  $\text{key}(e) = k$ , entferne  $e$  aus Liste (sonst return)



$(a, b)$ -Baumremove( $k$ )

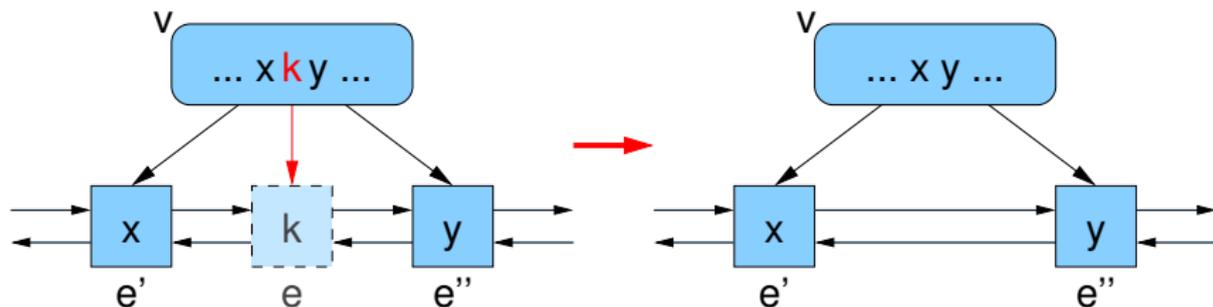
- Abstieg wie bei locate( $k$ ) bis Element  $e$  in Liste erreicht
- falls  $\text{key}(e) = k$ , **entferne  $e$**  aus Liste (sonst return)



# (a, b)-Baum

remove( $k$ )

- entferne Handle auf  $e$  und Schlüssel  $k$  vom Baumknoten  $v$  über  $e$  (wenn  $e$  rechtestes Kind: Schlüsselvertauschung wie bei binärem Suchbaum)
- falls  $d(v) \geq a$ , dann fertig

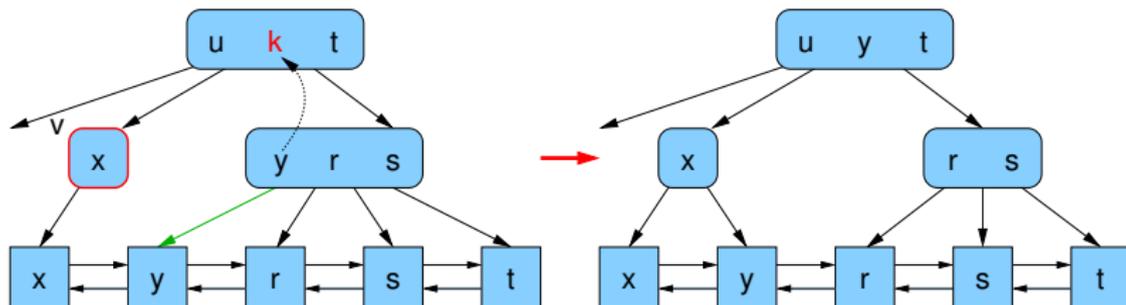


# (a, b)-Baum

remove(k)

- falls  $d(v) < a$  und ein direkter Nachbar  $v'$  von  $v$  hat Grad  $> a$ ,  
nimm Kante von  $v'$

Beispiel: (2, 4)-Baum

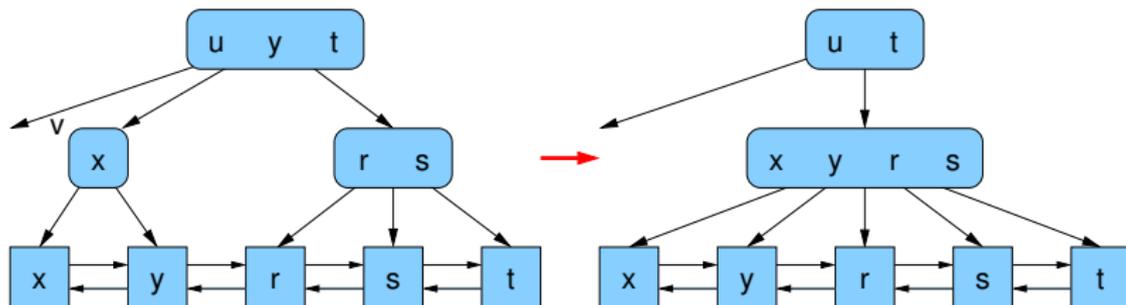


# (a, b)-Baum

remove(k)

- falls  $d(v) < a$  und kein direkter Nachbar von  $v$  hat Grad  $> a$ ,  
merge  $v$  mit Nachbarn

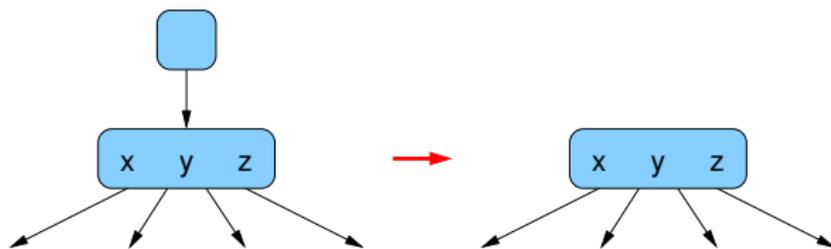
Beispiel: (3, 5)-Baum



# (a, b)-Baum

remove(k)

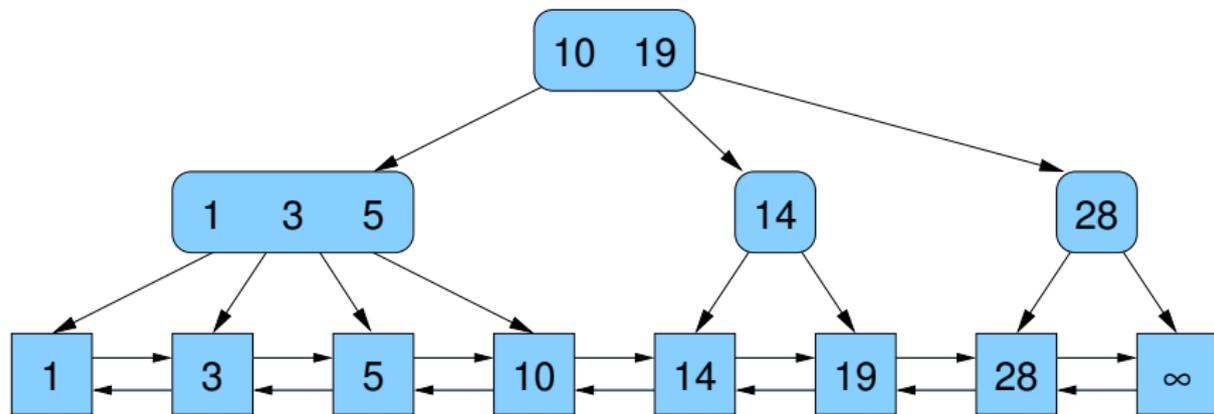
- Verschmelzungen können sich nach oben fortsetzen, ggf. bis zur Wurzel
- falls Grad der Wurzel < 2: entferne Wurzel  
neue Wurzel wird das einzige Kind der alten Wurzel



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

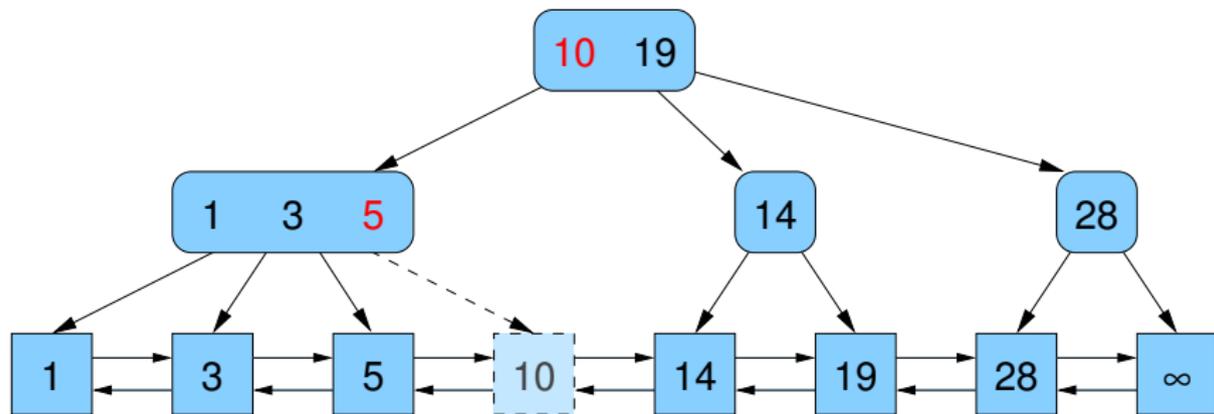
remove(10)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

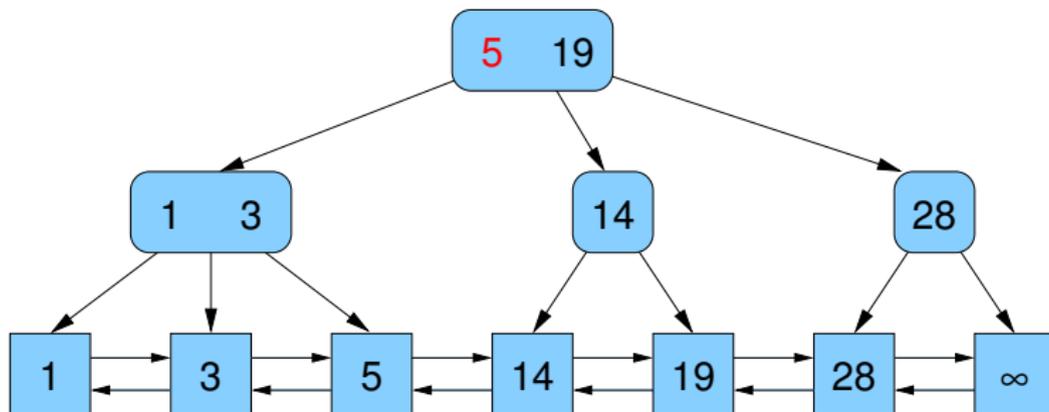
remove(10)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

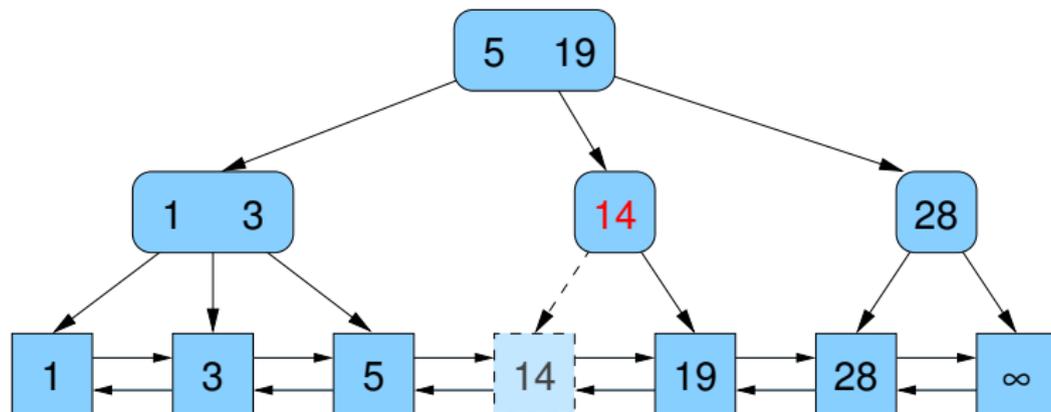
remove(10)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

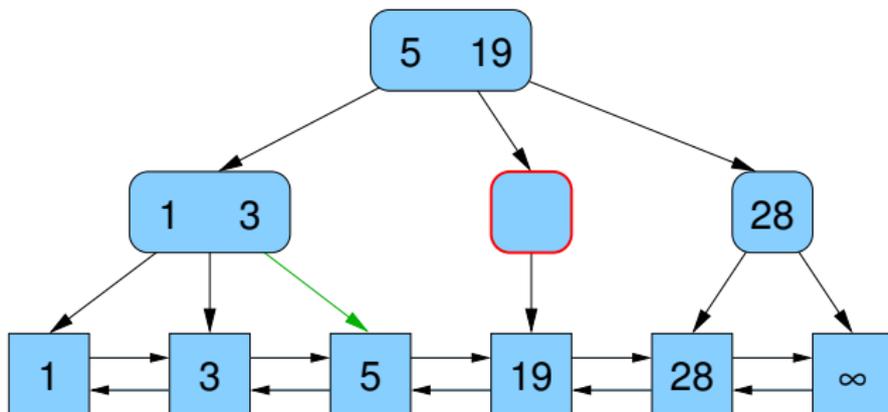
remove(14)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

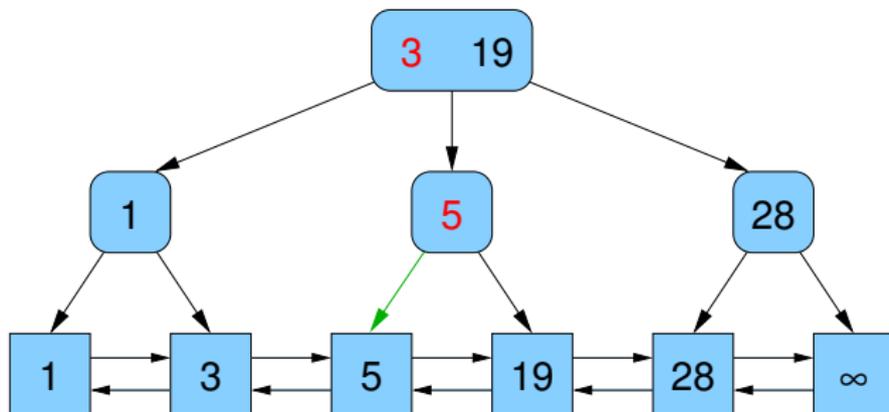
remove(14)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

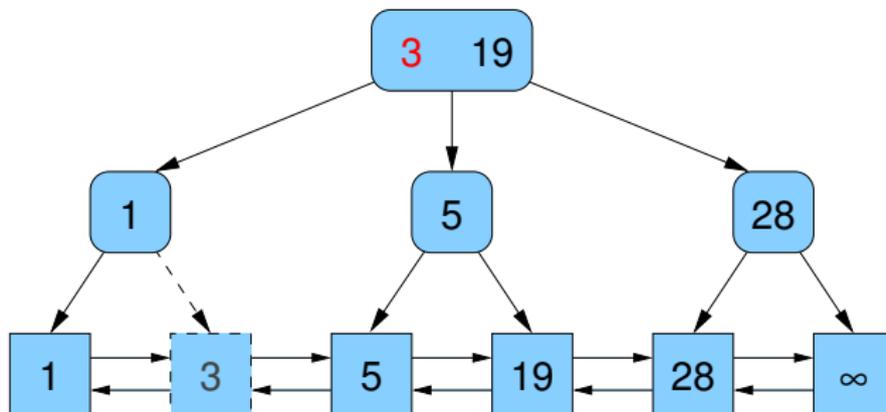
remove(14)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

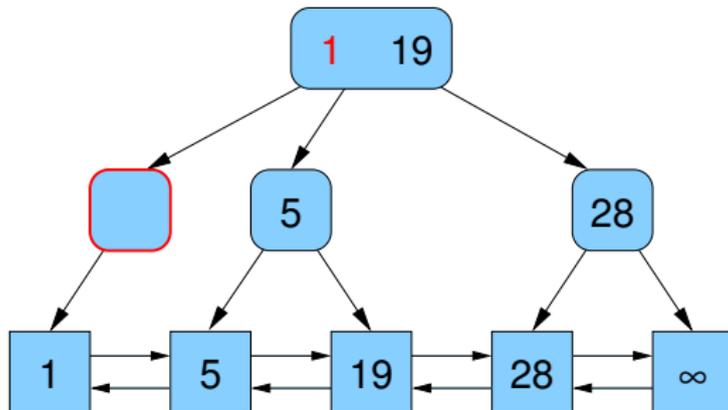
remove(3)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

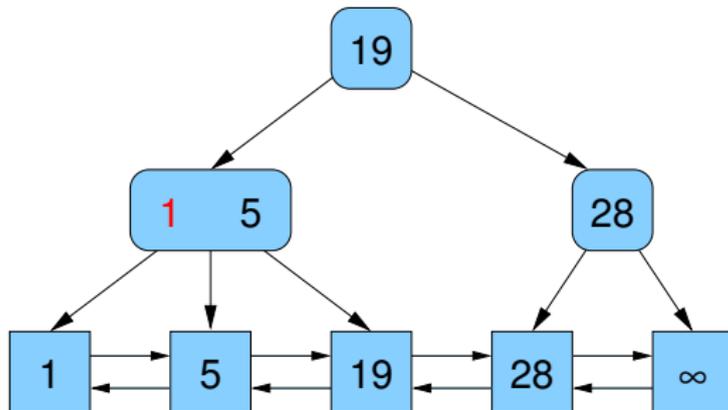
remove(3)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

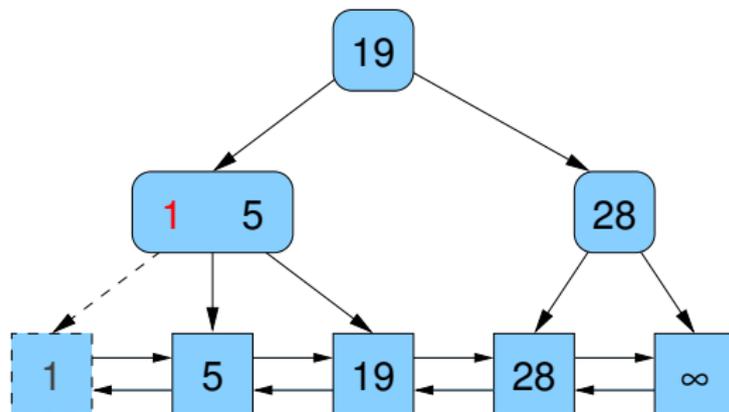
remove(3)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

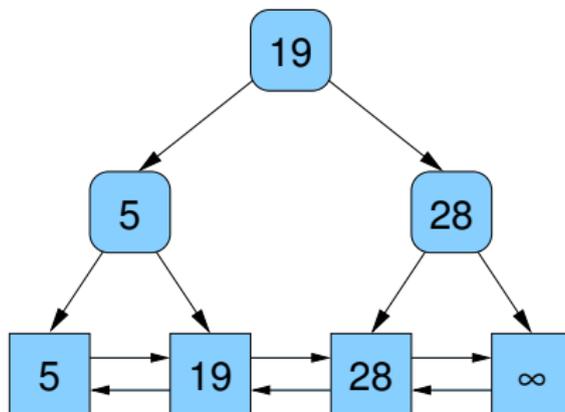
remove(1)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

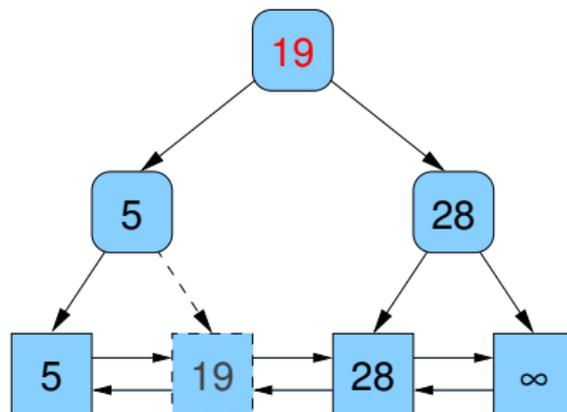
remove(1)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

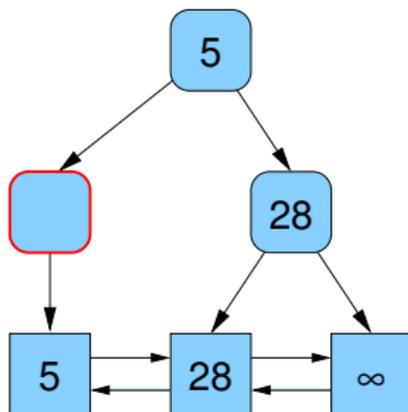
remove(19)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

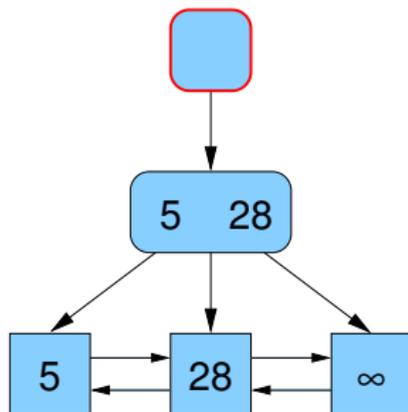
remove(19)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

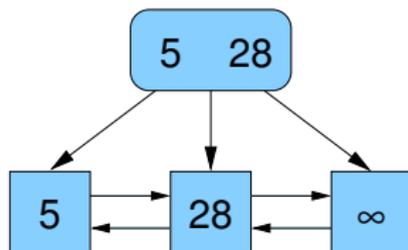
remove(19)



# (a, b)-Baum / remove

$a = 2, b = 4$

remove(19)



## (a, b)-Baum / remove

### Form-Invariante

- alle Blätter behalten dieselbe Tiefe
- falls alte Wurzel entfernt wird, verringert sich die Tiefe aller Blätter

### Grad-Invariante

- remove verschmilzt Knoten, die Grad  $a - 1$  und  $a$  haben
- wenn  $b \geq 2a - 1$ , dann ist der resultierende Grad  $\leq b$
- remove verschiebt eine Kante von Knoten mit Grad  $> a$  zu Knoten mit Grad  $a - 1$ , danach sind beide Grade in  $[a, b]$
- wenn Wurzel gelöscht, wurden vorher die Kinder verschmolzen, Grad vom letzten Kind ist also  $\geq a$  (und  $\leq b$ )

# Weitere Operationen im (a, b)-Baum

- **min / max-Operation**

verwende first / last-Methode der Liste, um das kleinste bzw. größte Element auszugeben

Zeit:  $O(1)$

- **Range queries** (Bereichsanfragen)

suche alle Elemente im Bereich  $[x, y]$ :

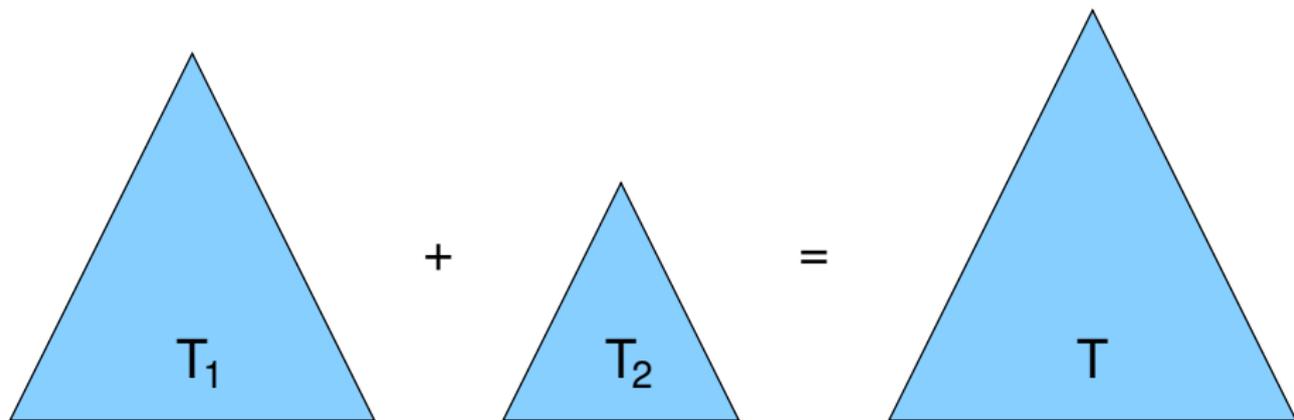
- ▶ führe locate( $x$ ) aus und
- ▶ durchlaufe die Liste, bis Element  $> y$  gefunden wird

Zeit:  $O(\log n + \text{Ausgabegröße})$

- **Konkatenation / Splitting**

# Konkatenation von (a, b)-Bäumen

- verknüpfe zwei (a, b)-Bäume  $T_1$  und  $T_2$  mit  $s_1$  bzw.  $s_2$  Elementen und Höhe  $h_1$  bzw.  $h_2$  zu (a, b)-Baum  $T$
- Bedingung: Schlüssel in  $T_1 \leq$  Schlüssel in  $T_2$

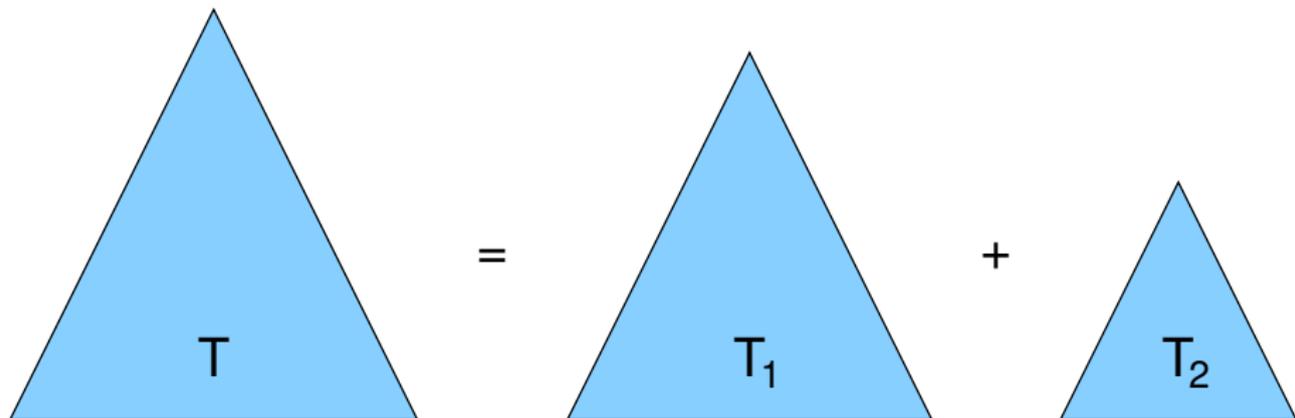


# Konkatenation von (a, b)-Bäumen

- lösche in  $T_1$  das  $\infty$ -Dummy-Element
  - wenn danach dessen Vater-Knoten  $< a$  Kinder hat, dann behandle dies wie bei remove
  - verschmelze die Wurzel des niedrigeren Baums mit dem entsprechenden äußersten Knoten des anderen Baums, der sich auf dem gleichen Level befindet
  - wenn dieser Knoten danach  $> b$  Kinder hat, dann behandle dies wie bei insert
- ⇒ falls Höhe der Bäume explizit gespeichert: Zeit  $O(1 + |h_1 - h_2|)$   
ansonsten (mit Höhenbestimmung): Zeit  $O(1 + \max\{h_1, h_2\})$   
 $\subseteq O(1 + \log(\max\{s_1, s_2\}))$

# Aufspaltung eines $(a, b)$ -Baums

- spalte  $(a, b)$ -Baum  $T$  bei Schlüssel  $k$  in zwei  $(a, b)$ -Bäume  $T_1$  und  $T_2$  auf



# Aufspaltung eines (a, b)-Baums

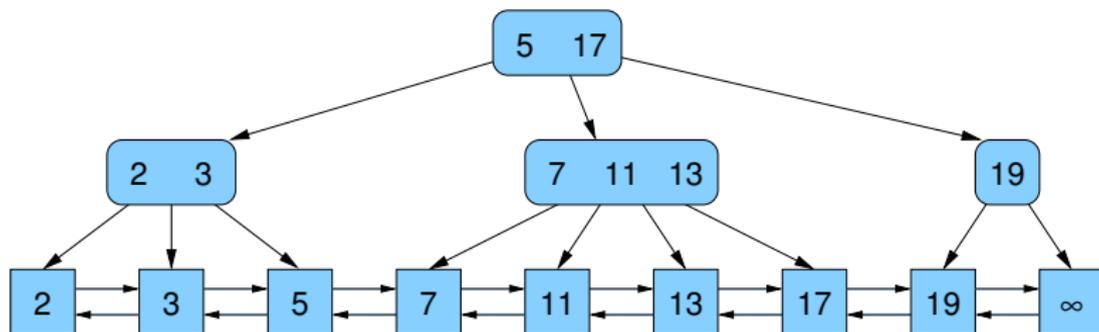
- Sequenz  $q = \langle w, \dots, x, y, \dots, z \rangle$  soll bei Schlüssel  $y$  in Teile  $q_1 = \langle w, \dots, x \rangle$  und  $q_2 = \langle y, \dots, z \rangle$  aufgespalten werden
- betrachte Pfad von Wurzel zum Blatt  $y$
- spalte auf diesem Pfad jeden Knoten  $v$  in zwei Knoten  $v_\ell$  und  $v_r$
- $v_\ell$  bekommt Kinder links vom Pfad,  $v_r$  bekommt Kinder rechts vom Pfad (evt. gibt es Knoten ohne Kinder)
- Knoten mit Kind(ern) werden als Wurzeln von (a, b)-Bäumen interpretiert
- Konkatenation der linken Bäume zusammen mit einem neuen  $\infty$ -Dummy ergibt einen Baum für die Elemente bis  $x$
- Konkatenation von  $\langle y \rangle$  zusammen mit den rechten Bäumen ergibt einen Baum für die Elemente ab  $y$

# Aufspaltung eines (a, b)-Baums

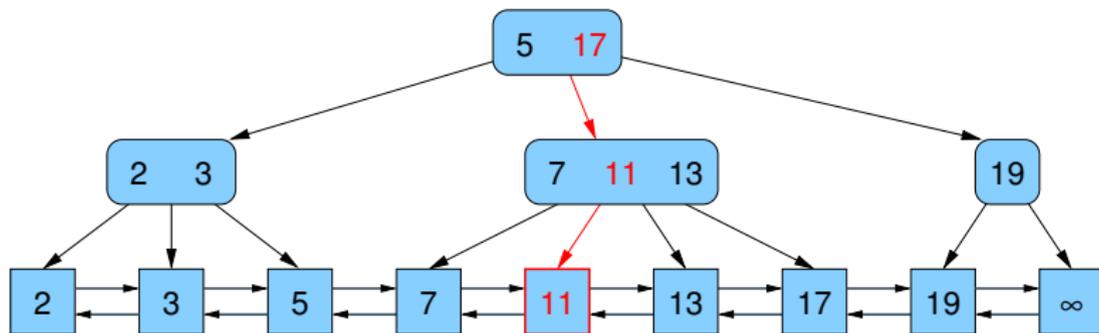
- diese  $O(\log n)$  Konkatenationen können in Gesamtzeit  $O(\log n)$  erledigt werden
- Grund: die linken Bäume haben echt monoton fallende, die rechten echt monoton wachsende Höhe
- Seien z.B.  $r_1, r_2, \dots, r_k$  die Wurzeln der linken Bäume und  $h_1 > h_2 > \dots > h_k$  deren Höhen
- verbinde zuerst  $r_{k-1}$  und  $r_k$  in Zeit  $O(1 + h_{k-1} - h_k)$ , dann  $r_{k-2}$  mit dem Ergebnis in Zeit  $O(1 + h_{k-2} - h_{k-1})$ , dann  $r_{k-3}$  mit dem Ergebnis in Zeit  $O(1 + h_{k-3} - h_{k-2})$  usw.
- Gesamtzeit:

$$O\left(\sum_{1 \leq i < k} (1 + h_i - h_{i+1})\right) = O(k + h_1 - h_k) \in O(\log n)$$

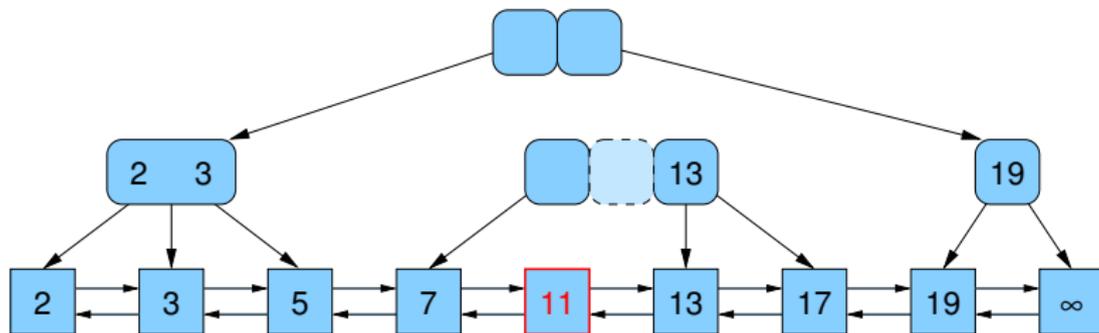
# Aufspaltung eines (a, b)-Baums



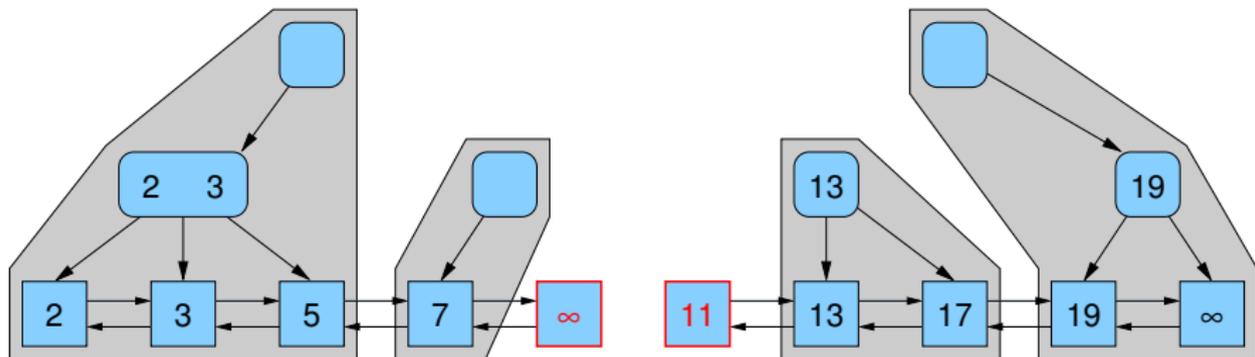
# Aufspaltung eines (a, b)-Baums



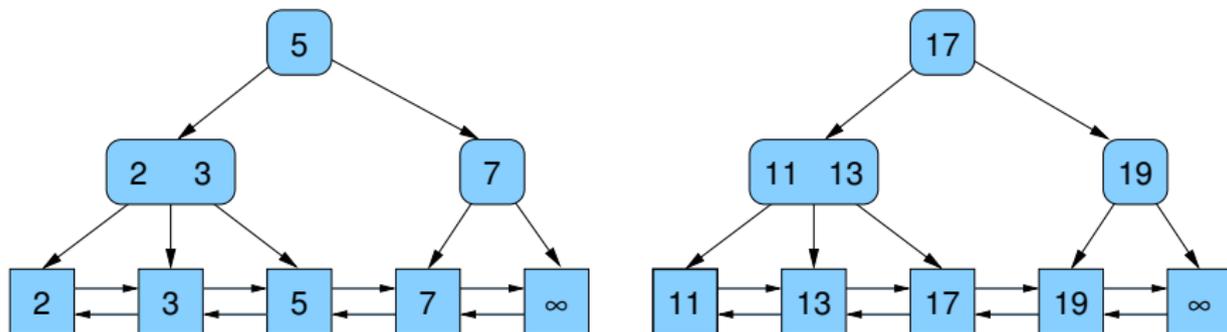
# Aufspaltung eines (a, b)-Baums



# Aufspaltung eines (a, b)-Baums



# Aufspaltung eines (a, b)-Baums



# Effizienz von insert / remove-Folgen

## Satz

Es gibt eine Folge von  $n$  insert- und remove-Operationen auf einem anfangs leeren (2,3)-Baum, so dass die Gesamtanzahl der Knotenaufspaltungen und -verschmelzungen in  $\Omega(n \log n)$  ist.

Beweis: siehe Übung

# Effizienz von insert / remove-Folgen

## Satz

Für  $(a, b)$ -Bäume, die die erweiterte Bedingung  $b \geq 2a$  erfüllen, gilt:

Für jede Folge von  $n$  insert- und remove-Operationen auf einem anfangs leeren  $(a, b)$ -Baum ist die Gesamtanzahl der Knotenaufspaltungen und -verschmelzungen in  $O(n)$ .

