

Datenstrukturen und effiziente Algorithmen

Markus Vieth David Klopp

17. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

I. Sortieren und Suchen	1
1. Bubblesort	2
1.1. Pseudocode	2
1.2. Laufzeitanalyse	3
2. Heapsort	4
2.1. Skizze	4
2.1.1. Indices innerhalb der Baumstruktur	4
2.2. Heap-Eigenschaft	4
2.3. Idee	5
2.4. Pseudocode	5
2.4.1. Phase: Bottom-up Strategie zum Heapaufbau	5
2.4.2. Phase: Sortierphase	5
2.5. Korrektheitsbetrachtung	5
2.6. Laufzeitanalyse	6
2.6.1. Zusammenhang von n und k	6
2.6.2. Analyse Heapaufbau	7
2.6.3. Sortierphase	7
2.6.4. Fazit	8
3. Landau-Notation	9
3.1. $O(n)$	9
3.2. $\Omega(n)$	9
3.3. $\Theta(n)$	9
3.4. $o(n)$	9
3.4.1. Notation	10
4. Mergesort (Divide and Conquer)	11
4.1. Pseudo-Code	11
4.2. Laufzeitanalyse	11
5. Master-Theorem	13
5.1. Fall 1 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) < 1$	13
5.2. Fall 2 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) > 1$	14
5.3. Fall 3 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) = 1$	14
5.3.1. Beispiel: Mergesort	14
6. Schnelle Multiplikation langer Zahlen	15
6.1. Schulmethode zur Multiplikation	15
6.2. Karazuba Ofman	15
7. Akra-Bazzi Theorem	17
7.1. Beispiel	17

Inhaltsverzeichnis

7.2. Das Theorem	17
7.3. Beweisidee	17
8. Lineare Rekursionsgleichungen	19
8.1. Fibonacci-Zahlen	19
8.2. Methode der erzeugenden Funktionen	19
8.2.1. Einschub: Beispiel Reihenentwicklung	19
8.2.2. Nullstellen des Nennerpolynoms	20
8.2.3. Partialbruchzerlegung	20
8.2.4. Lösung	20
9. Quicksort (Divide and Conquer)	21
9.1. Pseudo-Code	21
9.1.1. Zufallsperturbation	22
9.1.2. Einschub: Stochastik	23
9.1.3. Laufzeitanalyse	23
10. Median in Linearzeit	25
10.1. Verallgemeinerung	25
10.2. Idee	25
11. Quickselect	26
11.1. Quicksort	26
11.2. Quickselect	26
12. Verallgemeinerung von Akra-Bazzi	27
13. Median der Mediane	28
13.1. Ansatz	28
13.2. Deterministische Variante für k-Select	28
13.3. Laufzeitanalyse für den worst-case	28
14. Untere Schranke für vergleichsbasierte Sortierverfahren	29
14.1. Entscheidungsproblem: (Bubblesort)	29
14.2. Worst-case Laufzeit	30
14.2.1. Lemma: Mittlere Tiefe der Blätter in einem Entscheidungsbaum $> \log_2(n)n$. .	30
15. Radix-Sort	32
15.1. Beispiel:	32
15.2. Pseudo-Code	32
16. Binäre Suchbäume	33
16.1. Pseudo-Code	34
17. AVL-Bäume von Adelson-Velsky and Landis	35
17.1. Allgemein	35
17.2. Laufzeitanalyse	35
17.3. Baumtiefe	37
17.3.1. AVL-Eigenschaft:	37
17.4. Rotationen	38
17.5. Pseudo-Code	39

18. (a,b)-Suchbäume	40
18.1. Aufspaltung bei Einfügen	40
18.2. Verschmelzen von Knoten beim Löschen	40
19. Amortisierte Analyse	41
19.1. Bankkonto-Methode	41
19.1.1. Kontoführungsschema: für Binärzähler	42
19.1.2. Kontoführungsschema für einen 2-5 Baum	42
19.2. Hashing	42
19.2.1. Universelles Hashing	43
20. Vorlesung	45
20.0.1. Definition	45
20.0.2. Beispiel	45
20.0.3. Abschätzung nach oben	46
20.1. Perfektes Hashing	46
20.1.1. Definition	46
20.1.2. Nachteil	48
21. Vorlesung	49
II. Graphen-Algorithmen	50
21.0.1. Einführung	51
21.0.2. BFS (Breadth-First Search) Breitensuche	53
22. Vorlesung	55
22.1. Kürzeste Wege Algorithmen	58
22.2. Dijkstra-Algorithmus	58
23. Vorlesung	60
23.0.1. Vorläufige Laufzeitanalyse von Dijkstra	61
23.1. Bellman-Ford-Algorithmus	61
23.1.1. Pseudocode	62
23.1.2. Laufzeit: Bellman-Ford	62
23.1.3. Korrektheitsbeweis: Bellman-Ford	62
23.1.4. Induktionsschritt: $i \rightarrow i + 1$	62
24. Vorlesung	63
24.1. All-Pairs-Shortest Path Algorithmen	63
24.1.1. Laufzeit zur Berechnung von $D^{(n)}$	64
24.2. Floyd-Warshall-Algorithmus	64
24.2.1. Korrektheitsbeweis:	64
24.2.2. Beweis der Invariante durch Induktion nach k	65
24.3. Naive Lösung	65
24.4. Johnson-Algorithmus	65
24.4.1. Laufzeit des Johnson-Algorithmus	66
25. Vorlesung	67
25.1. Minimal aufspannende Bäume MST	67
25.1.1. Greedy-Algorithmen zur Lösung des MST-Problems:	67

