

Datenstrukturen und Algorithmen

Vorlesung am D-Math (CSE) der ETH Zürich

Felix Friedrich

FS 2017

1. Einführung

Algorithmen und Datenstrukturen, drei Beispiele

Willkommen!

Vorlesungshomepage:

<http://lec.inf.ethz.ch/DA/2017>

Das Team:

Assistenten

Alexander Pilz

Daniel Hupp

Lukas Humbel

Dozent

Felix Friedrich

1

2

Ziele der Vorlesung

- Verständnis des Entwurfs und der Analyse grundlegender Algorithmen und Datenstrukturen.
- Vertiefter Einblick in ein modernes Programmiermodell (mit C++).
- Wissen um Chancen, Probleme und Grenzen des parallelen und nebenläufigen Programmierens.

3

4

Ziele der Vorlesung

Einerseits

- Unverzichtbares Grundlagenwissen aus der Informatik.

Andererseits

- Vorbereitung für Ihr weiteres Studium und die Praxis.

Inhalte der Vorlesung

Datenstrukturen / Algorithmen

Begriff der Invariante, Kostenmodell, Landau Symbole

Algorithmenentwurf, Induktion

Suchen und Auswahl, Sortieren

Dynamic Programming Graphen, Kürzeste Wege, Backtracking, Flow

Wörterbücher: Hashing und Suchbäume, AVL

Sortiernetzwerke, parallele Algorithmen

Randomisierte Algorithmen (Gibbs/SA), Multiskalen

Geometrische Algorithmen, High Performance LA

Programmieren mit C++

RAII, Move Konstruktion, Smart Pointers, Constexpr, user defined literals

Templates und Generische Programmierung

Exceptions Funktoren und Lambdas

Promises and Futures

Threads, Mutexs and Monitors

Parallel Programming

Parallelität vs. Concurrency, Speedup (Amdahl/-Gustavson), Races, Memory Reordering, Atomic Registers, RMW (CAS,TAS), Deadlock/Starvation

Literatur

Algorithmen und Datenstrukturen, T. Ottmann, P. Widmayer, Spektrum-Verlag, 5. Auflage, 2011

Algorithmen - Eine Einführung, T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein, Oldenbourg, 2010

Introduction to Algorithms, T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein, 3rd ed., MIT Press, 2009

The C++ Programming Language, B. Stroustrup, 4th ed., Addison-Wesley, 2013.

The Art of Multiprocessor Programming, M. Herlihy, N. Shavit, Elsevier, 2012.

1.2 Algorithmen

[Cormen et al, Kap. 1;Ottman/Widmayer, Kap. 1.1]

Algorithmus

Algorithmus: wohldefinierte Berechnungsvorschrift, welche aus Eingabedaten (*input*) Ausgabedaten (*output*) berechnet.

Beispielproblem

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n)

Output : Eine Permutation $(a'_1, a'_2, \dots, a'_n)$ der Folge $(a_i)_{1 \leq i \leq n}$, so dass $a'_1 \leq a'_2 \leq \dots \leq a'_n$

Mögliche Eingaben

$(1, 7, 3), (15, 13, 12, -0.5), (1) \dots$

Jedes Beispiel erzeugt eine *Probleminstanz*.

9

10

Beispiele für Probleme in der Algorithmik

- Routenplanung: Shortest Path
- Kryptographie / Digitale Signaturen
- Stundenpläne / Arbeitspläne: Linear Programming
- DNA Matching: Dynamic Programming
- Fabrikationspipeline: Topologische Sortierung
- Geometrische Probleme, z.B. Konvexe Hülle

Charakteristik

- Extrem grosse Anzahl potentieller Lösungen
- Praktische Anwendung

11

12

Datenstrukturen

- Organisation der Daten, zugeschnitten auf die Algorithmen die auf den Daten operieren
- Programme = Algorithmen + Datenstrukturen.

13

Sehr schwierige Probleme

- NP-vollständige Probleme: Keine bekannte effiziente Lösung (Fehlen einer solchen Lösung ist aber unbewiesen!)
- Beispiel: Travelling Salesman Problem

14

Ein Traum

- Wären Rechner unendlich schnell und hätten unendlich viel Speicher ...
- ... dann bräuchten wir die Theorie der Algorithmen (nur) für Aussagen über Korrektheit (incl. Terminierung).

15

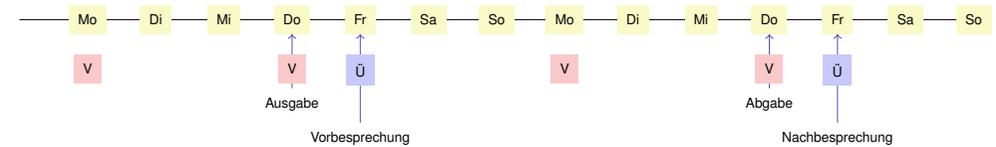
Die Realität

- Ressourcen sind beschränkt und nicht umsonst:
- Rechenzeit → Effizienz
 - Speicherplatz → Effizienz

16

1.3 Organisation

Ablauf des Übungsbetriebes



- Übungsblattausgabe zur Vorlesung am Donnerstag (online).
- Vorbereitung am Freitag.
- Bearbeitung der Übung bis spätestens am Donnerstag darauf.
- Nachbereitung der Übung am Freitag darauf. Feedback zu den Abgaben innerhalb einer Woche nach Nachbereitung.

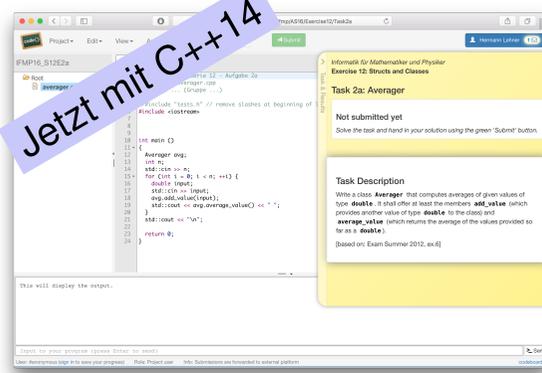
17

18

Codeboard

Codeboard ist eine Online-IDE: Programmieren im Browser!

- Sie können Beispiele ausprobieren, ohne dass Sie irgendwelche Tools installieren müssen.
- Auch für die Übungen eingesetzt.

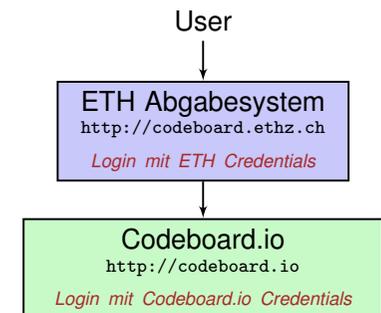


19

Codeboard @ETH

Codeboard besteht aus zwei unabhängigen Systemen, die miteinander kommunizieren:

- **Das ETH Abgabesystem:** Ermöglicht es uns, ihre Aufgaben zu bewerten
- **Die Online IDE:** Die Programmierumgebung



20

Codeboard

Codeboard.io Registrierung

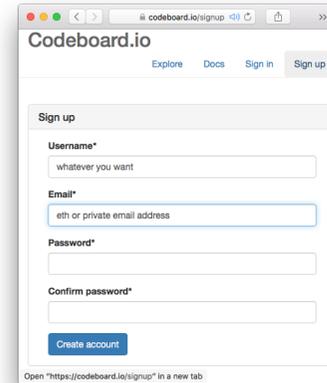
Gehen Sie auf <http://codeboard.io> und erstellen Sie dort ein Konto, bleiben Sie am besten eingeloggt.

Einschreibung in Übungsgruppen

Gehen Sie auf <http://codeboard.ethz.ch/da> und schreiben Sie sich dort in eine Übungsgruppe ein.

Codeboard.io Registrierung

Falls Sie noch keinen **Codeboard.io** Account haben ...



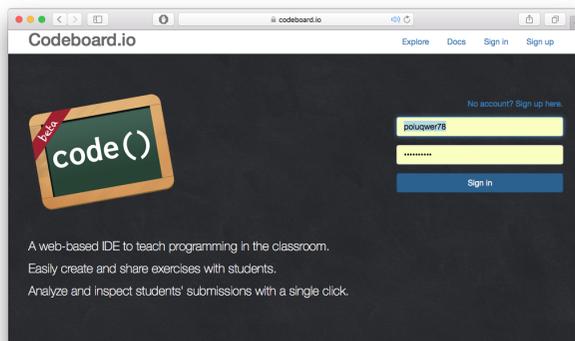
- Wir verwenden die Online IDE **Codeboard.io**
- Erstellen Sie dort einen Account, um Ihren Fortschritt abzuspeichern und später Submissions anzuschauen
- Anmeldedaten können beliebig gewählt werden! *Verwenden Sie nicht das ETH Passwort.*

21

22

Codeboard.io Login

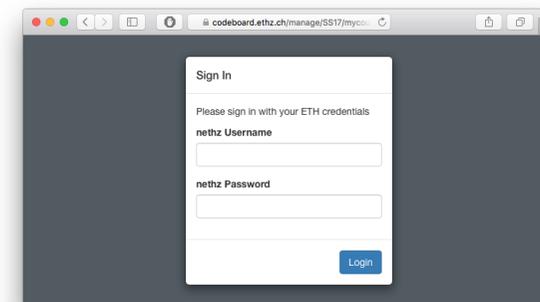
Falls Sie schon einen Account haben, loggen Sie sich ein:



23

Einschreibung in Übungsgruppen - I

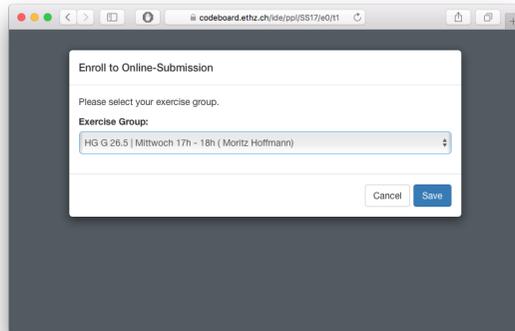
- Besuchen Sie <http://codeboard.ethz.ch/da>
- Loggen Sie sich mit Ihrem nethz Account ein.



24

Einschreibung in Übungsgruppen - II

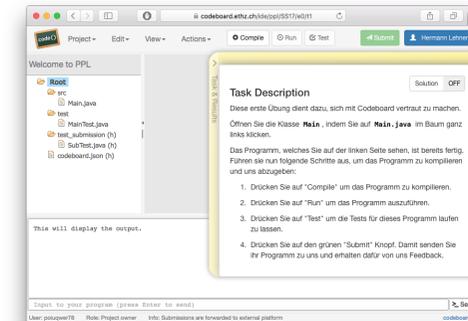
Schreiben Sie sich in diesem Dialog in eine Übungsgruppe ein.



25

Die erste Übung

Sie sind nun eingeschrieben und die erste Übung ist geladen. Folgen Sie den Anweisungen in der gelben Box. Das Übungsblatt auf der Kurshomepage enthält weitere Anweisungen und Erklärungen.



26

Die erste Übung - Codeboard.io Login

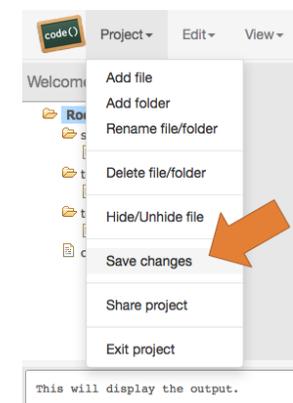
Falls Sie diese Nachricht sehen, klicken Sie auf [Sign in now](#) und melden Sie sich dort mit ihrem **Codeboard.io** Account ein.



27

Die erste Übung - Fortschritt speichern!

Achtung! Speichern Sie ihren Fortschritt regelmässig ab. So können Sie jederzeit an einem anderen Ort weiterarbeiten.



28

Zu den Übungen

- Seit HS 2013 für Prüfungszulassung kein Testat mehr erforderlich.
- Bearbeitung der wöchentlichen Uebungsserien ist freiwillig, wird aber **dringend** empfohlen!

29

Relevantes für die Prüfung

Prüfungsstoff für die Endprüfung (in der Prüfungssession 2017) schliesst ein

- Vorlesungsinhalt (Vorlesung, Handout) und
- Übungsinhalte (Übungsstunden, Übungsblätter).

Prüfung (120 min) ist schriftlich. Hilfsmittel: vier A4-Seiten (bzw. 2 A4-Blätter doppelseitig) entweder handgeschrieben oder mit Fontgrösse minimal 11 Punkt.

30

In Ihrem und unserem Interesse

Bitte melden sie frühzeitig, wenn Sie Probleme sehen, wenn Ihnen

- die Vorlesung zu schnell, zu schwierig, zu ist
- die Übungen nicht machbar sind ...
- Sie sich nicht gut betreut fühlen ...

Kurz: wenn Ihnen irgendetwas auf dem Herzen liegt.



31

1.4 Altägyptische Multiplikation

Altägyptische Multiplikation

32

Beispiel 1: Altägyptische Multiplikation¹

Berechnung von $11 \cdot 9$

11		9		9		11
22		4		18		5
44		2		36		2
88		1		72		1
99		—		99		—

- 1 Links verdoppeln, rechts ganzzahlig halbieren.
- 2 Gerade Zahl rechts \Rightarrow Zeile streichen.
- 3 Übrige Zeilen links addieren.

¹Auch bekannt als Russische Bauernmultiplikation

33

Vorteile

- Kurze Beschreibung, einfach zu verstehen.
- Effizient für Computer im Dualsystem: Verdoppeln = Left Shift, Halbieren = Right Shift

Beispiel

left shift $9 = 01001_2 \rightarrow 10010_2 = 18$

right shift $9 = 01001_2 \rightarrow 00100_2 = 4$

34

Fragen

- Funktioniert das immer? (z.B. für negative Zahlen)
- Wenn nicht, wann?
- Wie beweist man die Korrektheit?
- Besser als die "Schulmethode"?
- Was heisst "gut"? Lässt sich Güte anordnen?
- Wie schreibt man das Verfahren unmissverständlich auf?

35

Beobachtung

Wenn $b > 1$, $a \in \mathbb{Z}$, dann:

$$a \cdot b = \begin{cases} 2a \cdot \frac{b}{2} & \text{falls } b \text{ gerade,} \\ a + 2a \cdot \frac{b-1}{2} & \text{falls } b \text{ ungerade.} \end{cases}$$

36

Terminierung

$$a \cdot b = \begin{cases} a & \text{falls } b = 1, \\ 2a \cdot \frac{b}{2} & \text{falls } b \text{ gerade,} \\ a + 2a \cdot \frac{b-1}{2} & \text{falls } b \text{ ungerade.} \end{cases}$$

37

Rekursiv funktional notiert

$$f(a, b) = \begin{cases} a & \text{falls } b = 1, \\ f(2a, \frac{b}{2}) & \text{falls } b \text{ gerade,} \\ a + f(2a, \frac{b-1}{2}) & \text{falls } b \text{ ungerade.} \end{cases}$$

38

Funktion programmiert

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b){
    if(b==1)
        return a;
    else if (b%2 == 0)
        return f(2*a, b/2);
    else
        return a + f(2*a, (b-1)/2);
}
```

39

Korrektheit

$$f(a, b) = \begin{cases} a & \text{falls } b = 1, \\ f(2a, \frac{b}{2}) & \text{falls } b \text{ gerade,} \\ a + f(2a \cdot \frac{b-1}{2}) & \text{falls } b \text{ ungerade.} \end{cases}$$

Zu zeigen: $f(a, b) = a \cdot b$ für $a \in \mathbb{Z}$, $b \in \mathbb{N}^+$.

40

Beweis per Induktion

Anfang: $b = 1 \Rightarrow f(a, b) = a = a \cdot 1$.

Hypothese: $f(a, b') = a \cdot b'$ für $0 < b' \leq b$

Schritt: $f(a, b + 1) \stackrel{!}{=} a \cdot (b + 1)$

$$f(a, b + 1) = \begin{cases} f(2a, \overbrace{\frac{b+1}{2}}^{\leq b}) = a \cdot (b + 1) & \text{falls } b \text{ ungerade,} \\ a + f(2a, \underbrace{\frac{b}{2}}_{\leq b}) = a + a \cdot b & \text{falls } b \text{ gerade.} \end{cases}$$



41

Endrekursion

Die Rekursion lässt sich *endrekursiv* schreiben

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b){
    if(b==1)
        return a;
    else if (b%2 == 0)
        return f(2*a, b/2);
    else
        return a + f(2*a, (b-1)/2);
}
```



```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b){
    if(b==1)
        return a;
    int z=0;
    if (b%2 != 0){
        --b;
        z=a;
    }
    return z + f(2*a, b/2);
}
```

42

Endrekursion \Rightarrow Iteration

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b){
    if(b==1)
        return a;
    int z=0;
    if (b%2 != 0){
        --b;
        z=a;
    }
    return z + f(2*a, b/2);
}
```



```
int f(int a, int b) {
    int res = 0;
    while (b != 1) {
        int z = 0;
        if (b % 2 != 0){
            --b;
            z = a;
        }
        res += z;
        a *= 2; // neues a
        b /= 2; // neues b
    }
    res += a; // Basisfall b=1
    return res;
}
```

43

Vereinfachen

```
int f(int a, int b) {
    int res = 0;
    while (b != 1) {
        int z = 0;
        if (b % 2 != 0){
            --b;  $\rightarrow$  Teil der Division
            z = a;  $\rightarrow$  Direkt in res
        }
        res += z;
        a *= 2;
        b /= 2;
    }
    res += a;  $\rightarrow$  in den Loop
    return res;
}
```



```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b) {
    int res = 0;
    while (b > 0) {
        if (b % 2 != 0)
            res += a;
        a *= 2;
        b /= 2;
    }
    return res;
}
```

44

Invarianten!

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b) {
  int res = 0;
  while (b > 0) {
    if (b % 2 != 0){
      res += a;
      --b;
    }
    a *= 2;
    b /= 2;
  }
  return res;
}
```

Sei $x = a \cdot b$.

Hier gilt $x = a \cdot b + res$

Wenn hier $x = a \cdot b + res \dots$

... dann auch hier $x = a \cdot b + res$
 b gerade

Hier gilt $x = a \cdot b + res$

Hier gilt $x = a \cdot b + res$ und $b = 0$

Also $res = x$.

45

Zusammenfassung

Der Ausdruck $a \cdot b + res$ ist eine *Invariante*.

- Werte von a, b, res ändern sich, aber die Invariante bleibt "im Wesentlichen" unverändert:
- Invariante vorübergehend durch eine Anweisung zerstört, aber dann darauf wieder hergestellt.
- Betrachtet man solche Aktionsfolgen als atomar, bleibt der Wert tatsächlich invariant
- Insbesondere erhält die Schleife die Invariante (*Schleifeninvariante*), wirkt dort wie der Induktionsschritt bei der vollständigen Induktion
- Invarianten sind offenbar mächtige Beweishilfsmittel!

46

Weiteres Kürzen

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b) {
  int res = 0;
  while (b > 0) {
    if (b % 2 != 0)
      res += a;
    a *= 2;
    b /= 2;
  }
  return res;
}
```



```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b) {
  int res = 0;
  while (b > 0) {
    res += a * (b%2);
    a *= 2;
    b /= 2;
  }
  return res;
}
```

47

Analyse

```
// pre: b>0
// post: return a*b
int f(int a, int b) {
  int res = 0;
  while (b > 0) {
    res += a * (b%2);
    a *= 2;
    b /= 2;
  }
  return res;
}
```

Altägyptische Multiplikation entspricht der Schulmethode zur Basis 2.

$$\begin{array}{r} 1\ 0\ 0\ 1 \times 1\ 0\ 1\ 1 \\ \hline 1\ 0\ 0\ 1 \quad (9) \\ 1\ 0\ 0\ 1 \quad (18) \\ \hline 1\ 1\ 0\ 1\ 1 \\ 1\ 0\ 0\ 1 \quad (72) \\ \hline 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1 \quad (99) \end{array}$$

48

Effizienz

Frage: Wie lange dauert eine Multiplikation von a und b ?

■ Mass für die Effizienz

- Gesamtzahl der elementaren Operationen: Verdoppeln, Halbieren, Test auf "gerade", Addition
- Im rekursiven Code: maximal 6 Operationen pro Aufruf

■ Wesentliches Kriterium:

- Anzahl rekursiver Aufrufe oder
- Anzahl Schleifendurchläufe(im iterativen Fall)

- $\frac{b}{2^n} \leq 1$ gilt für $n \geq \log_2 b$. Also nicht mehr als $6 \lceil \log_2 b \rceil$ elementare Operationen.

49

1.5 Schnelle Multiplikation von Zahlen

[Ottman/Widmayer, Kap. 1.2.3]

50

Beispiel 2: Multiplikation grosser Zahlen

Primarschule:

$$\begin{array}{r} \begin{array}{cc|cc} a & b & c & d \\ 6 & 2 & \cdot & 3 & 7 \end{array} \\ \hline & & & 1 & 4 & d \cdot b \\ & & & 4 & 2 & d \cdot a \\ & & & & 6 & c \cdot b \\ & & & 1 & 8 & c \cdot a \\ \hline = & 2 & 2 & 9 & 4 & \end{array}$$

$2 \cdot 2 = 4$ einstellige Multiplikationen. \Rightarrow Multiplikation zweier n -stelliger Zahlen: n^2 einstellige Multiplikationen

51

Beobachtung

$$\begin{aligned} ab \cdot cd &= (10 \cdot a + b) \cdot (10 \cdot c + d) \\ &= 100 \cdot a \cdot c + 10 \cdot a \cdot d \\ &\quad + 10 \cdot b \cdot c + b \cdot d \\ &\quad + 10 \cdot (a - b) \cdot (d - c) \end{aligned}$$

52

Verbesserung?

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{cccc}
 a & b & c & d \\
 6 & 2 & 3 & 7
 \end{array} & \\
 \hline
 & 1 & 4 & d \cdot b \\
 & 1 & 4 & d \cdot b \\
 & 1 & 6 & (a - b) \cdot (d - c) \\
 & 1 & 8 & c \cdot a \\
 & 1 & 8 & c \cdot a \\
 \hline
 = & 2 & 2 & 9 & 4
 \end{array}$$

→ 3 einstellige Multiplikationen.

53

Grosse Zahlen

$$6237 \cdot 5898 = \underbrace{62}_{a'} \underbrace{37}_{b'} \cdot \underbrace{58}_{c'} \underbrace{98}_{d'}$$

Rekursive / induktive Anwendung: $a' \cdot c'$, $a' \cdot d'$, $b' \cdot c'$ und $c' \cdot d'$ wie oben berechnen.

→ $3 \cdot 3 = 9$ statt 16 einstellige Multiplikationen.

54

Verallgemeinerung

Annahme: zwei n -stellige Zahlen, $n = 2^k$ für ein k .

$$\begin{aligned}
 (10^{n/2}a + b) \cdot (10^{n/2}c + d) &= 10^n \cdot a \cdot c + 10^{n/2} \cdot a \cdot c \\
 &+ 10^{n/2} \cdot b \cdot d + b \cdot d \\
 &+ 10^{n/2} \cdot (a - b) \cdot (d - c)
 \end{aligned}$$

Rekursive Anwendung dieser Formel: Algorithmus von Karatsuba und Ofman (1962).

55

Analyse

$M(n)$: Anzahl einstelliger Multiplikationen.

Rekursive Anwendung des obigen Algorithmus ⇒
Rekursionsgleichung:

$$M(2^k) = \begin{cases} 1 & \text{falls } k = 0, \\ 3 \cdot M(2^{k-1}) & \text{falls } k > 0. \end{cases}$$

56

Teleskopieren

Iteratives Einsetzen der Rekursionsformel zum Lösen der Rekursionsgleichung.

$$\begin{aligned} M(2^k) &= 3 \cdot M(2^{k-1}) = 3 \cdot 3 \cdot M(2^{k-2}) = 3^2 \cdot M(2^{k-2}) \\ &= \dots \\ &\stackrel{!}{=} 3^k \cdot M(2^0) = 3^k. \end{aligned}$$

57

Beweis: Vollständige Induktion

Hypothese H:

$$M(2^k) = 3^k.$$

Induktionsanfang ($k = 0$):

$$M(2^0) = 3^0 = 1. \quad \checkmark$$

Induktionsschritt ($k \rightarrow k + 1$):

$$M(2^{k+1}) \stackrel{\text{def}}{=} 3 \cdot M(2^k) \stackrel{H}{=} 3 \cdot 3^k = 3^{k+1}.$$



58

Vergleich

Primarschulmethode: n^2 einstellige Multiplikationen.

Karatsuba/Ofman:

$$M(n) = 3^{\log_2 n} = (2^{\log_2 3})^{\log_2 n} = 2^{\log_2 3 \log_2 n} = n^{\log_2 3} \approx n^{1.58}.$$

Beispiel: 1000-stellige Zahl: $1000^2 / 1000^{1.58} \approx 18$.

59

Bestmöglicher Algorithmus?

Wir kennen nun eine obere Schranke $n^{\log_2 3}$.

Es gibt praktisch (für grosses n) relevante, schnellere Algorithmen. Die beste obere Schranke ist nicht bekannt.

Untere Schranke: $n/2$ (Jede Ziffer muss zumindest einmal angeschaut werden).

60

1.6 Finde den Star

Konstruktiv?

Übung: Finde ein schnelleres Multiplikationsverfahren.
Unsystematisches Suchen einer Lösung \Rightarrow 😞.

Betrachten nun ein konstruktiveres Beispiel.

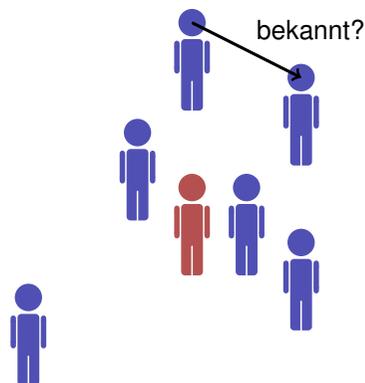
61

62

Beispiel 3: Finde den Star!

Raum mit $n > 1$ Personen.

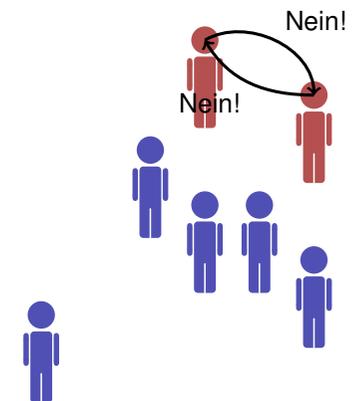
- **Star**: Person, die niemanden anderen kennt, jedoch von allen gekannt wird.
- **Elementare Operation**: Einzige erlaubte Frage an Person A : "Kennst Du B ?" ($B \neq A$)



Problemeigenschaften

- Möglich: kein Star anwesend.
- Möglich: ein Star.
- Mehr als ein Star möglich?

Annahme: Zwei Stars S_1, S_2 .
 S_1 kennt $S_2 \Rightarrow S_1$ kein Star.
 S_1 kennt S_2 nicht $\Rightarrow S_2$ kein Star.
Star. \perp



63

64

Naive Lösung

Frage jeden über jeden.

Resultat:

	1	2	3	4
1	-	Ja	Nein	Nein
2	Nein	-	Nein	Nein
3	Ja	Ja	-	Nein
4	Ja	Ja	Ja	-

Star ist 2.

Anzahl Operationen (Fragen): $n \cdot (n - 1)$.

65

Geht das besser?

Induktion: zerlege Problem in kleinere Teile.

- $n = 2$: Zwei Fragen genügen.
- $n > 2$: Schicke eine Person A weg. Finde den Star unter $n - 1$ Personen. Danach überprüfe A mit $2 \cdot (n - 1)$ Fragen.

Gesamt

$$F(n) = 2(n-1) + F(n-1) = 2(n-1) + 2(n-2) + \dots + 2 = n(n-1).$$

Kein Gewinn. 😞

66

Verbesserung

Idee: Vermeide, den Star rauszuschicken.

- Frage eine beliebige Person A im Raum, ob sie B kennt.
- Falls ja: A ist kein Star.
- Falls nein: B ist kein Star.
- Zum Schluss bleiben 2 Personen, von denen möglicherweise eine Person X der Star ist. Wir überprüfen mit jeder Person, die draussen ist, ob X ein Star sein kann.

67

Analyse

$$F(n) = \begin{cases} 2 & \text{für } n = 2, \\ 1 + F(n-1) + 2 & \text{für } n > 2. \end{cases}$$

Teleskopieren:

$$F(n) = 3 + F(n-1) = 2 \cdot 3 + F(n-2) = \dots = 3 \cdot (n-2) + 2 = 3n - 4.$$

Beweis: Übung!

68

Moral

Bei vielen Problemen lässt sich ein induktives oder rekursives Lösungsmuster erarbeiten, welches auf der stückweisen Vereinfachung eines Problems basiert. Weiteres Beispiel in der nächsten Stunde.

69

2. Effizienz von Algorithmen

Effizienz von Algorithmen, Random Access Machine Modell, Funktionenwachstum, Asymptotik [Cormen et al, Kap. 2.2,3,4.2-4.4 | Ottman/Widmayer, Kap. 1.1]

70

Effizienz von Algorithmen

Ziele

- Laufzeitverhalten eines Algorithmus maschinenunabhängig quantifizieren.
- Effizienz von Algorithmen vergleichen.
- Abhängigkeit von der Eingabegrösse verstehen.

71

Technologiemodell

Random Access Machine (RAM)

- Ausführungsmodell: Instruktionen werden der Reihe nach (auf einem Prozessorkern) ausgeführt.
- Speichermodell: Konstante Zugriffszeit.
- Elementare Operationen: Rechenoperation (+, −, ·, ...) , Vergleichsoperationen, Zuweisung / Kopieroperation, Flusskontrolle (Sprünge)
- Einheitskostenmodell: elementare Operation hat Kosten 1.
- Datentypen: Fundamentaltypen wie grössenbeschränkte Ganzzahl oder Fließkommazahl.

72

Grösse der Eingabedaten

Typisch: Anzahl Eingabeobjekte (von fundamentalem Typ).
Oftmals: Anzahl Bits für eine *vernünftige / kostengünstige* Repräsentation der Daten.

2.1 Funktionenwachstum

\mathcal{O} , Θ , Ω [Cormen et al, Kap. 3; Ottman/Widmayer, Kap. 1.1]

Asymptotisches Verhalten

Genauere Laufzeit lässt sich selbst für kleine Eingabedaten kaum voraussagen.

- Betrachten das asymptotische Verhalten eines Algorithmus.
- Ignorieren alle konstanten Faktoren.

Beispiel

Eine Operation mit Kosten 20 ist genauso gut wie eine mit Kosten 1.
Lineares Wachstum mit Steigung 5 ist genauso gut wie lineares Wachstum mit Steigung 1.

73

74

Oberflächlich

Verwende die asymptotische Notation zur Kennzeichnung der Laufzeit von Algorithmen

Wir schreiben $\Theta(n^2)$ und meinen, dass der Algorithmus sich für grosse n wie n^2 verhält: verdoppelt sich die Problemgrösse, so vervierfacht sich die Laufzeit.

75

76

Genauer: Asymptotische obere Schranke

Gegeben: Funktion $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$.

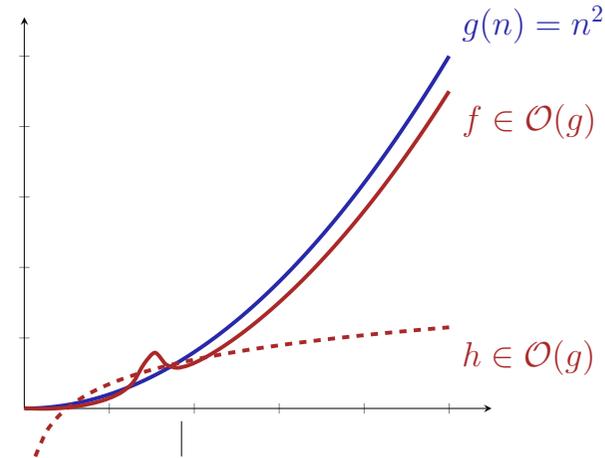
Definition:

$$\mathcal{O}(g) = \{f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} \mid \exists c > 0, n_0 \in \mathbb{N} : 0 \leq f(n) \leq c \cdot g(n) \forall n \geq n_0\}$$

Schreibweise:

$$\mathcal{O}(g(n)) := \mathcal{O}(g(\cdot)) = \mathcal{O}(g).$$

Anschauung



77

78

Beispiele

$$\mathcal{O}(g) = \{f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} \mid \exists c > 0, n_0 \in \mathbb{N} : 0 \leq f(n) \leq c \cdot g(n) \forall n \geq n_0\}$$

$f(n)$	$f \in \mathcal{O}(?)$	Beispiel
$3n + 4$	$\mathcal{O}(n)$	$c = 4, n_0 = 4$
$2n$	$\mathcal{O}(n)$	$c = 2, n_0 = 0$
$n^2 + 100n$	$\mathcal{O}(n^2)$	$c = 2, n_0 = 100$
$n + \sqrt{n}$	$\mathcal{O}(n)$	$c = 2, n_0 = 1$

Eigenschaft

$$f_1 \in \mathcal{O}(g), f_2 \in \mathcal{O}(g) \Rightarrow f_1 + f_2 \in \mathcal{O}(g)$$

79

80

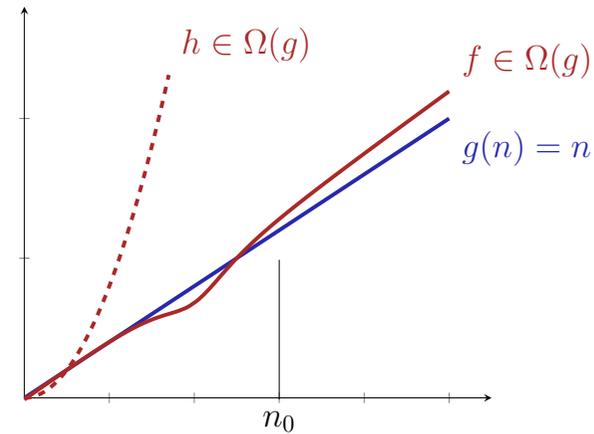
Umkehrung: Asymptotische untere Schranke

Gegeben: Funktion $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$.

Definition:

$$\Omega(g) = \{f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} \mid \exists c > 0, n_0 \in \mathbb{N} : 0 \leq c \cdot g(n) \leq f(n) \forall n \geq n_0\}$$

Beispiel



81

82

Asymptotisch scharfe Schranke

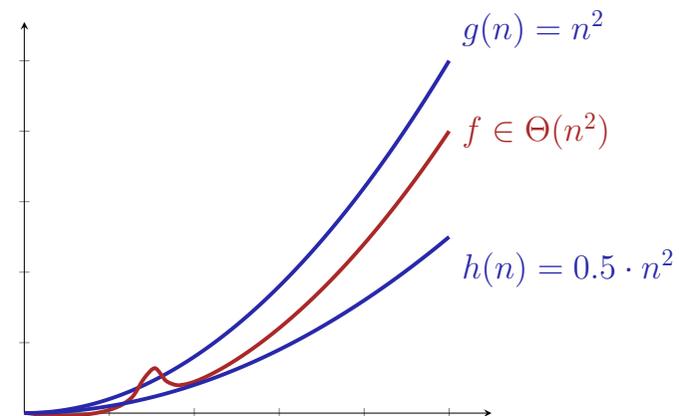
Gegeben Funktion $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$.

Definition:

$$\Theta(g) := \Omega(g) \cap \mathcal{O}(g).$$

Einfache, geschlossene Form: Übung.

Beispiel



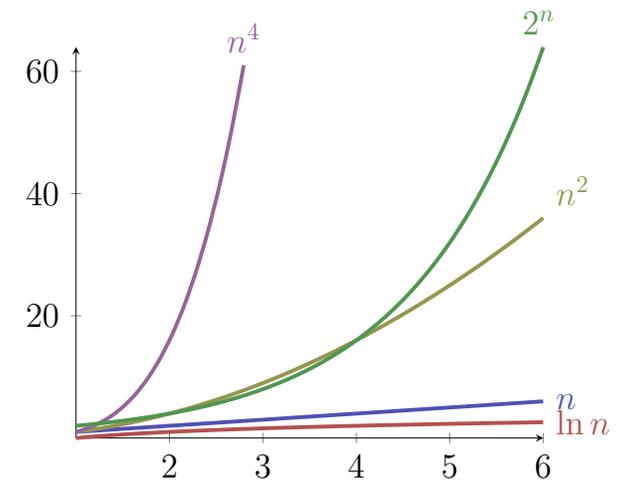
83

84

Wachstumsbezeichnungen

$\mathcal{O}(1)$	beschränkt	Array-Zugriff
$\mathcal{O}(\log \log n)$	doppelt logarithmisch	Binäre sortierte Suche interpoliert
$\mathcal{O}(\log n)$	logarithmisch	Binäre sortierte Suche
$\mathcal{O}(\sqrt{n})$	wie die Wurzelfunktion	Primzahltest (naiv)
$\mathcal{O}(n)$	linear	Unsortierte naive Suche
$\mathcal{O}(n \log n)$	superlinear / loglinear	Gute Sortieralgorithmen
$\mathcal{O}(n^2)$	quadratisch	Einfache Sortieralgorithmen
$\mathcal{O}(n^c)$	polynomial	Matrixmultiplikation
$\mathcal{O}(2^n)$	exponentiell	Travelling Salesman Dynamic Programming
$\mathcal{O}(n!)$	faktoriell	Travelling Salesman naiv

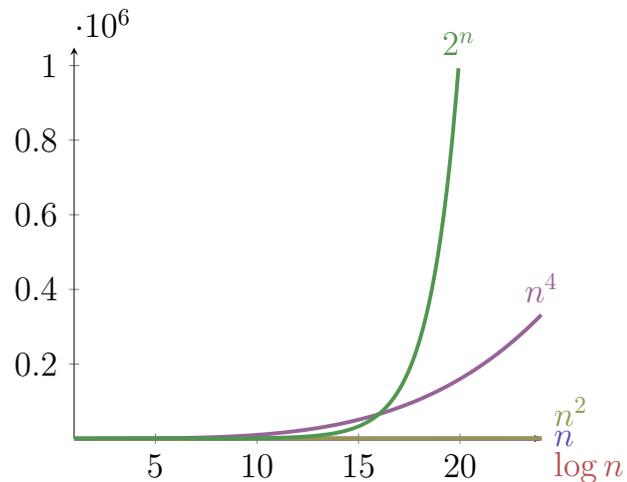
Kleine n



85

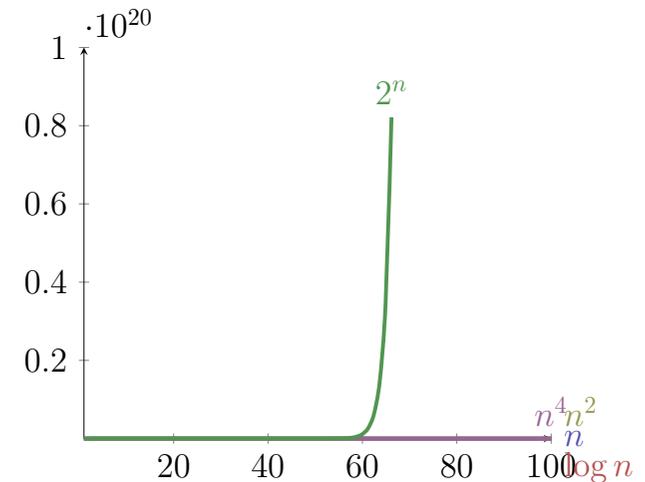
86

Grössere n



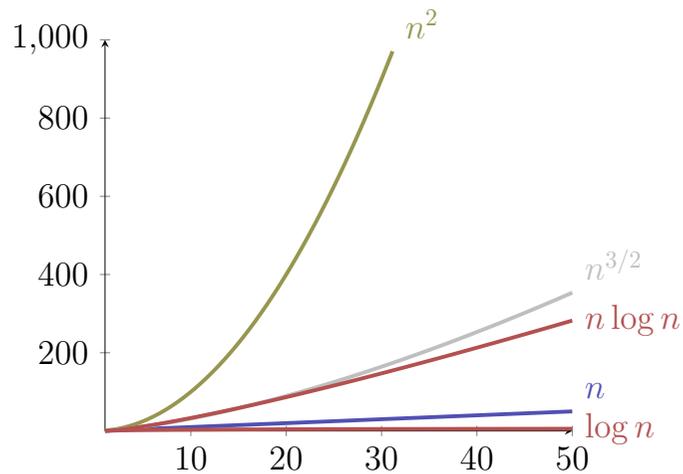
87

“Grosse” n



88

Logarithmen!



Zeitbedarf

Annahme: 1 Operation = $1 \mu s$.

Problemgrösse	1	100	10000	10^6	10^9
$\log_2 n$	$1 \mu s$	$7 \mu s$	$13 \mu s$	$20 \mu s$	$30 \mu s$
n	$1 \mu s$	$100 \mu s$	$1/100 s$	$1 s$	17 Minuten
$n \log_2 n$	$1 \mu s$	$700 \mu s$	$13/100 \mu s$	$20 s$	8.5 Stunden
n^2	$1 \mu s$	$1/100 s$	1.7 Minuten	11.5 Tage	317 Jahrhund.
2^n	$1 \mu s$	10^{14} Jahrh.	$\approx \infty$	$\approx \infty$	$\approx \infty$

89

90

Eine gute Strategie?

... dann kaufe ich mir eben eine neue Maschine! Wenn ich heute ein Problem der Grösse n lösen kann, dann kann ich mit einer 10 oder 100 mal so schnellen Maschine...

Komplexität	(speed $\times 10$)	(speed $\times 100$)
$\log_2 n$	$n \rightarrow n^{10}$	$n \rightarrow n^{100}$
n	$n \rightarrow 10 \cdot n$	$n \rightarrow 100 \cdot n$
n^2	$n \rightarrow 3.16 \cdot n$	$n \rightarrow 10 \cdot n$
2^n	$n \rightarrow n + 3.32$	$n \rightarrow n + 6.64$

Beispiele

- $n \in \mathcal{O}(n^2)$ korrekt, aber ungenau:
 $n \in \mathcal{O}(n)$ und sogar $n \in \Theta(n)$.
- $3n^2 \in \mathcal{O}(2n^2)$ korrekt, aber unüblich:
Konstanten weglassen: $3n^2 \in \mathcal{O}(n^2)$.
- $2n^2 \in \mathcal{O}(n)$ ist falsch: $\frac{2n^2}{cn} = \frac{2}{c}n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$!
- $\mathcal{O}(n) \subseteq \mathcal{O}(n^2)$ ist korrekt
- $\Theta(n) \subseteq \Theta(n^2)$ ist falsch: $n \notin \Omega(n^2) \supset \Theta(n^2)$

91

92

Nützliches

Theorem

Seien $f, g : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$ zwei Funktionen. Dann gilt:

- 1 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = 0 \Rightarrow f \in \mathcal{O}(g), \mathcal{O}(f) \subsetneq \mathcal{O}(g).$
- 2 $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(n)}{g(n)} = C > 0$ (C konstant) $\Rightarrow f \in \Theta(g).$
- 3 $\frac{f(n)}{g(n)} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty \Rightarrow g \in \mathcal{O}(f), \mathcal{O}(g) \subsetneq \mathcal{O}(f).$

Zur Notation

Übliche Schreibweise

$$f = \mathcal{O}(g)$$

ist zu verstehen als $f \in \mathcal{O}(g).$

Es gilt nämlich

$$f_1 = \mathcal{O}(g), f_2 = \mathcal{O}(g) \not\Rightarrow f_1 = f_2!$$

Beispiel

$n = \mathcal{O}(n^2), n^2 = \mathcal{O}(n^2)$ aber natürlich $n \neq n^2.$

93

94

Algorithmen, Programme und Laufzeit

Programm: Konkrete Implementation eines Algorithmus.

Laufzeit des Programmes: messbarer Wert auf einer konkreten Maschine. Kann sowohl nach oben, wie auch nach unten abgeschätzt werden.

Beispiel

Rechner mit 3 GHz. Maximale Anzahl Operationen pro Taktzyklus (z.B. 8). \Rightarrow untere Schranke.
 Einzelne Operation dauert mit Sicherheit nie länger als ein Tag \Rightarrow obere Schranke.

Asymptotisch gesehen stimmen die Schranken überein.

Komplexität

Komplexität eines Problems P : minimale (asymptotische) Kosten über alle Algorithmen A , die P lösen.

Komplexität der Elementarmultiplikation zweier Zahlen der Länge n ist $\Omega(n)$ und $\mathcal{O}(n^{\log_3 2})$ (Karatsuba Ofman).

Exemplarisch:

Problem	Komplexität	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n^2)$
		\uparrow	\uparrow	\uparrow
Algorithmus	Kosten ²	$3n - 4$	$\mathcal{O}(n)$	$\Theta(n^2)$
		\downarrow	\updownarrow	\updownarrow
Programm	Laufzeit	$\Theta(n)$	$\mathcal{O}(n)$	$\Theta(n^2)$

²Anzahl Elementaroperationen

95

96

Algorithmenentwurf

3. Algorithmenentwurf

Maximum Subarray Problem [Ottman/Widmayer, Kap. 1.3]
Divide and Conquer [Ottman/Widmayer, Kap. 1.2.2. S.9; Cormen et al, Kap. 4-4.1]

Induktive Entwicklung eines Algorithmus: Zerlegung in Teilprobleme, Verwendung der Lösungen der Teilproblem zum Finden der endgültigen Lösung.

Ziel: Entwicklung des asymptotisch effizientesten (korrekten) Algorithmus.

Effizienz hinsichtlich der Laufzeitkosten (# Elementaroperationen) oder / und Speicherbedarf.

97

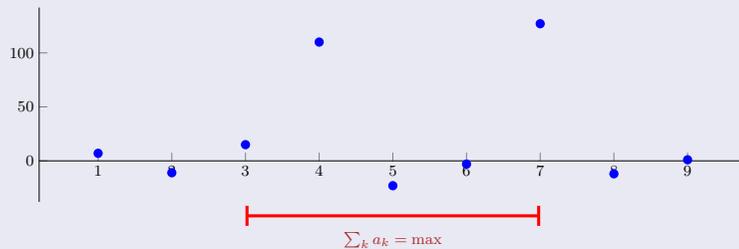
98

Maximum Subarray Problem

Gegeben: ein Array von n rationalen Zahlen (a_1, \dots, a_n) .

Gesucht: Teilstück $[i, j]$, $1 \leq i \leq j \leq n$ mit maximaler positiver Summe $\sum_{k=i}^j a_k$.

Beispiel: $a = (7, -11, 15, 110, -23, -3, 127, -12, 1)$



99

Naiver Maximum Subarray Algorithmus

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n)

Output : I, J mit $\sum_{k=I}^J a_k$ maximal.

$M \leftarrow 0; I \leftarrow 1; J \leftarrow 0$

for $i \in \{1, \dots, n\}$ **do**

for $j \in \{i, \dots, n\}$ **do**

$m = \sum_{k=i}^j a_k$

if $m > M$ **then**

$M \leftarrow m; I \leftarrow i; J \leftarrow j$

return I, J

100

Analyse

Theorem

Der naive Algorithmus für das Maximum Subarray Problem führt $\Theta(n^3)$ Additionen durch.

Beweis:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n (j-i) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{n-i} j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n-i} j = \sum_{i=1}^n \frac{(n-i)(n-i+1)}{2} \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} \frac{i \cdot (i+1)}{2} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^{n-1} i^2 + \sum_{i=0}^{n-1} i \right) \\ &= \frac{1}{2} (\Theta(n^3) + \Theta(n^2)) = \Theta(n^3). \end{aligned}$$

■

101

Beobachtung

$$\sum_{k=i}^j a_k = \underbrace{\left(\sum_{k=1}^j a_k \right)}_{S_j} - \underbrace{\left(\sum_{k=1}^{i-1} a_k \right)}_{S_{i-1}}$$

Präfixsummen

$$S_i := \sum_{k=1}^i a_k.$$

102

Maximum Subarray Algorithmus mit Präfixsummen

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n)

Output : I, J mit $\sum_{k=I}^J a_k$ maximal.

$S_0 \leftarrow 0$

for $i \in \{1, \dots, n\}$ **do** // Präfixsumme

$S_i \leftarrow S_{i-1} + a_i$

$M \leftarrow 0; I \leftarrow 1; J \leftarrow 0$

for $i \in \{1, \dots, n\}$ **do**

for $j \in \{i, \dots, n\}$ **do**

$m = S_j - S_{i-1}$

if $m > M$ **then**

$M \leftarrow m; I \leftarrow i; J \leftarrow j$

Analyse

Theorem

Der Präfixsummen Algorithmus für das Maximum Subarray Problem führt $\Theta(n^2)$ Additionen und Subtraktionen durch.

Beweis:

$$\sum_{i=1}^n 1 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n 1 = n + \sum_{i=1}^n (n-i+1) = n + \sum_{i=1}^n i = \Theta(n^2)$$

■

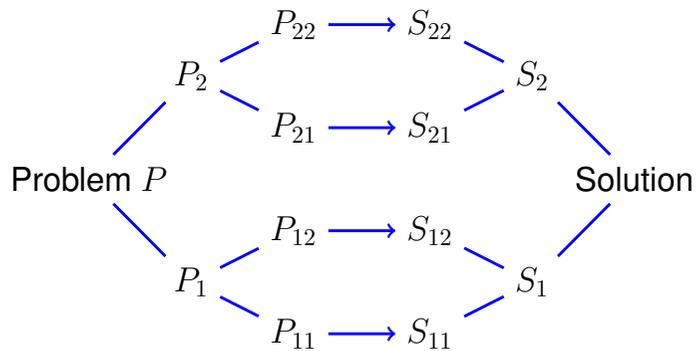
103

104

divide et impera

Teile und (be)herrsche (engl. divide and conquer)

Zerlege das Problem in Teilprobleme, deren Lösung zur vereinfachten Lösung des Gesamtproblems beitragen.



105

Maximum Subarray – Divide

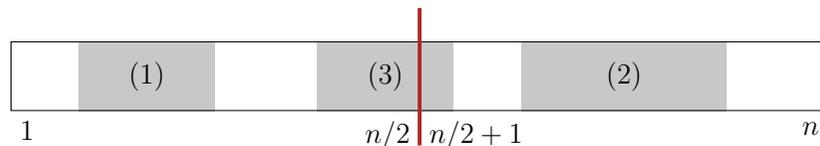
- Divide: Teile das Problem in zwei (annähernd) gleiche Hälften auf:
 $(a_1, \dots, a_n) = (a_1, \dots, a_{\lfloor n/2 \rfloor}, a_{\lfloor n/2 \rfloor + 1}, \dots, a_n)$
- Vereinfachende Annahme: $n = 2^k$ für ein $k \in \mathbb{N}$.

106

Maximum Subarray – Conquer

Sind i, j die Indizes einer Lösung \Rightarrow Fallunterscheidung:

- 1 Lösung in linker Hälfte $1 \leq i \leq j \leq n/2 \Rightarrow$ Rekursion (linke Hälfte)
- 2 Lösung in rechter Hälfte $n/2 < i \leq j \leq n \Rightarrow$ Rekursion (rechte Hälfte)
- 3 Lösung in der Mitte $1 \leq i \leq n/2 < j \leq n \Rightarrow$ Nachfolgende Beobachtung



107

Maximum Subarray – Beobachtung

Annahme: Lösung in der Mitte $1 \leq i \leq n/2 < j \leq n$

$$\begin{aligned}
 S_{\max} &= \max_{\substack{1 \leq i \leq n/2 \\ n/2 < j \leq n}} \sum_{k=i}^j a_k = \max_{\substack{1 \leq i \leq n/2 \\ n/2 < j \leq n}} \left(\sum_{k=i}^{n/2} a_k + \sum_{k=n/2+1}^j a_k \right) \\
 &= \max_{1 \leq i \leq n/2} \sum_{k=i}^{n/2} a_k + \max_{n/2 < j \leq n} \sum_{k=n/2+1}^j a_k \\
 &= \max_{1 \leq i \leq n/2} \underbrace{S_{n/2} - S_{i-1}}_{\text{Suffixsumme}} + \max_{n/2 < j \leq n} \underbrace{S_j - S_{n/2}}_{\text{Präfixsumme}}
 \end{aligned}$$

108

Maximum Subarray Divide and Conquer Algorithmus

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n)

Output : Maximales $\sum_{k=i'}^{j'} a_k$.

if $n = 1$ **then**

return $\max\{a_1, 0\}$

else

 Unterteile $a = (a_1, \dots, a_n)$ in $A_1 = (a_1, \dots, a_{n/2})$ und $A_2 = (a_{n/2+1}, \dots, a_n)$

 Berechne rekursiv beste Lösung W_1 in A_1

 Berechne rekursiv beste Lösung W_2 in A_2

 Berechne grösste Suffixsumme S in A_1

 Berechne grösste Präfixsumme P in A_2

 Setze $W_3 \leftarrow S + P$

return $\max\{W_1, W_2, W_3\}$

Analyse

Theorem

Der Divide and Conquer Algorithmus für das Maximum Subarray Sum Problem führt $\Theta(n \log n)$ viele Additionen und Vergleiche durch.

109

110

Analyse

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n)

Output : Maximales $\sum_{k=i'}^{j'} a_k$.

if $n = 1$ **then**

$\Theta(1)$ **return** $\max\{a_1, 0\}$

else

$\Theta(1)$ Unterteile $a = (a_1, \dots, a_n)$ in $A_1 = (a_1, \dots, a_{n/2})$ und $A_2 = (a_{n/2+1}, \dots, a_n)$

$T(n/2)$ Berechne rekursiv beste Lösung W_1 in A_1

$T(n/2)$ Berechne rekursiv beste Lösung W_2 in A_2

$\Theta(n)$ Berechne grösste Suffixsumme S in A_1

$\Theta(n)$ Berechne grösste Präfixsumme P in A_2

$\Theta(1)$ Setze $W_3 \leftarrow S + P$

$\Theta(1)$ **return** $\max\{W_1, W_2, W_3\}$

Analyse

Rekursionsgleichung

$$T(n) = \begin{cases} c & \text{falls } n = 1 \\ 2T(\frac{n}{2}) + a \cdot n & \text{falls } n > 1 \end{cases}$$

111

112

Analyse

Mit $n = 2^k$:

$$\bar{T}(k) = \begin{cases} c & \text{falls } k = 0 \\ 2\bar{T}(k-1) + a \cdot 2^k & \text{falls } k > 0 \end{cases}$$

Lösung:

$$\bar{T}(k) = 2^k \cdot c + \sum_{i=0}^{k-1} 2^i \cdot a \cdot 2^{k-i} = c \cdot 2^k + a \cdot k \cdot 2^k = \Theta(k \cdot 2^k)$$

also

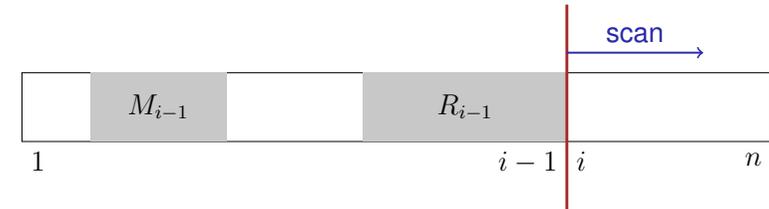
$$T(n) = \Theta(n \log n)$$



113

Maximum Subarray Sum Problem – Induktiv

Annahme: Maximaler Wert M_{i-1} der Subarraysumme für (a_1, \dots, a_{i-1}) ($1 < i \leq n$) bekannt.



a_i : erzeugt höchstens Intervall am Rand (Präfixsumme).

$$R_{i-1} \Rightarrow R_i = \max\{R_{i-1} + a_i, 0\}$$

114

Induktiver Maximum Subarray Algorithmus

Input : Eine Folge von n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n) .

Output : $\max\{0, \max_{i,j} \sum_{k=i}^j a_k\}$.

$M \leftarrow 0$

$R \leftarrow 0$

for $i = 1 \dots n$ **do**

$R \leftarrow R + a_i$

if $R < 0$ **then**

$R \leftarrow 0$

if $R > M$ **then**

$M \leftarrow R$

return M ;

Analyse

Theorem

Der induktive Algorithmus für das Maximum Subarray Sum Problem führt $\Theta(n)$ viele Additionen und Vergleiche durch.

115

116

Komplexität des Problems?

Geht es besser als $\Theta(n)$?

Jeder korrekte Algorithmus für das Maximum Subarray Sum Problem muss jedes Element im Algorithmus betrachten.

Annahme: der Algorithmus betrachtet nicht a_i .

- 1 Lösung des Algorithmus enthält a_i . Wiederholen den Algorithmus mit genügend kleinem a_i , so dass die Lösung den Punkt nicht enthalten hätte dürfen.
- 2 Lösung des Algorithmus enthält a_i nicht. Wiederholen den Algorithmus mit genügend grossem a_i , so dass die Lösung a_i hätten enthalten müssen.

4. Suchen

Lineare Suche, Binäre Suche, Interpolationssuche, Exponentielle Suche, Untere Schranken [Ottman/Widmayer, Kap. 3.2, Cormen et al, Kap. 2: Problems 2.1-3,2.2-3,2.3-5]

Komplexität des Maximum Subarray Sum Problems

Theorem

Das Maximum Subarray Sum Problem hat Komplexität $\Theta(n)$.

Beweis: Induktiver Algorithmus mit asymptotischer Laufzeit $\mathcal{O}(n)$.
Jeder Algorithmus hat Laufzeit $\Omega(n)$.
Somit ist die Komplexität $\Omega(n) \cap \mathcal{O}(n) = \Theta(n)$. ■

117

118

Das Suchproblem

Gegeben

- Menge von Datensätzen.

Beispiele

Telefonverzeichnis, Wörterbuch, Symboltabelle

- Jeder Datensatz hat einen Schlüssel k .
- Schlüssel sind vergleichbar: eindeutige Antwort auf Frage $k_1 \leq k_2$ für Schlüssel k_1, k_2 .

Aufgabe: finde Datensatz nach Schlüssel k .

119

120

Das Auswahlproblem

Gegeben

- Menge von Datensätzen mit vergleichbaren Schlüsseln k .

Gesucht: Datensatz, mit dem kleinsten, grössten, mittleren Schlüssel. Allgemein: finde Datensatz mit i -kleinstem Schlüssel.

Suche in Array

Gegeben

- Array A mit n Elementen $(A[1], \dots, A[n])$.
- Schlüssel b

Gesucht: Index k , $1 \leq k \leq n$ mit $A[k] = b$ oder "nicht gefunden".

22	20	32	10	35	24	42	38	28	41
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

121

122

Lineare Suche

Durchlaufen des Arrays von $A[1]$ bis $A[n]$.

- **Bestenfalls** 1 Vergleich.
- **Schlimmstenfalls** n Vergleiche.
- Annahme: Jede Anordnung der n Schlüssel ist gleichwahrscheinlich. **Erwartete** Anzahl Vergleiche:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = \frac{n+1}{2}.$$

Suche in sortierten Array

Gegeben

- Sortiertes Array A mit n Elementen $(A[1], \dots, A[n])$ mit $A[1] \leq A[2] \leq \dots \leq A[n]$.
- Schlüssel b

Gesucht: Index k , $1 \leq k \leq n$ mit $A[k] = b$ oder "nicht gefunden".

10	20	22	24	28	32	35	38	41	42
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

123

124

Divide and Conquer!

Suche $b = 23$.

10	20	22	24	28	32	35	38	41	42	$b < 28$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	20	22	24	28	32	35	38	41	42	$b > 20$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	20	22	24	28	32	35	38	41	42	$b > 22$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	20	22	24	28	32	35	38	41	42	$b < 24$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
10	20	22	24	28	32	35	38	41	42	erfolglos
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Binärer Suchalgorithmus $BSearch(A, b, l, r)$

Input : Sortiertes Array A von n Schlüssel. Schlüssel b . Bereichsgrenzen $1 \leq l \leq r \leq n$ oder $l > r$ beliebig.

Output : Index des gefundenen Elements. 0, wenn erfolglos.