*Beweis: amortisierte Analyse, nicht in dieser Vorlesung*

# Übersicht

- 9 Graphen
  - Netzwerke und Graphen
  - Graphrepräsentation
  - Graphtraversierung
  - Kürzeste Wege
  - Minimale Spannbäume

# Übersicht

## 9 Graphen

- **Netzwerke und Graphen**
- Graphrepräsentation
- Graphtraversierung
- Kürzeste Wege
- Minimale Spannbäume

# Netzwerk

Objekt bestehend aus

- **Elementen** und
- Interaktionen bzw. **Verbindungen** zwischen den Elementen

eher *informales* Konzept

- keine exakte Definition
- Elemente und ihre Verbindungen können ganz unterschiedlichen Charakter haben
- manchmal manifestiert in **real** existierenden Dingen, manchmal nur gedacht (**virtuell**)

# Beispiele für Netzwerke

- Kommunikationsnetze: Internet, Telefonnetz
- Verkehrsnetze: Straßen-, Schienen-, Flug-, Nahverkehrsnetz
- Versorgungsnetzwerke: Strom, Wasser, Gas, Erdöl
- wirtschaftliche Netzwerke: Geld- und Warenströme, Handel
- biochemische Netzwerke: Metabolische und Interaktionsnetzwerke
- biologische Netzwerke: Gehirn, Ökosysteme
- soziale / berufliche Netzwerke: virtuell oder explizit (Communities)
- Publikationsnetzwerke: Zitationsnetzwerk, Koautor-Netzwerk

# Graph

formales / abstraktes Objekt bestehend aus

- Menge von **Knoten**  $V$  (engl. vertices, nodes)
- Menge von **Kanten**  $E$  (engl. edges, lines, links), die jeweils ein Paar von Knoten verbinden
- Menge von Eigenschaften der Knoten und / oder Kanten

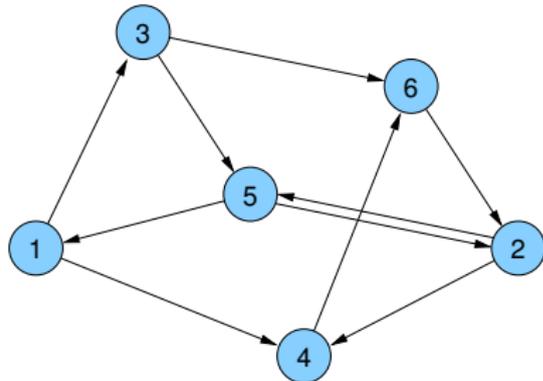
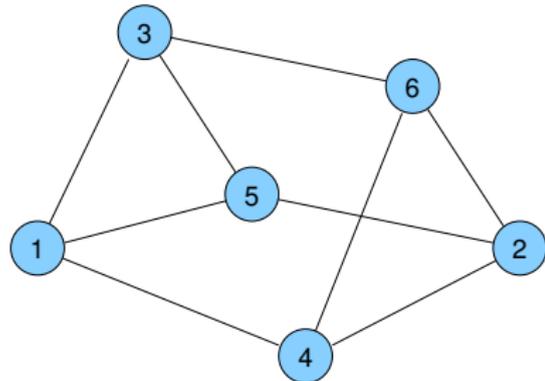
Notation:

- $G = (V, E)$   
manchmal auch  $G = (V, E, w)$  im Fall gewichteter Graphen
- Anzahl der Knoten:  $n = |V|$   
Anzahl der Kanten:  $m = |E|$

# Gerichtete und ungerichtete Graphen

## Kanten bzw. Graphen

- ungerichtet:  $E \subseteq \{\{v, w\} : v \in V, w \in V\}$   
(ungeordnetes Paar von Knoten bzw. 2-elementige Teilmenge)
- gerichtet:  $E \subseteq \{(v, w) : v \in V, w \in V\}$ , also  $E \subseteq V \times V$   
(geordnetes Paar von Knoten)



# Gerichtete und ungerichtete Graphen

Anwendungen:

- Ungerichtete Graphen:

**symmetrische** Beziehungen (z.B.  $\{v, w\} \in E$  genau dann, wenn Person  $v$  und Person  $w$  verwandt sind)

- Gerichtete Graphen:

**asymmetrische** Beziehungen (z.B.  $(v, w) \in E$  genau dann, wenn Person  $v$  Person  $w$  mag)

**kreisfreie** Beziehungen (z.B.  $(v, w) \in E$  genau dann, wenn Person  $v$  Vorgesetzter von Person  $w$  ist)

hier:

- Modellierung von ungerichteten durch gerichtete Graphen
- Ersetzung ungerichteter Kanten durch je zwei antiparallele gerichtete Kanten

# Nachbarn: Adjazenz, Inzidenz, Grad

- Sind zwei Knoten  $v$  und  $w$  durch eine Kante  $e$  verbunden, dann nennt man
  - ▶  $v$  und  $w$  **adjazent** bzw. benachbart
  - ▶  $v$  und  $e$  **inzident** (ebenso  $w$  und  $e$ )
  
- Anzahl der Nachbarn eines Knotens  $v$ : **Grad  $\deg(v)$**   
bei gerichteten Graphen:
  - ▶ Eingangsgrad:  **$\deg^-(v) = |\{(w, v) \in E\}|$**
  - ▶ Ausgangsgrad:  **$\deg^+(v) = |\{(v, w) \in E\}|$**

# Annahmen

- Graph (also Anzahl der Knoten und Kanten) ist **endlich**
- Graph ist **einfach**, d.h.  $E$  ist eine Menge und keine Multimenge (anderenfalls heißt  $G$  Multigraph)
- Graph enthält **keine Schleifen** (Kanten von  $v$  nach  $v$ )

# Gewichtete Graphen

In Abhängigkeit vom betrachteten Problem wird Kanten und / oder Knoten oft eine Eigenschaft (z.B. eine Farbe oder ein numerischer Wert, das **Gewicht**) zugeordnet (evt. auch mehrere), z.B.

- Distanzen (in Längen- oder Zeiteinheiten)
- Kosten
- Kapazitäten / Bandbreite
- Ähnlichkeiten
- Verkehrsdichte

Wir nennen den Graphen dann

- **knotengewichtet** bzw.
- **kantengewichtet**

Beispiel:  $w : E \mapsto \mathbb{R}$

Schreibweise:  $w(e)$  für das Gewicht einer Kante  $e \in E$

# Wege, Pfade und Kreise

- **Weg** (engl. *walk*) in einem Graphen  $G = (V, E)$ : alternierende Folge von Knoten und Kanten  $x_0, e_1, \dots, e_k, x_k$ , so dass
  - ▶  $\forall i \in [0, k] : x_i \in V$  und
  - ▶  $\forall i \in [1, k] : e_i = \{x_{i-1}, x_i\}$  bzw.  $e_i = (x_{i-1}, x_i) \in E$ .
- **Länge** eines Weges: Anzahl der enthaltenen Kanten
- Ein Weg ist ein **Pfad**, falls er (in sich) kantendisjunkt ist, falls also gilt:  $e_i \neq e_j$  für  $i \neq j$ .
- Ein Pfad ist ein **einfacher Pfad**, falls er (in sich) knotendisjunkt ist, falls also gilt:  $x_i \neq x_j$  für  $i \neq j$ .
- Ein Weg heißt **Kreis** (engl. *cycle*), falls  $x_0 = x_k$ .

# Operationen

**Graph**  $G$ : Datenstruktur (Typ / Klasse, Variable / Objekt) für Graphen

**Node**: Datenstruktur für Knoten,      **Edge**: Datenstruktur für Kanten

Operationen:

- **G.insert**(Edge  $e$ ):  $E := E \cup \{e\}$
- **G.remove**(Key  $i$ , Key  $j$ ):  $E := E \setminus \{e\}$   
für Kante  $e = (v, w)$  mit  $\text{key}(v) = i$  und  $\text{key}(w) = j$
- **G.insert**(Node  $v$ ):  $V := V \cup \{v\}$
- **G.remove**(Key  $i$ ): sei  $v \in V$  der Knoten mit  $\text{key}(v) = i$   
 $V := V \setminus \{v\}$ ,  $E := E \setminus \{(x, y) : x = v \vee y = v\}$
- **G.find**(Key  $i$ ): gib Knoten  $v$  mit  $\text{key}(v) = i$  zurück
- **G.find**(Key  $i$ , Key  $j$ ): gib Kante  $(v, w)$  mit  $\text{key}(v) = i$  und  $\text{key}(w) = j$  zurück

# Operationen

Anzahl der Knoten **konstant**

$$\Rightarrow V = \{0, \dots, n - 1\}$$

- (Knotenschlüssel durchnummeriert)

Anzahl der Knoten **variabel**

- Hashing kann verwendet werden für ein Mapping der  $n$  Knoten in den Bereich  $\{0, \dots, O(n)\}$

$\Rightarrow$  nur konstanter Faktor der Vergrößerung gegenüber statischer Datenstruktur

# Übersicht

- 9 Graphen
  - Netzwerke und Graphen
  - **Graphrepräsentation**
  - Graphtraversierung
  - Kürzeste Wege
  - Minimale Spannbäume

# Graphrepräsentation

Darstellung von Graphen im Computer?

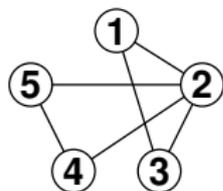
Vor- und Nachteile bei z.B. folgenden Fragen:

- Sind zwei gegebene Knoten  $v$  und  $w$  **adjazent**?
- Was sind die **Nachbarn** eines Knotens?
- Welche Knoten sind (direkte oder indirekte) **Vorgänger** bzw. **Nachfolger** eines Knotens  $v$  in einem gerichteten Graphen?
- Wie aufwendig ist das **Einfügen** oder **Löschen** eines Knotens bzw. einer Kante?

# Graphrepräsentationen

- Kantenliste
- Adjazenzmatrix
- Inzidenzmatrix
- Adjazenzarray
- Adjazenzliste
- implizit

# Kantenliste



{1, 2}, {1, 3}, {2, 3}, {2, 4}, {2, 5}, {4, 5}

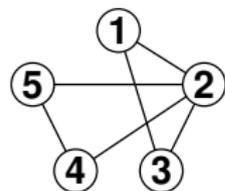
Vorteil:

- Speicherbedarf  $O(m + n)$
- Einfügen von Knoten und Kanten in  $O(1)$
- Löschen von Kanten per Handle in  $O(1)$

Nachteil:

- $G.find(\text{Key } i, \text{Key } j)$ : im worst case  $\Theta(m)$
- $G.remove(\text{Key } i, \text{Key } j)$ : im worst case  $\Theta(m)$
- Nachbarn nur in  $O(m)$  feststellbar

# Adjazenzmatrix



$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

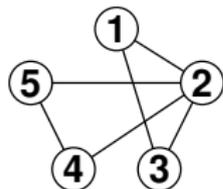
Vorteil:

- in  $O(1)$  feststellbar, ob zwei Knoten Nachbarn sind
- ebenso Einfügen und Löschen von Kanten

Nachteil:

- kostet  $\Theta(n^2)$  Speicher, auch bei Graphen mit  $o(n^2)$  Kanten
- Finden aller Nachbarn eines Knotens kostet  $O(n)$
- Hinzufügen neuer Knoten ist schwierig

# Inzidenzmatrix

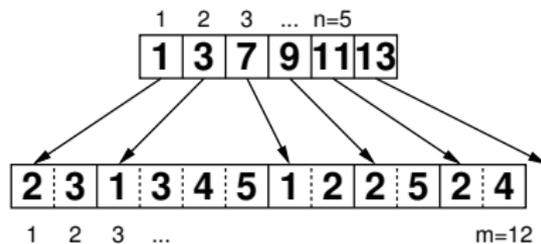
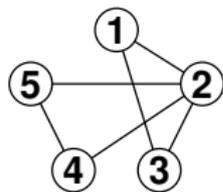


$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Nachteil:

- kostet  $\Theta(mn)$  Speicher

# Adjazenzarray



Vorteil:

- Speicherbedarf:

gerichtete Graphen:  $n + m + \Theta(1)$

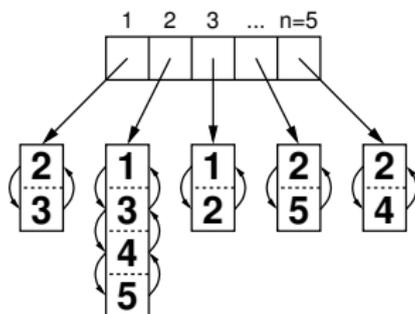
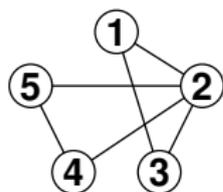
(hier noch kompakter als Kantenliste mit  $2m$ )

ungerichtete Graphen:  $n + 2m + \Theta(1)$

Nachteil:

- Einfügen und Löschen von Kanten ist schwierig,  
deshalb nur für *statische* Graphen geeignet

# Adjazenzliste



Unterschiedliche Varianten:  
einfach/doppelt verkettet, linear/zirkulär

Vorteil:

- Einfügen von Kanten in  $O(d)$  oder  $O(1)$
- Löschen von Kanten in  $O(d)$  (per Handle in  $O(1)$ )
- mit unbounded arrays etwas cache-effizienter

Nachteil:

- Zeigerstrukturen verbrauchen relativ viel Platz und Zugriffszeit

# Adjazenzliste + Hashtabelle

- speichere Adjazenzliste (Liste von adjazenten Nachbarn bzw. inzidenten Kanten zu jedem Knoten)
- speichere Hashtabelle, die zwei Knoten auf einen Zeiger abbildet, der dann auf die ggf. vorhandene Kante verweist

Zeitaufwand:

- $G.\text{find}(\text{Key } i, \text{Key } j)$ :  $O(1)$  (worst case)
- $G.\text{insert}(\text{Edge } e)$ :  $O(1)$  (im Mittel)
- $G.\text{remove}(\text{Key } i, \text{Key } j)$ :  $O(1)$  (im Mittel)
- Speicheraufwand:  $O(n + m)$

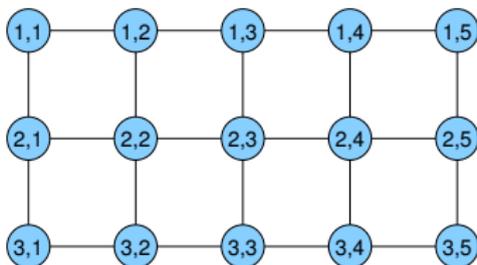
# Implizite Repräsentation

Beispiel: **Gitter-Graph** (grid graph)

- definiert durch zwei Parameter  $k$  und  $\ell$

$$V = [1, \dots, k] \times [1, \dots, \ell]$$

$$E = \left\{ ((i, j), (i, j')) \in V^2 : |j - j'| = 1 \right\} \cup \left\{ ((i, j), (i', j)) \in V^2 : |i - i'| = 1 \right\}$$



- Kantengewichte könnten in 2 zweidimensionalen Arrays gespeichert werden:  
eins für waagerechte und eins für senkrechte Kanten

# Übersicht

- 9 Graphen
  - Netzwerke und Graphen
  - Graphrepräsentation
  - **Graphtraversierung**
  - Kürzeste Wege
  - Minimale Spannbäume

# Graphtraversierung

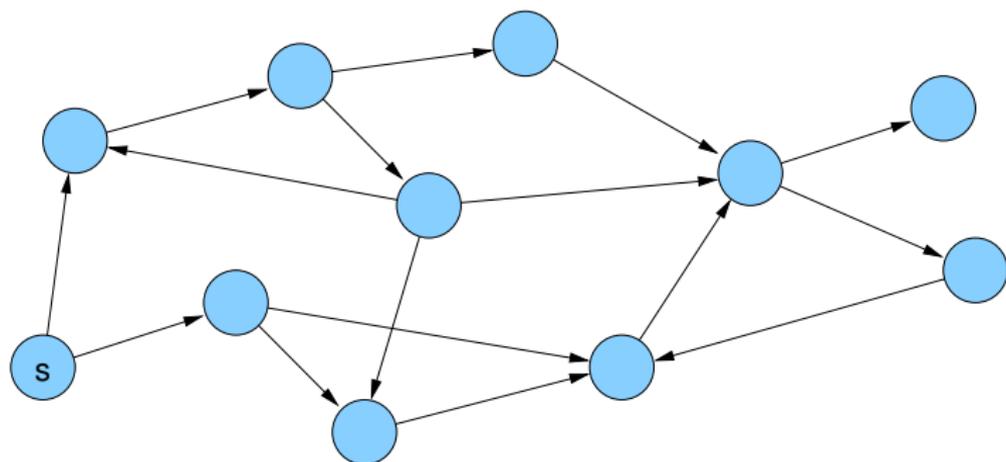
Problem:

Wie kann man die Knoten eines Graphen **systematisch durchlaufen**?

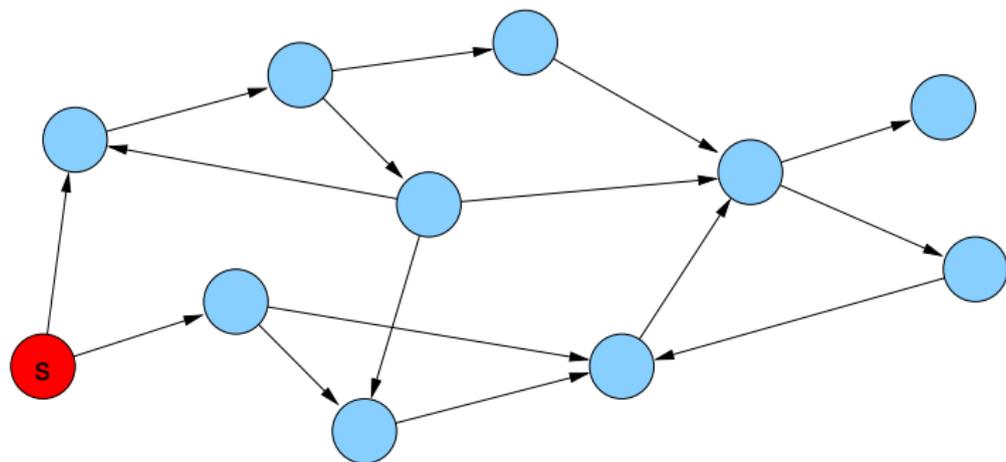
Grundlegende Strategien:

- Breitensuche (breadth-first search, BFS)
- Tiefensuche (depth-first search, DFS)

