

# Übung 1: Algorithmen und Datenstrukturen

Theodor Bajusz	7159556	x	x	x	x	
Valerij Dobler	7068135	x	x	x	x	
Matz Radloff	6946325	x	x	x	x	
Robin Wannags	6948409	x	x	x	x	

16. November 2020

## Aufgabe 1

Betrachten Sie zwei Algorithmen  $A$  und  $B$  für das gleiche Problem. Algorithmus  $A$  benötigt bei einer Eingabe der Größe  $n$  genau  $2n^2$  Basisoperationen, während Algorithmus  $B$  genau  $100n \lceil \log_2 n \rceil$  Basisoperationen benötigt. Betrachten Sie zwei Computer  $C_1$  und  $C_2$ . Computer  $C_1$  (Supercomputer) kann pro Sekunde  $4,16 \cdot 10^{17}$  Basisoperationen durchführen. Computer  $C_2$  (Handy) kann hingegen nur  $3 \cdot 10^{11}$  Basisoperationen pro Sekunde durchführen.

a)

Wie lange braucht Algorithmus  $A$  auf beiden Computern, um ein Problem der Größe  $n_1 = 200$ ,  $n_2 = 2,7 \cdot 10^9$  und  $n^3 = 10^{16}$  zu lösen? (Lösungen in Sekunden)

$n_i$	200	$2,7 \cdot 10^9$	$10^{16}$
$C_1$	ca. $1,92 \cdot 10^{-13}$	ca. 35	ca. $4,81 \cdot 10^{14}$
$C_2$	ca. $2,67 \cdot 10^{-7}$	$4,86 \cdot 10^7$	ca. $6,67 \cdot 10^{20}$

b)

Wie lange braucht Algorithmus  $B$  auf beiden Computern, um ein Problem der Größe  $n_1 = 200$ ,  $n_2 = 2,7 \cdot 10^9$  und  $n^3 = 10^{16}$  zu lösen?

$n_i$	200	$2,7 \cdot 10^9$	$10^{16}$
$C_1$	ca. $3,85 \cdot 10^{-13}$	ca. $2,08 \cdot 10^{-5}$	ca. 130
$C_2$	ca. $5,33 \cdot 10^{-7}$	28,8	$1,8 \cdot 10^8$

c)

Für welche Problemgrößen ist Algorithmus  $A$  schneller und für welche ist Algorithmus  $B$  schneller, wenn beide Algorithmen auf dem gleichen Computer laufen?

Algorithmus  $A$  ist für die Eingabe  $n = 200$  schneller. Bei den größeren Eingaben ist jeweils Algorithmus  $B$  schneller.

## Aufgabe 2

Betrachten Sie das Problem *Zweit-Kleinstes-Element*

- *Eingabe:* Ein Array  $A[1, \dots, n]$  von  $n \geq 2$  Zahlen
- *Ausgabe:* Ein Index  $i$ , sodass es einen Index  $j \neq i$  gibt mit  $A[j] \leq A[i]$  und für alle Indizes  $k \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{j\}$  gilt  $A[k] \geq A[i]$ .

a)

Beschreiben Sie in Pseudocode einen Algorithmus der das Problem *Zweit-Kleinstes-Element* löst. (3 Punkte)

---

**Algorithm 1:** ZweitKleinstesElement( $A$ )

---

**Result:** Das zweit kleinste Element

```
1 if  $A[1] \leq A[2]$  then
2   |  $min \leftarrow 1$ 
3   |  $i \leftarrow 2$ 
4 else
5   |  $min \leftrightarrow i$ 
6  $c \leftarrow 3$ 
7 while  $c \leq \text{length}(A)$  do
8   | if  $A[c] \leq A[min]$  then
9   |   |  $i \leftarrow min$ 
10  |   |  $min \leftarrow c$ 
11  | else if  $A[c] < A[i]$  then
12  |   |  $i \leftarrow c$ 
13  | else
14  |   | NOP
15  |   |  $c++$ 
16 return  $i$ 
```

---

*NOP: No-Operation*

b)

Beweisen Sie die Korrektheit Ihres Algorithmus mit Hilfe einer geeigneten Schleifeninvariante.