```

 $m \leftarrow \lfloor (l+r)/2 \rfloor$ 
if  $l > r$  then // erfolglose Suche
    return 0
else if  $b = A[m]$  then // gefunden
    return  $m$ 
else if  $b < A[m]$  then // Element liegt links
    return  $BSearch(A, b, l, m - 1)$ 
else //  $b > A[m]$ : Element liegt rechts
    return  $BSearch(A, b, m + 1, r)$ 
    
```

125

126

Analyse (Schlimmster Fall)

Rekurrenz ($n = 2^k$)

$$T(n) = \begin{cases} d & \text{falls } n = 1, \\ T(n/2) + c & \text{falls } n > 1. \end{cases}$$

Teleskopieren:

$$\begin{aligned} T(n) &= T\left(\frac{n}{2}\right) + c = T\left(\frac{n}{4}\right) + 2c \\ &= T\left(\frac{n}{2^i}\right) + i \cdot c \\ &= T\left(\frac{n}{n}\right) + \log_2 n \cdot c. \end{aligned}$$

\Rightarrow Annahme: $T(n) = d + c \log_2 n$

127

Analyse (Schlimmster Fall)

$$T(n) = \begin{cases} d & \text{falls } n = 1, \\ T(n/2) + c & \text{falls } n > 1. \end{cases}$$

Vermutung : $T(n) = d + c \cdot \log_2 n$

Beweis durch Induktion:

- Induktionsanfang: $T(1) = d$.
- Hypothese: $T(n/2) = d + c \cdot \log_2 n/2$
- Schritt ($n/2 \rightarrow n$)

$$T(n) = T(n/2) + c = d + c \cdot (\log_2 n - 1) + c = d + c \log_2 n.$$

128

Resultat

Theorem

Der Algorithmus zur binären sortierten Suche benötigt $\Theta(\log n)$ Elementarschritte.

Iterativer binärer Suchalgorithmus

Input : Sortiertes Array A von n Schlüsseln. Schlüssel b .

Output : Index des gefundenen Elements. 0, wenn erfolglos.

$l \leftarrow 1; r \leftarrow n$

while $l \leq r$ **do**

$m \leftarrow \lfloor (l+r)/2 \rfloor$

if $A[m] = b$ **then**

return m

else if $A[m] < b$ **then**

$l \leftarrow m + 1$

else

$r \leftarrow m - 1$

return 0;

129

130

Korrektheit

Algorithmus bricht nur ab, falls A leer oder b gefunden.

Invariante: Falls b in A , dann im Bereich $A[l, \dots, r]$

Beweis durch Induktion

- Induktionsanfang: $b \in A[1, \dots, n]$ (oder nicht)
- Hypothese: Invariante gilt nach i Schritten
- Schritt:
 $b < A[m] \Rightarrow b \in A[l, \dots, m-1]$
 $b > A[m] \Rightarrow b \in A[m+1, \dots, r]$

131

Geht es noch besser?

Annahme: Gleichverteilung der Werte im Array.

Beispiel

Name "Becker" würde man im Telefonbuch vorne suchen.

"Wawrinka" wohl ziemlich weit hinten.

Binäre Suche vergleicht immer zuerst mit der Mitte.

Binäre Suche setzt immer $m = \lfloor l + \frac{r-l}{2} \rfloor$.

132

Interpolationssuche

Erwartete relative Position von b im Suchintervall $[l, r]$

$$\rho = \frac{b - A[l]}{A[r] - A[l]} \in [0, 1].$$

Neue "Mitte": $l + \rho \cdot (r - l)$

Anzahl Vergleiche im Mittel $\mathcal{O}(\log \log n)$ (ohne Beweis).

❓ Ist Interpolationssuche also immer zu bevorzugen?

❗ Nein: Anzahl Vergleiche im schlimmsten Fall $\Omega(n)$.

133

Exponentielle Suche

Annahme: Schlüssel b liegt eher vorne im Array A . n sehr gross.

Exponentielles Vorgehen:

- 1 Lege Suchbereich $l = 1, r = 1$ fest.
- 2 Verdopple r so lange, bis $r > n$ oder $A[r] > b$.
- 3 Setze $r \leftarrow \min(r, n)$.
- 4 Führe binäre Suche durch mit $l \leftarrow r/2, r$.

134

Analyse der Exponentiellen Suche

Sei m der gesuchte Index.

Anzahl Schritte für die Verdopplung von r : maximal $\log_2 m$.

Binäre Suche ist dann auch $\mathcal{O}(\log_2 m)$.

Schlechtester Fall insgesamt: Anzahl Schritte $\mathcal{O}(\log_2 n)$.

❓ Wann ist dieses Verfahren sinnvoll?

❗ Wenn $m \ll n$. Zum Beispiel bei positiven ganzzahligen paarweise verschiedenen Schlüsseln und $b \ll N$ (N : grösster Schlüsselwert).

135

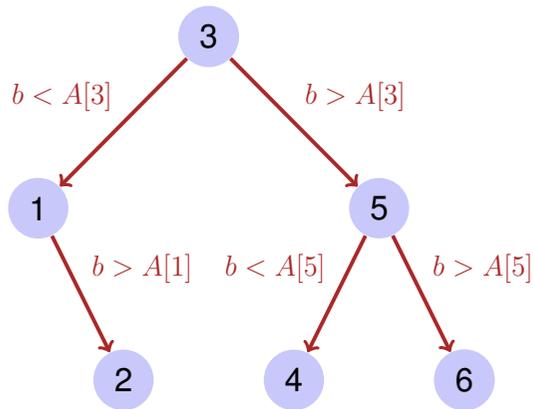
Untere Schranke

Binäre und exponentielle Suche (im schlechtesten Fall): $\Theta(\log n)$ viele Vergleiche.

Gilt für *jeden* Suchalgorithmus in sortiertem Array (im schlechtesten Fall): Anzahl Vergleiche = $\Omega(\log n)$?

136

Entscheidungsbaum



- Für jede Eingabe $b = A[i]$ muss Algorithmus erfolgreich sein \Rightarrow Baum enthält mindestens n Knoten.
- Anzahl Vergleiche im schlechtesten Fall = Höhe des Baumes = maximale Anzahl Knoten von Wurzel zu Blatt.

137

Entscheidungsbaum

Binärer Baum der Höhe h hat höchstens $2^0 + 2^1 + \dots + 2^{h-1} = 2^h - 1 < 2^h$ Knoten.

Mindestens n Knoten im Entscheidungsbaum mit Höhe h .

$$n < 2^h \Rightarrow h > \log_2 n.$$

Anzahl Entscheidungen = $\Omega(\log n)$.

Theorem

Jeder Algorithmus zur Suche in sortierten Daten der Länge n benötigt im schlechtesten Fall $\Omega(\log n)$ Vergleichsschritte.

138

Untere Schranke für Suchen in unsortiertem Array

Theorem

Jeder Algorithmus zur Suche in unsortierten Daten der Länge n benötigt im schlechtesten Fall $\Omega(n)$ Vergleichsschritte.

139

Versuch

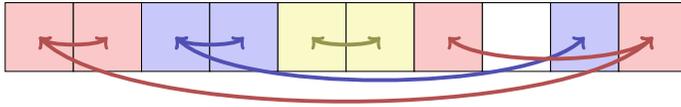
❓ Korrekt?

"Beweis": Um b in A zu finden, muss b mit jedem Element $A[i]$ ($1 \leq i \leq n$) verglichen werden.

❗ Falsch! Vergleiche zwischen Elementen von A möglich!

140

Besseres Argument



- i Vergleiche ohne b und e Vergleiche mit b
- Vergleiche erzeugen g Gruppen. Initial $g = n$.
- Verbinden zweier Gruppen benötigt mindestens einen Vergleich:
 $n - g \leq i$.
- Mindestens ein Element pro Gruppe muss mit b verglichen werden: $e \geq g$.
- Anzahl Vergleiche $i + e \geq n - g + g = n$.

■ 141

5. Auswählen

Das Auswahlproblem, Randomisierte Berechnung des Medians, Lineare Worst-Case Auswahl [Ottman/Widmayer, Kap. 3.1, Cormen et al, Kap. 9]

142

Min und Max

- ❓ Separates Finden von Minimum und Maximum in $(A[1], \dots, A[n])$ benötigt insgesamt $2n$ Vergleiche. (Wie) geht es mit weniger als $2n$ Vergleichen für beide gemeinsam?
- ⚠ Es geht mit $\frac{3}{2}N$ Vergleichen: Vergleiche jeweils 2 Elemente und deren kleineres mit Min und grösseres mit Max.

143

Das Auswahlproblem

Eingabe

- Unsortiertes Array $A = (A_1, \dots, A_n)$ paarweise verschiedener Werte
- Zahl $1 \leq k \leq n$.

Ausgabe: $A[i]$ mit $|\{j : A[j] < A[i]\}| = k - 1$

Spezialfälle

- $k = 1$: Minimum: Algorithmus mit n Vergleichsoperationen trivial.
- $k = n$: Maximum: Algorithmus mit n Vergleichsoperationen trivial.
- $k = \lfloor n/2 \rfloor$: Median.

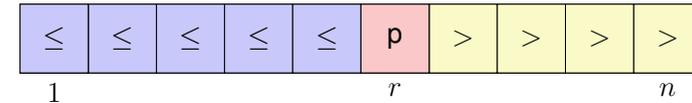
144

Ansätze

- Wiederholt das Minimum entfernen / auslesen: $\mathcal{O}(k \cdot n)$.
Median: $\mathcal{O}(n^2)$
- Sortieren (kommt bald): $\mathcal{O}(n \log n)$
- Pivotieren $\mathcal{O}(n)$!

Pivotieren

- 1 Wähle ein Element p als Pivotelement
- 2 Teile A in zwei Teile auf, den Rang von p bestimmend.
- 3 Rekursion auf dem relevanten Teil. Falls $k = r$, dann gefunden.



145

146

Algorithmus Partition($A[l..r], p$)

Input : Array A , welches den Sentinel p im Intervall $[l, r]$ mindestens einmal enthält.

Output : Array A partitioniert in $[l..r]$ um p . Rückgabe der Position von p .

```
while  $l < r$  do
  while  $A[l] < p$  do
     $l \leftarrow l + 1$ 
  while  $A[r] > p$  do
     $r \leftarrow r - 1$ 
  swap( $A[l], A[r]$ )
  if  $A[l] = A[r]$  then
     $l \leftarrow l + 1$ 
return  $l - 1$ 
```

Korrektheit: Invariante

Invariante I : $A_i \leq p \forall i \in [0, l), A_i > p \forall i \in (r, n], \exists k \in [l, r] : A_k = p$.

```
while  $l < r$  do
  while  $A[l] < p$  do  $I$ 
     $l \leftarrow l + 1$ 
  while  $A[r] > p$  do  $I$  und  $A[l] \geq p$ 
     $r \leftarrow r - 1$ 
  swap( $A[l], A[r]$ )  $I$  und  $A[r] \leq p$ 
  if  $A[l] = A[r]$  then  $I$  und  $A[l] \leq p \leq A[r]$ 
     $l \leftarrow l + 1$ 
return  $l - 1$   $I$ 
```

147

148

Korrektheit: Fortschritt

```

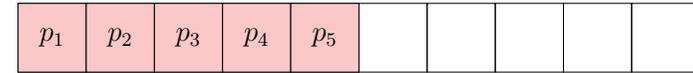
while l < r do
  while A[l] < p do
    l ← l + 1
  while A[r] > p do
    r ← r - 1
  swap(A[l], A[r])
  if A[l] = A[r] then
    l ← l + 1
return l-1

```

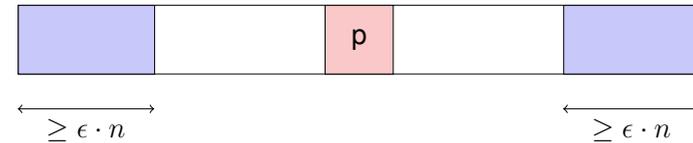
Fortschritt wenn $A[l] < p$
 Fortschritt wenn $A[r] > p$
 Fortschritt wenn $A[l] > p$ oder $A[r] < p$
 Fortschritt wenn $A[l] = A[r] = p$

Wahl des Pivots

Das Minimum ist ein schlechter Pivot: worst Case $\Theta(n^2)$



Ein guter Pivot hat linear viele Elemente auf beiden Seiten.



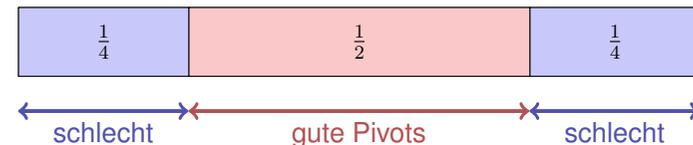
Analyse

Unterteilung mit Faktor q ($0 < q < 1$): zwei Gruppen mit $q \cdot n$ und $(1 - q) \cdot n$ Elementen (ohne Einschränkung $q \geq 1 - q$).

$$\begin{aligned}
 T(n) &\leq T(q \cdot n) + c \cdot n \\
 &= c \cdot n + q \cdot c \cdot n + T(q^2 \cdot n) = \dots = c \cdot n \sum_{i=0}^{\log_q(n)-1} q^i + T(1) \\
 &\leq c \cdot n \underbrace{\sum_{i=0}^{\infty} q^i}_{\text{geom. Reihe}} = c \cdot n \cdot \frac{1}{1 - q} = \mathcal{O}(n)
 \end{aligned}$$

Wie bekommen wir das hin?

Der Zufall hilft uns (Tony Hoare, 1961). Wähle in jedem Schritt einen zufälligen Pivot.



Wahrscheinlichkeit für guten Pivot nach einem Versuch: $\frac{1}{2} =: \rho$.
 Wahrscheinlichkeit für guten Pivot nach k Versuchen: $(1 - \rho)^{k-1} \cdot \rho$.
 Erwartungswert der geometrischen Verteilung: $1/\rho = 2$

[Erwartungswert der geometrischen Verteilung]

Zufallsvariable $X \in \mathbb{N}^+$ mit $\mathbb{P}(X = k) = (1 - p)^{k-1} \cdot p$.

Erwartungswert

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(X) &= \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot (1 - p)^{k-1} \cdot p = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot q^{k-1} \cdot (1 - q) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot q^{k-1} - k \cdot q^k = \sum_{k=0}^{\infty} (k + 1) \cdot q^k - \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot q^k \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} q^k = \frac{1}{1 - q} = \frac{1}{p}. \end{aligned}$$

Algorithmus Quickselect ($A[l..r], i$)

Input : Array A der Länge n . Indizes $1 \leq l \leq i \leq r \leq n$, so dass für alle $x \in A[l..r]$ gilt, dass $|\{j | A[j] \leq x\}| \geq l$ und $|\{j | A[j] \leq x\}| \leq r$.

Output : Partitioniertes Array A , so dass $|\{j | A[j] \leq A[i]\}| = i$

if $l = r$ **then** return;

repeat

 wähle zufälligen Pivot $x \in A[l..r]$

$p \leftarrow l$

for $j = l$ **to** r **do**

if $A[j] \leq x$ **then** $p \leftarrow p + 1$

until $\frac{l+r}{4} \leq p \leq \frac{3(l+r)}{4}$

$m \leftarrow \text{Partition}(A[l..r], x)$

if $i < m$ **then**

 quickselect($A[l..m], i$)

else

 quickselect($A[m..r], i$)

153

154

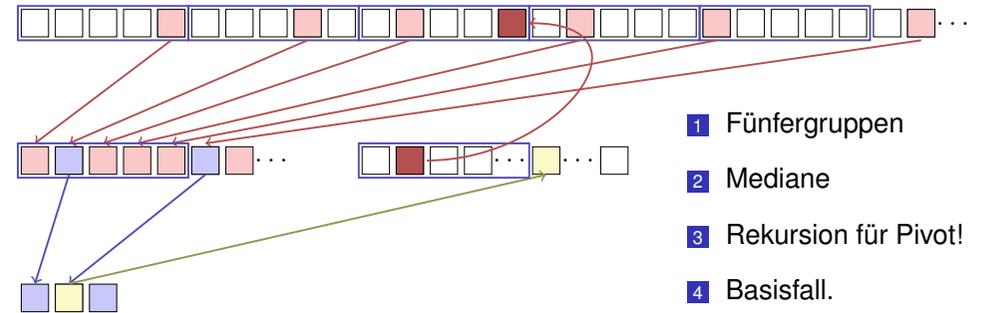
Median der Mediane

Ziel: Finde einen Algorithmus, welcher im schlechtesten Fall nur linear viele Schritte benötigt.

Algorithmus Select (k -smallest)

- Fünfergruppen bilden.
- Median jeder Gruppe bilden (naiv).
- Select rekursiv auf den Gruppenmediane.
- Partitioniere das Array um den gefundenen Median der Mediane.
Resultat: i
- Wenn $i = k$, Resultat. Sonst: Select rekursiv auf der richtigen Seite.

Median der Mediane

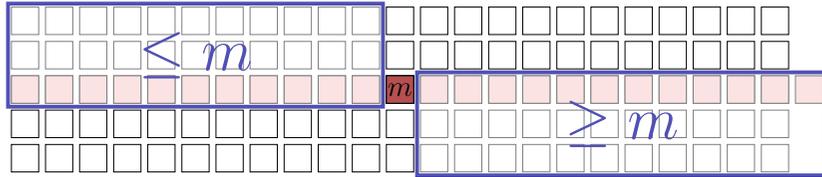


- 1 Fünfergruppen
- 2 Mediane
- 3 Rekursion für Pivot!
- 4 Basisfall.
- 5 Pivot (Level 1)
- 6 Partition (Level 1)
- 7 Median = Pivot Level 0
- 8 2. Rekursion startet

155

156

Was bringt das?



Anzahl Punkte links / rechts vom Median der Mediane (ohne Mediengruppe und ohne Restgruppe) $\geq 3 \cdot (\lceil \frac{1}{2} \lceil \frac{n}{5} \rceil \rceil - 2) \geq \frac{3n}{10} - 6$

Zweiter Aufruf mit maximal $\lceil \frac{7n}{10} + 6 \rceil$ Elementen.

Analyse

Rekursionsungleichung:

$$T(n) \leq T\left(\left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil\right) + T\left(\left\lceil \frac{7n}{10} + 6 \right\rceil\right) + d \cdot n.$$

mit einer Konstanten d .

Behauptung:

$$T(n) = \mathcal{O}(n).$$

157

158

Beweis

Induktionsanfang: Wähle c so gross, dass

$$T(n) \leq c \cdot n \text{ für alle } n \leq n_0.$$

Induktionsannahme:

$$T(i) \leq c \cdot i \text{ für alle } i < n.$$

Induktionsschritt:

$$\begin{aligned} T(n) &\leq T\left(\left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil\right) + T\left(\left\lceil \frac{7n}{10} + 6 \right\rceil\right) + d \cdot n \\ &= c \cdot \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil + c \cdot \left\lceil \frac{7n}{10} + 6 \right\rceil + d \cdot n. \end{aligned}$$

159

Beweis

Induktionsschritt:

$$\begin{aligned} T(n) &\leq c \cdot \left\lceil \frac{n}{5} \right\rceil + c \cdot \left\lceil \frac{7n}{10} + 6 \right\rceil + d \cdot n \\ &\leq c \cdot \frac{n}{5} + c + c \cdot \frac{7n}{10} + 6c + c + d \cdot n = \frac{9}{10} \cdot c \cdot n + 8c + d \cdot n. \end{aligned}$$

Wähle $c \geq 80 \cdot d$ und $n_0 = 91$.

$$T(n) \leq \frac{72}{80} \cdot c \cdot n + 8c + \frac{1}{80} \cdot c \cdot n = c \cdot \underbrace{\left(\frac{73}{80}n + 8\right)}_{\leq n \text{ für } n > n_0} \leq c \cdot n.$$

160

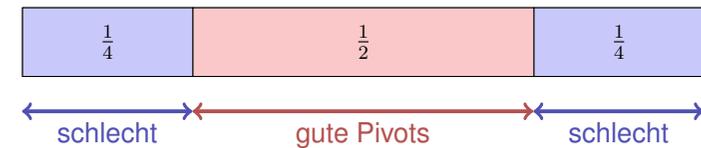
Resultat

Theorem

Das i -te Element einer Folge von n Elementen kann in höchstens $\mathcal{O}(n)$ Schritten gefunden werden.

Überblick

1. Wiederholt Minimum finden $\mathcal{O}(n^2)$
2. Sortieren und $A[i]$ ausgeben $\mathcal{O}(n \log n)$
3. Quickselect mit zufälligem Pivot $\mathcal{O}(n)$ im Mittel
4. Median of Medians (Blum) $\mathcal{O}(n)$ im schlimmsten Fall



161

162

6. C++ vertieft (I)

Kurzwiederholung: Vektoren, Zeiger und Iteratoren
Bereichsbasiertes for, Schlüsselwort auto, eine Klasse für Vektoren,
Subskript-Operator, Move-Konstruktion, Iterator.

Wir erinnern uns...

```
#include <iostream>
#include <vector>

int main(){
    // Vector of length 10
    std::vector<int> v(10,0);
    // Input
    for (int i = 0; i < v.length(); ++i)
        std::cin >> v[i];
    // Output
    for (std::vector::iterator it = v.begin(); it != v.end(); ++it)
        std::cout << *it << " ";
}
```

Das wollen wir doch genau verstehen!

Und zumindest das scheint uns zu umständlich!

163

164

Nützliche Tools (1): auto (C++11)

Das Schlüsselwort `auto`:

Der Typ einer Variablen wird inferiert vom Initialisierer.

Beispiele

```
int x = 10;
auto y = x; // int
auto z = 3; // int
std::vector<double> v(5);
auto i = v[3]; // double
```

165

Etwas besser...

```
#include <iostream>
#include <vector>

int main(){
    std::vector<int> v(10,0); // Vector of length 10

    for (int i = 0; i < v.length(); ++i)
        std::cin >> v[i];

    for (auto it = x.begin(); it != x.end(); ++it){
        std::cout << *it << " ";
    }
}
```

166

Nützliche Tools (2): Bereichsbasiertes for (C++11)

```
for (range-declaration : range-expression)
    statement;
```

range-declaration: benannte Variable vom Elementtyp der durch range-expression spezifizierten Folge.

range-expression: Ausdruck, der eine Folge von Elementen repräsentiert via Iterator-Paar `begin()`, `end()` oder in Form einer Initialisierungsliste.

Beispiele

```
std::vector<double> v(5);
for (double x: v) std::cout << x; // 00000
for (int x: {1,2,5}) std::cout << x; // 125
for (double& x: v) x=5;
```

167

Ok, das ist cool!

```
#include <iostream>
#include <vector>

int main(){
    std::vector<int> v(10,0); // Vector of length 10

    for (auto& x: v)
        std::cin >> x;

    for (const auto i: x)
        std::cout << i << " ";
}
```

168

Für unser genaues Verständnis

Wir bauen selbst eine Vektorklasse, die so etwas kann!

Auf dem Weg lernen wir etwas über

- RAII (Resource Acquisition is Initialization) und Move-Konstruktion
- Index-Operatoren und andere Nützlichkeiten
- Templates
- Exception Handling
- Funktoren und Lambda-Ausdrücke

Eine Klasse für Vektoren

```
class vector{
    int size;
    double* elem;
public:
    // constructors
    vector(): size{0}, elem{nullptr} {};

    vector(int s):size{s}, elem{new double[s]} {}
    // destructor
    ~vector(){
        delete[] elem;
    }
    // something is missing here
}
```

169

170

Elementzugriffe

```
class vector{
    ...
    // getter. pre: 0 <= i < size;
    double get(int i) const{
        return elem[i];
    }
    // setter. pre: 0 <= i < size;
    void set(int i, double d){ // setter
        elem[i] = d;
    }
    // length property
    int length() const {
        return size;
    }
}
```

```
class vector{
public:
    vector();
    vector(int s);
    ~vector();
    double get(int i) const;
    void set(int i, double d);
    int length() const;
}
```

Was läuft schief?

```
int main(){
    vector v(32);
    for (int i = 0; i<v.length(); ++i)
        v.set(i,i);
    vector w = v;
    for (int i = 0; i<w.length(); ++i)
        w.set(i,i*i);
    return 0;
}
```

```
class vector{
public:
    vector();
    vector(int s);
    ~vector();
    double get(int i);
    void set(int i, double d);
    int length() const;
}
```

```
*** Error in 'vector1': double free or corruption
(!prev): 0x0000000000d23c20 ***
===== Backtrace: =====
/lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6(+0x777e5) [0x7fe5a5ac97e5]
```

171

172

Rule of Three!

```
class vector{
...
public:
// Copy constructor
vector(const vector &v):
    size{v.size}, elem{new double[v.size]} {
    std::copy(v.elem, v.elem+v.size, elem);
}
}
```

```
class vector{
public:
vector();
vector(int s);
~vector();
vector(const vector &v);
double get(int i);
void set(int i, double d);
int length() const;
}
```

Rule of Three!

```
class vector{
...
// Assignment operator
vector& operator=(const vector&v){
    if (v.elem == elem) return *this;
    if (elem != nullptr) delete[] elem;
    size = v.size;
    elem = new double[size];
    std::copy(v.elem, v.elem+v.size, elem);
    return *this;
}
}
```

```
class vector{
public:
vector();
vector(int s);
~vector();
vector(const vector &v);
vector& operator=(const vector&v);
double get(int i);
void set(int i, double d);
int length() const;
}
```

Jetzt ist es zumindest korrekt. Aber umständlich.

173

174

Eleganter geht so:

```
class vector{
...
// Assignment operator
vector& operator= (const vector&v){
    vector cpy(v);
    swap(cpy);
    return *this;
}
private:
// helper function
void swap(vector& v){
    std::swap(size, v.size);
    std::swap(elem, v.elem);
}
}
```

```
class vector{
public:
vector();
vector(int s);
~vector();
vector(const vector &v);
vector& operator=(const vector&v);
double get(int i);
void set(int i, double d);
int length() const;
}
```

Arbeit an der Fassade.

Getter und Setter unschön. Wir wollen einen Indexoperator.
Überladen! So?

```
class vector{
...
double operator[] (int pos) const{
    return elem[pos];
}

void operator[] (int pos, double value){
    elem[pos] = value;
}
}
```

Nein!

175

176

Referenztypen!

```
class vector{
...
// for const objects
double operator[] (int pos) const{
    return elem[pos];
}
// for non-const objects
double& operator[] (int pos){
    return elem[pos]; // return by reference!
}
}
```

```
class vector{
public:
    vector();
    vector(int s);
    ~vector();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    double operator[] (int pos) const;
    double& operator[] (int pos);
    int length() const;
}
```

Soweit, so gut.

```
int main(){
    vector v(32); // Constructor
    for (int i = 0; i<v.length(); ++i)
        v[i] = i; // Index-Operator (Referenz!)

    vector w = v; // Copy Constructor
    for (int i = 0; i<w.length(); ++i)
        w[i] = i*i;

    const auto u = w;
    for (int i = 0; i<u.length(); ++i)
        std::cout << v[i] << ":" << u[i] << " "; // 0:0 1:1 2:4 ...
    return 0;
}
```

```
class vector{
public:
    vector();
    vector(int s);
    ~vector();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    double operator[] (int pos) const;
    double& operator[] (int pos);
    int length() const;
}
```

177

178

Anzahl Kopien

Wie oft wird `v` kopiert?

```
vector operator+ (const vector& l, double r){
    vector result (l); // Kopie von l nach result
    for (int i = 0; i < l.length(); ++i) result[i] = l[i] + r;
    return result; // Dekonstruktion von result nach Zuweisung
}

int main(){
    vector v(16); // Allokation von elems[16]
    v = v + 1; // Kopie bei Zuweisung!
    return 0; // Dekonstruktion von v
}
```

`v` wird zwei Mal kopiert.

179

Move-Konstruktor und Move-Zuweisung

```
class vector{
...
// move constructor
vector (vector&& v){
    swap(v);
};
// move assignment
vector& operator=(vector&& v){
    swap(v);
    return *this;
};
}
```

```
class vector{
public:
    vector();
    vector(int s);
    ~vector();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    vector (vector&& v);
    vector& operator=(vector&& v);
    double operator[] (int pos) const;
    double& operator[] (int pos);
    int length() const;
}
```

180

Erklärung

Wenn das Quellobjekt einer Zuweisung direkt nach der Zuweisung nicht weiter existiert, dann kann der Compiler den Move-Zuweisungsoperator anstelle des Zuweisungsoperators einsetzen.³ Damit wird eine potentiell teure Kopie vermieden. Anzahl der Kopien im vorigen Beispiel reduziert sich zu 1.

³Analoges gilt für den Kopier-Konstruktor und den Move-Konstruktor.

181

Bereichsbasiertes for

Wir wollten doch das:

```
vector v = ...;
for (auto x: v)
    std::cout << x << " ";
```

Dafür müssen wir einen Iterator über `begin` und `end` bereitstellen.

182

Iterator für den Vektor

```
class vector{
...
    // Iterator
    double* begin(){
        return elem;
    }
    double* end(){
        return elem+size;
    }
}
```

```
class vector{
public:
    vector ();
    vector(int s);
    ~vector();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    vector (vector&& v);
    vector& operator=(vector&& v);
    double operator[] (int pos) const;
    double& operator[] (int pos);
    int length() const;
    double* begin();
    double* end();
}
```

183

Const Iterator für den Vektor

```
class vector{
...
    // Const-Iterator
    const double* begin() const{
        return elem;
    }
    const double* end() const{
        return elem+size;
    }
}
```

```
class vector{
public:
    vector ();
    vector(int s);
    ~vector();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    vector (vector&& v);
    vector& operator=(vector&& v);
    double operator[] (int pos) const;
    double& operator[] (int pos);
    int length() const;
    double* begin();
    double* end();
    const double* begin() const;
    const double* end() const;
}
```

184

Zwischenstand

```
vector Natural(int from, int to){
    vector v(to-from+1);
    for (auto& x: v) x = from++;
    return v;
}

int main(){
    vector v = Natural(5,12);
    for (auto x: v)
        std::cout << x << " "; // 5 6 7 8 9 10 11 12
    std::cout << "\n";
    std::cout << "sum="
        << std::accumulate(v.begin(), v.end(),0); // sum = 68
    return 0;
}
```

185

Nützliche Tools (3): using (C++11)

using ersetzt in C++11 das alte typedef.

using identifier = type-id;

Beispiel

```
using element_t = double;
class vector{
    std::size_t size;
    element_t* elem;
    ...
}
```

186

7. Sortieren I

Einfache Sortierverfahren

7.1 Einfaches Sortieren

Sortieren durch Auswahl, Sortieren durch Einfügen, Bubblesort
[Ottman/Widmayer, Kap. 2.1, Cormen et al, Kap. 2.1, 2.2, Exercise 2.2-2, Problem 2-2]

187

188

Problemstellung

Eingabe: Ein Array $A = (A[1], \dots, A[n])$ der Länge n .

Ausgabe: Eine Permutation A' von A , die sortiert ist: $A'[i] \leq A'[j]$ für alle $1 \leq i \leq j \leq n$.

Algorithmus: IsSorted(A)

Input : Array $A = (A[1], \dots, A[n])$ der Länge n .

Output : Boolesche Entscheidung "sortiert" oder "nicht sortiert"

```
for  $i \leftarrow 1$  to  $n - 1$  do
  if  $A[i] > A[i + 1]$  then
    return "nicht sortiert";
return "sortiert";
```

189

190

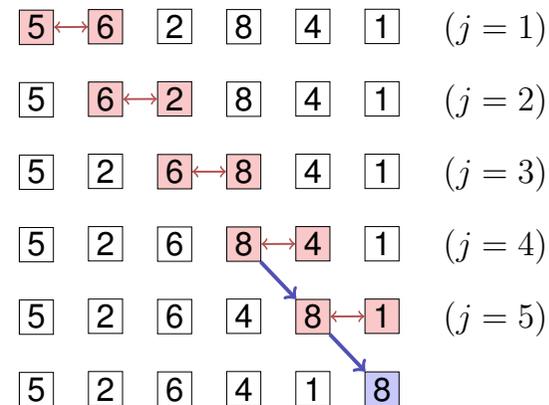
Beobachtung

IsSorted(A): "nicht sortiert", wenn $A[i] > A[i + 1]$ für ein i .

⇒ Idee:

```
for  $j \leftarrow 1$  to  $n - 1$  do
  if  $A[j] > A[j + 1]$  then
    swap( $A[j], A[j + 1]$ );
```

Ausprobieren



- Nicht sortiert! 😞.
- Aber das grösste Element wandert ganz nach rechts. ⇒ Neue Idee! 😊

191

192

Ausprobieren

5	6	2	8	4	1	(j = 1, i = 1)
5	6	2	8	4	1	(j = 2)
5	2	6	8	4	1	(j = 3)
5	2	6	8	4	1	(j = 4)
5	2	6	4	8	1	(j = 5)
5	2	6	4	1	8	(j = 1, i = 2)
2	5	6	4	1	8	(j = 2)
2	5	6	4	1	8	(j = 3)
2	5	4	6	1	8	(j = 4)
2	5	4	1	6	8	(j = 1, i = 3)
2	5	4	1	6	8	(j = 2)
2	4	5	1	6	8	(j = 3)
2	4	1	5	6	8	(j = 1, i = 4)
2	4	1	5	6	8	(j = 2)
2	4	1	5	6	8	(j = 3)
2	4	1	5	6	8	(j = 1, i = 4)
2	4	1	5	6	8	(j = 2)
2	4	1	5	6	8	(j = 3)
1	2	4	5	6	8	(i = 1, j = 5)

- Wende das Verfahren iterativ an.
- Für $A[1, \dots, n]$, dann $A[1, \dots, n - 1]$, dann $A[1, \dots, n - 2]$, etc.

Algorithmus: Bubblesort

Input : Array $A = (A[1], \dots, A[n])$, $n \geq 0$.

Output : Sortiertes Array A

```

for i ← 1 to n - 1 do
    for j ← 1 to n - i do
        if A[j] > A[j + 1] then
            swap(A[j], A[j + 1]);
    
```

193

194

Analyse

Anzahl Schlüsselvergleiche $\sum_{i=1}^{n-1} (n - i) = \frac{n(n-1)}{2} = \Theta(n^2)$.

Anzahl Vertauschungen im schlechtesten Fall: $\Theta(n^2)$

❓ Was ist der schlechteste Fall?

❗ Wenn A absteigend sortiert ist.

❓ Algorithmus kann so angepasst werden, dass er dann abbricht, wenn das Array sortiert ist. Schlüsselvergleiche und Vertauschungen des modifizierten Algorithmus im besten Fall?

❗ Schlüsselvergleiche = $n - 1$. Vertauschungen = 0.

Sortieren durch Auswahl

5	6	2	8	4	1	(i = 1)
1	6	2	8	4	5	(i = 2)
1	2	6	8	4	5	(i = 3)
1	2	4	8	6	5	(i = 4)
1	2	4	5	6	8	(i = 5)
1	2	4	5	6	8	(i = 6)
1	2	4	5	6	8	

- Iteratives Vorgehen wie bei Bubblesort.
- Auswahl des kleinsten (oder grössten) Elementes durch direkte Suche.

195

196

Algorithmus: Sortieren durch Auswahl

Input : Array $A = (A[1], \dots, A[n])$, $n \geq 0$.

Output : Sortiertes Array A

```

for  $i \leftarrow 1$  to  $n - 1$  do
     $p \leftarrow i$ 
    for  $j \leftarrow i + 1$  to  $n$  do
        if  $A[j] < A[p]$  then
             $p \leftarrow j$ 
    swap( $A[i], A[p]$ )
    
```

Analyse

Anzahl Vergleiche im schlechtesten Fall: $\Theta(n^2)$.

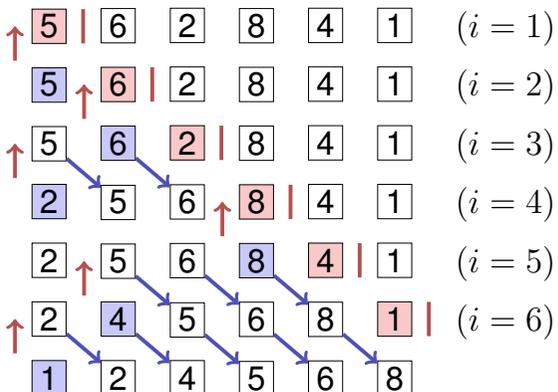
Anzahl Vertauschungen im schlechtesten Fall: $n - 1 = \Theta(n)$

Anzahl Vergleiche im besten Fall: $\Theta(n^2)$.

197

198

Sortieren durch Einfügen



- Iteratives Vorgehen:
 $i = 1 \dots n$
- Einfügeposition für Element i bestimmen.
- Element i einfügen, ggfs. Verschiebung nötig.

199

Sortieren durch Einfügen

❓ Welchen Nachteil hat der Algorithmus im Vergleich zum Sortieren durch Auswahl?

⚠ Im schlechtesten Fall viele Elementverschiebungen.

❓ Welchen Vorteil hat der Algorithmus im Vergleich zum Sortieren durch Auswahl?

⚠ Der Suchbereich (Einfügebereich) ist bereits sortiert.
Konsequenz: binäre Suche möglich.

200

Algorithmus: Sortieren durch Einfügen

Input : Array $A = (A[1], \dots, A[n])$, $n \geq 0$.
Output : Sortiertes Array A

```

for  $i \leftarrow 2$  to  $n$  do
   $x \leftarrow A[i]$ 
   $p \leftarrow \text{BinarySearch}(A[1..i-1], x)$ ; // Kleinstes  $p \in [1, i]$  mit  $A[p] \geq x$ 
  for  $j \leftarrow i-1$  downto  $p$  do
     $A[j+1] \leftarrow A[j]$ 
   $A[p] \leftarrow x$ 
  
```

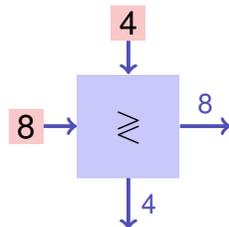
Analyse

Anzahl Vergleiche im schlechtesten Fall:
 $\sum_{k=1}^{n-1} a \cdot \log k = a \log((n-1)!) \in \mathcal{O}(n \log n)$.
 Anzahl Vergleiche im besten Fall: $\Theta(n \log n)$.⁴
 Anzahl Vertauschungen im schlechtesten Fall: $\sum_{k=2}^n (k-1) \in \Theta(n^2)$

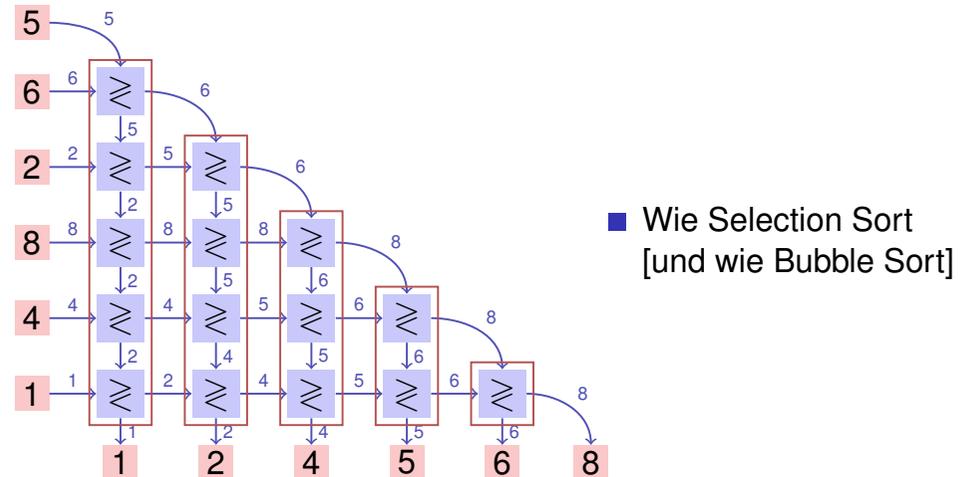
⁴Mit leichter Anpassung der Funktion BinarySearch für das Minimum / Maximum: $\Theta(n)$

Anderer Blickwinkel

Sortierknoten:

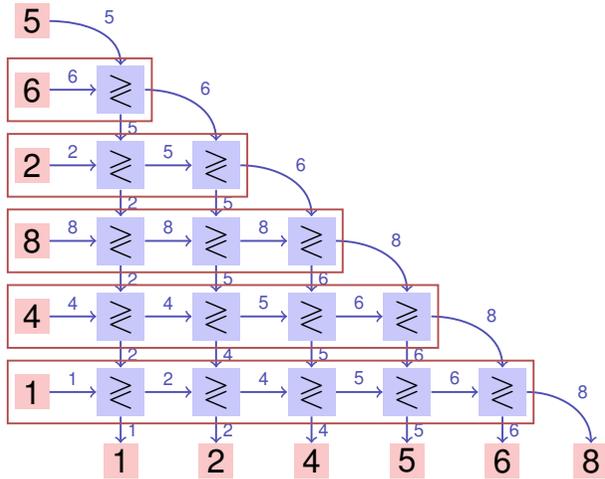


Anderer Blickwinkel



■ Wie Selection Sort
[und wie Bubble Sort]

Anderer Blickwinkel



■ Wie Insertion Sort

Schlussfolgerung

Selection Sort, Bubble Sort und Insertion Sort sind in gewissem Sinne dieselben Sortieralgorithmen. Wird später präzisiert.⁵

⁵Im Teil über parallele Sortiernetzwerke. Für sequentiellen Code gelten natürlich weiterhin die zuvor gemachten Feststellungen.

205

206

Shellsort

Insertion Sort auf Teilfolgen der Form $(A_{k \cdot i})$ ($i \in \mathbb{N}$) mit absteigenden Abständen k . Letzte Länge ist zwingend $k = 1$.

Gute Folgen: z.B. Folgen mit Abständen $k \in \{2^i 3^j \mid 0 \leq i, j\}$.

Shellsort

9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
1	8	7	6	5	4	3	2	9	0	insertion sort, $k = 4$
1	0	7	6	5	4	3	2	9	8	
1	0	3	6	5	4	7	2	9	8	
1	0	3	2	5	4	7	6	9	8	insertion sort, $k = 2$
1	0	3	2	5	4	7	6	9	8	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	insertion sort, $k = 1$

207

208

8. Sortieren II

Heapsort, Quicksort, Mergesort

8.1 Heapsort

[Ottman/Widmayer, Kap. 2.3, Cormen et al, Kap. 6]

209

210

Heapsort

Inspiration von Selectsort: Schnelles Einfügen

Inspiration von Insertionsort: Schnelles Finden der Position

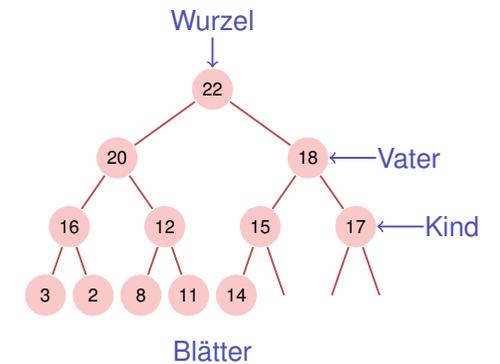
❓ Können wir das Beste der beiden Welten haben?

⚠️ Ja, aber nicht ganz so einfach...

[Max-]Heap⁶

Binärer Baum mit folgenden Eigenschaften

- 1 vollständig, bis auf die letzte Ebene
- 2 Lücken des Baumes in der letzten Ebene höchstens rechts.
- 3 *Heap-Bedingung*:
Max-(Min-)Heap: Schlüssel eines Kindes kleiner (größer) als der des Vaters



211

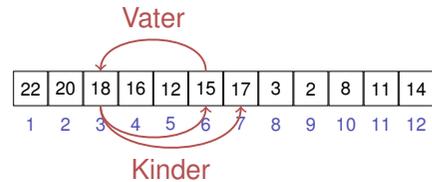
⁶Heap (Datenstruktur), nicht: wie in "Heap und Stack" (Speicherallokation)

212

Heap und Array

Baum \rightarrow Array:

- $\text{Kinder}(i) = \{2i, 2i + 1\}$
- $\text{Vater}(i) = \lfloor i/2 \rfloor$



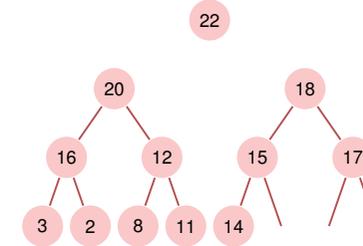
Abhängig von Startindex!⁷

⁷Für Arrays, die bei 0 beginnen: $\{2i, 2i + 1\} \rightarrow \{2i + 1, 2i + 2\}$, $\lfloor i/2 \rfloor \rightarrow \lfloor (i - 1)/2 \rfloor$

213

Rekursive Heap-Struktur

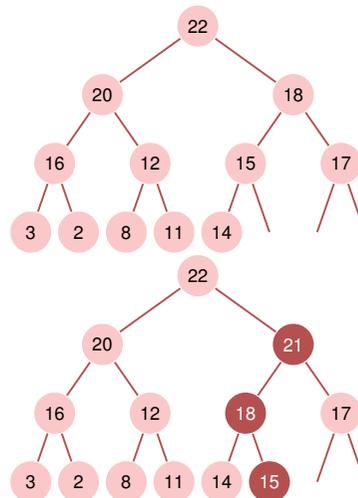
Ein Heap besteht aus zwei Teilheaps:



214

Einfügen

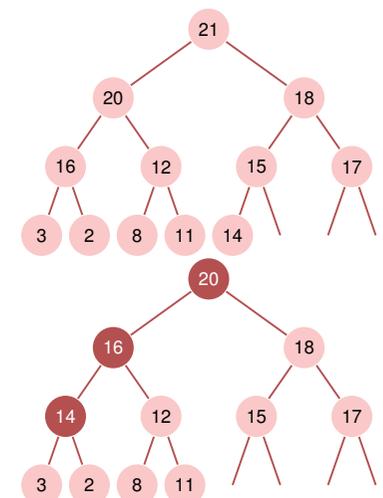
- Füge neues Element an erste freie Stelle ein. Verletzt Heap Eigenschaft potentiell.
- Stelle Heap Eigenschaft wieder her: Sukzessives Aufsteigen.
- Anzahl Operationen im schlechtesten Fall: $\mathcal{O}(\log n)$



215

Maximum entfernen

- Ersetze das Maximum durch das unterste rechte Element.
- Stelle Heap Eigenschaft wieder her: Sukzessives Absinken (in Richtung des grösseren Kindes).
- Anzahl Operationen im schlechtesten Fall: $\mathcal{O}(\log n)$



216

Algorithmus Versickern(A, i, m)

Input : Array A mit Heapstruktur für die Kinder von i . Letztes Element m .

Output : Array A mit Heapstruktur für i mit letztem Element m .

```
while  $2i \leq m$  do
   $j \leftarrow 2i$ ; //  $j$  linkes Kind
  if  $j < m$  and  $A[j] < A[j + 1]$  then
     $j \leftarrow j + 1$ ; //  $j$  rechtes Kind mit grösserem Schlüssel
  if  $A[i] < A[j]$  then
    swap( $A[i], A[j]$ )
     $i \leftarrow j$ ; // weiter versickern
  else
     $i \leftarrow m$ ; // versickern beendet
```

217

Heap Sortieren

$A[1, \dots, n]$ ist Heap.

Solange $n > 1$

- swap($A[1], A[n]$)
- Versickere($A, 1, n - 1$);
- $n \leftarrow n - 1$



218

Heap erstellen

Beobachtung: Jedes Blatt eines Heaps ist für sich schon ein korrekter Heap.

Folgerung: Induktion von unten!

219

Algorithmus HeapSort(A, n)

Input : Array A der Länge n .

Output : A sortiert.

for $i \leftarrow n/2$ **downto** 1 **do**

└ Versickere(A, i, n);

// Nun ist A ein Heap.

for $i \leftarrow n$ **downto** 2 **do**

└ swap($A[1], A[i]$)

└ Versickere($A, 1, i - 1$)

// Nun ist A sortiert.

220

Analyse: Sortieren eines Heaps

Versickere durchläuft maximal $\log n$ Knoten. An jedem Knoten 2 Schlüsselvergleiche. \Rightarrow Heap sortieren kostet im schlechtesten Fall $2n \log n$ Vergleiche.

Anzahl der Bewegungen vom Heap Sortieren auch $\mathcal{O}(n \log n)$.

8.2 Mergesort

[Ottman/Widmayer, Kap. 2.4, Cormen et al, Kap. 2.3],

Analyse: Heap bauen

Aufrufe an Versickern: $n/2$. Also Anzahl Vergleiche und Bewegungen $v(n) \in \mathcal{O}(n \log n)$.

Versickerpfade aber im Mittel viel kürzer, also sogar:

$$v(n) = \sum_{h=0}^{\lfloor \log n \rfloor} \left\lceil \frac{n}{2^{h+1}} \right\rceil \cdot c \cdot h \in \mathcal{O}\left(n \sum_{h=0}^{\lfloor \log n \rfloor} \frac{h}{2^h}\right)$$

$s(x) := \sum_{k=0}^{\infty} kx^k = \frac{x}{(1-x)^2}$ ($0 < x < 1$). Mit $s(\frac{1}{2}) = 2$:

$$v(n) \in \mathcal{O}(n).$$

221

222

Zwischenstand

Heapsort: $\mathcal{O}(n \log n)$ Vergleiche und Bewegungen.

❓ Nachteile von Heapsort?

- ❗ Wenig Lokalität: per Definition springt Heapsort im sortierten Array umher (Negativer Cache Effekt).
- ❗ Zwei Vergleiche vor jeder benötigten Bewegung.

223

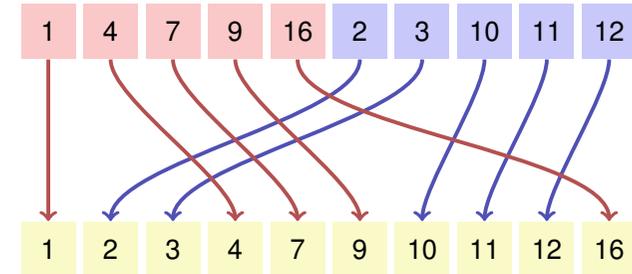
224

Mergesort (Sortieren durch Verschmelzen)

Divide and Conquer!

- Annahme: Zwei Hälften eines Arrays A bereits sortiert.
- Folgerung: Minimum von A kann mit 2 Vergleichen ermittelt werden.
- Iterativ: Sortierung des so vorsortierten A in $\mathcal{O}(n)$.

Merge



225

226

Algorithmus Merge(A, l, m, r)

Input : Array A der Länge n , Indizes $1 \leq l \leq m \leq r \leq n$. $A[l, \dots, m]$,
 $A[m + 1, \dots, r]$ sortiert

Output : $A[l, \dots, r]$ sortiert

```
1  $B \leftarrow$  new Array( $r - l + 1$ )
2  $i \leftarrow l$ ;  $j \leftarrow m + 1$ ;  $k \leftarrow 1$ 
3 while  $i \leq m$  and  $j \leq r$  do
4   if  $A[i] \leq A[j]$  then  $B[k] \leftarrow A[i]$ ;  $i \leftarrow i + 1$ 
5   else  $B[k] \leftarrow A[j]$ ;  $j \leftarrow j + 1$ 
6    $k \leftarrow k + 1$ ;
7 while  $i \leq m$  do  $B[k] \leftarrow A[i]$ ;  $i \leftarrow i + 1$ ;  $k \leftarrow k + 1$ 
8 while  $j \leq r$  do  $B[k] \leftarrow A[j]$ ;  $j \leftarrow j + 1$ ;  $k \leftarrow k + 1$ 
9 for  $k \leftarrow l$  to  $r$  do  $A[k] \leftarrow B[k - l + 1]$ 
```

Korrektheit

Hypothese: Nach k Durchläufen der Schleife von Zeile 3 ist $B[1, \dots, k]$ sortiert und $B[k] \leq A[i]$, falls $i \leq m$ und $B[k] \leq A[j]$ falls $j \leq r$.

Beweis per Induktion:

Induktionsanfang: Das leere Array $B[1, \dots, 0]$ ist trivialerweise sortiert.

Induktionsschluss ($k \rightarrow k + 1$):

- oBdA $A[i] \leq A[j]$, $i \leq m, j \leq r$.
- $B[1, \dots, k]$ ist nach Hypothese sortiert und $B[k] \leq A[i]$.
- Nach $B[k + 1] \leftarrow A[i]$ ist $B[1, \dots, k + 1]$ sortiert.
- $B[k + 1] = A[i] \leq A[i + 1]$ (falls $i + 1 \leq m$) und $B[k + 1] \leq A[j]$ falls $j \leq r$.
- $k \leftarrow k + 1, i \leftarrow i + 1$: Aussage gilt erneut.

227

228

Analyse (Merge)

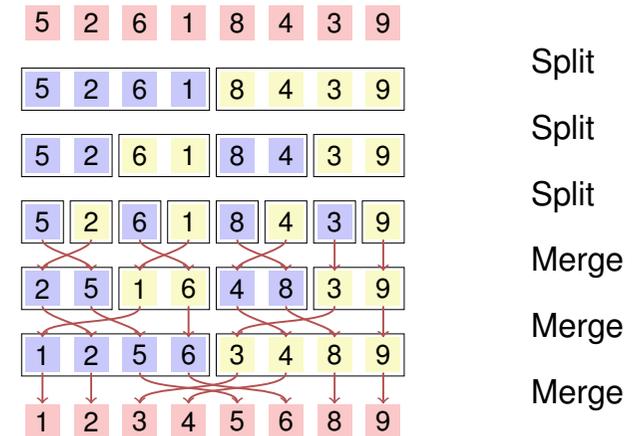
Lemma

Wenn: Array A der Länge n , Indizes $1 \leq l < r \leq n$. $m = \lfloor (l+r)/2 \rfloor$ und $A[l, \dots, m]$, $A[m+1, \dots, r]$ sortiert.

Dann: im Aufruf $\text{Merge}(A, l, m, r)$ werden $\Theta(r-l)$ viele Schlüsselbewegungen und Vergleiche durchgeführt.

Beweis: (Inspektion des Algorithmus und Zählen der Operationen).

Mergesort



229

230

Algorithmus Rekursives 2-Wege Mergesort(A, l, r)

Input : Array A der Länge n . $1 \leq l \leq r \leq n$

Output : Array $A[l, \dots, r]$ sortiert.

if $l < r$ then

$m \leftarrow \lfloor (l+r)/2 \rfloor$	// Mittlere Position
Mergesort(A, l, m)	// Sortiere vordere Hälfte
Mergesort($A, m+1, r$)	// Sortiere hintere Hälfte
Merge(A, l, m, r)	// Verschmelzen der Teilfolgen

Analyse

Rekursionsgleichung für die Anzahl Vergleiche und Schlüsselbewegungen:

$$C(n) = C\left(\left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil\right) + C\left(\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + \Theta(n) \in \Theta(n \log n)$$

231

232

Algorithmus StraightMergesort(A)

Rekursion vermeiden: Verschmelze Folgen der Länge 1, 2, 4... direkt

Input : Array A der Länge n

Output : Array A sortiert

$length \leftarrow 1$

while $length < n$ **do** // Iteriere über die Längen n

$right \leftarrow 0$

while $right + length < n$ **do** // Iteriere über die Teilfolgen

$left \leftarrow right + 1$

$middle \leftarrow left + length - 1$

$right \leftarrow \min(middle + length, n)$

 Merge($A, left, middle, right$)

$length \leftarrow length \cdot 2$

233

Analyse

Wie rekursives Mergesort führt reines 2-Wege-Mergesort immer $\Theta(n \log n)$ viele Schlüsselvergleiche und -bewegungen aus.

234

Natürliches 2-Wege Mergesort

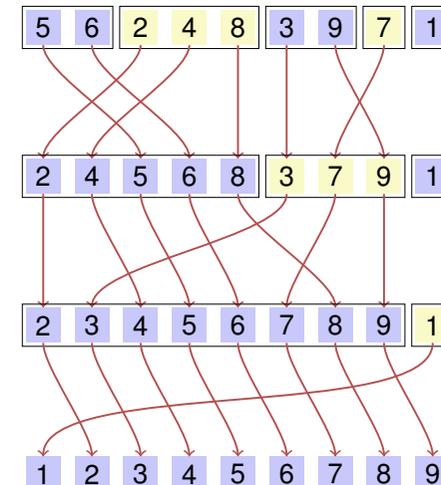
Beobachtung: Obige Varianten nutzen nicht aus, wenn vorsortiert ist und führen immer $\Theta(n \log n)$ viele Bewegungen aus.

❓ Wie kann man teilweise vorsortierte Folgen besser sortieren?

⚠️ Rekursives Verschmelzen von bereits vorsortierten Teilen (*Runs*) von A .

235

Natürliches 2-Wege Mergesort



236

Algorithmus NaturalMergesort(A)

Input : Array A der Länge $n > 0$

Output : Array A sortiert

repeat

$r \leftarrow 0$

while $r < n$ **do**

$l \leftarrow r + 1$

$m \leftarrow l$; **while** $m < n$ **and** $A[m + 1] \geq A[m]$ **do** $m \leftarrow m + 1$

if $m < n$ **then**

$r \leftarrow m + 1$; **while** $r < n$ **and** $A[r + 1] \geq A[r]$ **do** $r \leftarrow r + 1$

 Merge(A, l, m, r);

else

$r \leftarrow n$

until $l = 1$

8.3 Quicksort

[Ottman/Widmayer, Kap. 2.2, Cormen et al, Kap. 7]

Analyse

Im besten Fall führt natürliches Mergesort nur $n - 1$ Vergleiche durch!

❓ Ist es auch im Mittel asymptotisch besser als StraightMergesort?

❗ Nein. Unter Annahme der Gleichverteilung der paarweise unterschiedlichen Schlüssel haben wir im Mittel $n/2$ Stellen i mit $k_i > k_{i+1}$, also $n/2$ Runs und sparen uns lediglich einen Durchlauf, also n Vergleiche.

Natürliches Mergesort führt im schlechtesten und durchschnittlichen Fall $\Theta(n \log n)$ viele Vergleiche und Bewegungen aus.

237

238

Quicksort

❓ Was ist der Nachteil von Mergesort?

❗ Benötigt $\Theta(n)$ Speicherplatz für das Verschmelzen.

❓ Wie könnte man das Verschmelzen einsparen?

❗ Sorge dafür, dass jedes Element im linken Teil kleiner ist als im rechten Teil.

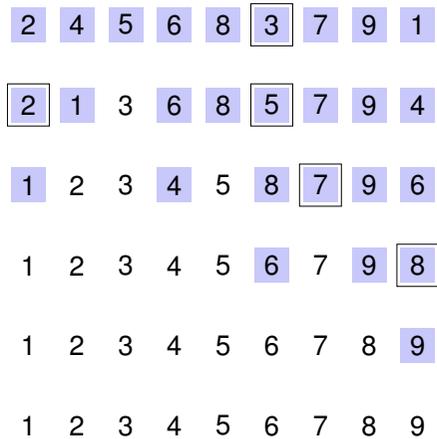
❓ Wie?

❗ Pivotieren und Aufteilen!

239

240

Quicksort (willkürlicher Pivot)



241

Algorithmus Quicksort($A[l, \dots, r]$)

Input : Array A der Länge n . $1 \leq l \leq r \leq n$.

Output : Array A , sortiert zwischen l und r .

if $l < r$ **then**

 Wähle Pivot $p \in A[l, \dots, r]$

$k \leftarrow \text{Partition}(A[l, \dots, r], p)$

 Quicksort($A[l, \dots, k - 1]$)

 Quicksort($A[k + 1, \dots, r]$)

242

Zur Erinnerung: Algorithmus Partition($A[l, \dots, r], p$)

Input : Array A , welches den Sentinel p im Intervall $[l, r]$ mindestens einmal enthält.

Output : Array A partitioniert um p . Rückgabe der Position von p .

while $l < r$ **do**

while $A[l] < p$ **do**

$l \leftarrow l + 1$

while $A[r] > p$ **do**

$r \leftarrow r - 1$

 swap($A[l], A[r]$)

if $A[l] = A[r]$ **then**

$l \leftarrow l + 1$

// Nur für nicht paarweise verschiedene Schlüssel

return $l - 1$

243

Analyse: Anzahl Vergleiche

Bester Fall. Pivotelement = Median; Anzahl Vergleiche:

$$T(n) = 2T(n/2) + c \cdot n, T(1) = 0 \Rightarrow T(n) \in \mathcal{O}(n \log n)$$

Schlechtester Fall. Pivotelement = Minimum oder Maximum; Anzahl Vergleiche:

$$T(n) = T(n - 1) + c \cdot n, T(1) = 0 \Rightarrow T(n) \in \Theta(n^2)$$

244

Analyse: Anzahl Vertauschungen

Resultat eines Aufrufes an Partition (Pivot 3):

2 1 3 6 8 5 7 9 4

❓ Wie viele Vertauschungen haben hier maximal stattgefunden?

❗ 2. Die maximale Anzahl an Vertauschungen ist gegeben durch die Anzahl Schlüssel im kleineren Bereich.

245

Analyse: Anzahl Vertauschungen

Gedankenspiel

- Jeder Schlüssel aus dem kleineren Bereich zahlt bei einer Vertauschung eine Münze.
- Wenn ein Schlüssel eine Münze gezahlt hat, ist der Bereich, in dem er sich befindet maximal halb so gross wie zuvor.
- Jeder Schlüssel muss also maximal $\log n$ Münzen zahlen. Es gibt aber nur n Schlüssel.

Folgerung: Es ergeben sich $\mathcal{O}(n \log n)$ viele Schlüsselvertauschungen im schlechtesten Fall!

246

Randomisiertes Quicksort

Quicksort wird trotz $\Theta(n^2)$ Laufzeit im schlechtesten Fall oft eingesetzt.

Grund: Quadratische Laufzeit unwahrscheinlich, sofern die Wahl des Pivots und die Vorsortierung nicht eine ungünstige Konstellation aufweisen.

Vermeidung: Zufälliges Ziehen eines Pivots. Mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus $[l, r]$.

247

Analyse (Randomisiertes Quicksort)

Erwartete Anzahl verglichener Schlüssel bei Eingabe der Länge n :

$$T(n) = (n - 1) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T(k - 1) + T(n - k)), \quad T(0) = T(1) = 0$$

Behauptung $T(n) \leq 4n \log n$.

Beweis per Induktion:

Induktionsanfang: klar für $n = 0$ (mit $0 \log 0 := 0$) und für $n = 1$.

Hypothese: $T(n) \leq 4n \log n$ für ein n .

Induktionsschritt: $(n - 1 \rightarrow n)$

248

Analyse (Randomisiertes Quicksort)

$$\begin{aligned}
 T(n) &= n - 1 + \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} T(k) \stackrel{H}{\leq} n - 1 + \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} 4k \log k \\
 &= n - 1 + \sum_{k=1}^{n/2} 4k \underbrace{\log k}_{\leq \log n-1} + \sum_{k=n/2+1}^{n-1} 4k \underbrace{\log k}_{\leq \log n} \\
 &\leq n - 1 + \frac{8}{n} \left((\log n - 1) \sum_{k=1}^{n/2} k + \log n \sum_{k=n/2+1}^{n-1} k \right) \\
 &= n - 1 + \frac{8}{n} \left((\log n) \cdot \frac{n(n-1)}{2} - \frac{n}{4} \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \right) \\
 &= 4n \log n - 4 \log n - 3 \leq 4n \log n
 \end{aligned}$$

249

Analyse (Randomisiertes Quicksort)

Theorem

Im Mittel benötigt randomisiertes Quicksort $\mathcal{O}(n \cdot \log n)$ Vergleiche.

250

Praktische Anmerkungen

Rekursionstiefe im schlechtesten Fall: $n - 1^8$. Dann auch Speicherplatzbedarf $\mathcal{O}(n)$.

Kann vermieden werden: Rekursion nur auf dem kleineren Teil. Dann garantiert $\mathcal{O}(\log n)$ Rekursionstiefe und Speicherplatzbedarf.

⁸Stack-Overflow möglich!

251

Quicksort mit logarithmischem Speicherplatz

Input : Array A der Länge n . $1 \leq l \leq r \leq n$.

Output : Array A , sortiert zwischen l und r .

while $l < r$ **do**

 Wähle Pivot $p \in A[l, \dots, r]$

$k \leftarrow \text{Partition}(A[l, \dots, r], p)$

if $k - l < r - k$ **then**

 Quicksort($A[l, \dots, k - 1]$)

$l \leftarrow k + 1$

else

 Quicksort($A[k + 1, \dots, r]$)

$r \leftarrow k - 1$

Der im ursprünglichen Algorithmus verbleibende Aufruf an Quicksort($A[l, \dots, r]$) geschieht iterativ (Tail Recursion ausgenutzt!): die If-Anweisung wurde zur While Anweisung.

252

Praktische Anmerkungen

Für den Pivot wird in der Praxis oft der Median von drei Elementen genommen. Beispiel: `Median3(A[l], A[r], A[(l + r)/2])`.

Es existiert eine Variante von Quicksort mit konstanten Speicherplatzbedarf. Idee: Zwischenspeichern des alten Pivots am Ort des neuen Pivots.

253

9. C++ vertieft (II): Templates

254

Motivation

Ziel: generische Vektor-Klasse und Funktionalität.

Beispiele

```
vector<double> vd(10);
vector<int> vi(10);
vector<char> vc(20);

auto nd = vd * vd; // norm (vector of double)
auto ni = vi * vi; // norm (vector of int)
```

255

Typen als Template Parameter

- 1 Ersetze in der konkreten Implementation einer Klasse den Typ, der generisch werden soll (beim Vektor: `double`) durch einen Stellvertreter, z.B. `T`.
- 2 Stelle der Klasse das Konstrukt `template<typename T>`⁹ voran (ersetze `T` ggfs. durch den Stellvertreter)..

Das Konstrukt `template<typename T>` kann gelesen werden als "für alle Typen T".

⁹gleichbedeutend: `template<class T>`

256

Typen als Template Parameter

```
template <typename ElementType>
class vector{
    size_t size;
    ElementType* elem;
public:
    ...
    vector(size_t s):
        size{s},
        elem{new ElementType[s]}{}
    ...
    ElementType& operator[](size_t pos){
        return elem[pos];
    }
    ...
}
```

257

Template Instanziierung

`vector<typeName>` erzeugt Typinstanz von `vector` mit `ElementType=typeName`.
Bezeichnung: **Instanziierung**.

Beispiele

```
vector<double> x;           // vector of double
vector<int> y;             // vector of int
vector<vector<double>> x;  // vector of vector of double
```

258

Type-checking

Templates sind weitgehend Ersetzungsregeln zur Instanzierungszeit und während der Kompilation. Es wird immer so wenig geprüft wie nötig und so viel wie möglich.

259

Beispiel

```
template <typename T>
class vector{
    ...
    // pre: vector contains at least one element, elements comparable
    // post: return minimum of contained elements
    T min() const{
        auto min = elem[0];
        for (auto x=elem+1; x<elem+size; ++x){
            if (*x<min) min = *x;
        }
        return min;
    }
    ...
}
```

```
vector<int> a(10); // ok
auto m = a.min(); // ok
vector<vector<int>> b(10); // ok;
auto n = b.min(); no match for operator< !
```

260

Generische Programmierung

Generische Komponenten sollten eher als **Generalisierung eines oder mehrerer Beispiele** entwickelt werden als durch Ableitung von Grundprinzipien.

