

Algorithmen und Datenstrukturen (für ET/IT)

Sommersemester 2016

Dr. Tobias Lasser

Computer Aided Medical Procedures
Technische Universität München



Übersicht Inhalte

- ① Einführung
- ② Grundlagen von Algorithmen
- ③ Grundlagen von Datenstrukturen
- ④ Grundlagen der Korrektheit von Algorithmen
- ⑤ Grundlagen der Effizienz von Algorithmen
- ⑥ Grundlagen des Algorithmen-Entwurfs

- ⑦ Fortgeschrittene Datenstrukturen
- ⑧ Such-Algorithmen
- ⑨ Graph-Algorithmen
- ⑩ Numerische Algorithmen

Organisatorisches

Weiterer Ablauf:

- Montag, 4. und Donnerstag, 7. Juli:
 - **Vorlesung:** Kapitel 11 Datenkompression
- Montag, 11. Juli:
 - **Vorlesung:** Kapitel 12 Kryptographie
- Donnerstag, 14. Juli: **keine** Vorlesung

- Mittwoch, 6. Juli:
 - letzte reguläre **Zentralübung**
- Mittwoch, 13. Juli:
 - **Zentralübung:** zweite Probe-Klausur
- Freitag, 15. Juli:
 - letzte **Tutorfragestunde**
- Donnerstag, 28. Juli:
 - **Klausur**

2

Übersicht Inhalte

Nicht Klausur-relevant:

- ⑪ Datenkompression
- ⑫ Kryptographie

Kapitel 1: Einführung

- Was ist ein **Algorithmus**?
- Was ist eine **Datenstruktur**?
- Wo kommen sie vor?
- Einordnung in Computer-Schema

5

Kapitel 2: Grundlagen von Algorithmen

2.1 Darstellung von Algorithmen

- Pseudocode, Flowchart, Struktogramm, Programmiersprachen
- Churchsche These

2.2 Elementare Bausteine

- Elementarer Verarbeitungsschritt, Sequenz, bedingter Verarbeitungsschritt, Wiederholung

2.3 Logische Ausdrücke

- Konjunktion, Disjunktion, Negation
- Rechenregeln
- Logische Ausdrücke in Pseudocode

6

Kapitel 3: Grundlagen von Datenstrukturen

3.1 Primitive Datentypen und Zahldarstellung

- Bits und Bytes, Primitive Datentypen
- Dezimal-, Binär-, Hexadezimalsystem, 2-Komplement Darstellung
- Fixed point und Floating point Darstellung

3.2 Felder als sequentielle Liste

- Feld als sequentielle Liste mit Operationen

3.3 Zeichen und Zeichenfolgen

- ASCII Code, Unicode, Zeichen und Strings

3.4 Felder als verkettete Liste

- Feld als (doppelt) verkettete Liste mit Operationen

7

Kapitel 3: Grundlagen von Datenstrukturen

3.5 Abstrakte Datentypen

- Abstrakter Datentyp, abstrakte Variable

3.6 Stacks

- Stack mit Operationen und Implementationen (sequentielle / verkettete Liste)

3.7 Queues

- Queue mit Operationen und Implementationen (verkettete Liste, (zirkuläre) sequentielle Liste)

8

Kapitel 4: Grundlagen der Korrektheit von Algorithmen

4.1 Motivation und Spezifikation

- Relative Korrektheit, Nachweis durch Verifikation, Validation

4.2 Verifikation

- Vor- und Nachbedingungen, partielle und totale Korrektheit
- Korrektheitsbeweis für 4 Bausteine

4.3 Beispiel: Insertion Sort

- Algorithmus und Verifikation

4.4 Validation

- Systematische Tests: Blackbox-, Whitebox-, Regression-, Integrations-Test
- Fehlerquellen, fehlertolerantes und fehlerpräventives Programmieren

9

Kapitel 6: Grundlagen des Algorithmen-Entwurfs

6.1 Entwurfsprinzipien

- Prinzip Verfeinerung, Prinzip Algorithmen-Muster

6.2 Divide and Conquer

- Muster Divide and Conquer, MergeSort, QuickSort
- Ausblick auf später: Binäre Suche, Strassen, FFT