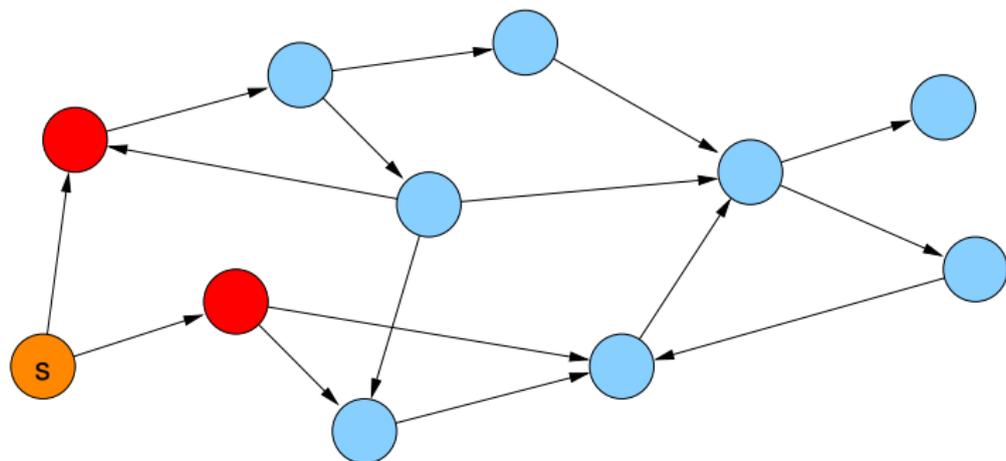
# Breitensuche



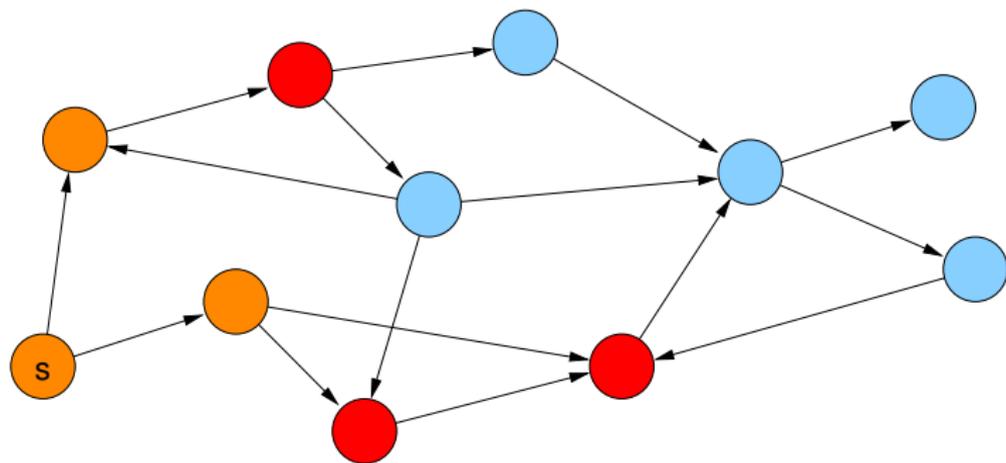
# Breitensuche



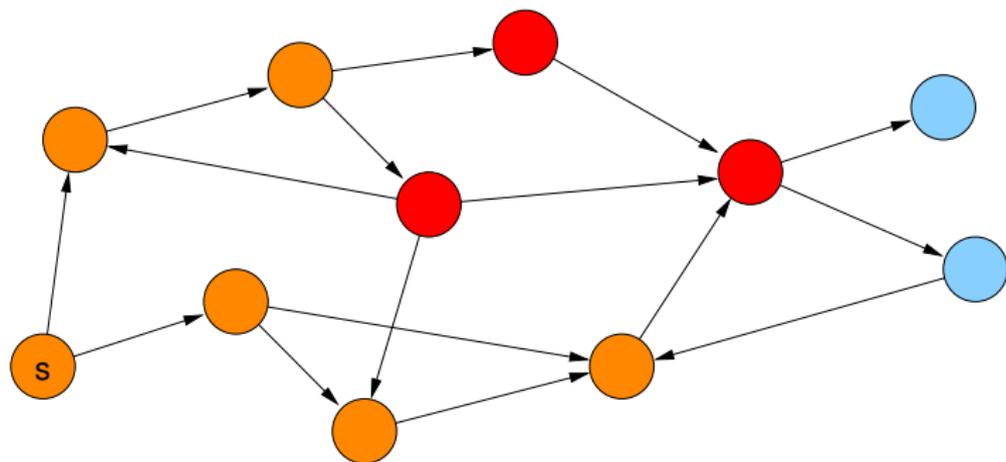
# Breitensuche



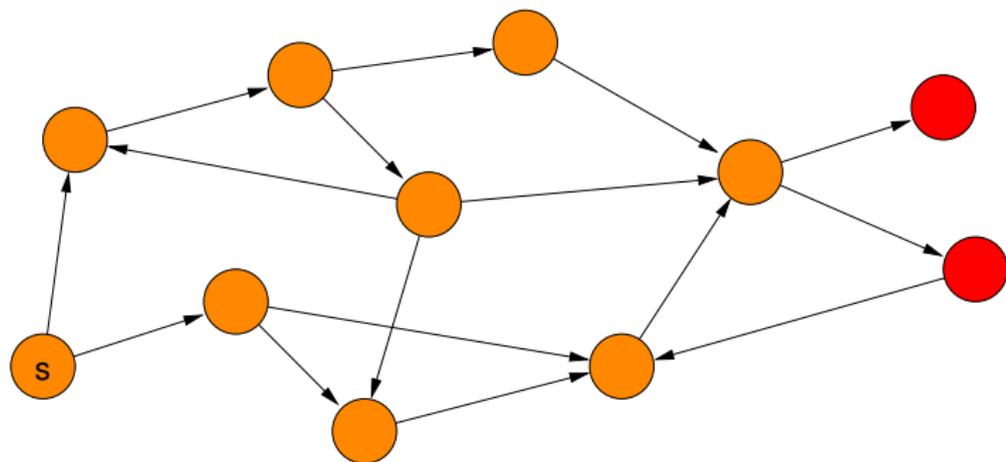
# Breitensuche



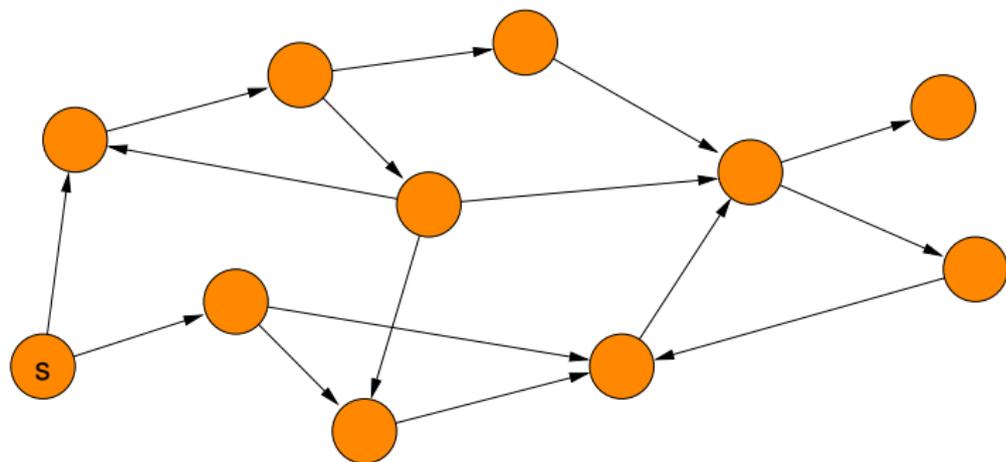
# Breitensuche



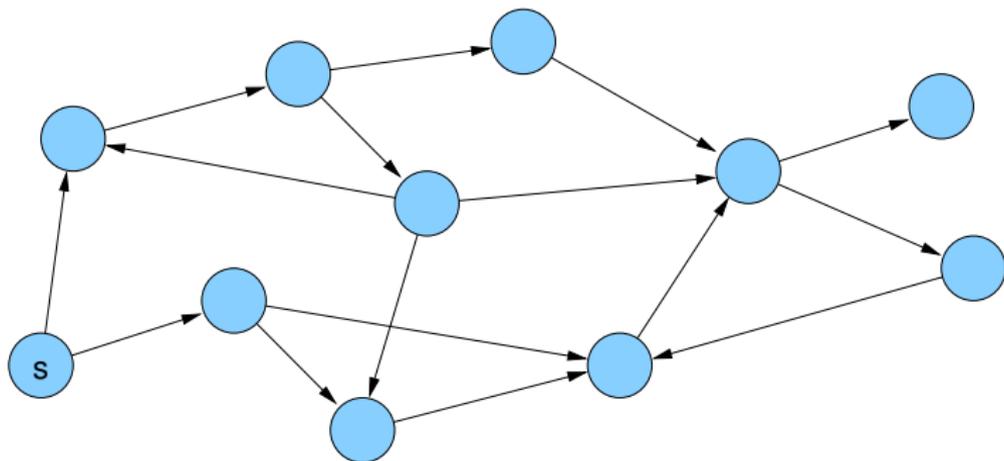
# Breitensuche



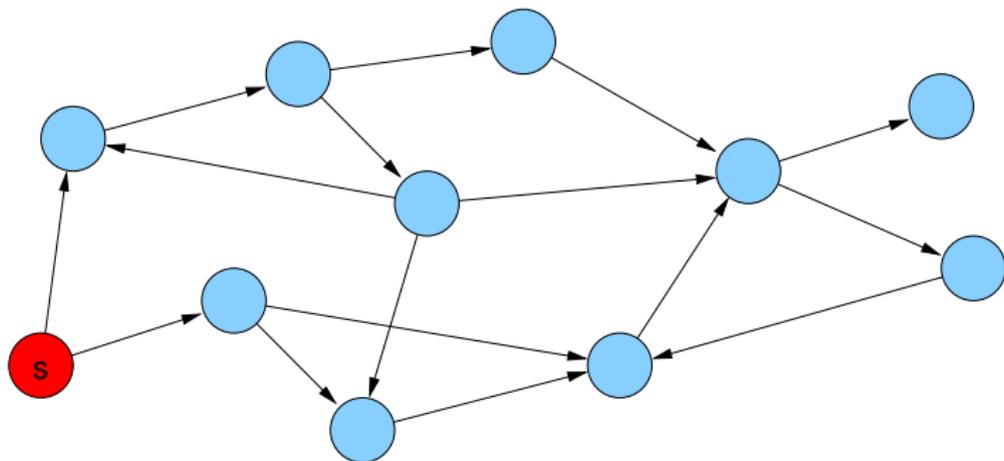
# Breitensuche



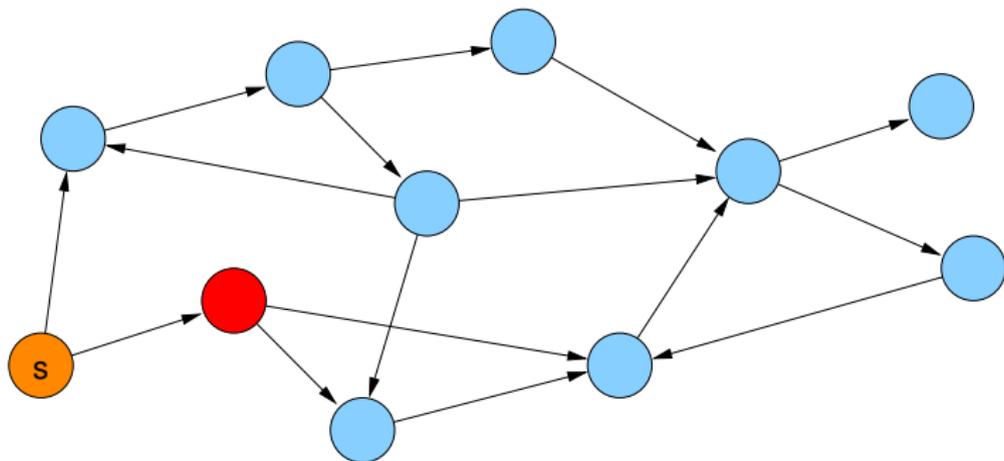
# Tiefensuche



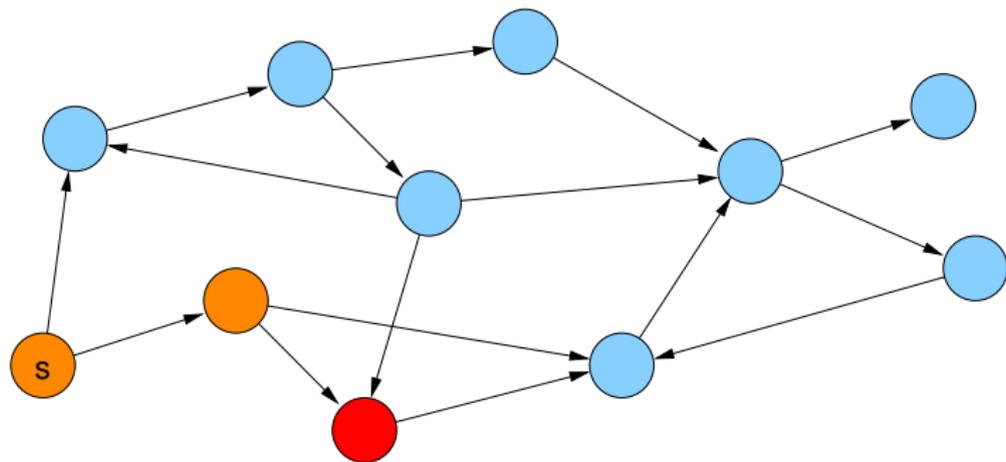
# Tiefensuche



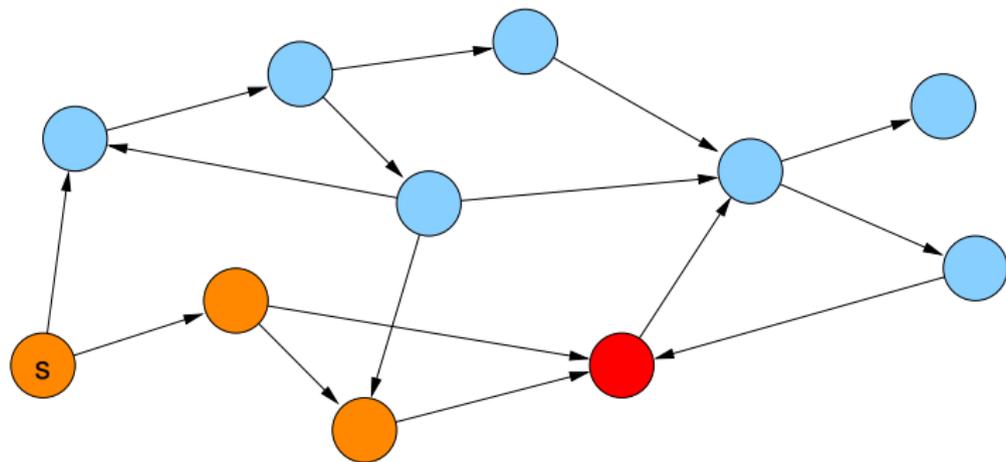
# Tiefensuche



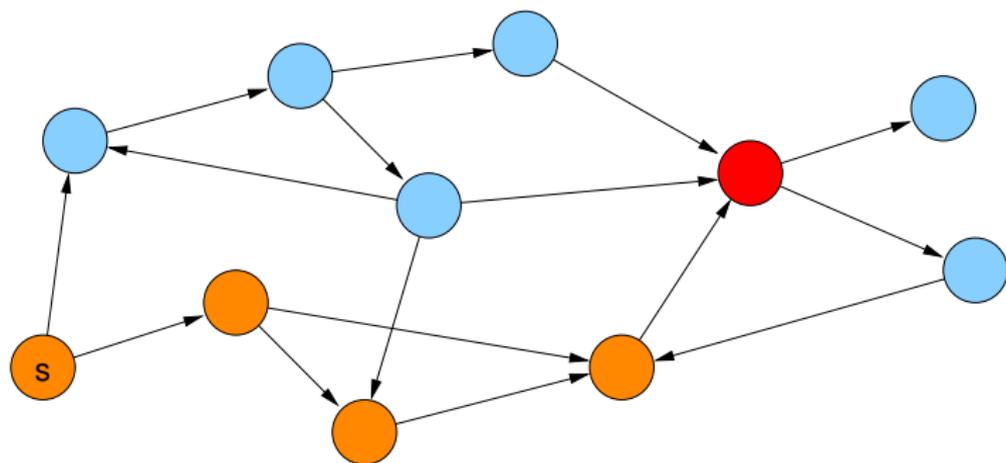
# Tiefensuche



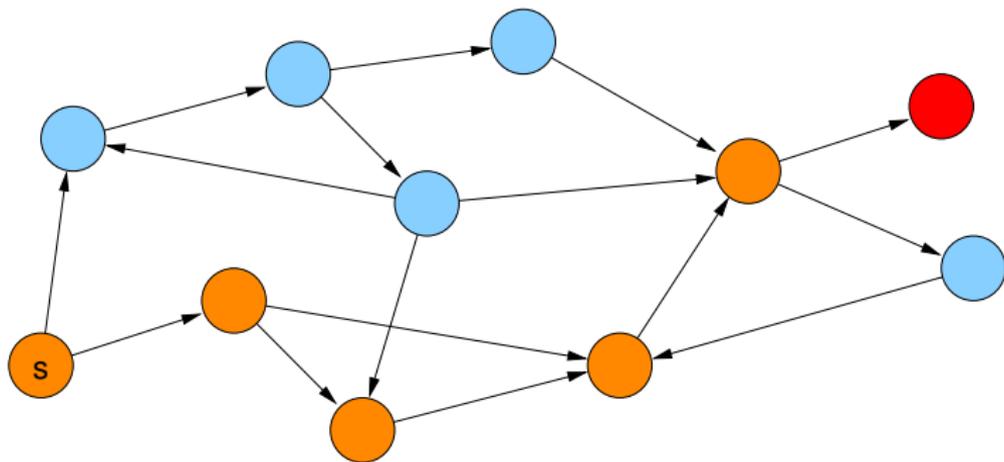
# Tiefensuche



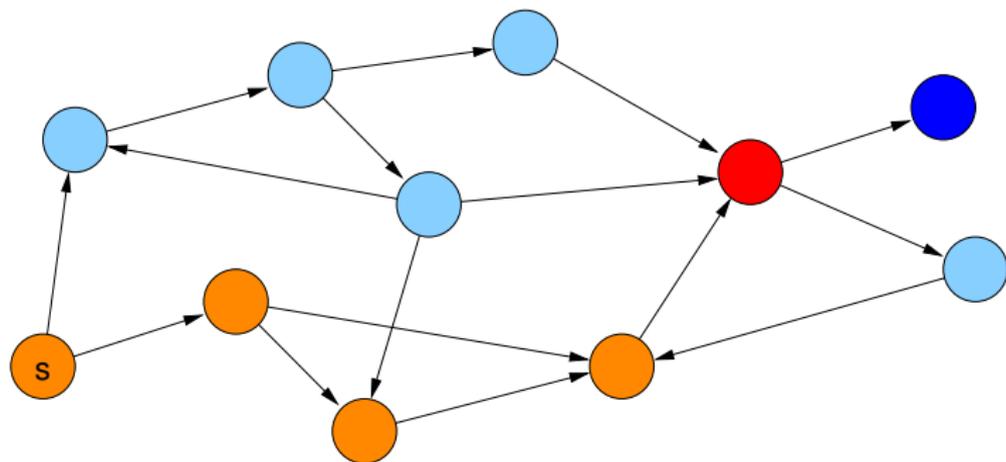
# Tiefensuche



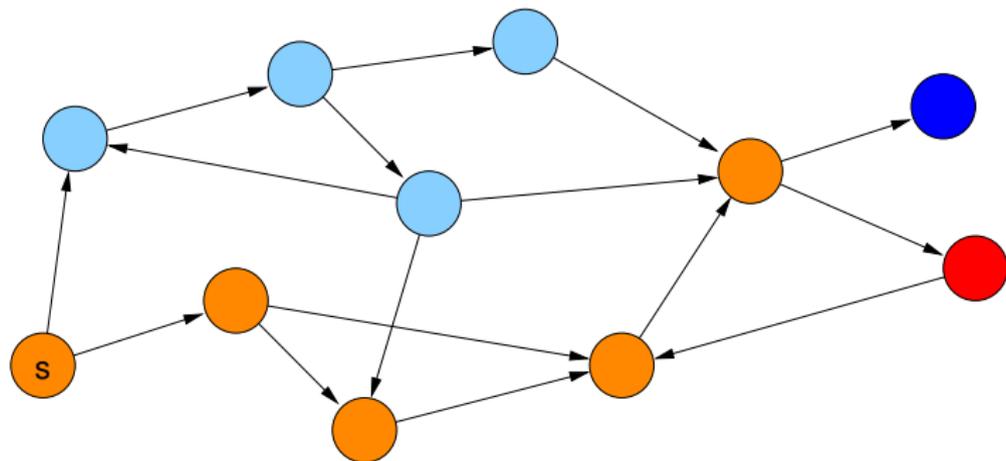
# Tiefensuche



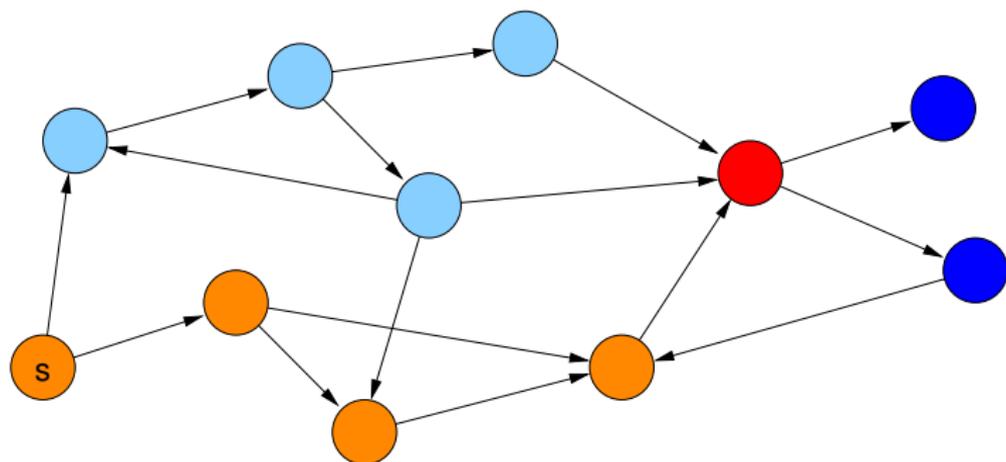
# Tiefensuche



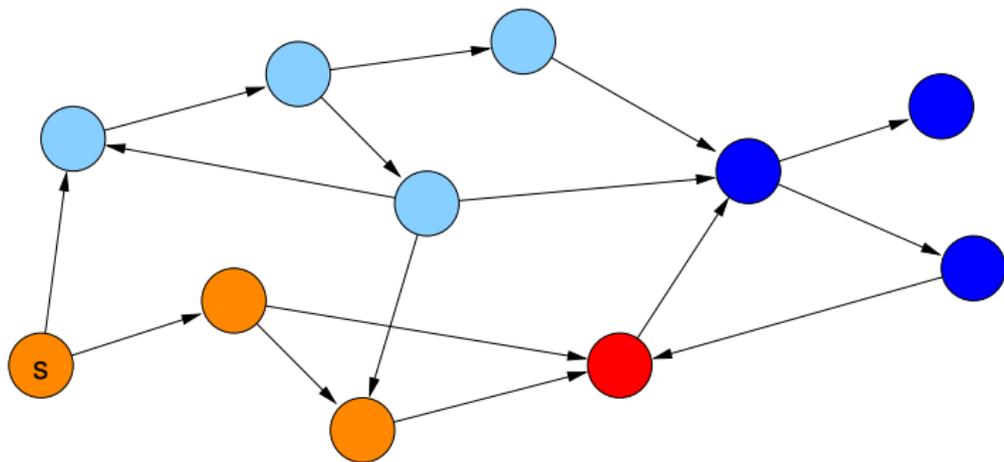
# Tiefensuche



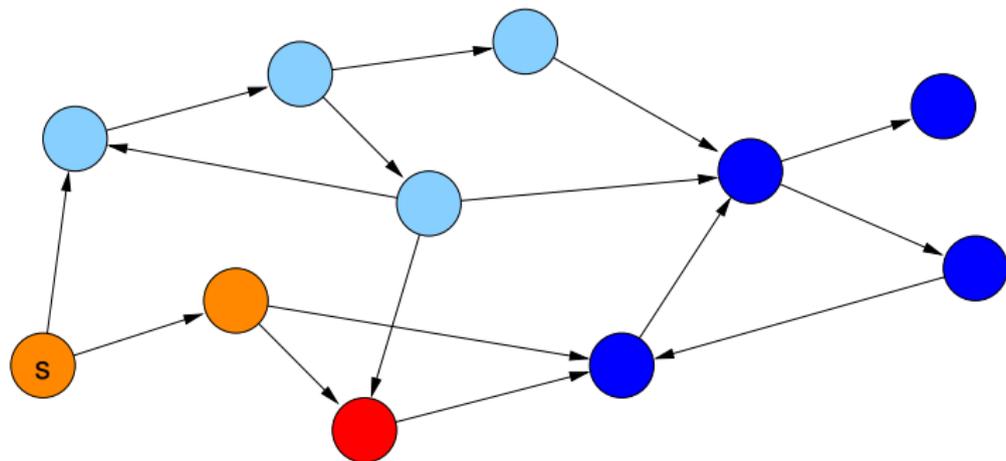
# Tiefensuche



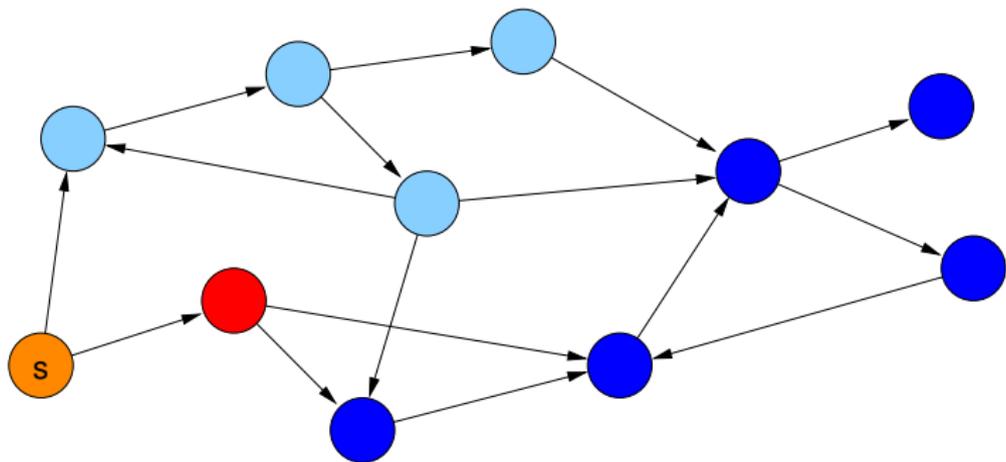
# Tiefensuche



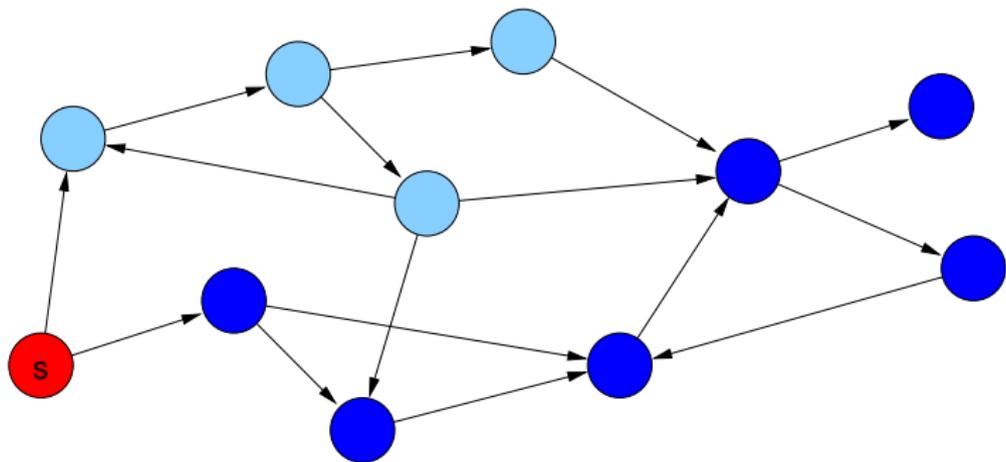
# Tiefensuche



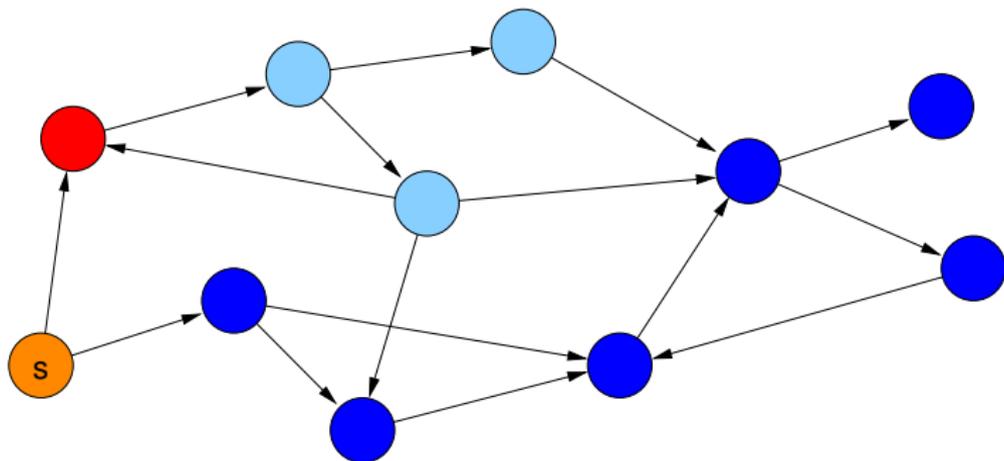
# Tiefensuche



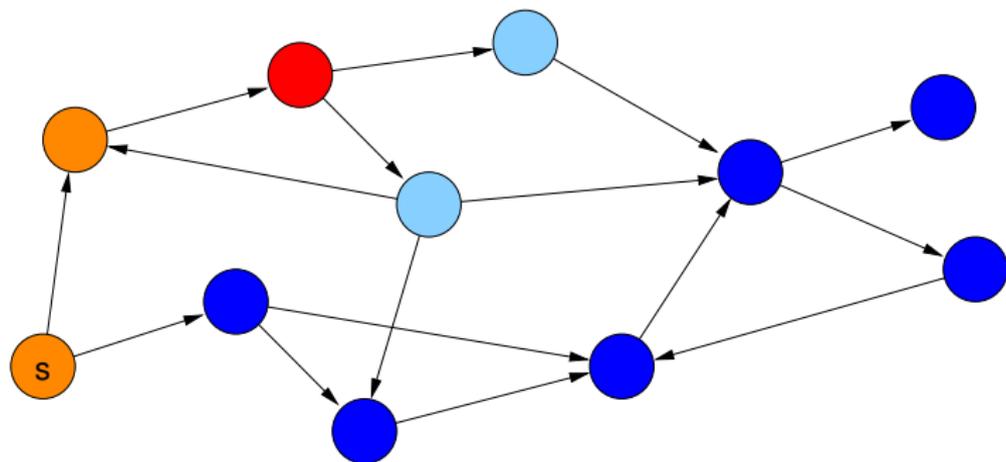
# Tiefensuche



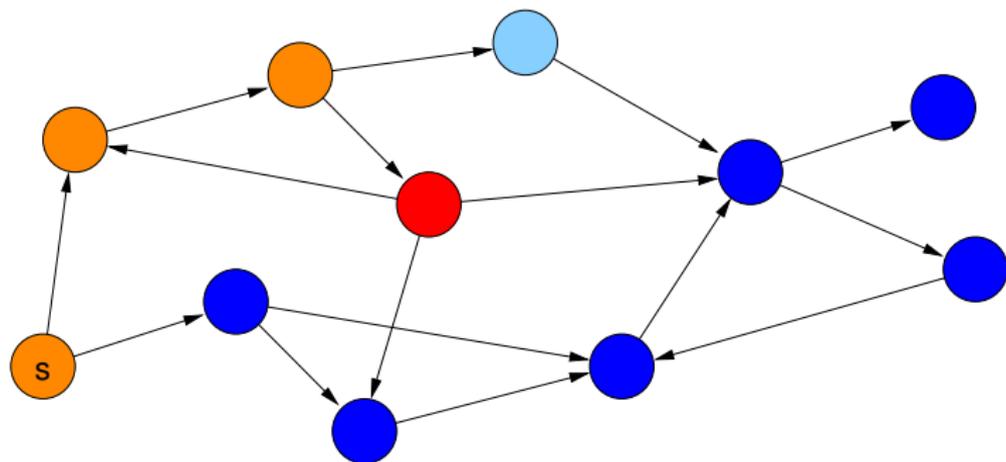
# Tiefensuche



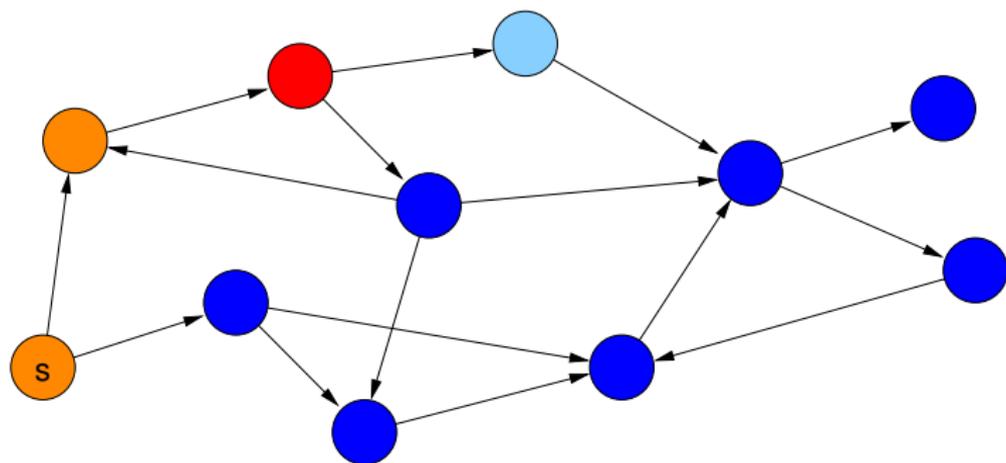
# Tiefensuche



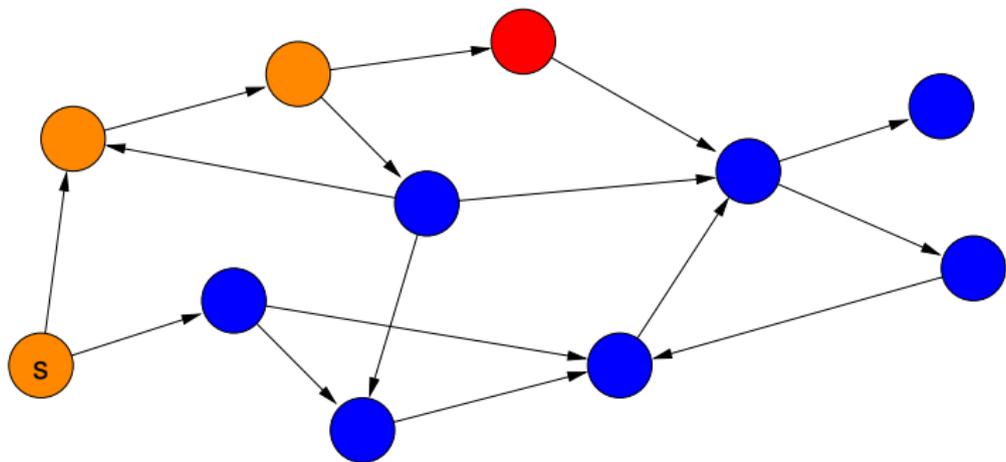
# Tiefensuche



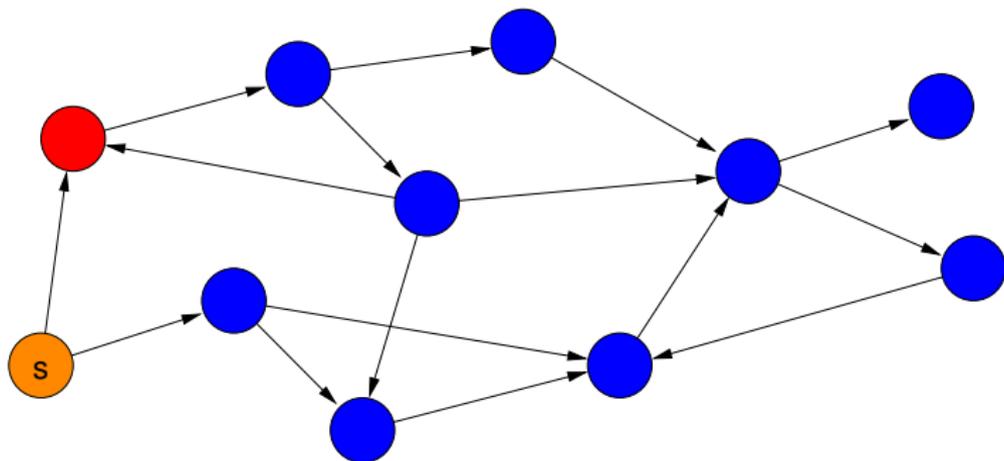
# Tiefensuche



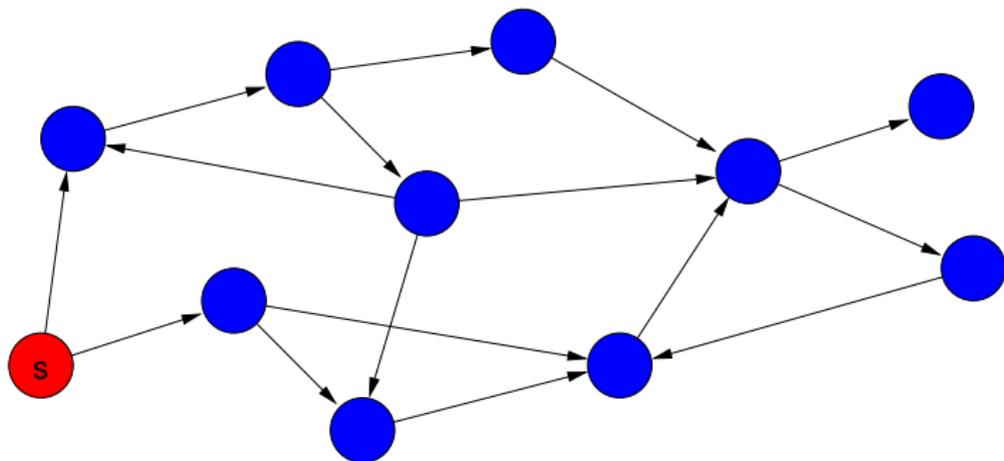
# Tiefensuche



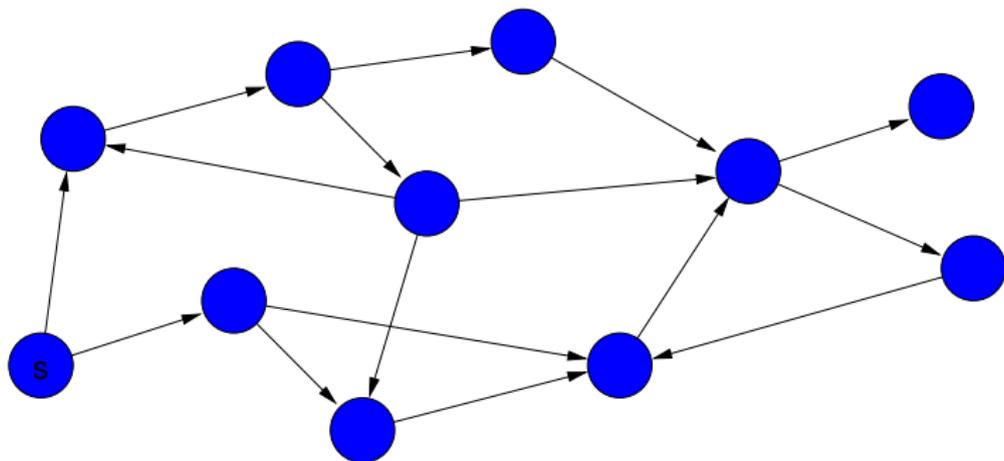
# Tiefensuche



# Tiefensuche

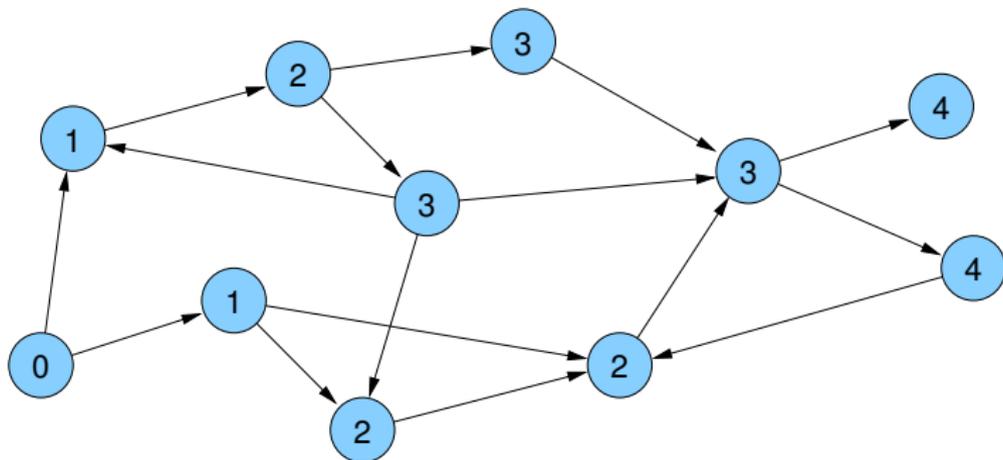


# Tiefensuche



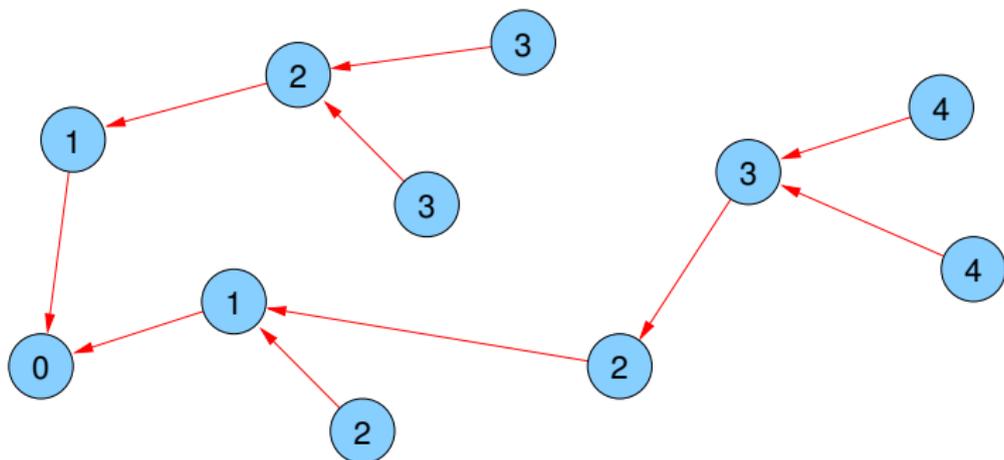
# Breitensuche

- $d(v)$ : Distanz von Knoten  $v$  zu  $s$  ( $d(s) = 0$ )



# Breitensuche

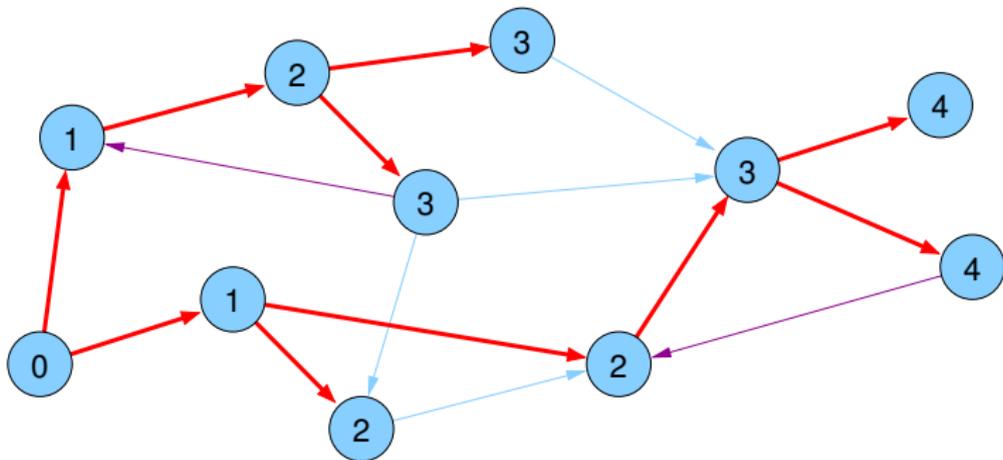
- **parent**( $v$ ): Knoten, von dem  $v$  entdeckt wurde
- parent wird beim ersten Besuch von  $v$  gesetzt ( $\Rightarrow$  eindeutig)



# Breitensuche

Kantentypen:

- **Baumkanten:** zum Kind
- **Rückwärtskanten:** zu einem Vorfahren
- **Kreuzkanten:** sonstige

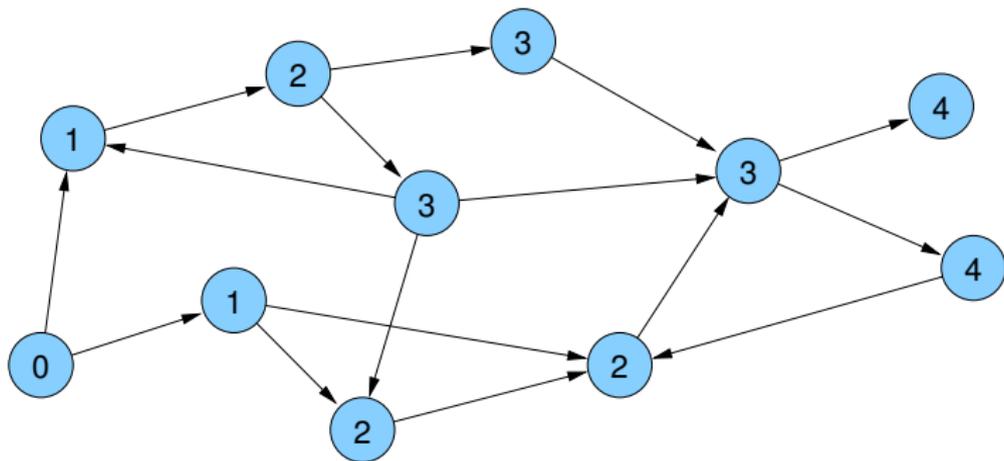


# Breitensuche

```
BFS(Node s) {  
    d[s] = 0;  
    parent[s] = s;  
    List<Node> q = <s>;  
    while ( !q.empty() ) {  
        u = q.popFront();  
        foreach ((u, v) ∈ E) {  
            if (parent[v] == null) {  
                q.pushBack(v);  
                d[v] = d[u]+1;  
                parent[v] = u;  
            }  
        }  
    }  
}
```

# Breitensuche

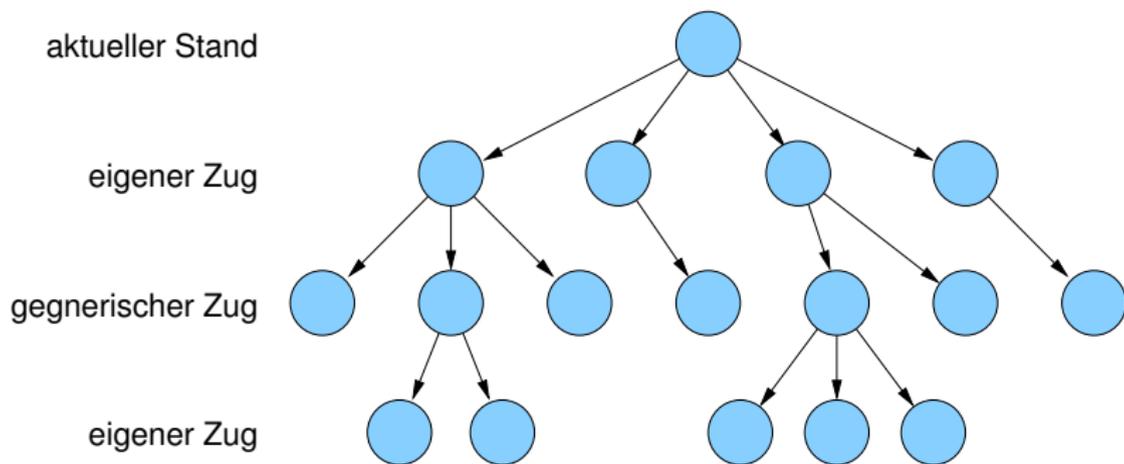
Anwendung: Single Source Shortest Path (SSSP) Problem  
in **ungewichteten** Graphen



# Breitensuche

Anwendung: Bestimmung des nächsten Zugs bei Spielen

Exploration des Spielbaums



Problem: halte Aufwand zur Suche eines guten Zuges in Grenzen

# Breitensuche

Anwendung: Bestimmung des nächsten Zugs bei Spielen

- **Standard-BFS:** verwendet **FIFO-Queue**  
ebenenweise Erkundung  
aber: zu teuer!
- **Best-First Search:** verwendet **Priority Queue**  
(z.B. realisiert durch binären Heap)  
Priorität eines Knotens wird durch eine Güte-Heuristik des repräsentierten Spielzustands gegeben

# Tiefensuche

Übergeordnete Methode (falls nicht alle Knoten erreicht werden)

```
foreach ( $v \in V$ )
```

```
  Setze  $v$  auf nicht markiert;
```

```
  init();
```

```
  foreach ( $s \in V$ )
```

```
    if (s nicht markiert) {
```

```
      markiere s;
```

```
      root(s);
```

```
      DFS(s,s);
```

```
    }
```

# Tiefensuche

```
DFS(Node u, Node v) {  
  foreach ((v, w) ∈ E)  
    if (w ist markiert)  
      traverseNonTreeEdge(v,w);  
    else {  
      traverseTreeEdge(v,w);  
      markiere w;  
      DFS(v,w);  
    }  
  backtrack(u,v);  
}
```

# Tiefensuche

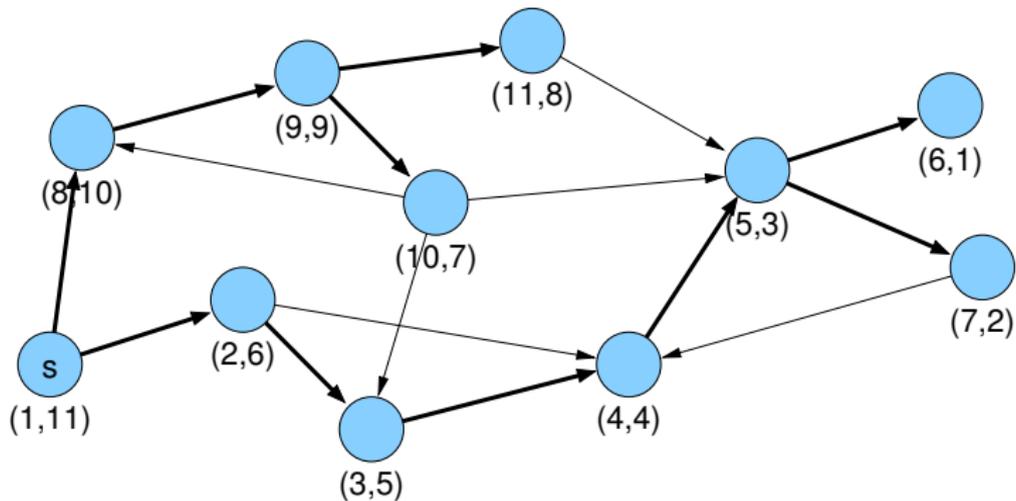
Variablen:

- `int[] dfsNum; // Explorationsreihenfolge`
- `int[] finishNum; // Fertigstellungsreihenfolge`
- `int dfsCount, finishCount; // Zähler`

Methoden:

- `init() { dfsCount = 1; finishCount = 1; }`
- `root(Node s) { dfsNum[s] = dfsCount; dfsCount++; }`
- `traverseTreeEdge(Node v, Node w)`  
`{ dfsNum[w] = dfsCount; dfsCount++; }`
- `traverseNonTreeEdge(Node v, Node w) { }`
- `backtrack(Node u, Node v)`  
`{ finishNum[v] = finishCount; finishCount++; }`

# Tiefensuche



# DFS-Nummerierung

Beobachtung:

- Knoten im DFS-Rekursionsstack (aktiven Knoten) sind bezüglich `dfsNum` aufsteigend sortiert

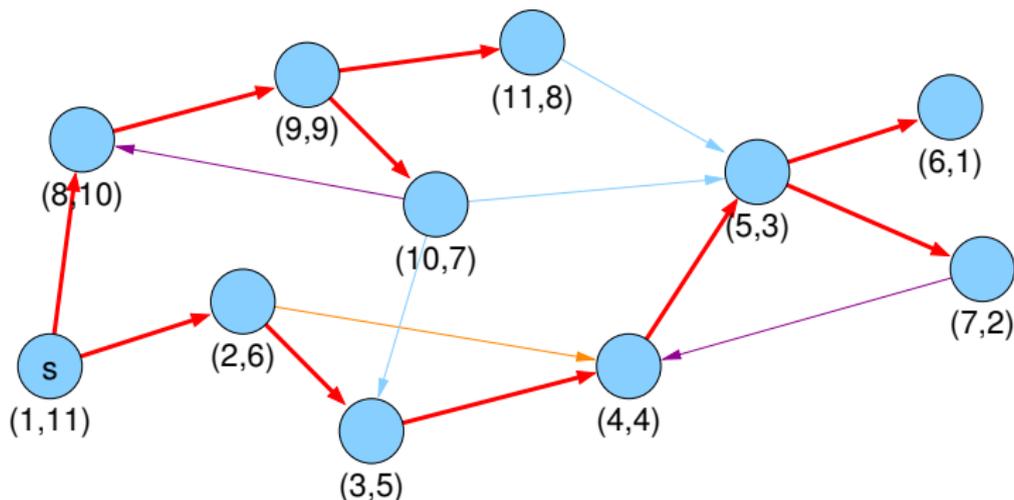
Begründung:

- `dfsCount` wird nach jeder Zuweisung von `dfsNum` inkrementiert
- neue aktive Knoten haben also immer die höchste `dfsNum`

# DFS-Nummerierung

Kantentypen:

- **Baumkanten:** zum Kind
- **Vorwärtskanten:** zu einem Nachfahren
- **Rückwärtskanten:** zu einem Vorfahren
- **Kreuzkanten:** sonstige



# DFS-Nummerierung

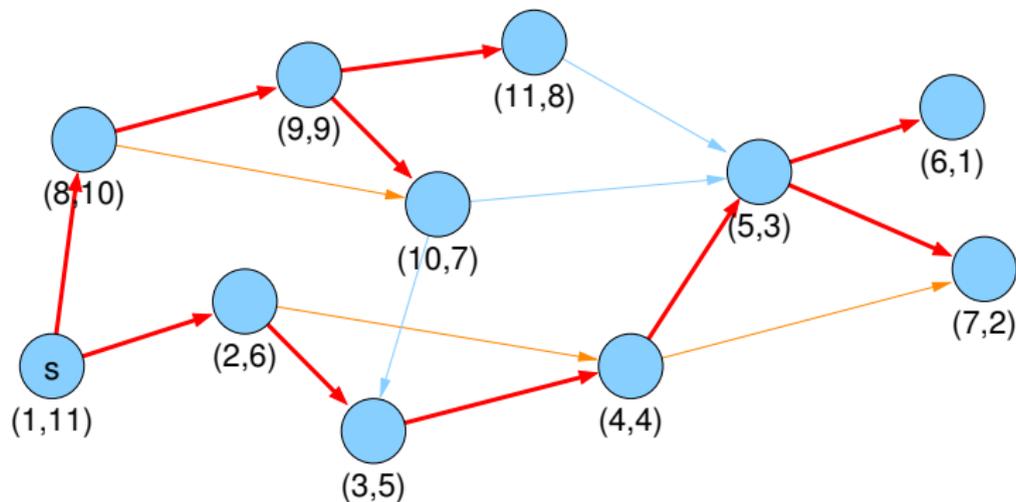
Beobachtung für Kante  $(v, w)$ :

Kantentyp	$\text{dfsNum}[v] < \text{dfsNum}[w]$	$\text{finishNum}[v] > \text{finishNum}[w]$
Baum & Vorwärts	ja	ja
Rückwärts	nein	nein (umgekehrt)
Kreuz	nein	ja

# DAG-Erkennung per DFS

Anwendung:

- Erkennung von azyklischen gerichteten Graphen (engl. directed acyclic graph / DAG)



- keine gerichteten Kreise

# DAG-Erkennung per DFS

## Lemma

*Folgende Aussagen sind äquivalent:*

- 1 Graph  $G$  ist ein DAG.
- 2 DFS in  $G$  enthält keine Rückwärtskante.
- 3  $\forall (v, w) \in E : finishNum[v] > finishNum[w]$

## Beweis.

- (2) $\Rightarrow$ (3): wenn (2), dann gibt es nur Baum-, Vorwärts- und Kreuzkanten  
Für alle gilt (3)
- (3) $\Rightarrow$ (2): für Rückwärtskanten gilt sogar die umgekehrte Relation  $finishNum[v] < finishNum[w]$   
wenn (3), dann kann es also keine Rückwärtskanten geben (2)

...