```
using size_t=std::size_t;
template <typename T>
class vector{
public:
    vector ();
    vector(size_t s);
    ~vector ();
    vector(const vector &v);
    vector& operator=(const vector&v);
    vector (vector&& v);
    vector& operator=(vector&& v);
    T operator[] (size_t pos) const;
    T& operator[] (size_t pos);
    int length() const;
    T* begin();
    T* end();
    const T* begin() const;
    const T* end() const;
}
```

261

Funktionentemplates

- 1 Ersetze in der konkreten Implementation einer Funktion den Typ, der generisch werden soll durch einen Stellvertreter, z.B. **T**,
- 2 Stelle der Funktion das Konstrukt `template<typename T>`¹⁰ voran (ersetze **T** ggfs. durch den Stellvertreter).

¹⁰gleichbedeutend: `template<class T>`

262

Funktionentemplates

```
template <typename T>
void swap(T& x, T&y){
    T temp = x;
    x = y;
    y = temp;
}
```

Typen der Aufrufparameter determinieren die Version der Funktion, welche (kompiliert und) verwendet wird:

```
int x=5;
int y=6;
swap(x,y); // calls swap with T=int
```

263

Grenzen der Magie

```
template <typename T>
void swap(T& x, T&y){
    T temp = x;
    x = y;
    y = temp;
}
```

Eine unverträgliche Version der Funktion wird nicht erzeugt:

```
int x=5;
double y=6;
swap(x,y); // error: no matching function for ...
```

264

Praktisch!

```
// Output of an arbitrary container
template <typename T>
void output(const T& t){
    for (auto x: t)
        std::cout << x << " ";
    std::cout << "\n";
}

int main(){
    std::vector<int> v={1,2,3};
    output(v); // 1 2 3
}
```

265

Mächtig!

```
template <typename T> // square number
T sq(T x){
    return x*x;
}

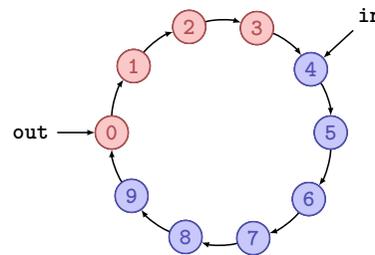
template <typename Container, typename F>
void apply(Container& c, F f){ // x ← f(x) forall x in c
    for(auto& x: c)
        x = f(x);
}

int main(){
    std::vector<int> v={1,2,3};
    apply(v,sq<int>);
    output(v); // 1 4 9
}
```

266

Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
class CircularBuffer{
    T buf[size] ;
    int in; int out;
public:
    CircularBuffer():in{0},out{0}{};
    bool empty(){
        return in == out;
    }
    bool full(){
        return (in + 1) % size == out;
    }
    void put(T x); // declaration
    T get(); // declaration
};
```

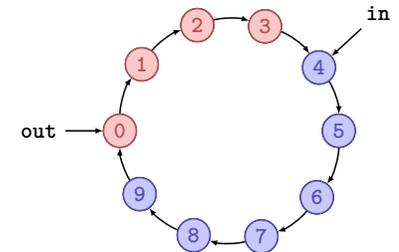


267

Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
void CircularBuffer<T,size>::put(T x){
    assert(!full());
    buf[in] = x;
    in = (in + 1) % size;
}

template <typename T, int size>
T CircularBuffer<T,size>::get(){
    assert(!empty());
    T x = buf[out];
    out = (out + 1) % size; ← Optimierungspotential, wenn size = 2^k.
    return x;
}
```



268

10. Sortieren III

Untere Schranken für das vergleichsbasierte Sortieren, Radix- und Bucketsort

269

Untere Schranke für das Sortieren

Bis hierher: Sortieren im schlechtesten Fall benötigt $\Omega(n \log n)$ Schritte.

Geht es besser? Nein:

Theorem

Vergleichsbasierte Sortierverfahren benötigen im schlechtesten Fall und im Mittel mindestens $\Omega(n \log n)$ Schlüsselvergleiche.

271

10.1 Untere Grenzen für Vergleichsbasiertes Sortieren

[Ottman/Widmayer, Kap. 2.8, Cormen et al, Kap. 8.1]

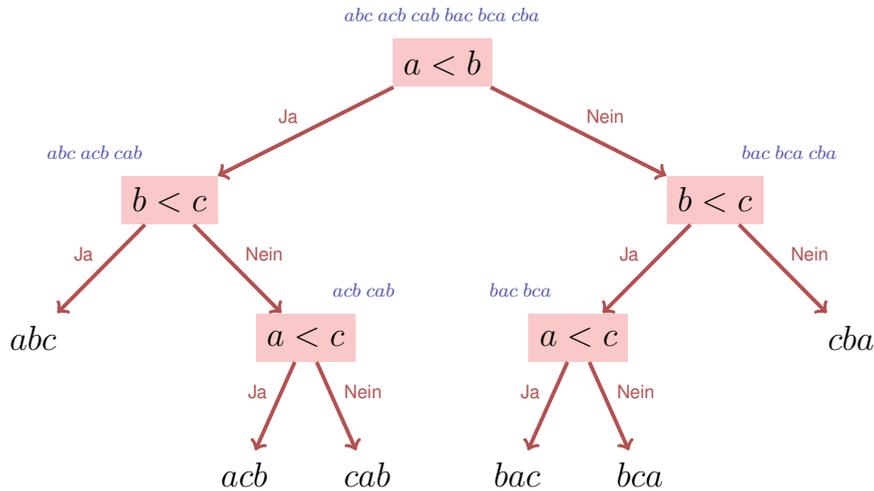
270

Vergleichsbasiertes Sortieren

- Algorithmus muss unter $n!$ vielen Anordnungsmöglichkeiten einer Folge $(A_i)_{i=1,\dots,n}$ die richtige identifizieren.
- Zu Beginn weiss der Algorithmus nichts.
- Betrachten den “Wissensgewinn” des Algorithmus als Entscheidungsbaum:
 - Knoten enthalten verbleibende Möglichkeiten
 - Kanten enthalten Entscheidungen

272

Entscheidungsbaum



Entscheidungsbaum

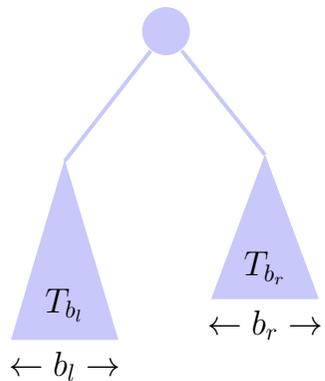
Die Höhe eines binären Baumes mit L Blättern ist mindestens $\log_2 L$. \Rightarrow Höhe des Entscheidungsbaumes $h \geq \log n! \in \Omega(n \log n)$.¹¹

Somit auch die Länge des längsten Pfades im Entscheidungsbaum $\in \Omega(n \log n)$.

Bleibt zu zeigen: mittlere Länge $M(n)$ eines Pfades $M(n) \in \Omega(n \log n)$.

¹¹ $\log n! \in \Theta(n \log n)$:
 $\log n! = \sum_{k=1}^n \log k \leq n \log n$.
 $\log n! = \sum_{k=1}^n \log k \geq \sum_{k=n/2}^n \log k \geq \frac{n}{2} \cdot \log \frac{n}{2}$.

Untere Schranke im Mittel



- Entscheidungsbaum T_n mit n Blättern, mittlere Tiefe eines Blatts $m(T_n)$
- Annahme: $m(T_n) \geq \log n$ nicht für alle n .
- Wähle kleinstes b mit $m(T_b) < \log n \Rightarrow b \geq 2$
- $b_l + b_r = b$, oBdA $b_l > 0$ und $b_r > 0 \Rightarrow b_l < b, b_r < b \Rightarrow m(T_{b_l}) \geq \log b_l$ und $m(T_{b_r}) \geq \log b_r$

Untere Schranke im Mittel

Mittlere Tiefe eines Blatts:

$$\begin{aligned}
 m(T_b) &= \frac{b_l}{b} (m(T_{b_l}) + 1) + \frac{b_r}{b} (m(T_{b_r}) + 1) \\
 &\geq \frac{1}{b} (b_l (\log b_l + 1) + b_r (\log b_r + 1)) = \frac{1}{b} (b_l \log 2b_l + b_r \log 2b_r) \\
 &\geq \frac{1}{b} (b \log b) = \log b.
 \end{aligned}$$

Widerspruch. ■

Die letzte Ungleichung gilt, da $f(x) = x \log x$ konvex ist und für eine konvexe Funktion gilt $f((x+y)/2) \leq 1/2 f(x) + 1/2 f(y)$ ($x = 2b_l, y = 2b_r$ einsetzen).¹² Einsetzen von $x = 2b_l, y = 2b_r$, und $b_l + b_r = b$.

¹²allgemein $f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)$ für $0 \leq \lambda \leq 1$.

10.2 Radixsort und Bucketsort

Radixsort, Bucketsort [Ottman/Widmayer, Kap. 2.5, Cormen et al, Kap. 8.3]

Radix Sort

Vergleichsbasierte Sortierverfahren: Schlüssel vergleichbar ($<$ oder $>$, $=$). Ansonsten keine Voraussetzung.

Andere Idee: nutze mehr Information über die Zusammensetzung der Schlüssel.

277

278

Annahmen

Annahme: Schlüssel darstellbar als Wörter aus einem Alphabet mit m Elementen.

Beispiele

$m = 10$	Dezimalzahlen	$183 = 183_{10}$
$m = 2$	Dualzahlen	101_2
$m = 16$	Hexadezimalzahlen	$A0_{16}$
$m = 26$	Wörter	“INFORMATIK”

m heisst die Wurzel (lateinisch *Radix*) der Darstellung.

279

Annahmen

- Schlüssel $=m$ -adische Zahlen mit gleicher Länge.
- Verfahren z zur Extraktion der k -ten Ziffer eines Schlüssels in $\mathcal{O}(1)$ Schritten.

Beispiel

$$\begin{aligned}z_{10}(0, 85) &= 5 \\z_{10}(1, 85) &= 8 \\z_{10}(2, 85) &= 0\end{aligned}$$

280

Radix-Exchange-Sort

Schlüssel mit Radix 2.

Beobachtung: Wenn $k \geq 0$,

$$z_2(i, x) = z_2(i, y) \text{ für alle } i > k$$

und

$$z_2(k, x) < z_2(k, y),$$

dann $x < y$.

281

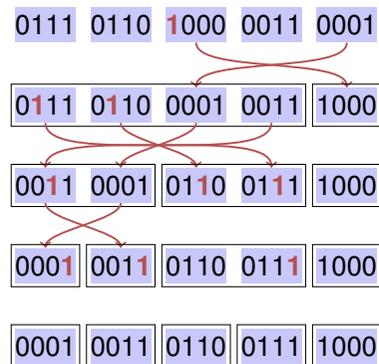
Radix-Exchange-Sort

Idee:

- Starte mit maximalem k .
- Binäres Aufteilen der Datensätze mit $z_2(k, \cdot) = 0$ vs. $z_2(k, \cdot) = 1$ wie bei Quicksort.
- $k \leftarrow k - 1$.

282

Radix-Exchange-Sort



283

Algorithmus RadixExchangeSort(A, l, r, b)

Input : Array A der Länge n , linke und rechte Grenze $1 \leq l \leq r \leq n$,
Bitposition b

Output : Array A , im Bereich $[l, r]$ nach Bits $[0, \dots, b]$ sortiert.

if $l > r$ **and** $b \geq 0$ **then**

$i \leftarrow l - 1$

$j \leftarrow r + 1$

repeat

repeat $i \leftarrow i + 1$ **until** $z_2(b, A[i]) = 1$ **and** $i \geq j$

repeat $j \leftarrow j + 1$ **until** $z_2(b, A[j]) = 0$ **and** $i \geq j$

if $i < j$ **then** swap($A[i], A[j]$)

until $i \geq j$

RadixExchangeSort($A, l, i - 1, b - 1$)

RadixExchangeSort($A, i, r, b - 1$)

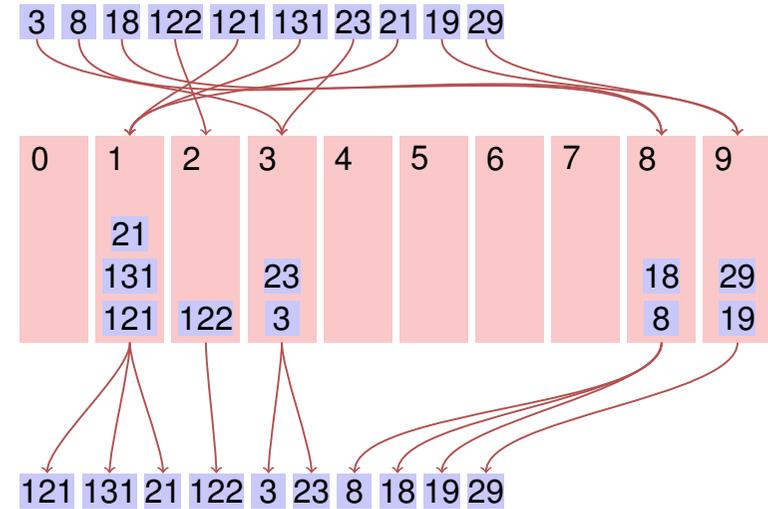
284

Analyse

RadixExchangeSort ist rekursiv mit maximaler Rekursionstiefe = maximaler Anzahl Ziffern p .

Laufzeit im schlechtesten Fall $\mathcal{O}(p \cdot n)$.

Bucket Sort (Sortieren durch Fachverteilen)

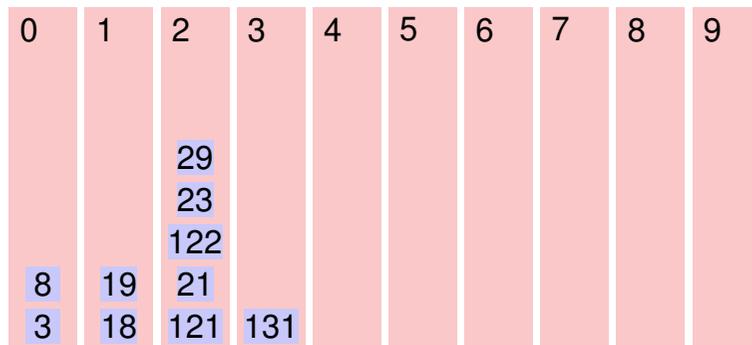


285

286

Bucket Sort (Sortieren durch Fachverteilen)

121 131 21 122 3 23 8 18 19 29

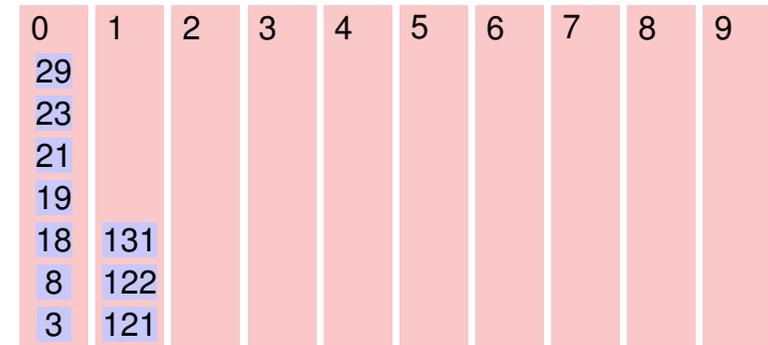


3 8 18 19 121 21 122 23 29

287

Bucket Sort (Sortieren durch Fachverteilen)

3 8 18 19 121 21 122 23 29



3 8 18 19 21 23 29 121 122 131 😊

288

Implementationsdetails

Bucketgrösse sehr unterschiedlich. Zwei Möglichkeiten

- Verkettete Liste für jede Ziffer.
- Ein Array der Länge n , Offsets für jede Ziffer in erstem Durchlauf bestimmen.

289

11. Elementare Datentypen

Abstrakte Datentypen Stapel, Warteschlange, Implementationsvarianten der verketteten Liste, amortisierte Analyse [Ottman/Widmayer, Kap. 1.5.1-1.5.2, Cormen et al, Kap. 10.1.-10.2,17.1-17.3]

290

Abstrakte Datentypen

Wir erinnern uns¹³ (Vorlesung Informatik I)

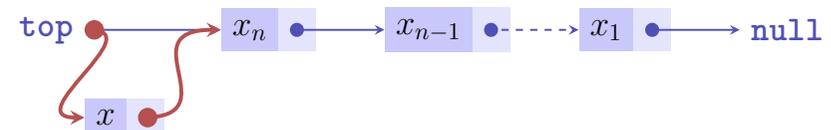
Ein *Stack* ist ein abstrakter Datentyp (ADT) mit Operationen

- $\text{push}(x, S)$: Legt Element x auf den Stapel S .
- $\text{pop}(S)$: Entfernt und liefert oberstes Element von S , oder null .
- $\text{top}(S)$: Liefert oberstes Element von S , oder null .
- $\text{isEmpty}(S)$: Liefert true wenn Stack leer, sonst false .
- $\text{emptyStack}()$: Liefert einen leeren Stack.

¹³hoffentlich

291

Implementation Push

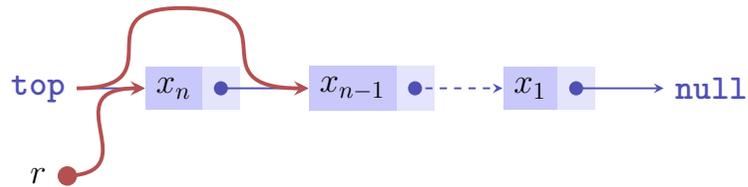


$\text{push}(x, S)$:

- 1 Erzeuge neues Listenelement mit x und Zeiger auf den Wert von top .
- 2 Setze top auf den Knoten mit x .

292

Implementation Pop



$\text{pop}(S)$:

- 1 Ist $\text{top}=\text{null}$, dann gib null zurück
- 2 Andernfalls merke Zeiger p von top in r .
- 3 Setze top auf $p.\text{next}$ und gib r zurück

293

Analyse

Jede der Operationen push , pop , top und isEmpty auf dem Stack ist in $\mathcal{O}(1)$ Schritten ausführbar.

294

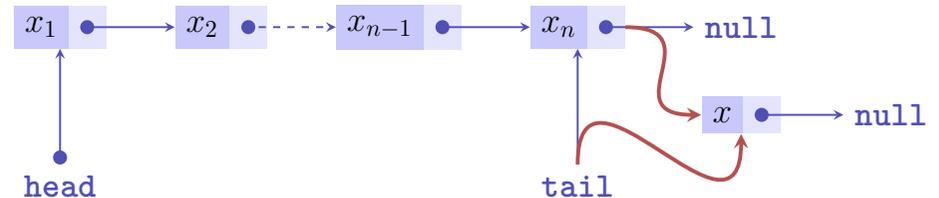
Queue (Schlange / Warteschlange / Fifo)

Queue ist ein ADT mit folgenden Operationen:

- $\text{enqueue}(x, Q)$: fügt x am Ende der Schlange an.
- $\text{dequeue}(Q)$: entfernt x vom Beginn der Schlange und gibt x zurück (null sonst.)
- $\text{head}(Q)$: liefert das Objekt am Beginn der Schlange zurück (null sonst.)
- $\text{isEmpty}(Q)$: liefert true wenn Queue leer, sonst false .
- $\text{emptyQueue}()$: liefert leere Queue zurück.

295

Implementation Queue

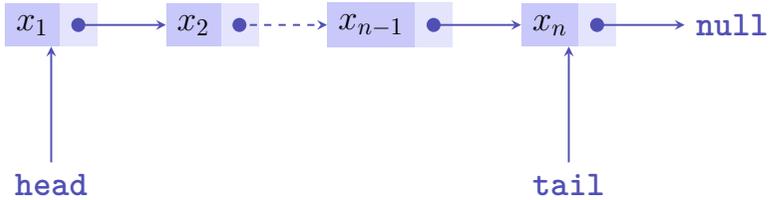


$\text{enqueue}(x, S)$:

- 1 Erzeuge neues Listenelement mit x und Zeiger auf null .
- 2 Wenn $\text{tail} \neq \text{null}$, setze tail.next auf den Knoten mit x .
- 3 Setze tail auf den Knoten mit x .
- 4 Ist $\text{head} = \text{null}$, dann setze head auf tail .

296

Invarianten!

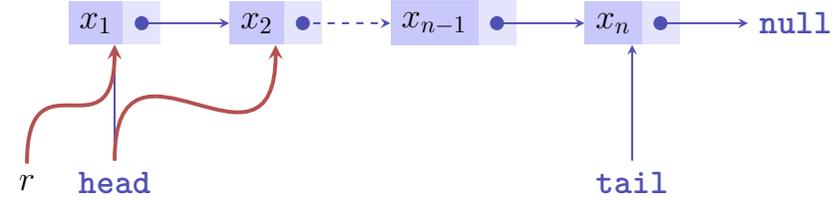


Mit dieser Implementation gilt

- entweder `head = tail = null`,
- oder `head = tail ≠ null` und `head.next = null`
- oder `head ≠ null` und `tail ≠ null` und `head ≠ tail` und `head.next ≠ null`.

297

Implementation Queue



`dequeue(S)`:

- 1 Merke Zeiger von `head` in r . Wenn $r = \text{null}$, gib r zurück.
- 2 Setze den Zeiger von `head` auf `head.next`.
- 3 Ist nun `head = null`, dann setze `tail` auf `null`.
- 4 Gib den Wert von r zurück.

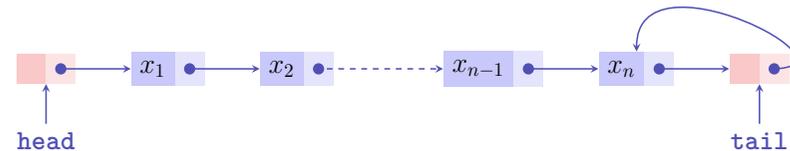
298

Analyse

Jede der Operationen `enqueue`, `dequeue`, `head` und `isEmpty` auf der Queue ist in $\mathcal{O}(1)$ Schritten ausführbar.

Implementationsvarianten verketteter Listen

Liste mit Dummy-Elementen (Sentinels).



Vorteil: Weniger Spezialfälle!

Variante davon: genauso, dabei Zeiger auf ein Element immer einfach indirekt gespeichert.

299

300

Implementationsvarianten verketteter Listen

Doppelt verkettete Liste



Übersicht

	enqueue	insert	delete	search	concat
(A)	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(n)$	$\Theta(n)$	$\Theta(n)$
(B)	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(n)$	$\Theta(n)$	$\Theta(1)$
(C)	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(n)$	$\Theta(1)$
(D)	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$	$\Theta(n)$	$\Theta(1)$

(A) = Einfach verkettet

(B) = Einfach verkettet, mit Dummyelement

(C) = Einfach verkettet, mit einfach indirekter Elementadressierung

(D) = Doppelt verkettet

301

302

Prioritätswarteschlange (Priority Queue)

Priority Queue = Warteschlange mit Prioritäten.

Operationen

- **insert** (x, p, Q): Füge Objekt x mit Priorität p ein.
- **extractMax** (Q): Entferne Objekt x mit höchster Priorität und liefere es.

Implementation Prioritätswarteschlange

Mit einem Max-Heap!

Also

- **insert** in Zeit $\mathcal{O}(\log n)$ und
- **extractMax** in Zeit $\mathcal{O}(\log n)$.

303

304

Multistack

Multistack unterstützt neben den oben genannten Stackoperationen noch

multipop(s, S): Entferne die $\min(\text{size}(S), k)$ zuletzt eingefügten Objekte und liefere diese zurück.

Implementation wie beim Stack. Laufzeit von **multipop** ist $\mathcal{O}(k)$.

305

Akademische Frage

Führen wir auf einem Stack mit n Elementen n mal **multipop(k, S)** aus, kostet das dann $\mathcal{O}(n^2)$?

Sicher richtig, denn jeder **multipop** kann Zeit $\mathcal{O}(n)$ haben.

Wie machen wir es besser?

306

Idee (Accounting)

Wir führen ein Kostenmodell ein:

- Aufruf von **push**: kostet 1 CHF und zusätzlich 1 CHF kommt aufs Bankkonto
- Aufruf von **pop**: kostet 1 CHF, wird durch Rückzahlung vom Bankkonto beglichen.

Kontostand wird niemals negativ. Also: maximale Kosten: Anzahl der **push** Operationen mal zwei.

307

Formalisierung

Bezeichne t_i die realen Kosten der Operation i . Potentialfunktion $\Phi_i \geq 0$ für den "Kontostand" nach i Operationen. $\Phi_i \geq \Phi_0 \forall i$.

Amortisierte Kosten der i -ten Operation:

$$a_i := t_i + \Phi_i - \Phi_{i-1}.$$

Es gilt

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n (t_i + \Phi_i - \Phi_{i-1}) = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) + \Phi_n - \Phi_0 \geq \sum_{i=1}^n t_i.$$

Ziel: Suche Potentialfunktion, die teure Operationen ausgleicht.

308

Beispiel Stack

Potentialfunktion $\Phi_i = \text{Anzahl Elemente auf dem Stack}$.

- **push**(x, S): Reale Kosten $t_i = 1$. $\Phi_i - \Phi_{i-1} = 1$. Amortisierte Kosten $a_i = 2$.
- **pop**(S): Reale Kosten $t_i = 1$. $\Phi_i - \Phi_{i-1} = -1$. Amortisierte Kosten $a_i = 0$.
- **multipop**(k, S): Reale Kosten $t_i = k$. $\Phi_i - \Phi_{i-1} = -k$. Amortisierte Kosten $a_i = 0$.

Alle Operationen haben *konstante amortisierte Kosten!* Im Durchschnitt hat also Multipop konstanten Zeitbedarf.

309

Beispiel binärer Zähler

Binärer Zähler mit k bits. Im schlimmsten Fall für jede Zähloperation maximal k Bitflips. Also $\mathcal{O}(n \cdot k)$ Bitflips für Zählen von 1 bis n . Geht das besser?

Reale Kosten $t_i = \text{Anzahl Bitwechsel von 0 nach 1 plus Anzahl Bitwechsel von 1 nach 0}$.

$$\dots 0 \underbrace{1111111}_l \text{ Einsen} + 1 = \dots 1 \underbrace{0000000}_l \text{ Nullen}.$$
$$\Rightarrow t_i = l + 1$$

310

Beispiel binärer Zähler

$$\dots 0 \underbrace{1111111}_l \text{ Einsen} + 1 = \dots 1 \underbrace{0000000}_l \text{ Nullen}$$

Potentialfunktion Φ_i : Anzahl der 1-Bits von x_i .

$$\Rightarrow \Phi_i - \Phi_{i-1} = 1 - l,$$
$$\Rightarrow a_i = t_i + \Phi_i - \Phi_{i-1} = l + 1 + (1 - l) = 2.$$

Amortisiert konstante Kosten für eine Zähloperation. 😊

311

12. Wörterbücher

Wörterbuch, Selbstordnung, Implementation Wörterbuch mit Array / Liste / Skipliste. [Ottman/Widmayer, Kap. 3.3,1.7, Cormen et al, Kap. Problem 17-5]

312

Wörterbuch (Dictionary)

ADT zur Verwaltung von Schlüsseln aus \mathcal{K} mit Operationen

- **insert**(k, D): Hinzufügen von $k \in \mathcal{K}$ in Wörterbuch D . Bereits vorhanden \Rightarrow Fehlermeldung.
- **delete**(k, D): Löschen von k aus dem Wörterbuch D . Nicht vorhanden \Rightarrow Fehlermeldung.
- **search**(k, D): Liefert **true** wenn $k \in D$, sonst **false**.

313

Idee

Implementiere Wörterbuch als sortiertes Array.

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

Suchen	$\mathcal{O}(\log n)$	😊
Einfügen	$\mathcal{O}(n)$	😞
Löschen	$\mathcal{O}(n)$	😞

314

Andere Idee

Implementiere Wörterbuch als verkettete Liste

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

Suchen	$\mathcal{O}(n)$	😞
Einfügen	$\mathcal{O}(1)$ ¹⁴	😊
Löschen	$\mathcal{O}(n)$	😞

¹⁴Unter der Voraussetzung, dass wir die Existenz nicht prüfen wollen.

315

Selbstanordnung

Problematisch bei der Verwendung verketteter Listen: lineare Suchzeit

Idee: Versuche, die Listenelemente so anzuordnen, dass Zugriffe über die Zeit hinweg schneller möglich sind

Zum Beispiel

- Transpose: Bei jedem Zugriff auf einen Schlüssel wird dieser um eine Position nach vorne bewegt.
- Move-to-Front (MTF): Bei jedem Zugriff auf einen Schlüssel wird dieser ganz nach vorne bewegt.

316

Transpose

Transpose:

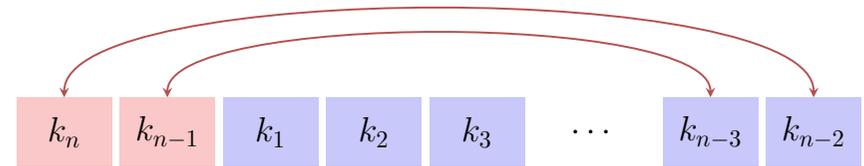


Worst case: n Wechselnde Zugriffe auf k_{n-1} und k_n . Laufzeit: $\Theta(n^2)$

317

Move-to-Front

Move-to-Front:



n Wechselnde Zugriffe auf k_{n-1} und k_n . Laufzeit: $\Theta(n)$

Man kann auch hier Folge mit quadratischer Laufzeit angeben, z.B. immer das letzte Element. Aber dafür ist keine offensichtliche Strategie bekannt, die viel besser sein könnte als MTF.

318

Analyse

Vergleichen MTF mit dem bestmöglichen Konkurrenten (Algorithmus) A. Wie viel besser kann A sein?

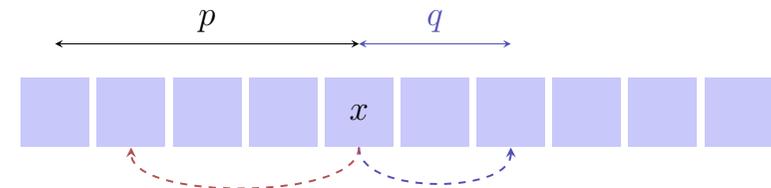
Annahme: MTF und A dürfen jeweils nur das zugeworfene Element x verschieben. MTF und A starten mit derselben Liste. M_k und A_k bezeichnen die Liste nach dem k -ten Schritt. $M_0 = A_0$.

319

Analyse

Kosten:

- Zugriff auf x : Position p von x in der Liste.
- Keine weiteren Kosten, wenn x **vor** p verschoben wird.
- Weitere Kosten q für jedes Element, das x von p aus nach **hinten** verschoben wird.



320

Amortisierte Analyse

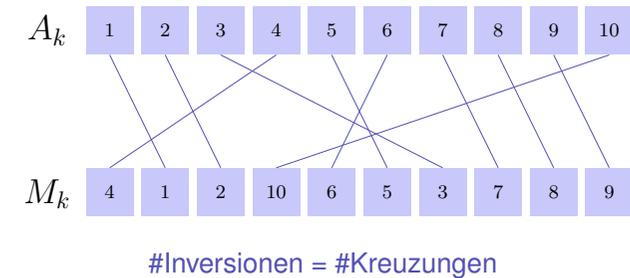
Sei eine beliebige Folge von Suchanfragen gegeben und seien $G_k^{(M)}$ und $G_k^{(A)}$ jeweils die Kosten im Schritt k für Move-to-Front und A. Suchen Abschätzung für $\sum_k G_k^{(M)}$ im Vergleich zu $\sum_k G_k^{(A)}$.

⇒ Amortisierte Analyse mit Potentialfunktion Φ .

Potentialfunktion

Potentialfunktion $\Phi =$ Anzahl der Inversionen von A gegen MTF.

Inversion = Paar x, y so dass für die Positionen von x und y
 $p^{(A)}(x) < p^{(A)}(y) \wedge p^{(M)}(x) > p^{(M)}(y)$ oder
 $p^{(A)}(x) > p^{(A)}(y) \wedge p^{(M)}(x) < p^{(M)}(y)$

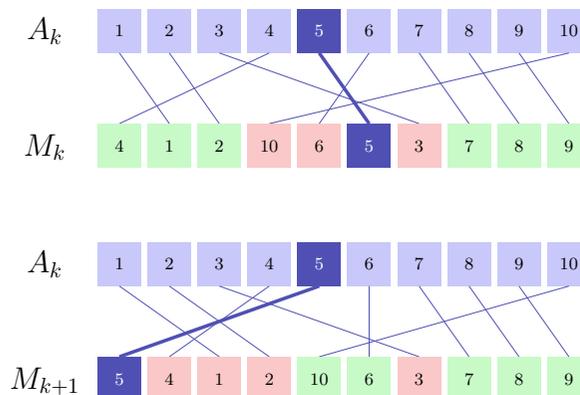


321

322

Abschätzung der Potentialfunktion: MTF

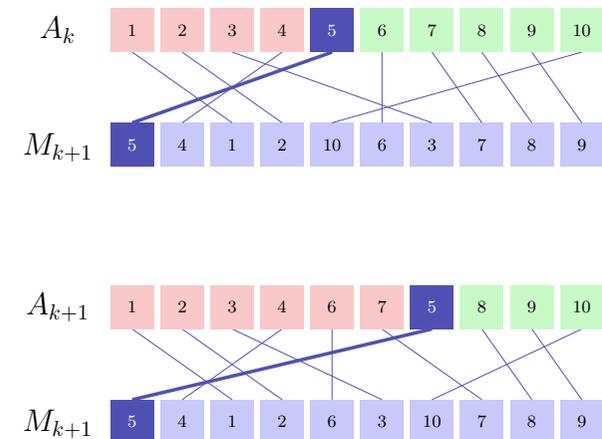
- Element i an Position $p_i := p^{(M)}(i)$.
- Zugriffskosten $C_k^{(M)} = p_i$.
- x_i : Anzahl Elemente, die in M vor p_i und in A nach i stehen.
- MTF löst x_i Inversionen auf.
- $p_i - x_i - 1$: Anzahl Elemente, die in M vor p_i und in A vor i stehen.
- MTF erzeugt $p_i - 1 - x_i$ Inversionen.



323

Abschätzung der Potentialfunktion: A

- (oBdA) Element i an Position i .
- $X_k^{(A)}$: Anzahl Verschiebungen nach hinten (sonst 0).
- Zugriffskosten für i : $C_k^{(A)} = i$
- A erhöht die Anzahl Inversionen um $X_k^{(A)}$.



324

Abschätzung

$$\Phi_{k+1} - \Phi_k \leq -x_i + (p_i - 1 - x_i) + X_k^{(A)}$$

Amortisierte Kosten von MTF im k -ten Schritt:

$$\begin{aligned} a_k^{(M)} &= C_k^{(M)} + \Phi_{k+1} - \Phi_k \\ &\leq p_i - x_i + (p_i - 1 - x_i) + X_k^{(A)} \\ &= (p_i - x_i) + (p_i - x_i) - 1 + X_k^{(A)} \\ &\leq C_k^{(A)} + C_k^{(A)} - 1 + X_k^{(A)}. \end{aligned}$$

325

Abschätzung

Kosten Summiert

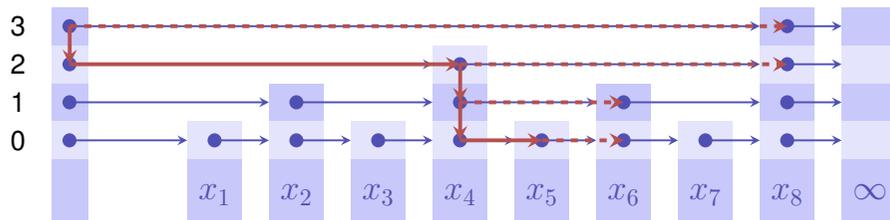
$$\begin{aligned} \sum_k G_k^{(M)} &= \sum_k C_k^{(M)} \leq \sum_k a_k^{(M)} \leq \sum_k 2 \cdot C_k^{(A)} - 1 + X_k^{(A)} \\ &\leq \sum_k 2 \cdot C_k^{(A)} + X_k^{(A)} \leq 2 \cdot \sum_k C_k^{(A)} + X_k^{(A)} \\ &= 2 \cdot \sum_k G_k^{(A)} \end{aligned}$$

MTF führt im schlechtesten Fall höchstens doppelt so viele Operationen aus wie eine optimale Strategie.

326

Cooler Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste



$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_9.$$

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel x mit $x_5 < x < x_6$.

Analyse Perfekte Skipliste (schlechtester Fall)

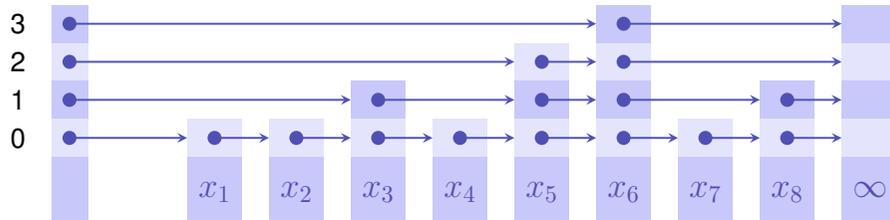
Suchen in $\mathcal{O}(\log n)$. Einfügen in $\mathcal{O}(n)$.

327

328

Randomisierte Skipliste

Idee: Füge jeweils einen Knoten mit zufälliger Höhe H ein, wobei $\mathbb{P}(H = i) = \frac{1}{2^{i+1}}$.



Analyse Randomisierte Skipliste

Theorem

Die Anzahl an erwarteten Elementaroperationen für Suchen, Einfügen und Löschen eines Elements in einer randomisierten Skipliste ist $\mathcal{O}(\log n)$.

Der längliche Beweis, welcher im Rahmen dieser Vorlesung nicht geführt wird, betrachtet die Länge eines Weges von einem gesuchten Knoten zurück zum Startpunkt im höchsten Level.

329

330

13. C++ vertieft (III): Funktoren und Lambda

13.1 Nachträge zum vorigen C++ Kapitel

331

332

Nachtrag zur Move-Semantik

```
// nonsense implementation of a "vector" for demonstration purposes
class vec{
public:
    vec () {
        std::cout << "default constructor\n";}
    vec (const vec&) {
        std::cout << "copy constructor\n";}
    vec& operator = (const vec&) {
        std::cout << "copy assignment\n"; return *this;}
    ~vec() {}
};
```

333

Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe
default constructor
copy constructor
copy constructor
copy constructor
copy assignment

4 Kopien des Vektors

334

Nachtrag zur Move-Semantik

```
// nonsense implementation of a "vector" for demonstration purposes
class vec{
public:
    vec () { std::cout << "default constructor\n";}
    vec (const vec&) { std::cout << "copy constructor\n";}
    vec& operator = (const vec&) {
        std::cout << "copy assignment\n"; return *this;}
    ~vec() {}
    // new: move constructor and assignment
    vec (vec&&) {
        std::cout << "move constructor\n";}
    vec& operator = (vec&&) {
        std::cout << "move assignment\n"; return *this;}
};
```

335

Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe
default constructor
copy constructor
copy constructor
copy constructor
move assignment

3 Kopien des Vektors

336

Wie viele Kopien?

```
vec operator + (vec a, const vec& b){
    // add b to a
    return a;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe
default constructor
copy constructor
move constructor
move constructor
move constructor
move assignment

1 Kopie des Vektors

Erklärung: Move-Semantik kommt zum Einsatz, wenn ein x-wert (expired) zugewiesen wird. R-Wert-Rückgaben von Funktionen sind x-Werte.

http://en.cppreference.com/w/cpp/language/value_category

337

Wie viele Kopien

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = a;
    a=b;
    b=tmp;
}

int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

Ausgabe
default constructor
default constructor
copy constructor
copy assignment
copy assignment

3 Kopien des Vektors

338

X-Werte erzwingen

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = std::move(a);
    a=std::move(b);
    b=std::move(tmp);
}

int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

Ausgabe
default constructor
default constructor
move constructor
move assignment
move assignment

0 Kopien des Vektors

Erklärung: Mit `std::move` kann man einen L-Wert Ausdruck zu einem X-Wert (genauer: zu einer R-Wert Referenz) machen. Dann kommt wieder Move-Semantik zum Einsatz. <http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/move>

339

13.2 Funktoren und Lambda-Expressions

340

Funktoren: Motivierung

Ein simpler Ausgabefilter

```
template <typename T, typename function>
void filter(const T& collection, function f){
    for (const auto& x: collection)
        if (f(x)) std::cout << x << " ";
        std::cout << "\n";
}
```

341

Funktoren: Motivierung

```
template <typename T, typename function>
void filter(const T& collection, function f);
```

```
template <typename T>
bool even(T x){
    return x % 2 == 0;
}
```

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
filter(a,even<int>); // output: 2,4,6,16
```

342

Funktor: Objekt mit überladenem Operator ()

```
class LargerThan{
    int value; // state
public:
    LargerThan(int x):value{x}{};

    bool operator() (int par){
        return par > value;
    }
};
```

Funktor ist ein aufrufbares Objekt. Kann verstanden werden als Funktion mit Zustand.

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;
filter(a,LargerThan(value)); // 9,11,16,19
```

343

Funktor: Objekt mit überladenem Operator ()

```
template <typename T>
class LargerThan{
    T value;
public:
    LargerThan(T x):value{x}{};

    bool operator() (T par){
        return par > value;
    }
};
```

(geht natürlich auch mit Template)

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;
filter(a,LargerThan<int>(value)); // 9,11,16,19
```

344

Dasselbe mit Lambda-Expression

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;

filter(a, [value](int x) {return x>value;} );
```

345

Summe aller Elemente - klassisch

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int sum = 0;
for (auto x: a)
    sum += x;
std::cout << sum << "\n"; // 83
```

346

Summe aller Elemente - mit Funktor

```
template <typename T>
struct Sum{
    T & value = 0;
    Sum (T& v): value{v} {}

    void operator() (T par){
        value += par;
    }
};

std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int s=0;
Sum<int> sum(s);
sum = std::for_each(a.begin(), a.end(), sum);
std::cout << s << "\n"; // 83
```

347

Summe aller Elemente - mit Λ

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int s=0;

std::for_each(a.begin(), a.end(), [&s] (int x) {s += x;} );

std::cout << s << "\n";
```

348

Sortieren, mal anders

```
// pre: i >= 0
// post: returns sum of digits of i
int q(int i){
    int res =0;
    for(;i>0;i/=10)
        res += i % 10;
    return res;
}

std::vector<int> v {10,12,9,7,28,22,14};
std::sort (v.begin(), v.end(),
    [] (int i, int j) { return q(i) < q(j);}
);
```

Jetzt $v = 10, 12, 22, 14, 7, 9, 28$ (sortiert nach Quersumme)

349

Lambda-Expressions im Detail

```
[value] (int x) ->bool {return x>value;}
      Capture Parameter Rückgabe- Anweisung
                        typ
```

350

Closure

```
[value] (int x) ->bool {return x>value;}
```

- Lambda-Expressions evaluieren zu einem temporären Objekt – einer closure
- Die closure erhält den Ausführungskontext der Funktion, also die captured Objekte.
- Lambda-Expressions können als Funktoren implementiert sein.

351

Simple Lambda-Expression

```
[] () ->void {std::cout << "Hello World";}
```

Aufruf:

```
[] () ->void {std::cout << "Hello World";}();
```

352

Minimale Lambda-Expression

`[] {}`

- Rückgabetyyp kann inferiert werden, wenn kein oder nur ein return:

```
[] () {std::cout << "Hello World";}
```

- Wenn keine Parameter und keine Rückgabe, kann () weggelassen werden

```
[] {std::cout << "Hello World";}
```

- [...] kann nie weggelassen werden.

353

Beispiele

```
[] (int x, int y) {std::cout << x * y;} (4,5);
```

Output: 20

354

Beispiele

```
int k = 8;  
[] (int& v) {v += v;} (k);  
std::cout << k;
```

Output: 16

355

Beispiele

```
int k = 8;  
[] (int v) {v += v;} (k);  
std::cout << k;
```

Output: 8

356

Capture – Lambdas

Für Lambda-Expressions bestimmt die capture-Liste über den zugreifbaren Teil des Kontextes

Syntax:

- `[x]`: Zugriff auf kopierten Wert von x (nur lesend)
- `&x`: Zugriff zur Referenz von x
- `&x, y`: Zugriff zur Referenz von x und zum kopierten Wert von y
- `&`: Default-Referenz-Zugriff auf alle Objekte im Scope der Lambda-Expression
- `=`: Default-Werte-Zugriff auf alle Objekte im Kontext der Lambda-Expression

357

Capture – Lambdas

```
int elements=0;
int sum=0;
std::for_each(v.begin(), v.end(),
    [&] (int k) {sum += k; elements++;} // capture all by reference
)
```

358

Capture – Lambdas

```
template <typename T>
void sequence(vector<int> & v, T done){
    int i=0;
    while (!done()) v.push_back(i++);
}

vector<int> s;
sequence(s, [&] {return s.size() >= 5;} )
```

jetzt v = 0 1 2 3 4

Die capture liste bezieht sich auf den Kontext der Lambda Expression

359

Capture – Lambdas

Wann wird der Wert gelesen?

```
int v = 42;
auto func = [=] {std::cout << v << "\n"};
v = 7;
func();
```

Ausgabe: 42

Werte werden bei der Definition der (temporären) Lambda-Expression zugewiesen.

360

Capture – Lambdas

(Warum) funktioniert das?

```
class Limited{
    int limit = 10;
public:
    // count entries smaller than limit
    int count(const std::vector<int>& a){
        int c = 0;
        std::for_each(a.begin(), a.end(),
            [=,&c] (int x) {if (x < limit) c++;}
        );
        return c;
    }
};
```

Der `this` pointer wird per default implizit kopiert

361

Capture – Lambdas

```
struct mutant{
    int i = 0;
    void do(){ [=] {i=42;}();}
};
```

```
mutant m;
m.do();
std::cout << m.i;
```

Ausgabe: 42

Der `this pointer` wird per default implizit kopiert

362

Lambda Ausdrücke sind Funktoren

```
[x, &y] () {y = x;}
```

kann implementiert werden als

```
unnamed {x,y};
```

mit

```
class unnamed {
    int x; int& y;
    unnamed (int x_, int& y_) : x (x_), y (y_) {}
    void operator () () {y = x;}};
};
```

363

Lambda Ausdrücke sind Funktoren

```
[=] () {return x + y;}
```

kann implementiert werden als

```
unnamed {x,y};
```

mit

```
class unnamed {
    int x; int y;
    unnamed (int x_, int y_) : x (x_), y (y_) {}
    int operator () () {return x + y;}};
};
```

364

Polymorphic Function Wrapper `std::function`

```
#include <functional>
```

```
int k= 8;  
std::function<int(int)> f;  
f = [k](int i){ return i+k; };  
std::cout << f(8); // 16
```

Kann verwendet werden, um Lambda-Expressions zu speichern.

Andere Beispiele

```
std::function<int(int, int)>;  
std::function<void(double)> ...
```

<http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/functional/function>

365

Motivation

Ziel: Tabelle aller n Studenten dieser Vorlesung

Anforderung: **Schneller Zugriff per Name**

367

14. Hashing

Hash Tabellen, Geburtstagsparadoxon, Hashfunktionen, Perfektes und universelles Hashing, Kollisionsauflösung durch Verkettung, offenes Hashing, Sondieren

[Ottman/Widmayer, Kap. 4.1-4.3.2, 4.3.4, Cormen et al, Kap. 11-11.4]

366

Naive Ideen

Zuordnung Name $s = s_1s_2 \dots s_{l_s}$ zu Schlüssel

$$k(s) = \sum_{i=1}^{l_s} s_i \cdot b^i$$

b gross genug, so dass verschiedene Namen verschiedene Schlüssel erhalten.

Speichere jeden Datensatz an seinem Index in einem grossen Array.

Beispiel, mit $b = 100$. Ascii-Werte s_i .

Anna \mapsto 71111065

Jacqueline \mapsto 102110609021813999774

Unrealistisch: erfordert zu grosse Arrays.

368

Bessere Idee?

Allokation eines Arrays der Länge m ($m > n$).

Zuordnung Name s zu

$$k_m(s) = \left(\sum_{i=1}^{l_s} s_i \cdot b^i \right) \bmod m.$$

Verschiedene Namen können nun denselben Schlüssel erhalten ("Kollision"). Und dann?

369

Abschätzung

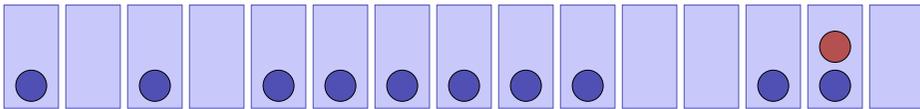
Vielleicht passieren Kollisionen ja fast nie. Wir schätzen ab ...

370

Abschätzung

Annahme: m Urnen, n Kugeln (oBdA $n \leq m$).

n Kugeln werden gleichverteilt in Urnen gelegt.



Wie gross ist die Kollisionswahrscheinlichkeit?

Sehr verwandte Frage: Bei wie vielen Personen (n) ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei am selben Tag ($m = 365$) Geburtstag haben grösser als 50%?

371

Abschätzung

$$\mathbb{P}(\text{keine Kollision}) = \frac{m}{m} \cdot \frac{m-1}{m} \cdot \dots \cdot \frac{m-n+1}{m} = \frac{m!}{(m-n)! \cdot m^n}.$$

Sei $a \ll m$. Mit $e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots$ approximiere $1 - \frac{a}{m} \approx e^{-\frac{a}{m}}$.

Damit:

$$1 \cdot \left(1 - \frac{1}{m}\right) \cdot \left(1 - \frac{2}{m}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{n-1}{m}\right) \approx e^{-\frac{1+\dots+n-1}{m}} = e^{-\frac{n(n-1)}{2m}}.$$

Es ergibt sich

$$\mathbb{P}(\text{Kollision}) = 1 - e^{-\frac{n(n-1)}{2m}}.$$

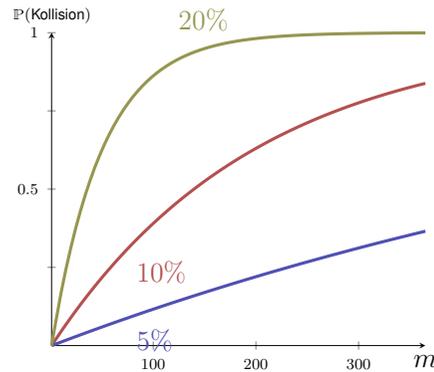
Auflösung zum Geburtstagsparadoxon: Bei 23 Leuten ist die Wahrscheinlichkeit für Geburtstagskollision 50.7%. Zahl stammt von der leicht besseren Approximation via Stirling Formel.

372

Mit Füllgrad

Mit Füllgrad $\alpha := n/m$ ergibt sich (weiter vereinfacht)

$$\mathbb{P}(\text{Kollision}) \approx 1 - e^{-\alpha^2 \cdot \frac{m}{2}}.$$



Der maximale Füllgrad sollte sich an n^2/m orientieren.

373

Nomenklatur

Hashfunktion h : Abbildung aus der Menge der Schlüssel \mathcal{K} auf die Indexmenge $\{0, 1, \dots, m-1\}$ eines Arrays (**Hashtabelle**).

$$h : \mathcal{K} \rightarrow \{0, 1, \dots, m-1\}.$$

Meist $|\mathcal{K}| \gg m$. Es gibt also $k_1, k_2 \in \mathcal{K}$ mit $h(k_1) = h(k_2)$ (**Kollision**).

Eine Hashfunktion sollte die Menge der Schlüssel möglichst gleichmässig auf die Positionen der Hashtabelle verteilen.

374

Beispiele guter Hashfunktionen

- $h(k) = k \bmod m$, m Primzahl
- $h(k) = \lfloor m(k \cdot r - \lfloor k \cdot r \rfloor) \rfloor$, r irrational, besonders gut: $r = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$.

375

Perfektes Hashing

Ist im Vorhinein die Menge der verwendeten Schlüssel bekannt? Dann kann die Hashfunktion perfekt gewählt werden. Die praktische Konstruktion ist nicht-trivial.

Beispiel: Tabelle der Schlüsselwörter in einem Compiler.

376

Universelles Hashing

- $|\mathcal{K}| > m \Rightarrow$ Menge "ähnlicher Schlüssel" kann immer so gewählt sein, so dass überdurchschnittlich viele Kollisionen entstehen.
- Unmöglich, einzelne für alle Fälle "beste" Hashfunktion auszuwählen.
- Jedoch möglich¹⁵: randomisieren!

Universelle Hashklasse $\mathcal{H} \subseteq \{h : \mathcal{K} \rightarrow \{0, 1, \dots, m-1\}\}$ ist eine Familie von Hashfunktionen, so dass

$$\forall k_1 \neq k_2 \in \mathcal{K} : |\{h \in \mathcal{H} | h(k_1) = h(k_2)\}| \leq \frac{1}{m} |\mathcal{H}|.$$

¹⁵Ähnlich wie beim Quicksort

377

Universelles Hashing

Theorem

Eine aus einer universellen Klasse \mathcal{H} von Hashfunktionen zufällig gewählte Funktion $h \in \mathcal{H}$ verteilt im Erwartungswert eine beliebige Folge von Schlüssel aus \mathcal{K} so gleichmässig wie nur möglich auf die verfügbaren Plätze.

378

Universelles Hashing

Vorbemerkung zum Beweis des Theorems.

Definiere mit $x, y \in \mathcal{K}$, $h \in \mathcal{H}$, $Y \subseteq \mathcal{K}$:

$$\delta(x, y, h) = \begin{cases} 1, & \text{falls } h(x) = h(y), x \neq y \\ 0, & \text{sonst,} \end{cases}$$
$$\delta(x, Y, h) = \sum_{y \in Y} \delta(x, y, h),$$
$$\delta(x, y, \mathcal{H}) = \sum_{h \in \mathcal{H}} \delta(x, y, h).$$

\mathcal{H} ist universell, wenn für alle $x, y \in \mathcal{K}$, $x \neq y$: $\delta(x, y, \mathcal{H}) \leq |\mathcal{H}|/m$.

379

Universelles Hashing

Beweis des Theorems

$S \subseteq \mathcal{K}$: bereits gespeicherte Schlüssel. x wird hinzugefügt:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_{\mathcal{H}}(\delta(x, S, h)) &= \sum_{h \in \mathcal{H}} \delta(x, S, h) / |\mathcal{H}| \\ &= \frac{1}{|\mathcal{H}|} \sum_{h \in \mathcal{H}} \sum_{y \in S} \delta(x, y, h) = \frac{1}{|\mathcal{H}|} \sum_{y \in S} \sum_{h \in \mathcal{H}} \delta(x, y, h) \\ &= \frac{1}{|\mathcal{H}|} \sum_{y \in S} \delta(x, y, \mathcal{H}) \\ &\leq \frac{1}{|\mathcal{H}|} \sum_{y \in S} |\mathcal{H}|/m = \frac{|S|}{m}. \end{aligned}$$

380

Universelles Hashing ist relevant!

Sei p Primzahl und $\mathcal{K} = \{0, \dots, p-1\}$. Mit $a \in \mathcal{K} \setminus \{0\}$, $b \in \mathcal{K}$ definiere

$$h_{ab} : \mathcal{K} \rightarrow \{0, \dots, m-1\}, h_{ab}(x) = ((ax + b) \bmod p) \bmod m.$$

Dann gilt

Theorem

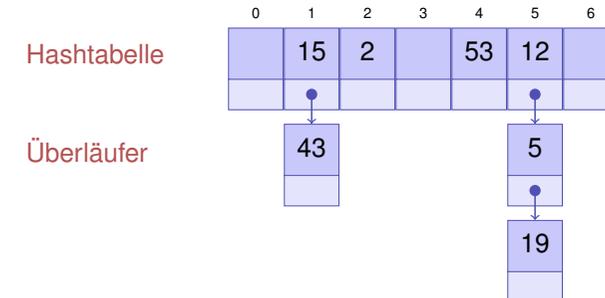
Die Klasse $\mathcal{H} = \{h_{ab} \mid a, b \in \mathcal{K}, a \neq 0\}$ ist eine universelle Klasse von Hashfunktionen.

Behandlung von Kollisionen

Beispiel $m = 7$, $\mathcal{K} = \{0, \dots, 500\}$, $h(k) = k \bmod m$.

Schlüssel 12, 53, 5, 15, 2, 19, 43

Verkettung der Überläufer



381

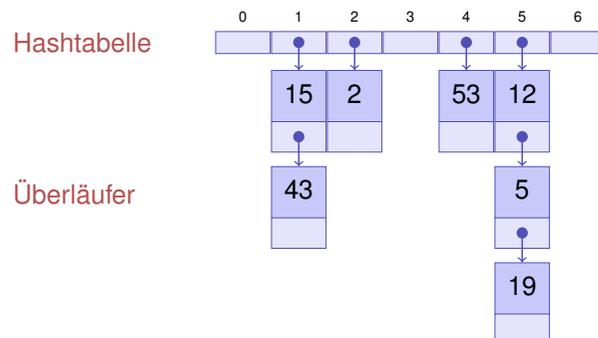
382

Behandlung von Kollisionen

Beispiel $m = 7$, $\mathcal{K} = \{0, \dots, 500\}$, $h(k) = k \bmod m$.

Schlüssel 12, 53, 5, 15, 2, 19, 43

Direkte Verkettung der Überläufer



383

Algorithmen zum Hashing mit Verkettung

- **search**(k) Durchsuche Liste an Position $h(k)$ nach k . Gib wahr zurück, wenn gefunden, sonst falsch.
- **insert**(k) Prüfe ob k in Liste an Position $h(k)$. Falls nein, füge k am Ende der Liste ein.
- **delete**(k) Durchsuche die Liste an Position $h(k)$ nach k . Wenn Suche erfolgreich, entferne das entsprechende Listenelement.

384

Analyse (direkt verkettete Liste)

- 1 Erfolglose Suche. Durchschnittliche Listenlänge ist $\alpha = \frac{n}{m}$. Liste muss ganz durchlaufen werden.

⇒ Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C'_n = \alpha.$$

- 2 Erfolgreiche Suche. Betrachten die Einfügehistorie: Schlüssel j sieht durchschnittliche Listenlänge $(j - 1)/m$.

⇒ Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 + (j - 1)/m) = 1 + \frac{1}{n} \frac{n(n - 1)}{2m} \approx 1 + \frac{\alpha}{2}.$$

385

Vor und Nachteile

Vorteile der Strategie:

- Belegungsfaktoren $\alpha > 1$ möglich
- Entfernen von Schlüsseln einfach

Nachteile

- Speicherverbrauch der Verkettung

386

Offene Hashverfahren

Speichere die Überläufer direkt in der Hashtabelle mit einer **Sondierfunktion** $s(j, k)$ ($0 \leq j < m, k \in \mathcal{K}$)

Tabellenposition des Schlüssels entlang der **Sondierfolge**

$$S(k) := (h(k) - s(0, k) \bmod m, \dots, (h(k) - (m - 1, k)) \bmod m$$

387

Algorithmen zum Open Addressing

- **search**(k) Durchlaufe Tabelleneinträge gemäss $S(k)$. Wird k gefunden, gib **true** zurück. Ist die Sondierfolge zu Ende oder eine leere Position erreicht, gib **false** zurück.
- **insert**(k) Suche k in der Tabelle gemäss $S(k)$. Ist k nicht vorhanden, füge k an die erste freie Position in der Sondierfolge ein.¹⁶
- **delete**(k) Suche k in der Tabelle gemäss $S(k)$. Wenn k gefunden, markiere Position von k mit einem **deleted**-flag.

¹⁶Als frei gilt auch eine nicht leere Position mit **deleted** flag.

388

Lineares Sondieren

$$s(j, k) = j \Rightarrow$$

$$S(k) = (h(k) \bmod m, (h(k) - 1) \bmod m, \dots, (h(k) + 1) \bmod m)$$

Beispiel $m = 7, \mathcal{K} = \{0, \dots, 500\}, h(k) = k \bmod m$.

Schlüssel 12, 53, 5, 15, 2, 19

0	1	2	3	4	5	6
19	15	2	5	53	12	

389

Analyse Lineares Sondieren (ohne Herleitung)

- 1 Erfolglose Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C'_n \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{(1 - \alpha)^2} \right)$$

- 2 Erfolgreiche Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C_n \approx \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{1 - \alpha} \right).$$

390

Diskussion

Beispiel $\alpha = 0.95$

Erfolglose Suche betrachtet im Durchschnitt 200 Tabelleneinträge!

❓ Nachteile des Verfahrens?

⚠️ **Primäre Häufung:** Ähnliche Hashadressen haben ähnliche Sondierungsfolgen \Rightarrow lange zusammenhängende belegte Bereiche.

391

Quadratisches Sondieren

$$s(j, k) = \lceil j/2 \rceil^2 (-1)^j$$

$$S(k) = (h(k) + 1, h(k) - 1, h(k) + 4, h(k) - 4, \dots) \bmod m$$

Beispiel $m = 7, \mathcal{K} = \{0, \dots, 500\}, h(k) = k \bmod m$.

Schlüssel 12, 53, 5, 15, 2, 19

0	1	2	3	4	5	6
19	15	2		53	12	5

392

Analyse Quadratisches Sondieren (ohne Herleitung)

- 1 Erfolgreiche Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C'_n \approx \frac{1}{1-\alpha} - \alpha + \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$$

- 2 Erfolgreiche Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C_n \approx 1 + \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right) - \frac{\alpha}{2}$$

393

Diskussion

Beispiel $\alpha = 0.95$

Erfolgreiche Suche betrachtet im Durchschnitt 22 Tabelleneinträge

? Nachteile des Verfahrens?

! **Sekundäre Häufung:** Synonyme k und k' (mit $h(k) = h(k')$) durchlaufen dieselbe Sondierungsfolge.

394

Double Hashing

Zwei Hashfunktionen $h(k)$ und $h'(k)$. $s(j, k) = j \cdot h'(k)$.
 $S(k) = (h(k) - h'(k), h(k) - 2h'(k), \dots, h(k) - (m-1)h'(k)) \pmod{m}$

Beispiel:
 $m = 7, \mathcal{K} = \{0, \dots, 500\}, h(k) = k \pmod{7}, h'(k) = 1 + k \pmod{5}$.
 Schlüssel 12, 53, 5, 15, 2, 19

0	1	2	3	4	5	6
19	15	2	5	53	12	

395

Double Hashing

- Sondierungsreihenfolge muss Permutation aller Hashadressen bilden. Also $h'(k) \neq 0$ und $h'(k)$ darf m nicht teilen, z.B. garantiert mit m prim.
- h' sollte unabhängig von h sein (Vermeidung sekundärer Häufung).

Unabhängigkeit:

$$\mathbb{P}((h(k) = h(k')) \wedge (h'(k) = h'(k'))) = \mathbb{P}(h(k) = h(k')) \cdot \mathbb{P}(h'(k) = h'(k')).$$

Unabhängigkeit erfüllt von $h(k) = k \pmod{m}$ und $h'(k) = 1 + k \pmod{m-2}$ (m prim).