6.3 Greedy-Algorithmen

- Muster Greedy, Wechselgeld, minimaler Spannbaum
- Ausblick auf später: Dijkstra, Prim (Huffman Code - nicht Klausur-relevant)

6.4 Backtracking

- Muster Backtracking, Labyrinth, Traveling Salesman, Acht-Damen-Problem

6.5 Dynamisches Programmieren

- Muster dynamisches Programmieren, Fibonacci-Zahlen

11

Kapitel 5: Grundlagen der Effizienz von Algorithmen

5.1 Motivation

- Komplexität Insertion Sort, Wachstumsraten

5.2 RAM-Modell

- Rechnermodell zur Laufzeitanalyse

5.3 Landau-Symbole

- Landau-Symbole O und Θ , Konstanten und Rechenregeln
- Kategorisierung der Effizienz von Algorithmen
- Komplexität der 4 Bausteine

10

Ende Teil 1

Ende Teil 1, nun Teil 2

12

Kapitel 7: Fortgeschrittene Datenstrukturen

- 7.1 Graphen
- 7.2 Bäume
- 7.3 Heaps
- 7.4 Priority Queues

Kapitel 7.1: Graphen

- Ungerichteter Graph:

Definition: Ungerichteter Graph
Ein **ungerichteter Graph** ist ein Paar $G = (V, E)$ mit

- V endliche Menge der **Knoten**
- $E \subseteq \{\{u, v\} : u, v \in V\}$ Menge der **Kanten**

- Gerichteter Graph:

Definition: Gerichteter Graph
Ein **gerichteter Graph** ist ein Paar $G = (V, E)$ mit

- V endliche Menge der **Knoten**
- $E \subseteq V \times V$ Menge der **Kanten**

- Gewichteter Graph:

Definition: Gewichteter Graph
Ein **gewichteter Graph** ist ein Graph $G = (V, E)$ mit einer Gewichtsfunktion $w : E \rightarrow \mathbb{R}$.

Kapitel 7.1: Graphen

- **Eigenschaften von Graphen:**
 - adjazente Knoten
 - gerichteter Graph: Eingangs- und Ausgangsgrad
 - ungerichteter Graph: Grad
 - Pfad zwischen Knoten
 - Zyklus in gerichteten und ungerichteten Graphen
 - (starker) Zusammenhang und (starke) Zusammenhangskomponenten
- **Darstellung von Graphen:**
 - Adjazenzmatrizen, Speicherkomplexität: $O(|V|^2)$
 - Adjazenzlisten, Speicherkomplexität: $O(|V| + |E|)$
 - Komplexitäten der Operationen
 - Kanten-Operationen einfach mit Adjazenzmatrix: $O(1)$
 - Knoten einfügen einfach mit Adjazenzliste: $O(1)$
 - Knoten löschen immer aufwendig: $O(|V|^2)$ bzw. $O(|V| + |E|)$

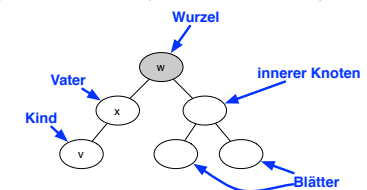
Kapitel 7.2: Bäume

- Bäume und Wälder:

Definition: Wald und Baum

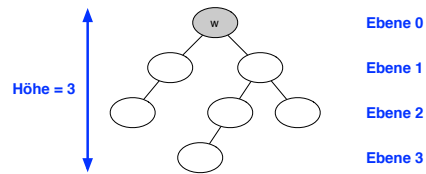
- Ein azyklischer ungerichteter Graph heißt auch **Wald**.
- Ein zusammenhängender, azyklischer ungerichteter Graph heißt auch **Baum**.

