

Algorithmen und Datenstrukturen

A5. Laufzeitanalyse: Einführung und Selectionsort

Marcel Lüthi and Gabriele Röger

Universität Basel

8. März 2024

Algorithmen und Datenstrukturen

8. März 2024 — A5. Laufzeitanalyse: Einführung und Selectionsort

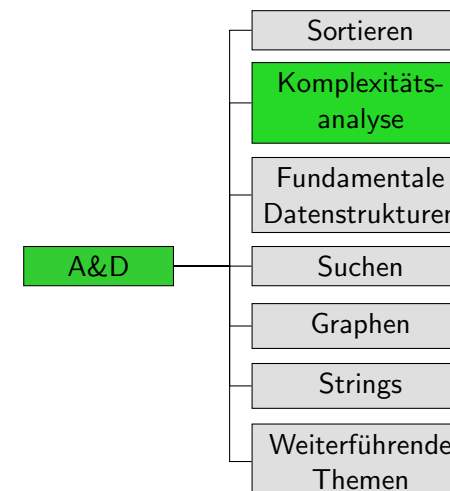
A5.1 Laufzeitanalyse Allgemein

A5.2 Beispiel: Selectionsort

A5.3 Zusammenfassung

A5.1 Laufzeitanalyse Allgemein

Inhalt dieser Veranstaltung



Exakte Laufzeitanalyse unrealistisch

- ▶ **Wäre schön:** Formel, die für konkrete Eingabe berechnet, wie lange das Programm läuft.
- ▶ **exakte Laufzeitprognose schwierig**, da zu viele Einflüsse:
 - ▶ Geschwindigkeit und Architektur des Computers
 - ▶ Programmiersprache
 - ▶ Compilerversion
 - ▶ aktuelle Auslastung (was sonst noch läuft)
 - ▶ Cacheverhalten

Wir können und wollen das nicht alles in die Formel aufnehmen.

Laufzeitanalyse: Vereinfachung 1

Zähle Anzahl der Operationen statt die Zeit zu messen!

Was ist eine Operation?

- ▶ Idealerweise: eine Zeile Maschinencode oder – noch präziser – ein Prozessorzyklus
- ▶ Stattdessen: Anweisungen, die konstante Zeit benötigen
 - ▶ konstante Zeit: Laufzeit unabhängig von Eingabe
 - ▶ ignoriere Laufzeitunterschiede verschiedener Anweisungen
 - ▶ z.B. Addition, Zuweisung, Verzweigung, Funktionsaufruf
 - ▶ **grob:** Operation = eine Zeile Code
 - ▶ **aber:** auch beachten, was dahinter steht
 - z.B. Schritte innerhalb einer aufgerufenen Funktion

Wichtig: Laufzeit ungefähr proportional zu Anzahl Operationen

Laufzeitanalyse: Vereinfachung 2

Schätze ab statt genau zu zählen!

- ▶ Meistens Abschätzung nach oben („obere Schranke“)
 - Wie viele Schritte braucht das Programm höchstens?
 - ▶ Manchmal auch Abschätzung nach unten („untere Schranke“)
 - Wie viele Schritte werden mindestens ausgeführt?
- „Laufzeit“ für Abschätzung der Anzahl ausgeführter Operationen

Laufzeitanalyse: Vereinfachung 3

Abschätzung nur abhängig von Eingabegrösse

- ▶ $T(n)$: Laufzeit bei Eingabe der Grösse n
- ▶ Bei adaptiven Verfahren unterscheiden wir
 - ▶ **Beste Laufzeit (best case)**
Laufzeit bei günstigstmöglicher Eingabe
 - ▶ **Schlechteste Laufzeit (worst case)**
Laufzeit bei schlechtestmöglicher Eingabe
 - ▶ **Mittlere Laufzeit (average case)**
Durchschnitt der Laufzeit über alle Eingaben der Grösse n

Kostenmodelle

Auch: Analyse mit **Kostenmodell**

- ▶ Identifiziere grundlegende Operationen der Algorithmenklasse
z.B. für vergleichsbasierte Sortierverfahren
 - ▶ Vergleich von Schlüsselpaaren
 - ▶ Tausch zweier Elemente oder Bewegung eines Elementes
- ▶ Schätze Anzahl dieser Operationen ab.

Beispiel aus C++-Referenz

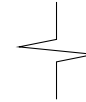
```
function template                                     <algorithm>
std::sort
default (1)   template <class RandomAccessIterator>
               void sort (RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last);
custom (2)   template <class RandomAccessIterator, class Compare>
               void sort (RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last, Compare comp);
```

Sort elements in range

Sorts the elements in the range `[first, last)` into ascending order.

The elements are compared using operator< for the first version, and `comp` for the second.

Equivalent elements are not guaranteed to keep their original relative order (see `stable_sort`).



Complexity

On average, linearithmic in the distance between `first` and `last`: Performs approximately $N \cdot \log_2(N)$ (where N is this distance) comparisons of elements, and up to that many element swaps (or moves).