396

Analyse Double Hashing

Sind h und h' unabhängig, dann:

- 1 Erfolglose Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C'_n \approx \frac{1}{1 - \alpha}$$

- 2 Erfolgreiche Suche. Durchschnittliche Anzahl betrachteter Einträge

$$C_n \approx 1 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha^3}{4} + \frac{\alpha^4}{15} - \frac{\alpha^5}{18} + \dots < 2.5$$

15. C++ vertieft (IV): Ausnahmen (Exceptions)

Übersicht

	$\alpha = 0.50$		$\alpha = 0.90$		$\alpha = 0.95$	
	C_n	C'_n	C_n	C'_n	C_n	C'_n
Separate Verkettung	1.250	1.110	1.450	1.307	1.475	1.337
Direkte Verkettung	1.250	0.500	1.450	0.900	1.475	0.950
Lineares Sondieren	1.500	2.500	5.500	50.500	10.500	200.500
Quadratisches Sondieren	1.440	2.190	2.850	11.400	3.520	22.050
Double Hashing	1.39	2.000	2.560	10.000	3.150	20.000

397

398

Was kann schon schiefgehen?

- Öffnen einer Datei zum Lesen oder Schreiben

```
std::ifstream input("myfile.txt");
```

- Parsing

```
int value = std::stoi("12-8");
```

- Speicherallokation

```
std::vector<double> data(ManyMillions);
```

- Invalide Daten

```
int a = b/x; // what if x is zero?
```

399

400

Möglichkeiten der Fehlerbehandlung

- Keine (inakzeptabel)
- Globale Fehlervariable (Flags)
- Funktionen, die Fehlercodes zurückgeben
- Objekte, die Fehlercodes speichern
- Ausnahmen

401

Globale Fehlervariablen

- Typisch für älteren C-Code
- Nebenläufigkeit ist ein Problem
- Fehlerbehandlung nach Belieben. Erfordert grosse Disziplin, sehr gute Dokumentation und übersäht den Code mit scheinbar unzusammenhängenden Checks.

402

Rückgabe von Fehlercodes

- Jeder Aufruf einer Funktion wird mit Ergebnis quittiert.
- Typisch für grosse APIs (OS Level). Dort oft mit globalen Fehlercodes kombiniert.¹⁷
- Der Aufrufer kann den Rückgabewert einer Funktion prüfen, um die korrekte Ausführung zu überwachen.

¹⁷Globaler error code thread-safety durch thread local storage.

403

Rückgabe von Fehlercodes

Beispiel

```
#include <errno.h>
...

pf = fopen ("notexisting.txt", "r+");
if (pf == NULL) {
    fprintf(stderr, "Error opening file: %s\n", strerror( errno ));
}
else { // ...
    fclose (pf);
}
```

404

Fehlerstatus im Objekt

- Fehlerzustand eines Objektes intern im Objekt gespeichert.

Beispiel

```
int i;
std::cin >> i;
if (std::cin.good()){// success, continue
    ...
}
```

405

Exceptions

- Exceptions unterbrechen den normalen Kontrollfluss
- Exceptions können geworfen (throw) und gefangen (catch) werden
- Exceptions können über Funktionengrenzen hinweg agieren.

406

Beispiel: Exception werfen

```
class MyException{};

void f(int i){
    if (i==0) throw MyException();
    f(i-1);
}

int main()
{
    f(4);
    return 0;
}
```

terminate called after throwing an instance of 'MyException'
Aborted

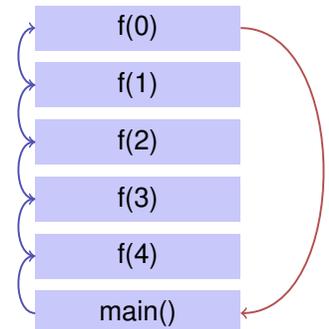
407

Beispiel: Exception fangen

```
class MyException{};

void f(int i){
    if (i==0) throw MyException();
    f(i-1);
}

int main(){
    try{
        f(4);
    }
    catch (MyException e){
        std::cout << "exception caught\n";
    }
}
```



exception caught

408

Ressourcen werden geschlossen

```
class MyException{};
struct SomeResource{
    ~SomeResource(){std::cout << "closed resource\n";}
};
void f(int i){
    if (i==0) throw MyException();
    SomeResource x;
    f(i-1);
}
int main(){
    try{f(5);}
    catch (MyException e){
        std::cout << "exception caught\n";
    }
}
```

```
closed resource
closed resource
closed resource
closed resource
closed resource
exception caught
```

409

Wann Exceptions?

Exceptions werden für die *Behandlung von Fehlern* benutzt.

- Verwende **throw** nur, um einen Fehler zu signalisieren, welcher die Postcondition einer Funktion verletzt oder das Fortfahren des Codes unmöglich macht
- Verwende **catch** nur, wenn klar ist, wie man den Fehler behandeln kann (u.U. mit erneutem Werfen der Exception)
- Verwende **throw nicht** um einen Programmierfehler oder eine Verletzung von Invarianten anzuzeigen (benutze stattdessen **assert**)
- Verwende Exceptions **nicht** um den Kontrollfluss zu ändern. Throw ist **nicht** ein besseres return.

410

Warum Exceptions?

Das:

```
int ret = f();
if (ret == 0) {
    // ...
} else {
    // ...code that handles the error...
}
```

sieht auf den ersten Blick vielleicht besser / einfacher aus als das:

```
try {
    f();
    // ...
} catch (std::exception& e) {
    // ...code that handles the error...
}
```

411

Warum Exceptions?

Die Wahrheit ist, dass Einfachstbeispiele den Kern der Sache nicht immer treffen.

Return-Codes zur Fehlerbehandlung übersähen grössere Codestücke entweder mit Checks oder die Fehlerbehandlung bleibt auf der Strecke.

412

Darum Exceptions

Beispiel 1: Evaluation von Ausdrücken (Expression Parser, Vorlesung Informatik I), siehe <http://codeboard.io/projects/46131>

Eingabe: `1 + (3 * 6 / (/ 7))`

Fehler tief in der Rekursionshierarchie. Wie kann ich eine vernünftige Fehlermeldung produzieren (und weiterfahren)? Müsste den Fehlercode über alle Rekursionsstufen zurückgeben. Das übersieht den Code mit checks.

Beispiel 2

Wertetyp mit Garantie: Werte im gegebenen Bereich.

```
template <typename T, T min, T max>
class Range{
public:
    Range(){}
    Range (const T& v) : value (v) {
        if (value < min) throw Underflow ();
        if (value > max) throw Overflow ();
    }
    operator const T& () const {return value;}
private:
    T value;
};
```

Fehlerbehandlung im Konstruktor!

413

414

Fehlertypen, hierarchisch

```
class RangeException {};
class Overflow : public RangeException {};
class Underflow : public RangeException {};
class DivisionByZero: public RangeException {};
class FormatError: public RangeException {};
```

Operatoren

```
template <typename T, T min, T max>
Range<T, min, max> operator/ (const Range<T, min, max>& a,
                             const Range<T, min, max>& b){
    if (b == 0) throw DivisionByZero();
    return T (a) * T(b);
}

template <typename T, T min, T max>
std::istream& operator >> (std::istream& is, Range<T, min, max>& a){
    T value;
    if (!(is >> value)) throw FormatError();
    a = value;
    return is;
}
```

Fehlerbehandlung im Operator!

415

416

Fehlerbehandlung (zentral)

```
Range<int, -10, 10> a, b, c;
try{
    std::cin >> a;
    std::cin >> b;
    std::cin >> c;
    a = a / b + 4 * (b - c);
    std::cout << a;
}
catch(FormatError& e){ std::cout << "Format error\n"; }
catch(Underflow& e){ std::cout << "Underflow\n"; }
catch(Overflow& e){ std::cout << "Overflow\n"; }
catch(DivisionByZero& e){ std::cout << "Divison By Zero\n"; }
```

417

16. Natürliche Suchbäume

[Ottman/Widmayer, Kap. 5.1, Cormen et al, Kap. 12.1 - 12.3]

418

Wörterbuchimplementationen

Hashing: Implementierung von Wörterbüchern mit erwartet sehr schnellen Zugriffszeiten.

Nachteile von Hashing: im schlechtesten Fall lineare Zugriffszeit.

Manche Operationen gar nicht unterstützt:

- Aufzählen von Schlüssel in aufsteigender Anordnung
- Nächst kleinerer Schlüssel zu gegebenem Schlüssel

419

Bäume

Bäume sind

- Verallgemeinerte Listen: Knoten können mehrere Nachfolger haben
- Spezielle Graphen: Graphen bestehen aus Knoten und Kanten. Ein Baum ist ein zusammenhängender, gerichteter, azyklischer Graph.

420

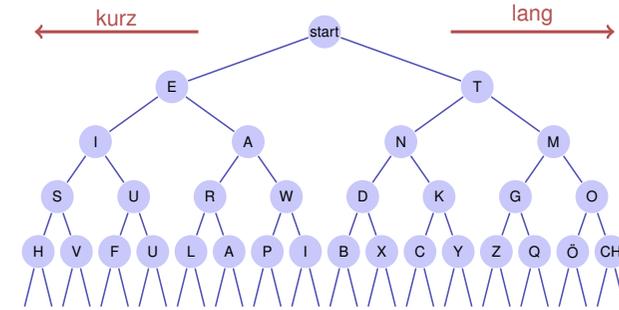
Bäume

Verwendung

- Entscheidungsbäume: Hierarchische Darstellung von Entscheidungsregeln
- Syntaxbäume: Parsen und Traversieren von Ausdrücken, z.B. in einem Compiler
- Codebäume: Darstellung eines Codes, z.B. Morsealphabet, Huffman Code
- Suchbäume: ermöglichen effizientes Suchen eines Elementes



Beispiele

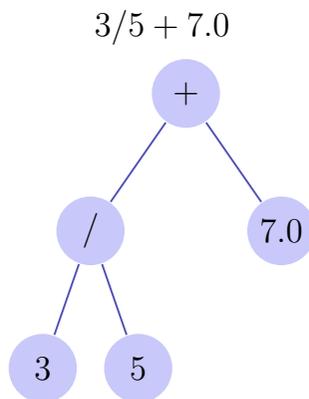


Morsealphabet

421

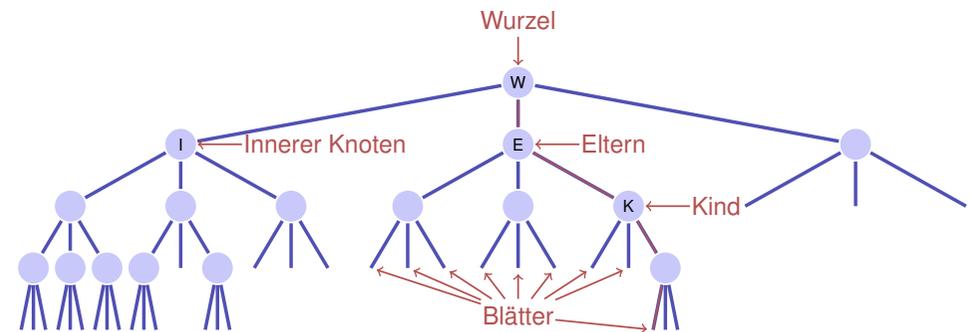
422

Beispiele



Ausdrucksbaum

Nomenklatur



- Ordnung des Baumes: Maximale Anzahl Kindknoten, hier: 3
- Höhe des Baumes: maximale Pfadlänge Wurzel – Blatt (hier: 4)

423

424

Binäre Bäume

Ein binärer Baum ist entweder

- ein Blatt, d.h. ein leerer Baum, oder
- ein innerer Knoten mit zwei Bäumen T_l (linker Teilbaum) und T_r (rechter Teilbaum) als linken und rechten Nachfolger.

In jedem Knoten v speichern wir



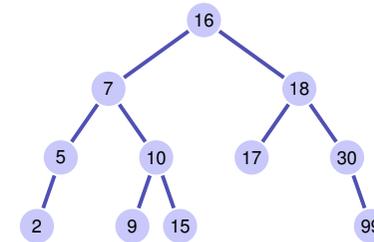
- einen Schlüssel $v.key$ und
- zwei Zeiger $v.left$ und $v.right$ auf die Wurzeln der linken und rechten Teilbäume.
- Ein Blatt wird durch den **null**-Zeiger repräsentiert

425

Binärer Suchbaum

Ein binärer Suchbaum ist ein binärer Baum, der die Suchbaumeigenschaft erfüllt:

- Jeder Knoten v speichert einen Schlüssel
- Schlüssel im linken Teilbaum $v.left$ von v sind kleiner als $v.key$
- Schlüssel im rechten Teilbaum $v.right$ von v sind grösser als $v.key$



426

Suchen

Input : Binärer Suchbaum mit Wurzel r ,
Schlüssel k

Output : Knoten v mit $v.key = k$ oder **null**

$v \leftarrow r$

while $v \neq \text{null}$ **do**

if $k = v.key$ **then**

return v

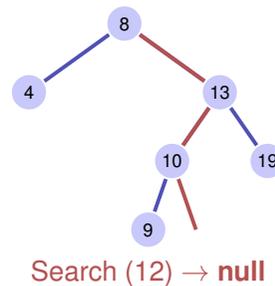
else if $k < v.key$ **then**

$v \leftarrow v.left$

else

$v \leftarrow v.right$

return null



427

Höhe eines Baumes

Die Höhe $h(T)$ eines Baumes T mit Wurzel r ist gegeben als

$$h(r) = \begin{cases} 0 & \text{falls } r = \text{null} \\ 1 + \max\{h(r.left), h(r.right)\} & \text{sonst.} \end{cases}$$

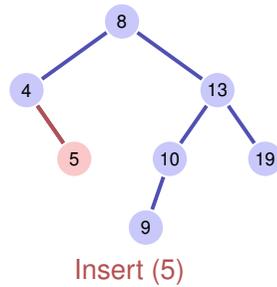
Die Laufzeit der Suche ist somit im schlechtesten Fall $\mathcal{O}(h(T))$

428

Einfügen eines Schlüssels

Einfügen des Schlüssels k

- Suche nach k .
- Wenn erfolgreich:
Fehlerausgabe
- Wenn erfolglos: Einfügen des Schlüssels am erreichten Blatt.

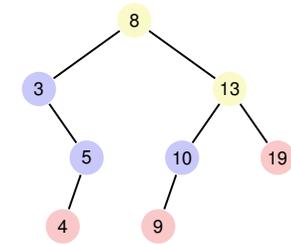


Knoten entfernen

Drei Fälle möglich

- Knoten hat keine Kinder
- Knoten hat ein Kind
- Knoten hat zwei Kinder

[Blätter zählen hier nicht]



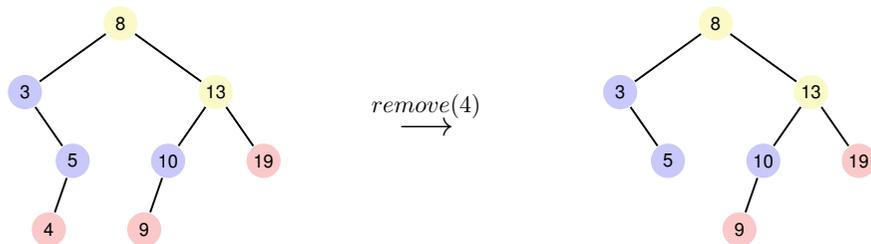
429

430

Knoten entfernen

Knoten hat keine Kinder

Einfacher Fall: Knoten durch Blatt ersetzen.

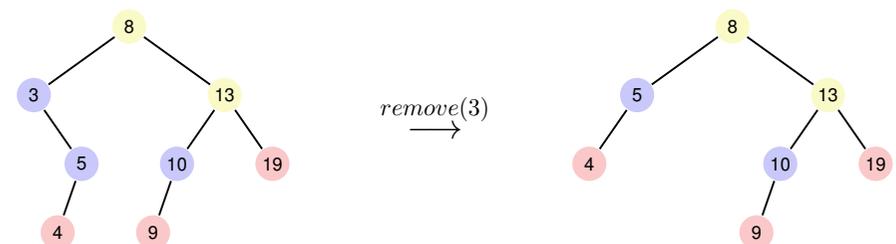


431

Knoten entfernen

Knoten hat ein Kind

Auch einfach: Knoten durch das einzige Kind ersetzen.



432

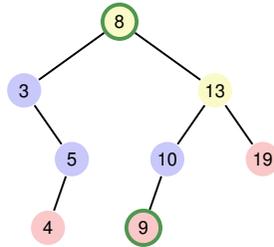
Knoten entfernen

Knoten v hat zwei Kinder

Beobachtung: Der kleinste Schlüssel im rechten Teilbaum $v.right$ (der *symmetrische Nachfolger* von v)

- ist kleiner als alle Schlüssel in $v.right$
- ist grösser als alle Schlüssel in $v.left$
- und hat kein linkes Kind.

Lösung: ersetze v durch seinen symmetrischen Nachfolger

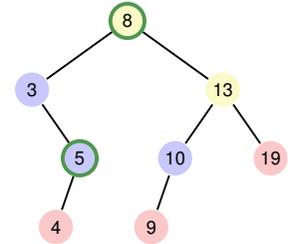


433

Aus Symmetrie Gründen...

Knoten v hat zwei Kinder

Auch möglich: ersetze v durch seinen symmetrischen Vorgänger



434

Algorithmus SymmetricSuccessor(v)

Input : Knoten v eines binären Suchbaumes

Output : Symmetrischer Nachfolger von v

$w \leftarrow v.right$

$x \leftarrow w.left$

while $x \neq \text{null}$ **do**

$w \leftarrow x$

$x \leftarrow x.left$

return w

435

Analyse

Löschen eines Elementes v aus einem Baum T benötigt $\mathcal{O}(h(T))$

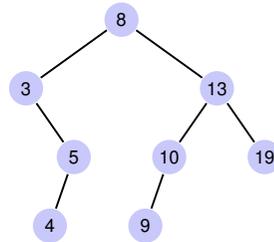
Elementarschritte:

- Suchen von v hat Kosten $\mathcal{O}(h(T))$
- Hat v maximal ein Kind ungleich **null**, dann benötigt das Entfernen $\mathcal{O}(1)$
- Das Suchen des symmetrischen Nachfolgers n benötigt $\mathcal{O}(h(T))$ Schritte. Entfernen und Einfügen von n hat Kosten $\mathcal{O}(1)$

436

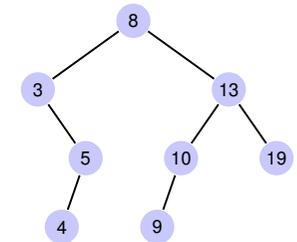
Traversierungsarten

- Hauptreihenfolge (preorder): v , dann $T_{\text{left}}(v)$, dann $T_{\text{right}}(v)$.
8, 3, 5, 4, 13, 10, 9, 19
- Nebenreihenfolge (postorder): $T_{\text{left}}(v)$, dann $T_{\text{right}}(v)$, dann v .
4, 5, 3, 9, 10, 19, 13, 8
- Symmetrische Reihenfolge (inorder): $T_{\text{left}}(v)$, dann v , dann $T_{\text{right}}(v)$.
3, 4, 5, 8, 9, 10, 13, 19



Weitere unterstützte Operationen

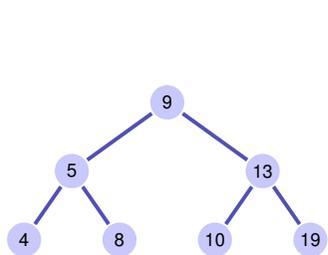
- $\text{Min}(T)$: Auslesen des Minimums in $\mathcal{O}(h)$
- $\text{ExtractMin}(T)$: Auslesen und Entfernen des Minimums in $\mathcal{O}(h)$
- $\text{List}(T)$: Ausgeben einer sortierten Liste der Elemente von T
- $\text{Join}(T_1, T_2)$: Zusammenfügen zweier Bäume mit $\max(T_1) < \min(T_2)$ in $\mathcal{O}(n)$.



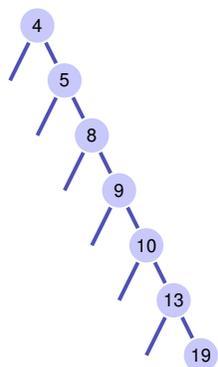
437

438

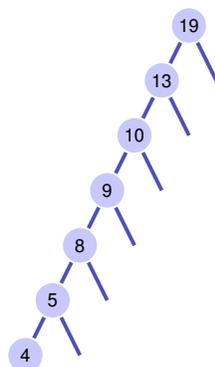
Degenerierte Suchbäume



Insert 9,5,13,4,8,10,19
bestmöglich
balanciert



Insert 4,5,8,9,10,13,19
Lineare Liste



Insert 19,13,10,9,8,5,4
Lineare Liste

439

17. AVL Bäume

Balancierte Bäume [Ottman/Widmayer, Kap. 5.2-5.2.1, Cormen et al, Kap. Problem 13-3]

440

Ziel

Suchen, Einfügen und Entfernen eines Schlüssels in Baum mit n Schlüsseln, welche in zufälliger Reihenfolge eingefügt wurden im Mittel in $\mathcal{O}(\log_2 n)$ Schritten.

Schlechtester Fall jedoch: $\Theta(n)$ (degenerierter Baum).

Ziel: Verhinderung der Degenerierung. Künstliches, bei jeder Update-Operation erfolgtes Balancieren eines Baumes

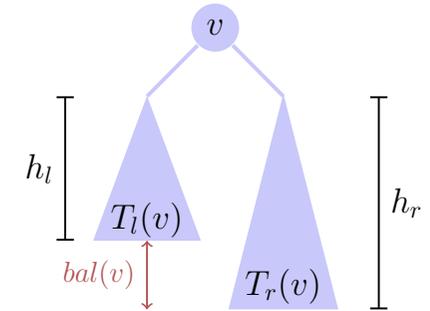
Balancierung: garantiere, dass ein Baum mit n Knoten stets eine Höhe von $\mathcal{O}(\log n)$ hat.

Adelson-Venskii und Landis (1962): AVL-Bäume

Balance eines Knotens

Die **Balance** eines Knotens v ist definiert als die Höhendifferenz seiner beiden Teilbäume $T_l(v)$ und $T_r(v)$

$$\text{bal}(v) := h(T_r(v)) - h(T_l(v))$$

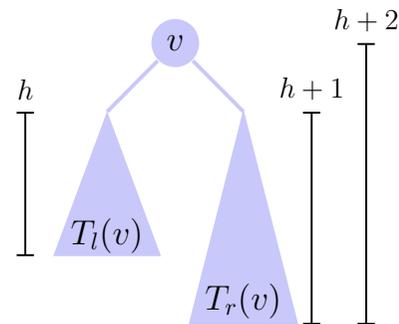


441

442

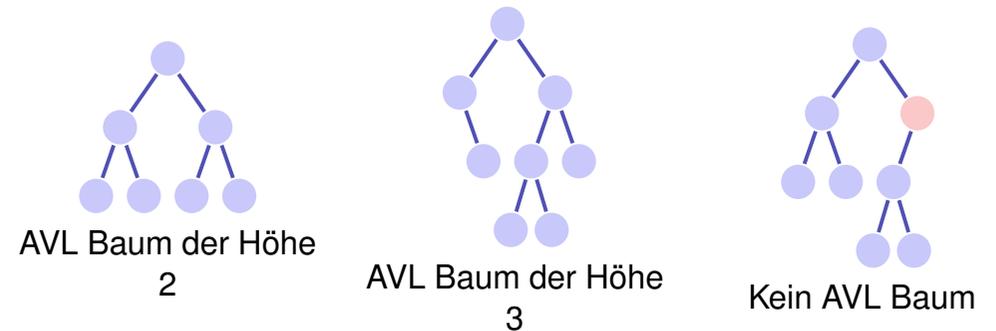
AVL Bedingung

AVL Bedingung: für jeden Knoten v eines Baumes gilt $\text{bal}(v) \in \{-1, 0, 1\}$



443

(Gegen-)Beispiele

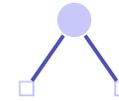


444

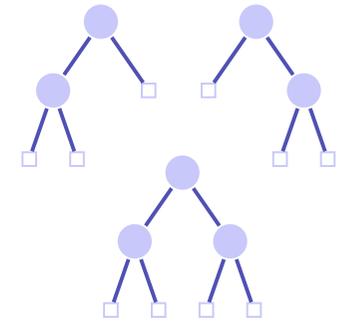
Anzahl Blätter

- 1. Beobachtung: Ein Suchbaum mit n Schlüsseln hat genau $n + 1$ Blätter. Einfaches Induktionsargument.
- 2. Beobachtung: untere Grenze für Anzahl Blätter eines Suchbaums zu gegebener Höhe erlaubt Abschätzung der maximalen Höhe eines Suchbaums zu gegebener Anzahl Schlüssel.

Untere Grenze Blätter



AVL Baum der Höhe 1 hat
 $M(1) := 2$ Blätter



AVL Baum der Höhe 2 hat
mindestens $M(2) := 3$
Blätter

445

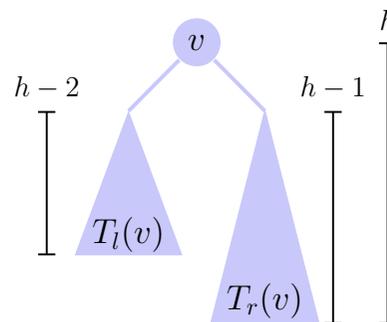
446

Untere Grenze Blätter für $h > 2$

- Höhe eines Teilbaums $\geq h - 1$.
- Höhe des anderen Teilbaums $\geq h - 2$.

Minimale Anzahl Blätter $M(h)$ ist

$$M(h) = M(h - 1) + M(h - 2)$$



Insgesamt gilt $M(h) = F_{h+2}$ mit **Fibonacci-Zahlen** $F_0 := 0$, $F_1 := 1$,
 $F_n := F_{n-1} + F_{n-2}$ für $n > 1$.

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

Geschlossene Form der Fibonacci Zahlen: Berechnung über erzeugende Funktionen:

- 1 Potenzreihenansatz

$$f(x) := \sum_{i=0}^{\infty} F_i \cdot x^i$$

447

448

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

- 2 Für Fibonacci Zahlen gilt $F_0 = 0$, $F_1 = 1$,
 $F_i = F_{i-1} + F_{i-2} \forall i > 1$. Daher:

$$\begin{aligned} f(x) &= x + \sum_{i=2}^{\infty} F_i \cdot x^i = x + \sum_{i=2}^{\infty} F_{i-1} \cdot x^i + \sum_{i=2}^{\infty} F_{i-2} \cdot x^i \\ &= x + x \sum_{i=2}^{\infty} F_{i-1} \cdot x^{i-1} + x^2 \sum_{i=2}^{\infty} F_{i-2} \cdot x^{i-2} \\ &= x + x \sum_{i=0}^{\infty} F_i \cdot x^i + x^2 \sum_{i=0}^{\infty} F_i \cdot x^i \\ &= x + x \cdot f(x) + x^2 \cdot f(x). \end{aligned}$$

449

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

- 3 Damit:

$$\begin{aligned} f(x) \cdot (1 - x - x^2) &= x. \\ \Leftrightarrow f(x) &= \frac{x}{1 - x - x^2} \\ \Leftrightarrow f(x) &= \frac{x}{(1 - \phi x) \cdot (1 - \hat{\phi} x)} \end{aligned}$$

mit den Wurzeln ϕ und $\hat{\phi}$ von $1 - x - x^2$.

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \\ \hat{\phi} &= \frac{1 - \sqrt{5}}{2}. \end{aligned}$$

450

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

- 4 Es gilt:

$$(1 - \hat{\phi}x) - (1 - \phi x) = \sqrt{5} \cdot x.$$

Damit:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\sqrt{5}} \frac{(1 - \hat{\phi}x) - (1 - \phi x)}{(1 - \phi x) \cdot (1 - \hat{\phi}x)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1}{1 - \phi x} - \frac{1}{1 - \hat{\phi}x} \right) \end{aligned}$$

451

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

- 5 Potenzreihenentwicklung von $g_a(x) = \frac{1}{1 - a \cdot x}$ ($a \in \mathbb{R}$):

$$\frac{1}{1 - a \cdot x} = \sum_{i=0}^{\infty} a^i \cdot x^i.$$

Sieht man mit Taylor-Entwicklung von $g_a(x)$ um $x = 0$ oder so: Sei $\sum_{i=0}^{\infty} G_i \cdot x^i$ eine Potenzreihenentwicklung von g . Mit der Identität $g_a(x)(1 - a \cdot x) = 1$ gilt

$$1 = \sum_{i=0}^{\infty} G_i \cdot x^i - a \cdot \sum_{i=0}^{\infty} G_i \cdot x^{i+1} = G_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (G_i - a \cdot G_{i-1}) \cdot x^i$$

Also $G_0 = 1$ und $G_i = a \cdot G_{i-1} \Rightarrow G_i = a^i$.

452

[Fibonacci Zahlen: geschlossene Form]

6 Einsetzen der Potenzreihenentwicklung:

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1}{1-\phi x} - \frac{1}{1-\hat{\phi} x} \right) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\sum_{i=0}^{\infty} \phi^i x^i - \sum_{i=0}^{\infty} \hat{\phi}^i x^i \right) \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^i - \hat{\phi}^i) x^i \end{aligned}$$

Koeffizientenvergleich mit $f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} F_i \cdot x^i$ liefert

$$F_i = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^i - \hat{\phi}^i).$$

453

Fibonacci Zahlen

Es gilt $F_i = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^i - \hat{\phi}^i)$ mit den Wurzeln $\phi, \hat{\phi}$ der Gleichung $x^2 = x + 1$ (goldener Schnitt), also $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}, \hat{\phi} = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$.

Beweis (Induktion). Klar für $i = 0, i = 1$. Sei $i > 2$:

$$\begin{aligned} F_i &= F_{i-1} + F_{i-2} = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^{i-1} - \hat{\phi}^{i-1}) + \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^{i-2} - \hat{\phi}^{i-2}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^{i-1} + \phi^{i-2}) - \frac{1}{\sqrt{5}} (\hat{\phi}^{i-1} + \hat{\phi}^{i-2}) = \frac{1}{\sqrt{5}} \phi^{i-2} (\phi + 1) - \frac{1}{\sqrt{5}} \hat{\phi}^{i-2} (\hat{\phi} + 1) \\ &= \frac{1}{\sqrt{5}} \phi^{i-2} (\phi^2) - \frac{1}{\sqrt{5}} \hat{\phi}^{i-2} (\hat{\phi}^2) = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^i - \hat{\phi}^i). \end{aligned}$$

454

Baumhöhe

Da $\hat{\phi} < 1$, gilt insgesamt

$$M(h) \in \Theta \left(\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2} \right)^h \right) \subseteq \Omega(1.618^h)$$

und somit

$$h \leq 1.44 \log_2 n + c.$$

AVL Baum ist asymptotisch nicht mehr als 44% höher als ein perfekt balancierter Baum.

455

Einfügen

Balancieren

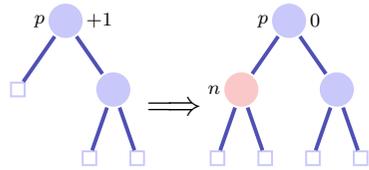
- Speichern der Balance für jeden Knoten
- Baum Re-balancieren bei jeder Update-Operation

Neuer Knoten n wird eingefügt:

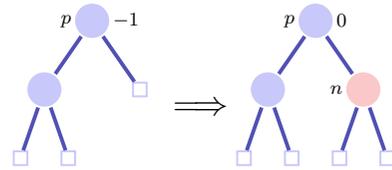
- Zuerst einfügen wie bei Suchbaum.
- Prüfe die Balance-Bedingung für alle Knoten aufsteigend von n zur Wurzel.

456

Balance am Einfügeort



Fall 1: $\text{bal}(p) = +1$

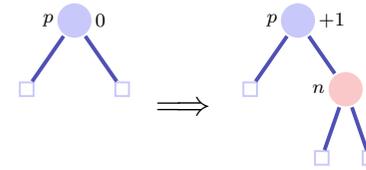


Fall 2: $\text{bal}(p) = -1$

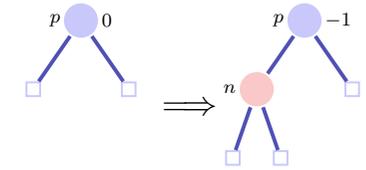
Fertig in beiden Fällen, denn der Teilbaum ist nicht gewachsen.

457

Balance am Einfügeort



Fall 3.1: $\text{bal}(p) = 0$ rechts



Fall 3.2: $\text{bal}(p) = 0$, links

In beiden Fällen noch nicht fertig. Aufruf von `upin(p)`.

458

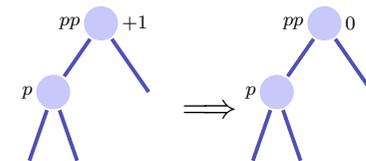
upin(p) - Invariante

Beim Aufruf von `upin(p)` gilt, dass

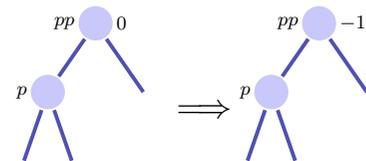
- der Teilbaum ab p gewachsen ist und
- $\text{bal}(p) \in \{-1, +1\}$

upin(p)

Annahme: p ist linker Sohn von pp ¹⁸



Fall 1: $\text{bal}(pp) = +1$, fertig.



Fall 2: $\text{bal}(pp) = 0$, `upin(pp)`

In beiden Fällen gilt nach der Operation die AVL-Bedingung für den Teilbaum ab pp

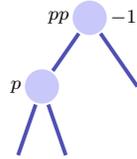
¹⁸Ist p rechter Sohn: symmetrische Fälle unter Vertauschung von $+1$ und -1

459

460

upin(p)

Annahme: p ist linker Sohn von pp



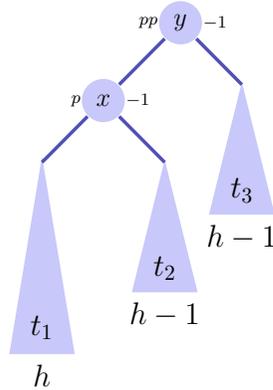
Fall 3: $\text{bal}(pp) = -1$,

Dieser Fall ist problematisch: das Hinzufügen von n im Teilbaum ab pp hat die AVL-Bedingung verletzt. Rebalancieren!

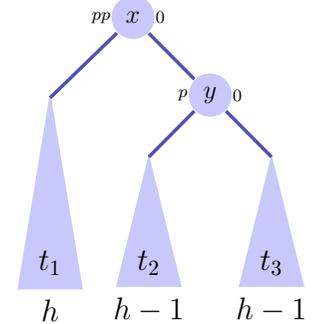
Zwei Fälle $\text{bal}(p) = -1$, $\text{bal}(p) = +1$

Rotationen

Fall 1.1 $\text{bal}(p) = -1$.¹⁹



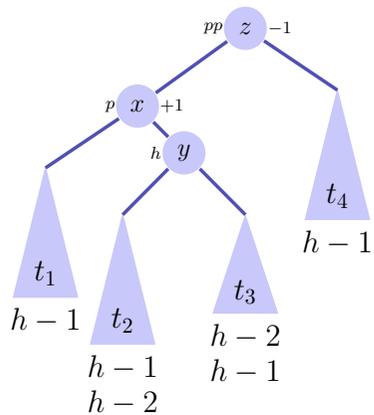
⇒
Rotation
nach
rechts



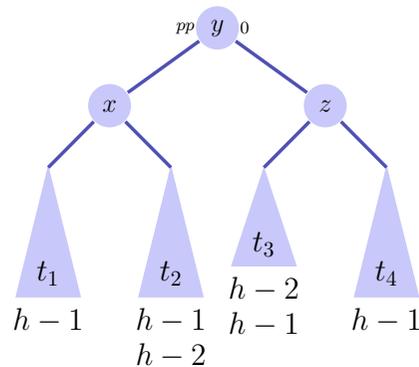
¹⁹ p rechter Sohn: $\text{bal}(pp) = \text{bal}(p) = +1$, Linksrotation

Rotationen

Fall 1.2 $\text{bal}(p) = +1$.²⁰



⇒
Doppel-
rotation
links-
rechts



²⁰ p rechter Sohn: $\text{bal}(pp) = +1$, $\text{bal}(p) = -1$, Doppelrotation rechts links

Analyse

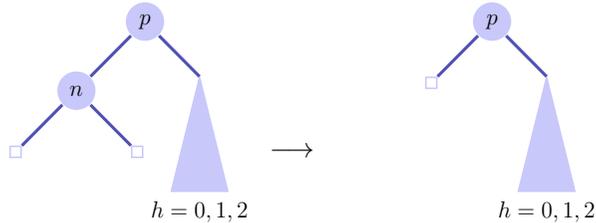
- Höhe des Baumes: $\mathcal{O}(\log n)$.
- Einfügen wie beim binären Suchbaum.
- Balancieren durch Rekursion vom Knoten zur Wurzel. Maximale Pfadlänge $\mathcal{O}(\log n)$.

Das Einfügen im AVL-Baum hat Laufzeitkosten von $\mathcal{O}(\log n)$.

Löschen

Fall 1: Knoten n hat zwei Blätter als Kinder Sei p Elternknoten von n .
⇒ Anderer Teilbaum hat Höhe $h' = 0, 1$ oder 2

- $h' = 1$: $\text{bal}(p)$ anpassen.
- $h' = 0$: $\text{bal}(p)$ anpassen. Aufruf $\text{upout}(p)$.
- $h' = 2$: Rebalancieren des Teilbaumes. Aufruf $\text{upout}(p)$.

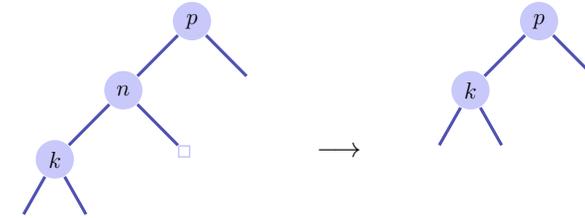


465

Löschen

Fall 2: Knoten n hat einen inneren Knoten k als Kind

- Ersetze n durch k . $\text{upout}(k)$



466

Löschen

Fall 3: Knoten n hat zwei inneren Knoten als Kinder

- Ersetze n durch symmetrischen Nachfolger. $\text{upout}(k)$
- Löschen des symmetrischen Nachfolgers wie in Fall 1 oder 2.

$\text{upout}(p)$

Sei pp der Elternknoten von p

(a) p linkes Kind von pp

- 1 $\text{bal}(pp) = -1 \Rightarrow \text{bal}(pp) \leftarrow 0$. $\text{upout}(pp)$
- 2 $\text{bal}(pp) = 0 \Rightarrow \text{bal}(pp) \leftarrow +1$.
- 3 $\text{bal}(pp) = +1 \Rightarrow$ nächste Folien.

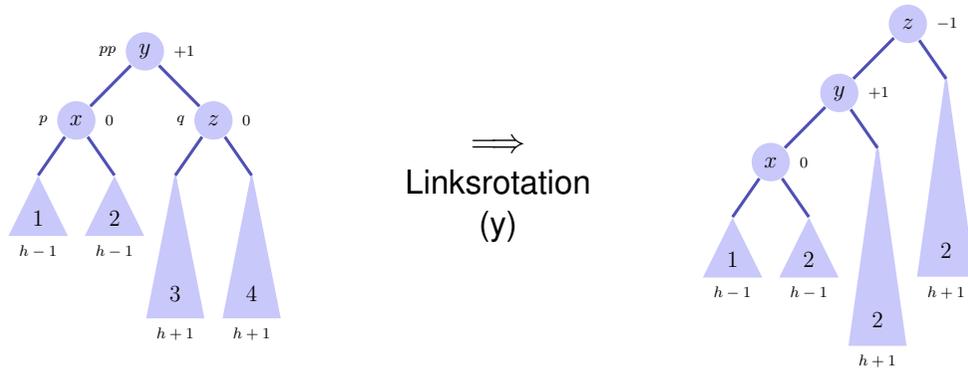
(b) p rechtes Kind von pp : Symmetrische Fälle unter Vertauschung von $+1$ und -1 .

467

468

upout (p)

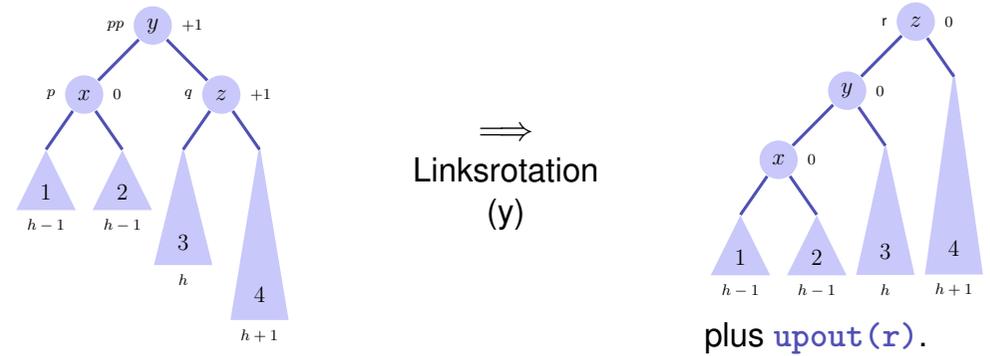
Fall (a).3: $\text{bal}(pp) = +1$. Sei q Bruder von p
 (a).3.1: $\text{bal}(q) = 0$.²¹



²¹(b).3.1: $\text{bal}(pp) = -1$, $\text{bal}(q) = -1$, Rechtsrotation.

upout (p)

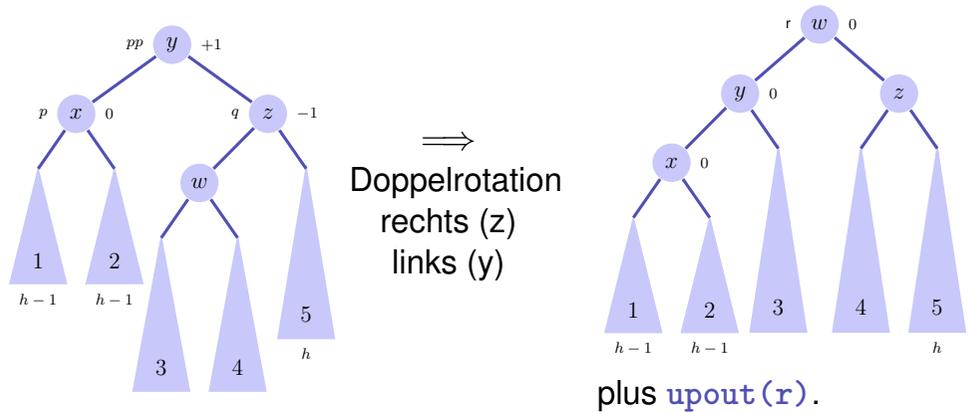
Fall (a).3: $\text{bal}(pp) = +1$. (a).3.2: $\text{bal}(q) = +1$.²²



²²(b).3.2: $\text{bal}(pp) = -1$, $\text{bal}(q) = +1$, Rechtsrotation+upout

upout (p)

Fall (a).3: $\text{bal}(pp) = +1$. (a).3.3: $\text{bal}(q) = -1$.²³



²³(b).3.3: $\text{bal}(pp) = -1$, $\text{bal}(q) = -1$, Links-Rechts-Rotation + upout

Zusammenfassung

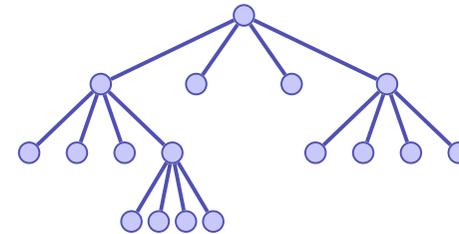
- AVL-Bäume haben asymptotische Laufzeit von $\mathcal{O}(\log n)$ (schlechtester Fall) für das Suchen, Einfügen und Löschen von Schlüssel
- Einfügen und Löschen ist verhältnismässig aufwändig und für kleine Probleme relativ langsam.

18. Quadrees

Quadrees, Bildsegmentierung, Funktionalminimierung, Reduktionsprinzip

Quadtree

Ein Quadtree ist ein Baum der Ordnung 4.



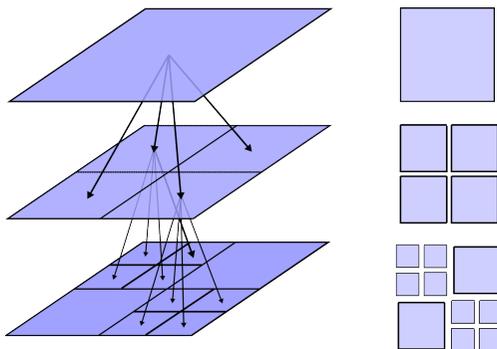
... und ist als solcher nicht besonders interessant, ausser man verwendet ihn zur...

473

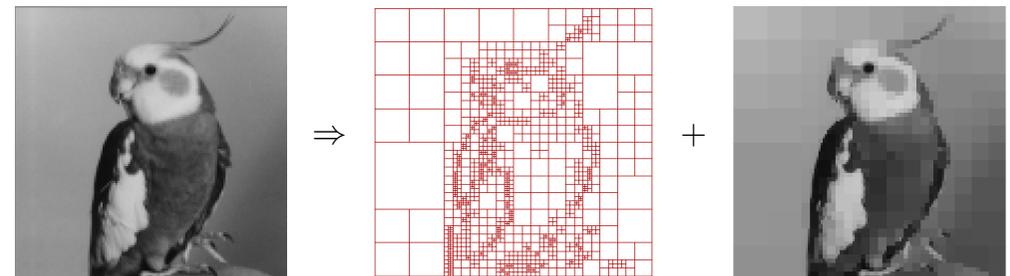
474

Quadtree - Interpretation und Nutzen

Partitionierung eines zweidimensionalen Bereiches in 4 gleich grosse Teile.



Bildsegmentierung

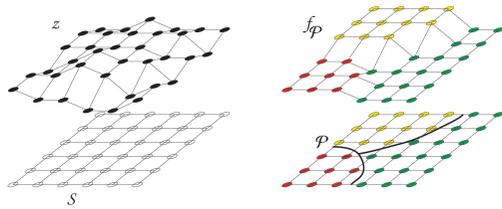


(Mögliche Anwendungen: Kompression, Entrauschen, Kantendetektion)

475

476

Etwas Notation

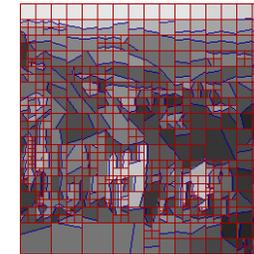


$S \subset \mathbb{Z}^2$ endliche rechteckige Indexmenge ('Pixel')
 $z \in \mathbb{R}^S$ Bild
 \mathfrak{P} Familie von Partitionen $\mathcal{P} \subset 2^S$ von S
 $\mathcal{F} = (\mathcal{F}_r)_{r \in S}$ Familie von 'Regressionsmodellen' $\mathcal{F}_r \subset \mathbb{R}^r$
 $f_{\mathcal{P}} \in \mathbb{R}^S$ 'Approximation' mit $f_{\mathcal{P}}|_r \in \mathcal{F}_r, r \in \mathcal{P}$
 \mathfrak{S} Familie von Segmentierungen $(\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}})$

Anderes Beispiel



z



$(\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}})$



$f_{\mathcal{P}}$

\mathcal{P} : Quadrees mit zusätzlicher Unterteilung in Polygone ('Wedges'),
 $f_{\mathcal{P}}$: konstante Funktionen

477

478

Minimierungsproblem

\mathcal{P} Partition $\gamma \geq 0$ Regularisierungsparameter
 $f_{\mathcal{P}}$ Approximation z Bild = 'Daten'

Ziel: Effiziente Minimierung des Funktionals

$$H_{\gamma, z} : \mathfrak{S} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}}) \mapsto \gamma \cdot |\mathcal{P}| + \|z - f_{\mathcal{P}}\|_2^2.$$

Ergebnis $(\hat{\mathcal{P}}, \hat{f}_{\hat{\mathcal{P}}}) \in \operatorname{argmin}_{(\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}})} H_{\gamma, z}$ interpretierbar als **optimaler Kompromiss zwischen Regularität und Datentreue**.

479

Warum Quadrees

$$H_{\gamma, z} : \mathfrak{S} \rightarrow \mathbb{R}, \quad (\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}}) \mapsto \gamma \cdot |\mathcal{P}| + \|z - f_{\mathcal{P}}\|_2^2.$$

- Anzahl aller Partitionierungen extrem gross ($|\mathfrak{P}| > 2^{|S|}$)
- Einsatz von Markov-Chain-Monte-Carlo (MCMC) Methoden zur Minimierung des Funktionals H über alle Partitionierung möglich, aber zeitaufwändig und inexakt.
- \Rightarrow Einschränkung des Suchraumes. Hierarchische Quadtree-Partitionierung besonders gut mit rekursivem Divide-And-Conquer Ansatz verträglich.²⁴

²⁴Wie Quicksort (nur 2d)!

480

Reduktionsprinzip

$$\begin{aligned} & \min_{(\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}}) \in \mathcal{G}} \gamma |\mathcal{P}| + \|z - f_{\mathcal{P}}\|_2^2 \\ = & \min_{\mathcal{P} \in \mathfrak{P}} \left\{ \gamma |\mathcal{P}| + \sum_{r \in \mathcal{P}} \min_{f_r \in \mathcal{F}_r} \sum_{s \in r} (z(s) - f_r(s))^2 \right\} \end{aligned}$$

⇒ Separation von Partitionssuche und lokaler Projektion.

Algorithmus: Minimize(z, r, γ)

Input : Bilddaten $z \in \mathbb{R}^S$, Rechteck $r \subset S$, Regularisierung $\gamma > 0$

Output : $\min_{(\mathcal{P}, f_{\mathcal{P}}) \in \mathcal{G}} \gamma |\mathcal{P}| + \|z - f_{\mathcal{P}}\|_2^2$

if $|r| = 0$ **then return** 0

$m \leftarrow \gamma + \min_{f_r \in \mathcal{F}_r} \sum_{s \in r} (z(s) - f_r(s))^2$

if $|r| > 1$ **then**

 Split r into $r_{ul}, r_{lr}, r_{ul}, r_{ur}$

$m_1 \leftarrow \text{Minimize}(z, r_{ul})$

$m_2 \leftarrow \text{Minimize}(z, r_{lr})$

$m_3 \leftarrow \text{Minimize}(z, r_{ul})$

$m_4 \leftarrow \text{Minimize}(z, r_{ur})$

$m' \leftarrow m_1 + m_2 + m_3 + m_4$

else

$m' \leftarrow \infty$

if $m' < m$ **then** $m \leftarrow m'$

return m

481

482

Konstante Funktionen

Minimiere

$$\min_{f_r \in \mathcal{F}_r} \sum_{s \in r} (z(s) - f_r(s))^2$$

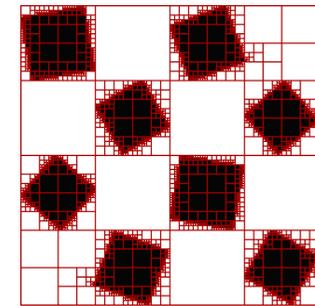
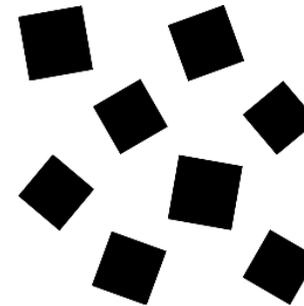
für die auf r konstanten Funktionen

Lösung: $\mu_r = \frac{1}{r} \sum_{s \in r} z(s)$

Schnelle Berechnung von μ_r auf Rechtecken möglich:

Präfixsummen!

Multiskalenansatz!



483

484

Allgemeine Regression

Betrachte Familie von $n \in \mathbb{N}$ Funktionen $\varphi_i : S \rightarrow \mathbb{R}$, $1 \leq i \leq n$.

Ziel: Minimiere

$$\sum_{s \in r} \left(z_s - \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(s) \right)^2$$

in $a \in \mathbb{R}^n$.

Normalgleichungen:

$$\begin{aligned} \sum_{s \in r} z_s \varphi_j(s) &= \sum_{s \in r} \sum_{i=1}^n a_i \varphi_i(s) \varphi_j(s), 1 \leq j \leq n \\ \Leftrightarrow \sum_{s \in r} z_s \varphi_j(s) &= \sum_{i=1}^n a_i \sum_{s \in r} \varphi_i(s) \varphi_j(s), 1 \leq j \leq n \end{aligned}$$

485

Allgemeine Regression

Normalgleichungen in Matrixschreibweise:

$$Y = M \cdot a.$$

mit $a = (a_i)_{1 \leq i \leq n}$ und

$$Y := \left(\sum_{s \in r} z_s \varphi_j(s) \right)_{1 \leq j \leq n}, \quad M := \left(\sum_{s \in r} \varphi_i(s) \varphi_j(s) \right)_{1 \leq i, j \leq n}.$$

486

Allgemeine Regression

Sei \hat{a} eine Lösung obigen Gleichungssystems. Berechnung des Approximationsfehlers:

$$\begin{aligned} \min_{f_r \in \mathcal{F}_r} \sum_{s \in r} (z_s - f_r(s))^2 &= \sum_{s \in r} \left(z_s - \sum_{i=1}^n \hat{a}_i \varphi_i(s) \right)^2 \\ &= \sum_{s \in r} z_s^2 - 2 \sum_{i=1}^n \hat{a}_i Y_i + \sum_{i=1}^n \hat{a}_i^2 M_{ii}. \end{aligned}$$

487

Beispiel: Affine Funktionen

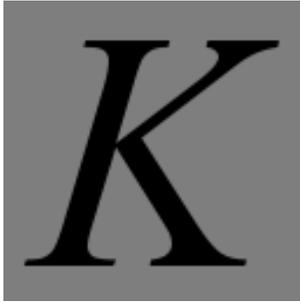
$n = 3$

- $\varphi_0(s) = 1$,
- $\varphi_1(s) = s_1$ (x -Koordinate von s),
- $\varphi_2(s) = s_2$ (y -Koordinate von s)

Regression: Übung!

488

Affine Regression



Effiziente lokale Berechnung

Benötigt: schnelle Berechnung der $\frac{n(n+1)}{2} + n$ 'Momente'

$$\sum_s \varphi_i(s)\varphi_j(s) \text{ und } \sum_{s \in r} z_s \varphi_j(s), 1 \leq i, j \leq n,$$

und für den Approximationsfehler

$$\sum_{s \in r} z_s^2.$$

Verwendung von Präfixsummen: Berechnung der lokalen Regression über Rechtecken in $\mathcal{O}(1)$.

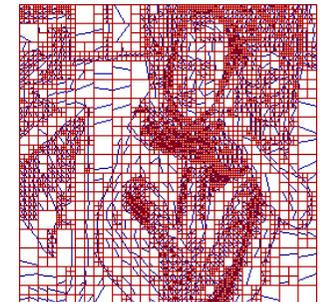
489

490

Analyse

Unter der Voraussetzung, dass die lokale Approximation in $\mathcal{O}(1)$ berechnet werden kann, benötigt der Minimierungsalgorithmus über dyadische Partitionen (Quadtree) $\mathcal{O}(|S| \log |S|)$ Schritte.

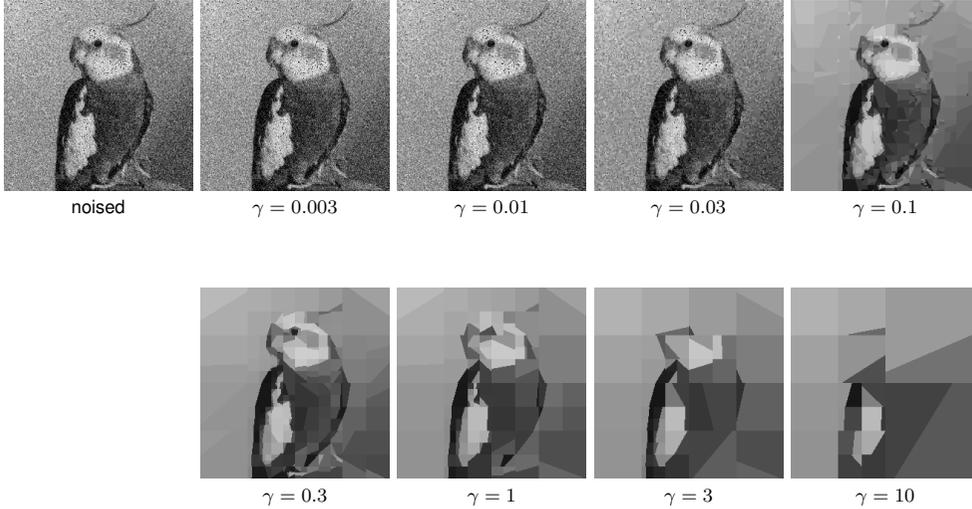
Affine Regression + Wedgelets



491

492

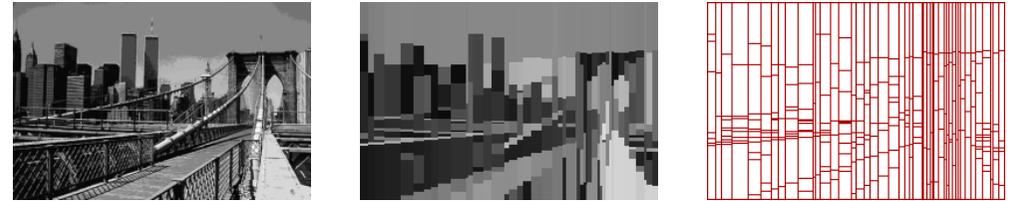
Entrauschen



493

Andere Ideen

kein Quadtree: hierarchisch-eindimensionales Modell (benötigt Dynamic Programming)



494

19. Dynamic Programming I

Fibonacci, Längste aufsteigende Teilfolge, längste gemeinsame Teilfolge, Editierdistanz, Matrixkettenmultiplikation, Matrixmultiplikation nach Strassen [Ottman/Widmayer, Kap. 1.2.3, 7.1, 7.4, Cormen et al, Kap. 15]

495

Fibonacci Zahlen

☹️ (schon wieder)

$$F_n := \begin{cases} 1 & \text{wenn } n < 2 \\ F_{n-1} + F_{n-2} & \text{wenn } n \geq 3. \end{cases}$$

Analyse: warum ist der rekursive Algorithmus so langsam.

496

Algorithmus FibonacciRecursive(n)

Input : $n \geq 0$

Output : n -te Fibonacci Zahl

if $n \leq 2$ **then**

 | $f \leftarrow 1$

else

 | $f \leftarrow \text{FibonacciRecursive}(n - 1) + \text{FibonacciRecursive}(n - 2)$

return f

Analyse

$T(n)$: Anzahl der ausgeführten Operationen.

■ $n = 1, 2$: $T(n) = \Theta(1)$

■ $n \geq 3$: $T(n) = T(n - 2) + T(n - 1) + c$.

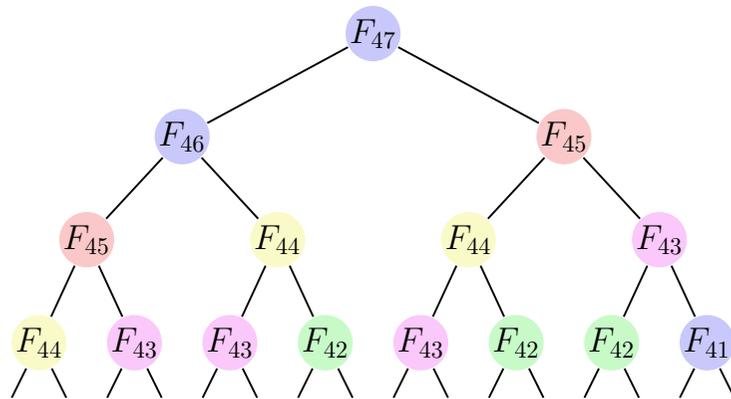
$$T(n) = T(n - 2) + T(n - 1) + c \geq 2T(n - 2) + c \geq 2^{n/2}c' = (\sqrt{2})^n c'$$

Algorithmus ist *exponentiell (!)* in n .

497

498

Grund, visualisiert



Knoten mit denselben Werten werden oft ausgewertet.

Memoization

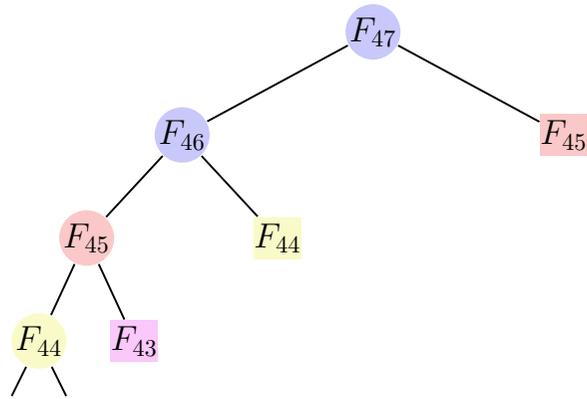
Memoization (sic) Abspeichern von Zwischenergebnissen.

- Bevor ein Teilproblem gelöst wird, wird Existenz eines entsprechenden Zwischenergebnis geprüft.
- Existiert ein gespeichertes Zwischenergebnis bereits, so wird dieses verwendet.
- Andernfalls wird der Algorithmus ausgeführt und das Ergebnis wird entsprechend gespeichert.

499

500

Memoization bei Fibonacci



Rechteckige Knoten wurden bereits ausgewertet.

501

Algorithmus FibonacciMemoization(n)

Input : $n \geq 0$

Output : n -te Fibonacci Zahl

if $n \leq 2$ **then**

$f \leftarrow 1$

else if $\exists \text{memo}[n]$ **then**

$f \leftarrow \text{memo}[n]$

else

$f \leftarrow \text{FibonacciMemoization}(n - 1) + \text{FibonacciMemoization}(n - 2)$

$\text{memo}[n] \leftarrow f$

return f

502

Analyse

Berechnungsaufwand:

$$T(n) = T(n - 1) + c = \dots = \mathcal{O}(n).$$

Algorithmus benötigt $\Theta(n)$ Speicher.²⁵

²⁵Allerdings benötigt der naive Algorithmus auch $\Theta(n)$ Speicher für die Rekursionsverwaltung.

503

Genauer hingesehen ...

... berechnet der Algorithmus der Reihe nach die Werte $F_1, F_2, F_3,$
... verkleidet im *Top-Down* Ansatz der Rekursion.

Kann den Algorithmus auch gleich *Bottom-Up* hinschreiben. Man spricht dann auch von *dynamischer Programmierung*.

504

Algorithmus FibonacciDynamicProgram(n)

Input : $n \geq 0$

Output : n -te Fibonacci Zahl

```
F[1] ← 1
F[2] ← 1
for i ← 3, ..., n do
  F[i] ← F[i - 1] + F[i - 2]
return F[n]
```

Dynamic Programming: Vorgehen

- 1 Verwalte **DP-Tabelle** mit Information zu den Teilproblemen.
Dimension der Tabelle? Bedeutung der Einträge?
- 2 Berechnung der **Randfälle**.
Welche Einträge hängen nicht von anderen ab?
- 3 **Berechnungsreihenfolge** bestimmen.
In welcher Reihenfolge können Einträge berechnet werden, so dass benötigte Einträge jeweils vorhanden sind?
- 4 Auslesen der **Lösung**.
Wie kann sich Lösung aus der Tabelle konstruieren lassen?