Inhaltsverzeichnis

25.1.2. Schnitt-Lemma:	68
25.1.3. Beweis für das Schnitt-Lemma	68
25.1.4. Algorithmus von Kruskal	68
26. Vorlesung	70
26.0.1. Einfache Union-Find-Datenstruktur	70
26.0.2. Prim-Algorithmus zur Berechnung eines MST	71
26.0.3. Beispiel des Prim-Algorithmus:	73
27. Vorlesung	74
27.1. Priority-Queue mittels Fibonacci-Heaps	74
27.1.1. Operationen eines Binomial-Heaps	74
28. Vorlesung	77
28.1. Priority-Queue mittels Fibonacci-Heaps (Fortsetzung)	77
28.1.1. Lemma	77
28.1.2. Beweis	77
28.1.3. Satz	79
28.1.4. Beweis	79

Teil I.

Sortieren und Suchen

1. Bubblesort

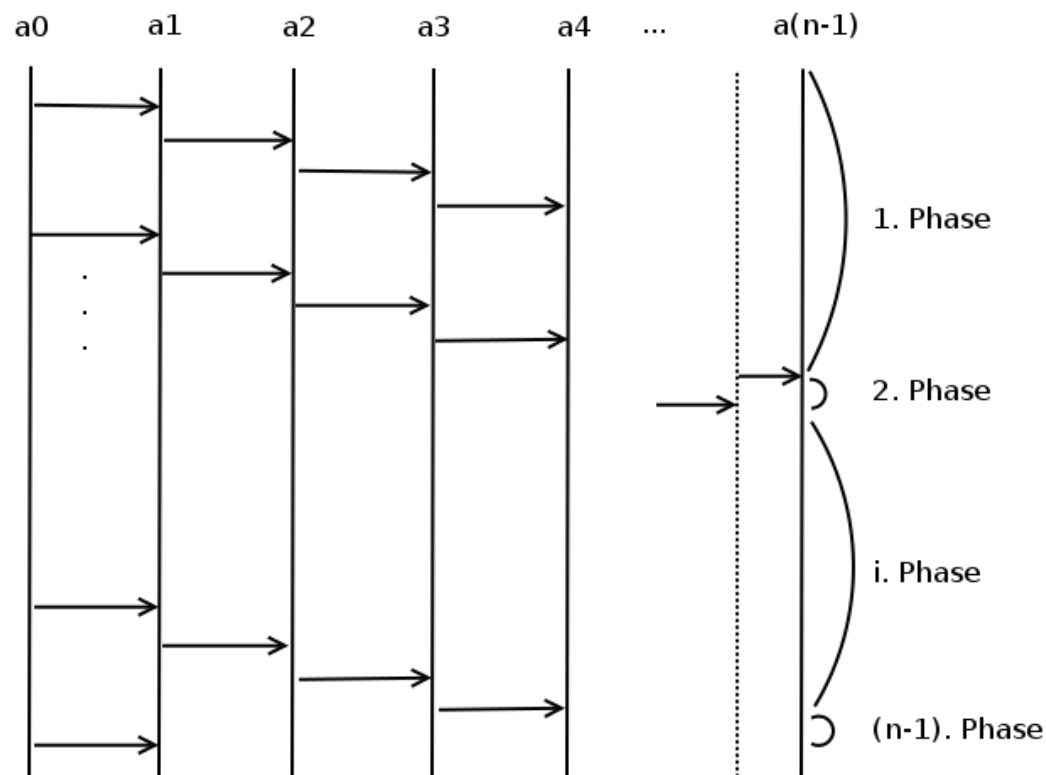


Abbildung 1.1.: Bubblesort

1.1. Pseudocode

```
1 void bubblesort (int[] a) {  
2     int n = a.length;  
3     for (int i = 1; i < n; i++) {  
4         for (int j = 0; j < n-i; j++) {  
5             if (a[j] < a[j+1])  
6                 swap (a, j, j+1);  
7         }  
8     }  
9 }
```

Schleifen-Invariante: Nach dem Ablauf der i-ten Phase gilt:

Die Feldpositionen $n-i, \dots, n$ enthalten die korrekt sortierten Feldelemente

Beweis durch Induktion nach $i \stackrel{i=n-1}{\implies}$ Sortierung am Ende korrekt.