# DAG-Erkennung per DFS

## Lemma

*Folgende Aussagen sind äquivalent:*

- 1 Graph  $G$  ist ein DAG.
- 2 DFS in  $G$  enthält keine Rückwärtskante.
- 3  $\forall (v, w) \in E : finishNum[v] > finishNum[w]$

## Beweis.

- $\neg(2) \Rightarrow \neg(1)$ : wenn Rückwärtskante  $(v, w)$  existiert, gibt es einen gerichteten Kreis ab Knoten  $w$  (und  $G$  ist kein DAG)
- $\neg(1) \Rightarrow \neg(2)$ : wenn es einen gerichteten Kreis gibt, ist mindestens eine von der DFS besuchte Kante dieses Kreises eine Rückwärtskante (Kante zu einem schon besuchten Knoten, dieser muss Vorfahr sein)



# Zusammenhang in Graphen

## Definition

Ein ungerichteter Graph heißt **zusammenhängend**, wenn es von jedem Knoten einen Pfad zu jedem anderen Knoten gibt.

Ein maximaler zusammenhängender induzierter Teilgraph wird als **Zusammenhangskomponente** bezeichnet.

Die Zusammenhangskomponenten eines ungerichteten Graphen können mit DFS oder BFS in  $O(n + m)$  bestimmt werden.

# Knoten-Zusammenhang

## Definition

Ein ungerichteter Graph  $G = (V, E)$  heißt  **$k$ -fach zusammenhängend** (oder genauer gesagt  $k$ -knotenzusammenhängend), falls

- $|V| > k$  und
- für jede echte Knotenteilmenge  $X \subset V$  mit  $|X| < k$  der Graph  $G - X$  zusammenhängend ist.

Bemerkung:

- “zusammenhängend” ist im wesentlichen gleichbedeutend mit “1-knotenzusammenhängend”

Ausnahme: Graph mit nur einem Knoten ist zusammenhängend, aber nicht 1-zusammenhängend

# Artikulationsknoten und Blöcke

## Definition

Ein Knoten  $v$  eines Graphen  $G$  heißt **Artikulationsknoten** (engl. *cut-vertex*), wenn sich die Anzahl der Zusammenhangskomponenten von  $G$  durch das Entfernen von  $v$  erhöht.

## Definition

Die **Zweifachzusammenhangskomponenten** eines Graphen sind die maximalen Teilgraphen, die 2-fach zusammenhängend sind.

Ein **Block** ist ein maximaler zusammenhängender Teilgraph, der keinen Artikulationsknoten enthält.

D.h. die Menge der Blöcke besteht aus den Zweifachzusammenhangskomponenten, den Brücken (engl. *cut edges*), sowie den isolierten Knoten.

# Blöcke und DFS

Modifizierte DFS nach R. E. Tarjan:

- **num**[ $v$ ]: DFS-Nummer von  $v$
- **low**[ $v$ ]: minimale Nummer **num**[ $w$ ] eines Knotens  $w$ , der von  $v$  aus über beliebig viele ( $\geq 0$ ) Baumkanten abwärts, evt. gefolgt von einer einzigen Rückwärtskante erreicht werden kann
  
- **low**[ $v$ ]: Minimum von
  - ▶ **num**[ $v$ ]
  - ▶ **low**[ $w$ ], wobei  $w$  ein Kind von  $v$  im DFS-Baum ist (**Baumkante**)
  - ▶ **num**[ $w$ ], wobei  $\{v, w\}$  eine **Rückwärtskante** ist

# Artikulationsknoten und DFS

## Lemma

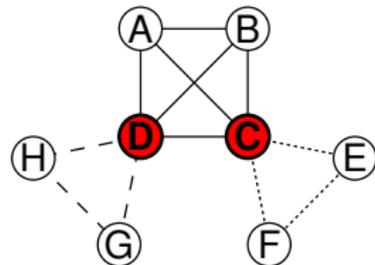
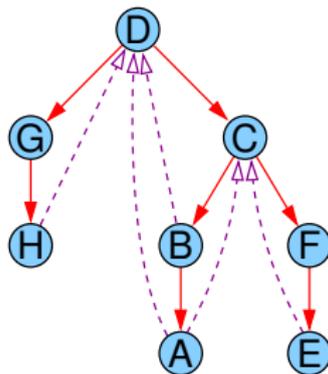
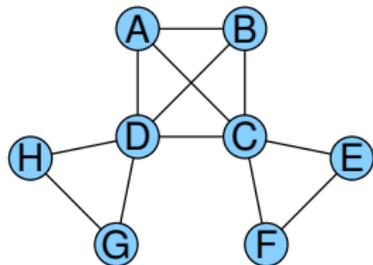
Sei  $G = (V, E)$  ein ungerichteter, zusammenhängender Graph und  $T$  ein DFS-Baum in  $G$ .

Ein Knoten  $a \in V$  ist genau dann ein Artikulationsknoten, wenn

- $a$  die Wurzel von  $T$  ist und mindestens 2 Kinder hat, oder
- $a$  nicht die Wurzel von  $T$  ist und es ein Kind  $b$  von  $a$  mit  $low[b] \geq num[a]$  gibt.

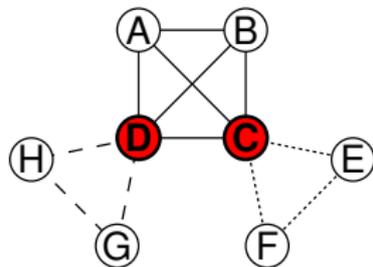
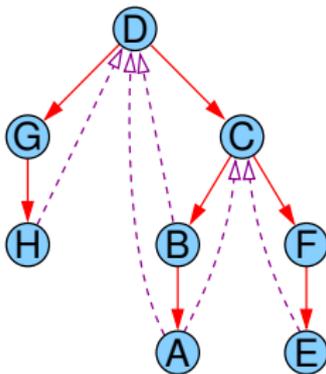
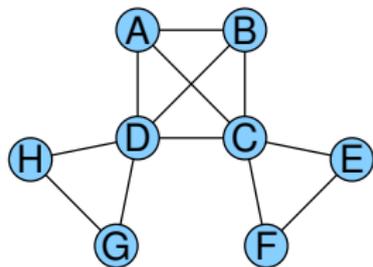
# Artikulationsknoten und Blöcke per DFS

- bei Aufruf der DFS für Knoten  $v$  wird  $\text{num}[v]$  bestimmt und  $\text{low}[v]$  mit  $\text{num}[v]$  initialisiert
- nach Besuch eines Nachbarknotens  $w$ : Update von  $\text{low}[v]$  durch Vergleich mit
  - ▶  $\text{low}[w]$  nach Rückkehr vom rekursiven Aufruf, falls  $(v, w)$  eine Baumkante war
  - ▶  $\text{num}[w]$ , falls  $(v, w)$  eine Rückwärtskante war



# Artikulationsknoten und Blöcke per DFS

- Kanten werden auf einem anfangs leeren Stack gesammelt
- Baumkanten kommen vor dem rekursiven Aufruf auf den Stack
- Rückwärtskanten werden direkt auf den Stack gelegt
- nach Rückkehr von einem rekursiven Aufruf werden im Fall  $low[w] \geq num[v]$  die obersten Kanten vom Stack bis einschließlich der Baumkante  $\{v, w\}$  entfernt und bilden den nächsten Block



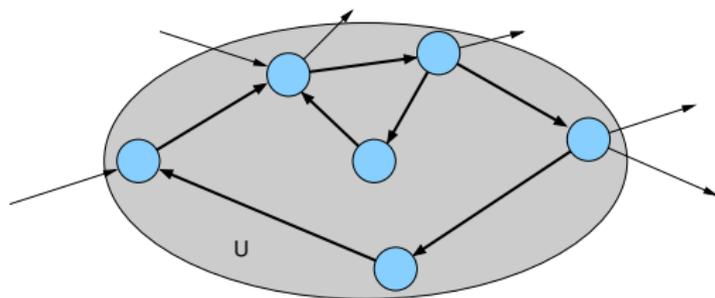
# Starke Zusammenhangskomponenten

## Definition

Sei  $G = (V, E)$  ein gerichteter Graph.

Knotenteilmenge  $U \subseteq V$  heißt **stark zusammenhängend** genau dann, wenn für alle  $u, v \in U$  ein gerichteter Pfad von  $u$  nach  $v$  in  $G$  existiert.

Für Knotenteilmenge  $U \subseteq V$  heißt der induzierte Teilgraph  $G[U]$  **starke Zusammenhangskomponente** von  $G$ , wenn  $U$  stark zusammenhängend und (inklusions-)maximal ist.



# Starke Zusammenhangskomponenten

Beobachtungen:

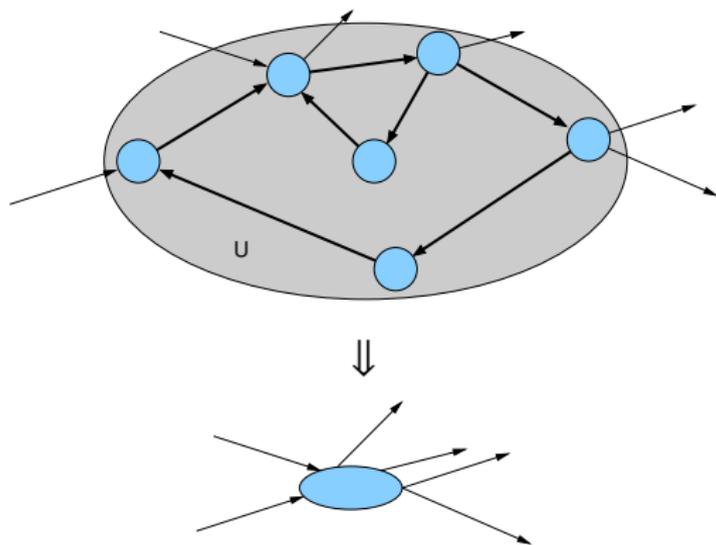
- Knoten  $x, y \in V$  sind stark zusammenhängend, falls beide Knoten auf einem gemeinsamen gerichteten Kreis liegen (oder  $x = y$ ).
- Die starken Zusammenhangskomponenten bilden eine Partition der Knotenmenge.

(im Gegensatz zu 2-Zhk. bei ungerichteten Graphen, wo nur die Kantenmenge partitioniert wird, sich aber zwei verschiedene 2-Zhk. in einem Knoten überlappen können)

# Starke Zusammenhangskomponenten

Beobachtungen:

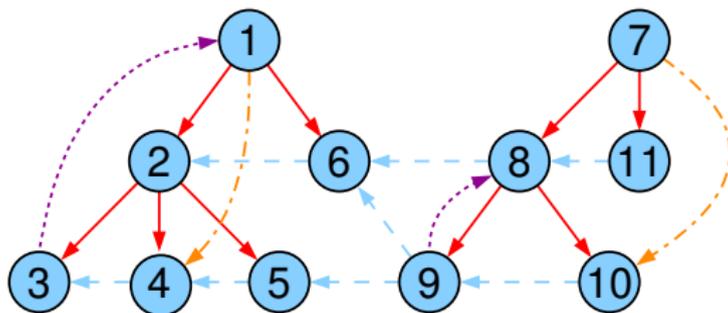
- Schrumpft man alle starken Zusammenhangskomponenten zu einzelnen (Super-)Knoten, ergibt sich ein DAG.



# Starke Zhk. und DFS / Variante 1

## Modifizierte DFS nach R. E. Tarjan

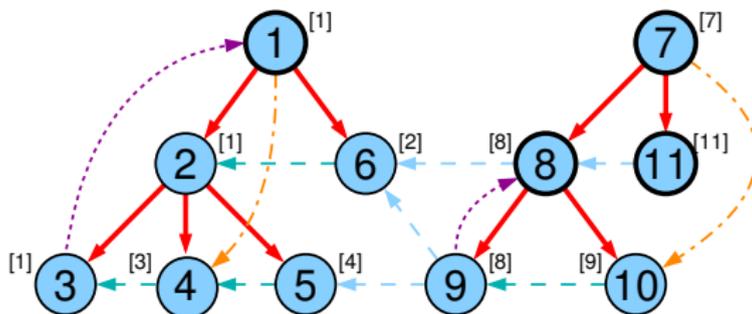
- **num**[ $v$ ]: DFS-Nummer von  $v$
- In einer starken Zhk. heißt der Knoten mit kleinster DFS-Nummer Wurzel der starken Zhk.
- **low**[ $v$ ]: minimales **num**[ $w$ ] eines Knotens  $w$ , der von  $v$  aus über beliebig viele ( $\geq 0$ ) Baumkanten abwärts, evt. gefolgt von einer einzigen Rückwärtskante oder einer Querkante zu einer ZHK, deren Wurzel echter Vorfahre von  $v$  ist, erreicht werden kann



# Starke Zhk. und DFS / Variante 1

## Modifizierte DFS nach R. E. Tarjan

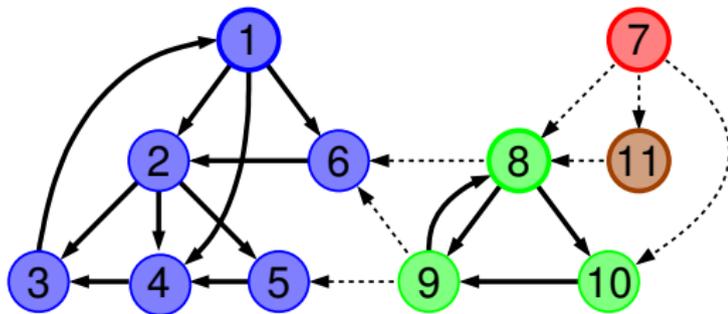
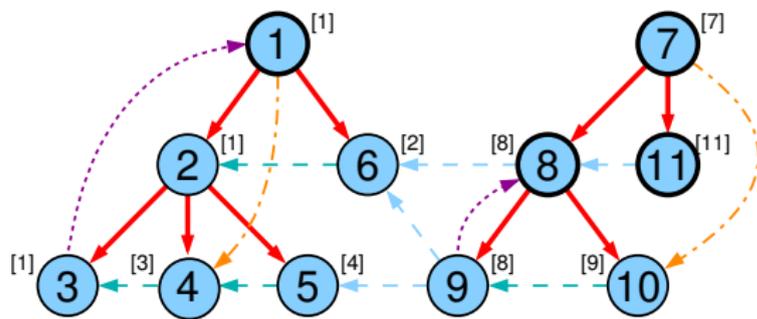
- $low[v]$ : Minimum von
  - ▶  $num[v]$
  - ▶  $low[w]$ , wobei  $w$  ein Kind von  $v$  im DFS-Baum ist (**Baumkante**)
  - ▶  $num[w]$ , wobei  $\{v, w\}$  eine **Rückwärtskante** ist
  - ▶  $num[w]$ , wobei  $\{v, w\}$  eine **Querkante** ist und die Wurzel der starken Zusammenhangskomponente von  $w$  ist Vorfahre von  $v$



# Starke Zhk. und DFS / Variante 1

Modifizierte DFS nach R. E. Tarjan

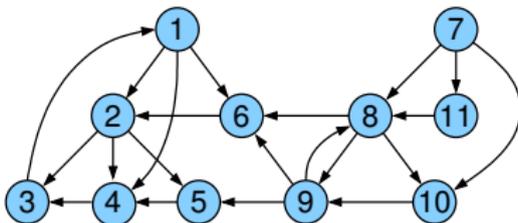
- Knoten  $v$  ist genau dann Wurzel einer starken Zusammenhangskomponente, wenn  $num[v] = low[v]$



# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Idee:

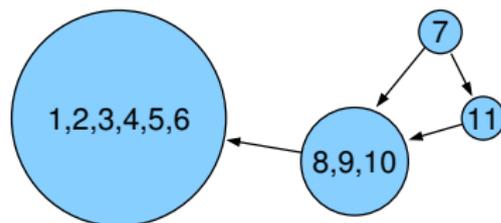
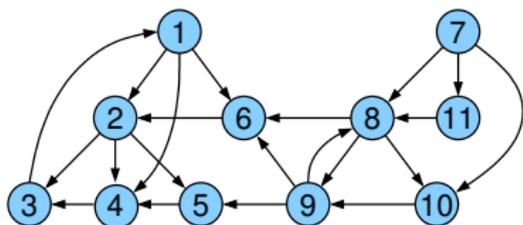
- beginne mit Graph ohne Kanten, jeder Knoten ist eigene SCC
  - füge nach und nach einzelne Kanten ein
- ⇒ aktueller (current) Graph  $G_c = (V, E_c)$
- Update der starken Zusammenhangskomponenten (SCCs)



# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

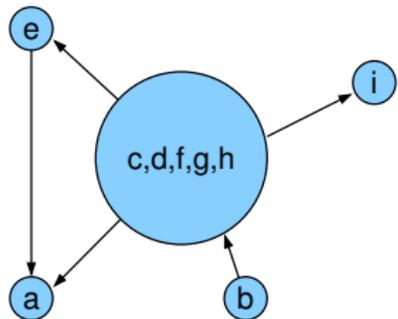
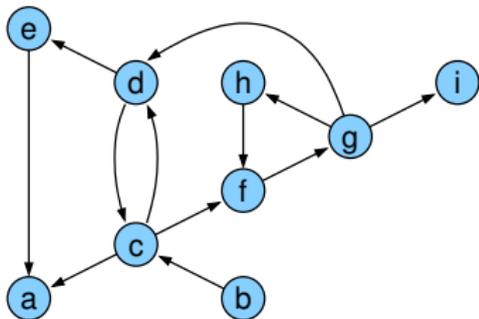
Idee:

- betrachte geschrumpften (shrunken) Graph  $G_c^s$ :  
Knoten entsprechen SCCs von  $G_c$ , Kante  $(C, D)$  genau dann, wenn es Knoten  $u \in C$  und  $v \in D$  mit  $(u, v) \in E_c$  gibt
- geschrumpfter Graph  $G_c^s$  ist ein DAG
- Ziel: Aktualisierung des geschrumpften Graphen beim Einfügen



# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Geschrumpfter Graph  
(Beispiel aus Mehlhorn / Sanders)



## Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Update des geschrumpften Graphen nach Einfügen einer Kante:

3 Möglichkeiten:

- beide Endpunkte gehören zu derselben SCC  
⇒ geschrumpfter Graph unverändert
  
- Kante verbindet Knoten aus zwei verschiedenen SCCs, aber schließt keinen Kreis  
⇒ SCCs im geschrumpften Graph unverändert, aber eine Kante wird im geschrumpften Graph eingefügt (falls nicht schon vorhanden)
  
- Kante verbindet Knoten aus zwei verschiedenen SCCs und schließt einen oder mehrere Kreise  
⇒ alle SCCs, die auf einem der Kreise liegen, werden zu einer einzigen SCC verschmolzen

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Prinzip:

- Tiefensuche

$V_c$  schon markierte (entdeckte) Knoten

$E_c$  schon gefundene Kanten

- 3 Arten von SCC: unentdeckt, offen, geschlossen

- unentdeckte Knoten haben Ein- / Ausgangsgrad Null in  $G_c$

⇒ zunächst bildet jeder Knoten eine eigene **unentdeckte** SCC, andere SCCs enthalten nur markierte Knoten

- SCCs mit mindestens einem aktiven Knoten (ohne finishNum) heißen **offen**

- SCC heißt **geschlossen**, falls sie nur fertige Knoten (mit finishNum) enthält

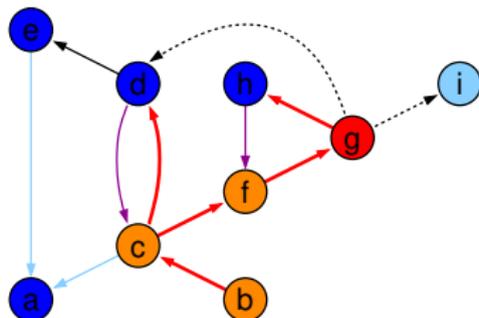
- Knoten in offenen / geschlossenen SCCs heißen offen / geschlossen

## Starke Zhk. und DFS / Variante 2

- Knoten in geschlossenen SCCs sind immer fertig (mit finishNum)
- Knoten in offenen SCCs können fertig oder noch aktiv (ohne finishNum) sein
- **Repräsentant** einer SCC: Knoten mit kleinster dfsNum

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

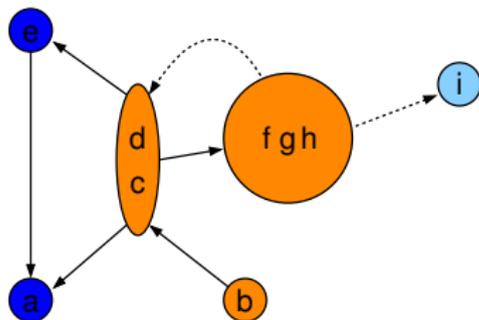
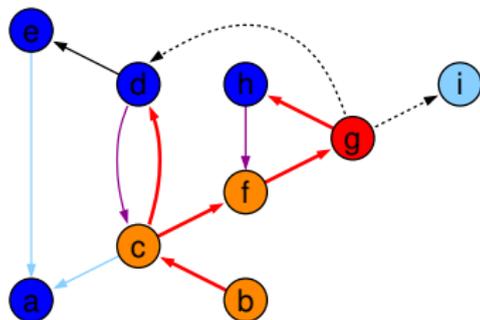
DFS-Snapshot:



- erste DFS startete bei Knoten  $a$ , zweite bei  $b$
- aktueller Knoten ist  $g$ , auf dem Stack liegen  $b, c, f, g$
- $(g, d)$  und  $(g, i)$  wurden noch nicht exploriert
- $(d, c)$  und  $(h, f)$  sind Rückwärtskanten
- $(c, a)$  und  $(e, a)$  sind Querkanten
- $(b, c)$ ,  $(c, d)$ ,  $(c, f)$ ,  $(f, g)$  und  $(g, h)$  sind Baumkanten

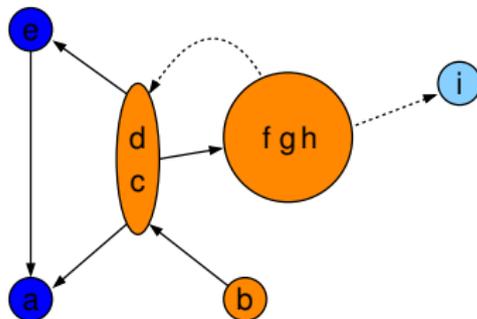
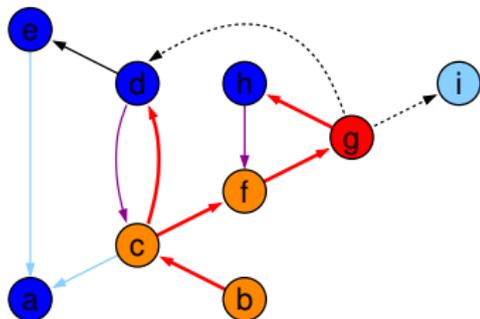
# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

DFS-Snapshot mit geschrumpftem Graph:



- unentdeckt:  $\{i\}$     offen:  $\{b\}, \{c, d\}, \{f, g, h\}$     geschlossen:  $\{a\}, \{e\}$
- offene SCCs bilden Pfad im geschrumpften Graph
- aktueller Knoten gehört zur letzten SCC
- offene Knoten wurden in Reihenfolge  $b, c, d, f, g, h$  erreicht und werden von den Repräsentanten  $b, c$  und  $f$  genau in die offenen SCCs partitioniert

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2



Beobachtungen (Invarianten für  $G_c$ ):

- 1 Pfade aus **geschlossenen** Knoten / SCCs führen immer zu **geschlossenen** Knoten / SCCs
- 2 Pfad zum aktuellen Knoten enthält die **Repräsentanten** aller **offenen** SCCs  
offene Komponenten bilden **Pfad** im geschrumpften Graph
- 3 Knoten der offenen SCCs in Reihenfolge der DFS-Nummern werden durch Repräsentanten in die offenen SCCs **partitioniert**

## Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Geschlossene SCCs von  $G_c$  sind auch SCCs in  $G$ :

- Sei  $v$  geschlossener Knoten und  $S / S_c$  seine SCC in  $G / G_c$ .
- zu zeigen:  $S = S_c$
- $G_c$  ist Subgraph von  $G$ , also  $S_c \subseteq S$
- somit zu zeigen:  $S \subseteq S_c$

- Sei  $w$  ein Knoten in  $S$ .

⇒ ∃ Kreis  $C$  durch  $v$  und  $w$ .

- Invariante 1: alle Knoten von  $C$  sind geschlossen und somit erledigt (alle ausgehenden Kanten exploriert)
- $C$  ist in  $G_c$  enthalten, also  $w \in S_c$
- damit gilt  $S \subseteq S_c$ , also  $S = S_c$

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

## Vorgehen:

- Invarianten 2 und 3 helfen bei Verwaltung der offenen SCCs
- Knoten in offenen SCCs auf Stack **oNodes**  
(in Reihenfolge steigender dfsNum)
- Repräsentanten der offenen SCCs auf Stack **oReps**
- zu Beginn Invarianten gültig (alles leer)
- vor Markierung einer neuen Wurzel sind alle markierten Knoten erledigt, also keine offenen SCCs, beide Stacks leer  
dann: neue offene SCC für neue Wurzel  $s$ ,  
 $s$  kommt auf beide Stacks

## Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Prinzip: betrachte Kante  $e = (v, w)$

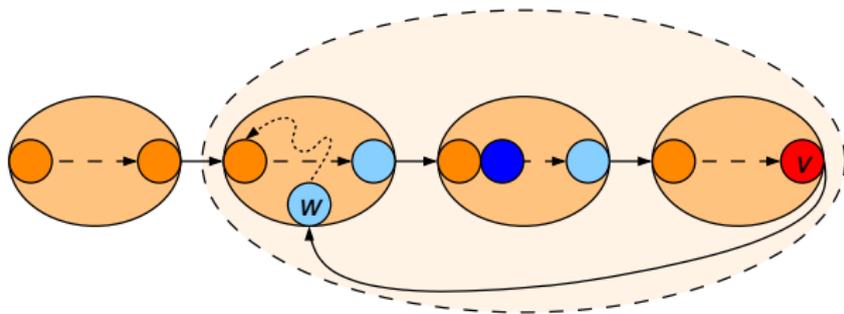
- Kante zu unbekanntem Knoten  $w$  (Baumkante):  
neue eigene offene SCC für  $w$  ( $w$  kommt auf `oNodes` und `oReps`)
- Kante zu Knoten  $w$  in geschlossener SCC (Nicht-Baumkante):  
von  $w$  gibt es keinen Weg zu  $v$ , sonst wäre die SCC von  $w$  noch nicht geschlossen (geschlossene SCCs sind bereits komplett), also SCCs unverändert
- Kante zu Knoten  $w$  in offener SCC (Nicht-Baumkante):  
falls  $v$  und  $w$  in unterschiedlichen SCCs liegen, müssen diese mit allen SCCs dazwischen zu einer einzigen SCC verschmolzen werden (durch Löschen der Repräsentanten)

Wenn Knoten keine ausgehenden Kanten mehr hat:

- Knoten fertig
- wenn Knoten Repräsentant seiner SCC ist, dann SCC schließen

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Vereinigung offener SCCs im Kreisfall:



- offene SCC entsprechen Ovalen, Knoten sortiert nach dfsNum
  - alle Repräsentanten offener SCCs liegen auf Baumpfad zum aktuellen Knoten  $v$  in SCC  $S_k$
  - Nicht-Baumkante  $(v, w)$  endet an Knoten  $w$  in offener SCC  $S_i$  mit Repräsentant  $r_i$
  - Pfad von  $w$  nach  $r_i$  muss existieren (innerhalb SCC  $S_i$ )
- ⇒ Kante  $(v, w)$  vereinigt  $S_i, \dots, S_k$

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

- `init()` {  
    `component = new int[n];`  
    `oReps = <>;`  
    `oNodes = <>;`  
    `dfsCount = 1;`  
}
  
- `root(Node w) / traverseTreeEdge(Node v, Node w)` {  
    `oReps.push(w);`     // Repräsentant einer neuen ZHK  
    `oNodes.push(w);`     // neuer offener Knoten  
    `dfsNum[w] = dfsCount;`  
    `dfsCount++;`  
}

## Starke Zhk. und DFS / Variante 2

- **traverseNonTreeEdge**(Node v, Node w) {  
    if ( $w \in oNodes$ )     // verschmelze SCCs  
        while ( $dfsNum[w] < dfsNum[oReps.top()]$ )  
            oReps.pop();  
}
  
- **backtrack**(Node u, Node v) {  
    if ( $v == oReps.top()$ ) { // v Repräsentant?  
        oReps.pop(); // ja: entferne v  
        do { // und offene Knoten bis v  
            w = oNodes.pop();  
            component[w] = v;  
        } while ( $w \neq v$ );  
    }  
}

# Starke Zhk. und DFS / Variante 2

Zeit:  $O(n + m)$

Begründung:

- **init, root:**  $O(1)$
- **traverseTreeEdge:**  $(n - 1) \times O(1)$
- **backtrack, traverseNonTreeEdge:**  
da jeder Knoten höchstens einmal in `oReps` und `oNodes` landet,  
insgesamt  $O(n + m)$
- **DFS-Gerüst:**  $O(n + m)$
- **gesamt:**  $O(n + m)$

# Übersicht

- 9 Graphen
  - Netzwerke und Graphen
  - Graphrepräsentation
  - Graphtraversierung
  - **Kürzeste Wege**
  - Minimale Spannbäume

# Kürzeste Wege

Zentrale Frage: Wie kommt man am schnellsten von A nach B?

# Kürzeste Wege

Zentrale Frage: Wie kommt man am schnellsten von A nach B?

Fälle:

- Kantenkosten 1
- DAG, beliebige Kantenkosten
- beliebiger Graph, positive Kantenkosten
- beliebiger Graph, beliebige Kantenkosten

# Kürzeste-Wege-Problem

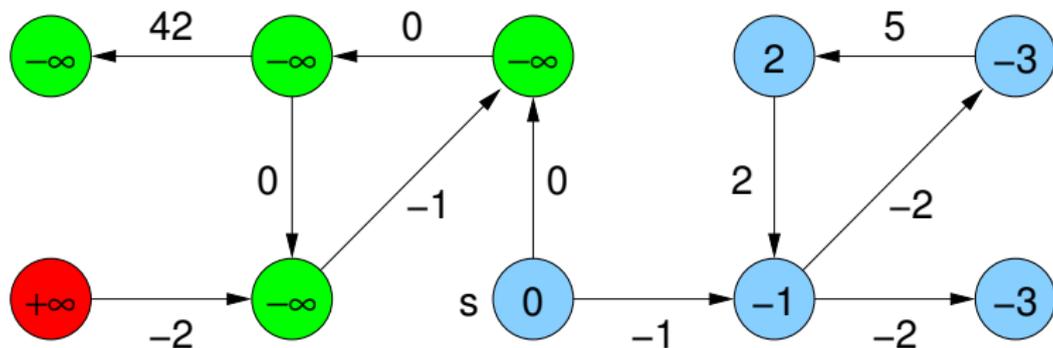
gegeben:

- gerichteter Graph  $G = (V, E)$
- Kantenkosten  $c : E \mapsto \mathbb{R}$

2 Varianten:

- SSSP (single source shortest paths):  
kürzeste Wege von einer Quelle zu allen anderen Knoten
- APSP (all pairs shortest paths):  
kürzeste Wege zwischen allen Paaren

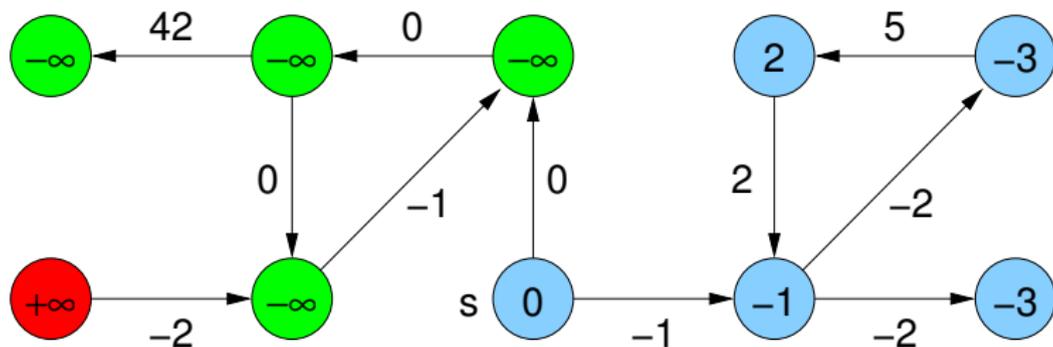
# Distanzen



$\mu(s, v)$ : Distanz von  $s$  nach  $v$

$$\mu(s, v) = \begin{cases} +\infty & \text{kein Weg von } s \text{ nach } v \\ -\infty & \text{Weg beliebig kleiner Kosten von } s \text{ nach } v \\ \min\{c(p) : p \text{ ist Weg von } s \text{ nach } v\} & \end{cases}$$

# Distanzen



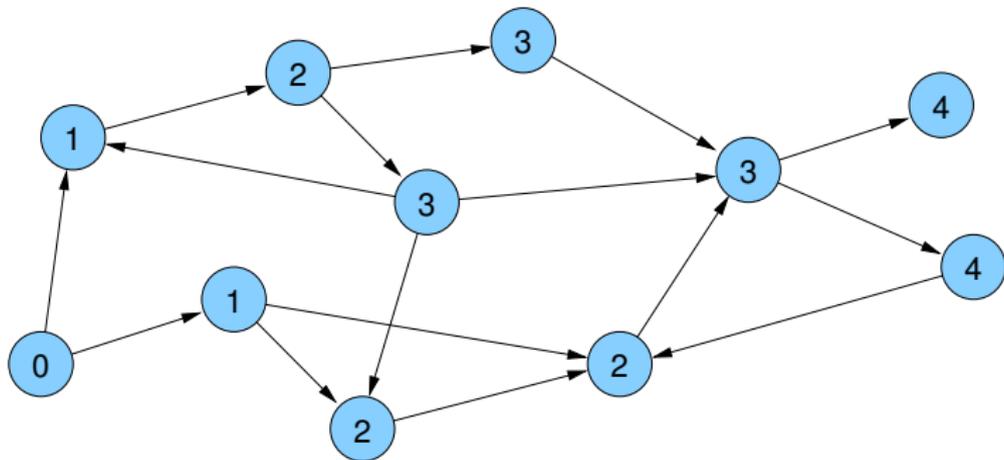
Wann sind die Kosten  $-\infty$ ?

wenn es einen **Kreis mit negativer Gewichtssumme** gibt  
(hinreichende und notwendige Bedingung)

# Kürzeste Wege bei uniformen Kantenkosten

Graph mit Kantenkosten 1:

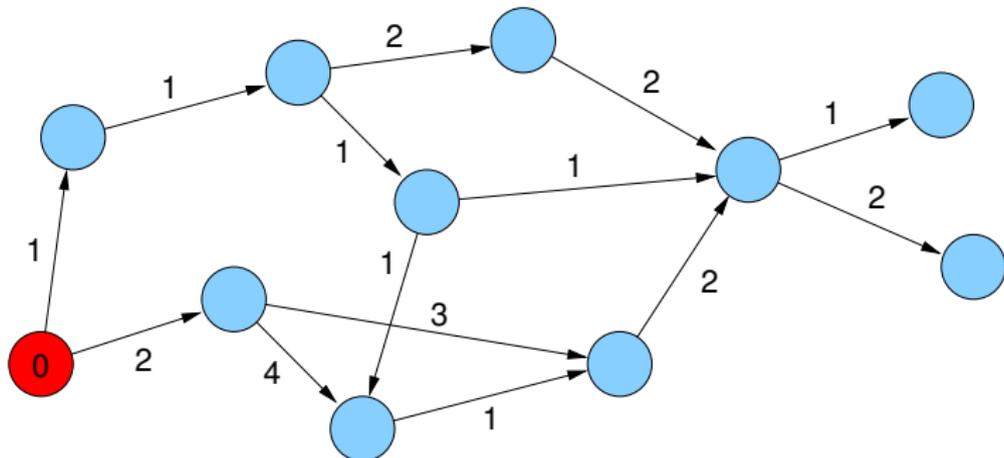
⇒ Breitensuche (BFS)



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

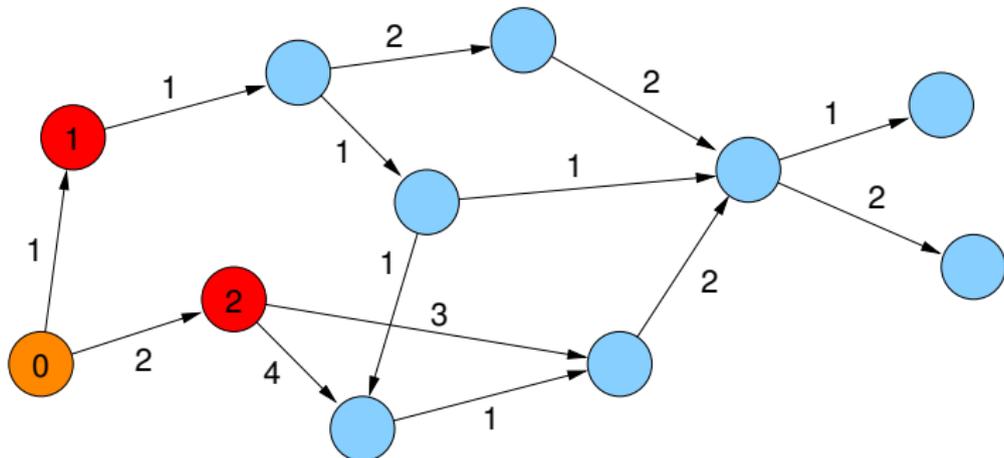
Einfache Breitensuche funktioniert nicht.