*Behauptung.* Kandidat für  $I(c, i, min)$   
 $A[i] = \min\{A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, c-1\} \setminus \{min\}\}$

*Beweis.* Durch Schleifeninvariante

1. Initialisierung: O.b.d.A.:  $A[1] \leq A[2] \implies i = 2, min = 1$ , sonst analog  
Somit gilt nach Zeile 6:

- $I(c, i, min) = I(3, 2, 1)$

- $I(3, 2, 1) : \quad "A[2] = \min\{ A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, 3 - 1\} \setminus 1\} = \min\{ A[2] \}"$

2. Erhaltung: In Iteration  $c$  soll gelten:

- Annahme:  $I(c, i, \min)$  nach Zeile 7
- Ziel:  $I(c + 1, i, \min)$  nach Zeile 15
- nach Zeile 8:  
 $A[c] \leq A[\min] = \min\{A[1], \dots, A[c - 1]\}$   
 $\implies A[c] = \min\{A[1], \dots, A[c]\}$   
 $\implies A[i] = \min\{ A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, c\} \setminus c\}$   
 $\iff I(c + 1, i, \min)$  schon nach Zeile 10, weil  $i \leftarrow \min$  und  $\min \leftarrow c$
- nach Zeile 11:  
 $A[i] > A[c] > A[\min] = \min\{A[1], \dots, A[c]\}$   
 $\implies A[c] = \min\{ A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, c\} \setminus \min\}$   
 $\implies I(c + 1, i, \min)$  nach Zeile 12, weil  $i \leftarrow c$
- nach Zeile 13 impliziert  
 $A[\min] = \min\{A[1], \dots, A[c]\} \wedge A[i] = \min\{ A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, c\} \setminus \min\}$   
 $\implies I(c + 1, i, \min)$
- also:  $I(c + 1, i, \min)$  nach Zeile 14

3. Terminierung:

- Ende letzter Schleifendurchlauf:  
 $c = \text{length}(A)$
- nach Zeile 15 gilt also  
 $I(\text{length}(A) + 1, i, \min)$   
 $\iff A[\min] = \min\{A[1], \dots, A[c]\} \wedge A[i] = \min\{ A[j] \mid j \in \{1, 2, \dots, c\} \setminus \min\}$
- gilt folglich auch vor Zeile 16

□

c)

Analysieren Sie die worst-case Laufzeit des formulierten Algorithmus.

Zeile	Laufzeit
1	$\mathcal{O}(1)$
2	$\mathcal{O}(1)$
3	$\mathcal{O}(1)$
4	$\mathcal{O}(1)$
5	$\mathcal{O}(1)$
6	$\mathcal{O}(1)$
7	$\sum_{i=2}^n \mathcal{O}(i)$
8	$\mathcal{O}(1)$
9	$\mathcal{O}(1)$
10	$\mathcal{O}(1)$
11	$\mathcal{O}(1)$
12	$\mathcal{O}(1)$
13	$\mathcal{O}(1)$
14	$\mathcal{O}(1)$
15	$\mathcal{O}(1)$
17	$\mathcal{O}(1)$

$$\stackrel{\text{Theorem 2.7}}{\implies} T(n) = \mathcal{O}(1) + \mathcal{O}(n-2) \cdot (8 \cdot \mathcal{O}(1)) + \mathcal{O}(1) = \mathcal{O}(n)$$

Da wir immer über jedes Element des Arrays iterieren müssen, ist die asymptotische Laufzeit gleichzeitig die best- und worst-case Laufzeit unseres Algorithmus. Die Laufzeit ist nicht ausschlaggebend variabel.

## Aufgabe 3

Zeigen Sie, dass  $(\ln(x))^k = \mathcal{O}(x^\epsilon)$ . Hierbei sind  $k, \epsilon$  Konstanten größer Null.

Ein möglicher Hinweis: Zeigen Sie die Aussage zunächst für  $k = 1$ .