- falls Kante entfernt: nicht mehr zusammenhängend
- falls Kante hinzugefügt: nicht mehr azyklisch
- $|E| = |V| - 1$
- **Eigenschaften:**
 - Wurzelknoten, Vaterknoten, innere Knoten, Blätter



Kapitel 7.2: Bäume

- Eigenschaften:
 - Tiefe, Ebene, Höhe



- Spezialfälle:
 - geordnete Bäume (\rightarrow Suchbäume)
 - n-äre Bäume
 - Binärbäume
- Darstellung von Bäumen:
 - mit (doppelt) verketteten Listen
 - Binärbäume mit (doppelt) verketteten Listen (Kind links/rechts) bzw. als sequentielle Liste

17

Kapitel 7.2: Bäume

- Traversierung von Binärbäumen:
 - Tiefensuche/DFS: Pre-order (wlr), In-order (lwr), Post-order (lrw)
Implementierung z.B. mit Stack
 - Breitensuche/BFS
Implementierung z.B. mit Queue

18

Kapitel 7.3: Heaps

- Heap:

Definition Heap

Sei $G = (V, E)$ ein Binärbaum mit Wurzel $w \in V$. Jeder Knoten $v \in V$ sei mit einem Wert $key(v)$ verknüpft, die Werte seien durch \leq, \geq geordnet.

G heißt **Heap**, falls er folgende zwei Eigenschaften erfüllt:

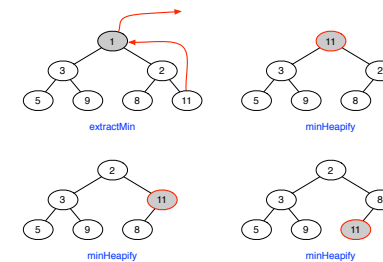
- G ist **fast vollständig**, d.h. alle Ebenen sind vollständig gefüllt, ausser auf der untersten Ebene, die von links her nur bis zu einem bestimmten Punkt gefüllt sein muss.
- G erfüllt die **Min-Heap-Eigenschaft** bzw. die **Max-Heap-Eigenschaft**, d.h. für alle Knoten $v \in V, v \neq w$ gilt
 - Min-Heap: $key(v.vater) \leq key(v)$
 - Max-Heap: $key(v.vater) \geq key(v)$

Entsprechend der Heap-Eigenschaft heißt G **Min-Heap** bzw. **Max-Heap**.

19

Kapitel 7.3: Heaps

- Operationen:
 - minHeapify: $O(\log n)$
 - buildMinHeap: $O(n)$
 - extractMin: $O(\log n)$



- HeapSort:
 - buildMinHeap und extractMin bis leer
 - in-place, $O(n \log n)$, besser als QuickSort im worst case

20

Kapitel 7.4: Priority Queues

- Priority Queue:

Definition Priority Queue

Eine Priority Queue ist ein abstrakter Datentyp. Sie beschreibt einen Queue-artigen Datentyp für eine Menge von Elementen mit zugeordnetem Schlüssel und unterstützt die Operationen

- Einfügen von Elemente mit Schlüssel in die Queue,
- Entfernen von Element mit minimalem Schlüssel aus der Queue,
- Ansehen des Elementes mit minimalem Schlüssel in der Queue.

- Operationen auf Priority Queue als Heap:

- extractMin und insert, beides $O(\log n)$
- decreaseKey: $O(\log n)$

- auch implementierbar mit (un)sortierten Feldern

21

Kapitel 8: Such-Algorithmen

8.1 Lineare Suche

8.2 Binäre Suche

8.3 Binäre Suchbäume

8.4 Balancierte Suchbäume

8.5 Suchen mit Hashtabellen

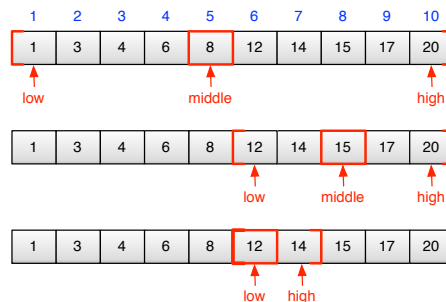
8.6 Suchen in Zeichenketten

22

Kapitel 8.1 und 8.2: Lineare und binäre Suche

- Lineare Suche: durchlaufe Array bis gesuchter Schlüssel gefunden: $O(n)$

- Binäre Suche: sortiere Array, dann Divide and Conquer: $O(\log n)$



23

Kapitel 8.3: Binäre Suchbäume

- Binärer Suchbaum:

Definition binärer Suchbaum

Sei $G = (V, E)$ ein Binärbaum mit Wurzel $w \in V$. Jeder Knoten $v \in V$ sei mit einem Wert $key(v)$ verknüpft, die Werte seien durch \leq, \geq geordnet.