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

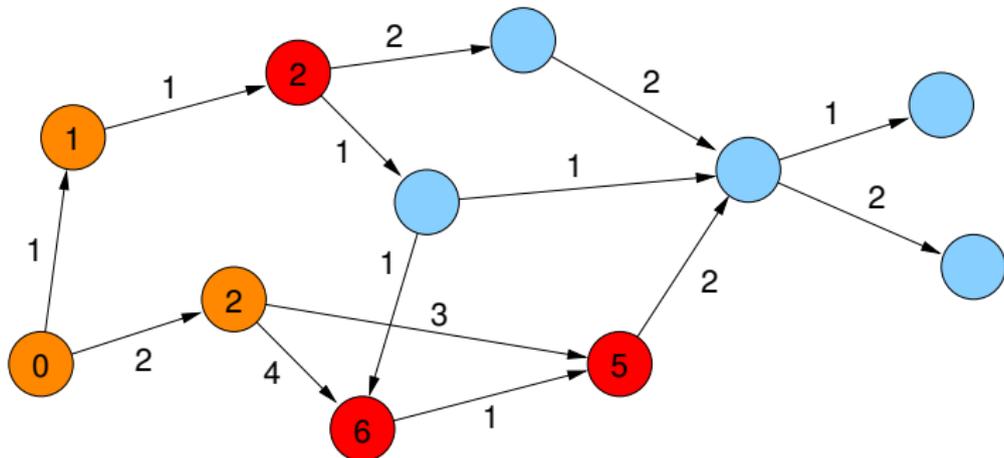
Einfache Breitensuche funktioniert nicht.



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

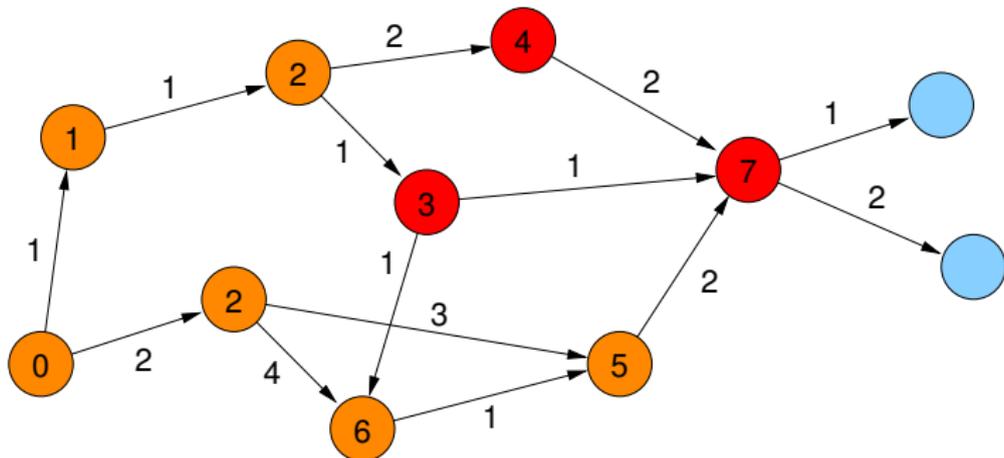
Einfache Breitensuche funktioniert nicht.



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

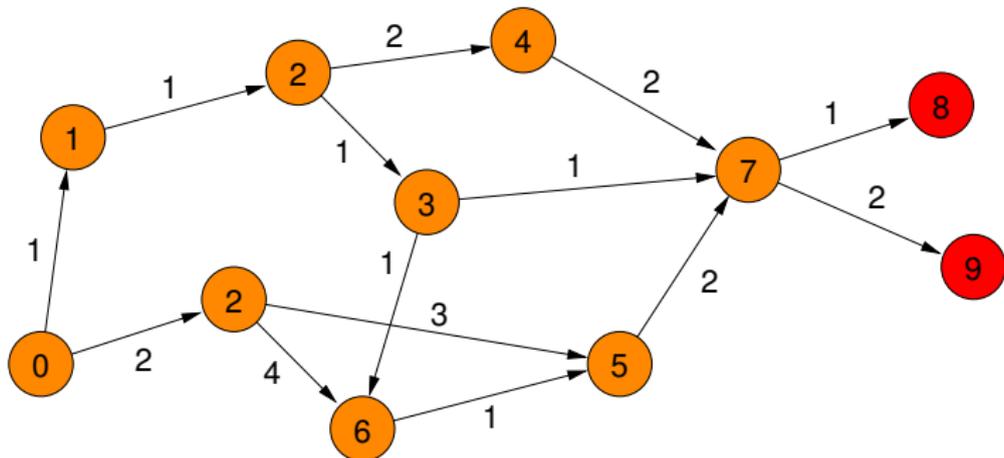
Einfache Breitensuche funktioniert nicht.



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

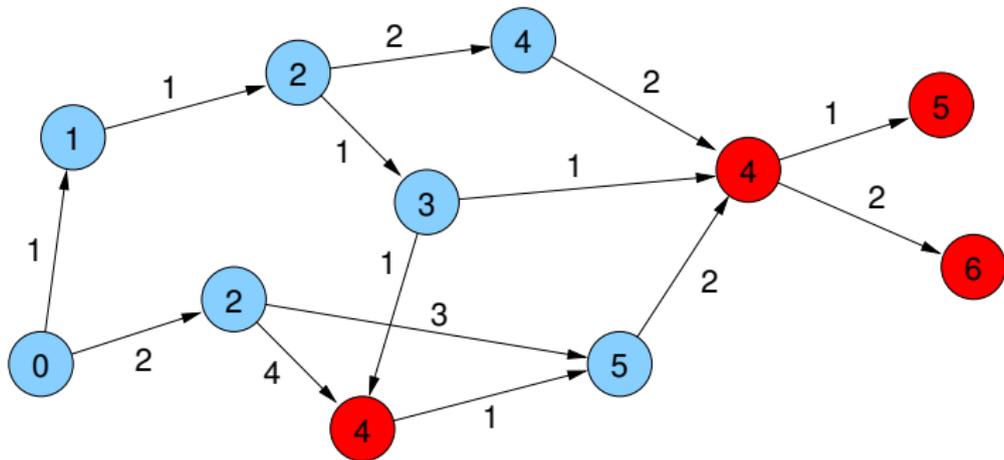
Einfache Breitensuche funktioniert nicht.



# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Einfache Breitensuche funktioniert nicht.

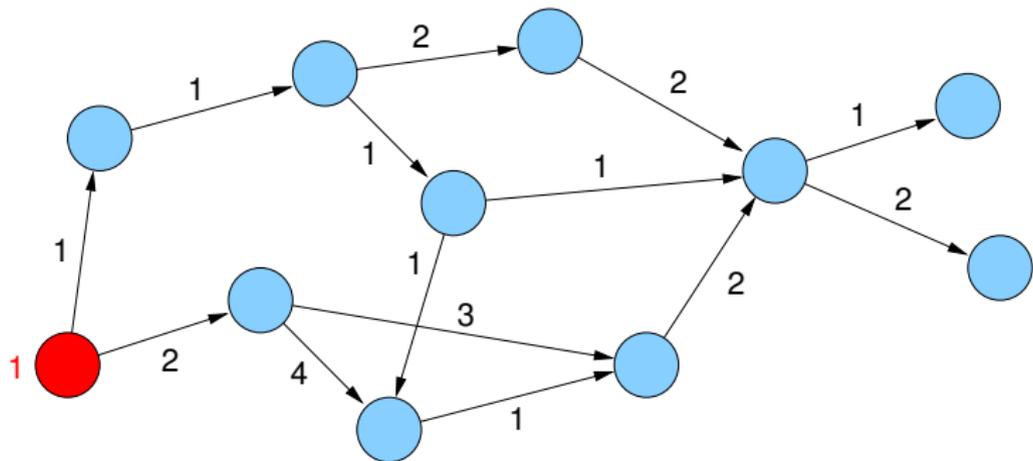


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es **topologische Sortierung**

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

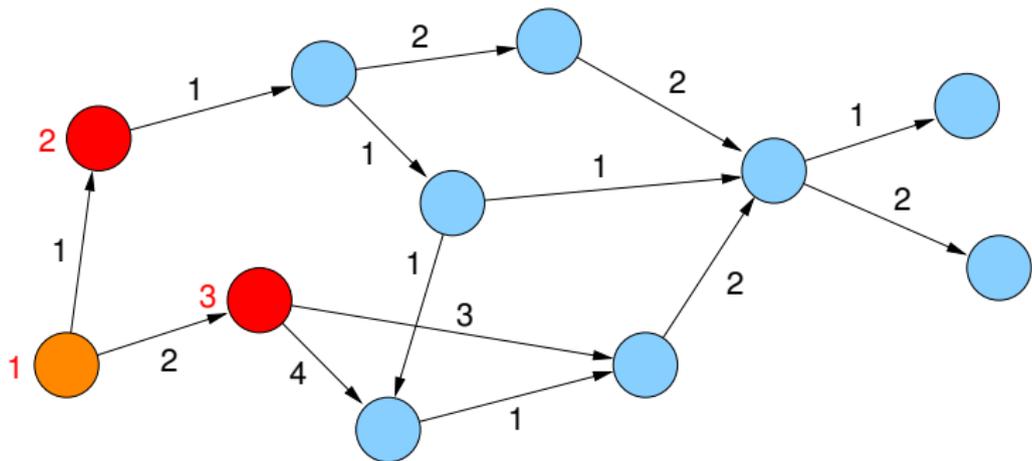


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

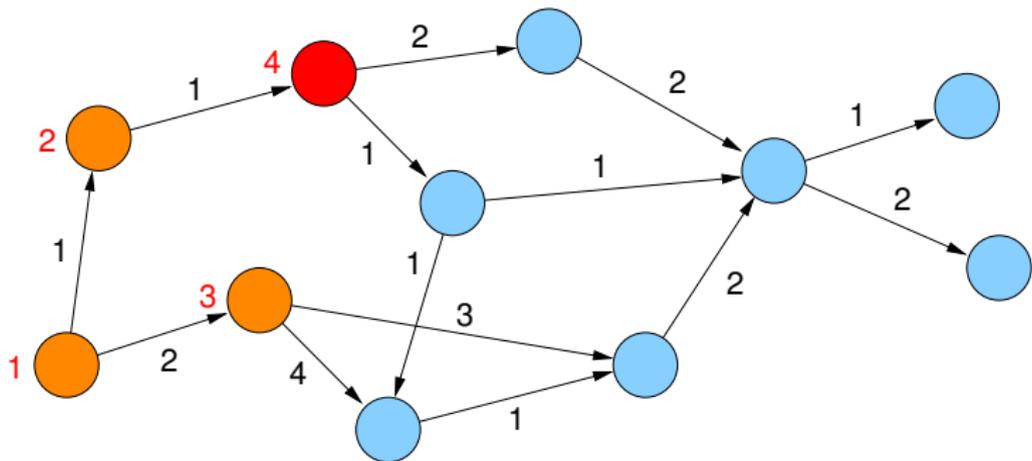


# Topologische Sortierung in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

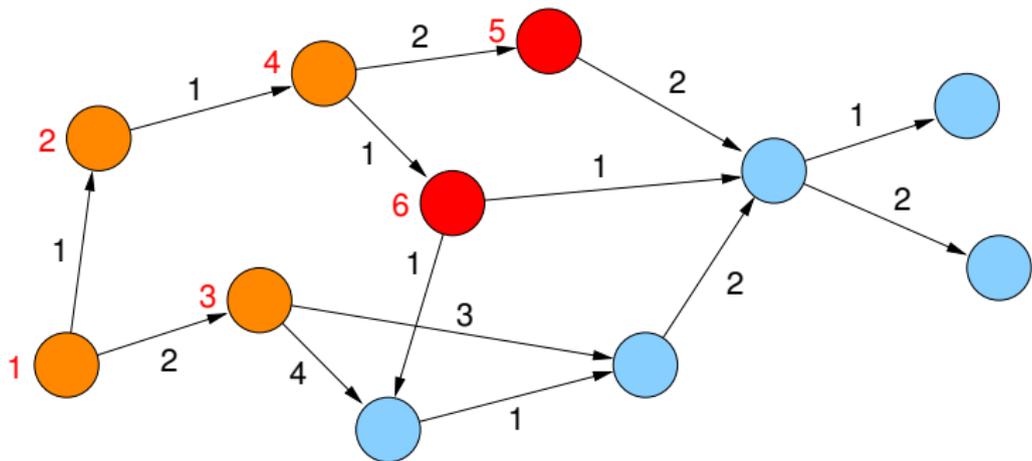


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

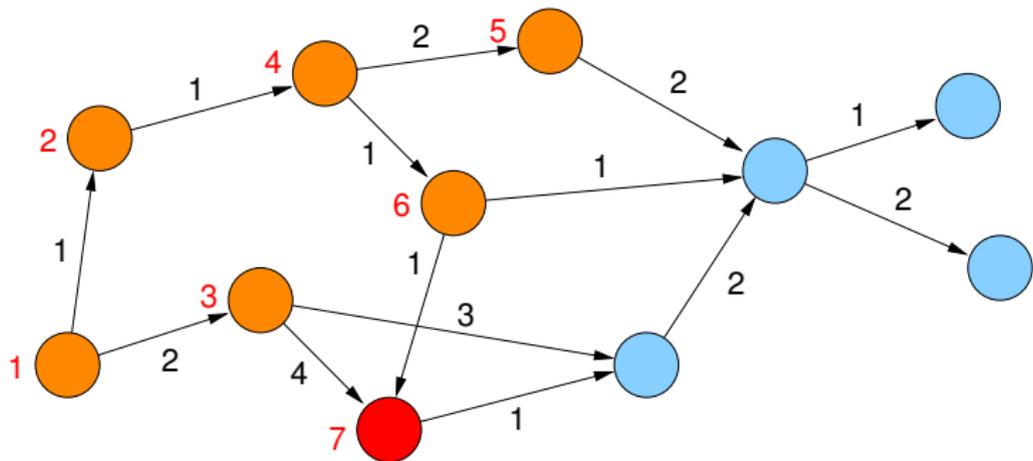


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

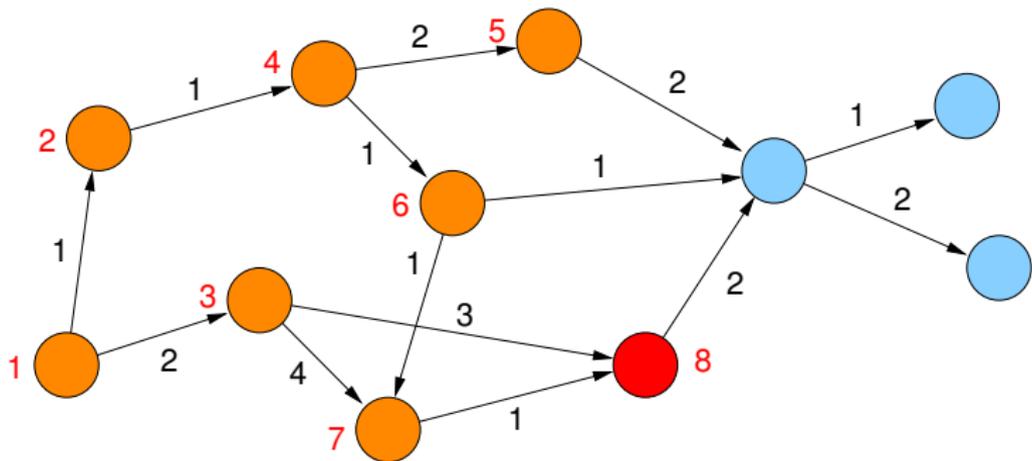


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

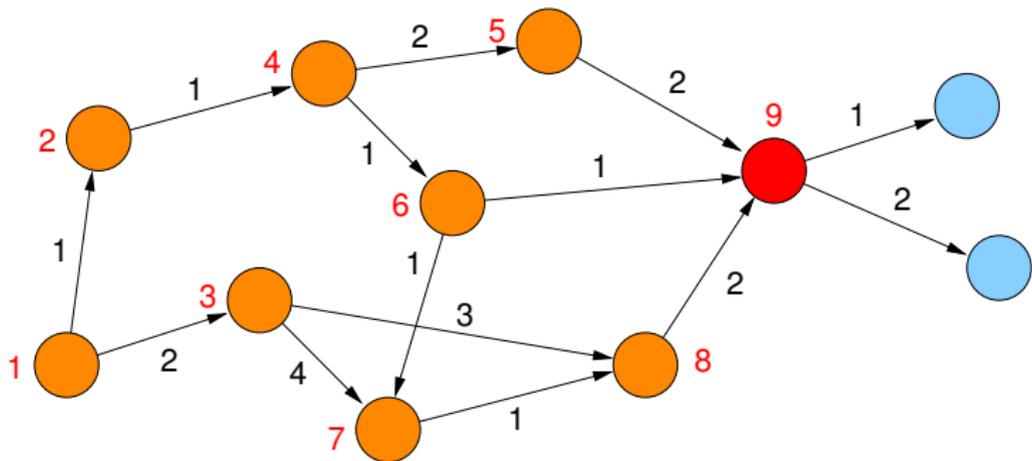


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

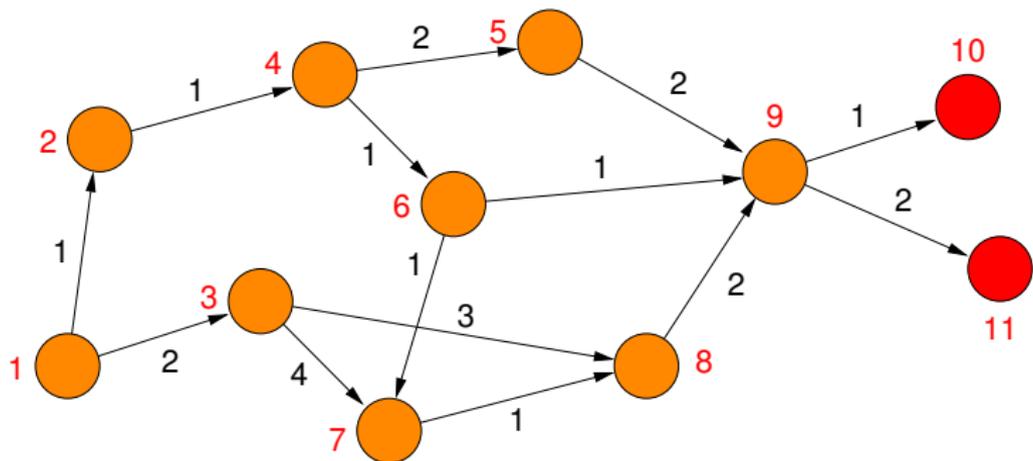


# Topologische Sortierung in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie: in DAGs gibt es topologische Sortierung

(für alle Kanten  $e=(v,w)$  gilt  $\text{topoNum}(v) < \text{topoNum}(w)$ )

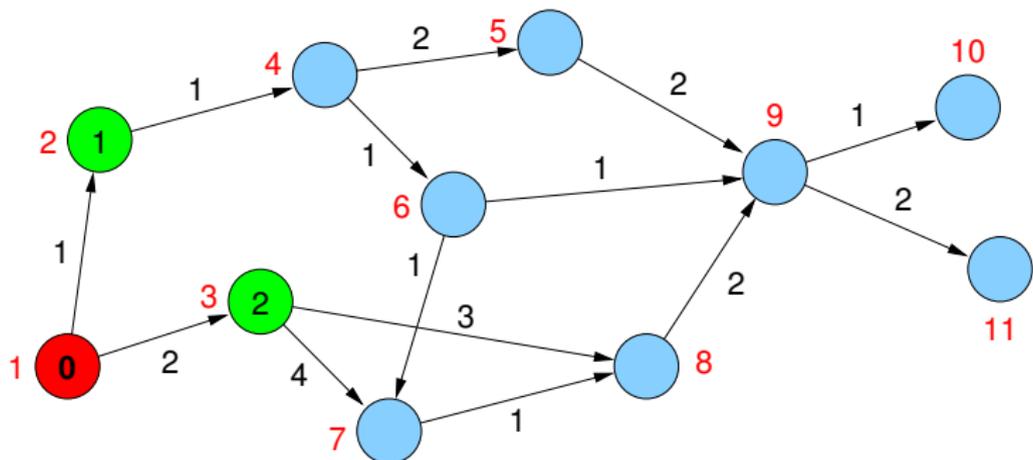


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

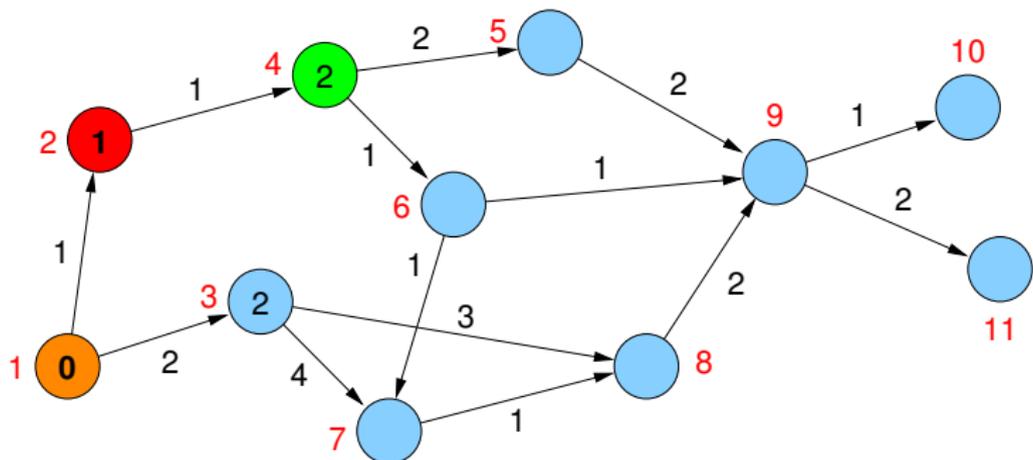


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

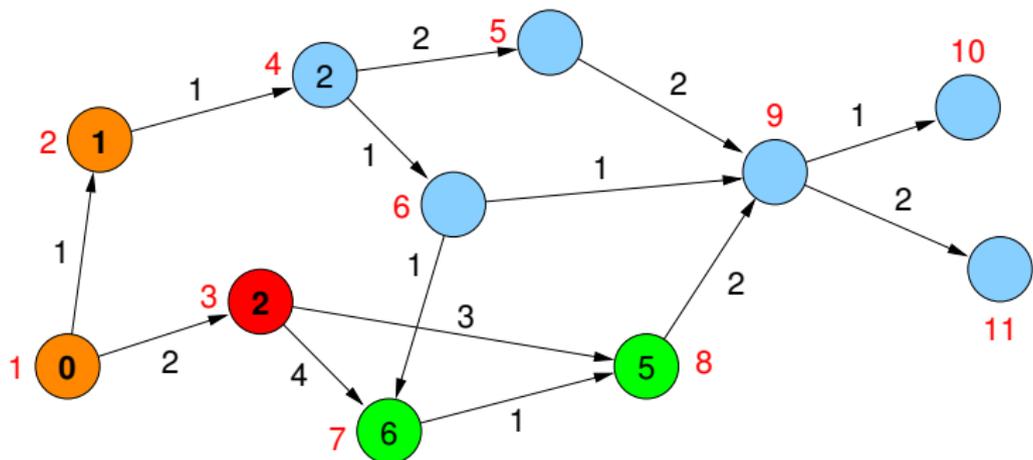


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

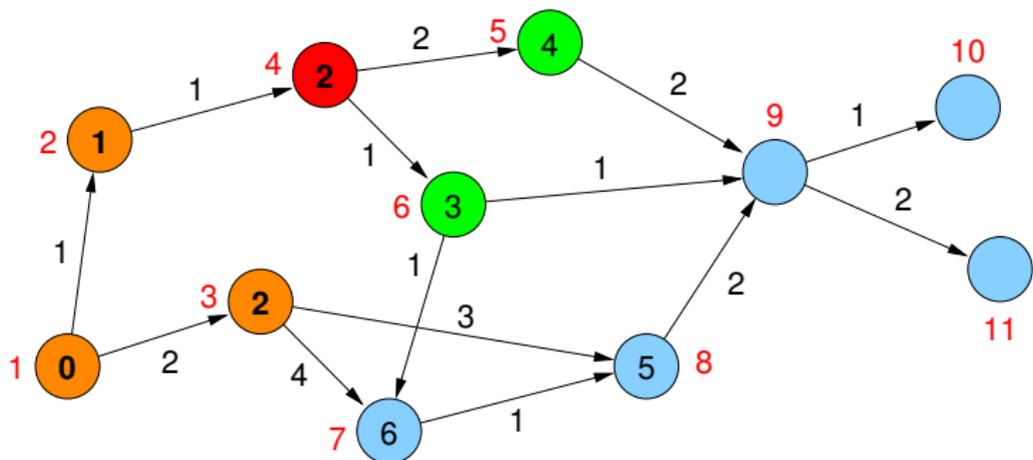


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

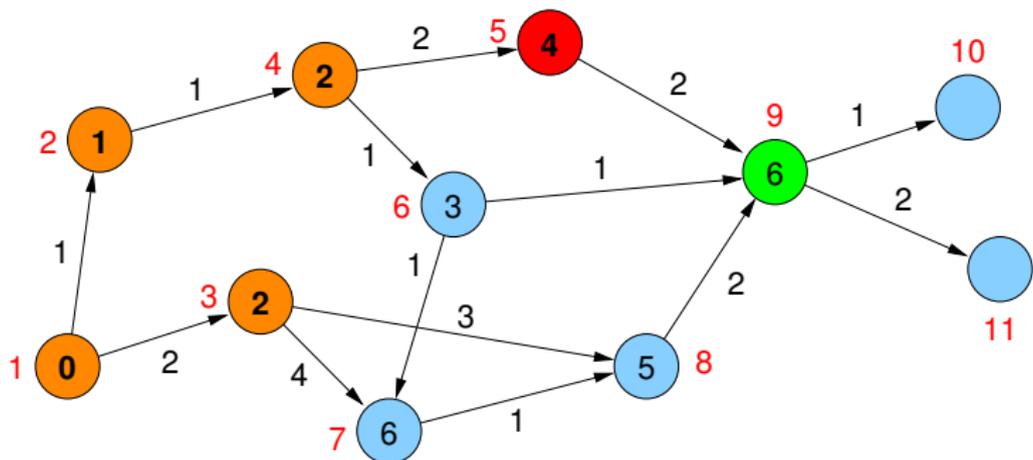


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

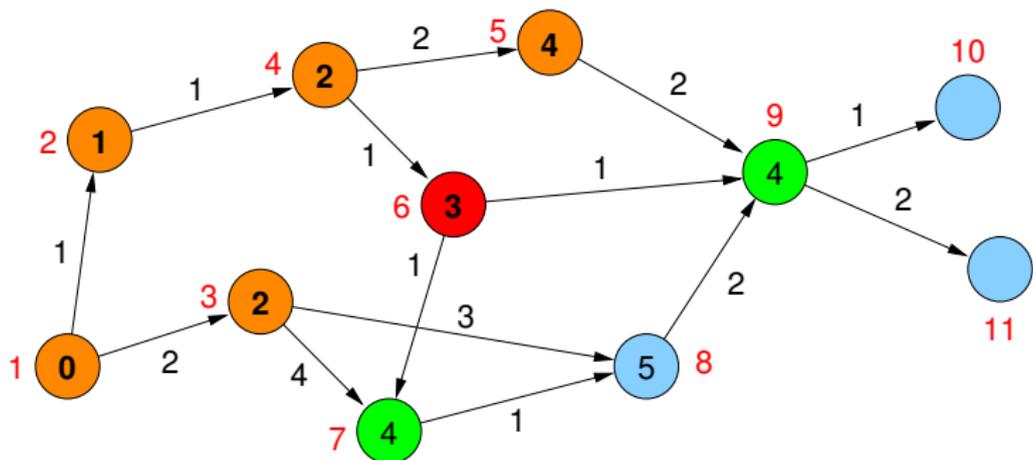


# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

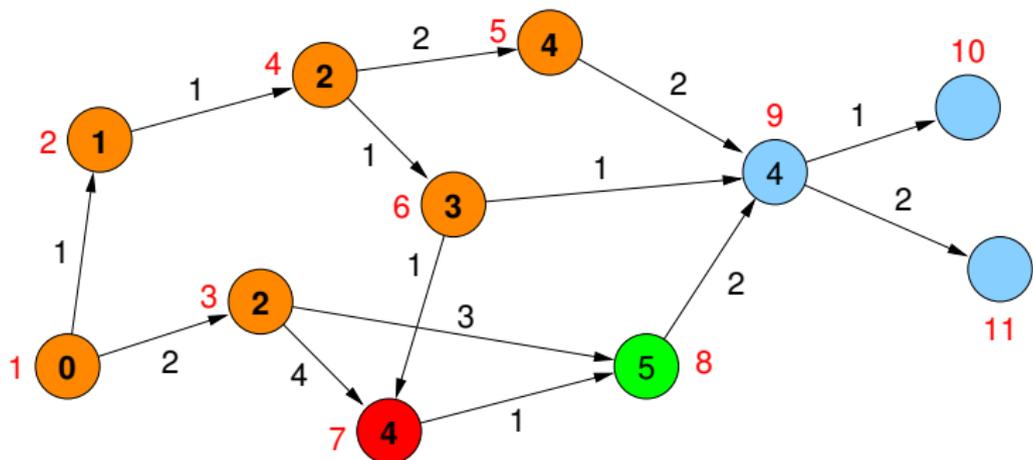


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

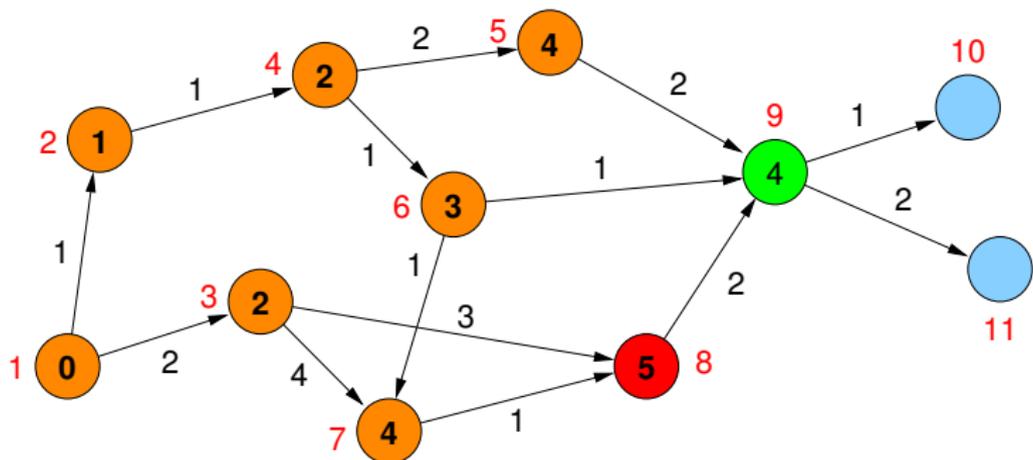


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

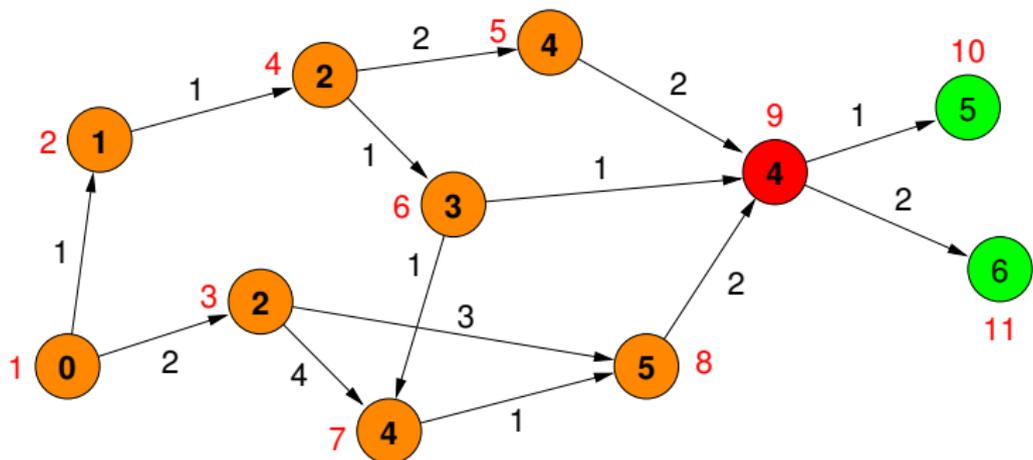


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

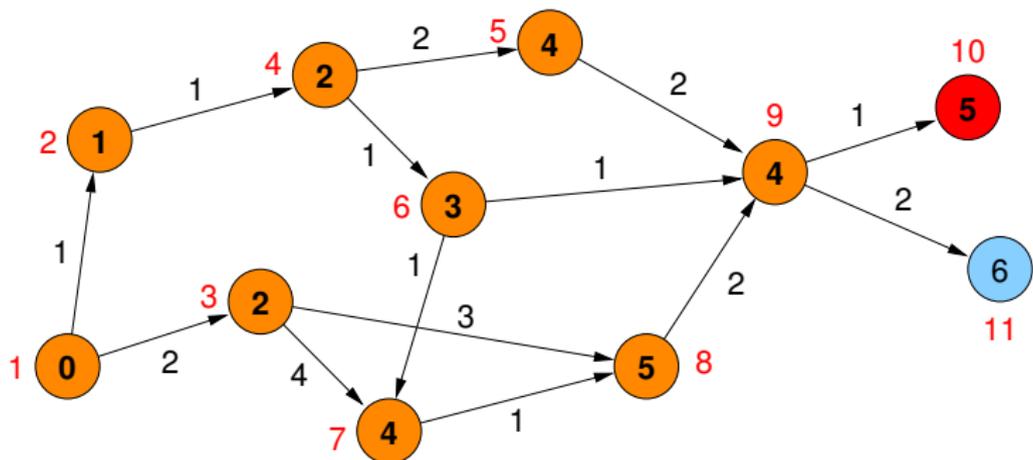


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte

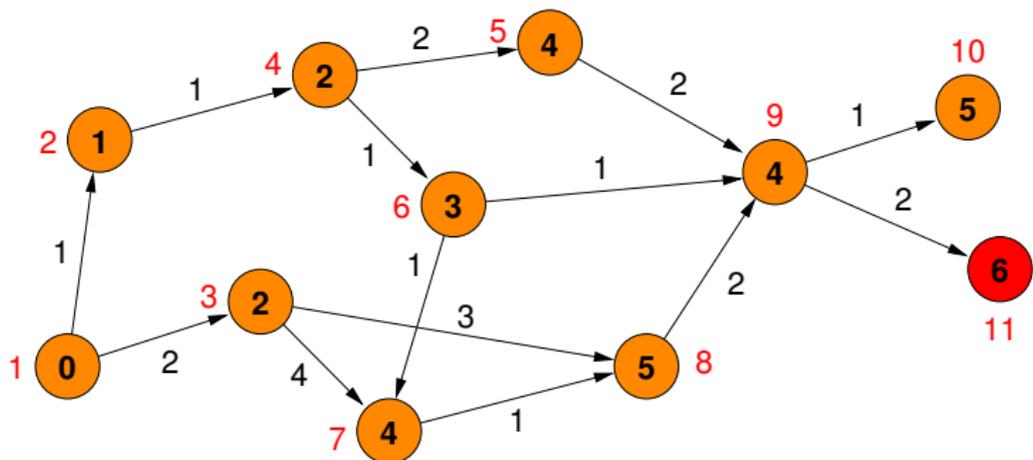


# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

Strategie:

- betrachte Knoten in Reihenfolge der topologischen Sortierung
- aktualisiere Distanzwerte



# Kürzeste Wege in DAGs

## Beliebige Kantengewichte in DAGs

### Topologische Sortierung – warum funktioniert das?

- betrachte einen kürzesten Weg von  $s$  nach  $v$
- der ganze Pfad beachtet die topologische Sortierung
- d.h., die Distanzen werden in der Reihenfolge der Knoten vom Anfang des Pfades zum Ende hin betrachtet
- damit ergibt sich für  $v$  der richtige Distanzwert
  
- ein Knoten  $x$  kann auch nie einen Wert erhalten, der echt kleiner als seine Distanz zu  $s$  ist
- die Kantenfolge von  $s$  zu  $x$ , die jeweils zu den Distanzwerten an den Knoten geführt hat, wäre dann ein kürzerer Pfad (Widerspruch)

# Kürzeste Wege in DAGs

Beliebige Kantengewichte in DAGs

Allgemeine Strategie:

- Anfang: setze  $d(s) = 0$  und für alle anderen Knoten  $v$  setze  $d(v) = \infty$
- besuche Knoten in einer Reihenfolge, die sicherstellt, dass **mindestens ein** kürzester Weg von  $s$  zu jedem  $v$  in der Reihenfolge seiner Knoten besucht wird
- für jeden besuchten Knoten  $v$  aktualisiere die Distanzen der Knoten  $w$  mit  $(v, w) \in E$ , d.h. setze

$$d(w) = \min\{ d(w), d(v) + c(v, w) \}$$

# Kürzeste Wege in DAGs

## Topologische Sortierung

- verwende **FIFO-Queue  $q$**
- verwalte für jeden Knoten einen **Zähler für die noch nicht markierten eingehenden Kanten**
- initialisiere  $q$  mit allen Knoten, die keine eingehende Kante haben (Quellen)
- nimm nächsten Knoten  $v$  aus  $q$  und markiere alle  $(v, w) \in E$ , d.h. dekrementiere Zähler für  $w$
- falls der Zähler von  $w$  dabei Null wird, füge  $w$  in  $q$  ein
- wiederhole das, bis  $q$  leer wird

# Kürzeste Wege in DAGs

## Topologische Sortierung

### Korrektheit

- Knoten wird erst dann nummeriert, wenn alle Vorgänger nummeriert sind

### Laufzeit

- für die Anfangswerte der Zähler muss der Graph einmal traversiert werden  $O(n + m)$
- danach wird jede Kante genau einmal betrachtet

⇒ gesamt:  $O(n + m)$

### Test auf DAG-Eigenschaft

- topologische Sortierung erfasst genau dann **alle** Knoten, wenn der Graph ein **DAG** ist
- bei gerichteten Kreisen erhalten diese Knoten keine Nummer

# Kürzeste Wege in DAGs

## DAG-Strategie

- 1 Topologische Sortierung der Knoten  
Laufzeit  $O(n + m)$
- 2 Aktualisierung der Distanzen gemäß der topologischen Sortierung  
Laufzeit  $O(n + m)$

Gesamtlaufzeit:  $O(n + m)$

# Beliebige Graphen mit nicht-negativen Gewichten

Gegeben:

- **beliebiger** Graph  
(gerichtet oder ungerichtet, muss diesmal kein DAG sein)
  - mit **nicht-negativen** Kantengewichten
- ⇒ keine Knoten mit Distanz  $-\infty$

Problem:

- besuche Knoten eines kürzesten Weges in der richtigen Reihenfolge
- wie bei Breitensuche, jedoch diesmal auch mit Distanzen  $\neq 1$

Lösung:

- besuche Knoten in der Reihenfolge der kürzesten Distanz zum Startknoten  $s$

# Kürzeste Pfade: SSSP / Dijkstra

---

## Dijkstra-Algorithmus

---

**Input** :  $G = (V, E)$ ,  $c : E \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $s \in V$

**Output** : Distanzen  $d(s, v)$  zu allen  $v \in V$

$P = \emptyset$ ;  $T = V$ ;

$d(s, v) = \infty$  for all  $v \in V \setminus s$ ;

$d(s, s) = 0$ ;  $pred(s) = 0$ ;

**while**  $P \neq V$  **do**

$v = \operatorname{argmin}_{v \in T} \{d(s, v)\}$ ;

$P = P \cup v$ ;  $T = T \setminus v$ ;

**forall the**  $(v, w) \in E$  **do**

**if**  $d(s, w) > d(s, v) + c(v, w)$  **then**

$d(s, w) = d(s, v) + c(v, w)$ ;

$pred(w) = v$ ;

---

## Dijkstra-Algorithmus für SSSP

---

**Input** :  $G = (V, E)$ ,  $c : E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ ,  $s \in V$

**Output** : Distanzen  $d[v]$  von  $s$  zu allen  $v \in V$

$d[v] = \infty$  for all  $v \in V \setminus s$ ;

$d[s] = 0$ ;  $pred[s] = \perp$ ;

$pq = \langle \rangle$ ;  $pq.insert(s, 0)$ ;

**while**  $\neg pq.empty()$  **do**

$v = pq.deleteMin()$ ;

**forall the**  $(v, w) \in E$  **do**

$newDist = d[v] + c(v, w)$ ;

**if**  $newDist < d[w]$  **then**

$pred[w] = v$ ;

**if**  $d[w] == \infty$  **then**  $pq.insert(w, newDist)$ ;

**else**  $pq.decreaseKey(w, newDist)$ ;

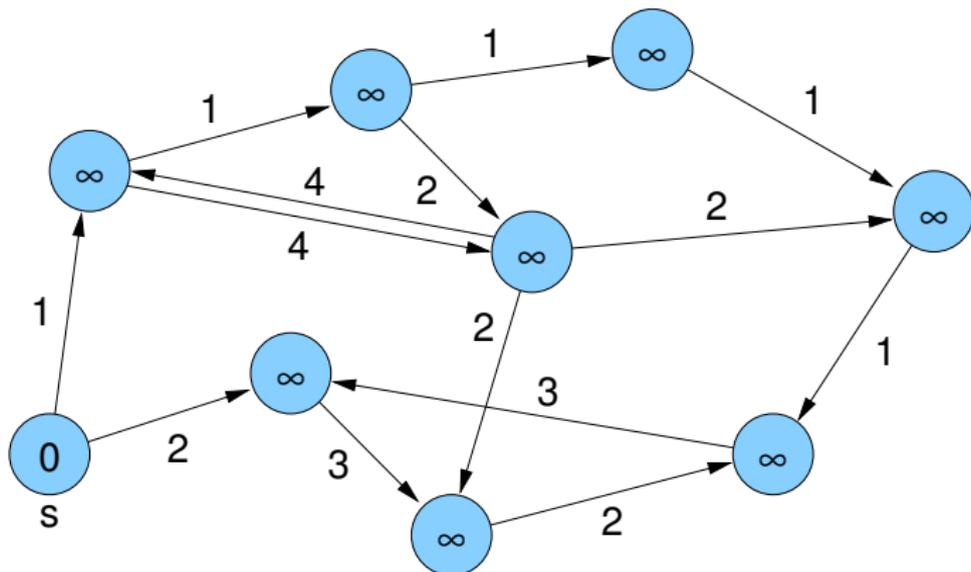
$d[w] = newDist$ ;

# Dijkstra-Algorithmus

- setze Startwert  $d(s, s) = 0$  und zunächst  $d(s, v) = \infty$
- verwende **Prioritätswarteschlange**, um die Knoten zusammen mit ihren aktuellen Distanzen zu speichern
- am Anfang nur Startknoten (mit Distanz 0) in Priority Queue
- dann immer nächsten Knoten  $v$  (mit kleinster Distanz) entnehmen, endgültige Distanz dieses Knotens  $v$  steht nun fest
- betrachte alle Nachbarn von  $v$ , füge sie ggf. in die PQ ein bzw. aktualisiere deren Priorität in der PQ

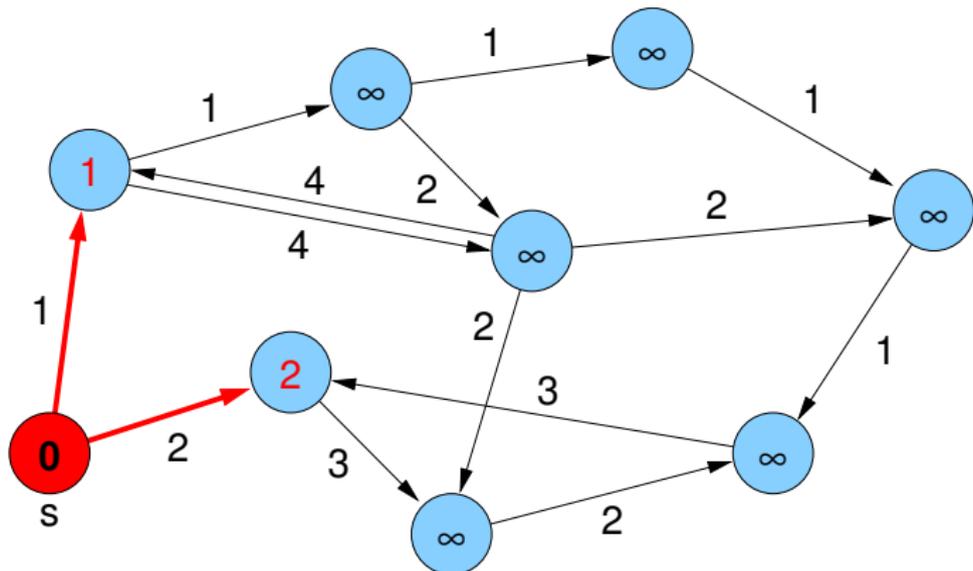
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



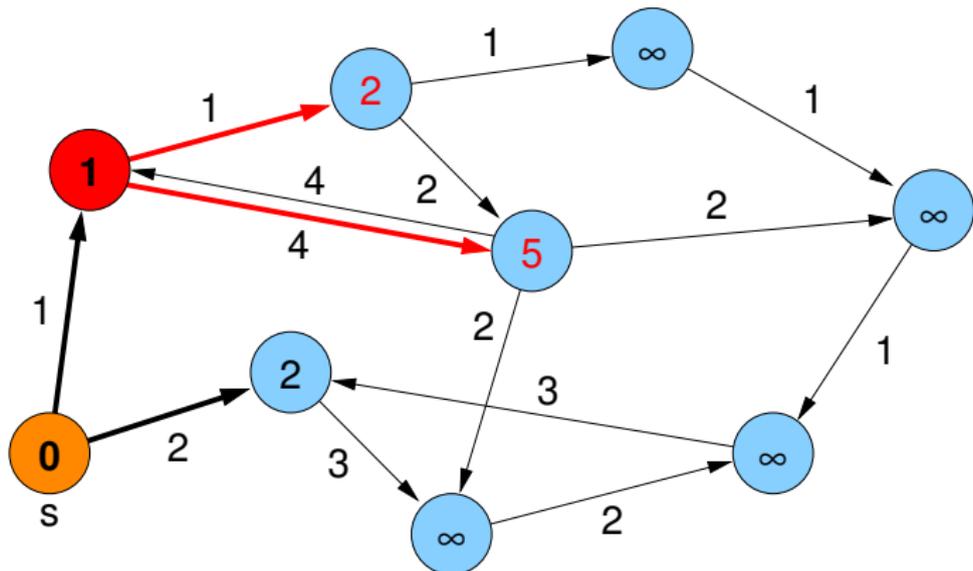
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



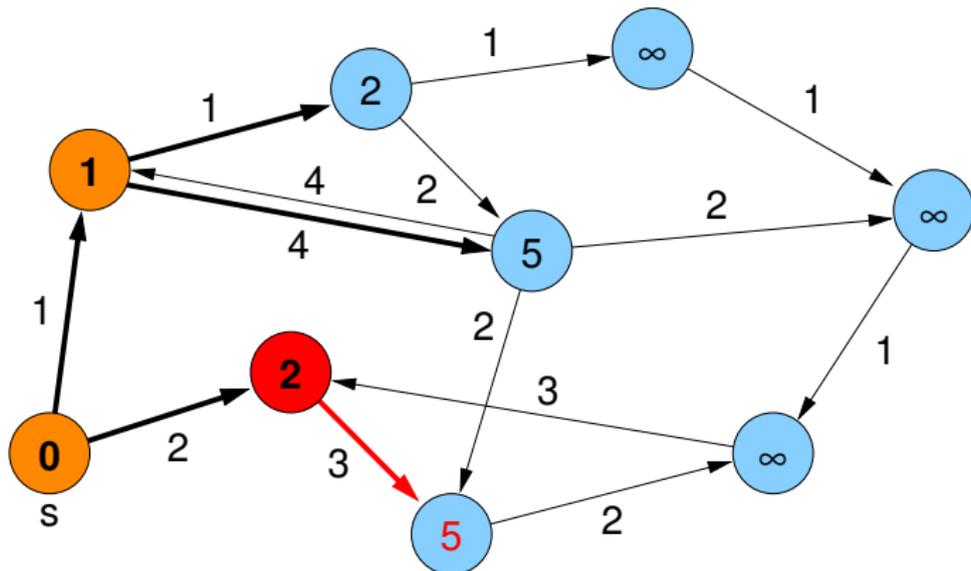
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



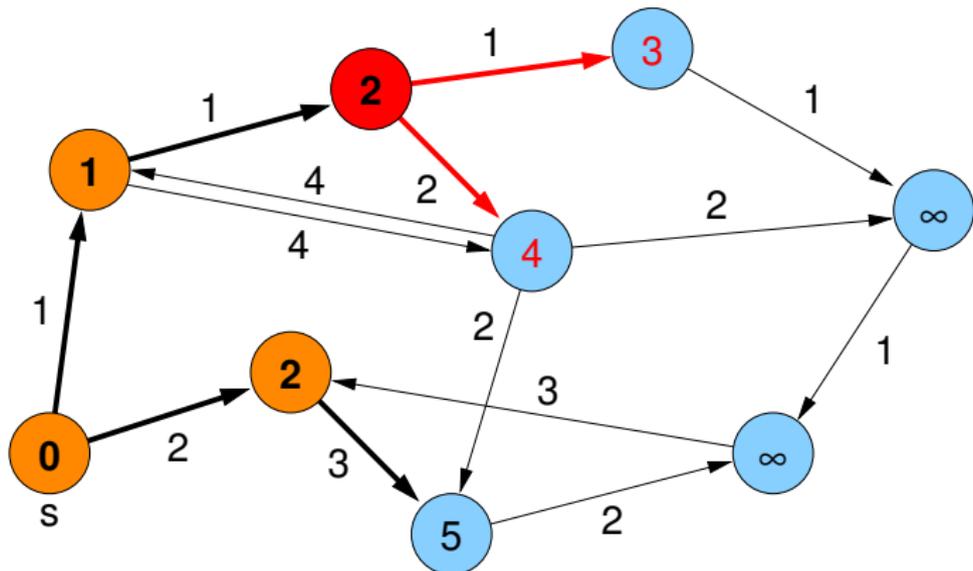
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



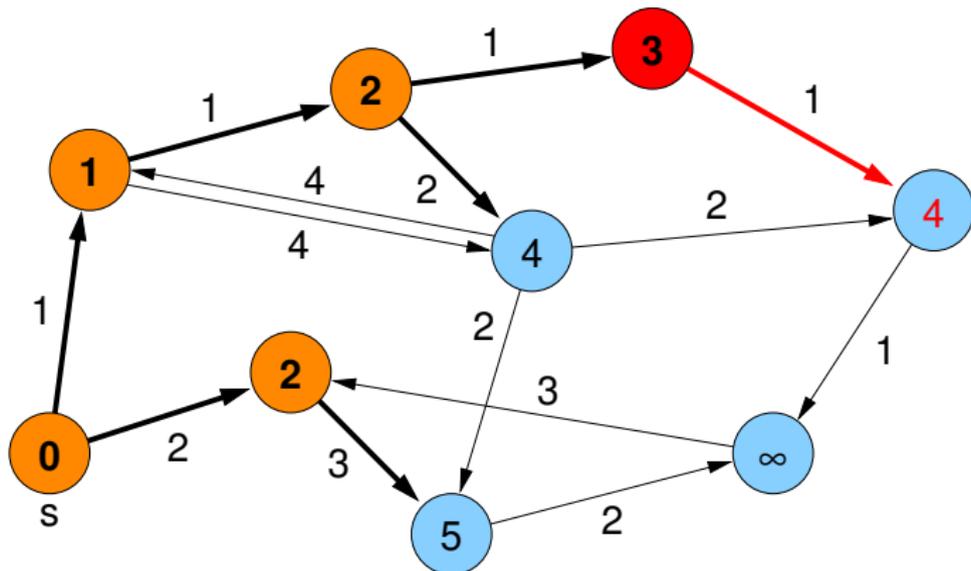
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



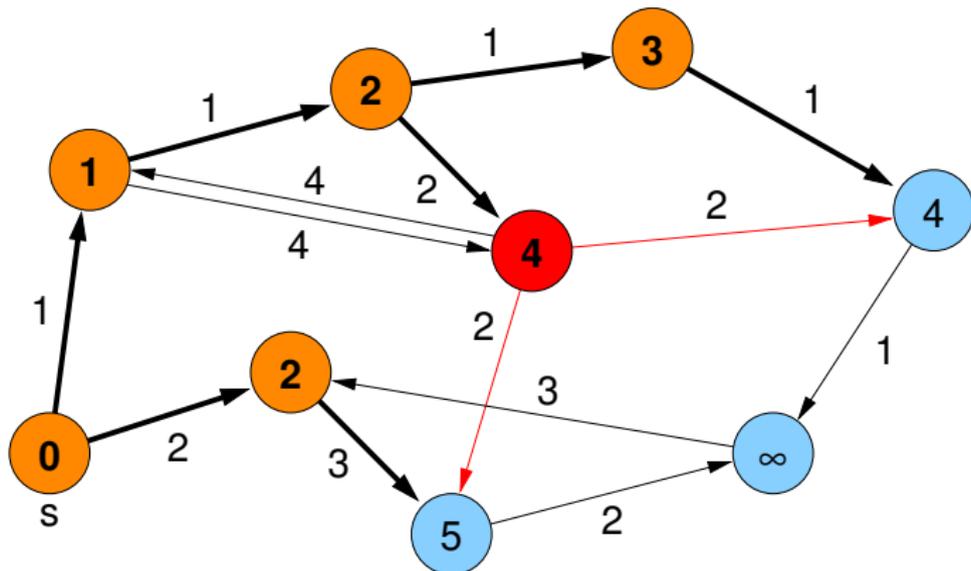
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



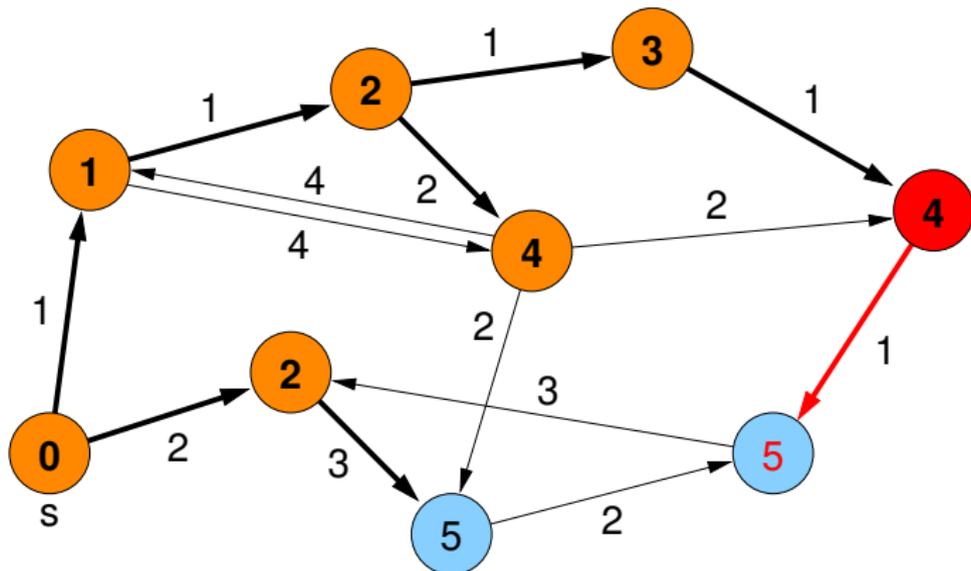
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



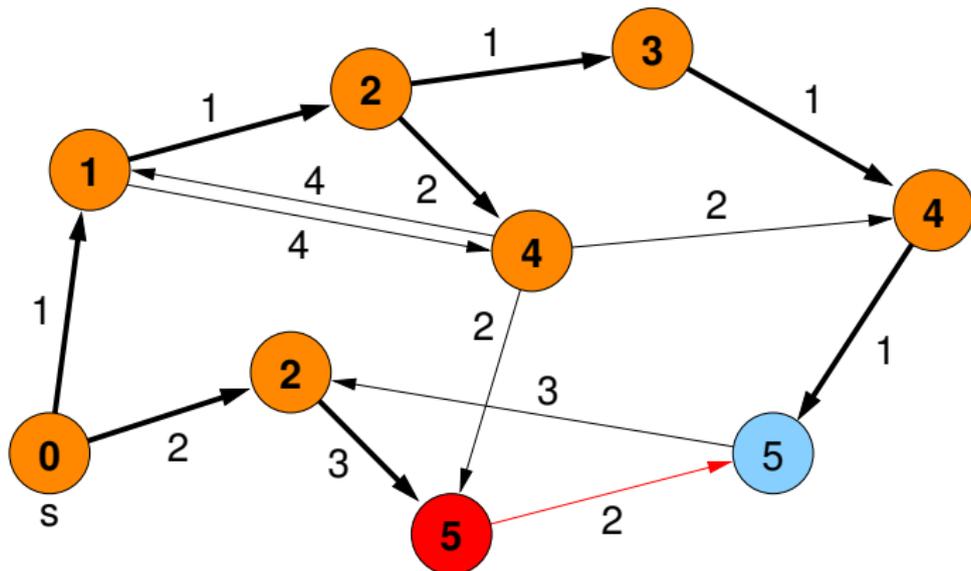
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



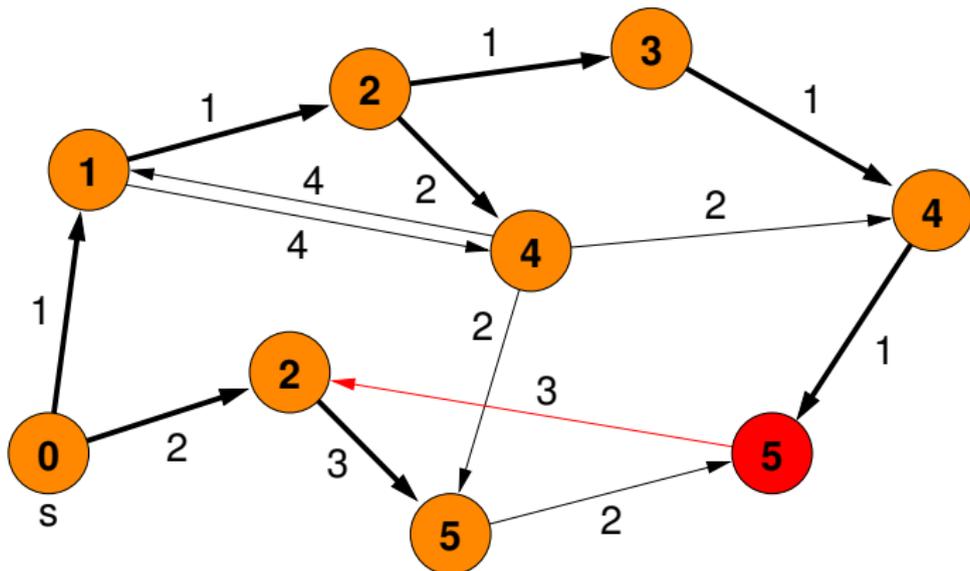
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



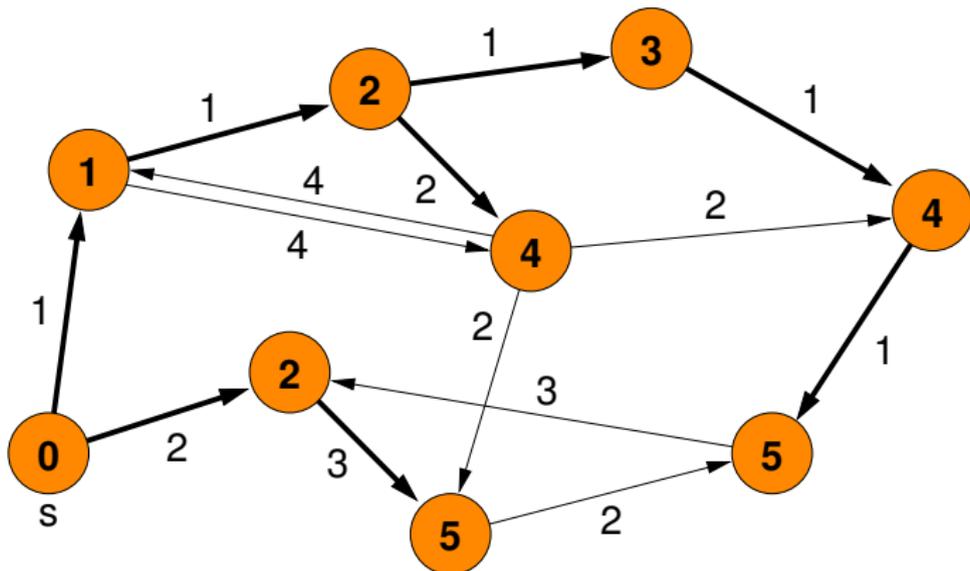
# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



# Dijkstra-Algorithmus

Beispiel:



# Dijkstra-Algorithmus

Korrektheit:

- Annahme: Algorithmus liefert für  $w$  einen **zu kleinen** Wert  $d(s, w)$
- sei  $w$  der erste Knoten, für den die Distanz falsch festgelegt wird (kann nicht  $s$  sein, denn die Distanz  $d(s, s)$  bleibt immer 0)
- kann nicht sein, weil  $d(s, w)$  **nur dann** aktualisiert wird, wenn man über einen von  $s$  schon erreichten Knoten  $v$  mit Distanz  $d(s, v)$  den Knoten  $w$  über die Kante  $(v, w)$  mit Distanz  $d(s, v) + c(v, w)$  erreichen kann
- d.h.  $d(s, v)$  müsste schon falsch gewesen sein (Widerspruch zur Annahme, dass  $w$  der erste Knoten mit falscher Distanz war)

# Dijkstra-Algorithmus

- Annahme: Algorithmus liefert für  $w$  einen **zu großen** Wert  $d(s, w)$
- sei  $w$  der Knoten mit der kleinsten (wirklichen) Distanz, für den der Wert  $d(s, w)$  falsch festgelegt wird (wenn es davon mehrere gibt, der Knoten, für den die Distanz zuletzt festgelegt wird)
- kann nicht sein, weil  $d(s, w)$  **immer** aktualisiert wird, wenn man über einen von  $s$  schon erreichten Knoten  $v$  mit Distanz  $d(s, v)$  den Knoten  $w$  über die Kante  $(v, w)$  mit Distanz  $d(s, v) + c(v, w)$  erreichen kann (dabei steht  $d(s, v)$  immer schon fest, so dass auch die Länge eines kürzesten Wegs über  $v$  zu  $w$  richtig berechnet wird)
- d.h., entweder wurde auch der Wert von  $v$  falsch berechnet (Widerspruch zur Def. von  $w$ ) oder die Distanz von  $v$  wurde noch nicht festgesetzt
- weil die berechneten Distanzwerte monoton wachsen, kann letzteres nur passieren, wenn  $v$  die gleiche Distanz hat wie  $w$  (auch Widerspruch zur Def. von  $w$ )

# Dijkstra-Algorithmus

- Datenstruktur: Prioritätswarteschlange  
(z.B. Fibonacci Heap: amortisierte Komplexität  $O(1)$  für insert und decreaseKey,  $O(\log n)$  deleteMin)
- Komplexität:
  - ▶  $O(n)$  insert
  - ▶  $O(n)$  deleteMin
  - ▶  $O(m)$  decreaseKey $\Rightarrow O(m + n \log n)$
- aber: nur für nichtnegative Kantengewichte(!)

# Monotone Priority Queues

Beobachtung:

- aktuelles Distanz-Minimum der verbleibenden Knoten ist beim Dijkstra-Algorithmus **monoton wachsend**

## Monotone Priority Queue

- Folge der entnommenen Elemente hat monoton steigende Werte
- effizientere Implementierung möglich, falls Kantengewichte **ganzzahlig**

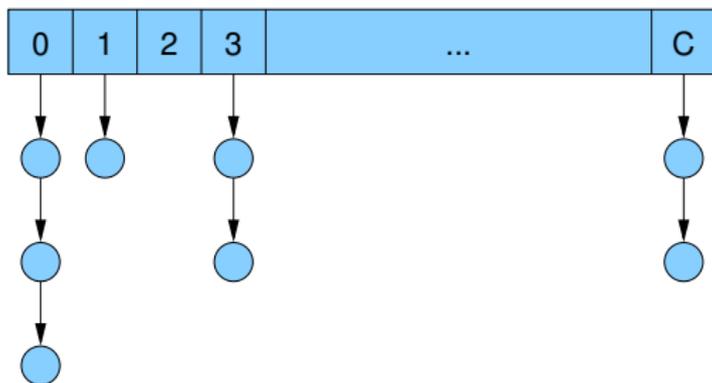
Annahme: alle **Kantengewichte** im Bereich  $[0, C]$

Konsequenz für Dijkstra-Algorithmus:

⇒ enthaltene Distanzwerte immer im Bereich  $[d, d + C]$

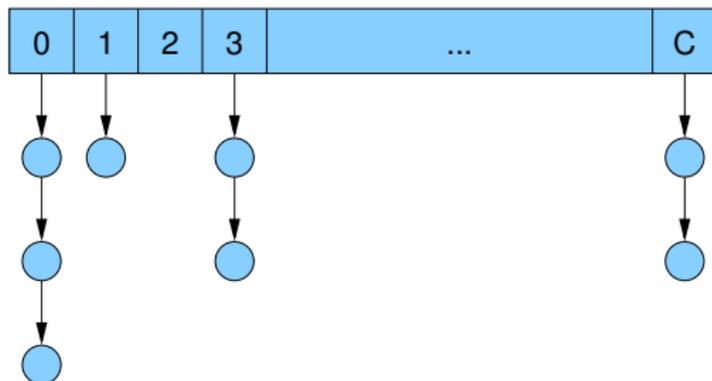
# Bucket Queue

- Array **B** aus  $C + 1$  Listen
- Variable  $d_{\min}$  für aktuelles Distanzminimum mod  $(C + 1)$



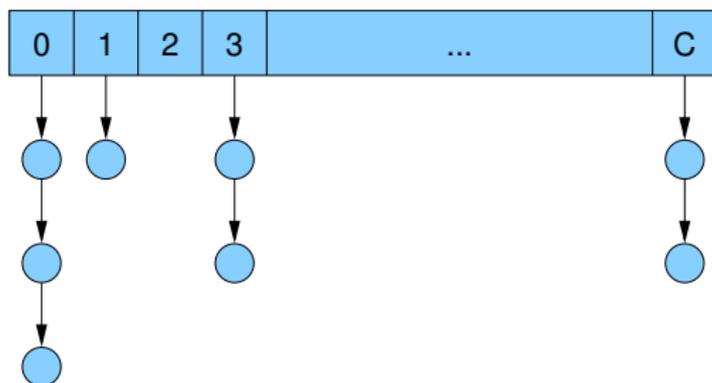
# Bucket Queue

- jeder Knoten  $v$  mit aktueller Distanz  $d[v]$  in Liste  $B[d[v] \bmod (C + 1)]$
- alle Knoten in Liste  $B[d]$  haben dieselbe Distanz, weil alle aktuellen Distanzen im Bereich  $[d, d + C]$  liegen



## Bucket Queue / Operationen

- **insert**( $v$ ): fügt  $v$  in Liste  $B[d[v] \bmod (C + 1)]$  ein ( $O(1)$ )
- **decreaseKey**( $v$ ): entfernt  $v$  aus momentaner Liste ( $O(1)$  falls Handle auf Listenelement in  $v$  gespeichert) und fügt  $v$  in Liste  $B[d[v] \bmod (C + 1)]$  ein ( $O(1)$ )
- **deleteMin**(): solange  $B[d_{\min}] = \emptyset$ , setze  $d_{\min} = (d_{\min} + 1) \bmod (C + 1)$ .  
Nimm dann einen Knoten  $u$  aus  $B[d_{\min}]$  heraus ( $O(C)$ )



# Dijkstra mit Bucket Queue

- insert, decreaseKey:  $O(1)$
- deleteMin:  $O(C)$
- Dijkstra:  $O(m + C \cdot n)$
- lässt sich mit **Radix Heaps** noch verbessern
- verwendet exponentiell wachsende Bucket-Größen
- Details in der Vorlesung Effiziente Algorithmen und Datenstrukturen
- Laufzeit ist dann  $O(m + n \log C)$

# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegeben:

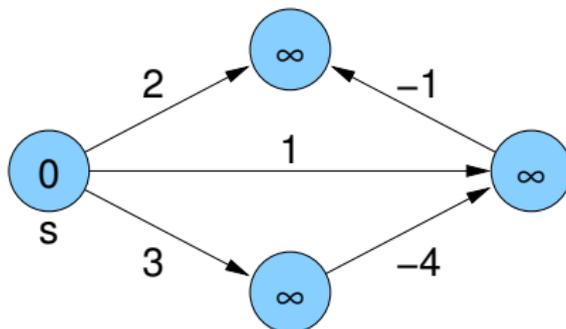
- **beliebiger** Graph mit **beliebigen** Kantengewichten
- ⇒ Anhängen einer Kante an einen Weg kann zur Verkürzung des Weges (Kantengewichtssumme) führen (wenn Kante negatives Gewicht hat)
- ⇒ es kann negative Kreise und Knoten mit Distanz  $-\infty$  geben

Problem:

- besuche Knoten eines kürzesten Weges in der richtigen Reihenfolge
- Dijkstra kann nicht mehr verwendet werden, weil Knoten nicht unbedingt in der Reihenfolge der kürzesten Distanz zum Startknoten  $s$  besucht werden

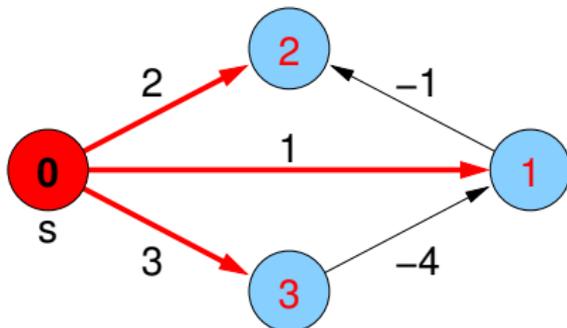
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



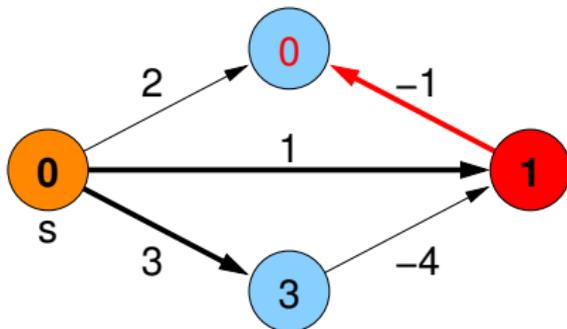
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



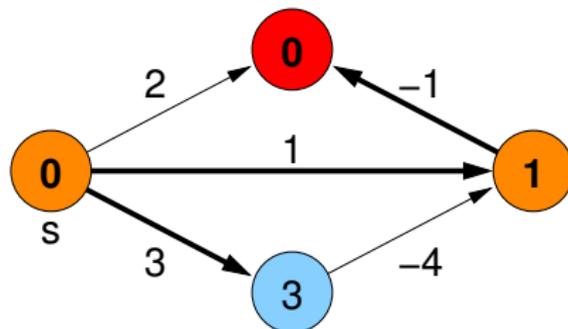
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



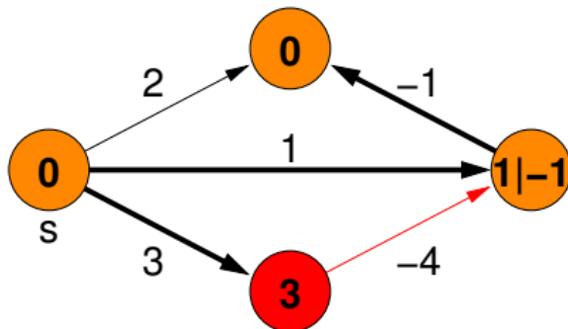
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



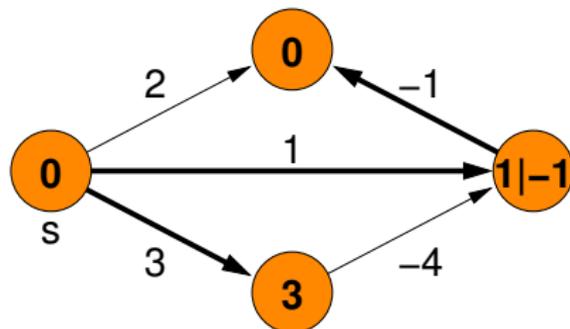
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



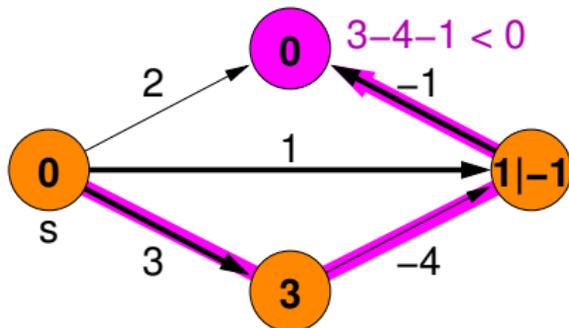
# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

Gegenbeispiel für Dijkstra-Algorithmus:



# Beliebige Graphen mit beliebigen Gewichten

## Lemma

Für jeden Knoten  $v$  mit  $d(s, v) > -\infty$  gibt es einen **einfachen** Pfad (ohne Kreis) von  $s$  nach  $v$  der Länge  $d(s, v)$ .