Laufzeit (typisch) = Anzahl Einträge der Tabelle mal Aufwand pro Eintrag.

505

506

Dynamic Programming: Vorgehen am Beispiel

- 1 Dimension der Tabelle? Bedeutung der Einträge?
Tabelle der Grösse $n \times 1$. n -ter Eintrag enthält n -te Fibonacci Zahl.
- 2 Welche Einträge hängen nicht von anderen ab?
Werte F_1 und F_2 sind unabhängig einfach "berechenbar".
- 3 In welcher Reihenfolge können Einträge berechnet werden, so dass benötigte Einträge jeweils vorhanden sind?
 F_i mit aufsteigenden i .
- 4 Wie kann sich Lösung aus der Tabelle konstruieren lassen?
 F_n ist die n -te Fibonacci-Zahl.

507

Längste aufsteigende Teilfolge (LAT)

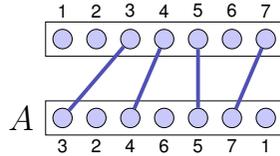


Verbinde so viele passende Anschlüsse wie möglich, ohne dass sich die Anschlüsse kreuzen.

508

Formalisieren

- Betrachte Folge $A = (a_1, \dots, a_n)$.
- Suche eine längste aufsteigende Teilfolge von A .
- Beispiele aufsteigender Teilfolgen:
 $(3, 4, 5)$, $(2, 4, 5, 7)$, $(3, 4, 5, 7)$, $(3, 7)$.



Verallgemeinerung: Lasse Zahlen ausserhalb von $1, \dots, n$ zu, auch mit Mehrfacheinträgen. Lasse nur strikt aufsteigende Teilfolgen zu.
 Beispiel: $(2, 3, 3, 3, 5, 1)$ mit aufsteigender Teilfolge $(2, 3, 5)$.

509

Erster Entwurf

Annahme: LAT L_k für k bekannt. Wollen nun LAT L_{k+1} für $k + 1$ berechnen.

Wenn a_{k+1} zu L_k passt, dann $L_{k+1} = L_k \oplus a_{k+1}$

Gegenbeispiel: $A_5 = (1, 2, 5, 3, 4)$. Sei $A_3 = (1, 2, 5)$ mit $L_3 = A$. Bestimme L_4 aus L_3 ?

So kommen wir nicht weiter: können nicht von L_k auf L_{k+1} schliessen.

510

Zweiter Entwurf

Annahme: eine LAT L_j für alle $j \leq k$ bekannt. Wollen nun LAT L_{k+1} für $k + 1$ berechnen.

Betrachte alle passenden $L_{k+1} = L_j \oplus a_{k+1}$ ($j \leq k$) und wähle eine längste solche Folge.

Gegenbeispiel: $A_5 = (1, 2, 5, 3, 4)$. Sei $A_4 = (1, 2, 5, 3)$ mit $L_1 = (1)$, $L_2 = (1, 2)$, $L_3 = (1, 2, 5)$, $L_4 = (1, 2, 5)$. Bestimme L_5 aus L_1, \dots, L_4 ?

So kommen wir nicht weiter: können nicht von *jeweils nur einer beliebigen Lösung* L_j auf L_{k+1} schliessen. Wir müssten alle möglichen LAT betrachten. Zu viel!

511

Dritter Entwurf

Annahme: die LAT L_j , *welche mit kleinstem Element endet* sei für alle Längen $1 \leq j \leq k$ bekannt.

Betrachte nun alle passenden $L_j \oplus a_{k+1}$ ($j \leq k$) und aktualisiere die Tabelle der längsten aufsteigenden Folgen, welche mit kleinstem Element enden.

Beispiel: $A = (1, 1000, 1001, 2, 3, 4, \dots, 999)$

A	LAT
(1)	(1)
(1, 1000)	(1), (1, 1000)
(1, 1000, 1001)	(1), (1, 1000), (1, 1000, 1001)
(1, 1000, 1001, 2)	(1), (1, 2), (1, 1000, 1001)
(1, 1000, 1001, 2, 3)	(1), (1, 2), (1, 2, 3)

512

DP Table

- Idee: speichere jeweils nur das letzte Element der aufsteigenden Folge am Slot j .
- Beispielfolge:
3 2 5 1 6 4
- Problem: **Tabelle** enthält zum Schluss nicht die Folge, nur den letzten Wert.
- Lösung: **Zweite Tabelle** mit den Vorgängern.

Index	1	2	3	4	5	6
Wert	3	2	5	1	6	4
Vorgänger	$-\infty$	$-\infty$	2	$-\infty$	5	1

	0	1	2	3	4	...
$-\infty$	∞	∞	∞	∞	∞	
$-\infty$	3	∞	∞	∞	∞	
$-\infty$	2	∞	∞	∞	∞	
$-\infty$	2	5	∞	∞	∞	
$-\infty$	1	5	∞	∞	∞	
$-\infty$	1	5	6	∞	∞	
$-\infty$	1	4	6	∞	∞	

513

Dynamic Programming Algorithmus LAT

Dimension der Tabelle? Bedeutung der Einträge?

- Zwei Tabellen $T[0, \dots, n]$ und $V[1, \dots, n]$. Zu Beginn $T[0] \leftarrow -\infty$, $T[i] \leftarrow \infty \forall i > 1$

Berechnung eines Eintrags

- Einträge in T aufsteigend sortiert. Für jeden Neueintrag a_{k+1} binäre Suche nach l , so dass $T[l] < a_k < T[l+1]$. Setze $T[l+1] \leftarrow a_{k+1}$. Setze $V[k] = T[l]$.

514

Dynamic Programming Algorithmus LAT

Berechnungsreihenfolge

- Beim Traversieren der Liste werden die Einträge $T[k]$ und $V[k]$ mit aufsteigendem k berechnet.

Wie kann sich Lösung aus der Tabelle konstruieren lassen?

- Suche das grösste l mit $T[l] < \infty$. l ist der letzte Index der LAT. Suche von l ausgehend den Index $i < l$, so dass $V[l] = A[i]$, i ist der Vorgänger von l . Repetiere mit $l \leftarrow i$ bis $T[l] = -\infty$

515

Analyse

Berechnung Tabelle:

- Initialisierung: $\Theta(n)$ Operationen
- Berechnung k -ter Eintrag: Binäre Suche auf Positionen $\{1, \dots, k\}$ plus konstante Anzahl Zuweisungen.

$$\sum_{k=1}^n (\log k + \mathcal{O}(1)) = \mathcal{O}(n) + \sum_{k=1}^n \log(k) = \Theta(n \log n).$$

- Rekonstruktion:** Traversiere A von rechts nach links: $\mathcal{O}(n)$.

Somit Gesamtlaufzeit

$$\Theta(n \log n).$$

516

Längste Gemeinsame Teilfolge

Teilfolgen einer Zeichenkette:

Teilfolgen(KUH): (), (*K*), (*U*), (*H*), (*KU*), (*KH*), (*UH*), (*KUH*)

Problem:

- **Eingabe:** Zwei Zeichenketten $A = (a_1, \dots, a_m)$, $B = (b_1, \dots, b_n)$ der Längen $m > 0$ und $n > 0$.
- **Gesucht:** Eine längste gemeinsame Teilfolge (LGT) von A und B .

Sinnvolle Anwendung: Ähnlichkeit von DNA-Sequenzen in der Biologie.

517

Längste Gemeinsame Teilfolge

Beispiele:

$LGT(IGEL, KATZE) = E$, $LGT(TIGER, ZIEGE) = IGE$

Ideen zur Lösung?

T I G E R
Z I E G E

518

Rekursives Vorgehen

Annahme: Lösungen $L(i, j)$ bekannt für $A[1, \dots, i]$ und $B[1, \dots, j]$ für alle $1 \leq i \leq m$ und $1 \leq j \leq n$, jedoch nicht für $i = m$ und $j = n$.

T I G E R
Z I E G E

Betrachten Zeichen a_m, b_n . Drei Möglichkeiten:

- 1 A wird um ein Leerzeichen erweitert. $L(m, n) = L(m, n - 1)$
- 2 B wird um ein Leerzeichen erweitert. $L(m, n) = L(m - 1, n)$
- 3 $L(m, n) = L(m - 1, n - 1) + \delta_{mn}$ mit $\delta_{mn} = 1$ wenn $a_m = b_n$ und $\delta_{mn} = 0$ sonst

519

Rekursion

$L(m, n) \leftarrow \max \{L(m - 1, n - 1) + \delta_{mn}, L(m, n - 1), L(m - 1, n)\}$

für $m, n > 0$ und Randfälle $L(\cdot, 0) = 0$, $L(0, \cdot) = 0$.

	\emptyset	Z	I	E	G	E
\emptyset	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0
I	0	0	1	1	1	1
G	0	0	1	1	2	2
E	0	0	1	2	2	3
R	0	0	1	2	2	3

520

Dynamic Programming Algorithmus LGT

Dimension der Tabelle? Bedeutung der Einträge?

- 1 Tabelle $L[0, \dots, m][0, \dots, n]$. $L[i, j]$: Länge einer LGT der Zeichenketten (a_1, \dots, a_i) und (b_1, \dots, b_j)

Berechnung eines Eintrags

- 2 $L[0, i] \leftarrow 0 \forall 0 \leq i \leq m$, $L[j, 0] \leftarrow 0 \forall 0 \leq j \leq n$. Berechnung von $L[i, j]$ sonst mit $L[i, j] = \max(L[i-1, j-1] + \delta_{ij}, L[i, j-1], L[i-1, j])$.

521

Dynamic Programming Algorithmus LGT

Berechnungsreihenfolge

- 3 Abhängigkeiten berücksichtigen: z.B. Zeilen aufsteigend und innerhalb von Zeilen Spalten aufsteigend.

Wie kann sich Lösung aus der Tabelle konstruieren lassen?

- 4 Beginne bei $j = m, i = n$. Falls $a_i = b_j$ gilt, gib a_i aus, sonst falls $L[i, j] = L[i, j-1]$ fahre mit $j \leftarrow j-1$ fort, sonst falls $L[i, j] = L[i-1, j]$ fahre mit $i \leftarrow i-1$ fort. Terminiere für $i = 0$ oder $j = 0$.

522

Analyse LGT

- Anzahl Tabelleneinträge: $(m+1) \cdot (n+1)$.
- Berechnung jeweils mit konstanter Anzahl Zuweisungen und Vergleichen. Anzahl Schritte $\mathcal{O}(mn)$
- Bestimmen der Lösung: jeweils Verringerung von i oder j . Maximal $\mathcal{O}(n+m)$ Schritte.

Laufzeit insgesamt:

$$\mathcal{O}(mn).$$

523

Editierdistanz

Editierdistanz von zwei Zeichenketten $A = (a_1, \dots, a_m)$,
 $B = (b_1, \dots, b_m)$.

Editieroperationen:

- Einfügen eines Zeichens
- Löschen eines Zeichens
- Änderung eines Zeichens

Frage: Wie viele Editieroperationen sind mindestens nötig, um eine gegebene Zeichenkette A in eine Zeichenkette B zu überführen.

TIGER ZIGER ZIEGER ZIEGE

Editierdistanz= Levenshtein Distanz

524

Vorgehen?

- Zweidimensionale Tabelle $E[0, \dots, m][0, \dots, n]$ mit Editierdistanzen $E[i, j]$ zwischen Worten $A_i = (a_1, \dots, a_i)$ und $B_j = (b_1, \dots, b_j)$.
- Betrachte die jeweils letzten Zeichen von A_i und B_j . Drei mögliche Fälle:

- 1 Lösche letztes Zeichen von A_i :²⁶ $E[i-1, j] + 1$.
- 2 Füge Zeichen zu A_i hinzu:²⁷ $E[i, j-1] + 1$.
- 3 Ersetze A_i durch B_j : $E[i-1, j-1] + 1 - \delta_{ij}$.

$$E[i, j] \leftarrow \min \{ E[i-1, j] + 1, E[i, j-1] + 1, E[i-1, j-1] + 1 - \delta_{ij} \}$$

²⁶oder füge Zeichen zu B_j hinzu

²⁷oder lösche letztes Zeichen von B_j

DP Tabelle

$$E[i, j] \leftarrow \min \{ E[i-1, j] + 1, E[i, j-1] + 1, E[i-1, j-1] + 1 - \delta_{ij} \}$$

	\emptyset	Z	I	E	G	E
\emptyset	0	1	2	3	4	5
T	1	1	2	3	4	5
I	2	2	1	2	3	4
G	3	3	2	2	2	3
E	4	4	3	2	3	2
R	5	5	4	3	3	3

Algorithmus: Übung!

525

526

Matrix-Kettenmultiplikation

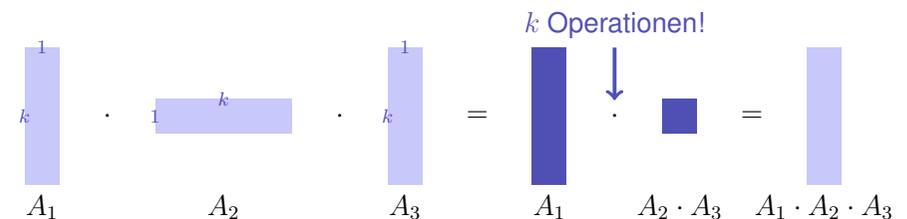
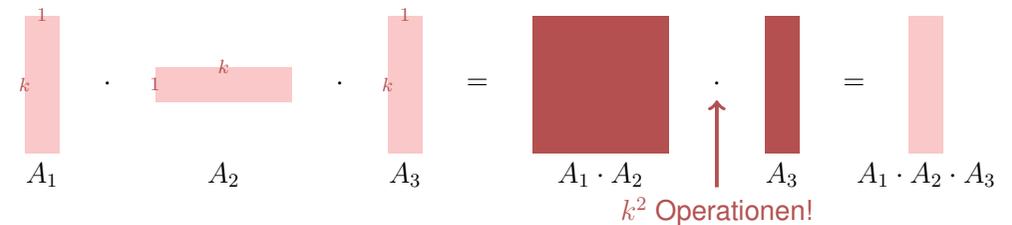
Aufgabe: Berechnung des Produktes $A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ von Matrizen A_1, \dots, A_n .

Matrizenmultiplikation ist assoziativ, d.h. Klammerung kann beliebig gewählt.

Ziel: möglichst effiziente Berechnung des Produktes.

Annahme: Multiplikation einer $(r \times s)$ -Matrix mit einer $(s \times u)$ -Matrix hat Kosten $r \cdot s \cdot u$.

Macht das einen Unterschied?



527

528

Rekursion

- Annahme, dass die bestmögliche Berechnung von $(A_1 \cdot A_2 \cdots A_i)$ und $(A_{i+1} \cdot A_{i+2} \cdots A_n)$ für jedes i bereits bekannt ist.
- Bestimme bestes i , fertig.

$n \times n$ -Tabelle M . Eintrag $M[p, q]$ enthält Kosten der besten Klammerung von $(A_p \cdot A_{p+1} \cdots A_q)$.

$$M[p, q] \leftarrow \min_{p \leq i < q} (M[p, i] + M[i + 1, q] + \text{Kosten letzte Multiplikation})$$

529

Berechnung der DP-Tabelle

- Randfälle: $M[p, p] \leftarrow 0$ für alle $1 \leq p \leq n$.
- Berechnung von $M[p, q]$ hängt ab von $M[i, j]$ mit $p \leq i \leq j \leq q$, $(i, j) \neq (p, q)$.
Insbesondere hängt $M[p, q]$ höchstens ab von Einträgen $M[i, j]$ mit $i - j < q - p$.
Folgerung: Fülle die Tabelle von der Diagonale ausgehend.

530

Analyse

DP-Tabelle hat n^2 Einträge. Berechnung eines Eintrages bedingt Betrachten von bis zu $n - 1$ anderen Einträgen.

Gesamtlaufzeit $\mathcal{O}(n^3)$.

Auslesen der Reihenfolge aus M : Übung!

531

Exkurs: Matrixmultiplikation

Betrachten Multiplikation zweier $n \times n$ -Matrizen.

Seien

$$A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}, B = (b_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}, C = (c_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}, \\ C = A \cdot B$$

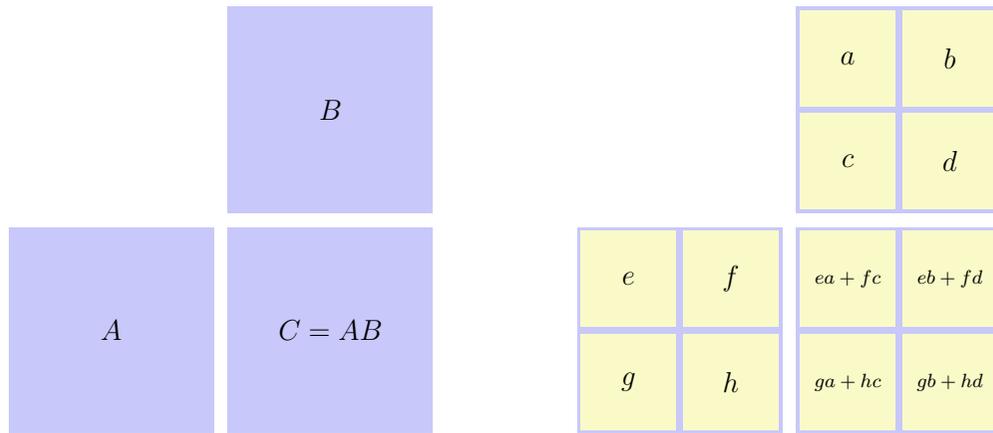
dann

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj}.$$

Naiver Algorithmus benötigt $\Theta(n^3)$ elementare Multiplikationen.

532

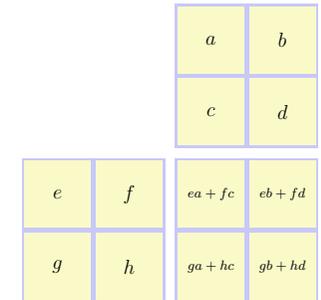
Divide and Conquer



533

Divide and Conquer

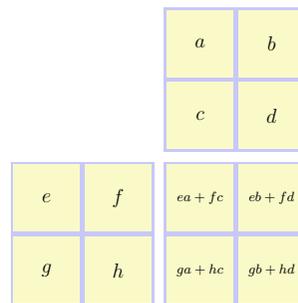
- Annahme $n = 2^k$.
- Anzahl elementare Multiplikationen:
 $M(n) = 8M(n/2), M(1) = 1$.
- Ergibt $M(n) = 8^{\log_2 n} = n^{\log_2 8} = n^3$. Kein Gewinn 😞



534

Strassens Matrixmultiplikation

- **Nichttriviale Beobachtung von Strassen (1969):** Es genügt die Berechnung der sieben Produkte $A = (e + h) \cdot (a + d)$, $B = (g + h) \cdot a$, $C = e \cdot (b - d)$, $D = h \cdot (c - a)$, $E = (e + f) \cdot d$, $F = (g - e) \cdot (a + b)$, $G = (f - h) \cdot (c + d)$. Denn:
 $ea + fc = A + D - E + G$, $eb + fd = C + E$,
 $ga + hc = B + D$, $gb + hd = A - B + C + F$.
- **Damit ergibt sich**
 $M'(n) = 7M(n/2), M'(1) = 1$.
Also $M'(n) = 7^{\log_2 n} = n^{\log_2 7} \approx n^{2.807}$.
- **Schnellster bekannter Algorithmus:**
 $\mathcal{O}(n^{2.37})$



535

20. Dynamic Programming II

Subset Sum Problem, Rucksackproblem, Greedy Algorithmus, Lösungen mit dynamischer Programmierung, FPTAS, Optimaler Suchbaum [Ottman/Widmayer, Kap. 7.2, 7.3, 5.7, Cormen et al, Kap. 15,35.5]

536

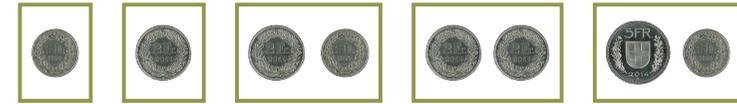
Aufgabe

Hannes und Niklas sollen eine grosse Menge Geschenke unterschiedlichen monetären Wertes bekommen.

Die Eltern wollen die Geschenke vorher so gerecht aufteilen, dass kein Streit eintritt. Frage: wie geht das?

Antwort: wer Kinder hat, der weiss dass diese Aufgabe keine Lösung hat.

Realistischere Aufgabe



Teile obige "Gegenstände" so auf zwei Mengen auf, dass beide Mengen den gleichen Wert haben.

Eine Lösung:



537

538

Subset Sum Problem

Seien $n \in \mathbb{N}$ Zahlen $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{N}$ gegeben.

Ziel: Entscheide, ob eine Auswahl $I \subseteq \{1, \dots, n\}$ existiert mit

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{i \in \{1, \dots, n\} \setminus I} a_i.$$

Naiver Algorithmus

Prüfe für jeden Bitvektor $b = (b_1, \dots, b_n) \in \{0, 1\}^n$, ob

$$\sum_{i=1}^n b_i a_i \stackrel{?}{=} \sum_{i=1}^n (1 - b_i) a_i$$

Schlechtester Fall: n Schritte für jeden der 2^n Bitvektoren b . Anzahl Schritte: $\mathcal{O}(n \cdot 2^n)$.

539

540

Algorithmus mit Aufteilung

- Zerlege Eingabe in zwei gleich grosse Teile: $a_1, \dots, a_{n/2}$ und $a_{n/2+1}, \dots, a_n$.
- Iteriere über alle Teilmengen der beiden Teile und berechne Teilsummen $S_1^k, \dots, S_{2^{n/2}}^k$ ($k = 1, 2$).
- Sortiere die Teilsummen: $S_1^k \leq S_2^k \leq \dots \leq S_{2^{n/2}}^k$.
- Prüfe ob es Teilsummen gibt, so dass $S_i^1 + S_j^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i =: h$
 - Beginne mit $i = 1, j = 2^{n/2}$.
 - Gilt $S_i^1 + S_j^2 = h$ dann fertig
 - Gilt $S_i^1 + S_j^2 > h$ dann $j \leftarrow j - 1$
 - Gilt $S_i^1 + S_j^2 < h$ dann $i \leftarrow i + 1$

Beispiel

Menge $\{1, 6, 2, 3, 4\}$ mit Wertesumme 16 hat 32 Teilmengen.
Aufteilung in $\{1, 6\}$, $\{2, 3, 4\}$ ergibt folgende 12 Teilmengen mit Wertesummen:

$\{1, 6\}$				$\{2, 3, 4\}$							
{}	{1}	{6}	{1, 6}	{}	{2}	{3}	{4}	{2, 3}	{2, 4}	{3, 4}	{2, 3, 4}
0	1	6	7	0	2	3	4	5	6	7	9

⇔ Eine Lösung: $\{1, 3, 4\}$

541

542

Analyse

- Teilsummegenerierung in jedem Teil: $\mathcal{O}(2^{n/2} \cdot n)$.
- Sortieren jeweils: $\mathcal{O}(2^{n/2} \log(2^{n/2})) = \mathcal{O}(n 2^{n/2})$.
- Zusammenführen: $\mathcal{O}(2^{n/2})$

Gesamtlaufzeit

$$\mathcal{O}(n \cdot 2^{n/2}) = \mathcal{O}(n (\sqrt{2})^n)$$

Wesentliche Verbesserung gegenüber ganz naivem Verfahren – aber immer noch exponentiell!

543

Dynamische Programmierung

Aufgabe: sei $z = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i$. Suche Auswahl $I \subset \{1, \dots, n\}$, so dass $\sum_{i \in I} a_i = z$.

DP-Tabelle: $[0, \dots, n] \times [0, \dots, z]$ -Tabelle T mit Wahrheitseinträgen. $T[k, s]$ gibt an, ob es eine Auswahl $I_k \subset \{1, \dots, k\}$ gibt, so dass $\sum_{i \in I_k} a_i = s$.

Initialisierung: $T[0, 0] = \text{true}$. $T[0, s] = \text{false}$ für $s > 0$.

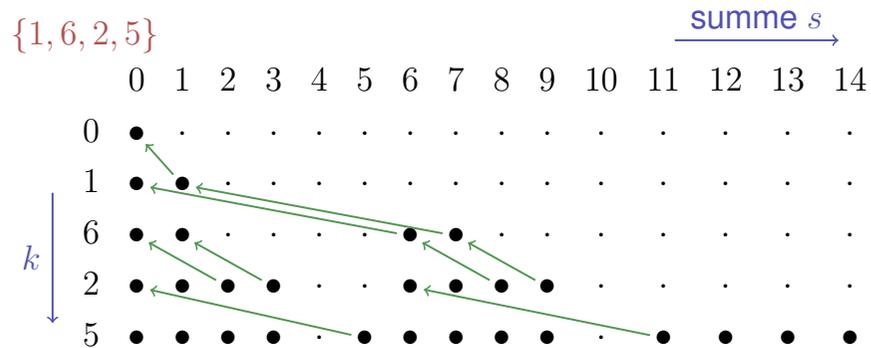
Berechnung:

$$T[k, s] \leftarrow \begin{cases} T[k-1, s] & \text{falls } s < a_k \\ T[k-1, s] \vee T[k-1, s - a_k] & \text{falls } s \geq a_k \end{cases}$$

für aufsteigende k und innerhalb k dann s .

544

Beispiel



Auslesen der Lösung: wenn $T[k, s] = T[k - 1, s]$ dann a_k nicht benutzt und bei $T[k - 1, s]$ weiterfahren, andernfalls a_k benutzt und bei $T[k - 1, s - a_k]$ weiterfahren.

545

Rätselhaftes

Der Algorithmus benötigt $\mathcal{O}(n \cdot z)$ Elementaroperationen.

Was ist denn jetzt los? Hat der Algorithmus plötzlich polynomielle Laufzeit?

546

Aufgelöst

Der Algorithmus hat nicht unbedingt eine polynomielle Laufzeit. z ist eine **Zahl** und keine **Anzahl**!

Eingabelänge des Algorithmus \cong Anzahl Bits zur *vernünftigen* Repräsentation der Daten. Bei der Zahl z wäre das $\zeta = \log z$.

Also: Algorithmus benötigt $\mathcal{O}(n \cdot 2^\zeta)$ Elementaroperationen und hat exponentielle Laufzeit in ζ .

Sollte z allerdings polynomiell sein in n , dann hat der Algorithmus polynomielle Laufzeit in n . Das nennt man **pseudopolynomiell**.

547

NP

Man weiss, dass der Subset-Sum Algorithmus zur Klasse der **NP**-vollständigen Probleme gehört (und somit **NP-schwer** ist).

P: Menge aller in Polynomialzeit lösbarer Probleme.

NP: Menge aller **N**ichtdeterministisch in **P**olynomialzeit lösbarer Probleme.

Implikationen:

- NP enthält P.
- Probleme in Polynomialzeit **verifizierbar**.
- Unter der (noch?) unbewiesenen²⁸ Annahme, dass $NP \neq P$, gibt es für das Problem **keinen Algorithmus mit polynomieller Laufzeit**.

²⁸Die bedeutendste ungelöste Frage der theoretischen Informatik!

548

Das Rucksackproblem

Wir packen unseren Koffer und nehmen mit ...

- Zahnbürste
- Hantelset
- Kaffemaschine
- Oh jeh – zu schwer.
- Zahnbürste
- Luftballon
- Taschenmesser
- Ausweis
- Hantelset
- Oh jeh – zu schwer.
- Zahnbürste
- Kaffemaschine
- Taschenmesser
- Ausweis
- Oh jeh – zu schwer.
- Oh jeh – zu schwer.

Wollen möglichst viel mitnehmen. Manche Dinge sind uns aber wichtiger als andere.

549

Rucksackproblem (engl. Knapsack problem)

Gegeben:

- Menge von $n \in \mathbb{N}$ Gegenständen $\{1, \dots, n\}$.
- Jeder Gegenstand i hat Nutzwert $v_i \in \mathbb{N}$ und Gewicht $w_i \in \mathbb{N}$.
- Maximalgewicht $W \in \mathbb{N}$.
- Bezeichnen die Eingabe mit $E = (v_i, w_i)_{i=1, \dots, n}$.

Gesucht:

eine Auswahl $I \subseteq \{1, \dots, n\}$ die $\sum_{i \in I} v_i$ maximiert unter $\sum_{i \in I} w_i \leq W$.

550

Gierige (engl. greedy) Heuristik

Sortiere die Gegenstände absteigend nach Nutzen pro Gewicht v_i/w_i : Permutation p mit $v_{p_i}/w_{p_i} \geq v_{p_{i+1}}/w_{p_{i+1}}$

Füge Gegenstände in dieser Reihenfolge hinzu ($I \leftarrow I \cup \{p_i\}$), sofern das zulässige Gesamtgewicht dadurch nicht überschritten wird.

Das ist schnell: $\Theta(n \log n)$ für Sortieren und $\Theta(n)$ für die Auswahl. Aber ist es auch gut?

551

Gegenbeispiel zur greedy strategy

$$v_1 = 1 \quad w_1 = 1 \quad v_1/w_1 = 1$$

$$v_2 = W - 1 \quad w_2 = W \quad v_2/w_2 = \frac{W-1}{W}$$

Greedy Algorithmus wählt $\{v_1\}$ mit Nutzwert 1.

Beste Auswahl: $\{v_2\}$ mit Nutzwert $W - 1$ und Gewicht W .

Greedy kann also beliebig schlecht sein.

552

Dynamic Programming

Unterteile das Maximalgewicht.

Dreidimensionale Tabelle $m[i, w, v]$ ("machbar") aus Wahrheitswerten.

$m[i, w, v] = \text{true}$ genau dann wenn

- Auswahl der ersten i Teile existiert ($0 \leq i \leq n$)
- deren Gesamtgewicht höchstens w ($0 \leq w \leq W$) und
- Nutzen mindestens v ($0 \leq v \leq \sum_{i=1}^n v_i$) ist.

553

Berechnung der DP Tabelle

Initial

- $m[i, w, 0] \leftarrow \text{true}$ für alle $i \geq 0$ und alle $w \geq 0$.
- $m[0, w, v] \leftarrow \text{false}$ für alle $w \geq 0$ und alle $v > 0$.

Berechnung

$$m[i, w, v] \leftarrow \begin{cases} m[i-1, w, v] \vee m[i-1, w-w_i, v-v_i] & \text{falls } w \geq w_i \text{ und } v \geq v_i \\ m[i-1, w, v] & \text{sonst.} \end{cases}$$

aufsteigend nach i und für festes i aufsteigend nach w und für festes i und w aufsteigend nach v .

Lösung: Grösstes v , so dass $m[i, w, v] = \text{true}$ für ein i und w .

554

Beobachtung

Nach der Definition des Problems gilt offensichtlich, dass

- für $m[i, w, v] = \text{true}$ gilt:
 - $m[i', w, v] = \text{true} \forall i' \geq i$,
 - $m[i, w', v] = \text{true} \forall w' \geq w$,
 - $m[i, w, v'] = \text{true} \forall v' \leq v$.
- für $m[i, w, v] = \text{false}$ gilt:
 - $m[i', w, v] = \text{false} \forall i' \leq i$,
 - $m[i, w', v] = \text{false} \forall w' \leq w$,
 - $m[i, w, v'] = \text{false} \forall v' \geq v$.

Das ist ein starker Hinweis darauf, dass wir keine 3d-Tabelle benötigen.

DP Tabelle mit 2 Dimensionen

Tabelleneintrag $t[i, w]$ enthält statt Wahrheitswerten das jeweils grösste v , das erreichbar ist²⁹ mit

- den Gegenständen $1, \dots, i$ ($0 \leq i \leq n$)
- bei höchstem zulässigen Gewicht w ($0 \leq w \leq W$).

²⁹So etwas ähnliches hätten wir beim Subset Sum Problem auch machen können, um die dünnbesetzte Tabelle etwas zu verkleinern

555

556

Berechnung

Initial

- $t[0, w] \leftarrow 0$ für alle $w \geq 0$.

Berechnung

$$t[i, w] \leftarrow \begin{cases} t[i-1, w] & \text{falls } w < w_i \\ \max\{t[i-1, w], t[i-1, w-w_i] + v_i\} & \text{sonst.} \end{cases}$$

aufsteigend nach i und für festes i aufsteigend nach w .

Lösung steht in $t[n, w]$

Beispiel

$$E = \{(2, 3), (4, 5), (1, 1)\}$$

	w							
	0	1	2	3	4	5	6	7
\emptyset	0	0	0	0	0	0	0	0
(2, 3)	0	0	3	3	3	3	3	3
(4, 5)	0	0	3	3	5	5	8	8
(1, 1)	0	1	3	4	5	6	8	9

Auslesen der Lösung: wenn $t[i, w] = t[i-1, w]$ dann Gegenstand i nicht benutzt und bei $t[i-1, w]$ weiterfahren, andernfalls benutzt und bei $t[i-1, w-w_i]$ weiterfahren.

557

558

Analyse

Die beiden Algorithmen für das Rucksackproblem haben eine Laufzeit in $\Theta(n \cdot W \cdot \sum_{i=1}^n v_i)$ (3d-Tabelle) und $\Theta(n \cdot W)$ (2d-Tabelle) und sind beide damit pseudopolynomiell, liefern aber das bestmögliche Resultat.

Der greedy Algorithmus ist sehr schnell, liefert aber unter Umständen beliebig schlechte Resultate.

Im folgenden beschäftigen wir uns mit einer Lösung dazwischen.

Approximation

Sei ein $\varepsilon \in (0, 1)$ gegeben. Sei I_{opt} eine bestmögliche Auswahl.

Suchen eine gültige Auswahl I mit

$$\sum_{i \in I} v_i \geq (1 - \varepsilon) \sum_{i \in I_{\text{opt}}} v_i.$$

Summe der Gewichte darf W natürlich in keinem Fall überschreiten.

559

560

Andere Formulierung des Algorithmus

Bisher: Gewichtsschranke $w \rightarrow$ maximaler Nutzen v

Umkehrung: Nutzen $v \rightarrow$ minimales Gewicht w

\Rightarrow Alternative Tabelle: $g[i, v]$ gibt das minimale Gewicht an, welches

- eine Auswahl der ersten i Gegenstände ($0 \leq i \leq n$) hat, die
- einen Nutzen von genau v aufweist ($0 \leq v \leq \sum_{i=1}^n v_i$).

Berechnung

Initial

- $g[0, 0] \leftarrow 0$
- $g[0, v] \leftarrow \infty$ (Nutzen v kann mit 0 Gegenständen nie erreicht werden.).

Berechnung

$$g[i, v] \leftarrow \begin{cases} g[i-1, v] & \text{falls } v < v_i \\ \min\{g[i-1, v], g[i-1, v-v_i] + w_i\} & \text{sonst.} \end{cases}$$

aufsteigend nach i und für festes i aufsteigend nach v .

Lösung ist der grösste Index v mit $g[n, v] \leq w$.

561

562

Beispiel

$E = \{(2, 3), (4, 5), (1, 1)\}$

	v									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\emptyset	0	∞								
(2, 3)	0	∞	∞	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞
(4, 5)	0	∞	∞	2	∞	4	∞	∞	6	∞
(1, 1)	0	1	∞	2	3	4	5	∞	6	7

Note: Green arrows in the original image point from (2,3) to (4,5) and from (4,5) to (1,1) in the table above.

Auslesen der Lösung: wenn $g[i, v] = g[i-1, v]$ dann Gegenstand i nicht benutzt und bei $g[i-1, v]$ weiterfahren, andernfalls benutzt und bei $g[i-1, v-v_i]$ weiterfahren.

563

Der Approximationstrick

Pseudopolynomielle Laufzeit wird polynomiell, wenn vorkommenden Werte in Polynom der Eingabelänge beschränkt werden können.

Sei $K > 0$ *geeignet* gewählt. Ersetze die Nutzwerte v_i durch "gerundete Werte" $\tilde{v}_i = \lfloor v_i/K \rfloor$ und erhalte eine neue Eingabe $E' = (w_i, \tilde{v}_i)_{i=1..n}$.

Wenden nun den Algorithmus auf Eingabe E' mit derselben Gewichtsschranke W an.

564

Idee

Beispiel $K = 5$

Eingabe Nutzwerte

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, ..., 98, 99, 100

→

0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 2, ..., 19, 19, 20

Offensichtlich weniger unterschiedliche Nutzwerte

Eigenschaften des neuen Algorithmus

- Auswahl von Gegenständen aus E' ist genauso gültig wie die aus E . Gewicht unverändert!
- Laufzeit des Algorithmus ist beschränkt durch $\mathcal{O}(n^2 \cdot v_{\max}/K)$
($v_{\max} := \max\{v_i | 1 \leq i \leq n\}$)

565

566

Wie gut ist die Approximation?

Es gilt

$$v_i - K \leq K \cdot \left\lfloor \frac{v_i}{K} \right\rfloor = K \cdot \tilde{v}_i \leq v_i$$

Sei I'_{opt} eine optimale Lösung von E' . Damit

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i \in I_{opt}} v_i \right) - n \cdot K &\stackrel{|I_{opt}| \leq n}{\leq} \sum_{i \in I_{opt}} (v_i - K) \leq \sum_{i \in I_{opt}} (K \cdot \tilde{v}_i) = K \sum_{i \in I_{opt}} \tilde{v}_i \\ &\stackrel{I'_{opt} \text{ optimal}}{\leq} K \sum_{i \in I'_{opt}} \tilde{v}_i = \sum_{i \in I'_{opt}} K \cdot \tilde{v}_i \leq \sum_{i \in I'_{opt}} v_i. \end{aligned}$$

Wahl von K

Forderung:

$$\sum_{i \in I'} v_i \geq (1 - \varepsilon) \sum_{i \in I_{opt}} v_i.$$

Ungleichung von oben:

$$\sum_{i \in I'_{opt}} v_i \geq \left(\sum_{i \in I_{opt}} v_i \right) - n \cdot K$$

$$\text{Also: } K = \varepsilon \frac{\sum_{i \in I_{opt}} v_i}{n}.$$

567

568

Wahl von K

Wähle $K = \varepsilon \frac{\sum_{i \in I_{\text{opt}}} v_i}{n}$. Die optimale Summe ist aber unbekannt, daher wählen wir $K' = \varepsilon \frac{v_{\text{max}}}{n}$.³⁰

Es gilt $v_{\text{max}} \leq \sum_{i \in I_{\text{opt}}} v_i$ und somit $K' \leq K$ und die Approximation ist sogar etwas besser.

Die Laufzeit des Algorithmus ist beschränkt durch

$$\mathcal{O}(n^2 \cdot v_{\text{max}}/K') = \mathcal{O}(n^2 \cdot v_{\text{max}}/(\varepsilon \cdot v_{\text{max}}/n)) = \mathcal{O}(n^3/\varepsilon).$$

³⁰Wir können annehmen, dass vorgängig alle Gegenstände i mit $w_i > W$ entfernt wurden.

FPTAS

Solche Familie von Algorithmen nennt man **Approximationsschema**: die Wahl von ε steuert Laufzeit und Approximationsgüte.

Die Laufzeit $\mathcal{O}(n^3/\varepsilon)$ ist ein Polynom in n und in $\frac{1}{\varepsilon}$. Daher nennt man das Verfahren auch ein voll polynomiell Approximationsschema **FPTAS - Fully Polynomial Time Approximation Scheme**

Optimale binäre Suchbäume

Gegeben: Suchwahrscheinlichkeiten p_i zu jedem Schlüssel k_i ($i = 1, \dots, n$) und q_i zu jedem Intervall d_i ($i = 0, \dots, n$) zwischen Suchschlüsseln eines binären Suchbaumes. $\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=0}^n q_i = 1$.

Gesucht: Optimaler Suchbaum T mit Schlüsseltiefen $\text{depth}(\cdot)$, welcher die erwarteten Suchkosten

$$\begin{aligned} C(T) &= \sum_{i=1}^n p_i \cdot (\text{depth}(k_i) + 1) + \sum_{i=0}^n q_i \cdot (\text{depth}(d_i) + 1) \\ &= 1 + \sum_{i=1}^n p_i \cdot \text{depth}(k_i) + \sum_{i=0}^n q_i \cdot \text{depth}(d_i) \end{aligned}$$

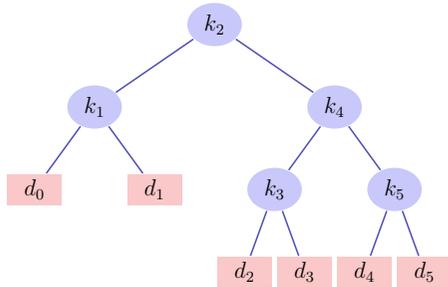
minimiert.

Beispiel

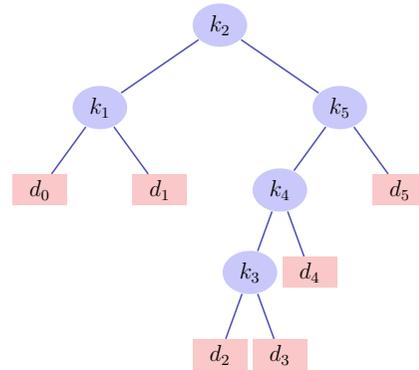
Erwartete Häufigkeiten

i	0	1	2	3	4	5
p_i		0.15	0.10	0.05	0.10	0.20
q_i	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.10

Beispiel



Suchbaum mit erwarteten
Kosten 2.8



Suchbaum mit erwarteten
Kosten 2.75

Struktur eines optimalen Suchbaumes

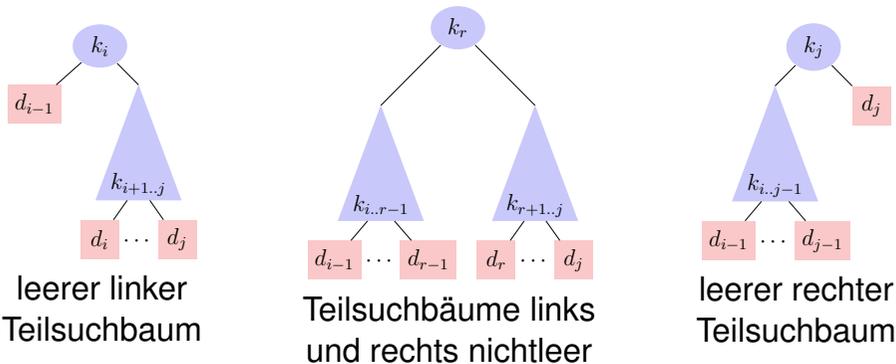
- Teilsuchbaum mit Schlüsseln k_i, \dots, k_j und Intervallschlüsseln d_{i-1}, \dots, d_j muss für das entsprechende Teilproblem optimal sein.³¹
- Betrachten aller Teilsuchbäume mit Wurzel k_r , $i \leq r \leq j$ und optimalen Teilbäumen k_i, \dots, k_{r-1} und k_{r+1}, \dots, k_j

³¹Das übliche Argument: wäre er nicht optimal, könnte er durch eine bessere Lösung ersetzt werden, welche die Gesamtlösung verbessert.

573

574

Teilsuchbäume



Erwartete Suchkosten

Sei $\text{depth}_T(k)$ die Tiefe des Knotens im Teilbaum T . Sei k_r die Wurzel eines Teilbaumes T_r und T_{L_r} und T_{R_r} der linke und rechte Teilbaum von T_r . Dann

$$\text{depth}_T(k_i) = \text{depth}_{T_{L_r}}(k_i) + 1, \quad (i < r)$$

$$\text{depth}_T(k_i) = \text{depth}_{T_{R_r}}(k_i) + 1, \quad (i > r)$$

575

576

Erwartete Suchkosten

Seien $e[i, j]$ die Kosten eines optimalen Suchbaumes mit Knoten k_i, \dots, k_j .

Basisfall: $e[i, i - 1]$, erwartete Suchkosten d_{i-1}

Sei $w(i, j) = \sum_{l=i}^j p_l + \sum_{l=i-1}^j q_l$.

Wenn k_r die Wurzel eines optimalen Teilbaumes mit Schlüsseln k_i, \dots, k_j , dann

$$e[i, j] = p_r + (e[i, r - 1] + w(i, r - 1)) + (e[r + 1, j] + w(r + 1, j))$$

mit $w(i, j) = w(i, r - 1) + p_r + w(r + 1, j)$:

$$e[i, j] = e[i, r - 1] + e[r + 1, j] + w(i, j).$$

577

Dynamic Programming

$$e[i, j] = \begin{cases} q_{i-1} & \text{falls } j = i - 1, \\ \min_{i \leq r \leq j} \{e[i, r - 1] + e[r + 1, j] + w[i, j]\} & \text{falls } i \leq j \end{cases}$$

578

Berechnung

Tabellen $e[1 \dots n + 1, 0 \dots n], w[1 \dots n + 1, 0 \dots m], r[1 \dots n, 1 \dots n]$
Initial

■ $e[i, i - 1] \leftarrow q_{i-1}, w[i, i - 1] \leftarrow q_{i-1}$ für alle $1 \leq i \leq n + 1$.

Berechnung

$$w[i, j] = w[i, j - 1] + p_j + q_j$$

$$e[i, j] = \min_{i \leq r \leq j} \{e[i, r - 1] + e[r + 1, j] + w[i, j]\}$$

$$r[i, j] = \arg \min_{i \leq r \leq j} \{e[i, r - 1] + e[r + 1, j] + w[i, j]\}$$

für Intervalle $[i, j]$ mit ansteigenden Längen $l = 1, \dots, n$, jeweils für $i = 1, \dots, n - l + 1$. Resultat steht in $e[1, n]$, Rekonstruktion via r .
Laufzeit $\Theta(n^3)$.

579

Beispiel

i	0	1	2	3	4	5
p_i		0.15	0.10	0.05	0.10	0.20
q_i	0.05	0.10	0.05	0.05	0.05	0.10

e

j	1	2	3	4	5	6
0	0.05					
1	0.45	0.10				
2	0.90	0.40	0.05			
3	1.25	0.70	0.25	0.05		
4	1.75	1.20	0.60	0.30	0.05	
5	2.75	2.00	1.30	0.90	0.50	0.10

w

j	1	2	3	4	5	6
0	0.05					
1	0.30	0.10				
2	0.45	0.25	0.05			
3	0.55	0.35	0.15	0.05		
4	0.70	0.50	0.30	0.20	0.05	
5	1.00	0.80	0.60	0.50	0.35	0.10

r

j	1	2	3	4	5
1	1				
2	1	2			
3	2	2	3		
4	2	2	4	4	
5	2	4	5	5	5

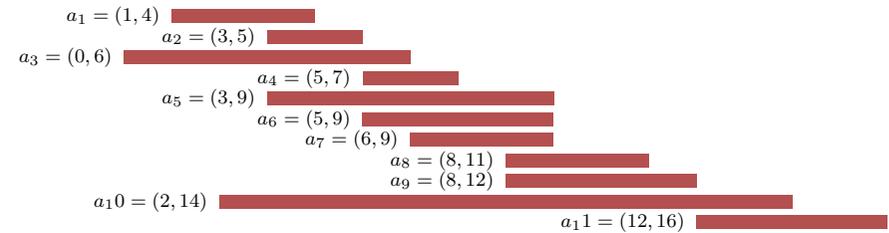
580

21. Greedy Algorithmen

Aktivitätenauswahl, Fractional Knapsack Problem, Huffman Coding
Cormen et al, Kap. 16.1, 16.3

Aktivitäten Auswahl

Koordination von Aktivitäten, die gemeinsame Resource exklusiv nutzen. Aktivitäten $S = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ mit Start und Endzeiten $0 \leq s_i \leq f_i < \infty$, aufsteigend sortiert nach Endzeiten.



Aktivitäten-Auswahl-Problem: Finde maximale Teilmenge kompatibler (nichtüberlappender) Aktivitäten.

581

582

Dynamic Programming Ansatz?

Sei $S_{ij} = \{a_k : f_i \leq s_k \wedge f_k \leq s_j\}$. Sei A_{ij} eine maximale Teilmenge kompatibler Aktivitäten aus S_{ij} . Sei ausserdem $a_k \in A_{ij}$ und $A_{ik} = S_{ik} \cap A_{ij}$, $A_{kj} = S_{kj} \cap A_{ij}$, also $A_{ij} = A_{ik} + \{a_k\} + A_{kj}$.



Klar: A_{ik} und A_{kj} müssen maximal sein, sonst wäre $A_{ij} = A_{ik} + \{a_k\} + A_{kj}$ nicht maximal.

583

Dynamic Programming Ansatz?

Sei $c_{ij} = |A_{ij}|$. Dann gilt folgende Rekursion $c_{ij} = c_{ik} + c_{kj} + 1$, also

$$c_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{falls } S_{ij} = \emptyset, \\ \max_{a_k \in S_{ij}} \{c_{ik} + c_{kj} + 1\} & \text{falls } S_{ij} \neq \emptyset. \end{cases}$$

Könnten nun dynamische Programmierung versuchen.

584

Greedy

Intuition: Wähle zuerst die Aktivität, die die früheste Endzeit hat (a_1). Das lässt maximal viel Platz für weitere Aktivitäten.

Verbleibendes Teilproblem: Aktivitäten, die starten nachdem a_1 endet. (Es gibt keine Aktivitäten, die vor dem Start von a_1 enden.)

Greedy

Theorem

Gegeben: Teilproblem S_k , a_m eine Aktivität aus S_k mit frühester Endzeit. Dann ist a_m in einer maximalen Teilmenge von kompatiblen Aktivitäten aus S_k enthalten.

Sei A_k maximal grosse Teilmenge mit kompatiblen Aktivitäten aus S_k und a_j eine Aktivität aus A_k mit frühester Endzeit. Wenn $a_j = a_m \Rightarrow$ fertig. Wenn $a_j \neq a_m$. Dann betrachte $A'_k = A_k - \{a_j\} \cup \{a_m\}$. Dann besteht A'_k aus kompatiblen Aktivitäten und ist auch maximal, denn $|A'_k| = |A_k|$. ■

585

586

Algorithmus RecursiveActivitySelect(s, f, k, n)

Input : Folge von Start und Endzeiten (s_i, f_i) , $1 \leq i \leq n$, $s_i < f_i$, $f_i \leq f_{i+1}$ für alle i . $1 \leq k \leq n$

Output : Maximale Menge kompatibler Aktivitäten.

```
 $m \leftarrow k + 1$ 
while  $m \leq n$  and  $s_m \leq f_k$  do
   $m \leftarrow m + 1$ 
if  $m \leq n$  then
  return  $\{a_m\} \cup \text{RecursiveActivitySelect}(s, f, m, n)$ 
else
  return  $\emptyset$ 
```



587

Algorithmus IterativeActivitySelect(s, f, n)

Input : Folge von Start und Endzeiten (s_i, f_i) , $1 \leq i \leq n$, $s_i < f_i$, $f_i \leq f_{i+1}$ für alle i .

Output : Maximale Menge kompatibler Aktivitäten.

```
 $A \leftarrow \{a_1\}$ 
 $k \leftarrow 1$ 
for  $m \leftarrow 2$  to  $n$  do
  if  $s_m \geq f_k$  then
     $A \leftarrow A \cup \{a_m\}$ 
     $k \leftarrow m$ 
return  $A$ 
```

Laufzeit beider Algorithmen: $\Theta(n)$

588

Das Gebrochene Rucksackproblem

Menge von $n \in \mathbb{N}$ Gegenständen $\{1, \dots, n\}$ gegeben. Jeder Gegenstand i hat Nutzwert $v_i \in \mathbb{N}$ und Gewicht $w_i \in \mathbb{N}$. Das Maximalgewicht ist gegeben als $W \in \mathbb{N}$. Bezeichnen die Eingabe mit $E = (v_i, w_i)_{i=1, \dots, n}$.

Gesucht: Anteile $0 \leq q_i \leq 1$ ($1 \leq i \leq n$) die die Summe $\sum_{i=1}^n q_i \cdot v_i$ maximieren unter $\sum_{i=1}^n q_i \cdot w_i \leq W$.

Gierige Heuristik

Sortiere die Gegenstände absteigend nach Nutzen pro Gewicht v_i/w_i .

Annahme $v_i/w_i \geq v_{i+1}/w_{i+1}$

Sei $j = \max\{0 \leq k \leq n : \sum_{i=1}^k w_i \leq W\}$. Setze

- $q_i = 1$ für alle $1 \leq i \leq j$.
- $q_{j+1} = \frac{W - \sum_{i=1}^j w_i}{w_{j+1}}$.
- $q_i = 0$ für alle $i > j + 1$.

Das ist schnell: $\Theta(n \log n)$ für Sortieren und $\Theta(n)$ für die Berechnung der q_i .

589

590

Korrektheit

Annahme: Optimale Lösung (r_i) ($1 \leq i \leq n$).

Der Rucksack wird immer ganz gefüllt: $\sum_i r_i \cdot w_i = \sum_i q_i \cdot w_i = W$.

Betrachte k : kleinstes i mit $r_i \neq q_i$. Die gierige Heuristik nimmt per Definition so viel wie möglich: $q_k > r_k$. Sei $x = q_k - r_k > 0$.

Konstruiere eine neue Lösung (r'_i) : $r'_i = r_i \forall i < k$. $r'_k = q_k$. Entferne Gewicht $\sum_{i=k+1}^n \delta_i = x \cdot w_k$ von den Gegenständen $k + 1$ bis n . Das geht, denn $\sum_{i=k}^n r_i \cdot w_i = \sum_{i=k}^n q_i \cdot w_i$.

Korrektheit

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^n r'_i v_i &= r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n (r_i w_i - \delta_i) \frac{v_i}{w_i} \\ &\geq r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n r_i w_i \frac{v_i}{w_i} - \delta_i \frac{v_k}{w_k} \\ &= r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} - x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n r_i w_i \frac{v_i}{w_i} = \sum_{i=k}^n r_i v_i. \end{aligned}$$

Also ist (r'_i) auch optimal. Iterative Anwendung dieser Idee erzeugt die Lösung (q_i) .

591

592

Huffman-Codierungen

Ziel: Speicherplatzeffizientes Speichern einer Folge von Zeichen mit einem binären *Zeichencode* aus *Codewörtern*.

Beispiel

File aus 100.000 Buchstaben aus dem Alphabet $\{a, \dots, f\}$

	a	b	c	d	e	f
Häufigkeit (Tausend)	45	13	12	16	9	5
Codewort fester Länge	000	001	010	011	100	101
Codewort variabler Länge	0	101	100	111	1101	1100

Speichergröße (Code fixe Länge): 300.000 bits.

Speichergröße (Code variabler Länge): 224.000 bits.

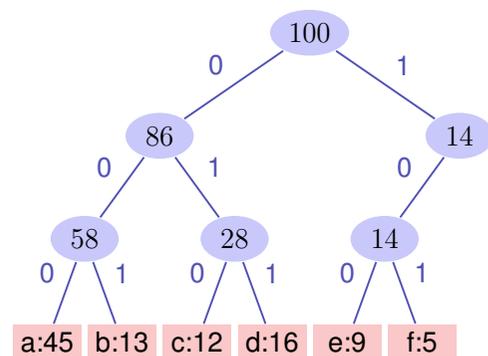
593

Huffman-Codierungen

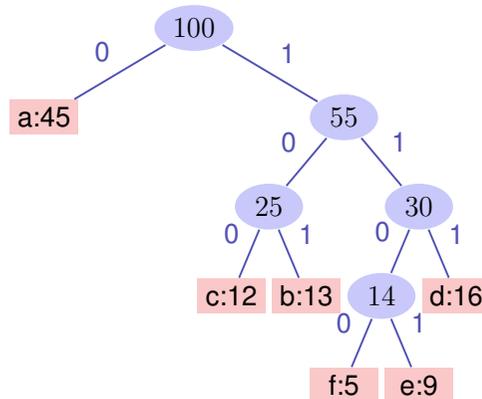
- Betrachten *Präfixcodes*: kein Codewort kann mit einem anderen Codewort beginnen.
- Präfixcodes können im Vergleich mit allen Codes die optimale *Datenkompression* erreichen (hier ohne Beweis).
- Codierung: Verkettung der Codewörter ohne Zwischenzeichen (Unterschied zum Morsen!)
 $af fe \rightarrow 0 \cdot 1100 \cdot 1100 \cdot 1101 \rightarrow 0110011001101$
- Decodierung einfach da Präfixcode
 $0110011001101 \rightarrow 0 \cdot 1100 \cdot 1100 \cdot 1101 \rightarrow af fe$

594

Codebäume



Codewörter fixer Länge



Codewörter variabler Länge

595

Eigenschaften der Codebäume

- Optimale Codierung eines Files wird immer durch vollständigen binären Baum dargestellt: jeder innere Knoten hat zwei Kinder.
- Sei C die Menge der Codewörter, $f(c)$ die Häufigkeit eines Codeworts c und $d_T(c)$ die Tiefe eines Wortes im Baum T . Definieren die *Kosten* eines Baumes als

$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c) \cdot d_T(c).$$

(Kosten = Anzahl Bits des codierten Files)

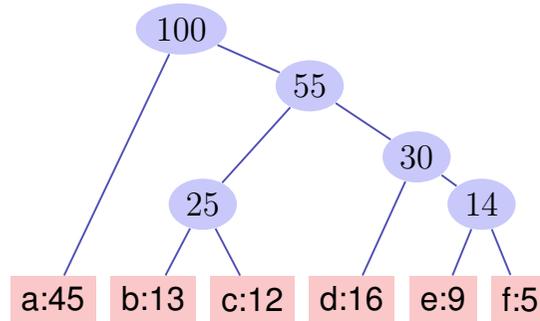
Bezeichnen im folgenden einen Codebaum als optimal, wenn er die Kosten minimiert.

596

Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



597

Algorithmus Huffman(C)

Input : Codewörter $c \in C$
Output : Wurzel eines optimalen Codebaums

```
 $n \leftarrow |C|$   
 $Q \leftarrow C$   
for  $i = 1$  to  $n - 1$  do  
  Alloziere neuen Knoten  $z$   
   $z.\text{left} \leftarrow \text{ExtractMin}(Q)$  // Extrahiere Wort mit minimaler Häufigkeit.  
   $z.\text{right} \leftarrow \text{ExtractMin}(Q)$   
   $z.\text{freq} \leftarrow z.\text{left}.\text{freq} + z.\text{right}.\text{freq}$   
   $\text{Insert}(Q, z)$   
return  $\text{ExtractMin}(Q)$ 
```

598

Analyse

Verwendung eines Heaps: Heap bauen in $\mathcal{O}(n)$. Extract-Min in $\mathcal{O}(\log n)$ für n Elemente. Somit Laufzeit $\mathcal{O}(n \log n)$.

599

Das gierige Verfahren ist korrekt

Theorem

Seien x, y zwei Symbole mit kleinsten Frequenzen in C und sei $T'(C')$ der optimale Baum zum Alphabet $C' = C - \{x, y\} + \{z\}$ mit neuem Symbol z mit $f(z) = f(x) + f(y)$. Dann ist der Baum $T(C)$ der aus $T'(C')$ entsteht, indem der Knoten z durch einen inneren Knoten mit Kindern x und y ersetzt wird, ein optimaler Codebaum zum Alphabet C .

600

Beweis

Es gilt $f(x) \cdot d_T(x) + f(y) \cdot d_T(y) = (f(x) + f(y)) \cdot (d_{T'}(z) + 1) = f(z) \cdot d_{T'}(x) + f(x) + f(y)$. Also $B(T') = B(T) - f(x) - f(y)$.

Annahme: T sei nicht optimal. Dann existiert ein optimaler Baum T'' mit $B(T'') < B(T)$. Annahme: x und y Brüder in T'' . T''' sei der Baum T'' in dem der innere Knoten mit Kindern x und y gegen z getauscht wird. Dann gilt

$B(T''') = B(T'') - f(x) - f(y) < B(T) - f(x) - f(y) = B(T')$.

Widerspruch zur Optimalität von T' .

Die Annahme, dass x und y Brüder sind in T'' kann man rechtfertigen, da ein Tausch der Elemente mit kleinster Häufigkeit auf die unterste Ebene den Wert von B höchstens verkleinern kann.

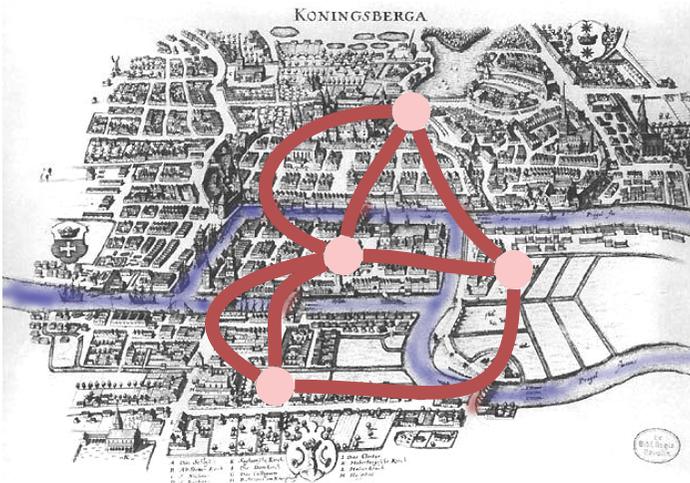
601

22. Graphen

Reflexive transitive Hülle, Traversieren (DFS, BFS), Zusammenhangskomponenten, Topologisches Sortieren
Ottman/Widmayer, Kap. 9.1 - 9.4, Cormen et al, Kap. 22

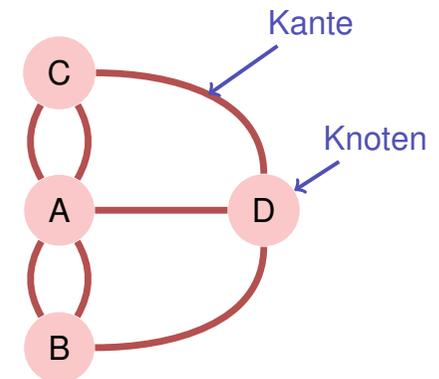
602

Königsberg 1736



603

Graph

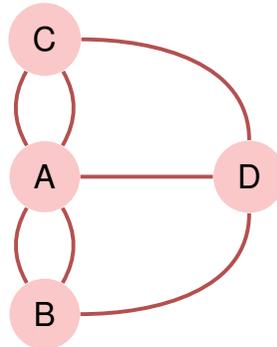


604

Zyklen

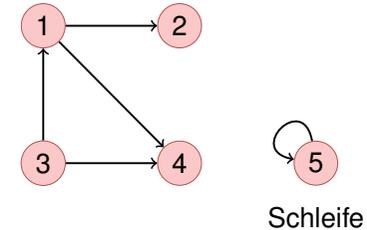
- Gibt es einen Rundweg durch die Stadt (den Graphen), welcher jede Brücke (jede Kante) genau einmal benutzt?
- Euler (1736): nein.
- Solcher Rundweg (*Zyklus*) heisst *Eulerscher Kreis*.
- Eulerzyklus \Leftrightarrow jeder Knoten hat gerade Anzahl Kanten (jeder Knoten hat einen *geraden Grad*).

" \Rightarrow " ist klar, " \Leftarrow " ist etwas schwieriger



Notation

Ein *gerichteter Graph* besteht aus einer Menge $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ von Knoten (*Vertices*) und einer Menge $E \subseteq V \times V$ von Kanten (*Edges*). Gleiche Kanten dürfen nicht mehrfach enthalten sein.