*Beweis.*

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^\epsilon}{(\ln(x))^k} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^{x^\epsilon}}{e^{(\ln(x))^k}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{e^{x^\epsilon}}{x \cdot k} \stackrel{(*)}{\rightarrow} \infty$$

(\*) Da  $f(x) = e^{x^\epsilon}$  exponentiell wächst und  $g(x) = x \cdot k$  hingegen nur linear. □

## Aufgabe 4

Ordnen Sie die folgenden Funktionen gemäß Ihres asymptotischen Wachstums und begründen Sie Ihre Antwort:

$$f_1(n) = 3^n, f_2(n) = n \cdot \ln(n), f_3(n) = 2^n, f_4(n) = e^{\log_2(n)}, f_5(n) = n^n, f_6(n) = n^{3/2}, f_7(n) = n!$$

Wir wollen nun beweisen, dass

$$f_4(n) \in o(f_2(n)) \wedge f_2(n) \in o(f_6(n)) \wedge f_6(n) \in o(f_3(n)) \\ \wedge f_3(n) \in o(f_1(n)) \wedge f_1(n) \in o(f_7(n)) \wedge f_7(n) \in o(f_5(n))$$

gilt.

*Behauptung.*  $f_4 \in o(f_2) \iff e^{\log_2(n)} \in o(n \cdot \ln(n))$

*Beweis.*

$$f_4(n) = e^{\log_2(n)} = e^{\frac{\ln(n)}{\ln(2)}} = n^{\frac{1}{\ln(2)}}, \quad f_2(n) = n \cdot \ln(n) \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_2(n)}{f_4(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \cdot \ln(n)}{n^{\frac{1}{\ln(2)}}} = \lim_{n \rightarrow \infty} n^{1 - \frac{1}{\ln(2)}} \cdot \ln(n) \rightarrow \infty$$

□

*Behauptung.*  $f_2 \in o(f_6) \iff n \cdot \ln(n) \in o(n^{\frac{3}{2}})$

*Beweis.*

$$f_2(n) = n \cdot \ln(n), \quad f_6(n) = n^{\frac{3}{2}} = n^1 \cdot n^{\frac{1}{2}} = n \cdot \sqrt{n} \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_6(n)}{f_2(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \cdot \sqrt{n}}{n \cdot \ln(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{n}}{\ln(n)}$$

Da beide Terme divergieren, kann man nach L'Hôpital beide Terme ableiten und die Grenzwerte stimmen überein.

$$\stackrel{\frac{d}{dn}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2\sqrt{n}} \stackrel{\frac{d}{dn}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2\sqrt{n}}{2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{n} \rightarrow \infty$$

□

*Behauptung.*  $f_6 \in o(f_3) \iff n^{\frac{3}{2}} \in o(2^n)$

*Beweis.*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_3(n)}{f_6(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n}{n^{\frac{3}{2}}}$$

Da beide Terme divergieren, kann man nach L'Hôpital beide Terme ableiten und die Grenzwerte stimmen überein.

$$\stackrel{\frac{d}{dn}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n \ln(2)}{\frac{3\sqrt{n}}{2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n+1} \ln(2)}{3\sqrt{n}}$$

Wir wenden wieder den H'Hôpital an.

$$\stackrel{\frac{d}{dn}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n+1} \ln^2(2) \sqrt{n}}{3} \rightarrow \infty$$

□

*Behauptung.*  $f_3 \in o(f_1) \iff 2^n \in o(3^n)$

*Beweis.*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_1(n)}{f_3(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3^n}{2^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{3}{2}\right)^n \rightarrow \infty$$

□

*Behauptung.*  $f_1 \in o(f_7) \iff 3^n \in o(n!)$

*Beweis.*

Induktionsbehauptung:  $\forall n \in \mathbb{N}_{>6} : 3^n < n!$

Induktionsanfang:  $n = 7 : 3^7 = 2187$

$7! = 5040 \checkmark$

Induktionsvoraussetzung: Für ein beliebiges, aber festes  $n > 6$  gilt:  $3^n < n!$

Induktionsschritt:  $3^{n+1} < (n+1)! \iff 3 \cdot 3^n < (n+1) \cdot n!$  durch Division beider Seiten der Ungleichung mit 3 bekommen wir raus  $\underbrace{3^n < n!}_{IB} < \frac{n+1}{3} \cdot n!$ . Da der Bruch  $\frac{n+1}{3}$  nach

Induktionsvoraussetzung größer 1 ist, folgt daraus die Induktionsbehauptung. □

*Behauptung.*  $f_7 \in o(f_5) \iff n! \in o(n^n)$

*Beweis.*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f_5(n)}{f_7(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^n}{n!} = \lim_{n \rightarrow \infty} \underbrace{\frac{n}{1} \frac{n}{2} \frac{n}{3} \cdots}_{>1} \underbrace{\frac{n}{n}}_{=1} \rightarrow \infty$$

□