<http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/sort/>

A5.2 Beispiel: Selectionsort

Selectionsort: Algorithmus

```
1 def selection_sort(array):
2     n = len(array)
3     for i in range(n - 1): # i = 0, ..., n-2
4         # find index of minimum element at positions i, ..., n-1
5         min_index = i
6         for j in range(i + 1, n): # j = i+1, ..., n-1
7             if array[j] < array[min_index]:
8                 min_index = j
9         # swap element at position i with minimum element
10        array[i], array[min_index] = array[min_index], array[i]
```

Selectionsort mit Kostenmodell

```

1 def selection_sort(array):
2     n = len(array)
3     for i in range(n - 1): # i = 0, ..., n-2
4         # find index of minimum element at positions i, ..., n-1
5         min_index = i
6         for j in range(i + 1, n): # j = i+1, ..., n-1
7             if array[j] < array[min_index]:
8                 min_index = j
9         # swap element at position i with minimum element
10        array[i], array[min_index] = array[min_index], array[i]

```

→ n-1 mal Tausch zweier Elemente („linear“)
 → 0.5(n-1)n Schlüsselvergleiche („quadratisch“)

Selectionsort: Analyse I

Wir zeigen: $T(n) \leq c' \cdot n^2$ für $n \geq 1$ und irgendeine Konstante c'

- ▶ Äussere Schleife (3-10) und innere Schleife (6-8)
- ▶ Anzahl Operationen für jede Iteration der äusseren Schleife:
 - ▶ Konstante a für Anzahl Operationen in Zeilen 7 und 8
 - ▶ Konstante b für Anzahl Operationen in Zeilen 5 und 10

| i | # Operationen |
|-----|-----------------|
| 0 | $a(n-1) + b$ |
| 1 | $a(n-2) + b$ |
| ... | ... |
| n-2 | $a \cdot 1 + b$ |

- ▶ Insgesamt: $T(n) = \sum_{i=0}^{n-2} (a(n - (i + 1)) + b)$

Selectionsort: Analyse II

$$\begin{aligned}
 T(n) &= \sum_{i=0}^{n-2} (a(n - (i + 1)) + b) \\
 &= \sum_{i=1}^{n-1} (a(n - i) + b) \\
 &= a \sum_{i=1}^{n-1} (n - i) + b(n - 1) \\
 &= 0.5a(n - 1)n + b(n - 1) \\
 &\leq 0.5an^2 + b(n - 1) \\
 &\leq 0.5an^2 + b(n - 1)n \\
 &\leq 0.5an^2 + bn^2 \\
 &= (0.5a + b)n^2
 \end{aligned}$$

⇒ mit $c' = (0.5a + b)$ gilt für $n \geq 1$, dass $T(n) \leq c' \cdot n^2$

Selectionsort: Analyse III

Zu grosszügig abgeschätzt?

Wir zeigen für $n \geq 2$: $T(n) \geq c \cdot n^2$ für irgendeine Konstante c

$$\begin{aligned}
 T(n) &= \dots = 0.5a(n - 1)n + b(n - 1) \\
 &\geq 0.5a(n - 1)n \\
 &\geq 0.25an^2 \quad (n - 1 \geq 0.5n \text{ für } n \geq 2)
 \end{aligned}$$

⇒ mit $c = 0.25a$ gilt für $n \geq 2$, dass $T(n) \geq c \cdot n^2$

Theorem

Selectionsort hat **quadratische Laufzeit**, d.h. es gibt Konstanten $c > 0$, $c' > 0$, $n_0 > 0$, so dass für $n \geq n_0$: $cn^2 \leq T(n) \leq c'n^2$.

Selectionsort: Analyse IV

Quadratische Laufzeit:

doppelt so grosse Eingabe, ca. viermal so lange Laufzeit

Was bedeutet das in der Praxis?

- ▶ Annahme: $c = 1$, eine Operation dauert im Schnitt 10^{-8} Sek.
- ▶ Bei 1 Tsd. Elementen warten wir
 $10^{-8} \cdot (10^3)^2 = 10^{-8} \cdot 10^6 = 10^{-2} = 0.02$ Sekunden.
- ▶ Bei 10 Tsd. Elementen $10^{-8} \cdot (10^4)^2 = 1$ Sekunde
- ▶ Bei 100 Tsd. Elementen $10^{-8} \cdot (10^5)^2 = 100$ Sekunden
- ▶ Bei 1 Mio. Elementen $10^{-8} \cdot (10^6)^2$ Sekunden = 2.77 Stunden
- ▶ Bei 1 Mrd. Elementen $10^{-8} \cdot (10^9)^2$ Sekunden = 317 Jahre
1 Mrd. Zahlen bei 4 Bytes/Zahl sind „nur“ 4 GB.

Quadratische Laufzeit problematisch für grosse Eingaben

A5.3 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- ▶ Bei der Laufzeitanalyse **schätzen** wir die **Anzahl der ausgeführten Operationen ab**.
 - ▶ Wir zählen nicht exakt.
 - ▶ Wir ignorieren, wie lange eine Operation tatsächlich dauert.
 - ▶ Hauptsache: Laufzeit ungefähr proportional zu Anzahl Operationen.
- ▶ **Selectionsort** hat **quadratische Laufzeit** und benötigt linear viele Vertauschungen und quadratisch viele Schlüsselvergleiche.