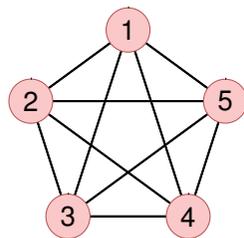


605

606

Notation

Ein *ungerichteter Graph* besteht aus einer Menge $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ von Knoten und einer Menge $E \subseteq \{\{u, v\} | u, v \in V\}$ von Kanten. Kanten dürfen nicht mehrfach enthalten sein.³²



ein vollständiger ungerichteter Graph

³²Im Gegensatz zum Eingangsbeispiel – andernfalls Multigraph genannt.

Notation

Ein Graph $G = (V, E)$ in dem E jede mögliche Kante enthält heisst *vollständig*.

Ein Graph, bei dem V so in disjunkte U und W aufgeteilt werden kann, dass alle $e \in E$ einen Knoten in U und einen in W haben heisst *bipartit*.

Ein *gewichteter Graph* $G = (V, E, c)$ ist ein Graph $G = (V, E)$ mit einer *Kantengewichtsfunktion* $c : E \rightarrow \mathbb{R}$. $c(e)$ heisst *Gewicht* der Kante e .

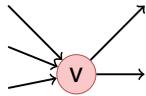
607

608

Notation

Für gerichtete Graphen $G = (V, E)$

- $w \in V$ heisst **adjazent** zu $v \in V$, falls $(v, w) \in E$
- **Vorgängermenge** von $v \in V$: $N^-(v) := \{u \in V \mid (u, v) \in E\}$.
Nachfolgermenge: $N^+(v) := \{u \in V \mid (v, u) \in E\}$
- **Eingangsgrad**: $\deg^-(v) = |N^-(v)|$,
Ausgangsgrad: $\deg^+(v) = |N^+(v)|$



$$\deg^-(v) = 3, \deg^+(v) = 2$$



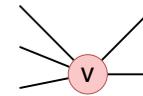
$$\deg^-(w) = 1, \deg^+(w) = 1$$

609

Notation

Für ungerichtete Graphen $G = (V, E)$:

- $w \in V$ heisst **adjazent** zu $v \in V$, falls $\{v, w\} \in E$
- **Nachbarschaft** von $v \in V$: $N(v) = \{w \in V \mid \{v, w\} \in E\}$
- **Grad** von v : $\deg(v) = |N(v)|$ mit Spezialfall Schleifen: erhöhen Grad um 2.



$$\deg(v) = 5$$



$$\deg(w) = 2$$

610

Beziehung zwischen Knotengraden und Kantenzahl

In jedem Graphen $G = (V, E)$ gilt

- 1 $\sum_{v \in V} \deg^-(v) = \sum_{v \in V} \deg^+(v) = |E|$, falls G gerichtet
- 2 $\sum_{v \in V} \deg(v) = 2|E|$, falls G ungerichtet.

611

Wege

- **Weg**: Sequenz von Knoten $\langle v_1, \dots, v_{k+1} \rangle$ so dass für jedes $i \in \{1 \dots k\}$ eine Kante von v_i nach v_{i+1} existiert.
- **Länge** des Weges: Anzahl enthaltene Kanten k .
- **Gewicht** des Weges (in gewichteten Graphen): $\sum_{i=1}^k c((v_i, v_{i+1}))$ (bzw. $\sum_{i=1}^k c(\{v_i, v_{i+1}\})$)
- **Pfad**: Weg der keinen Knoten mehrfach verwendet.
- **Zusammenhängend**: Ungerichteter Graph, bei dem für jedes Paar $v, w \in V$ ein verbindender Weg existiert.

612

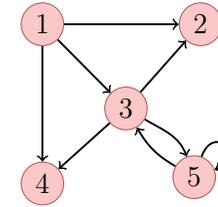
Zyklen

- **Zyklus:** Weg $\langle v_1, \dots, v_{k+1} \rangle$ mit $v_1 = v_{k+1}$
- **Kreis:** Zyklus mit paarweise verschiedenen v_1, \dots, v_k , welcher keine Kante mehrfach verwendet.
- **Kreisfrei (azyklisch):** Graph ohne jegliche Kreise.

Eine Folgerung: Ungerichtete Graphen können keinen Kreis der Länge 2 enthalten (Schleifen haben Länge 1).

Repräsentation mit Matrix

Graph $G = (V, E)$ mit Knotenmenge v_1, \dots, v_n gespeichert als **Adjazenzmatrix** $A_G = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ mit Einträgen aus $\{0, 1\}$. $a_{ij} = 1$ genau dann wenn Kante von v_i nach v_j .



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

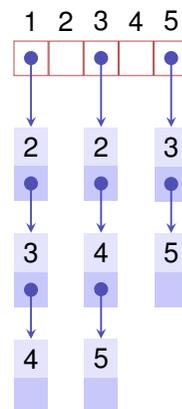
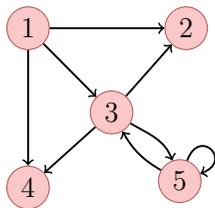
Speicherbedarf $\Theta(|V|^2)$. A_G ist symmetrisch, wenn G ungerichtet.

613

614

Repräsentation mit Liste

Viele Graphen $G = (V, E)$ mit Knotenmenge v_1, \dots, v_n haben deutlich weniger als n^2 Kanten. Repräsentation mit **Adjazenzliste**: Array $A[1], \dots, A[n]$, A_i enthält verkettete Liste aller Knoten in $N^+(v_i)$.



Speicherbedarf $\Theta(|V| + |E|)$.

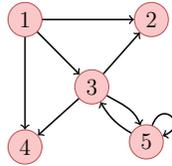
615

Laufzeiten einfacher Operationen

Operation	Matrix	Liste
Nachbarn von $v \in V$ finden	$\Theta(n)$	$\Theta(\deg^+ v)$
$v \in V$ ohne Nachbar finden	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(n)$
$(u, v) \in E$?	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(\deg^+ v)$
Kante einfügen	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
Kante löschen	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(\deg^+ v)$

616

Adjazenzmatrizen multipliziert



$$B := A_G^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

617

Interpretation

Theorem

Sei $G = (V, E)$ ein Graph und $k \in \mathbb{N}$. Dann gibt das Element $a_{i,j}^{(k)}$ der Matrix $(a_{i,j}^{(k)})_{1 \leq i, j \leq n} = A_G^k$ die Anzahl der Wege mit Länge k von v_i nach v_j an.

618

Beweis

Per Induktion.

Anfang: Klar für $k = 1$. $a_{i,j} = a_{i,j}^{(1)}$.

Hypothese: Aussage wahr für alle $k \leq l$

Schritt ($l \rightarrow l + 1$):

$$a_{i,j}^{(l+1)} = \sum_{k=1}^n a_{i,k}^{(l)} \cdot a_{k,j}$$

$a_{k,j} = 1$ g.d.w. Kante von k nach j , 0 sonst. Obige Summe zählt somit alle Knoten, die direkte Verbindung haben zu v_j und zu denen Weg der Länge l von v_i existiert, d.h. alle Wege der Länge $l + 1$.

619

Kürzester Weg

Frage: existiert Weg von i nach j ? Wie lang ist der kürzeste Weg?

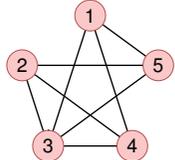
Antwort: Potenziere A_G bis für ein $k < n$ gilt $a_{i,j}^{(k)} > 0$. k gibt die Weglänge des kürzesten Weges. Wenn $a_{i,j}^{(k)} = 0$ für alle $1 \leq k < n$, so gibt es keinen Weg von i nach j .

620

Anzahl Dreiecke

Frage: Wie viele Dreieckswege enthält ein ungerichteter Graph?

Antwort: Entferne alle Zyklen (Diagonaleinträge). Berechne A_G^3 . $a_{ii}^{(3)}$ bestimmt die Anzahl Wege der Länge 3, die i enthalten. Es gibt 6 verschiedene Permutationen eines Dreiecksweges. Damit Anzahl Dreiecke: $\sum_{i=1}^n a_{ii}^{(3)} / 6$.



$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^3 = \begin{pmatrix} 4 & 4 & 8 & 8 & 8 \\ 4 & 4 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 4 & 4 \\ 8 & 8 & 8 & 4 & 4 \end{pmatrix} \Rightarrow 24/6 = 4 \text{ Dreiecke.}$$

621

Graphen und Relationen

Graph $G = (V, E)$ mit Adjazenzen $A_G \hat{=} \text{Relation } E \subseteq V \times V$ auf V

- **reflexiv** $\Leftrightarrow a_{i,i} = 1$ für alle $i = 1, \dots, n$.
- **symmetrisch** $\Leftrightarrow a_{i,j} = a_{j,i}$ für alle $i, j = 1, \dots, n$ (ungerichtet)
- **transitiv** $\Leftrightarrow (u, v) \in E, (v, w) \in E \Rightarrow (u, w) \in E$.

Äquivalenzrelation \Leftrightarrow Kollektion vollständiger, ungerichteter Graphen, für den jedes Element eine Schleife hat.

Reflexive transitive Hülle von $G \Leftrightarrow$ **Erreichbarkeitsrelation** E^* :
 $(v, w) \in E^*$ gdw. \exists Weg von Knoten v zu w .

622

Berechnung Reflexive Transitive Hülle

Ziel: Berechnung von $B = (b_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ mit $b_{ij} = 1 \Leftrightarrow (v_i, v_j) \in E^*$

Beobachtung: $a_{ij} = 1$ bedeutet bereits $(v_i, v_j) \in E^*$.

Erste Idee:

- Starte mit $B \leftarrow A$ und setze $b_{ii} = 1$ für alle i (Reflexivität).
- Iteriere über i, j, k und setze $b_{ij} = 1$, wenn $b_{ik} = 1$ und $b_{kj} = 1$.
 Dann alle Wege der Länge 1 und 2 berücksichtigt
- Wiederhole Iteration \Rightarrow alle Wege der Länge 1 ... 4 berücksichtigt.
- $\lceil \log_2 n \rceil$ Wiederholungen nötig.

623

Verbesserung: Algorithmus von Warshall (1962)

Induktiver Ansatz: Alle Wege bekannt über Knoten aus $\{v_i : i < k\}$.
 Hinzunahme des Knotens v_k .

624

Algorithmus ReflexiveTransitiveClosure(A_G)

Input : Adjazenzmatrix $A_G = (a_{ij})_{i,j=1}^n$

Output : Reflexive Transitive Hülle $B = (b_{ij})_{i,j=1}^n$ von G

```

 $B \leftarrow A_G$ 
for  $k \leftarrow 1$  to  $n$  do
     $a_{kk} \leftarrow 1$  // Reflexivität
    for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
        for  $j \leftarrow 1$  to  $n$  do
             $b_{ij} \leftarrow \max\{b_{ij}, b_{ik} \cdot b_{kj}\}$  // Alle Wege über  $v_k$ 
return  $B$ 
    
```

Laufzeit des Algorithmus $\Theta(n^3)$.

625

Korrektheit des Algorithmus (Induktion)

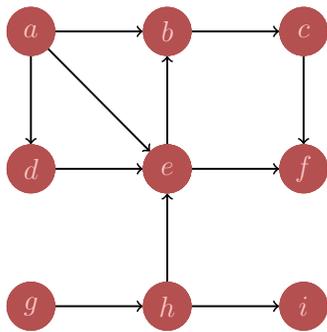
Invariante (k): alle Wege über Knoten mit maximalem Index $< k$ berücksichtigt

- Anfang ($k = 1$): Alle direkten Wege (alle Kanten) in A_G berücksichtigt.
- Hypothese: Invariante (k) erfüllt.
- Schritt ($k \rightarrow k + 1$): Für jeden Weg von v_i nach v_j über Knoten mit maximalen Index k : nach Hypothese $b_{ik} = 1$ und $b_{kj} = 1$. Somit im k -ten Schleifendurchlauf: $b_{ij} \leftarrow 1$.

626

Graphen Traversieren: Tiefensuche

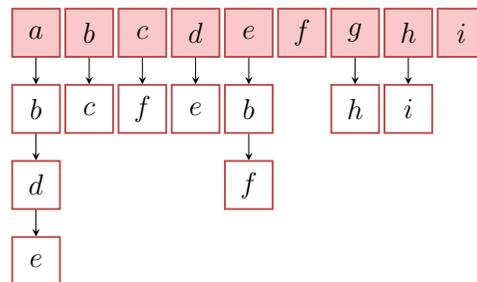
Verfolge zuerst Pfad in die Tiefe, bis nichts mehr besucht werden kann.



Reihenfolge

$a, b, c, f, d, e, g, h, i$

Adjazenzliste



627

Algorithmus Tiefensuche DFS-Visit(G, v)

Input : Graph $G = (V, E)$, Knoten v .

Markiere v als besucht

```

foreach  $(v, w) \in E$  do
    if  $\neg(w \text{ besucht})$  then
        DFS-Visit( $w$ )
    
```

Tiefensuche ab Knoten v . Laufzeit (ohne Rekursion): $\Theta(\deg^+ v)$

628

Algorithmus Tiefensuche DFS-Visit(G)

Input : Graph $G = (V, E)$

```

foreach  $v \in V$  do
  if  $\neg(v \text{ besucht})$  then
    DFS-Visit( $G, v$ )
  
```

Tiefensuche für alle Knoten eines Graphen. Laufzeit
 $\Theta(|V| + \sum_{v \in V} (\deg^+(v) + 1)) = \Theta(|V| + |E|)$.

Problem der Rekursion?

Sehr tiefe Graphen können Stack-Überlauf erzeugen.

Iteratives DFS-Visit(G, v)

Input : Graph $G = (V, E)$

Stack $S \leftarrow \emptyset$; push(S, v)

```

while  $S \neq \emptyset$  do
   $w \leftarrow \text{pop}(S)$ 
  if  $\neg(w \text{ besucht})$  then
    Markiere  $w$  besucht
    foreach  $(w, c) \in E$  do // (ggfs umgekehrt einfügen)
      if  $\neg(c \text{ besucht})$  then
        push( $S, c$ )
  
```

Stapelgröße bis zu $|E|$, für jeden Knoten maximal Extraaufwand
 $\Theta(\deg^+(w) + 1)$. Gesamt: $\mathcal{O}(|V| + |E|)$

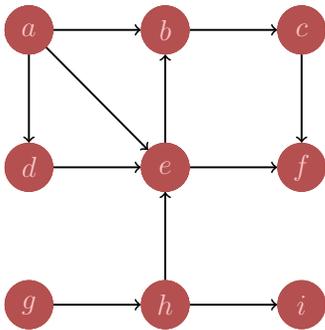
Mit Aufruf aus obigem Rahmenprogramm: $\Theta(|V| + |E|)$

629

630

Graphen Traversieren: Breitensuche

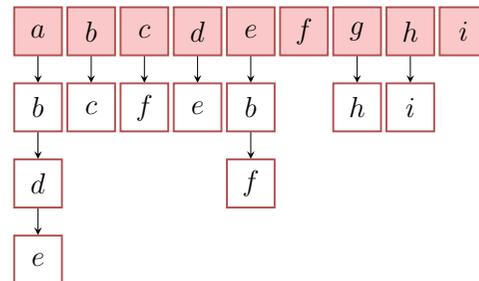
Verfolge zuerst Pfad in die Breite, gehe dann in die Tiefe.



Reihenfolge

$a, b, d, e, c, f, g, h, i$

Adjazenzliste



Iteratives BFS-Visit(G, v)

Input : Graph $G = (V, E)$

Queue $Q \leftarrow \emptyset$

Markiere v aktiv

enqueue(Q, v)

while $Q \neq \emptyset$ **do**

$w \leftarrow \text{dequeue}(Q)$

Markiere w besucht

foreach $(w, c) \in E$ **do**

if $\neg(c \text{ besucht} \vee c \text{ aktiv})$ **then**

Markiere c aktiv

enqueue(Q, c)

- Algorithmus kommt mit $\mathcal{O}(|V|)$ Extraplatz aus. (Warum funktioniert dieser simple Trick nicht beim DFS?)
- Gesamtlaufzeit mit Rahmenprogramm: $\Theta(|V| + |E|)$.

631

632

Zusammenhangskomponenten

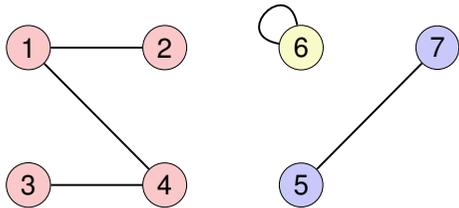
Zusammenhangskomponenten eines ungerichteten Graphen G :

Äquivalenzklassen der reflexiven, transitiven Hülle von G .

Zusammenhangskomponente = Teilgraph $G' = (V', E')$,

$E' = \{\{v, w\} \in E \mid v, w \in V'\}$ mit

$\{\{v, w\} \in E \mid v \in V' \vee w \in V'\} = E = \{\{v, w\} \in E \mid v \in V' \wedge w \in V'\}$



Graph mit Zusammenhangskomponenten $\{1, 2, 3, 4\}$, $\{5, 7\}$, $\{6\}$.

633

Berechnung der Zusammenhangskomponenten

- Berechnung einer Partitionierung von V in paarweise disjunkte Teilmengen V_1, \dots, V_k
- so dass jedes V_i die Knoten einer Zusammenhangskomponente enthält.
- Algorithmus: Tiefen- oder Breitensuche. Bei jedem Neustart von $\text{DFSsearch}(G, v)$ oder $\text{BFSsearch}(G, v)$ neue leere Zusammenhangskomponente erstellen und alle traversierten Knoten einfügen.

634

Topologische Sortierung

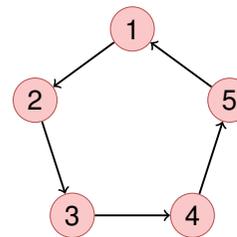
Topologische Sortierung eines azyklischen gerichteten Graphen

$G = (V, E)$: Bijektive Abbildung

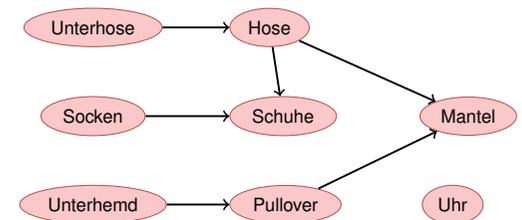
$$\text{ord} : V \rightarrow \{1, \dots, |V|\} \quad | \quad \text{ord}(v) < \text{ord}(w) \quad \forall (v, w) \in E.$$

Können Wert i auch identifizieren mit v_i . Topologische Sortierung $\cong \langle v_1, \dots, v_{|V|} \rangle$.

(Gegen-)Beispiele



Zyklischer Graph: kann nicht topologisch sortiert werden.



Eine mögliche Topologische Sortierung des Graphen:
Unterhemd, Pullover, Unterhose, Uhr, Hose, Mantel, Socken, Schuhe

635

636

Beobachtung

Theorem

Ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ besitzt genau dann eine topologische Sortierung, wenn er kreisfrei ist

Beweis " \Rightarrow ": Wenn G einen Kreis besitzt, so besitzt er keine topologische Sortierung. Denn in einem Kreis $\langle v_{i_1}, \dots, v_{i_m} \rangle$ gälte $v_{i_1} < \dots < v_{i_m} < v_{i_1}$.

Induktiver Beweis Gegenrichtung

- Anfang ($n = 1$): Graph mit einem Knoten ohne Schleife ist topologisch sortierbar. Setze $\text{ord}(v_1) = 1$.
- Hypothese: Graph mit n Knoten kann topologisch sortiert werden.
- Schritt ($n \rightarrow n + 1$):
 - 1 G enthält einen Knoten v_q mit Eingangsgrad $\text{deg}^-(v_q) = 0$. Andernfalls verfolge iterativ Kanten rückwärts – nach spätestens $n + 1$ Iterationen würde man einen Knoten besuchen, welcher bereits besucht wurde. Widerspruch zur Zyklensfreiheit.
 - 2 Graph ohne Knoten v_q und ohne dessen Eingangskanten kann nach Hypothese topologisch sortiert werden. Verwende diese Sortierung, setze $\text{ord}(v_i) \leftarrow \text{ord}(v_i) + 1$ für alle $i \neq q$ und setze $\text{ord}(v_q) \leftarrow 1$.

637

638

Algorithmus, vorläufiger Entwurf

Graph $G = (V, E)$. $d \leftarrow 1$

- 1 Traversiere von beliebigem Knoten rückwärts bis ein Knoten v_q mit Eingangsgrad 0 gefunden ist.
- 2 Wird kein Knoten mit Eingangsgrad 0 gefunden (n Schritte), dann Zyklus gefunden.
- 3 Setze $\text{ord}(v_q) \leftarrow d$.
- 4 Entferne v_q und seine Kanten von G .
- 5 Wenn $V \neq \emptyset$, dann $d \leftarrow d + 1$, gehe zu Schritt 1.

Laufzeit im schlechtesten Fall: $\Omega(|V|^2)$.

639

Verbesserung

Idee?

Berechne die Eingangsgrade der Knoten im Voraus und durchlaufe dann jeweils die Knoten mit Eingangsgrad 0 die Eingangsgrade der Nachfolgeknoten korrigierend.

640

Algorithmus Topological-Sort(G)

Input : Graph $G = (V, E)$.

Output : Topologische Sortierung ord

Stack $S \leftarrow \emptyset$

foreach $v \in V$ **do** $A[v] \leftarrow 0$

foreach $(v, w) \in E$ **do** $A[w] \leftarrow A[w] + 1$ // Eingangsgrade berechnen

foreach $v \in V$ with $A[v] = 0$ **do** push(S, v) // Merke Nodes mit Eingangsgrad 0

$i \leftarrow 1$

while $S \neq \emptyset$ **do**

$v \leftarrow \text{pop}(S)$; ord[v] $\leftarrow i$; $i \leftarrow i + 1$ // Wähle Knoten mit Eingangsgrad 0

foreach $(v, w) \in E$ **do** // Verringere Eingangsgrad der Nachfolger

$A[w] \leftarrow A[w] - 1$

if $A[w] = 0$ **then** push(S, w)

if $i = |V| + 1$ **then return** ord **else return** "Cycle Detected"

641

Algorithmus Korrektheit

Theorem

Sei $G = (V, E)$ ein gerichteter, kreisfreier Graph. Der Algorithmus $\text{TopologicalSort}(G)$ berechnet in Zeit $\Theta(|V| + |E|)$ eine topologische Sortierung ord für G .

Beweis: folgt im wesentlichen aus vorigem Theorem:

- 1 Eingangsgrad verringern entspricht Knotenentfernen.
- 2 Im Algorithmus gilt für jeden Knoten v mit $A[v] = 0$ dass entweder der Knoten Eingangsgrad 0 hat oder dass zuvor alle Vorgänger einen Wert ord[u] $\leftarrow i$ zugewiesen bekamen und somit ord[v] $>$ ord[u] für alle Vorgänger u von v . Knoten werden nur einmal auf den Stack gelegt.
- 3 Laufzeit: Inspektion des Algorithmus (mit Argumenten wie beim Traversieren).

642

Algorithmus Korrektheit

Theorem

Sei $G = (V, E)$ ein gerichteter, nicht kreisfreier Graph. Der Algorithmus $\text{TopologicalSort}(G)$ terminiert in Zeit $\Theta(|V| + |E|)$ und detektiert Zyklus.

Beweis: Sei $\langle v_{i_1}, \dots, v_{i_k} \rangle$ ein Kreis in G . In jedem Schritt des Algorithmus bleibt $A[v_{i_j}] \geq 1$ für alle $j = 1, \dots, k$. Also werden k Knoten nie auf den Stack gelegt und somit ist zum Schluss $i \leq |V| + 1 - k$.

Die Laufzeit des zweiten Teils des Algorithmus kann kürzer werden, jedoch kostet die Berechnung der Eingangsgrade bereits $\Theta(|V| + |E|)$.

643

23. Kürzeste Wege

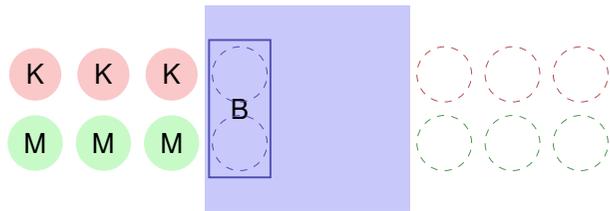
Motivation, Dijkstras Algorithmus auf Distanzgraphen, Algorithmus von Bellman-Ford, Algorithmus von Floyd-Warshall

[Ottman/Widmayer, Kap. 9.5 Cormen et al, Kap. 24.1-24.3, 25.2-25.3]

644

Flussüberquerung (Missionare und Kannibalen)

Problem: Drei Kannibalen und drei Missionare stehen an einem Ufer eines Flusses. Ein dort bereitstehendes Boot fasst maximal zwei Personen. Zu keiner Zeit dürfen an einem Ort (Ufer oder Boot) mehr Kannibalen als Missionare sein. Wie kommen die Missionare und Kannibalen möglichst schnell über den Fluss? ³³



³³Es gibt leichte Variationen dieses Problems, es ist auch äquivalent zum Problem der eifersüchtigen Ehemänner

645

Formulierung als Graph

Zähle alle erlaubten Konfigurationen als Knoten auf und verbinde diese mit einer Kante, wenn Überfahrt möglich ist. Das Problem ist dann ein Problem des kürzesten Pfades

Beispiel

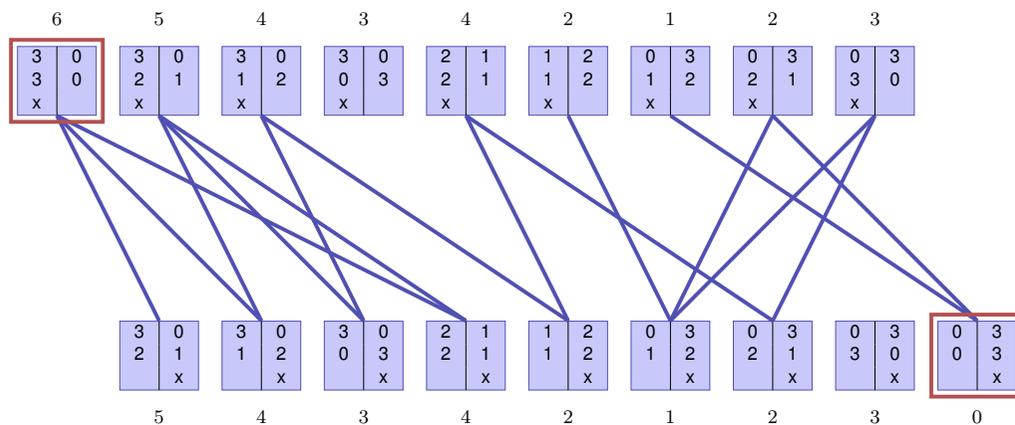
	links	rechts		links	rechts	
Missionare	3	0	Überfahrt möglich	Missionare	2	1
Kannibalen	3	0		Kannibalen	2	1
Boot	x			Boot		x

6 Personen am linken Ufer

4 Personen am linken Ufer

646

Das ganze Problem als Graph



647

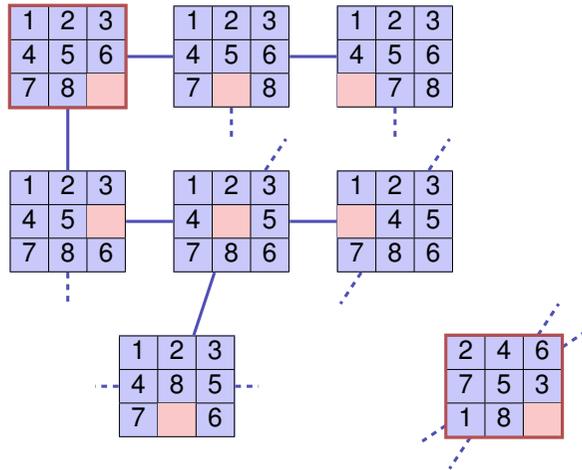
Beispiel Schiebepuzzle

Wollen die schnellste Lösung finden für



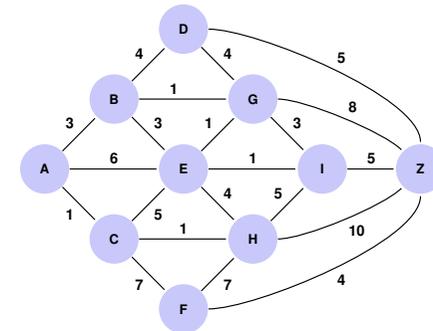
648

Problem als Graph



Routenfinder

Gegeben Städte A - Z und Distanzen zwischen den Städten.



Was ist der kürzeste Weg von A nach Z?

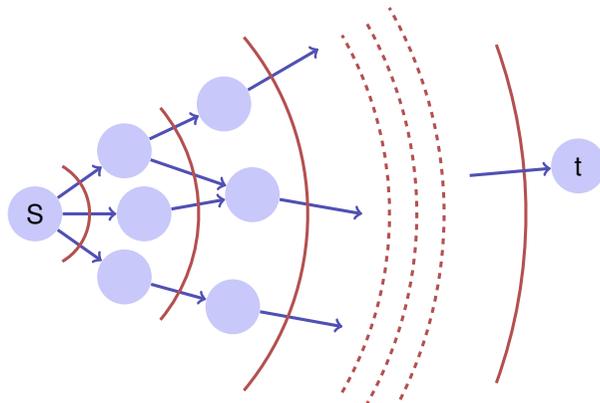
649

650

Einfachster Fall

Konstantes Kantengewicht 1 (oBdA)

Lösung: Breitensuche



651

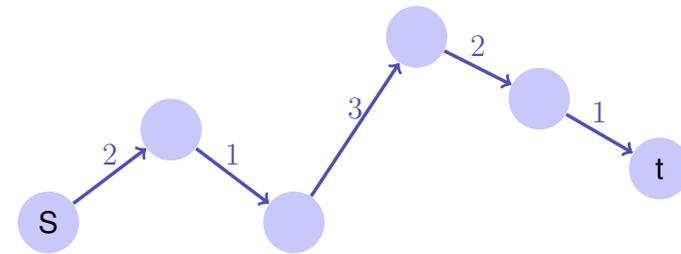
Positiv gewichtete Graphen

Gegeben: $G = (V, E, c), c : E \rightarrow \mathbb{R}^+, s, t \in V.$

Gesucht: Länge eines kürzesten Weges (Gewicht) von s nach t .

Weg: $\langle s = v_0, v_1, \dots, v_k = t \rangle, (v_i, v_{i+1}) \in E (0 \leq i < k)$

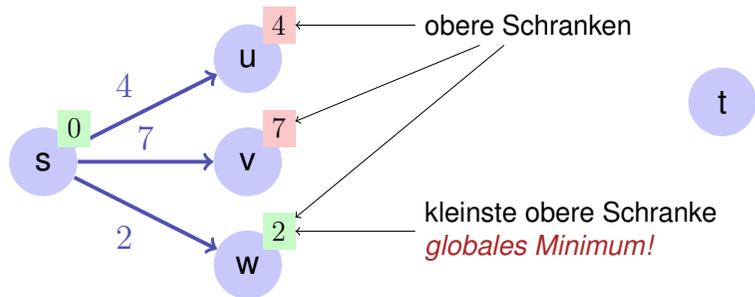
Gewicht: $\sum_{i=0}^{k-1} c((v_i, v_{i+1}))$.



Weg mit Gewicht 9

652

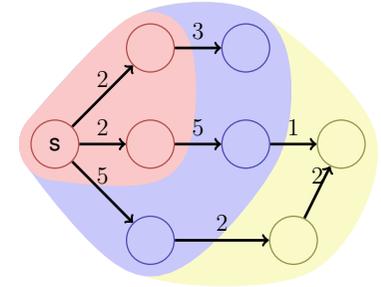
Beobachtung



Grundidee

Menge V aller Knoten wird unterteilt in

- die Menge M von Knoten, für die schon ein kürzester Weg von s bekannt ist
- die Menge $R = \bigcup_{v \in M} N^+(v) \setminus M$ von Knoten, für die kein kürzester Weg bekannt ist, die jedoch von M direkt erreichbar sind.
- die Menge $U = V \setminus (M \cup R)$ von Knoten, die noch nicht berücksichtigt wurden.



653

654

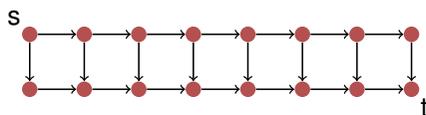
Existenz eines kürzesten Weges

Annahme: Es existiert ein Weg von s nach t in G

Behauptung: Es gibt einen kürzesten Weg s nach t in G

Beweis: Es kann zwar unendlich viele Wege von s nach t geben. Da aber c positiv ist, ist ein kürzester Weg zyklusfrei. Damit ist die Maximallänge eines kürzesten Weges durch ein $n \in \mathbb{N}$ beschränkt und es gibt nur endlich viele Kandidaten für kürzeste Wege.

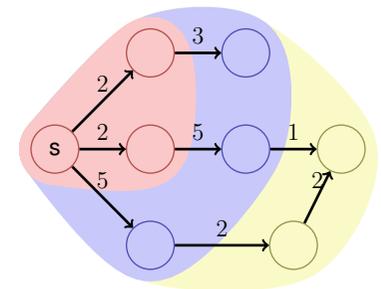
Bemerkung: es kann exponentiell viele Wege geben. Beispiel



Induktion

Induktion über $|M|$: Wähle Knoten aus R mit kleinster oberer Schranke. Nimm r zu M hinzu, und update R und U .

Korrektheit: Ist innerhalb einer "Wellenfront" einmal ein Knoten mit minimalem Pfadgewicht gefunden, kann kein Pfad grösseren Gewichts über andere Knoten zu einer Verbesserung führen.



655

656

Algorithmus Dijkstra(G, s)

Input : Positiv gewichteter Graph $G = (V, E, c)$, Startpunkt $s \in V$

Output : Minimale Gewichte d der kürzesten Pfade.

$M = \{s\}; R = N^+(s), U = V \setminus R$

$d(s) \leftarrow 0; d(u) \leftarrow \infty \forall u \neq s$

while $R \neq \emptyset$ **do**

$r \leftarrow \arg \min_{r \in R} \min_{m \in N^-(r) \cap M} d(m) + c(m, r)$

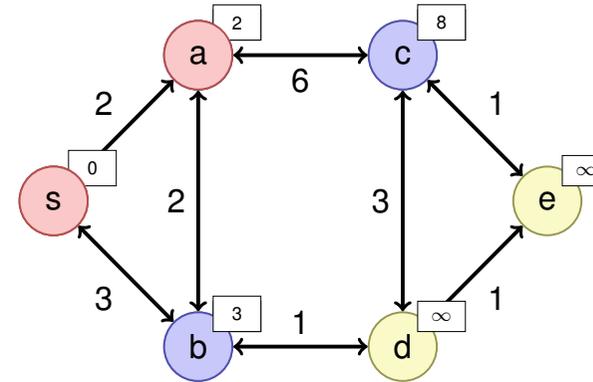
$d(r) \leftarrow \min_{m \in N^-(r) \cap M} d(m) + c(m, r)$

$M \leftarrow M \cup \{r\}$

$R \leftarrow R - \{r\} \cup N^+(r) \setminus M$

return d

Beispiel



$M = \{s, a\}$

$R = \{b, c\}$

$U = \{d, e\}$

657

658

Zur Implementation: Naive Variante

- Minimum finden: Alle Kanten (u, v) für $u \in M, v \in R$ durchlaufen.
- Gesamtkosten: $\mathcal{O}(|V| \cdot |E|)$

Zur Implementation: Bessere Variante

- Update aller ausgehenden Kanten beim Einfügen eines neuen w in M :


```
foreach  $(w, v) \in E$  do
    if  $d(w) + c(w, v) < d(v)$  then
         $d(v) \leftarrow d(w) + c(w, v)$ 
```
- Updatekosten: $\mathcal{O}(|E|)$, Minima finden: $\mathcal{O}(|V|^2)$, also Gesamtkosten $\mathcal{O}(|V|^2)$

659

660

Zur Implementation: Datenstruktur für R ?

Benötigte Operationen:

- ExtractMin (über R)
- DecreaseKey (Update in R)

```
foreach  $(m, v) \in E$  do
  if  $d(m) + c(m, v) < d(v)$  then
     $d(v) \leftarrow d(m) + c(m, v)$ 
    if  $v \in R$  then
      DecreaseKey( $R, v$ )           // Update eines  $d(v)$  im Heap zu  $R$ 
    else
       $R \leftarrow R \cup \{v\}$     // Einfügen eines neuen  $d(v)$  im Heap zu  $R$ 
```

- Heap Datenstruktur bietet sich an. Problem: Unklar, wo v in R steht (für DecreaseKey).

661

DecreaseKey

- DecreaseKey: Aufsteigen im MinHeap in $\mathcal{O}(\log |V|)$
- Position im Heap, Möglichkeit (a): Speichern am Knoten
- Position im Heap, Möglichkeit (b): Hashtabelle über Knoten

662

Laufzeit

- $|V| \times$ ExtractMin: $\mathcal{O}(|V| \log |V|)$
- $|E| \times$ Insert oder DecreaseKey: $\mathcal{O}(|E| \log |V|)$
- $1 \times$ Init: $\mathcal{O}(|V|)$
- Insgesamt: $\mathcal{O}(|E| \log |V|)$.

Kann verbessert werden unter Verwendung einer für ExtractMin und DecreaseKey optimierten Datenstruktur (Fibonacci Heap), dann Laufzeit $\mathcal{O}(|E| + |V| \log |V|)$.

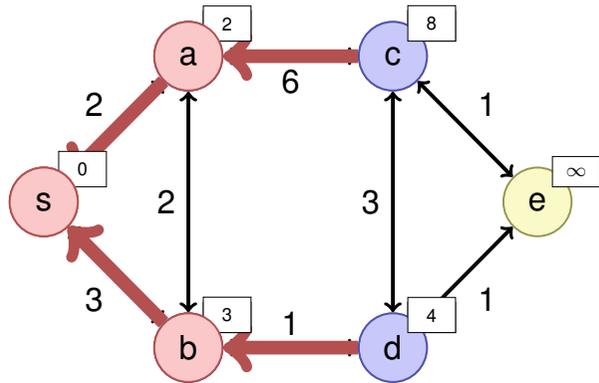
663

Kürzesten Weg Rekonstruieren

- Beim Updateschritt im obigen Algorithmus jeweils besten Vorgänger merken, an Knoten oder in separater Datenstruktur.
- Besten Pfad rekonstruieren durch Rückwärtslaufen der besten Kanten

664

Beispiel



$$M = \{s, a, b\}$$

$$R = \{c, d\}$$

$$U = \{e\}$$

Allgemeine Bewertete Graphen

Relaxieren geht genauso:

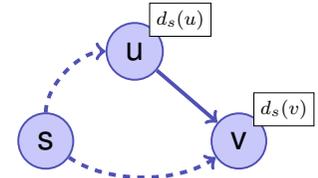
$\text{Relax}(u, v)$ ($u, v \in V, (u, v) \in E$)

if $d_s(v) > d_s(u) + c(u, v)$ then

$d_s(v) \leftarrow d_s(u) + c(u, v)$

 return true

return false



Problem: Zyklen mit negativen Gewichten können Weg verkürzen: es muss keinen kürzesten Weg mehr geben

665

666

Beobachtungen

- **Beobachtung 1:** Teilpfade von kürzesten Pfaden sind kürzeste Pfade: Sei $p = \langle v_0, \dots, v_k \rangle$ ein kürzester Pfad von v_0 nach v_k . Dann ist jeder der Teilpfade $p_{ij} = \langle v_i, \dots, v_j \rangle$ ($0 \leq i < j \leq k$) ein kürzester Pfad von v_i nach v_j .
Beweis: wäre das nicht so, könnte man einen der Teilpfade kürzen, Widerspruch zur Voraussetzung.
- **Beobachtung 2:** Wenn es einen kürzesten Weg gibt, dann ist dieser einfach, hat also keine doppelten Knoten.
Folgt direkt aus Beobachtung 1.

Dynamic Programming Ansatz (Bellman)

Induktion über Anzahl Kanten. $d_s[i, v]$: Kürzeste Weglänge von s nach v über maximal i Kanten.

$$d_s[i, v] = \min\{d_s[i-1, v], \min_{(u,v) \in E} (d_s[i-1, u] + c(u, v))\}$$

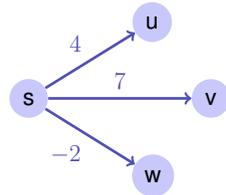
$$d_s[0, s] = 0, d_s[0, v] = \infty \quad \forall v \neq s.$$

667

668

Dynamic Programming Ansatz (Bellman)

	s	\dots	v	\dots	w
0	0	∞	∞	∞	∞
1	0	∞	7	∞	-2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$n - 1$	0	\dots	\dots	\dots	\dots



Algorithmus: Iteriere über letzte Zeile bis die Relaxationsschritte keine Änderung mehr ergeben, maximal aber $n - 1$ mal. Wenn dann noch Änderungen, dann gibt es keinen kürzesten Pfad.

669

Algorithmus Bellman-Ford(G, s)

Input : Graph $G = (V, E, c)$, Startpunkt $s \in V$

Output : Wenn Rückgabe true, Minimale Gewichte d der kürzesten Pfade zu jedem Knoten, sonst kein kürzester Pfad.

$d(v) \leftarrow \infty \forall v \in V; d(s) \leftarrow 0$

for $i \leftarrow 1$ **to** $|V|$ **do**

$f \leftarrow \text{false}$

foreach $(u, v) \in E$ **do**

$f \leftarrow f \vee \text{Relax}(u, v)$

if $f = \text{false}$ **then return true**

return false;

Laufzeit $\mathcal{O}(|E| \cdot |V|)$.

670

Alle kürzesten Pfade

Ziel: Berechne das Gewicht eines kürzesten Pfades für jedes Knotenpaar.

- $|V| \times$ Anwendung von Dijkstras ShortestPath: $\mathcal{O}(|V| \cdot |E| \cdot \log |V|)$
(Mit Fibonacci-Heap: $\mathcal{O}(|V|^2 \log |V| + |V| \cdot |E|)$)
- $|V| \times$ Anwendung von Bellman-Ford: $\mathcal{O}(|E| \cdot |V|^2)$
- Es geht besser!

671

Induktion über Knotennummer.³⁴

Betrachte die Gewichte aller kürzesten Wege S^k mit Zwischenknoten in $V^k := \{v_1, \dots, v_k\}$, wenn Gewichte zu allen kürzesten Wegen S^{k-1} mit Zwischenknoten in V^{k-1} gegeben sind.

- v_k kein Zwischenknoten eines kürzesten Pfades von $v_i \rightsquigarrow v_j$ in V^k : Gewicht eines kürzesten Pfades $v_i \rightsquigarrow v_j$ in S^{k-1} dann auch das Gewicht eines kürzesten Pfades in S^k .
- v_k Zwischenknoten eines kürzesten Pfades $v_i \rightsquigarrow v_j$ in V^k : Teilpfade $v_i \rightsquigarrow v_k$ und $v_k \rightsquigarrow v_j$ enthalten nur Zwischenknoten aus S^{k-1} .

³⁴wie beim Algorithmus für die reflexive transitive Hülle von Warshall

672

DP Induktion

$d^k(u, v)$ = Minimales Gewicht eines Pfades $u \rightsquigarrow v$ mit Zwischenknoten aus V^k

Induktion

$$d^k(u, v) = \min\{d^{k-1}(u, v), d^{k-1}(u, k) + d^{k-1}(k, v)\} (k \geq 1)$$

$$d^0(u, v) = c(u, v)$$

DP Algorithmus Floyd-Warshall(G)

Input : Azyklischer Graph $G = (V, E, c)$

Output : Minimale Gewichte aller Pfade d

$d^0 \leftarrow c$

for $k \leftarrow 1$ **to** $|V|$ **do**

for $i \leftarrow 1$ **to** $|V|$ **do**

for $j \leftarrow 1$ **to** $|V|$ **do**

$d^k(v_i, v_j) = \min\{d^{k-1}(v_i, v_j), d^{k-1}(v_i, v_k) + d^{k-1}(v_k, v_j)\}$

Laufzeit: $\Theta(|V|^3)$

Bemerkung: Der Algorithmus kann auf einer einzigen Matrix d (in place) ausgeführt werden.

673

674

Umgewichtung

Idee: Anwendung von Dijkstras Algorithmus auf Graphen mit negativen Gewichten durch Umgewichtung

Das folgende geht *nicht*. Die Graphen sind nicht äquivalent im Sinne der kürzesten Pfade.



675

Umgewichtung

Andere Idee: "Potentialfunktion" (Höhe) auf den Knoten

- $G = (V, E, c)$ ein gewichteter Graph.
- Funktion $h : V \rightarrow \mathbb{R}$
- Neue Gewichte

$$\tilde{c}(u, v) = c(u, v) + h(u) - h(v), (u, v \in V)$$

676

Umgewichtung

Beobachtung: Ein Pfad p ist genau dann kürzester Pfad in $G = (V, E, c)$, wenn er in $\tilde{G} = (V, E, \tilde{c})$ kürzester Pfad ist.

$$\begin{aligned}\tilde{c}(p) &= \sum_{i=1}^k \tilde{c}(v_{i-1}, v_i) = \sum_{i=1}^k c(v_{i-1}, v_i) + h(v_{i-1}) - h(v_i) \\ &= h(v_0) - h(v_k) + \sum_{i=1}^k c(v_{i-1}, v_i) = c(p) + h(v_0) - h(v_k)\end{aligned}$$

Also $\tilde{c}(p)$ minimal unter allen $v_0 \rightsquigarrow v_k \iff c(p)$ minimal unter allen $v_0 \rightsquigarrow v_k$.

Zyklengewichte sind invariant: $\tilde{c}(v_0, \dots, v_k = v_0) = c(v_0, \dots, v_k = v_0)$

677

Johnsons Algorithmus

Hinzunahme eines neuen Knotens $s \notin V$:

$$\begin{aligned}G' &= (V', E', c') \\ V' &= V \cup \{s\} \\ E' &= E \cup \{(s, v) : v \in V\} \\ c'(u, v) &= c(u, v), \quad u \neq s \\ c'(s, v) &= 0 (v \in V)\end{aligned}$$

678

Johnsons Algorithmus

Falls keine negativen Zyklen: wähle für Höhenfunktion Gewicht der kürzesten Pfade von s ,

$$h(v) = d(s, v).$$

Für minimales Gewicht d eines Pfades gilt generell folgende Dreiecksungleichung:

$$d(s, v) \leq d(s, u) + c(u, v).$$

Einsetzen ergibt $h(v) \leq h(u) + c(u, v)$. Damit

$$\tilde{c}(u, v) = c(u, v) + h(u) - h(v) \geq 0.$$

679

Algorithmus Johnson(G)

Input : Gewichteter Graph $G = (V, E, c)$

Output : Minimale Gewichte aller Pfade D .

Neuer Knoten s . Berechne $G' = (V', E', c')$

if BellmanFord(G', s) = false **then** return "graph has negative cycles"

foreach $v \in V'$ **do**

└ $h(v) \leftarrow d(s, v)$ // d aus BellmanFord Algorithmus

foreach $(u, v) \in E'$ **do**

└ $\tilde{c}(u, v) \leftarrow c(u, v) + h(u) - h(v)$

foreach $u \in V$ **do**

└ $\tilde{d}(u, \cdot) \leftarrow \text{Dijkstra}(\tilde{G}', u)$

└ **foreach** $v \in V$ **do**

└└ $D(u, v) \leftarrow \tilde{d}(u, v) + h(v) - h(u)$

680

Analyse

Laufzeiten

- Berechnung von G' : $\mathcal{O}(|V|)$
- Bellman Ford G' : $\mathcal{O}(|V| \cdot |E|)$
- $|V| \times$ Dijkstra $\mathcal{O}(|V| \cdot |E| \cdot \log |V|)$
(Mit Fibonacci-Heap: $\mathcal{O}(|V|^2 \log |V| + |V| \cdot |E|)$)

Insgesamt $\mathcal{O}(|V| \cdot |E| \cdot \log |V|)$
($\mathcal{O}(|V|^2 \log |V| + |V| \cdot |E|)$)

24. Minimale Spannbäume

Motivation, Greedy, Algorithmus von Kruskal, Allgemeine Regeln, Union-Find Struktur, Algorithmus von Jarnik, Prim, Dijkstra, Fibonacci Heaps

[Ottman/Widmayer, Kap. 9.6, 6.2, 6.1, Cormen et al, Kap. 23, 19]

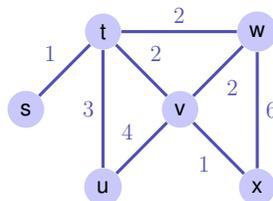
681

682

Problem

Gegeben: Ungerichteter, zusammenhängender, gewichteter Graph $G = (V, E, c)$.

Gesucht: Minimaler Spannbaum $T = (V, E')$, $E' \subset E$, so dass $\sum_{e \in E'} c(e)$ minimal.



Anwendung: Billigstes / kürzestes Kabelnetzwerk

Greedy Verfahren

Zur Erinnerung:

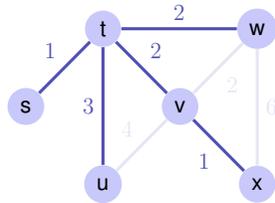
- Gierige Verfahren berechnen die Lösung schrittweise, indem lokal die beste Lösung gewählt wird.
- Die meisten Probleme sind nicht mit einer greedy Strategie lösbar.
- Das Problem der minimalen Spannbäume bildet in diesem Sinne eine der Ausnahmen.

683

684

Greedy Idee

Konstruiere T indem immer die billigste Kante hinzugefügt wird, welche keinen Zyklus erzeugt.



(Lösung ist nicht eindeutig.)

Algorithmus MST-Kruskal(G)

Input : Gewichteter Graph $G = (V, E, c)$

Output : Minimaler Spannbaum mit Kanten A .

Sortiere Kanten nach Gewicht $c(e_1) \leq \dots \leq c(e_m)$

$A \leftarrow \emptyset$

for $k = 1$ **to** $|E|$ **do**

if $(V, A \cup \{e_k\})$ kreisfrei **then**

$A \leftarrow A \cup \{e_k\}$

return (V, A, c)

685

686

Korrektheit

Zu jedem Zeitpunkt ist (V, A) ein Wald, eine Menge von Bäumen.

MST-Kruskal betrachtet jede Kante e_k einmal und wählt e_k oder verwirft e_k

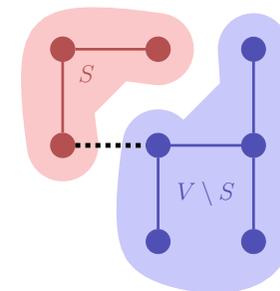
Notation (Momentaufnahme im Algorithmus)

- A : Menge gewählte Kanten
- R : Menge verworfener Kanten
- U : Menge der noch unentschiedenen Kanten

Schnitt

Ein Schnitt von G ist eine Partition $S, V \setminus S$ von V . ($S \subseteq V$).

Eine Kante kreuzt einen Schnitt, wenn einer Ihrer Endpunkte in S und der andere in $V \setminus S$ liegt.



687

688

Regeln

- 1 Auswahlregel: Wähle einen Schnitt, den keine gewählte Kante kreuzt. Unter allen unentschiedenen Kanten, welche den Schnitt kreuzen, wähle die mit minimalem Gewicht.
- 2 Verwerfregel: Wähle einen Kreis ohne verworfene Kanten. Unter allen unentschiedenen Kanten im Kreis verwerfe die mit maximalem Gewicht.

689

Regeln

Kruskal wendet beide Regeln an:

- 1 Ein gewähltes e_k verbindet zwei Zusammenhangskomponenten, sonst würde ein Kreis erzeugt werden. e_k ist beim Verbinden minimal, man kann also einen Schnitt wählen, den e_k mit minimalem Gewicht kreuzt.
- 2 Ein verworfenes e_k ist Teil eines Kreises. Innerhalb des Kreises hat e_k maximales Gewicht.

690

Korrektheit

Theorem

Jeder Algorithmus, welcher schrittweise obige Regeln anwendet bis $U = \emptyset$ ist korrekt.

Folgerung: MST-Kruskal ist korrekt.

691

Auswahlinvariante

Invariante: Es gibt stets einen minimalen Spannbaum, der alle gewählten und keine der verworfenen Kanten enthält.

Wenn die beiden Regeln die Invariante erhalten, dann ist der Algorithmus sicher korrekt. Induktion:

- Zu Beginn: $U = E, R = A = \emptyset$. Invariante gilt offensichtlich.
- Invariante bleibt erhalten.
- Am Ende: $U = \emptyset, R \cup A = E \Rightarrow (V, A)$ ist Spannbaum.

Beweis des Theorems: zeigen nun, dass die beiden Regeln die Invariante erhalten.

692

Auswahlregel erhält Invariante

Es gibt stets einen minimalen Spannbaum T , der alle gewählten und keine der verworfenen Kanten enthält.

Wähle einen Schnitt, den keine gewählte Kante kreuzt. Unter allen unentschiedenen Kanten, welche den Schnitt kreuzen, wähle eine Kante e mit minimalem Gewicht.

- Fall 1: $e \in T$ (fertig)
- Fall 2: $e \notin T$. Dann hat $T \cup \{e\}$ einen Kreis, der e enthält. Kreis muss eine zweite Kante e' enthalten, welche den Schnitt auch kreuzt.³⁵ Da $e' \notin T$ ist $e' \in U$. Somit $c(e) \leq c(e')$ und $T' = T \setminus \{e'\} \cup \{e\}$ ist auch minimaler Spannbaum (und $c(e) = c(e')$).

³⁵Ein solcher Kreis enthält mindestens einen Knoten in S und einen in $V \setminus S$ und damit mindestens zwei Kanten zwischen S und $V \setminus S$.

693

Verwerfregel erhält Invariante

Es gibt stets einen minimalen Spannbaum T , der alle gewählten und keine der verworfenen Kanten enthält.

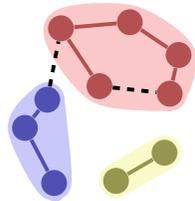
Wähle einen Kreis ohne verworfene Kanten. Unter allen unentschiedenen Kanten im Kreis verwerfe die Kante e mit maximalem Gewicht.

- Fall 1: $e \notin T$ (fertig)
- Fall 2: $e \in T$. Entferne e von T , Das ergibt einen Schnitt. Diesen Schnitt muss eine weitere Kante e' aus dem Kreis kreuzen. Da $c(e') \leq c(e)$ ist $T' = T \setminus \{e\} \cup \{e'\}$ auch minimal (und $c(e) = c(e')$).

694

Zur Implementation

Gegeben eine Menge von Mengen $i \equiv A_i \subset V$. Zur Identifikation von Schnitten und Kreisen: Zugehörigkeit der beiden Endpunkte einer Kante zu einer der Mengen.



695

Zur Implementation

Allgemeines Problem: Partition (Menge von Teilmengen) z.B. $\{\{1, 2, 3, 9\}, \{7, 6, 4\}, \{5, 8\}, \{10\}\}$

Benötigt: ADT (Union-Find-Struktur) mit folgenden Operationen

- Make-Set(i): Hinzufügen einer neuen Menge i .
- Find(e): Name i der Menge, welche e enthält.
- Union(i, j): Vereinigung der Mengen i und j .

696

Union-Find Algorithmus MST-Kruskal(G)

Input : Gewichteter Graph $G = (V, E, c)$

Output : Minimaler Spannbaum mit Kanten A .

Sortiere Kanten nach Gewicht $c(e_1) \leq \dots \leq c(e_m)$

$A \leftarrow \emptyset$

for $k = 1$ **to** $|V|$ **do**

 MakeSet(k)

for $k = 1$ **to** $|E|$ **do**

$(u, v) \leftarrow e_k$

if Find(u) \neq Find(v) **then**

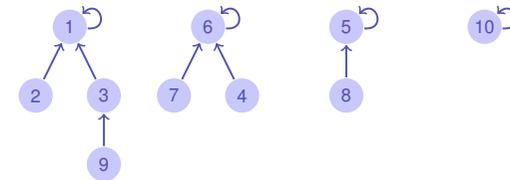
 Union(Find(u), Find(v))

$A \leftarrow A \cup e_k$

return (V, A, c)

Implementation Union-Find

Idee: Baum für jede Teilmenge in der Partition, z.B.
 $\{\{1, 2, 3, 9\}, \{7, 6, 4\}, \{5, 8\}, \{10\}\}$

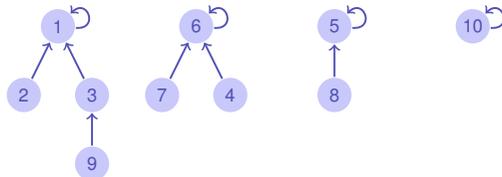


Baumwurzeln = Namen der Mengen,
 Bäume = Elemente der Mengen

697

698

Implementation Union-Find



Repräsentation als Array:

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Parent	1	1	1	6	5	6	5	5	3	10

Implementation Union-Find

Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Parent	1	1	1	6	5	6	5	5	3	10

Operationen:

■ Make-Set(i): $p[i] \leftarrow i$; **return** i

■ Find(i): **while** ($p[i] \neq i$) **do** $i \leftarrow p[i]$
 ; **return** i

■ Union(i, j): $p[j] \leftarrow i$; **return** i

699

700

Optimierung der Laufzeit für Find

Baum kann entarten: Beispiel Union(1, 2), Union(2, 3), Union(3, 4), ...

Idee: Immer kleineren Baum unter grösseren Baum hängen.

Zusätzlich: Grösseninformation g

Operationen:

■ Make-Set(i): $p[i] \leftarrow i; g[i] \leftarrow 1; \text{return } i$

■ Union(i, j):
if $g[j] > g[i]$ then swap(i, j)
 $p[j] \leftarrow i$
 $g[i] \leftarrow g[i] + g[j]$
return i

Beobachtung

Theorem

Obiges Verfahren Vereinigung nach Grösse konserviert die folgende Eigenschaft der Bäume: ein Baum mit Höhe h hat mindestens 2^h Knoten.

Unmittelbare Folgerung: Laufzeit Find = $\mathcal{O}(\log n)$.

701

702

Beweis

Induktion: nach Voraussetzung haben Teilbäume jeweils mindestens 2^{h_i} Knoten. ObdA:

$h_2 \leq h_1$.

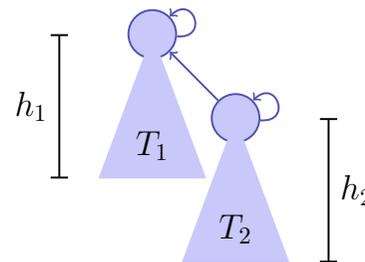
■ $h_2 < h_1$:

$$h(T_1 \oplus T_2) = h_1 \Rightarrow g(T_1 \oplus T_2) \geq 2^{h_1}$$

■ $h_2 = h_1$:

$$g(T_1) \geq g(T_2) \geq 2^{h_2}$$

$$\Rightarrow g(T_1 \oplus T_2) = g(T_1) + g(T_2) \geq 2 \cdot 2^{h_2} = 2^{h(T_1 \oplus T_2)}$$



703

Weitere Verbesserung

Bei jedem Find alle Knoten direkt an den Wurzelknoten hängen.

Find(i):

```
 $j \leftarrow i$   
while ( $p[i] \neq i$ ) do  $i \leftarrow p[i]$   
while ( $j \neq i$ ) do  
   $t \leftarrow j$   
   $j \leftarrow p[j]$   
   $p[t] \leftarrow i$   
return  $i$ 
```

Amortisierte Laufzeit: amortisiert *fast* konstant (Inverse der Ackermannfunktion).

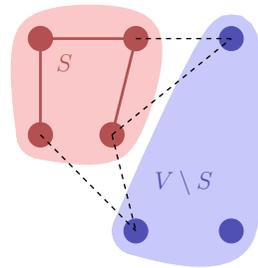
704

MST Algorithmus von Jarnik, Prim, Dijkstra

Idee: Starte mit einem $v \in V$ und lasse von dort unter Verwendung der Auswahlregel einen Spannbaum wachsen:

```

S ← {v0}
for i ← 1 to |V| do
  Wähle billigste (u, v) mit u ∈ S, v ∉ S
  A ← A ∪ {(u, v)}
  S ← S ∪ {v}
    
```



Laufzeit

Trivial $\mathcal{O}(|V| \cdot |E|)$.

Verbesserungen (wie bei Dijkstras ShortestPath):

- Billigste Kante nach S merken: für jedes $v \in V \setminus S$. Jeweils $\deg^+(v)$ viele Updates für jedes neue $v \in S$. Kosten: $|V|$ viele Minima + Updates: $\mathcal{O}(|V|^2 + \sum_{v \in V} \deg^+(v)) = \mathcal{O}(|V|^2 + |E|)$
- Mit Minheap, Kosten: $|V|$ viele Minima = $\mathcal{O}(|V| \log |V|)$, $|E|$ Updates: $\mathcal{O}(|E| \log |V|)$, Initialisierung $\mathcal{O}(|V|)$: $\mathcal{O}(|E| \cdot \log |V|)$.
- Mit Fibonacci-Heap: $\mathcal{O}(|E| + |V| \cdot \log |V|)$.

705

706

Fibonacci Heaps

Datenstruktur zur Verwaltung von Elementen mit Schlüssel.
Operationen

- **MakeHeap()**: Liefere neuen Heap ohne Elemente
- **Insert(H, x)**: Füge x zu H hinzu
- **Minimum(H)**: Liefere Zeiger auf das Element m mit minimalem Schlüssel
- **ExtractMin(H)**: Liefere und entferne (von H) Zeiger auf das Element m
- **Union(H_1, H_2)**: Liefere Verschmelzung zweier Heaps H_1 und H_2
- **DecreaseKey(H, x, k)**: Verkleinere Schlüssel von x in H zu k
- **Delete (H, x)**: Entferne Element x von H

Vorteil gegenüber Binary Heap?

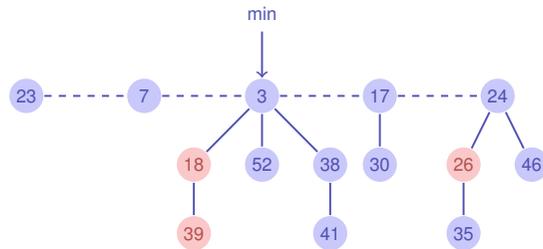
	Binary Heap (worst-Case)	Fibonacci Heap (amortisiert)
MakeHeap	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$
Insert	$\Theta(\log n)$	$\Theta(1)$
Minimum	$\Theta(1)$	$\Theta(1)$
ExtractMin	$\Theta(\log n)$	$\Theta(\log n)$
Union	$\Theta(n)$	$\Theta(1)$
DecreaseKey	$\Theta(\log n)$	$\Theta(1)$
Delete	$\Theta(\log n)$	$\Theta(\log n)$

707

708

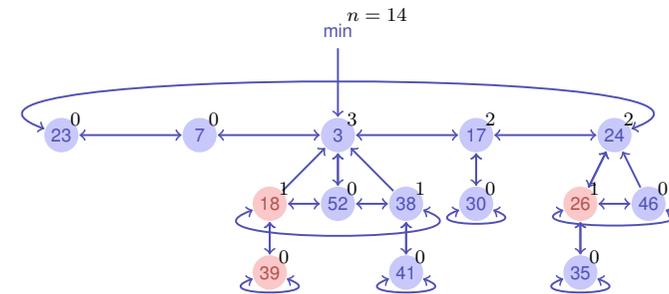
Struktur

Menge von Bäumen, welche der Min-Heap Eigenschaft genügen.
Markierbare Knoten.



Implementation

Doppelt verkettete Listen von Knoten mit marked-Flag und Anzahl Kinder. Zeiger auf das minimale Element und Anzahl Knoten.