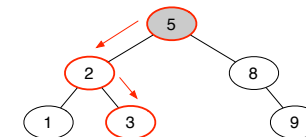
G heißt binärer Suchbaum, falls für alle inneren Knoten $v \in V$ gilt

- für alle Knoten x im linken Teilbaum $v.left$ gilt

$$key(x) \leq key(v)$$

- für alle Knoten y im rechten Teilbaum $v.right$ gilt

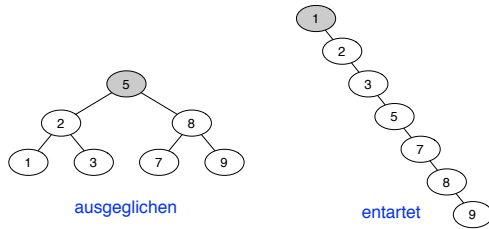
$$key(y) \geq key(v)$$



24

Kapitel 8.3: Binäre Suchbäume

- **Operationen** auf binären Suchbäumen mit Höhe h :
 - Suchen, Minimum, Maximum: $O(h)$
 - Einfügen, Löschen: $O(h)$
- **Effizienz** direkt abhängig von Höhe
 - best case: $O(\log n)$
 - worst case: $O(n)$



- **Ausweg:** balancierte Suchbäume

25

Kapitel 8.4: Balancierte Suchbäume

- **Problem:** binären Suchbaum balanciert zu halten ist aufwendig: $O(n)$
- **Ausweg:** Abschwächung der Kriterien
 - balanciert: AVL-Bäume
 - Binärbaum: B-Bäume, Rot-Schwarz-Bäume
- **AVL-Bäume:**

Definition AVL-Baum

Ein binärer Suchbaum $G = (V, E)$ mit Wurzel $w \in V$ heißt **AVL-Baum**, falls er die **AVL-Bedingung** erfüllt:

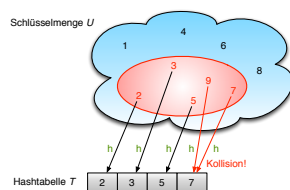
- für jeden inneren Knoten $v \in V$ gilt: Höhe von linkem und rechtem Teilbaum von v unterscheidet sich maximal um 1.

- Anpassung von Einfügen, Löschen mit Rotation und Doppelrotation

26

Kapitel 8.5: Suchen mit Hashtabellen

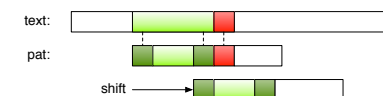
- **Motivation:** Such-Algorithmen für Wörterbücher mit Komplexität $O(1)$
 - Operationen: **search**, **insert**, **erase**
- **Adresstabellen:** Laufzeit $O(1)$, aber gigantischer Speicherverbrauch!
- **Hashtabellen:** reduziere Speicherverbrauch über **Hashfunktion**, behalte Laufzeit $O(1)$
 - **Kollisionsauflösung** durch Verkettung, offene Adressierung
 - **Hashfunktionen** mittels Divisionsmethode, Multiplikationsmethode, universelles Hashing



27

Kapitel 8.6: Suchen in Zeichenketten

- **Problem:** suche Muster (Länge m) in Text (Länge n)
- **Brute-Force Algorithmus:** teste an jeder Textstelle $O(nm)$
- **Knuth-Morris-Pratt Algorithmus:** $O(n + m)$
 - **Shift-Tabelle:** Länge des eigentlichen Randes des Präfixes von Muster
 - modifizierter Brute-Force-Algorithmus:
 - 0 in Shift-Tabelle: direkt weitersuchen ohne zurückspringen
 - > 0 in Shift-Tabelle: mitten in Muster weitersuchen