## Beweis.

Betrachte kürzesten Weg mit Kreis(en):

- Kreis mit Kantengewichtssumme  $> 0$  nicht enthalten:  
Entfernen des Kreises würde Kosten verringern
- Kreis mit Kantengewichtssumme  $= 0$ :  
Entfernen des Kreises lässt Kosten unverändert
- Kreis mit Kantengewichtssumme  $< 0$ :  
Distanz von  $s$  ist  $-\infty$



# Bellman-Ford-Algorithmus

## Folgerung

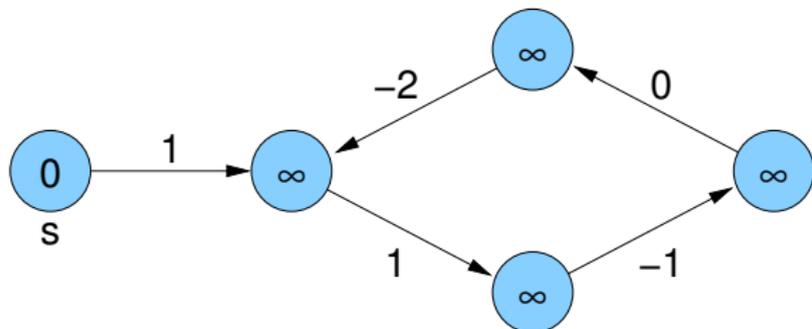
*In einem Graph mit  $n$  Knoten gibt es für jeden erreichbaren Knoten  $v$  mit  $d(s, v) > -\infty$  einen kürzesten Weg bestehend aus  **$< n$  Kanten** zwischen  $s$  und  $v$ .*

## Strategie:

- anstatt kürzeste Pfade in Reihenfolge wachsender Gewichtssumme zu berechnen, betrachte sie in **Reihenfolge steigender Kantenanzahl**
- durchlaufe  **$(n-1)$ -mal alle Kanten** im Graph und aktualisiere die Distanz
- dann alle kürzesten Wege berücksichtigt

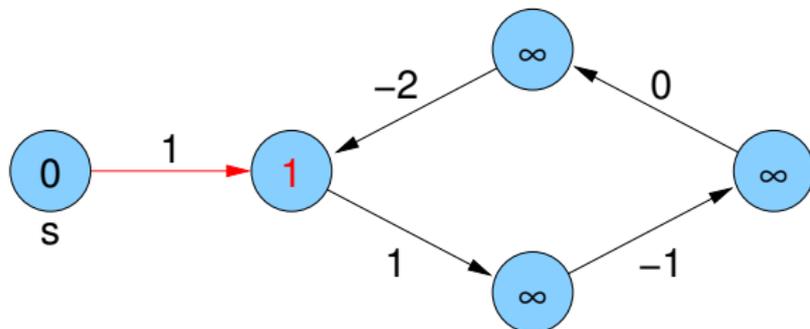
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



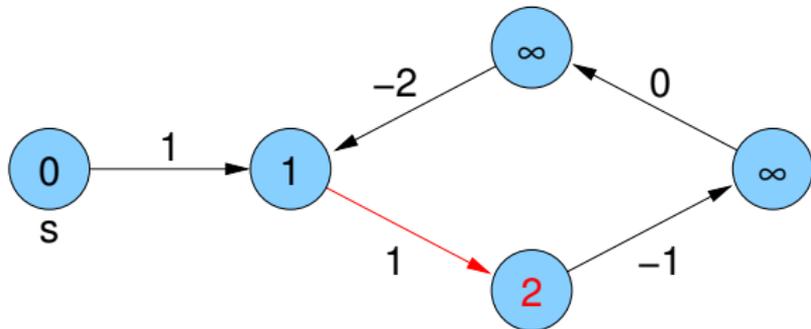
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



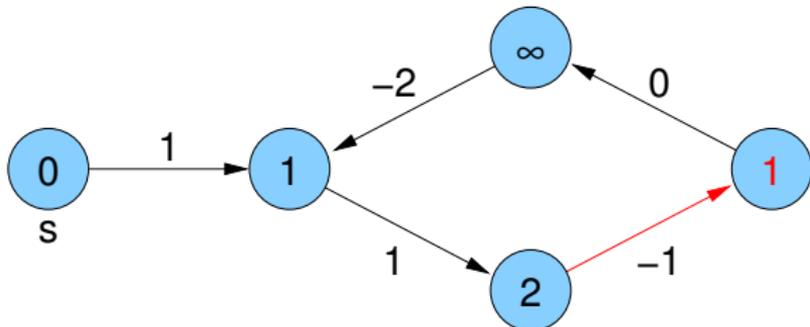
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



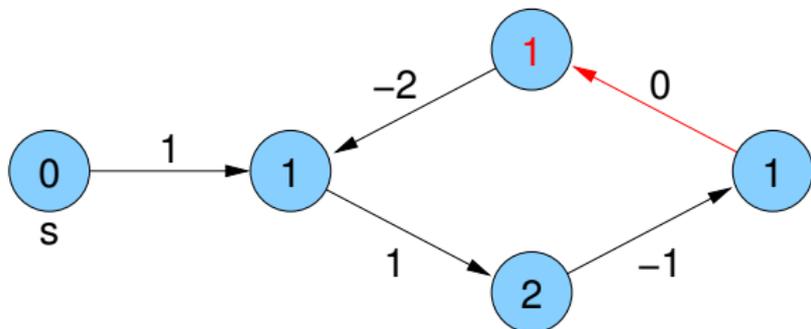
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



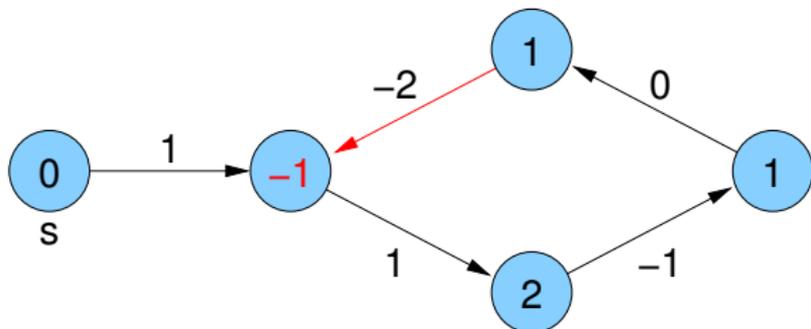
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



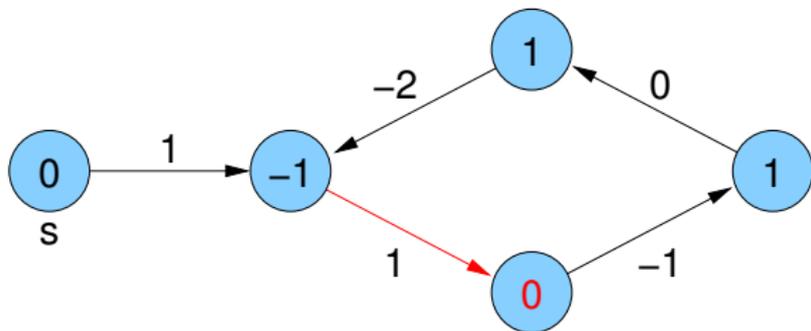
# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



# Bellman-Ford-Algorithmus

Problem: Erkennung negativer Kreise



# Bellman-Ford-Algorithmus

Keine Distanzverringerng mehr möglich:

- Annahme: zu einem Zeitpunkt gilt für alle Kanten  $(v, w)$   
 $d[v] + c(v, w) \geq d[w]$
- ⇒ (per Induktion) für alle Knoten  $w$  und jeden Weg  $p$  von  $s$  nach  $w$   
gilt:  $d[s] + c(p) \geq d[w]$
- falls sichergestellt, dass zu jedem Zeitpunkt für kürzesten Weg  $p$   
von  $s$  nach  $w$  gilt  $d[w] \geq c(p)$ , dann ist  $d[w]$  zum Schluss genau  
die Länge eines kürzesten Pfades von  $s$  nach  $w$  (also korrekte  
Distanz)

# Bellman-Ford-Algorithmus

Zusammenfassung:

- **keine Distanzniedrigung** mehr möglich  
( $d[v] + c(v, w) \geq d[w]$  für alle  $w$ ):  
fertig, alle  $d[w]$  korrekt für alle  $w$
- **Distanzniedrigung möglich** selbst noch in  $n$ -ter Runde  
( $d[v] + c(v, w) < d[w]$  für ein  $w$ ):  
Es gibt einen negativen Kreis, also Knoten  $w$  mit Distanz  $-\infty$ .

# Bellman-Ford-Algorithmus

```
BellmanFord(Node s) {  
    d[s] = 0;  parent[s] = s;  
    for (int i = 0; i < n - 1; i++) { // n - 1 Runden  
        foreach (e = (v, w) ∈ E  
            if (d[v] + c(e) < d[w]) { // kürzerer Weg?  
                d[w] = d[v] + c(e);  
                parent[w] = v;  
            }  
        }  
    }  
    foreach (e = (v, w) ∈ E  
        if (d[v] + c(e) < d[w]) { // kürzerer Weg in n-ter Runde?  
            infect(w);  
        }  
    }
```

# Bellman-Ford-Algorithmus

```
infect(Node v) { //  $-\infty$ -Knoten
  if ( $d[v] > -\infty$ ) {
     $d[v] = -\infty$ ;
    foreach ( $e = (v, w) \in E$ )
      infect(w);
  }
}
```

Gesamtlaufzeit:  $O(m \cdot n)$

# Bellman-Ford-Algorithmus

Bestimmung der **Knoten mit Distanz  $-\infty$** :

- betrachte alle Knoten, die in der  $n$ -ten Phase noch Distanzverbesserung erfahren
- aus jedem Kreis mit negativem Gesamtgewicht muss mindestens ein Knoten dabei sein
- jeder von diesen Knoten aus erreichbare Knoten muss Distanz  $-\infty$  bekommen
- das erledigt hier die **infect**-Funktion
- wenn ein Knoten zweimal auftritt (d.h. der Wert ist schon  $-\infty$ ), wird die Rekursion abgebrochen

# Bellman-Ford-Algorithmus

Bestimmung eines **negativen Zyklus**:

- bei den oben genannten Knoten sind vielleicht auch Knoten, die nur an negativen Kreisen über ausgehende Kanten angeschlossen sind, die selbst aber nicht Teil eines negativen Kreises sind
- Rückwärtsverfolgung der **parent**-Werte, bis sich ein Knoten wiederholt
- Kanten vom ersten bis zum zweiten Auftreten bilden **einen** negativen Zyklus

# Bellman-Ford-Algorithmus

Ursprüngliche Idee der Updates vorläufiger Distanzwerte stammt von Lester R. Ford Jr.

Verbesserung (Richard E. Bellman / Edward F. Moore):

- verwalte **FIFO-Queue** von Knoten, zu denen ein kürzerer Pfad gefunden wurde und deren Nachbarn am anderen Ende ausgehender Kanten noch auf kürzere Wege geprüft werden müssen
- wiederhole: nimm ersten Knoten aus der Queue und prüfe für jede ausgehende Kante die Distanz des Nachbarn  
falls kürzerer Weg gefunden, aktualisiere Distanzwert des Nachbarn und hänge ihn an Queue an (falls nicht schon enthalten)
- Phase besteht immer aus Bearbeitung der Knoten, die **am Anfang** des Algorithmus (bzw. der Phase) in der Queue sind (dabei kommen während der Phase schon neue Knoten ans Ende der Queue)

# Kürzeste einfache Pfade bei beliebigen Kantengewichten

**Achtung!**

## Fakt

Die Suche nach kürzesten **einfachen** Pfaden  
(also ohne Knotenwiederholungen / Kreise)  
in Graphen mit beliebigen Kantengewichten  
(also möglichen negativen Kreisen)  
ist ein **NP-vollständiges Problem**.

(Man könnte Hamilton-Pfad-Suche damit lösen.)

# All Pairs Shortest Paths

gegeben:

- Graph mit beliebigen Kantengewichten, der aber keine negativen Kreise enthält

gesucht:

- Distanzen / kürzeste Pfade zwischen allen Knotenpaaren

Naive Strategie:

- $n$ -mal Bellman-Ford-Algorithmus (jeder Knoten einmal als Startknoten)

⇒  $O(n^2 \cdot m)$

# All Pairs Shortest Paths

Bessere Strategie:

- reduziere  $n$  Aufrufe des Bellman-Ford-Algorithmus auf  $n$  Aufrufe des Dijkstra-Algorithmus

Problem:

- Dijkstra-Algorithmus funktioniert nur für nichtnegative Kantengewichte

Lösung:

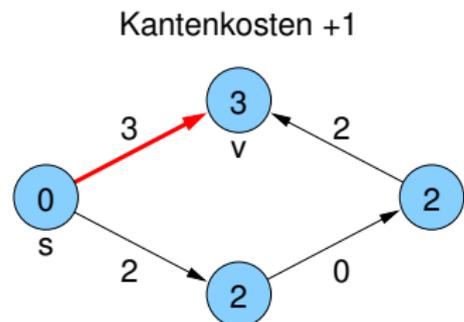
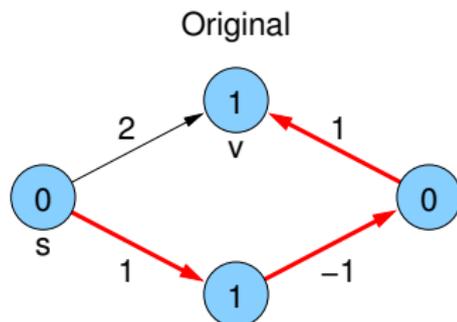
- Umwandlung in nichtnegative Kantenkosten ohne Verfälschung der kürzesten Wege

# All Pairs Shortest Paths

Naive Idee:

- negative Kantengewichte eliminieren, indem auf jedes Kantengewicht der gleiche Wert  $c$  addiert wird

⇒ **verfälscht** kürzeste Pfade



# All Pairs Shortest Paths

Sei  $\Phi : V \mapsto \mathbb{R}$  eine Funktion, die jedem Knoten ein **Potential** zuordnet.

**Modifizierte Kantenkosten** von  $e = (v, w)$ :

$$\bar{c}(e) = \Phi(v) + c(e) - \Phi(w)$$

## Lemma

Seien  $p$  und  $q$  Wege von  $v$  nach  $w$  in  $G$ .

$c(p)$  und  $c(q)$  bzw.  $\bar{c}(p)$  und  $\bar{c}(q)$  seien die aufsummierten Kosten bzw. modifizierten Kosten der Kanten des jeweiligen Pfads.

Dann gilt für jedes Potential  $\Phi$ :

$$\bar{c}(p) < \bar{c}(q) \quad \Leftrightarrow \quad c(p) < c(q)$$

# All Pairs Shortest Paths

## Beweis.

Sei  $p = (v_1, \dots, v_k)$  beliebiger Weg und  $\forall i: e_i = (v_i, v_{i+1}) \in E$

Es gilt:

$$\begin{aligned}\bar{c}(p) &= \sum_{i=1}^{k-1} \bar{c}(e_i) \\ &= \sum_{i=1}^{k-1} (\Phi(v_i) + c(e_i) - \Phi(v_{i+1})) \\ &= \Phi(v_1) + c(p) - \Phi(v_k)\end{aligned}$$

d.h. modifizierte Kosten eines Pfads hängen nur von ursprünglichen Pfadkosten und vom Potential des Anfangs- und Endknotens ab.

(Im Lemma ist  $v_1 = v$  und  $v_k = w$ )



# All Pairs Shortest Paths

## Lemma

Annahme:

- Graph hat keine negativen Kreise
- alle Knoten von  $s$  aus erreichbar

Sei für alle Knoten  $v$  das Potential  $\Phi(v) = d(s, v)$ .

Dann gilt für alle Kanten  $e$ :  $\bar{c}(e) \geq 0$

## Beweis.

- für alle Knoten  $v$  gilt nach Annahme:  $d(s, v) \in \mathbb{R}$  (also  $\neq \pm\infty$ )
- für jede Kante  $e = (v, w)$  ist

$$\begin{aligned}d(s, v) + c(e) &\geq d(s, w) \\d(s, v) + c(e) - d(s, w) &\geq 0\end{aligned}$$

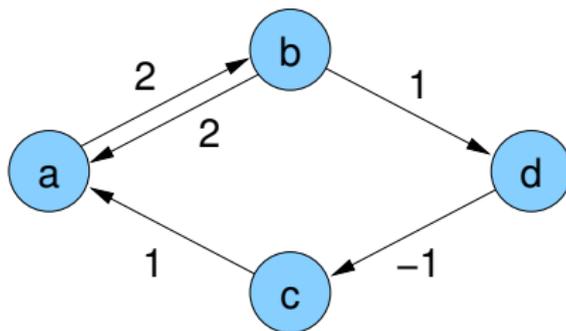


# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

- füge **neuen Knoten  $s$**  und Kanten  $(s, v)$  für alle  $v$  hinzu mit  $c(s, v) = 0$
- ⇒ alle Knoten erreichbar
- berechne  $d(s, v)$  mit Bellman-Ford-Algorithmus
  - setze  $\Phi(v) = d(s, v)$  für alle  $v$
  - berechne modifizierte Kosten  $\bar{c}(e)$
  - berechne für alle Knoten  $v$  die Distanzen  $\bar{d}(v, w)$  mittels Dijkstra-Algorithmus mit modifizierten Kantenkosten auf dem Graph ohne Knoten  $s$
  - berechne korrekte Distanzen  $d(v, w) = \bar{d}(v, w) + \Phi(w) - \Phi(v)$

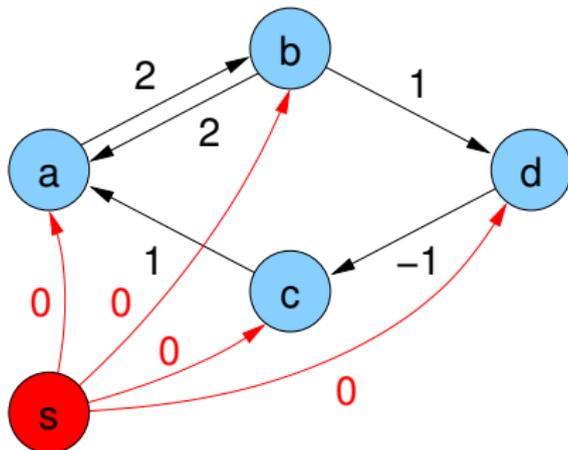
# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

Beispiel:



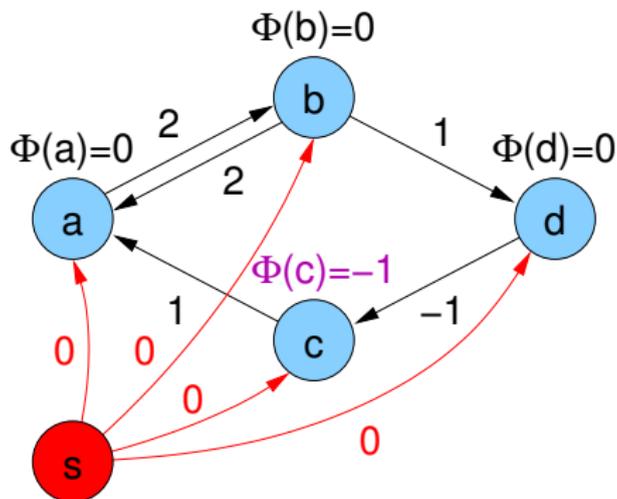
# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

1. künstliche Quelle  $s$ :



# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

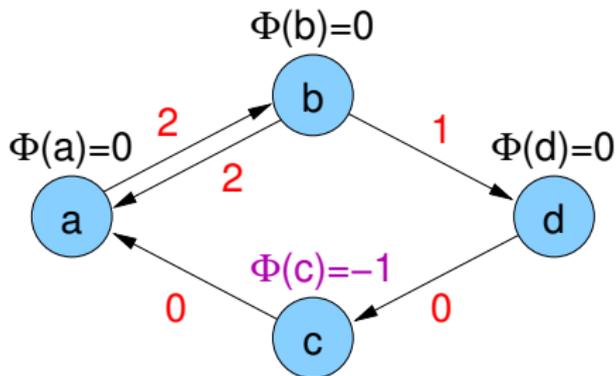
## 2. Bellman-Ford-Algorithmus auf s:



# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

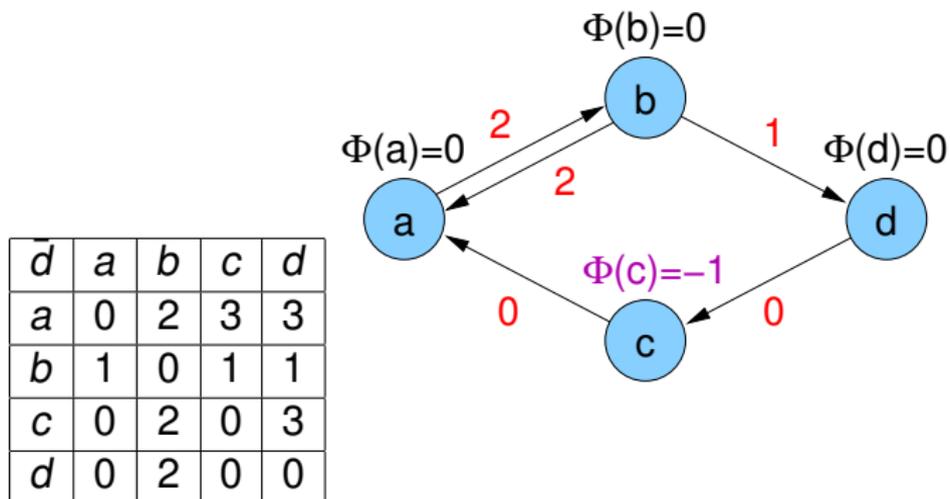
3.  $\bar{c}(e)$ -Werte für alle  $e = (v, w)$  berechnen:

$$\bar{c}(e) = \Phi(v) + c(e) - \Phi(w)$$



# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

4. Distanzen  $\bar{d}$  mit modifizierten Kantengewichten via Dijkstra:

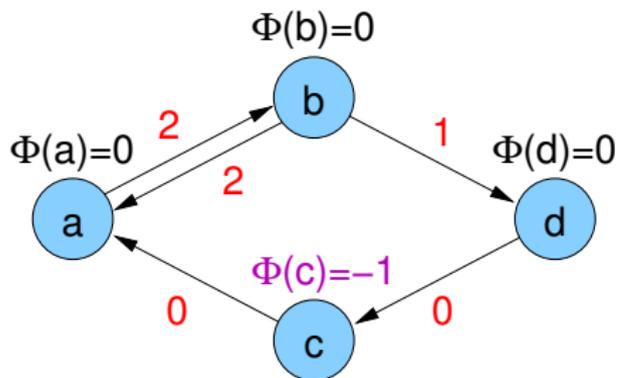


# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

5. korrekte Distanzen berechnen mit Formel

$$d(v, w) = \bar{d}(v, w) + \Phi(w) - \Phi(v)$$

$d$	$a$	$b$	$c$	$d$
$a$	0	2	2	3
$b$	1	0	0	1
$c$	1	3	0	4
$d$	0	2	-1	0



# All Pairs Shortest Paths / Johnson-Algorithmus

Laufzeit:

$$\begin{aligned}T(\text{APSP}) &= O(T_{\text{Bellman-Ford}}(n+1, m+n) + n \cdot T_{\text{Dijkstra}}(n, m)) \\ &= O((m+n) \cdot (n+1) + n(n \log n + m)) \\ &= O(m \cdot n + n^2 \log n)\end{aligned}$$

(bei Verwendung von Fibonacci Heaps)

# APSP / Floyd-Warshall-Algorithmus

## Grundlage:

- geht der kürzeste Weg **von  $u$  nach  $w$  über  $v$** , dann sind auch die beiden Teile **von  $u$  nach  $v$**  und **von  $v$  nach  $w$**  kürzeste Pfade zwischen diesen Knoten
  - Annahme: alle kürzesten Wege bekannt, die nur über Zwischenknoten mit Index kleiner als  $k$  gehen
- ⇒ kürzeste Wege über Zwischenknoten mit Indizes bis einschließlich  $k$  können leicht berechnet werden:
- ▶ entweder der schon bekannte Weg über Knoten mit Indizes kleiner als  $k$
  - ▶ oder über den Knoten mit Index  $k$  (hier im Algorithmus der Knoten  $v$ )

# APSP / Floyd-Warshall-Algorithmus

---

## Floyd-Warshall APSP Algorithmus

---

**Input** : Graph  $G = (V, E)$ ,  $c : E \rightarrow R$

**Output** : Distanzen  $d(u, v)$  zwischen allen  $u, v \in V$

**for**  $u, v \in V$  **do**

└  $d(u, v) = \infty$ ;  $\text{pred}(u, v) = 0$ ;

**for**  $v \in V$  **do**  $d(v, v) = 0$ ;

**for**  $\{u, v\} \in E$  **do**

└  $d(u, v) = c(u, v)$ ;  $\text{pred}(u, v) = u$ ;

**for**  $v \in V$  **do**

└ **for**  $\{u, w\} \in V \times V$  **do**

└ **if**  $d(u, w) > d(u, v) + d(v, w)$  **then**

└  $d(u, w) = d(u, v) + d(v, w)$ ;

└  $\text{pred}(u, w) = \text{pred}(v, w)$ ;

# APSP / Floyd-Warshall-Algorithmus

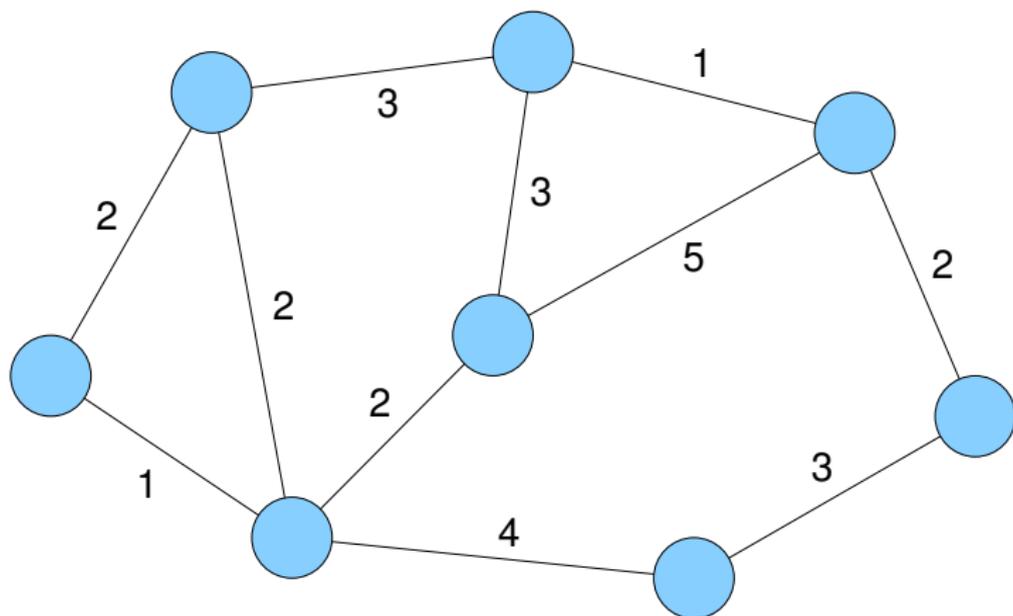
- Komplexität:  $O(n^3)$
- funktioniert auch, wenn Kanten mit negativem Gewicht existieren
- Kreise negativer Länge werden nicht direkt erkannt und verfälschen das Ergebnis, sind aber indirekt am Ende an negativen Diagonaleinträgen der Distanzmatrix erkennbar

# Übersicht

- 9 Graphen
  - Netzwerke und Graphen
  - Graphrepräsentation
  - Graphtraversierung
  - Kürzeste Wege
  - **Minimale Spannbäume**

# Minimaler Spannbaum

Frage: Welche Kanten nehmen, um mit minimalen Kosten alle Knoten zu verbinden?



# Minimaler Spannbaum

Eingabe:

- ungerichteter Graph  $G = (V, E)$
- Kantenkosten  $c : E \mapsto \mathbb{R}_+$

Ausgabe:

- Kantenteilmenge  $T \subseteq E$ , so dass Graph  $(V, T)$  verbunden und  $c(T) = \sum_{e \in T} c(e)$  minimal

Beobachtung:

- $T$  formt immer einen **Baum**  
(wenn Kantengewichte echt positiv)
- ⇒ Minimaler Spannbaum (MSB) / Minimum Spanning Tree (MST)

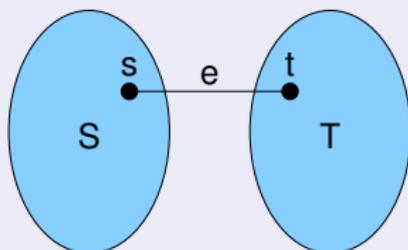
# Minimaler Spannbaum

## Lemma

Sei

- $(S, T)$  eine **Partition** von  $V$  (d.h.  $S \cup T = V$  und  $S \cap T = \emptyset$ ) und
- $e = \{s, t\}$  eine **Kante mit minimalen Kosten** mit  $s \in S$  und  $t \in T$ .

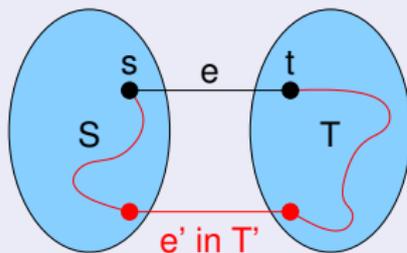
Dann gibt es einen minimalen Spannbaum  $T$ , der  $e$  enthält.