709

710

Einfache Operationen

- MakeHeap (trivial)
- Minimum (trivial)
- Insert(H, e)
 - 1 Füge neues Element in die Wurzelliste ein
 - 2 Wenn Schlüssel kleiner als Minimum, min-pointer neu setzen.
- Union (H_1, H_2)
 - 1 Wurzellisten von H_1 und H_2 aneinander hängen
 - 2 Min-Pointer neu setzen.
- Delete(H, e)
 - 1 DecreaseKey($H, e, -\infty$)
 - 2 ExtractMin(H)

ExtractMin

- 1 Entferne Minimalknoten m aus der Wurzelliste
- 2 Hänge Liste der Kinder von m in die Wurzelliste
- 3 Verschmelze solange heapgeordnete Bäume gleichen Ranges, bis alle Bäume unterschiedlichen Rang haben:
Rangarray $a[0, \dots, n]$ von Elementen, zu Beginn leer. Für jedes Element e der Wurzelliste:
 - a Sei g der Grad von e .
 - b Wenn $a[g] = nil$: $a[g] \leftarrow e$.
 - c Wenn $e' := a[g] \neq nil$: Verschmelze e mit e' zu neuem e'' und setze $a[g] \leftarrow nil$. Setze e'' unmarkiert Iteriere erneut mit $e \leftarrow e''$ vom Grad $g + 1$.

711

712

DecreaseKey (H, e, k)

- 1 Entferne e von seinem Vaterknoten p (falls vorhanden) und erniedrige den Rang von p um eins.
- 2 Insert(H, e)
- 3 Vermeide zu dünne Bäume:
 - a Wenn $p = nil$, dann fertig
 - b Wenn p unmarkiert: markiere p , fertig.
 - c Wenn p markiert: unmarkiere p , trenne p von seinem Vater pp ab und Insert(H, p). Iteriere mit $p \leftarrow pp$.

713

Abschätzung für den Rang

Theorem

Sei p Knoten eines F-Heaps H . Ordnet man die Söhne von p in der zeitlichen Reihenfolge, in der sie an p durch Zusammenfügen angehängt wurden, so gilt: der i -te Sohn hat mindestens Rang $i - 2$

Beweis: p kann schon mehr Söhne gehabt haben und durch Abtrennung verloren haben. Als der i -te Sohn p_i angehängt wurde, müssen p und p_i jeweils mindestens Rang $i - 1$ gehabt haben. p_i kann maximal einen Sohn verloren haben (wegen Markierung), damit bleibt mindestens Rang $i - 2$.

714

Abschätzung für den Rang

Theorem

Jeder Knoten p vom Rang k eines F-Heaps ist Wurzel eines Teilbaumes mit mindestens F_{k+1} Knoten. (F : Fibonacci-Folge)

Beweis: Sei S_k Minimalzahl Nachfolger eines Knotens vom Rang k in einem F-Heap plus 1 (der Knoten selbst). Klar: $S_0 = 1, S_1 = 2$. Nach vorigem Theorem $S_k \geq 2 + \sum_{i=0}^{k-2} S_i, k \geq 2$ (p und Knoten p_1 jeweils 1). Für Fibonacci-Zahlen gilt (Induktion) $F_k \geq 2 + \sum_{i=2}^k F_i, k \geq 2$ und somit (auch Induktion) $S_k \geq F_{k+2}$.

Fibonacci-Zahlen wachsen exponentiell ($\mathcal{O}(\varphi^k)$) Folgerung: Maximaler Grad eines beliebigen Knotens im Fibonacci-Heap mit n Knoten ist $\mathcal{O}(\log n)$.

715

Amortisierte Worst-case-Analyse Fibonacci Heap

$t(H)$: Anzahl Bäume in der Wurzelliste von H , $m(H)$: Anzahl markierte Knoten in H ausserhalb der Wurzelliste, Potentialfunktion $\Phi(H) = t(H) + 2 \cdot m(H)$. Zu Anfang $\Phi(H) = 0$. Potential immer nichtnegativ.

Amortisierte Kosten:

- Insert(H, x): $t'(H) = t(H) + 1, m'(H) = m(H)$, Potentialerhöhung 1, Amortisierte Kosten $\Theta(1) + 1 = \Theta(1)$
- Minimum(H): Amortisierte Kosten = tatsächliche Kosten = $\Theta(1)$
- Union(H_1, H_2): Amortisierte Kosten = tatsächliche Kosten = $\Theta(1)$

716

Amortisierte Kosten ExtractMin

- Anzahl der Bäume in der Wurzelliste $t(H)$.
- Tatsächliche Kosten der ExtractMin Operation: $\mathcal{O}(\log n + t(H))$.
- Nach dem Verschmelzen noch $\mathcal{O}(\log n)$ Knoten.
- Anzahl der Markierungen kann beim Verschmelzen der Bäume maximal kleiner werden.
- Amortisierte Kosten von ExtractMin also maximal

$$\mathcal{O}(\log n + t(H)) + \mathcal{O}(\log n) - \mathcal{O}(t(H)) = \mathcal{O}(\log n).$$

717

Amortisierte Kosten DecreaseKey

- Annahme: DecreaseKey führt zu c Abtrennungen eines Knotens von seinem Vaterknoten, tatsächliche Kosten $\mathcal{O}(c)$
- c Knoten kommen zur Wurzelliste hinzu
- Löschen von $(c - 1)$ Markierungen, Hinzunahme maximal einer Markierung
- Amortisierte Kosten von DecreaseKey:

$$\mathcal{O}(c) + (t(H) + c) + 2 \cdot (m(H) - c + 2) - (t(H) + 2m(H)) = \mathcal{O}(1)$$

718

Motivation

Modelliere Fluss von Flüssigkeiten, Bauteile auf Fließbändern, Strom in elektrischen Netzwerken oder Information in Kommunikationsnetzwerken.

25. Flüsse in Netzen

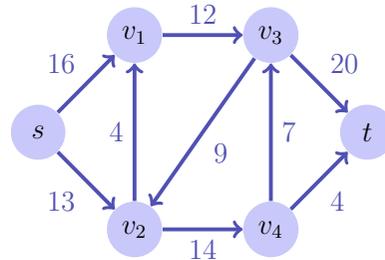
Flussnetzwerk, Maximaler Fluss, Schnitt, Restnetzwerk, Max-flow Min-cut Theorem, Ford-Fulkerson Methode, Edmonds-Karp Algorithmus, Maximales Bipartites Matching [Ottman/Widmayer, Kap. 9.7, 9.8.1], [Cormen et al, Kap. 26.1-26.3]

719

720

Flussnetzwerk

- **Flussnetzwerk** $G = (V, E, c)$: gerichteter Graph mit **Kapazitäten**
- Antiparallele Kanten verboten: $(u, v) \in E \Rightarrow (v, u) \notin E$.
- Fehlen einer Kante (u, v) auch modelliert durch $c(u, v) = 0$.
- **Quelle** s und **Senke** t : spezielle Knoten. Jeder Knoten v liegt auf einem Pfad zwischen s und t : $s \rightsquigarrow v \rightsquigarrow t$



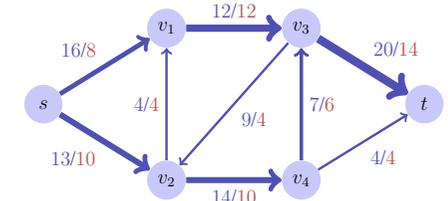
721

Fluss

Ein **Fluss** $f : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ erfüllt folgende Bedingungen:

- **Kapazitätsbeschränkung:** Für alle $u, v \in V$: $0 \leq f(u, v) \leq c(u, v)$.
- **Flusserhaltung:** Für alle $u \in V \setminus \{s, t\}$:

$$\sum_{v \in V} f(v, u) - \sum_{v \in V} f(u, v) = 0.$$



Wert w des Flusses:
 $w(f) = \sum_{v \in V} f(s, v) - \sum_{v \in V} f(v, s)$.
 Hier $w(f) = 18$.

722

Wie gross kann ein Fluss sein?

Begrenzende Faktoren: Schnitte

- **s von t trennender Schnitt:** Partitionierung von V in S und T mit $s \in S, t \in T$.
- **Kapazität** eines Schnittes: $c(S, T) = \sum_{v \in S, v' \in T} c(v, v')$
- **Minimaler Schnitt:** Schnitt mit minimaler Kapazität.
- **Fluss über Schnitt:**
 $f(S, T) = \sum_{v \in S, v' \in T} f(v, v') - \sum_{v \in S, v' \in T} f(v', v)$

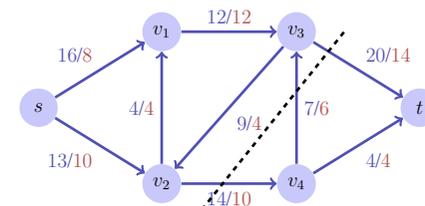
723

Wie gross kann ein Fluss sein?

Es gilt für jeden Fluss und jeden Schnitt, dass $f(S, T) = w(f)$:

$$\begin{aligned} f(S, T) &= \sum_{v \in S, v' \in T} f(v, v') - \sum_{v \in S, v' \in T} f(v', v) \\ &= \sum_{v \in S, v' \in V} f(v, v') - \sum_{v \in S, v' \in S} f(v, v') - \sum_{v \in S, v' \in V} f(v', v) + \sum_{v \in S, v' \in S} f(v', v) \\ &= \sum_{v' \in V} f(s, v') - \sum_{v' \in V} f(v', s) \end{aligned}$$

Zweite Gleichheit: Ergänzung, letzte Gleichheit: Flusserhaltung.



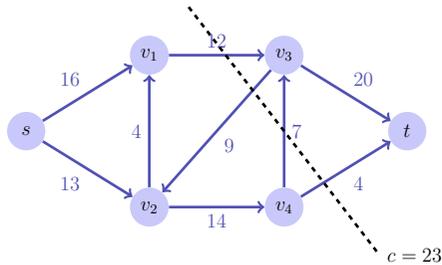
724

Maximaler Fluss ?

Es gilt insbesondere für alle Schnitte (S, T) von V .

$$f(S, T) \leq \sum_{v \in S, v' \in T} c(v, v') = c(S, T)$$

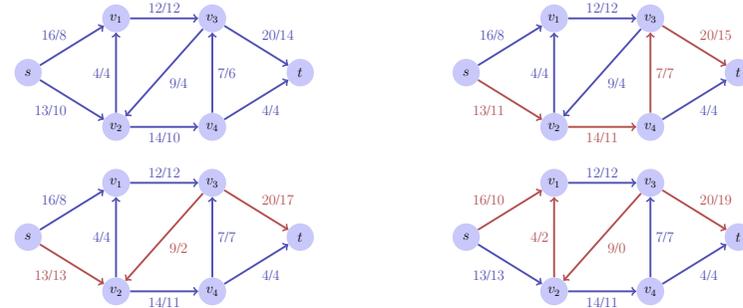
Werden sehen, dass Gleichheit gilt für $\min_{S, T} c(S, T)$.



725

Maximaler Fluss ?

Naives Vorgehen:



Folgerung: Greedy Flusserhöhung löst das Problem nicht.

726

Die Ford-Fulkerson Methode

- Starte mit $f(u, v) = 0$ für alle $u, v \in V$
- Bestimme Restnetzwerk* G_f und Erweiterungspfad in G_f
- Erhöhe Fluss über den Erweiterungspfad*
- Wiederholung bis kein Erweiterungspfad mehr vorhanden.

*Wird nun erklärt

727

Flusserhöhung, negativ

Sei ein Fluss f im Netzwerk gegeben.

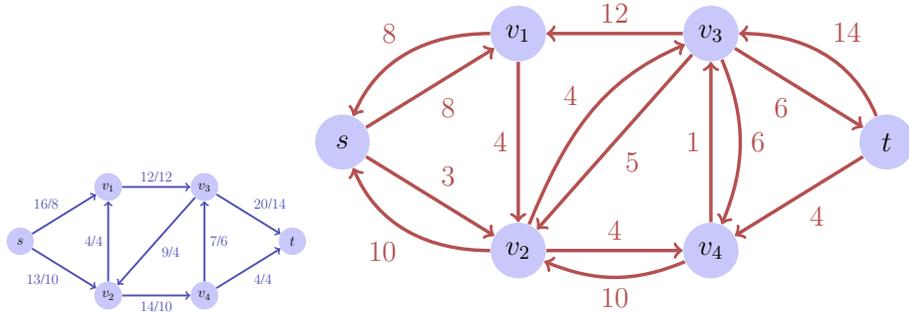
Erkenntnis:

- Flusserhöhung in Richtung einer Kante möglich, wenn Fluss entlang der Kante erhöht werden kann, also wenn $f(u, v) < c(u, v)$.
Restkapazität $c_f(u, v) = c(u, v) - f(u, v)$.
- Flusserhöhung *entgegen* der Kantenrichtung möglich, wenn Fluss entlang der Kante verringert werden kann, also wenn $f(u, v) > 0$.
Restkapazität $c_f(v, u) = f(u, v)$.

728

Restnetzwerk

Restnetzwerk G_f gegeben durch alle Kanten mit Restkapazität:



Restnetzwerke haben dieselben Eigenschaften wie Flussnetzwerke, ausser dass antiparallele Kanten zugelassen sind.

729

Beobachtung

Theorem

Sei $G = (V, E, c)$ ein Flussnetzwerk mit Quelle s und Senke t und f ein Fluss in G . Sei G_f das dazugehörige Restnetzwerk und sei f' ein Fluss in G_f . Dann definiert $f \oplus f'$ einen Fluss in G mit Wert $w(f) + w(f')$.

$$(f \oplus f')(u, v) = \begin{cases} f(u, v) + f'(u, v) - f'(v, u) & (u, v) \in E \\ 0 & (u, v) \notin E. \end{cases}$$

730

Beweis

Kapazitätsbeschränkung:

$$\begin{aligned} (f \oplus f')(u, v) &= f(u, v) + f'(u, v) - f'(v, u) \\ &\geq f(u, v) + f'(u, v) - f(u, v) = f'(u, v) \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (f \oplus f')(u, v) &= f(u, v) + f'(u, v) - f'(v, u) \\ &\leq f(u, v) + f'(u, v) \\ &\leq f(u, v) + c_f(u, v) \\ &= f(u, v) + c(u, v) - f(u, v) = c(u, v). \end{aligned}$$

731

Beweis

Flusserhaltung

$$\begin{aligned} \sum_{u \in V} (f \oplus f')(u, v) &= \sum_{u \in V} f(u, v) + \sum_{u \in V} f'(u, v) - \sum_{u \in V} f'(v, u) \\ &= \sum_{u \in V} f(v, u) + \sum_{u \in V} f'(v, u) - \sum_{u \in V} f'(u, v) \\ &= \sum_{u \in V} (f \oplus f')(v, u) \end{aligned}$$

(Flusserhaltung von f und f')

732

Beweis

Wert von $f \oplus f'$ (im Folgenden $N^+ := N^+(s)$, $N^- := N^-(s)$):

$$\begin{aligned}w(f \oplus f') &= \sum_{v \in N^+} (f \oplus f')(s, v) - \sum_{v \in N^-} (f \oplus f')(v, s) \\&= \sum_{v \in N^+} f(s, v) + f'(s, v) - f'(v, s) - \sum_{v \in N^-} f(v, s) + f'(v, s) - f'(s, v) \\&= \sum_{v \in N^+} f(s, v) - \sum_{v \in N^-} f(v, s) + \sum_{v \in N^+ \cup N^-} f'(s, v) + \sum_{v \in N^+ \cup N^-} f'(v, s) \\&= \sum_{v \in V} f(s, v) - \sum_{v \in V} f(v, s) + \sum_{v \in V} f'(s, v) + \sum_{v \in V} f'(v, s) \\&= w(f) + w(f').\end{aligned}$$

■

733

Fluss in G_f

Erweiterungspfad p : Pfad von s nach t im Restnetzwerk G_f .

Restkapazität $c_f(p) = \min\{c_f(u, v) : (u, v) \text{ Kante in } p\}$

Theorem

Die Funktion $f_p : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$,

$$f_p(u, v) = \begin{cases} c_f(p) & \text{wenn } (u, v) \text{ Kante in } p \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

ist ein Fluss in G_f mit dem Wert $w(f_p) = c_f(p) > 0$.

[Beweis: Übung]

734

Folgerung

Strategie für den Algorithmus:

Mit einem Erweiterungspfad p in G_f definiert $f \oplus f_p$ einen neuen Fluss mit Wert $w(f \oplus f_p) = w(f) + w(f_p) > w(f)$

735

Max-Flow Min-Cut Theorem

Theorem

Wenn f ein Fluss in einem Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$ mit Quelle s und Senke t ist, dann sind folgende Aussagen äquivalent:

- 1 f ist ein maximaler Fluss in G
- 2 Das Restnetzwerk G_f enthält keine Erweiterungspfade
- 3 Es gilt $w(f) = c(S, T)$ für einen Schnitt (S, T) von G .

736

Beweis

- (3) \Rightarrow (1):
Es gilt $w(f) \leq c(S, T)$ für alle Schnitte S, T . Aus $w(f) = c(S, T)$ folgt also $w(f)$ maximal.
- (1) \Rightarrow (2):
 f maximaler Fluss in G . Annahme: G_f habe einen Erweiterungsfad. Dann gilt $w(f \oplus f_p) = w(f) + w(f_p) > w(f)$. Widerspruch.

Beweis (2) \Rightarrow (3)

Annahme: G_f habe keinen Erweiterungsfad. Definiere $S = \{v \in V : \text{es existiert Pfad } s \rightsquigarrow v \text{ in } G_f\}$. $(S, T) := (S, V \setminus S)$ ist ein Schnitt: $s \in S, t \notin S$. Sei $u \in S$ und $v \in T$.

- Wenn $(u, v) \in E$, dann $f(u, v) = c(u, v)$, sonst wäre $(u, v) \in E_f$.
- Wenn $(v, u) \in E$, dann $f(v, u) = 0$, sonst wäre $c_f(u, v) = f(v, u) > 0$ und $(u, v) \in E_f$.
- Wenn $(u, v) \notin E$ und $(v, u) \notin E$, dann $f(u, v) = f(v, u) = 0$.

Also

$$\begin{aligned} w(f) = f(S, T) &= \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{v \in T} \sum_{u \in S} f(v, u) \\ &= \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) - \sum_{v \in T} \sum_{u \in S} 0 = \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) = c(S, T). \end{aligned}$$

737

738

Algorithmus Ford-Fulkerson(G, s, t)

Input : Flussnetzwerk $G = (V, E, c)$

Output : Maximaler Fluss f .

for $(u, v) \in E$ **do**

$f(u, v) \leftarrow 0$

while Existiert Pfad $p : s \rightsquigarrow t$ im Restnetzwerk G_f **do**

$c_f(p) \leftarrow \min\{c_f(u, v) : (u, v) \in p\}$

foreach $(u, v) \in p$ **do**

if $(u, v) \in E$ **then**

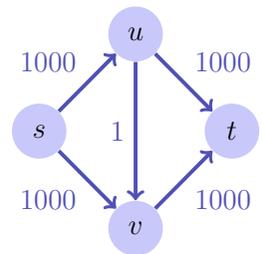
$f(u, v) \leftarrow f(u, v) + c_f(p)$

else

$f(v, u) \leftarrow f(v, u) - c_f(p)$

Analyse

- Der Ford-Fulkerson Algorithmus muss für irrationale Kapazitäten nicht einmal terminieren! Für ganze oder rationale Zahlen terminiert der Algorithmus.
- Für ganzzahligen Fluss benötigt der Algorithmus maximal $w(f_{\max})$ Durchläufe der While-Schleife. Suche einzelner zunehmender Weg (z.B. mit Tiefensuche oder Breitensuche $\mathcal{O}(|E|)$). Also $\mathcal{O}(f_{\max}|E|)$.



Bei schlecht gewählter Strategie benötigt der Algorithmus hier bis zu 2000 Iterationen.

739

740

Edmonds-Karp Algorithmus

Wähle in der Ford-Fulkerson-Methode zum Finden eines Pfades in G_f jeweils einen Erweiterungspfad kürzester Länge (z.B. durch Breitensuche).

741

Edmonds-Karp Algorithmus

Theorem

Wenn der Edmonds-Karp Algorithmus auf ein ganzzahliges Flussnetzwerk $G = (V, E)$ mit Quelle s und Senke t angewendet wird, dann ist die Gesamtanzahl der durch den Algorithmus angewendete Flusserhöhungen in $\mathcal{O}(|V| \cdot |E|)$

[Ohne Beweis]

742

Anwendung: Maximales bipartites Matching

Gegeben: bipartiter ungerichteter Graph $G = (V, E)$.

Matching M : $M \subseteq E$ so dass $|\{m \in M : v \in m\}| \leq 1$ für alle $v \in V$.

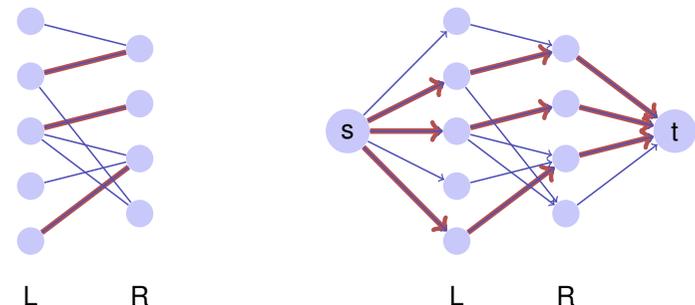
Maximales Matching M : Matching M , so dass $|M| \geq |M'|$ für jedes Matching M' .



743

Korrespondierendes Flussnetzwerk

Konstruiere zur einer Partition L, R eines bipartiten Graphen ein korrespondierendes Flussnetzwerk mit Quelle s und Senke t , mit gerichteten Kanten von s nach L , von L nach R und von R nach t . Jede Kante bekommt Kapazität 1.



744

Ganzzahligkeitstheorem

Theorem

Wenn die Kapazitäten eines Flussnetzwerks nur ganzzahlige Werte annehmen, dann hat der durch Ford-Fulkerson erzeugte maximale Fluss die Eigenschaft, dass der Wert von $f(u, v)$ für alle $u, v \in V$ eine ganze Zahl ist.

[ohne Beweis]

Folgerung: Ford Fulkerson erzeugt beim zum bipartiten Graph gehörenden Flussnetzwerk ein maximales Matching

$$M = \{(u, v) : f(u, v) = 1\}.$$

745

26. Geometrische Algorithmen

Lage von Strecken, Schnitt vieler Strecken, Konvexe Hülle, Dichtestes Punktepaar [Ottman/Widmayer, Kap. 8.2,8.3,8.8.2, Cormen et al, Kap. 33]

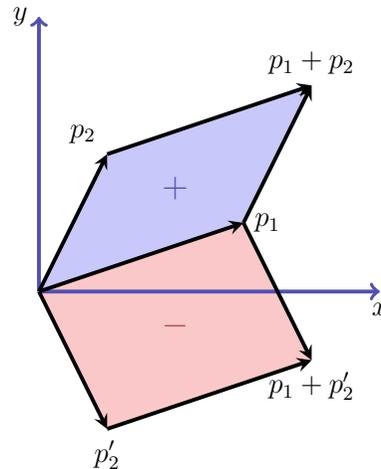
746

Eigenschaften von Strecken

Kreuzprodukt zweier Vektoren $p_1 = (x_1, y_1), p_2 = (x_2, y_2)$ in der Ebene

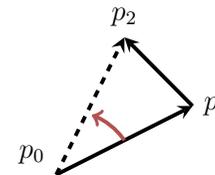
$$p_1 \times p_2 = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix} = x_1 y_2 - x_2 y_1$$

Vorzeichenbehafteter Flächeninhalt des Parallelogramms

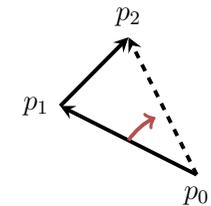


747

Abbiegerichtung



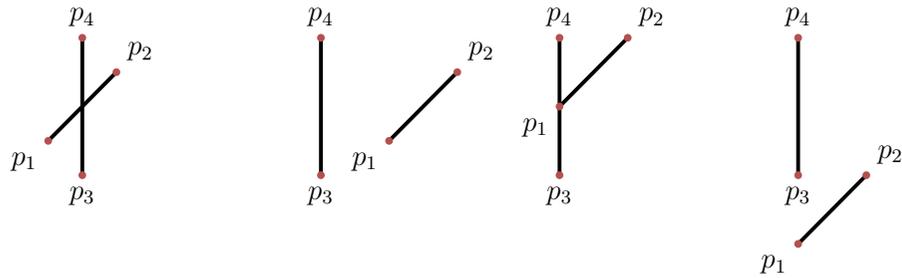
nach links:
 $(p_1 - p_0) \times (p_2 - p_0) > 0$



nach rechts:
 $(p_1 - p_0) \times (p_2 - p_0) < 0$

748

Schnitt zweier Strecken



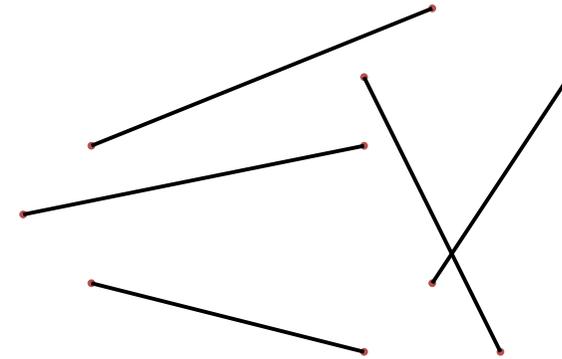
Schnitt: p_1 und p_2 gegenüber bzgl. $\overline{p_3p_4}$ und p_3, p_4 gegenüber bzgl. $\overline{p_1p_2}$

Kein Schnitt: p_1 und p_2 auf der gleichen Seite von $\overline{p_3p_4}$

Schnitt: p_1 auf $\overline{p_3p_4}$

Kein Schnitt: p_3 und p_4 auf der gleichen Seite von $\overline{p_1p_2}$

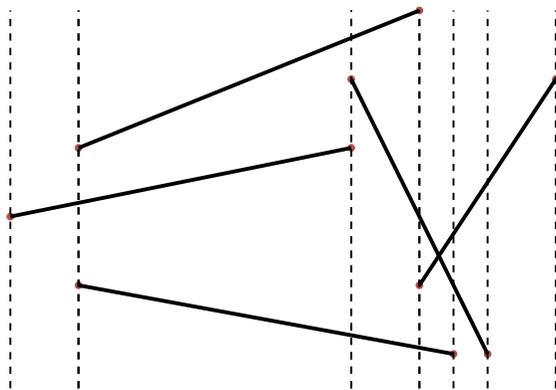
Schnittpunkt vieler Strecken



749

750

Sweepline Prinzip



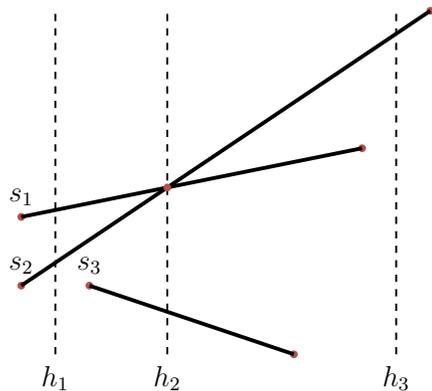
Vereinfachende Annahmen

- Keine Strecke verläuft senkrecht
- Jeder Schnittpunkt wird von maximal zwei Strecken gebildet.

751

752

Anordnen von Strecken



Quasiordnung (Halbordnung ohne Antisymmetrie)

$$s_2 \prec_{h_1} s_1$$

$$s_1 \prec_{h_2} s_2$$

$$s_2 \prec_{h_2} s_1$$

$$s_3 \prec_{h_2} s_2$$

Bzgl. h_3 sind die Strecken unvergleichbar.

753

Sweep-Line bewegen

- **Sweep-Line Status** : Beziehung der durch Sweep-Line geschnittenen Objekte
- **Ereignisliste** : Folge von Ereignispunkten, nach x -Koordinate geordnet. Sweepline wandert von links nach rechts und hält an jedem Ereignispunkt.

754

Sweep-Line Status

Vorordnung T der geschnittenen Strecken Benötigte Operationen:

- **Insert(T, s)** Füge Strecke s in T ein
- **Delete(T, s)** Entferne s von T
- **Above(T, s)** Rückgabe Strecke unmittelbar oberhalb von s in T
- **Below(T, s)** Rückgabe Strecke unmittelbar unterhalb von s in T

Mögliche Implementation: Balancierter Baum (AVL-Baum, Rot-Schwarz Baum etc.)

755

Algorithmus Any-Segments-Intersect(S)

Input : Liste von Strecken S

Output : Rückgabe ob S schneidende Strecken enthält

$T \leftarrow \emptyset$

Sortiere Endpunkte der Strecken in S von links nach rechts (links vor rechts und unten vor oben)

for Sortierte Endpunkte p **do**

if p linker Endpunkt einer Strecke s **then**

 Insert(T, s)

if Above(T, s) $\cap s \neq \emptyset \vee$ Below(T, s) $\cap s \neq \emptyset$ **then return true**

if p rechter Endpunkt einer Strecke s **then**

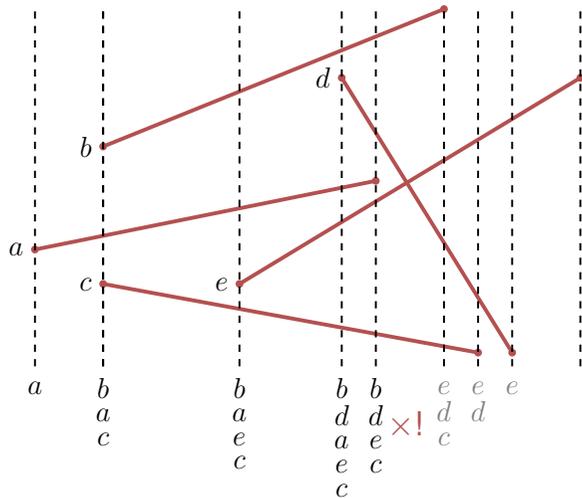
if Above(T, s) \cap Below(T, s) $\neq \emptyset$ **then return true**

 Delete(T, s)

return false;

756

Illustration



757

Analyse

Laufzeit des Algorithmus Any-Segments-Intersect

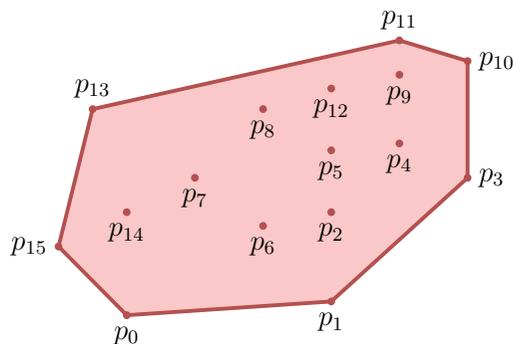
- Sortieren $\mathcal{O}(n \log n)$
- n Iterationen der For-Schleife. Jede Operation auf dem balancierten Baum $\mathcal{O}(\log n)$

Insgesamt $\mathcal{O}(n \log n)$

758

Konvexe Hülle

Konvexe Hülle $CH(Q)$ einer Menge Q von Punkten: kleinstes konvexes Polygon P , so dass jeder Punkt entweder auf dem Rand oder im Inneren liegt.



759

Algorithmus Graham-Scan

Input : Menge von Punkten Q

Output : Stack S von Punkten der konvexen Hülle von Q

p_0 : Punkt mit minimaler y - (gegebenenfalls zusätzlich minimaler x -) Koordinate
 (p_1, \dots, p_m) restlichen Punkte sortiert nach Polarwinkel gegen Uhrzeigersinn relativ zu p_0 ; Wenn Punkte mit gleichem Polarwinkel vorhanden, verwirfe alle ausser dem mit maximalen Abstand von p_0

$S \leftarrow \emptyset$

if $m < 2$ **then return** S

Push(S, p_0); Push(S, p_1); Push(S, p_2)

for $i \leftarrow 3$ **to** m **do**

while Winkel (NextToTop(S), Top(S), p_i) nicht nach links gerichtet **do**

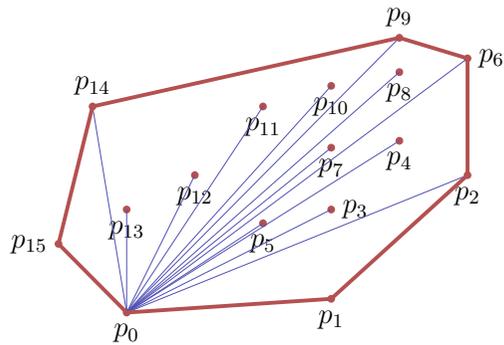
 Pop(S);

 Push(S, p_i)

return S

760

Illustration Graham-Scan



Stack:

p_{15}
 p_{14}
 p_9
 p_6
 p_2
 p_1
 p_0

Analyse

Laufzeit des Algorithmus Graham-Scan

- Sortieren $\mathcal{O}(n \log n)$
- n Iterationen der For-Schleife
- Amortisierte Analyse des Multipop beim Stapel: amortisiert konstante Laufzeit des Multipop, ebenso hier: amortisiert konstante Laufzeit der While-Schleife.

Insgesamt $\mathcal{O}(n \log n)$

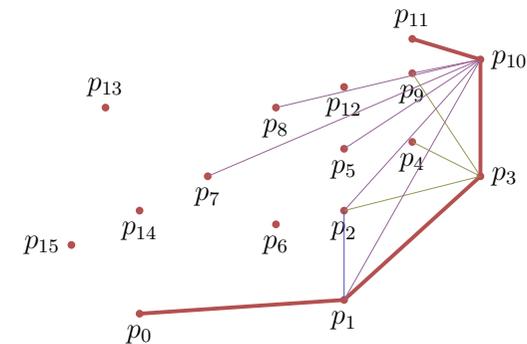
761

762

Jarvis Marsch / Gift Wrapping Algorithmus

- 1 Starte mit Extrempunkt (z.B. unterster Punkt) $p = p_0$
- 2 Suche Punkt q , so dass \overline{pq} am weitesten rechts liegende Gerade, d.h. jeder andere Punkt liegt links von der Geraden \overline{pq} (oder auf der Geraden näher bei p).
- 3 Fahre mit $p \leftarrow q$ bei (2) weiter, bis $p = p_0$.

Illustration Jarvis



763

764

Analyse Gift-Wrapping

- Sei h die Anzahl Eckpunkte der konvexen Hülle.
- Laufzeit des Algorithmus $\mathcal{O}(h \cdot n)$.

Dichtestes Punktepaa

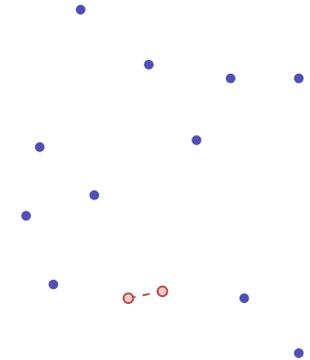
Euklidischer Abstand $d(s, t)$ zweier Punkte s und t :

$$d(s, t) = \|s - t\|_2 = \sqrt{(s_x - t_x)^2 + (s_y - t_y)^2}$$

Problem: Suche Punkte p und q aus Q , für welche gilt

$$d(p, q) \leq d(s, t) \quad \forall s, t \in Q, s \neq t.$$

Naiv: alle $\binom{n}{2} = \Theta(n^2)$ Punktepaae.

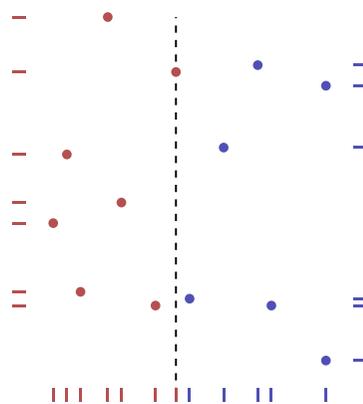


765

766

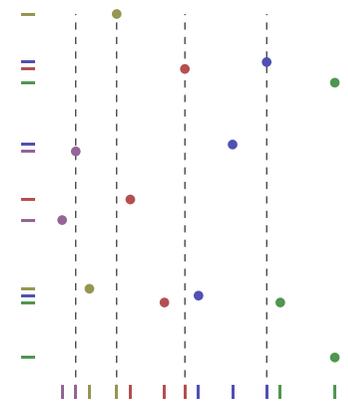
Divide And Conquer

- Punktmenge P , zu Beginn $P \leftarrow Q$
- Arrays X und Y , welche die Punkte aus P enthalten, sortiert nach x - bzw. nach y -Koordinate.
- Teile Punktmenge ein in zwei (annähernd) gleich grosse Mengen P_L und P_R , getrennt durch vertikale Gerade durch einen Punkt von P .
- Teile Arrays X und Y entsprechend in X_L, X_R, Y_L und Y_R .



Divide And Conquer

- Rekursiver Aufruf jeweils mit P_L, X_L, Y_L und P_R, X_R, Y_R . Erhalte minimale Abstände δ_L, δ_R .
- (Wenn nur noch $k \leq 3$ Punkte: berechne direkt minimalen Abstand)
- Nach rekursivem Aufruf $\delta = \min(\delta_L, \delta_R)$. Kombiniere (nächste Folie) und gib bestes Resultat zurück.



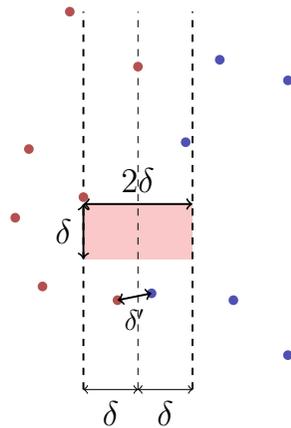
767

768

Kombinieren

- Erzeuge Array Y' mit y -sortierten Punkten aus Y , die innerhalb des 2δ Streifens um die Trennlinie befinden
- Betrachte für jeden Punkt $p \in Y'$ die sieben* (!) auf p folgenden Punkte. Berechne minimale Distanz δ' .
- Wenn $\delta' < \delta$, dann noch dichteres Paar in P als in P_L und P_R gefunden. Rückgabe der minimalen Distanz.

*Man kann zeigen, dass maximal acht Punkte aus P im gezeigten Rechteck liegen können. Hier ohne Beweis.



Implementation

- Ziel: Rekursionsgleichung (Laufzeit) $T(n) = 2 \cdot T(\frac{n}{2}) + \mathcal{O}(n)$.
- Konsequenz: in den Schritten ist das Sortieren verboten!
- Nichttrivial: nur Arrays Y und Y'
- Idee: Merge umgekehrt: durchlaufe (nach y -Koordinate vorsortiertes) Y und hänge dem Auswahlkriterium der x -Koordinate folgend an Y_L und Y_R an. Genauso für Y' . Laufzeit $\mathcal{O}(|Y|)$.

Gesamtlaufzeit: $\mathcal{O}(n \log n)$.

769

770

The Free Lunch

27. Parallel Programming I

Moore's Law und The Free Lunch, Hardware Architekturen, Parallele Ausführung, Klassifikation nach Flynn, Multi-Threading, Parallelität und Nebenläufigkeit, Skalierbarkeit: Amdahl und Gustafson, Daten- und Taskparallelität, Scheduling

[Task-Scheduling: Cormen et al, Kap. 27]

The free lunch is over ³⁶

771

³⁶"The Free Lunch is Over", a fundamental turn toward concurrency in software, Herb Sutter, Dr. Dobbs's Journal, 2005

772

Moore's Law



Gordon E. Moore (1929)

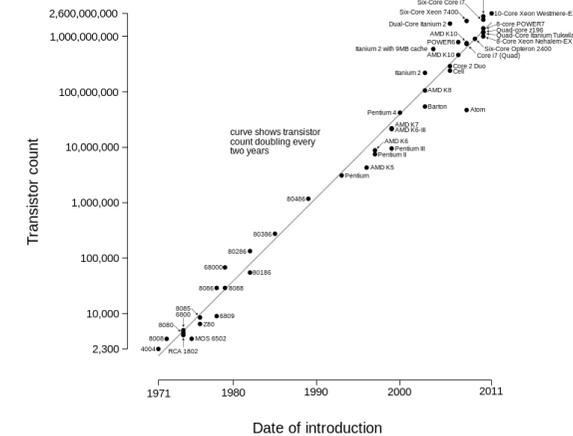
Beobachtung von Gordon E. Moore:

Die Anzahl Transistoren in integrierten Schaltkreisen verdoppelt sich ungefähr alle zwei Jahre.

773

Moore's Law

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



By Wjgsimon, <https://commons.wikimedia.org/wiki/index.php?curid=15193542>

774

Für eine lange Zeit...

- wurde die sequentielle Ausführung schneller (Instruction Level Parallelism, Pipelining, Höhere Frequenzen)
- mehr und kleinere Transistoren = mehr Performance
- Programmierer warteten auf die nächste schnellere Generation

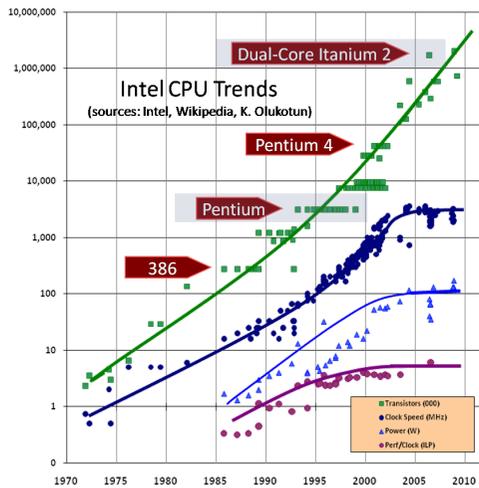
775

Heute

- steigt die Frequenz der Prozessoren kaum mehr an (Kühlproblematik)
- steigt die Instruction-Level Parallelität kaum mehr an
- ist die Ausführungsgeschwindigkeit in vielen Fällen dominiert von Speicherzugriffszeiten (Caches werden aber immer noch grösser und schneller)

776

Trends



<http://www.getw.ca/publications/concurrency-ddj.htm>
777

Multicore

- Verwende die Transistoren für mehr Rechenkerne
- Parallelität in der Software
- Implikation: Programmierer müssen parallele Programme schreiben, um die neue Hardware vollständig ausnutzen zu können

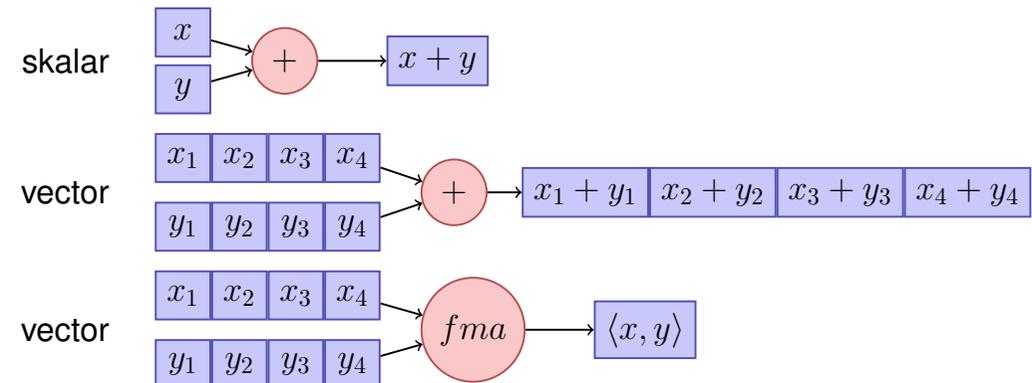
778

Formen der Parallelen Ausführung

- Vektorisierung
- Pipelining
- Instruction Level Parallelism
- Multicore / Multiprocessing
- Verteiltes Rechnen

Vektorisierung

Parallele Ausführung derselben Operation auf Elementen eines Vektor(Register)s



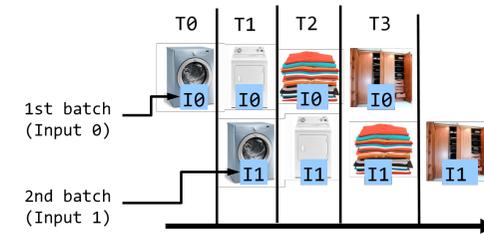
779

780

Hausarbeit



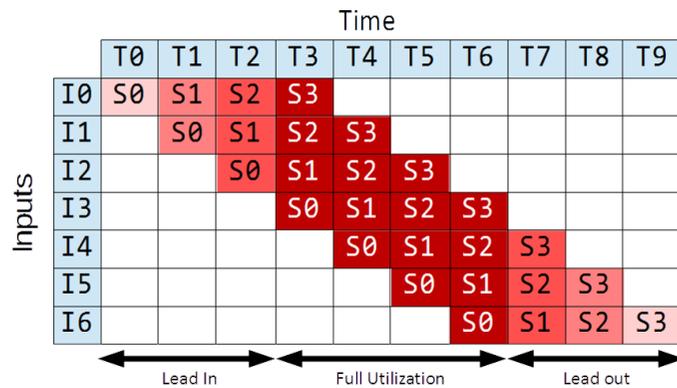
Effizienter



781

782

Pipeline



Throughput (Durchsatz)

- Throughput = Rate der ein- oder ausgehenden Daten
- Anzahl Operationen pro Zeiteinheit
- Je grösser, desto besser
- Approximation

$$\text{throughput} = \frac{1}{\max(\text{Berechnungszeit}(\text{Stufen}))}$$

ignoriert lead-in und lead-out Zeiten

783

784

Latenz

- Zeit zum Ausführen einer Berechnung
- Pipeline-Latenz ist nur konstant, wenn die Pipeline balanciert ist: Summe aller Operationen über die Stufen
- Unbalancierte Pipeline
 - Erster Durchlauf wie bei der balancierten Pipeline
 - Balancierte Version, Latenz= #stufen · max(Berechnungszeit(Stufen))

785

Beispiel Hausarbeit

Waschen $T_0 = 1h$, Trocknen $T_1 = 2h$, Bügeln $T_2 = 1h$, Versorgen $T_3 = 0.5h$

- Latenz Erster Durchlauf: $L = T_0 + T_1 + T_2 + T_3 = 4.5h$
- Latenz Zweiter Durchlauf: $L = T_1 + T_1 + T_2 + T_3 = 5.5h$
- Langfristiger Durchsatz: 1 Ladung alle $2h$ ($0.5/h$).

786

Throughput vs. Latency

- Erhöhen des Throughputs kann Latenz erhöhen
- Stufen der Pipeline müssen kommunizieren und synchronisieren: Overhead

787

Pipelines in CPUs

Fetch

Decode

Execute

Data Fetch

Writeback

Mehrere Stufen

- Jede Instruktion dauert 5 Zeiteinheiten (Zyklen)
- Im besten Fall: 1 Instruktion pro Zyklus, nicht immer möglich ("stalls")

Parallelität (mehrere funktionale Einheiten) führt zu *schnellerer Ausführung*.

788

ILP – Instruction Level Parallelism

Moderne CPUs führen unabhängige Instruktionen intern auf mehreren Einheiten parallel aus

- Pipelining
- Superscalar CPUs (multiple instructions per cycle)
- Out-Of-Order Execution (Programmer observes the sequential execution)
- Speculative Execution

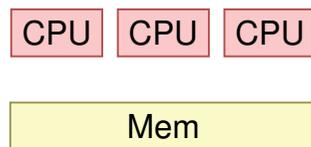
789

27.2 Hardware Architekturen

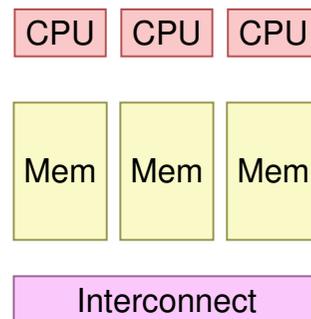
790

Gemeinsamer vs. verteilter Speicher

Gemeinsamer Speicher



Verteilter Speicher



791

Shared vs. Distributed Memory Programming

- Kategorien des Programmierinterfaces
 - Kommunikation via Message Passing
 - Kommunikation via geteiltem Speicher
- Es ist möglich:
 - Systeme mit gemeinsamen Speicher als verteilte Systeme zu programmieren (z.B. mit Message Passing Interface MPI)
 - Systeme mit verteiltem Speicher als System mit gemeinsamen Speicher zu programmieren (z.B. Partitioned Global Address Space PGAS)

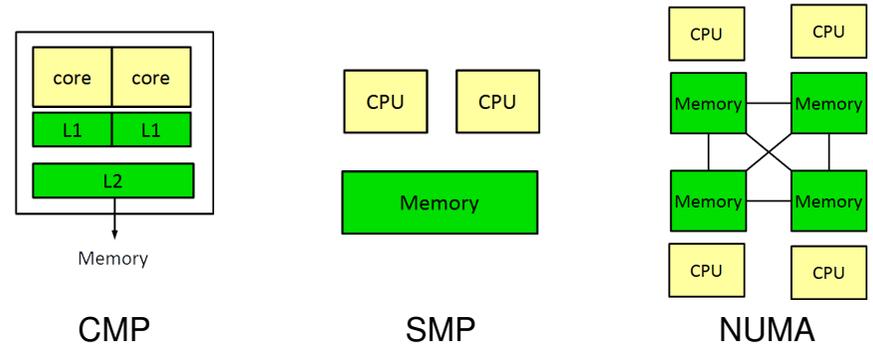
792

Architekturen mit gemeinsamen Speicher

- Multicore (Chip Multiprocessor - CMP)
- Symmetric Multiprocessor Systems (SMP)
- Simultaneous Multithreading (SMT = Hyperthreading)
 - nur ein physischer Kern, Mehrere Instruktionsströme/Threads: mehrere virtuelle Kerne
 - Zwischen ILP (mehrere Units für einen Strom) und Multicore (mehrere Units für mehrere Ströme). Limitierte parallele Performance
- Non-Uniform Memory Access (NUMA)

Gleiches Programmierinterface!

Übersicht



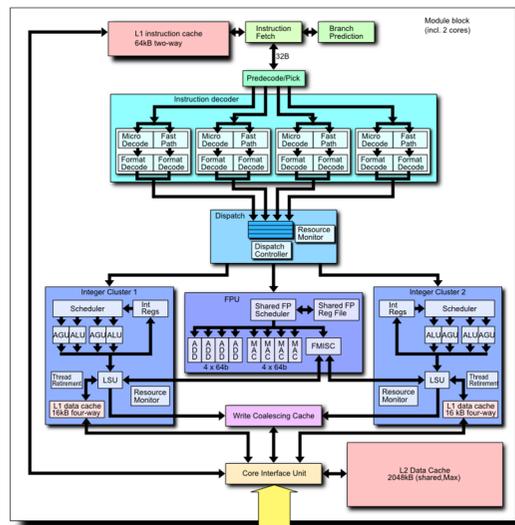
793

794

Ein Beispiel

AMD Bulldozer: Zwischen CMP und SMT

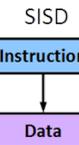
- 2x integer core
- 1x floating point core



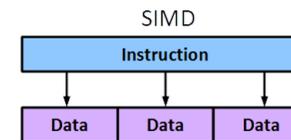
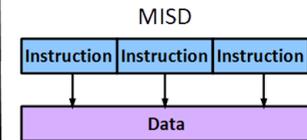
Wikipedia
795

Klassifikation nach Flynn

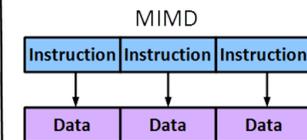
Single-Core



Fault-Tolerance



Vector Computing / GPU



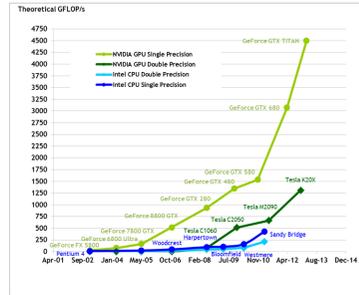
Multi-Core

796

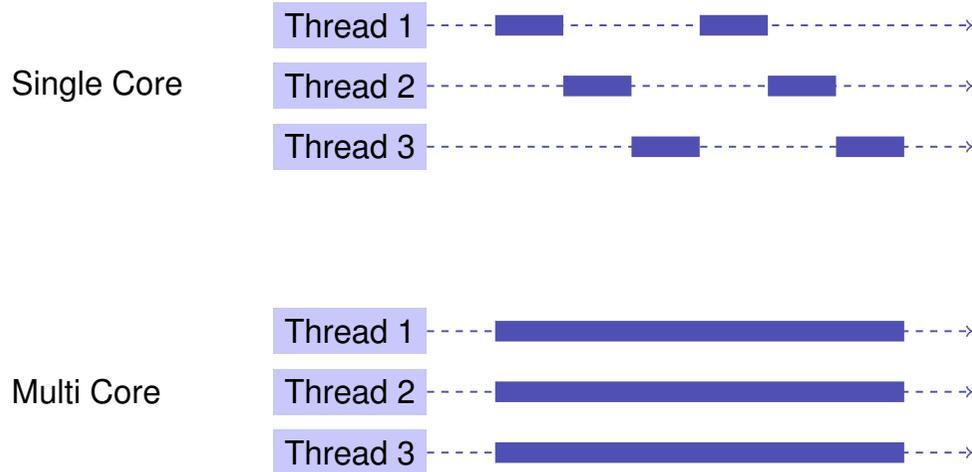
Massiv Parallele Hardware

[General Purpose] Graphical Processing Units ([GP]GPUs)

- Revolution im High Performance Computing
 - Calculation 4.5 TFlops vs. 500 GFlops
 - Memory Bandwidth 170 GB/s vs. 40 GB/s
- SIMD
 - Hohe Datenparallelität
 - Benötigt eigenes Programmiermodell. Z.B. CUDA / OpenCL

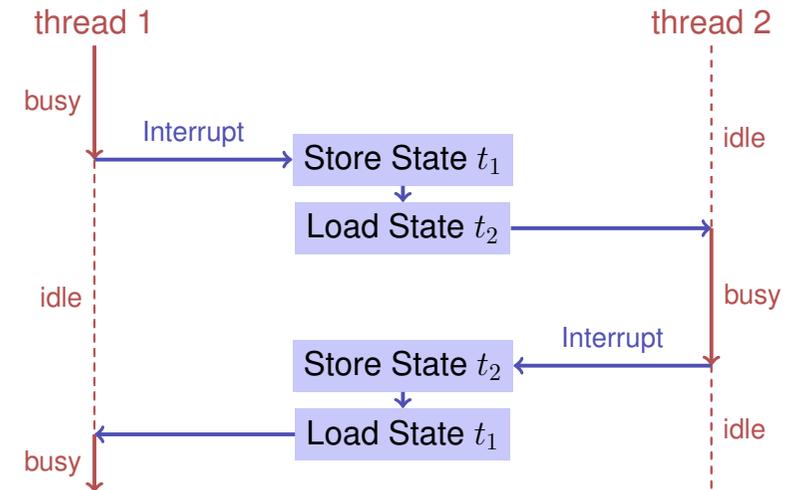


Multithreading konzeptuell



801

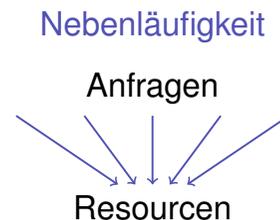
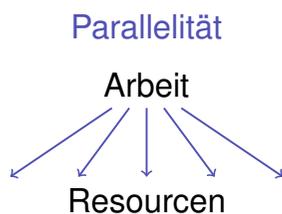
Threadwechsel auf einem Core (Preemption)



802

Parallelität vs. Nebenläufigkeit (Concurrency)

- **Parallelität:** Verwende zusätzliche Ressourcen (z.B. CPUs), um ein Problem schneller zu lösen
- **Nebenläufigkeit:** Verwalte gemeinsam genutzte Ressourcen (z.B. Speicher) korrekt und effizient
- Begriffe überlappen offensichtlich. Bei parallelen Berechnungen besteht fast immer Synchronisierungsbedarf.



803

Thread-Sicherheit

Thread-Sicherheit bedeutet, dass in der nebenläufigen Anwendung eines Programmes dieses sich immer wie gefordert verhält.

Viele Optimierungen (Hardware, Compiler) sind darauf ausgerichtet, dass sich ein *sequentielles* Programm korrekt verhält.

Nebenläufige Programme benötigen für ihre Synchronisierungen auch eine Annotation, welche gewisse Optimierungen selektiv abschaltet

804

Beispiel: Caches

- Speicherzugriff auf Register schneller als auf den gemeinsamen Speicher
- Prinzip der Lokalität
- Verwendung von Caches (transparent für den Programmierer)

Ob und wie weit die Cache-Kohärenz sichergestellt wird ist vom eingesetzten System abhängig.



805

806

27.4 Skalierbarkeit: Amdahl und Gustafson

Skalierbarkeit

In der parallelen Programmierung:

- Geschwindigkeitssteigerung bei wachsender Anzahl p Prozessoren
- Was passiert, wenn $p \rightarrow \infty$?
- Linear skalierendes Programm: Linearer Speedup

807

Parallele Performanz

Gegeben fixierte Rechenarbeit W (Anzahl Rechenschritte)

Sequentielle Ausführungszeit sei T_1

Parallele Ausführungszeit T_p auf p CPUs

- Perfektion: $T_p = T_1/p$
- Performanzverlust: $T_p > T_1/p$ (üblicher Fall)
- Hexerei: $T_p < T_1/p$

808

Paralleler Speedup

Paralleler Speedup S_p auf p CPUs:

$$S_p = \frac{W/T_p}{W/T_1} = \frac{T_1}{T_p}$$

- Perfektion: Linearer Speedup $S_p = p$
- Verlust: sublinearer Speedup $T_p > T_1/p$ (der übliche Fall)
- Hexerei: superlinearer Speedup $T_p < T_1/p$

Effizienz: $E_p = S_p/p$

809

Erreichbarer Speedup?

Paralleles Programm

Paralleler Teil	Seq. Teil
80%	20%

$$T_1 = 10$$

$$T_8 = ?$$

$$T_8 = \frac{10 \cdot 0.8}{8} + 10 \cdot 0.2 = 1 + 2 = 3$$

$$S_8 = \frac{T_1}{T_8} = \frac{10}{3} = 3.33$$

810

Amdahl's Law: Zutaten

Zu leistende Rechenarbeit W fällt in zwei Kategorien

- Parallelisierbarer Teil W_p
- Nicht parallelisierbarer, sequentieller Teil W_s

Annahme: W kann mit einem Prozessor in W Zeiteinheiten sequentiell erledigt werden ($T_1 = W$):

$$T_1 = W_s + W_p$$

$$T_p \geq W_s + W_p/p$$

811

Amdahl's Law

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} \leq \frac{W_s + W_p}{W_s + \frac{W_p}{p}}$$

812

Amdahl's Law

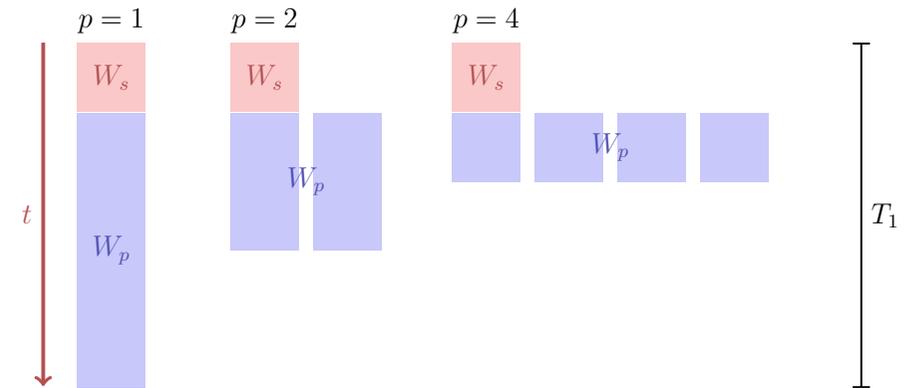
Mit seriellem, nicht parallelisierbarem Anteil λ : $W_s = \lambda W$,
 $W_p = (1 - \lambda)W$:

$$S_p \leq \frac{1}{\lambda + \frac{1-\lambda}{p}}$$

Somit

$$S_\infty \leq \frac{1}{\lambda}$$

Illustration Amdahl's Law



813

814

Amdahl's Law ist keine gute Nachricht

Alle nicht parallelisierbaren Teile können Problem bereiten und stehen der Skalierbarkeit entgegen.

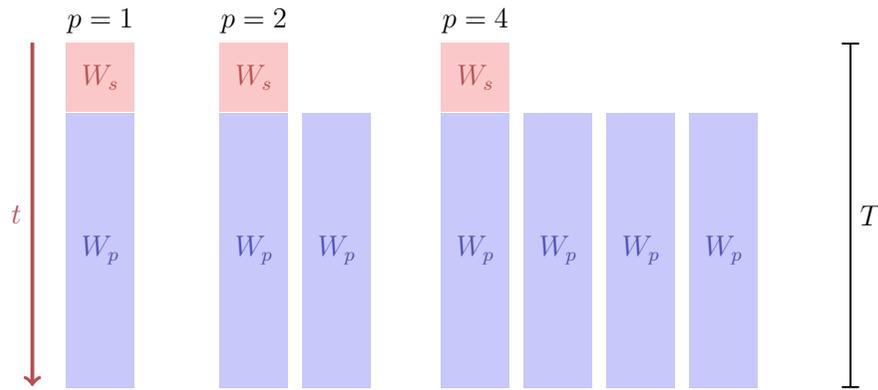
Gustafson's Law

- Halte die Ausführungszeit fest.
- Variiere die Problemgröße.
- Annahme: Der sequentielle Teil bleibt konstant, der parallele Teil wird grösser.

815

816

Illustration Gustafson's Law



817

Gustafson's Law

Arbeit, die mit einem Prozessor in der Zeit T erledigt werden kann:

$$W_s + W_p = T$$

Arbeit, die mit p Prozessoren in der Zeit T erledigt werden kann:

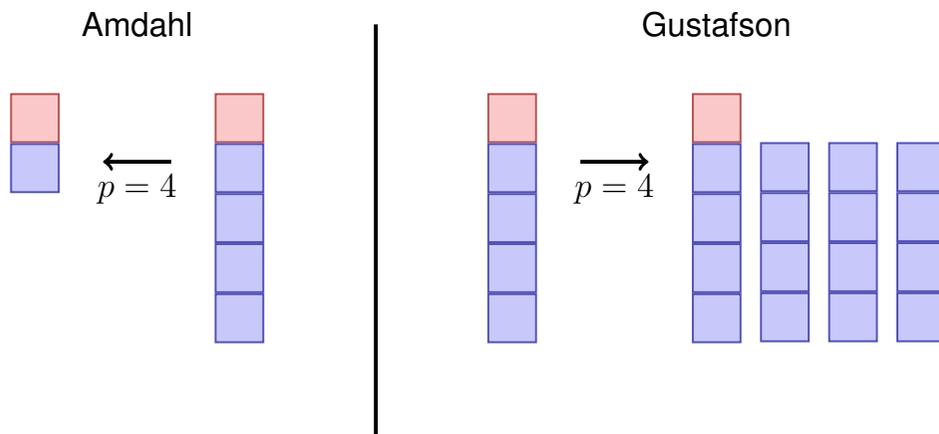
$$W_s + p \cdot W_p = \lambda \cdot T + p \cdot (1 - \lambda) \cdot T$$

Speedup:

$$\begin{aligned} S_p &= \frac{W_s + p \cdot W_p}{W_s + W_p} = p \cdot (1 - \lambda) + \lambda \\ &= p - \lambda(p - 1) \end{aligned}$$

818

Amdahl vs. Gustafson



819

27.5 Task- und Datenparallelität

820

Paradigmen der Parallelen Programmierung

- **Task Parallel:** Programmierer legt parallele Tasks explizit fest.
- **Daten-Parallel:** Operationen gleichzeitig auf einer Menge von individuellen Datenobjekten.