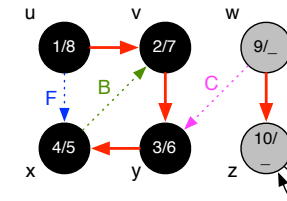
28

Kapitel 9: Graph-Algorithmen

- 9.1 Tiefensuche
- 9.2 Breitensuche
- 9.3 Kürzeste Pfade
- 9.4 Minimale Spannbäume

Kapitel 9.1: Tiefensuche

- Tiefensuche / DFS: $O(|V| + |E|)$



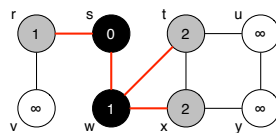
- Implementation rekursiv oder mit Stack
- Anwendungen:
 - berechnet Spannwald von Graph, markiert Rückkanten, Vorwärtskanten und Cross-Kanten
 - Test aus Zusammenhang
 - Test auf Zyklensfreiheit
 - Segmentierung von binären Bildern mit Nachbarschafts-Graph

29

30

Kapitel 9.2: Breitensuche

- Breitensuche / BFS: $O(|V| + |E|)$



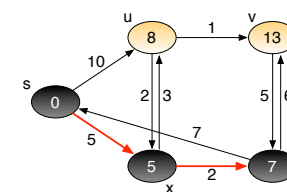
- Implementation mit Queue
- Anwendungen:
 - Besuch von Knoten in Zusammenhangskomponente
 - Berechnung Länge der kürzesten Pfade (d.h. Anzahl von Kanten)
 - Segmentierung von binären Bildern mit Nachbarschafts-Graph

Kapitel 9.3: Kürzeste Pfade

- Kürzester Pfad in gewichtetem Graph: Pfad mit minimaler Summe der Gewichte

$$w_{min}(u, v) = \begin{cases} \min\{w(p) : p \text{ Pfad von } u \text{ nach } v\} & \text{Pfad existiert} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

- Dijkstra Algorithmus: Greedy-Algorithmus, $O(|E| \log |V|)$
 - Voraussetzung: Kanten haben positives Gewicht
 - erweitere Pfad um kürzeste Kante heraus aus Menge aktueller Knoten
 - entscheidendes Hilfsmittel: Priority Queue

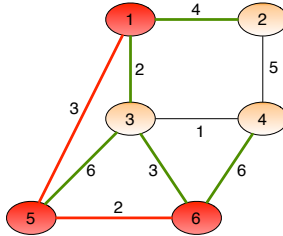


31

32

Kapitel 9.4: Minimale Spannbäume

- **Spannbaum**: Teilgraph, der Baum ist und alle Knoten enthält
- **minimaler Spannbaum**: Spannbaum mit minimalem Gewicht
- **Prim Algorithmus**: Greedy-Algorithmus, $O(|E| \log |V|)$
 - erweitere aktuelle Lösung um Kante mit minimalen Gewicht heraus aus Menge aktueller Knoten
 - entscheidendes Hilfsmittel: Priority Queue



33

Kapitel 10: Numerische Algorithmen

- 10.1 Matrizen
- 10.2 Lineare Gleichungen
- 10.3 Die LUP-Zerlegung
- 10.4 Least Squares Probleme
- 10.5 Fast Fourier Transform

34

Kapitel 10.1: Matrizen

- **Matrix** als Element von Vektorraum, lineare Abbildung, Anordnung von Zahlen
- **Matrix-Operationen**: Addition, Skalar-Multiplikation, Matrix-Multiplikation
- **Matrix-Multiplikation**:
 - regulär: $O(n^3)$
 - Strassen (Divide and Conquer): $O(n^{2.807})$

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_4 - \mathbf{q}_5 + \mathbf{q}_7 & \mathbf{q}_3 + \mathbf{q}_5 \\ \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_4 & \mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_6 \end{pmatrix}$$