# Minimaler Spannbaum

## Beweis.

- betrachte beliebigen MSB  $T'$
- $e = \{s, t\}$ :  $(S, T)$ -Kante minimaler Kosten
- betrachte **Verbindung zwischen  $s$  und  $t$  in  $T'$**  mit Kante  $e'$  zwischen  $S$  und  $T$



- Ersetzung von  $e'$  durch  $e$  führt zu Baum  $T''$ , der höchstens Kosten von MSB  $T'$  hat (also MSB)



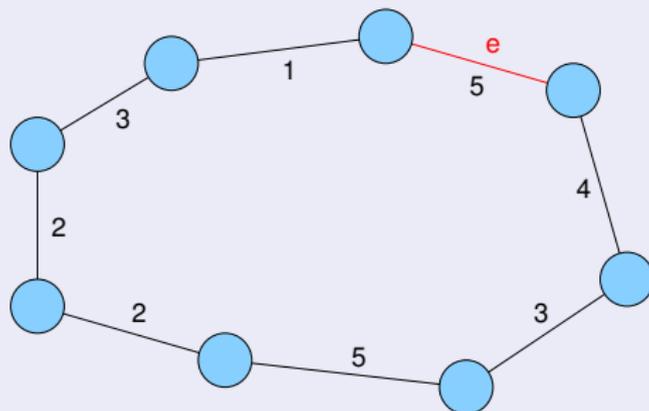
# Minimaler Spannbaum

## Lemma

Betrachte

- beliebigen **Kreis  $C$**  in  $G$
- eine Kante  $e$  in  $C$  mit **maximalen Kosten**

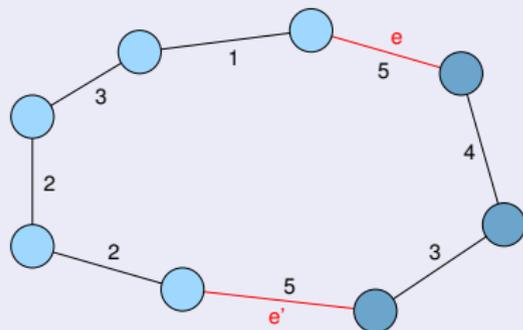
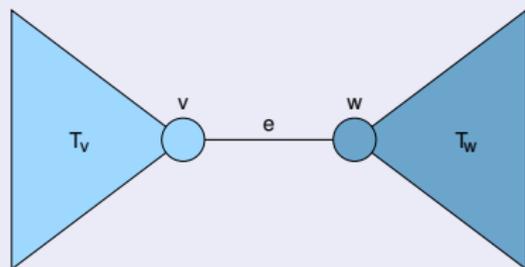
Dann ist jeder MSB in  $G$  ohne  $e$  auch ein MSB in  $G$



# Minimaler Spannbaum

## Beweis.

- betrachte beliebigen MSB  $T$  in  $G$
- Annahme:  $T$  enthält  $e$

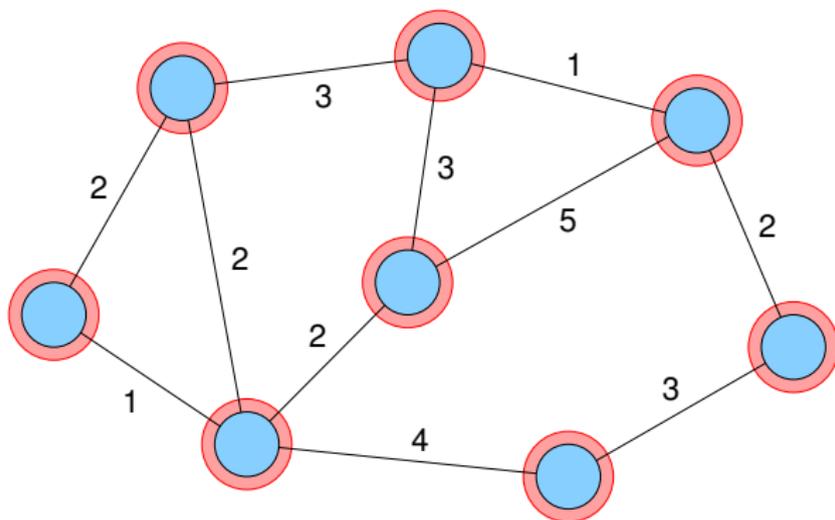


- es muss (mindestens) eine weitere Kante  $e'$  in  $G$  geben, die einen Knoten aus  $T_v$  mit einem Knoten aus  $T_w$  verbindet
- Ersetzen von  $e$  durch  $e'$  ergibt einen Baum  $T'$  dessen Gewicht nicht größer sein kann als das von  $T$ , also ist  $T'$  auch MSB

# Minimaler Spannbaum

Regel:

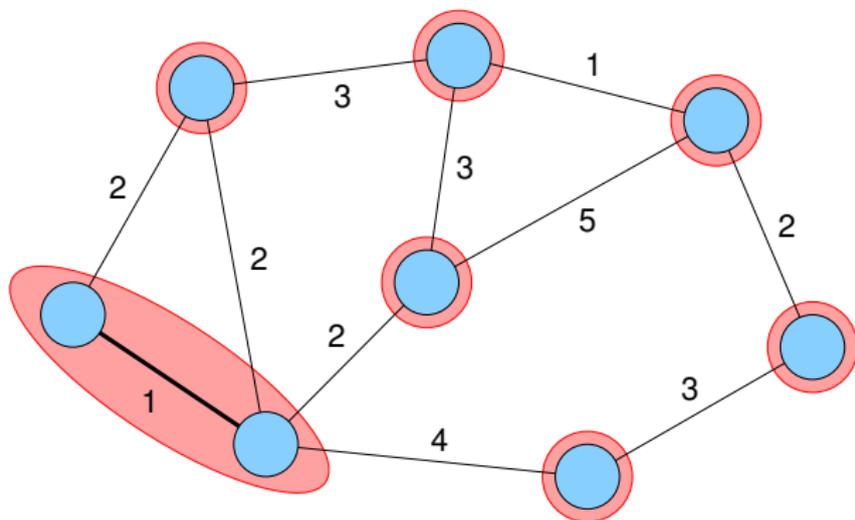
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

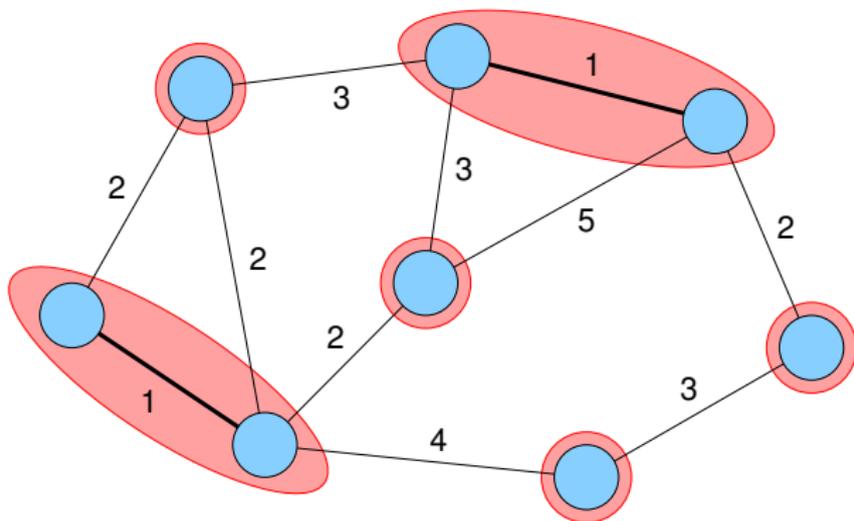
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

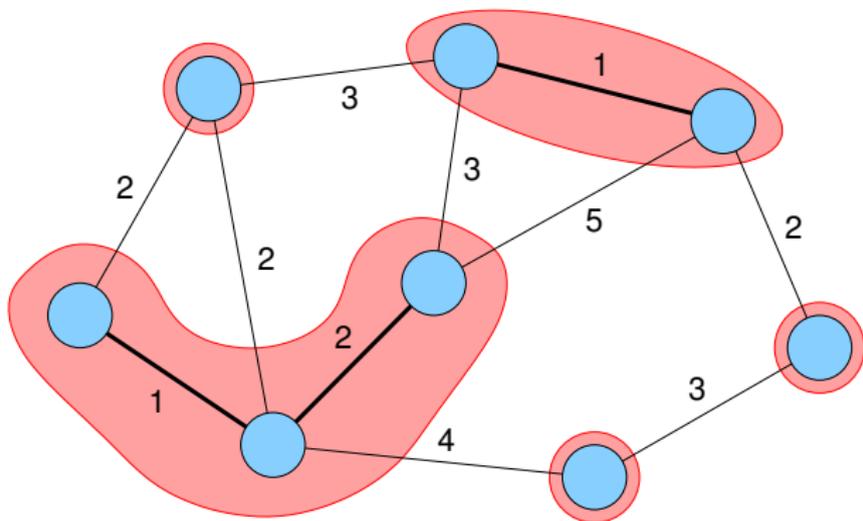
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

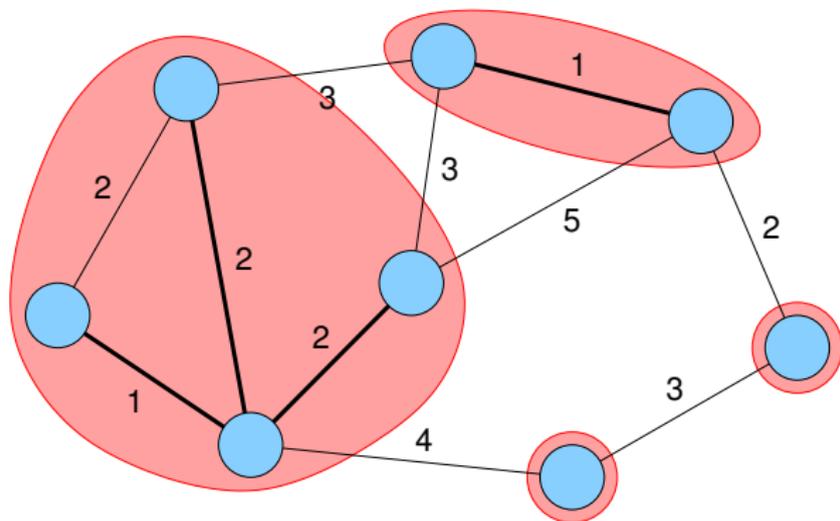
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist

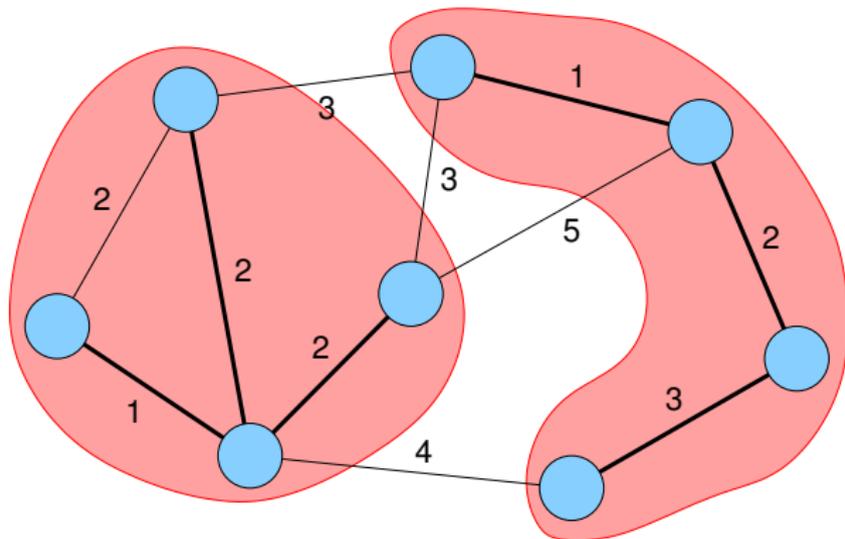




# Minimaler Spannbaum

Regel:

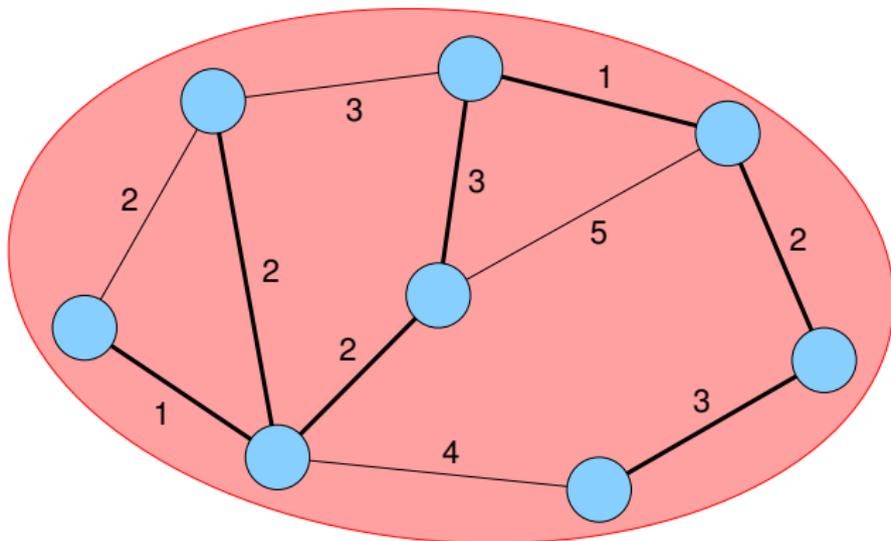
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

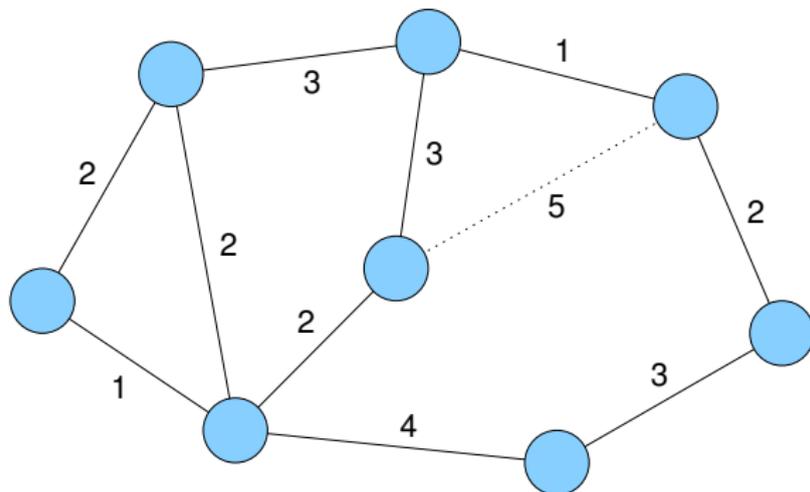
- wähle wiederholt Kante mit minimalen Kosten, die zwei Zusammenhangskomponenten verbindet
- bis nur noch eine Zusammenhangskomponente übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

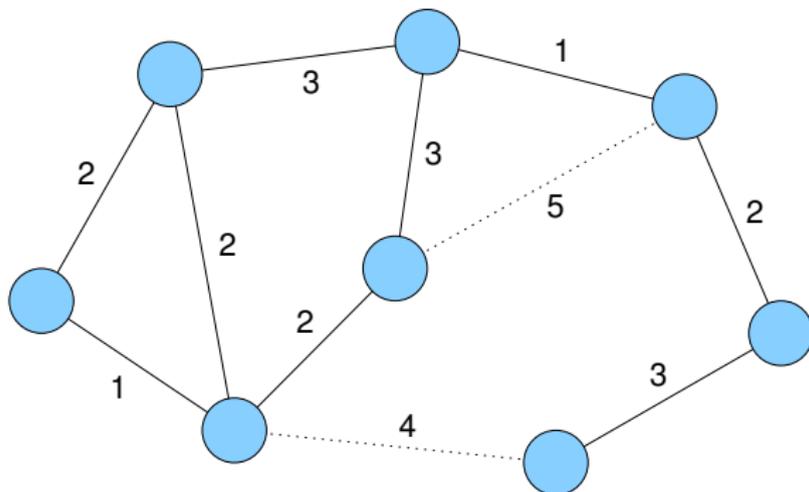
- lösche wiederholt Kante mit maximalen Kosten, so dass Zusammenhang nicht zerstört
- bis ein Baum übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

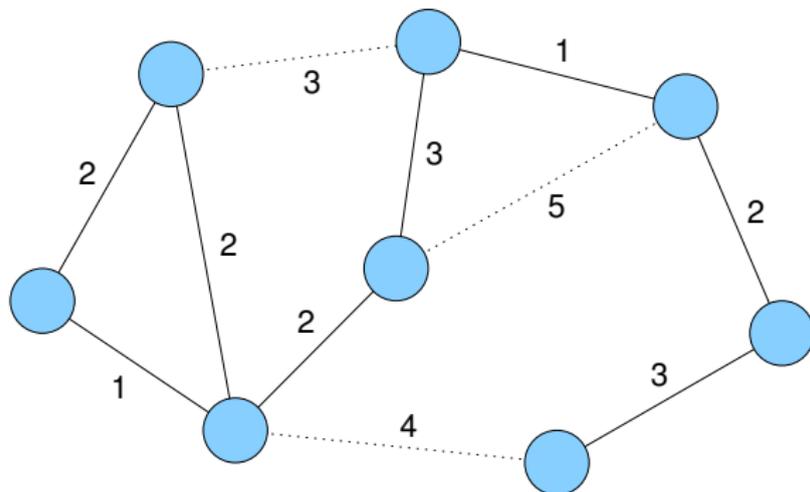
- lösche wiederholt Kante mit maximalen Kosten, so dass Zusammenhang nicht zerstört
- bis ein Baum übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

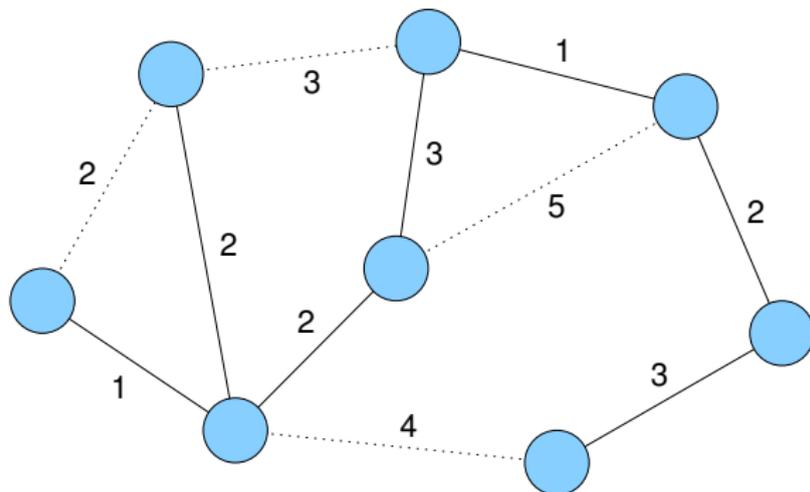
- lösche wiederholt Kante mit maximalen Kosten, so dass Zusammenhang nicht zerstört
- bis ein Baum übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

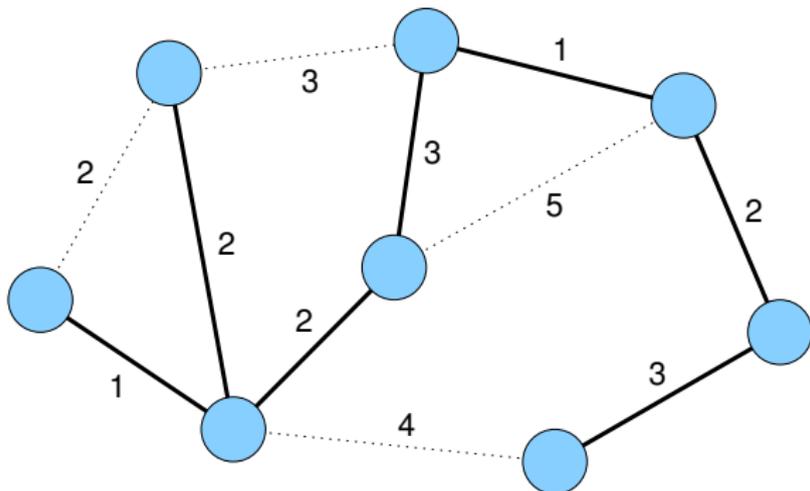
- lösche wiederholt Kante mit maximalen Kosten, so dass Zusammenhang nicht zerstört
- bis ein Baum übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Regel:

- lösche wiederholt Kante mit maximalen Kosten, so dass Zusammenhang nicht zerstört
- bis ein Baum übrig ist



# Minimaler Spannbaum

Problem: Wie implementiert man die Regeln effizient?

Strategie aus dem ersten Lemma:

- **sortiere** Kanten aufsteigend nach ihren Kosten
- setze  $T = \emptyset$  (leerer Baum)
- **teste** f­ur jede Kante  $\{u, v\}$  (in aufsteigender Reihenfolge), ob  $u$  und  $v$  schon in einer Zusammenhangskomponente (also im gleichen Baum) sind
- falls nicht, f­uge  $\{u, v\}$  zu  $T$  hinzu (nun sind  $u$  und  $v$  im gleichen Baum)

# Algorithmus von Kruskal

```
Set<Edge> MST_Kruskal (V, E, c) {  
    T =  $\emptyset$ ;  
    S = sort(E); // aufsteigend sortieren  
    foreach (e = {u, v}  $\in$  S)  
        if (u und v in verschiedenen Bäumen in T)  
            T = T  $\cup$  e;  
    return T;  
}
```

Problem:

- Umsetzung des Tests auf gleiche / unterschiedliche Zusammenhangskomponente

# Union-Find-Datenstruktur

Union-Find-Problem:

- gegeben sind (disjunkte) Mengen von Elementen
- jede Menge hat genau einen Repräsentanten
- **union** soll zwei Mengen vereinigen, die durch ihren jeweiligen Repräsentanten gegeben sind
- **find** soll zu einem gegebenen Element die zugehörige Menge in Form des Repräsentanten finden

Anwendung:

- Knoten seien nummeriert von 0 bis  $n - 1$
- Array `int parent[n]`, Einträge verweisen Richtung Repräsentant
- anfangs `parent[i]=i` für alle  $i$

# Union-Find-Datenstruktur

```
int find(int i) {  
    if (parent[i] == i) return i; // ist i Wurzel des Baums?  
    else { // nein  
        k = find( parent[i] ); // suche Wurzel  
        parent[i] = k; // zeige direkt auf Wurzel  
        return k; // gibt Wurzel zurück  
    }  
}
```

```
union(int i, int j) {  
    int ri = find(i);  
    int rj = find(j); // suche Wurzeln  
    if (ri != rj)  
        parent[ri] = rj; // vereinigen  
}
```

# Algorithmus von Kruskal

```
Set<Edge> MST_Kruskal (V, E, c) {  
    T =  $\emptyset$ ;  
    S = sort(E); // aufsteigend sortieren  
    for (int i = 0; i < |V|; i++)  
        parent[i] = i;  
    foreach (e = {u, v}  $\in$  S)  
        if (find(u)  $\neq$  find(v)) {  
            T = T  $\cup$  e;  
            union(u, v); // Bäume von u und v vereinigen  
        }  
    return T;  
}
```

# Gewichtete union-Operation mit Pfadkompression

- Laufzeit von find hängen von der **Höhe des Baums** ab
  - deshalb wird am Ende von find jeder Knoten auf dem Suchpfad direkt unter die Wurzel gehängt, damit die Suche beim nächsten Mal direkt zu diesem Knoten kommt (**Pfadkompression**)
  - weiterhin sollte bei union der niedrigere Baum unter die Wurzel des höheren gehängt werden (**gewichtete Vereinigung**)
- ⇒ Höhe des Baums ist dann  $O(\log n)$

# Gewichtete union-Operation

```
union(int i, int j) {  
    int ri = find(i);  
    int rj = find(j); // suche Wurzeln  
    if (ri  $\neq$  rj)  
        if (height[ri] < height[rj])  
            parent[ri] = rj;  
        else {  
            parent[rj] = ri;  
            if (height[ri] == height[rj])  
                height[ri]++;  
        }  
}
```

# union / find - Kosten

Situation:

- Folge von union / find -Operationen auf einer Partition von  $n$  Elementen, darunter  $n - 1$  union-Operationen

Komplexität:

- amortisiert  $\log^* n$  pro Operation, wobei

$$\log^* n = \min\{i \geq 1 : \underbrace{\log \log \dots \log n}_{i\text{-mal}} \leq 1\}$$

- bessere obere Schranke: mit inverser Ackermannfunktion (Vorlesung Effiziente Algorithmen und Datenstrukturen I)
- Gesamtkosten für Kruskal-Algorithmus:  $O(m \log n)$  (Sortieren)

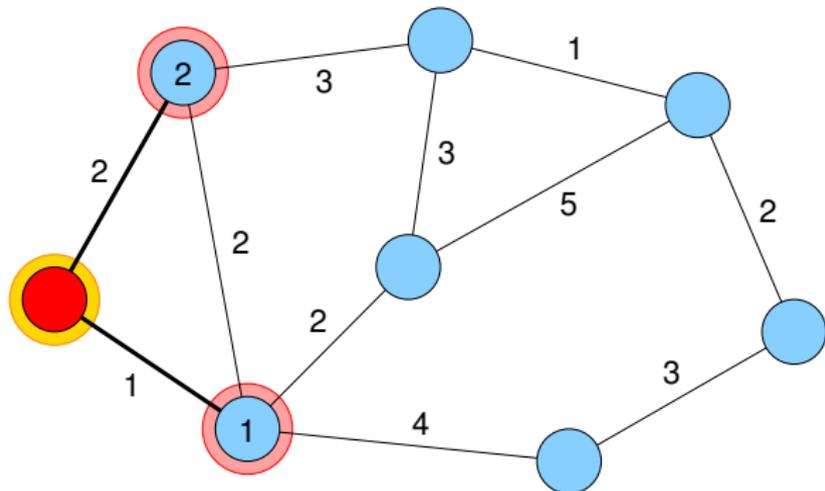
# Algorithmus von Prim

Problem: Wie implementiert man die Regeln effizient?

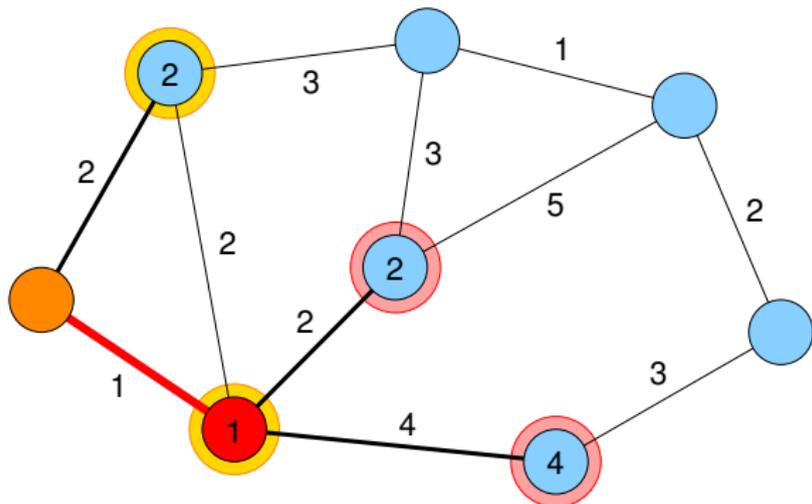
**Alternative** Strategie aus dem ersten Lemma:

- betrachte wachsenden Baum  $T$ , anfangs bestehend aus beliebigem einzelnen Knoten  $s$
  - füge zu  $T$  eine Kante mit minimalem Gewicht von einem Baumknoten zu einem Knoten außerhalb des Baums ein (bei mehreren Möglichkeiten egal welche)
- ⇒ Baum umfasst jetzt 1 Knoten / Kante mehr
- wiederhole Auswahl bis alle  $n$  Knoten im Baum

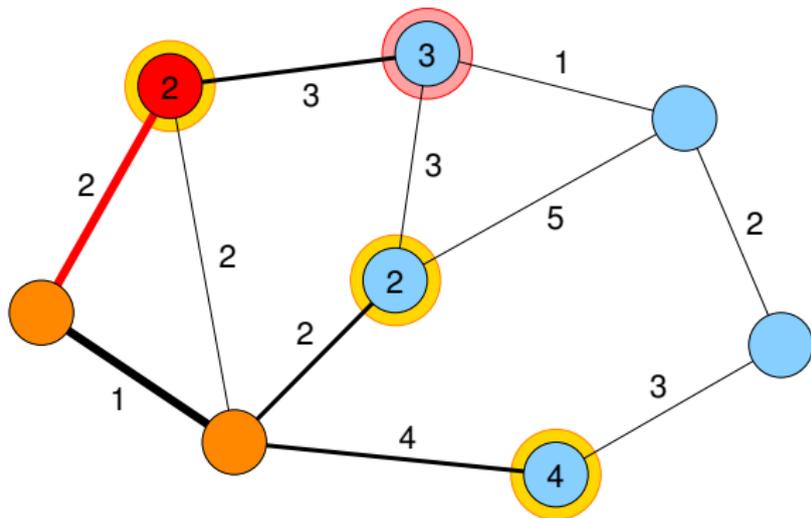
# Algorithmus von Prim



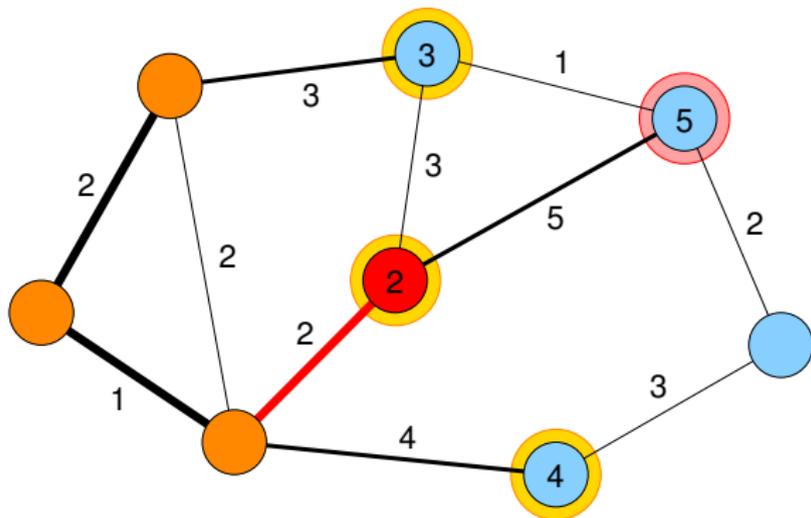
# Algorithmus von Prim



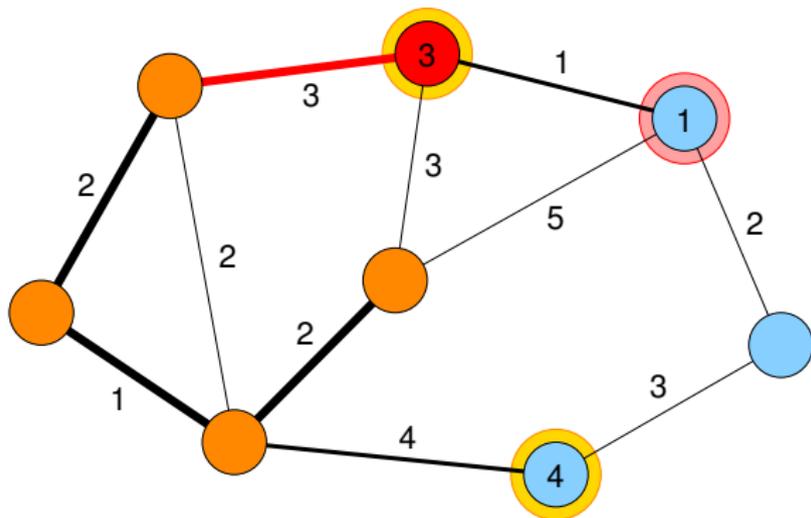
# Algorithmus von Prim



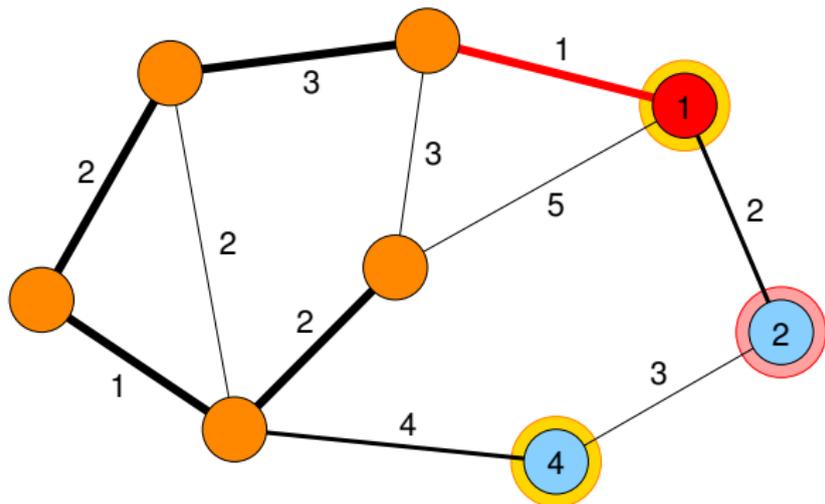
# Algorithmus von Prim



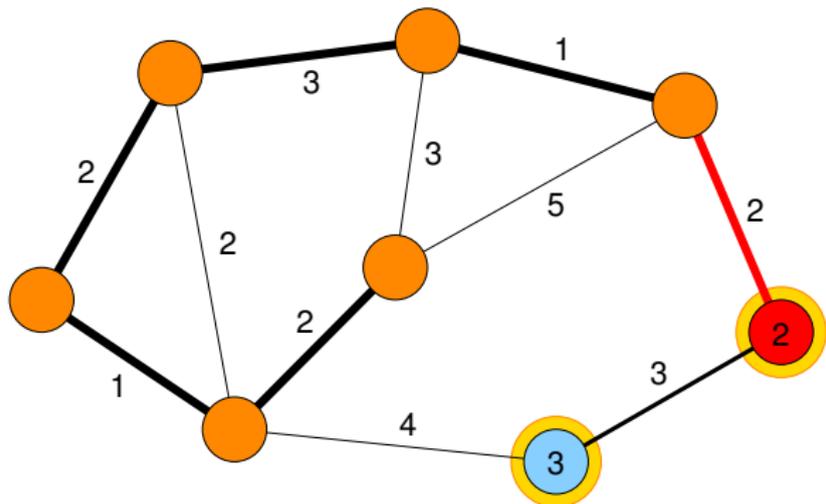
# Algorithmus von Prim



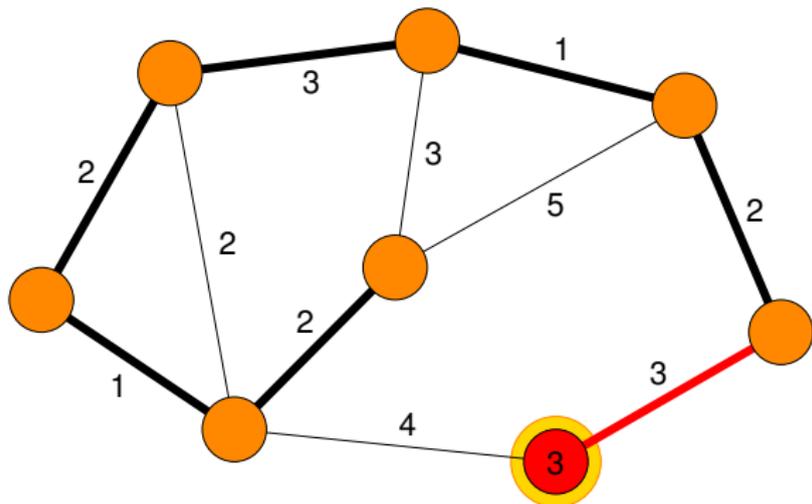
# Algorithmus von Prim



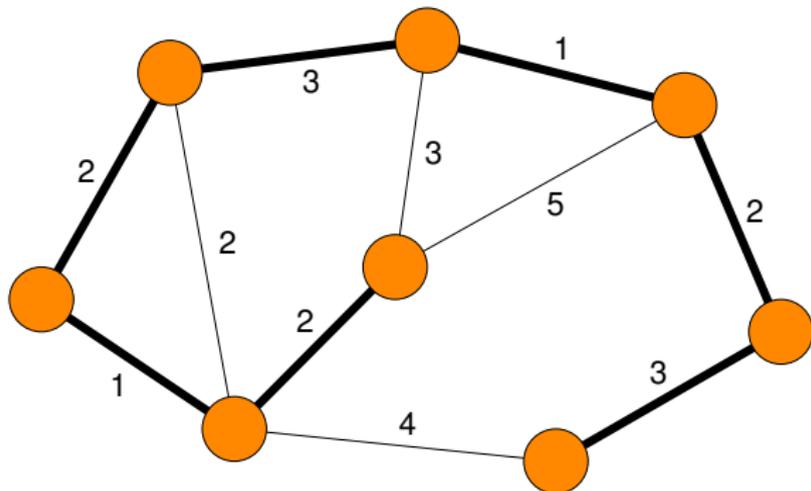
# Algorithmus von Prim



# Algorithmus von Prim



# Algorithmus von Prim



## Jarnik-Prim-Algorithmus f­ur MSB

**Input** :  $G = (V, E)$ ,  $c : E \rightarrow \mathbb{R}_+$ ,  $s \in V$

**Output** : Minimaler Spannbaum zwischen allen  $v \in V$  (in Array pred)

$d[v] = \infty$  for all  $v \in V \setminus s$ ;

$d[s] = 0$ ;  $pred[s] = \perp$ ;

$pq = \langle \rangle$ ;  $pq.insert(s, 0)$ ;

**while**  $\neg pq.empty()$  **do**

$v = pq.deleteMin()$ ;

**forall the**  $\{v, w\} \in E$  **do**

$newWeight = c(v, w)$ ;

**if**  $newWeight < d[w]$  **then**

$pred[w] = v$ ;

**if**  $d[w] == \infty$  **then**  $pq.insert(w, newWeight)$ ;

**else if**  $w \in pq$  **then**

$pq.decreaseKey(w, newWeight)$ ;

$d[w] = newWeight$ ;

# Jarnik-Prim-Algorithmus

Laufzeit:

$$O\left(n \cdot (T_{\text{insert}}(n) + T_{\text{deletMin}}(n)) + m \cdot T_{\text{decreaseKey}}(n)\right)$$

Binärer Heap:

- alle Operationen  $O(\log n)$ , also
- gesamt:  $O((m + n) \log n)$

Fibonacci-Heap: amortisierte Kosten

- $O(1)$  für insert und decreaseKey,
- $O(\log n)$  deleteMin
- gesamt:  $O(m + n \log n)$