Beispiel Data Parallel (OMP)

```
double sum = 0, A[MAX];
#pragma omp parallel for reduction (+:ave)
for (int i = 0; i < MAX; ++i)
    sum += A[i];
return sum;
```

821

822

Beispiel Task Parallel (C++11 Threads/Futures)

```
double sum(Iterator from, Iterator to)
{
    auto len = from - to;
    if (len > threshold){
        auto future = std::async(sum, from, from + len / 2);
        return sumS(from + len / 2, to) + future.get();
    }
    else
        return sumS(from, to);
}
```

823

Partitionierung und Scheduling

- Aufteilung der Arbeit in parallele Tasks (Programmierer oder System)
 - Ein Task ist eine Arbeitseinheit
 - Frage: welche Granularität?
- Scheduling (Laufzeitsystem)
 - Zuweisung der Tasks zu Prozessoren
 - Ziel: volle Ressourcennutzung bei wenig Overhead

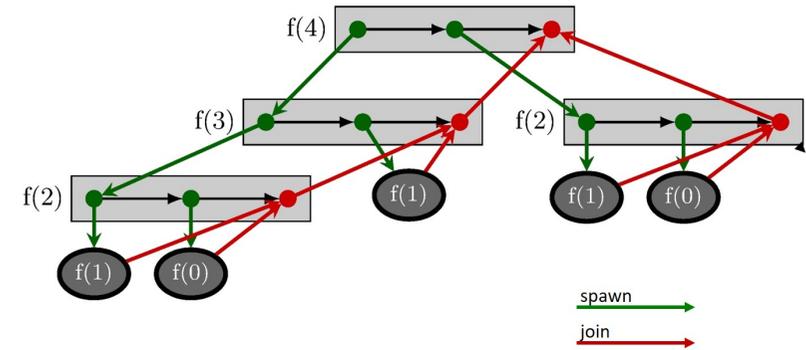
824

Beispiel: Fibonacci P-Fib

```

if  $n \leq 1$  then
  return  $n$ 
else
   $x \leftarrow$  spawn P-Fib( $n - 1$ )
   $y \leftarrow$  spawn P-Fib( $n - 2$ )
  sync
  return  $x + y$ ;
    
```

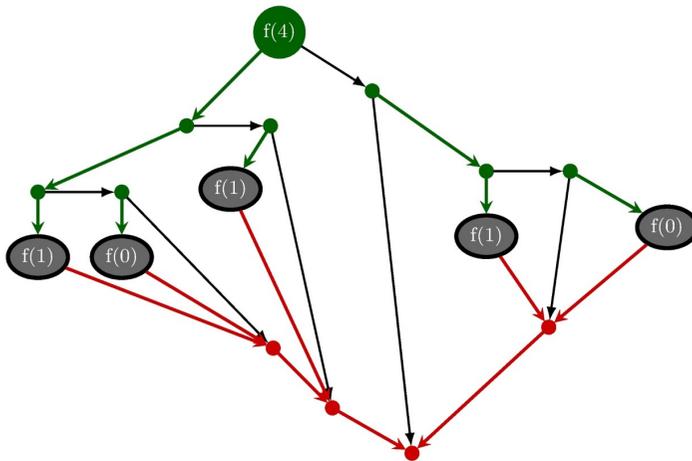
P-Fib Task Graph



825

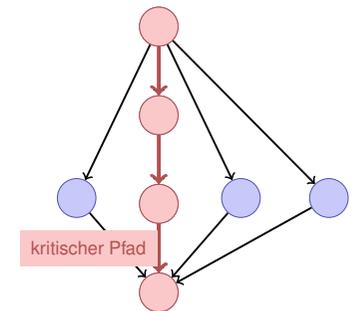
826

P-Fib Task Graph



Frage

- Jeder Knoten (Task) benötigt 1 Zeiteinheit.
- Pfeile bezeichnen Abhängigkeiten.
- Minimale Ausführungseinheit wenn Anzahl Prozessoren = ∞ ?

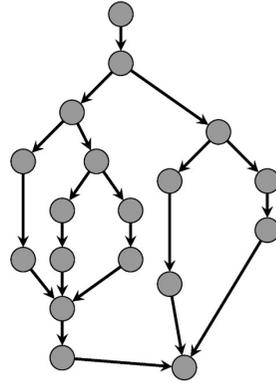


827

828

Performanzmodell

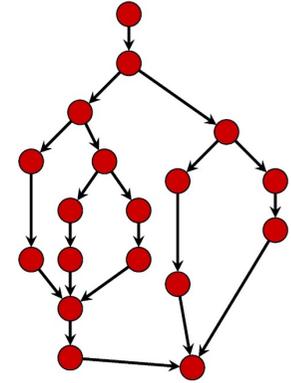
- p Prozessoren
- Dynamische Zuteilung
- T_p : Ausführungszeit auf p Prozessoren



829

Performanzmodell

- T_p : Ausführungszeit auf p Prozessoren
- T_1 : **Arbeit**: Zeit für die gesamte Berechnung auf einem Prozessor
- T_1/T_p : Speedup



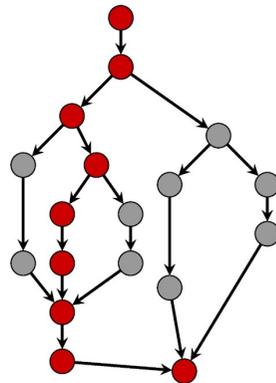
830

Performanzmodell

- T_∞ : **Zeitspanne**: Kritischer Pfad. Ausführungszeit auf ∞ Prozessoren. Längster Pfad von der Wurzel zur Senke.
- T_1/T_∞ : **Parallelität**: breiter ist besser
- Untere Grenzen

$$T_p \geq T_1/p \quad \text{Arbeitsgesetz}$$

$$T_p \geq T_\infty \quad \text{Zeitspannengesetz}$$



831

Greedy Scheduler

Greedy Scheduler: teilt zu jeder Zeit so viele Tasks zu Prozessoren zu wie möglich.

Theorem

Auf einem idealen Parallelrechner mit p Prozessoren führt ein Greedy-Scheduler eine mehrfädige Berechnung mit Arbeit T_1 und Zeitspanne T_∞ in Zeit

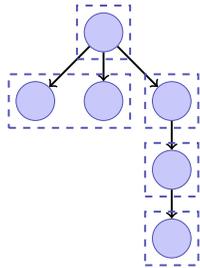
$$T_p \leq T_1/p + T_\infty$$

aus.

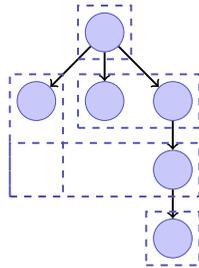
832

Beispiel

Annahme $p = 2$.



$$T_p = 5$$



$$T_p = 4$$

833

Beweis des Theorems

Annahme, dass alle Tasks gleich viel Arbeit aufweisen.

- Vollständiger Schritt: p Tasks stehen zur Berechnung bereit
- Unvollständiger Schritt: weniger als p Tasks bereit.

Annahme: Anzahl vollständige Schritte grösser als $\lfloor T_1/p \rfloor$.
 Ausgeführte Arbeit $\geq P \cdot (\lfloor T_1/p \rfloor \cdot p) = T_1 - T_1 \bmod p + p \geq T_1$.
 Widerspruch. Also maximal $\lfloor T_1/p \rfloor$ vollständige Schritte.

Jeder unvollständige Schritt führt zu jedem Zeitpunkt alle vorhandenen Tasks t mit $\deg^-(t) = 0$ aus und verringert die Länge der Zeitspanne. Andernfalls wäre die gewählte Zeitspanne nicht maximal. Anzahl unvollständige Schritte also maximal T_∞ .

834

Konsequenz

Wenn $p \ll T_1/T_\infty$, also $T_\infty \ll T_1/p$, dann $T_p \approx T_1/p$.

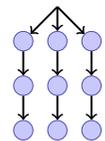
Beispiel Fibonacci

$T_1(n)/T_\infty(n) = \Theta(\phi^n/n)$. Für moderate Grössen von n können schon viele Prozessoren mit linearem Speedup eingesetzt werden.

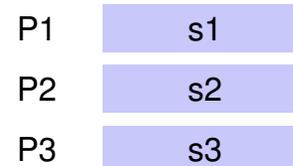
835

Granularität: Wie viele Tasks?

- #Tasks = #Cores?
- Problem: wenn ein Core nicht voll ausgelastet werden kann
- Beispiel: 9 Einheiten Arbeit. 3 Cores.
Scheduling von 3 sequentiellen Tasks.

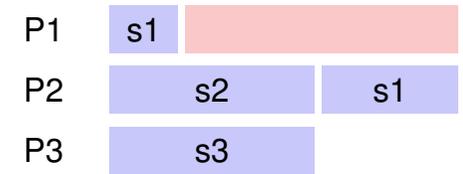


Exklusive Auslastung:



Ausführungszeit: 3 Einheiten

Fremder Thread "stört":

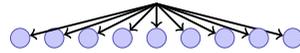


Ausführungszeit: 5 Einheiten

836

Granularität: Wie viele Tasks?

- #Tasks = Maximum?
- Beispiel: 9 Einheiten Arbeit. 3 Cores.
Scheduling von 9 sequentiellen Tasks.



Exklusive Auslastung:

P1	s1	s4	s7
P2	s2	s5	s8
P3	s3	s6	s9

Ausführungszeit: $3 + \varepsilon$ Einheiten

Fremder Thread "stört":

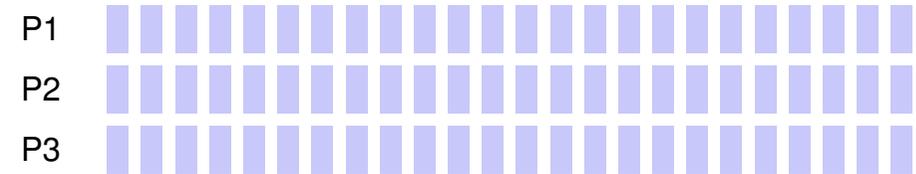
P1	s1			
P2	s2	s4	s5	s8
P3	s3	s6	s7	s9

Ausführungszeit: 4 Einheiten.
Volle Auslastung.

837

Granularität: Wie viele Tasks?

- #Tasks = Maximum?
- Beispiel: 10^6 kleine Einheiten Arbeit.



Ausführungszeit: dominiert vom Overhead.

838

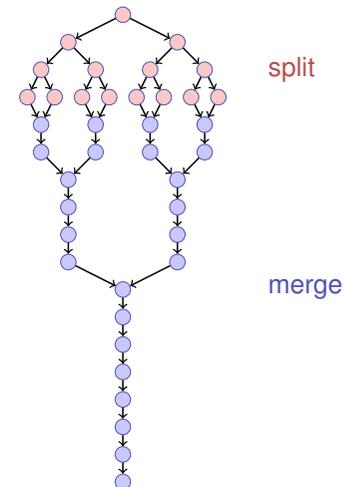
Granularität: Wie viele Tasks?

Antwort: so viele Tasks wie möglich mit sequentiellem Cut-off, welcher den Overhead vernachlässigen lässt.

839

Beispiel: Parallelität von Mergesort

- Arbeit (sequentielle Laufzeit) von Mergesort $T_1(n) = \Theta(n \log n)$.
- Span $T_\infty(n) = \Theta(n)$
- Parallelität $T_1(n)/T_\infty(n) = \Theta(\log n)$
(Maximal erreichbarer Speedup mit $p = \infty$ Prozessoren)



840

28. Parallel Programming II

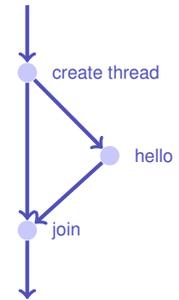
C++ Threads, Gemeinsamer Speicher, Nebenläufigkeit, Exkurs: Lock Algorithmus (Peterson), Gegenseitiger Ausschluss Race Conditions [C++ Threads: Anthony Williams, *C++ Concurrency in Action*]

C++11 Threads

```
#include <iostream>
#include <thread>

void hello(){
    std::cout << "hello\n";
}

int main(){
    // create and launch thread t
    std::thread t(hello);
    // wait for termination of t
    t.join();
    return 0;
}
```



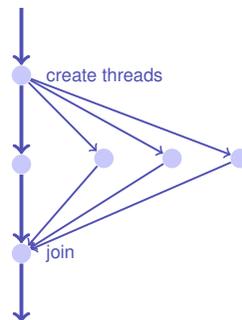
841

842

C++11 Threads

```
void hello(int id){
    std::cout << "hello from " << id << "\n";
}

int main(){
    std::vector<std::thread> tv(3);
    int id = 0;
    for (auto & t:tv)
        t = std::thread(hello, ++id);
    std::cout << "hello from main \n";
    for (auto & t:tv)
        t.join();
    return 0;
}
```



843

844

Nichtdeterministische Ausführung!

Eine Ausführung:

```
hello from main
hello from 2
hello from 1
hello from 0
```

Andere Ausführung:

```
hello from 1
hello from main
hello from 0
hello from 2
```

Andere Ausführung:

```
hello from main
hello from 0
hello from hello from 1
2
```

Technisches Detail

Um einen Thread als Hintergrundthread weiterlaufen zu lassen:

```
void background();

void someFunction(){
    ...
    std::thread t(background);
    t.detach();
    ...
} // no problem here, thread is detached
```

28.2 Gemeinsamer Speicher, Nebenläufigkeit

Mehr Technische Details

- Beim Erstellen von Threads werden auch Referenzparameter kopiert, ausser man gibt explizit `std::ref` bei der Konstruktion an.
- Funktoren oder Lambda-Expressions können auch auf einem Thread ausgeführt werden
- In einem Kontext mit Exceptions sollte das `join` auf einem Thread im `catch`-Block ausgeführt werden

Noch mehr Hintergründe im Kapitel 2 des Buches *C++ Concurrency in Action*, Anthony Williams, Manning 2012. Auch online bei der ETH Bibliothek erhältlich.

845

846

Gemeinsam genutzte Ressourcen (Speicher)

- Bis hier: fork-join Algorithmen: Datenparallel oder Divide und Conquer
- Einfache Struktur (Datenunabhängigkeit der Threads) zum Vermeiden von Wettlaufsituationen (*race conditions*)
- Funktioniert nicht mehr, wenn Threads gemeinsamen Speicher nutzen müssen.

847

848

Konsistenz des Zustands

Gemeinsamer Zustand: Hauptschwierigkeit beim nebenläufigen Programmieren.

Ansätze:

- Unveränderbarkeit, z.B. Konstanten
- Isolierte Veränderlichkeit, z.B. Thread-lokale Variablen, Stack.
- Gemeinsame veränderliche Daten, z.B. Referenzen auf gemeinsamen Speicher, globale Variablen

849

Schütze den gemeinsamen Zustand

- Methode 1: Locks, Garantiere exklusiven Zugriff auf gemeinsame Daten.
- Methode 2: lock-freie Datenstrukturen, garantiert exklusiven Zugriff mit sehr viel feinerer Granularität.
- Methode 3: Transaktionsspeicher (hier nicht behandelt)

850

Kanonisches Beispiel

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
public:
    int getBalance(){ return balance; }
    void setBalance(int x) { balance = x; }
    void withdraw(int amount) {
        int b = getBalance();
        setBalance(b - amount);
    }
    // deposit etc.
};
```

(korrekt bei Einzelthreadausführung)

851

Ungünstige Verschachtelung (Bad Interleaving)

Paralleler Aufruf von `withdraw(100)` auf demselben Konto

	Thread 1	Thread 2
	<code>int b = getBalance();</code>	<code>int b = getBalance();</code>
		<code>setBalance(b - amount);</code>
t	<code>setBalance(b - amount);</code>	

852

Verlockende Fallen

FALSCH:

```
void withdraw(int amount) {
    int b = getBalance();
    if (b==getBalance())
        setBalance(b - amount);
}
```

Bad interleavings lassen sich fast nie mit wiederholtem Lesen lösen

853

Verlockende Fallen

Auch FALSCH:

```
void withdraw(int amount) {
    setBalance(getBalance() - amount);
}
```

Annahmen über Atomizität von Operationen sind fast immer falsch

854

Gegenseitiger Ausschluss (Mutual Exclusion)

Wir benötigen ein Konzept für den gegenseitigen Ausschluss

Nur ein Thread darf zu einer Zeit die Operation *withdraw* *auf demselben Konto* ausführen.

Der Programmierer muss den gegenseitigen Ausschluss sicherstellen.

855

Mehr verlockende Fallen

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    bool busy = false;
public:
    void withdraw(int amount) {
        while (busy); // spin wait
        busy = true;
        int b = getBalance();
        setBalance(b - amount);
        busy = false;
    }

    // deposit would spin on the same boolean
};
```

funktioniert nicht!

856

Das Problem nur verschoben!

Thread 1

```
while (busy); //spin  
  
busy = true;  
  
int b = getBalance();  
  
setBalance(b - amount);
```

Thread 2

```
while (busy); //spin  
  
busy = true;  
  
int b = getBalance();  
setBalance(b - amount);
```

t

Wie macht man das richtig?

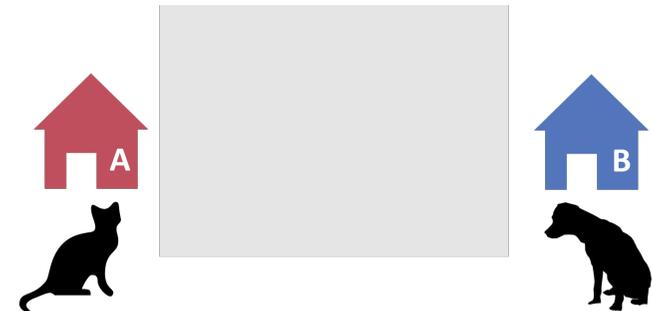
- Wir benutzen ein *Lock* (eine Mutex) aus Bibliotheken
- Eine Mutex verwendet ihrerseits Hardwareprimitiven, *Read-Modify-Write* (RMW) Operationen, welche atomar lesen und abhängig vom Leseergebnis schreiben können.
- Ohne RMW Operationen ist der Algorithmus nichttrivial und benötigt zumindest atomaren Zugriff auf Variablen von primitivem Typ.

857

858

28.3 Exkurs: Lock Algorithmus

Alice Katze und Bobs Dog



859

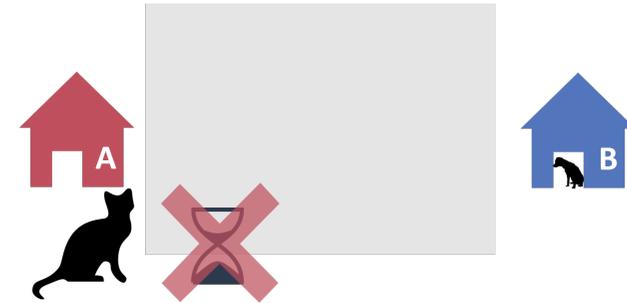
860

Gefordert: Gegenseitiger Ausschluss



861

Gefordert: Kein grundloses Aussperren



862

Arten der Kommunikation

- Transient: Parteien kommunizieren zur selben Zeit

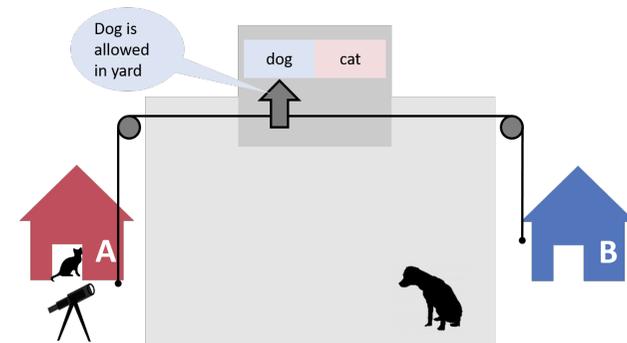


- Persistent: Parteien kommunizieren zu verschiedenen Zeiten



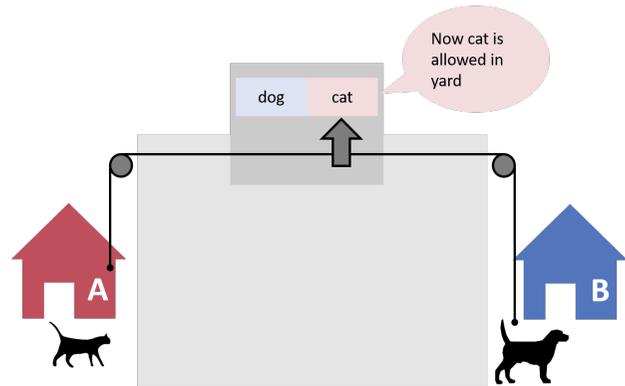
863

Erste Idee



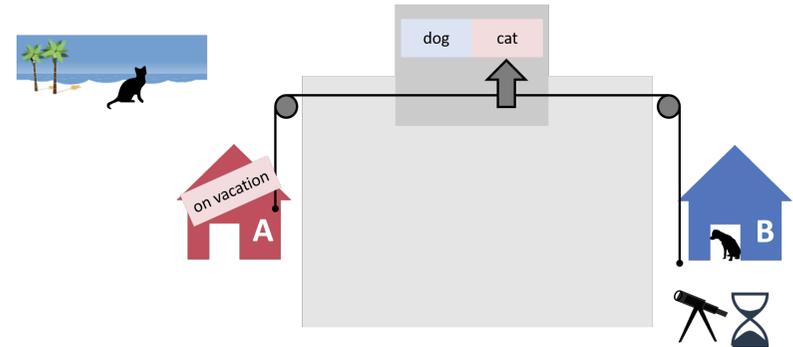
864

Zugriffsprotokoll



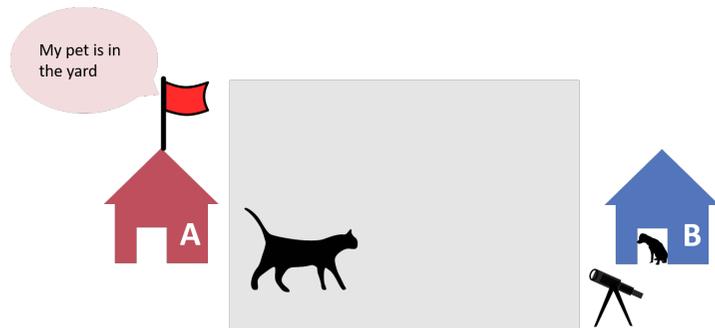
865

Problem!



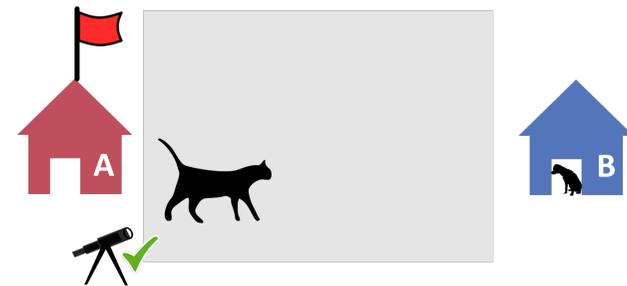
866

Zweite Idee



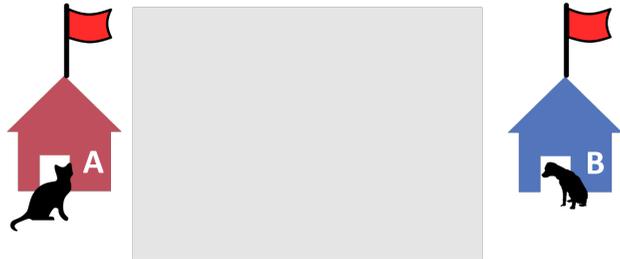
867

Zugriffsprotokoll 2.1



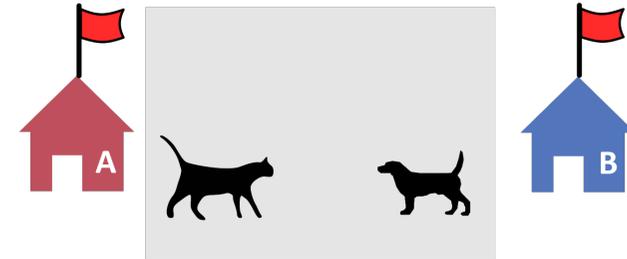
868

Anderes Szenario



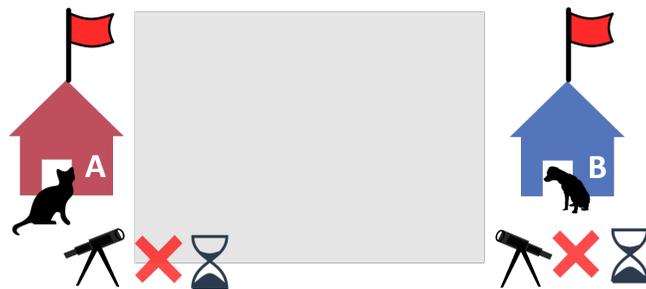
869

Problem: Kein gegenseitiger Ausschluss



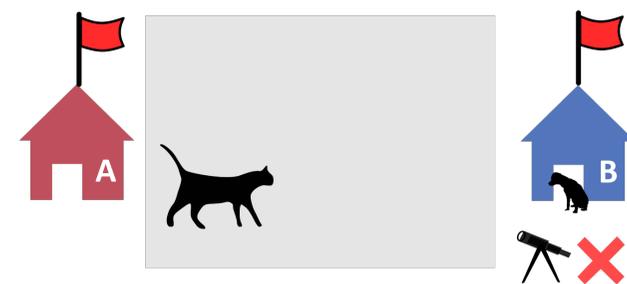
870

Die Fahnen zweimal prüfen: Deadlock



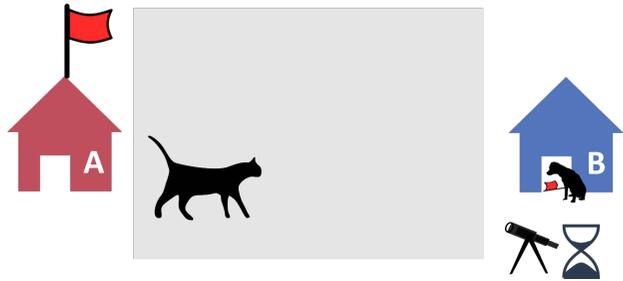
871

Zugriffsprotokoll 2.2

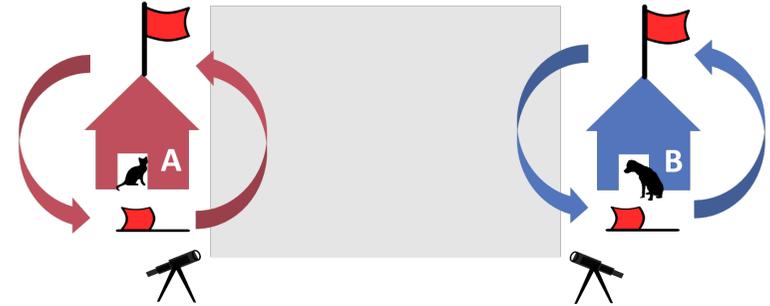


872

Zugriffsprotokoll 2.2: Provably Correct



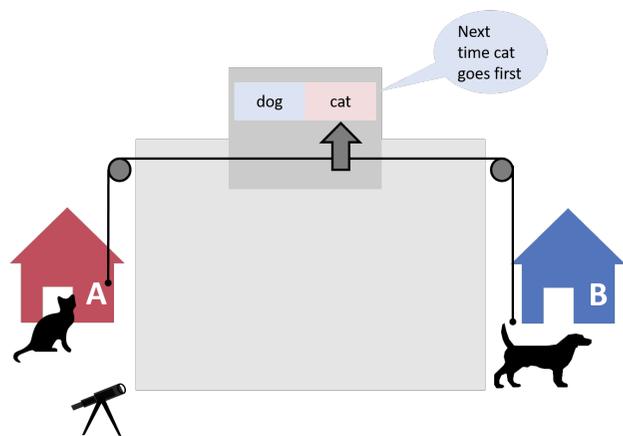
Minor Problem: Starvation



873

874

Lösung



Das generelles Problem mit Locking bleibt



875

876

Der Algorithmus von Peterson³⁷

für zwei Prozesse ist beweisbar korrekt und frei von Starvation.

`non-critical section`

```
flag[me] = true // I am interested
victim = me // but you go first
// spin while we are both interested and you go first:
while (flag[you] && victim == me) {};
```

`critical section`

```
flag[me] = false
```

Der Code setzt voraus, dass der Zugriff auf flag / victim atomar, linearisiert oder sequentiell konsistent ist, eine Anforderung, welche – wie wir weiter unten sehen – für normale Variablen nicht unbedingt gegeben ist. Das Peterson-Lock wird auf moderner Hardware nicht eingesetzt.

³⁷nicht prüfungsrelevant

877

28.4 Gegenseitiger Ausschluss

Kritische Abschnitte und Gegenseitiger Ausschluss

Kritischer Abschnitt (Critical Section)

Codestück, welches nur durch einen einzigen Thread zu einer Zeit ausgeführt werden darf.

Gegenseitiger Ausschluss (Mutual Exclusion)

Algorithmus zur Implementation eines kritischen Abschnitts

```
acquire_mutex(); // entry algorithm\
... // critical section
release_mutex(); // exit algorithm
```

879

Anforderung an eine Mutex.

Korrektheit (Safety)

- Maximal ein Prozess in der kritischen Region



Fortschritt (Liveness)

- Das Betreten der kritischen Region darf nur endliche Zeit dauern, wenn kein Thread in der kritischen Region verweilt.



878

880

Fast Korrekt

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    std::mutex m; // requires #include <mutex>
public:
    ...
    void withdraw(int amount) {
        m.lock();
        int b = getBalance();
        setBalance(b - amount);
        m.unlock();
    }
};
```

Was, wenn eine Exception auftritt?

881

RAII Ansatz

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    std::mutex m;
public:
    ...
    void withdraw(int amount) {
        std::lock_guard<std::mutex> guard(m);
        int b = getBalance();
        setBalance(b - amount);
    } // Destruction of guard leads to unlocking m
};
```

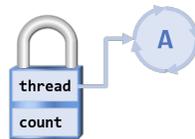
Was ist mit getBalance / setBalance?

882

Reentrante Locks

Reentrant Lock (rekursives Lock)

- merkt sich den betroffenen Thread;
- hat einen Zähler
 - Aufruf von lock: Zähler wird inkrementiert
 - Aufruf von unlock: Zähler wird dekrementiert. Wenn Zähler = 0, wird das Lock freigegeben



883

Konto mit reentrantem Lock

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    int getBalance(){ guard g(m); return balance;
    }
    void setBalance(int x) { guard g(m); balance = x;
    }
    void withdraw(int amount) { guard g(m);
        int b = getBalance();
        setBalance(b - amount);
    }
};
```

884

28.5 Race Conditions

Wetlaufsituation (Race Condition)

- Eine *Wetlaufsituation* (Race Condition) tritt auf, wenn das Resultat einer Berechnung vom Scheduling abhängt.
- Wir unterscheiden *bad interleavings* und *data races*
- Bad Interleavings können auch unter Verwendung einer Mutex noch auftreten.

885

886

Beispiel: Stack

Stack mit korrekt synchronisiertem Zugriff:

```
template <typename T>
class stack{
    ...
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    bool isEmpty(){ guard g(m); ... }
    void push(T value){ guard g(m); ... }
    T pop(){ guard g(m); ...}
};
```

Peek

Peek Funktion vergessen. Dann so?

```
template <typename T>
T peek (stack<T> &s){
    T value = s.pop();
    s.push(value);
    return value;
}
```

nicht Thread-sicher!

Code trotz fragwürdigem Stil in sequentieller Welt korrekt. Nicht so in nebenläufiger Programmierung!

887

888

Bad Interleaving!

Initial leerer Stack s , nur von Threads 1 und 2 gemeinsam genutzt.

Thread 1 legt einen Wert auf den Stack und prüft, dass der Stack nichtleer ist. Thread 2 liest mit `peek()` den obersten Wert.

	Thread 1	Thread 2
	<code>s.push(5);</code>	
t	<code>assert(!s.isEmpty());</code>	<code>int value = s.pop();</code>
		<code>s.push(value);</code>
		<code>return value;</code>

889

Die Lösung

Peek muss mit demselben Lock geschützt werden, wie die anderen Zugriffsmethoden.

890

Bad Interleavings

Race Conditions in Form eines Bad Interleavings können also auch auf hoher Abstraktionsstufe noch auftreten.

Betrachten nachfolgend andere Form der Wettlaufsituation: Data Race.

Wie ist es damit?

```
class counter{
    int count = 0;
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    int increase(){
        guard g(m); return ++count;
    }
    int get(){
        return count;
    }
}
```

nicht Thread-sicher!

891

892

Warum falsch?

Es sieht so aus, als könne hier nichts schiefgehen, da der Update von count in einem "winzigen Schritt" geschieht.

Der Code ist trotzdem falsch und von Implementationsdetails der Programmiersprache und unterliegenden Hardware abhängig.

Das vorliegende Problem nennt man *Data-Race*

Moral: *Vermeide Data-Races, selbst wenn jede denkbare Form von Verschachtelung richtig aussieht. Mache keine Annahmen über die Anordnung von Speicheroperationen.*

Etwas formaler

Data Race (low-level Race-Conditions) Fehlerhaftes Programmverhalten verursacht durch ungenügend synchronisierten Zugriff zu einer gemeinsam genutzten Resource, z.B. gleichzeitiges Lesen/Schreiben oder Schreiben/Schreiben zum gleichen Speicherbereich.

Bad Interleaving (High Level Race Condition) Fehlerhaftes Programmverhalten verursacht durch eine unglückliche Ausführungsreihenfolge eines Algorithmus mit mehreren Threads, selbst dann wenn die gemeinsam genutzten Ressourcen anderweitig gut synchronisiert sind.

893

894

Genau hingeschaut

```
class C {
  int x = 0;
  int y = 0;
public:
  void f() {
    (A) x = 1;
    (B) y = 1;
  }
  void g() {
    (C) int a = y;
    (D) int b = x;
    assert(b >= a);
  }
}
```

Es gibt keine Verschachtelung zweier f und g aufrufender Threads die die Bedingung in der Assertion falsch macht:

- A B C D ✓
- A C B D ✓
- A C D B ✓
- C A B D ✓
- C C D B ✓
- C D A B ✓

Can this fail? Es kann trotzdem passieren!

Ein Grund: Memory Reordering

Daumenregel: Compiler und Hardware dürfen die Ausführung des Codes so ändern, dass die *Semantik einer sequentiellen Ausführung* nicht geändert wird.

```
void f() {
  x = 1;
  y = x+1;
  z = x+1;
}
```

↔
sequentiell äquivalent

```
void f() {
  x = 1;
  z = x+1;
  y = x+1;
}
```

895

896

Die Software-Perspektive

Moderne Compiler geben keine Garantie, dass die globale Anordnung aller Speicherzugriffe der Ordnung im Quellcode entsprechen

- Manche Speicherzugriffe werden sogar komplett wegoptimiert
- Grosses Potential für Optimierungen – und Fehler in der nebenläufigen Welt, wenn man falsche Annahmen macht

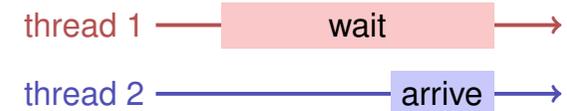
Beispiel: Selbstgemachtes Rendezvous

```
int x; // shared
```

```
void wait(){  
    x = 1;  
    while(x == 1);  
}
```

```
void arrive(){  
    x = 2;  
}
```

Angenommen Thread 1 ruft wait auf, später ruft Thread 2 arrive auf. Was passiert?



897

898

Kompilation

Source

```
int x; // shared
```

```
void wait(){  
    x = 1;  
    while(x == 1);  
}
```

```
void arrive(){  
    x = 2;  
}
```

Ohne Optimierung

```
wait:  
movl $0x1, x  
test: ←  
mov x, %eax  
cmp $0x1, %eax  
je test
```

if equal

Mit Optimierung

```
wait:  
movl $0x1, x  
test: ←  
jmp test
```

always

```
arrive  
movl $0x2, x
```

Hardware Perspektive

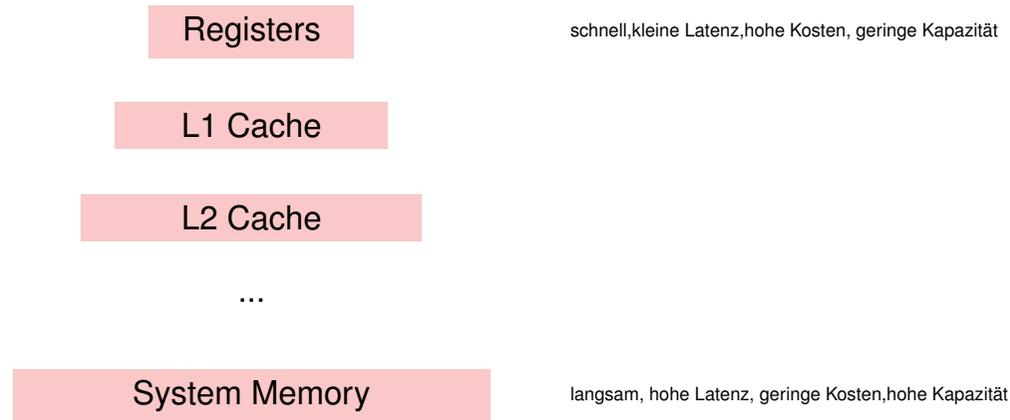
Moderne Prozessoren erzwingen nicht die globale Anordnung aller Instruktionen aus Gründen der Performanz:

- Die meisten Prozessoren haben einen Pipeline und können Teile von Instruktionen simultan oder in anderer Reihenfolge ausführen.
- Jeder Prozessor(kern) hat einen lokalen Cache, der Effekt des Speicherns im gemeinsamen Speicher kann bei anderen Prozessoren u.U. erst zu einem späteren Zeitpunkt sichtbar werden.

899

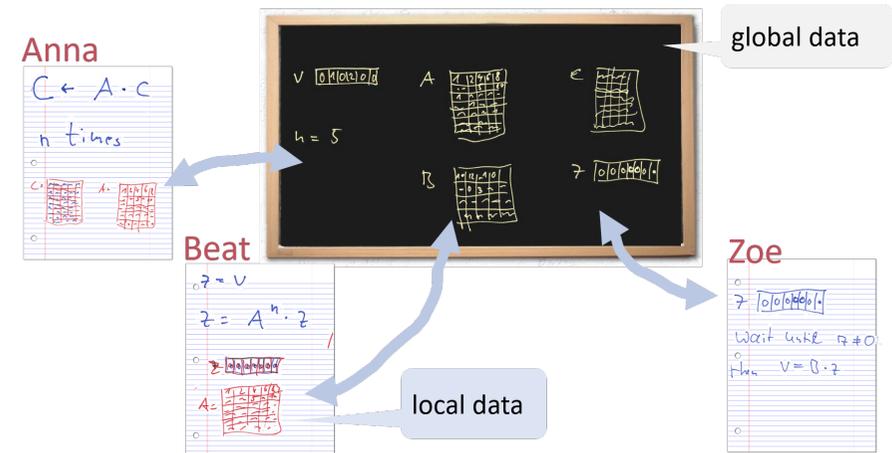
900

Speicherhierarchie



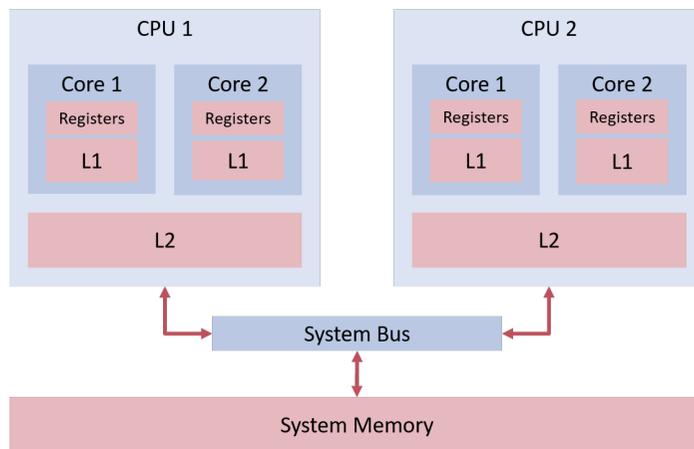
901

Eine Analogie



902

Schematisch



903

Speichermodelle

Wann und ob Effekte von Speicheroperationen für Threads sichtbar werden, hängt also von Hardware, Laufzeitsystem und der Programmiersprache ab.

Ein *Speichermodell* (z.B. das von C++) gibt Minimalgarantien für den Effekt von Speicheroperationen.

- Lässt Möglichkeiten zur Optimierung offen
- Enthält Anleitungen zum Schreiben Thread-sicherer Programme

C++ gibt zum Beispiel *Garantien, wenn Synchronisation mit einer Mutex verwendet* wird.

904

Repariert

```
class C {
    int x = 0;
    int y = 0;
    std::mutex m;
public:
    void f() {
        m.lock(); x = 1; m.unlock();
        m.lock(); y = 1; m.unlock();
    }
    void g() {
        m.lock(); int a = y; m.unlock();
        m.lock(); int b = x; m.unlock();
        assert(b >= a); // cannot happen
    }
};
```

905

Atomic

Hier auch möglich:

```
class C {
    std::atomic_int x{0}; // requires #include <atomic>
    std::atomic_int y{0};
public:
    void f() {
        x = 1;
        y = 1;
    }
    void g() {
        int a = y;
        int b = x;
        assert(b >= a); // cannot happen
    }
};
```

906

29. Parallel Programming III

Verklemmung (Deadlock) und Verhungern (Starvation)
Producer-Consumer, Konzept des Monitors, Condition Variables

907

Verklemmung (Deadlock) Motivation

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    ...
    void withdraw(int amount) { guard g(m); ... }
    void deposit(int amount){ guard g(m); ... }

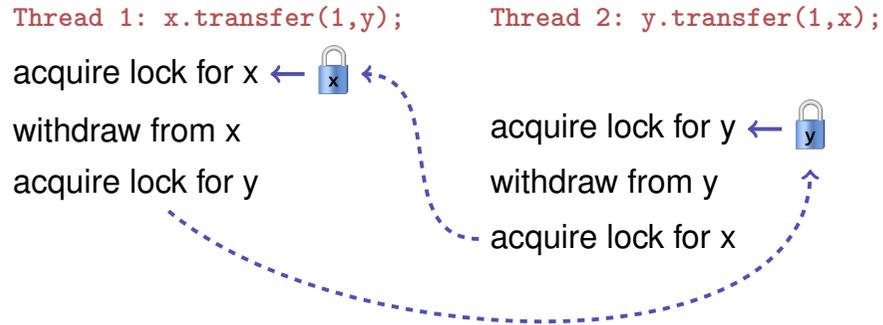
    void transfer(int amount, BankAccount& to){
        guard g(m);
        withdraw(amount);
        to.deposit(amount);
    }
};
```

Problem?

908

Verklemmung (Deadlock) Motivation

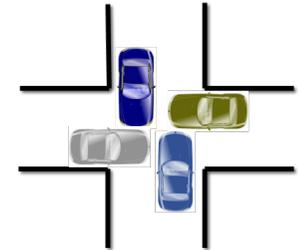
Betrachte BankAccount Instanzen x und y



909

Deadlock

Deadlock: zwei oder mehr Prozesse sind gegenseitig blockiert, weil jeder Prozess auf einen anderen Prozess warten muss, um fortzufahren.



910

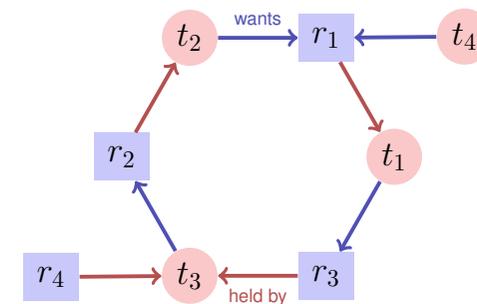
Threads und Ressourcen

- Grafisch: Threads t und Ressourcen (Locks) r
- Thread t versucht Resource a zu bekommen: $t \rightarrow a$
- Resource b wird von Thread q gehalten: $s \leftarrow b$

911

Deadlock – Erkennung

Ein Deadlock für Threads t_1, \dots, t_n tritt auf, wenn der gerichtete Graph, der die Beziehung der n threads und Ressourcen r_1, \dots, r_m beschreibt, einen Kreis enthält.



912

Techniken

- *Deadlock Erkennung* findet die Zyklen im Abhängigkeitsgraph. Deadlock kann normalerweise nicht geheilt werden: Freigeben von Locks resultiert in inkonsistentem Zustand.
- *Deadlock Vermeidung* impliziert, dass Zyklen nicht auftreten können
 - Grobere Granularität "one lock for all"
 - Zwei-Phasen-Locking mit Retry-Mechanismus
 - Lock-Hierarchien
 - ...
 - Anordnen der Ressourcen

Zurück zum Beispiel

```
class BankAccount {
    int id; // account number, also used for locking order
    std::recursive_mutex m; ...
public:
    ...
    void transfer(int amount, BankAccount& to){
        if (id < to.id){
            guard g(m); guard h(to.m);
            withdraw(amount); to.deposit(amount);
        } else {
            guard g(to.m); guard h(m);
            withdraw(amount); to.deposit(amount);
        }
    }
};
```

913

914

C++11 Stil

```
class BankAccount {
    ...
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    ...
    void transfer(int amount, BankAccount& to){
        std::lock(m,to.m); // lock order done by C++
        // tell the guards that the lock is already taken:
        guard g(m,std::adopt_lock); guard h(to.m,std::adopt_lock);
        withdraw(amount);
        to.deposit(amount);
    }
};
```

915

Übrigens...

```
class BankAccount {
    int balance = 0;
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
public:
    ...
    void withdraw(int amount) { guard g(m); ... }
    void deposit(int amount){ guard g(m); ... }

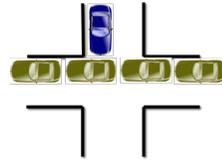
    void transfer(int amount, BankAccount& to){
        withdraw(amount);
        to.deposit(amount);
    }
};
```

Das hätte auch funktioniert. Allerdings verschwindet dann kurz das Geld, was inakzeptabel ist (kurzzeitige Inkonsistenz!)

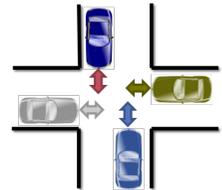
916

Starvation und Livelock

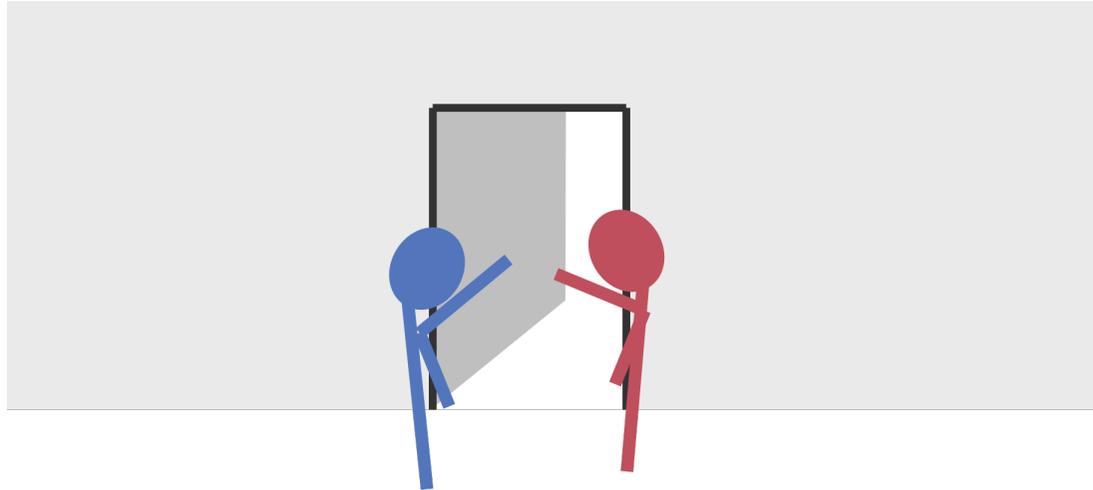
Starvation: der wiederholte, erfolglose Versuch eine zwischenzeitlich freigegebene Resource zu erhalten, um die Ausführung fortzusetzen.



Livelock: konkurrierende Prozesse erkennen einen potentiellen Deadlock, machen aber keinen Fortschritt beim Auflösen des Problems.



Politelock



917

918

Produzenten-Konsumenten Problem

Zwei (oder mehr) Prozesse, Produzenten und Konsumenten von Daten, sollen mit Hilfe einer Datenstruktur entkoppelt werden.
Fundamentale Datenstruktur für den Bau von Software-Pipelines!



919

Sequentielle Implementation (unbeschränkter Buffer)

```
class BufferS {
    std::queue<int> buf;
public:
    void put(int x){
        buf.push(x);
    }

    int get(){
        while (buf.empty()){} // wait until data arrive
        int x = buf.front();
        buf.pop();
        return x;
    }
};
```

nicht Thread-sicher

920

Wie wärs damit?

```
class Buffer {
    std::recursive_mutex m;
    using guard = std::lock_guard<std::recursive_mutex>;
    std::queue<int> buf;
public:
    void put(int x){ guard g(m);
        buf.push(x);
    }
    int get(){ guard g(m);
        while (buf.empty()){
            int x = buf.front();
            buf.pop();
            return x;
        }
    };
};
```

Deadlock

921

Ok, so?

```
void put(int x){
    guard g(m);
    buf.push(x);
}
int get(){
    m.lock();
    while (buf.empty()){
        m.unlock();
        m.lock();
    }
    int x = buf.front();
    buf.pop();
    m.unlock();
    return x;
}
```

Ok, das geht, verschwendet aber CPU Zeit!

922

Besser?

```
void put(int x){
    guard g(m);
    buf.push(x);
}
int get(){
    m.lock();
    while (buf.empty()){
        m.unlock();
        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::milliseconds(10));
        m.lock();
    }
    int x = buf.front(); buf.pop();
    m.unlock();
    return x;
}
```

Ok, etwas besser. Limitiert aber die Reaktivität!

923

Moral

Wir wollen das Warten auf eine Bedingung nicht selbst implementieren müssen.

Dafür gibt es bereits einen Mechanismus: *Bedingungsvariablen (condition variables)*.

Das zugrunde liegende Konzept nennt man *Monitor*.

924

Monitor

Monitor Abstrakte Datenstruktur, die mit einer Menge Operationen ausgestattet ist, die im gegenseitigen Ausschluss arbeiten und synchronisiert werden können.

Erfunden von C.A.R. Hoare und Per Brinch Hansen (cf. Monitors – An Operating System Structuring Concept, C.A.R. Hoare 1974)

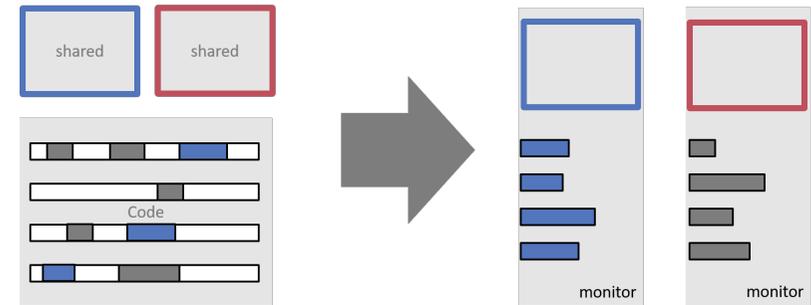


C.A.R. Hoare,
*1934



Per Brinch Hansen
(1938-2007)

Monitors vs. Locks



925

926

Monitor und Bedingungen

Ein Monitor stellt, zusätzlich zum gegenseitigen Ausschluss, folgenden Mechanismus bereit:

Warten auf Bedingungen: Ist eine Bedingung nicht erfüllt, dann

- Gib das Lock auf
- Warte auf die Erfüllung der Bedingung
- Prüfe die Erfüllung der Bedingung wenn ein Signal gesendet wird

Signalisieren: Thread, der die Bedingung wahr machen könnte:

- Sende Signal zu potentiell wartenden Threads

Bedingungsvariablen

```
#include <mutex>
#include <condition_variable>
...

class Buffer {
    std::queue<int> buf;

    std::mutex m;
    // need unique_lock guard for conditions
    using guard = std::unique_lock<std::mutex>;
    std::condition_variable cond;
public:
    ...
};
```

927

928

Bedingungsvariablen

```
class Buffer {
...
public:
    void put(int x){
        guard g(m);
        buf.push(x);
        cond.notify_one();
    }
    int get(){
        guard g(m);
        cond.wait(g, [&]{return !buf.empty();});
        int x = buf.front(); buf.pop();
        return x;
    }
};
```

929

Technische Details

- Ein Thread, der mit `cond.wait` wartet, läuft höchstens sehr kurz auf einem Core. Danach belastet er das System nicht mehr und “schläft”.
- Der Notify (oder Signal-) Mechanismus weckt schlafende Threads auf, welche nachfolgend ihre Bedingung prüfen.
 - `cond.notify_one` signalisiert *einen* wartenden Threads.
 - `cond.notify_all` signalisiert *alle* wartende Threads. Benötigt, wenn wartende Threads potentiell auf *verschiedene* Bedingungen warten.

930

Technische Details

- In vielen anderen Sprachen gibt es denselben Mechanismus. Das Prüfen von Bedingungen (in einem Loop!) muss der Programmierer dort oft noch selbst implementieren.

Java Beispiel

```
synchronized long get() {
    long x;
    while (isEmpty())
        try {
            wait ();
        } catch (InterruptedException e) { }
    x = doGet();
    return x;
}

synchronized put(long x){
    doPut(x);
    notify ();
}
```

931

Übrigens: mit bounded Buffer..

```
class Buffer {
...
    CircularBuffer<int,128> buf; // from lecture 6
public:
    void put(int x){ guard g(m);
        cond.wait(g, [&]{return !buf.full();});
        buf.put(x);
        cond.notify_all();
    }
    int get(){ guard g(m);
        cond.wait(g, [&]{return !buf.empty();});
        cond.notify_all();
        return buf.get();
    }
};
```

932

30. Parallel Programming IV

Futures, Read-Modify-Write Instruktionen, Atomare Variablen, Idee der lockfreien Programmierung

Futures: Motivation

Threads waren bisher Funktionen ohne Resultat:

```
void action(some parameters){  
    ...  
}  
  
std::thread t(action, parameters);  
...  
t.join();  
// potentially read result written via ref-parameters
```

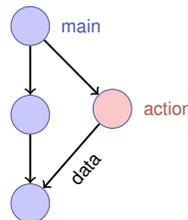
933

934

Futures: Motivation

Wir wollen nun etwas in dieser Art:

```
T action(some parameters){  
    ...  
    return value;  
}  
  
std::thread t(action, parameters);  
...  
value = get_value_from_thread();
```



Wir können das schon!

- Wir verwenden das Producer/Consumer Pattern (implementiert mit Bedingungsvariablen)
- Starten einen Thread mit Referenz auf den Buffer
- Wenn wir das Resultat brauchen, holen wir es vom Buffer
- Synchronisation ist ja bereits implementiert

935

936

Zur Erinnerung

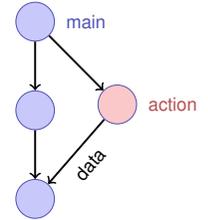
```
template <typename T>
class Buffer {
    std::queue<T> buf;
    std::mutex m;
    std::condition_variable cond;
public:
    void put(T x){ std::unique_lock<std::mutex> g(m);
        buf.push(x);
        cond.notify_one();
    }
    T get(){ std::unique_lock<std::mutex> g(m);
        cond.wait(g, [&]{return (!buf.empty());});
        T x = buf.front(); buf.pop(); return x;
    }
};
```

937

Anwendung

```
void action(Buffer<int>& c){
    // some long lasting operation ...
    c.put(42);
}

int main(){
    Buffer<int> c;
    std::thread t(action, std::ref(c));
    t.detach(); // no join required for free running thread
    // can do some more work here in parallel
    int val = c.get();
    // use result
    return 0;
}
```

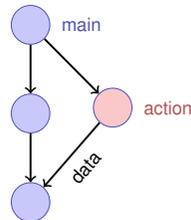


938

Mit C++11 Bordmitteln

```
int action(){
    // some long lasting operation
    return 42;
}

int main(){
    std::future<int> f = std::async(action);
    // can do some work here in parallel
    int val = f.get();
    // use result
    return 0;
}
```



939

30.2 Read-Modify-Write

940

Beispiel: Atomare Operationen in Hardware

CMPXCHG

Compare and Exchange

Compares the value in the AL, AX, EAX, or RAX register with the value in a register or a memory location (first operand). If the two values are equal, the instruction copies the value in the second operand to the first operand and sets the ZF flag in the rFLAGS register to 1. Otherwise, it copies the value in the first operand to the AL, AX, EAX, or RAX register and clears the ZF flag to 0.

The OF, SF, AF, DF, and CF flags are set to reflect the results of the compare.

When the first memory operand is the same as the second memory operand, the instruction performs a compare-and-exchange operation.

The forms of the LOCK prefix are described in the LOCK prefix section of the AMD64 Architecture Programmer's Manual.

Mnemonic

CMPXCHG r/m16, r/m16

CMPXCHG r/m32, r/m32

CMPXCHG r/m64, r/m64

CMPXCHG r/m64, r/m64, OF B1/r

Related Instructions

CMPXCHG8B, CMPXCHG16B

CMPXCHG mem, reg
«compares the value in Register A with the value in a memory location. If the two values are equal, the instruction copies the value in the second operand to the first operand and sets the ZF flag in the flag registers to 1. Otherwise it copies the value in the first operand to A register and clears ZF flag to 0»

1.2.5 Lock Prefix

The LOCK prefix causes certain kinds of memory read-modify-write instructions to occur atomically. The mechanism for doing so is implementation-dependent (for example, the mechanism may involve bus signaling or packet messaging between the processor and a memory controller). The prefix is intended to give the processor exclusive use of shared memory in a multiprocessor system.

8

8

8

24594—Rev. 3.14—September 2007

AMD64 Technology

«The lock prefix causes certain kinds of memory read-modify-write instructions to occur atomically»

AMD64 Architecture
Programmer's Manual

Read-Modify-Write

Konzept von **Read-Modify-Write**: Lesen, Verändern und Zurückschreiben, zu einem Zeitpunkt (atomar).

Beispiel: Test-And-Set

```
bool TAS(bool& variable){  
    bool old = variable;  
    variable = true;  
    return old;  
}
```

atomic

Verwendungsbeispiel TAS in C++11

```
class SpinLock{  
    std::atomic_flag taken {false};  
public:  
    void lock(){  
        while (taken.test_and_set());  
    }  
  
    void unlock(){  
        taken.clear();  
    }  
};
```

30.3 Lock-Freie Programmierung

Compare-And-Swap

```
bool CAS(int& variable, int& expected, int desired){  
    if (variable == expected){  
        variable = desired;  
        return true;  
    }  
    else{  
        expected = variable;  
        return false;  
    }  
}
```

atomic

945

946

Lock-freie Programmierung

Datenstruktur heisst

- **lock-frei**: zu jeder Zeit macht mindestens ein Thread in beschränkter Zeit Fortschritt, selbst dann, wenn viele Algorithmen nebenläufig ausgeführt werden. Impliziert systemweiten Fortschritt aber nicht Starvationfreiheit.
- **wait-free**: jeder Thread macht zu jeder Zeit in beschränkter Zeit Fortschritt, selbst dann wenn andere Algorithmen nebenläufig ausgeführt werden.

Fortschrittsbedingungen

	Lock-frei	Blockierend
Jeder macht Fortschritt	Wait-frei	Starvation-frei
Mindestens einer macht Fortschritt	Lock-frei	Deadlock-frei

947

948

Implikation

- Programmieren mit Locks: jeder Thread kann andere Threads beliebig blockieren.
- Lockfreie Programmierung: der Ausfall oder das Aufhängen eines Threads kann nicht bewirken, dass andere Threads blockiert werden

949

Wie funktioniert lock-freie Programmierung?

Beobachtung:

- RMW-Operationen sind in Hardware *Wait-Free* implementiert.
- Jeder Thread sieht das Resultat eines CAS oder TAS in begrenzter Zeit.

Idee der lock-freien Programmierung: lese Zustand der Datenstruktur und verändere die Datenstruktur *atomar* dann und nur dann, wenn der gelesene Zustand unverändert bleibt.

950

Beispiel: lock-freier Stack

Nachfolgend vereinfachte Variante eines Stacks

- pop prüft nicht, ob der Stack leer ist
- pop gibt nichts zurück

951

(Node)

Nodes:

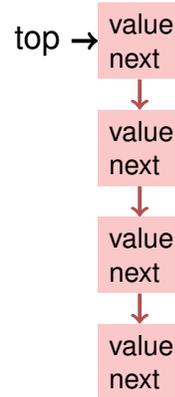
```
struct Node {  
    T value;  
  
    Node<T>* next;  
    Node(T v, Node<T>* nxt): value(v), next(nxt) {}  
};
```



952

(Blockierende Version)

```
template <typename T>
class Stack {
    Node<T> *top=nullptr;
    std::mutex m;
public:
    void push(T val){ guard g(m);
        top = new Node<T>(val, top);
    }
    void pop(){ guard g(m);
        Node<T>* old_top = top;
        top = top->next;
        delete old_top;
    }
};
```



953

Lock-Frei

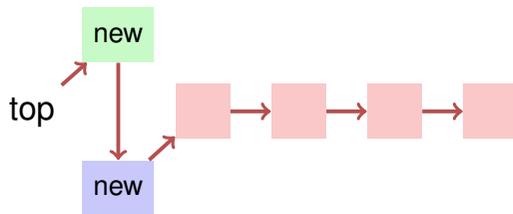
```
template <typename T>
class Stack {
    std::atomic<Node<T>*> top {nullptr};
public:
    void push(T val){
        Node<T>* new_node = new Node<T> (val, top);
        while (!top.compare_exchange_weak(new_node->next, new_node));
    }
    void pop(){
        Node<T>* old_top = top;
        while (!top.compare_exchange_weak(old_top, old_top->next));
        delete old_top;
    }
};
```

954

Push

```
void push(T val){
    Node<T>* new_node = new Node<T> (val, top);
    while (!top.compare_exchange_weak(new_node->next, new_node));
}
```

2 Threads:

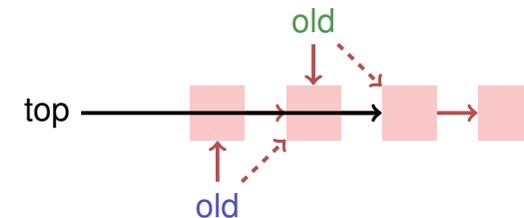


955

Pop

```
void pop(){
    Node<T>* old_top = top;
    while (!top.compare_exchange_weak(old_top, old_top->next));
    delete old_top;
}
```

2 Threads:



956

Lockfreie Programmierung – Grenzen

- Lockfreie Programmierung ist kompliziert.
- Wenn mehr als ein Wert nebenläufig angepasst werden muss (Beispiel: Queue), wird es schwieriger. Damit Algorithmen lock-frei bleiben, müssen Threads sich “gegenseitig helfen”.
- Bei Speicherwiederverwendung kann das *ABA Problem* auftreten.