35

Kapitel 10.2: Lineare Gleichungen

- **Lineare Gleichung**: $a^T x = b$
- **Lineares Gleichungssystem**: $Ax = b$
 - Anzahl Lösungen: keine, eine oder unendlich viele
- **Lösen von linearen Systemen**:
 - mit Inverser A^{-1} (numerisch nicht stabil)
 - mit Gauss-Elimination (numerisch nicht stabil)
 - mit Zerlegung und Vorwärts-/Rückwärts-Substitution (stabil mit geeigneter Zerlegung)
 - mit iterativen Verfahren

36

Kapitel 10.2: Lineare Gleichungen

- Matrix-Zerlegungen:
 - Cholesky-Zerlegung für symm. pos. def. Matrizen ($\frac{n^3}{3}$ FLOPs)
 - QR-Zerlegung für invertierbare Matrizen ($\frac{2n^3}{3}$ FLOPs)
 - LUP-Zerlegung für invertierbare Matrizen ($\frac{2n^3}{3}$ FLOPs)
 - SVD-Zerlegung für beliebige Matrizen ($2mn^2 + 2n^3$ FLOPs)

37

Kapitel 10.4: Least squares Probleme

- minimiere Approximationsfehler

$$\eta_j = F(x_j) - y_j$$

für Datenpunkte (x_j, y_j) und Funktion $F(x) = \sum_i c_i f_i(x)$

Least-squares Lösung

Sei $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $y \in \mathbb{R}^m$ mit $m \geq n$. Eine Lösung $c \in \mathbb{R}^n$ des Minimierungs-Problems

$$\min_c \|Ac - y\| \quad \text{or} \quad \min_c \|Ac - y\|^2$$

heißt Least-squares Lösung.

- Normalengleichung:

$$A^T A c = A^T y$$

- Pseudoinverse

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$$

und Berechnung via QR/SVD Methode

39

Kapitel 10.3: Die LUP-Zerlegung

- LU und LUP-Zerlegung
- Permutationsmatrizen und Darstellung
- Berechnung der LU- und LUP-Zerlegung:
 - rekursive Berechnung von Gauss-Eliminations-Schritten (Faktorisierung mittels Schur-Komplement)
 - partielles Pivoting zur Vermeidung von Division durch 0 und besserer Stabilität

38

Kapitel 10.5: Fast Fourier Transform

- Polynome in Koeffizientendarstellung:

$$A(x) = \sum_{j=0}^{n-1} a_j x^j$$

- Operationen:

- Auswertung: $O(n)$ mit Horner-Schema
- Addition: $O(n)$
- Multiplikation: $O(n^2)$

- Faltung zweier Vektoren entspricht Polynom-Multiplikation

40

- Polynome in Stützstellendarstellung:

$$\{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})\}$$

- Operationen:

- Addition: $O(n)$
- Multiplikation: $O(n)$

- Konversion zwischen Darstellungen:

- Koeffizienten \rightarrow Stützstellen: Auswertung mit FFT $O(n \log n)$
- Stützstellen \rightarrow Koeffizienten: Interpolation mit IFFT $O(n \log n)$

41

Ausblick: Kapitel 11 und 12

Nicht Klausur-relevant!

11 Datenkompression

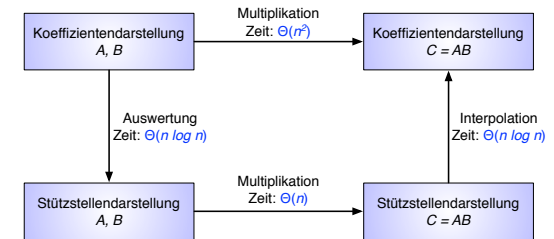
- 11.1 Einführung
- 11.2 Grundlagen der Informationstheorie
- 11.3 Huffman Codes
- 11.4 LZ77 und LZ78
- 11.5 JPEG

12 Kryptographie

- 12.1 Einführung
- 12.2 Symmetrische Verschlüsselung
- 12.3 RSA

43

- Effiziente Faltung / Polynom-Multiplikation:



- Diskrete Fourier Transformation: Polynom-Auswertung an n -ten komplexen Einheitswurzeln, $O(n^2)$
- Fast Fourier Transformation: DFT mit Divide and Conquer und Halbierungslemma, $O(n \log n)$
 - Implementierung z.B. entrekursiviert mit Butterfly-Schema

42