1.2. Laufzeitanalyse

$T(n)$ = Zahl der durchgeführten Elementvergleiche für eine Eingabemenge von n Elementen

1.	Phase	$n-1$
2.	Phase	$n-1$
3.	Phase	$n-1$
	\vdots	
i.	Phase	$n-1$
	\vdots	
(n-1).	Phase	$n-1$
<hr/>		
$1 + 2 + 3 + \dots + (n + 1)$		

$$T(n) = \sum_{i=1}^{n-1} i = \frac{n(n-1)}{2} \in O(n^2)$$

n	T_{real}
2^{10}	8ms
2^{11}	11ms
2^{12}	26ms
\vdots	
2^{16}	5,819s
2^{17}	23,381s
\vdots	
2^{20}	16min
\vdots	
2^{26}	52d

$$T_{real}(n) \approx cn^2 \quad c \approx 10^{-6}$$

$$T_{real}(2n) \approx c \cdot (2n)^2 = 4cn^2 = 4T_{real}(n)$$

$$\frac{T_{real}(2n)}{T_{real}(n)} = 4$$

2. Heapsort

z.B. 21 6 4 7 12 5 3 11 14 17 19 8 9 10 42

2.1. Skizze

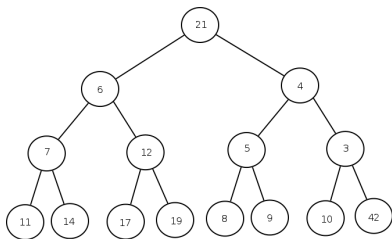


Abbildung 2.1. Heapsort (Ausgangssituation)

2.1.1. Indices innerhalb der Baumstruktur

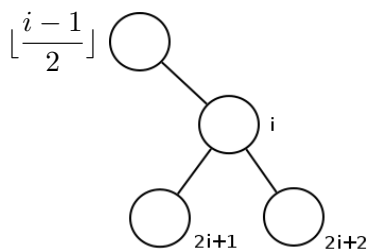


Abbildung 2.2.: Indices

2.2. Heap-Eigenschaft

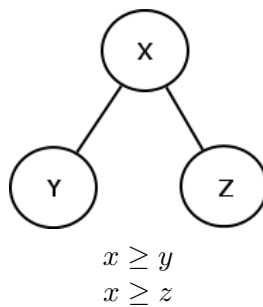


Abbildung 2.3.: Heap-Eigenschaft

2.3. Idee

Phase 1 Stelle die Heap-Eigenschaft überall her
 \Rightarrow größtes Element steht in der Wurzel

Phase 2 Tausche Wurzel mit letztem Feldelement
 (z.B. 42 mit 3)
 - Entferne letztes Feldelement aus dem Baum
 - Gehe erneut zu Phase 1

2.4. Pseudocode

```

1 void heapify (int[] a, int i, int n) {
2   while (2i + 1 < n) {           //linkes Kind von i existiert
3     int j = 2i + 1;
4     if (2i + 2 < n)               //rechtes Kind von i existiert
5       if (a[j] < a[j+1])
6         j = j + 1;               //j steht für Index des größten Kindes
7     if (a[i] > a[j])              //Vater größer als Kind
8       break;                     //Abbruch, weil heap bereits erfüllt
9     swap(a,i,j);                 //Tausch zwischen Vater und Kind
10    i = j;
11  }
12 }
```

2.4.1. Phase: Bottom-up Strategie zum Heapaufbau

```

1 for (int i = n/2; i >= 0; i--)
2   heapify(a,i,n);
```

2.4.2. Phase: Sortierphase

```

1 for (int i = n-1; i >= 0; i--) {
2   swap(a,0,i);
3   heapify(a,0,i);
4 }
```

2.5. Korrektheitsbetrachtung

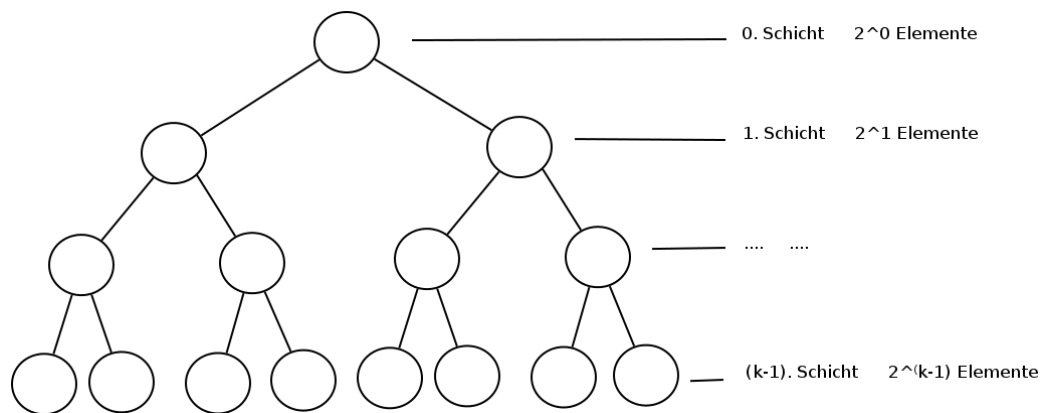
Invariante beim Heapaufbau: Beim Durchlauf der for-Schleife wird die Heapeigenschaft vom unteren Baumlevel bis zur Wurzel hergestellt.

Invariante für Sortierphase: Nach jedem weiteren Durchlauf der for-Schleife findet ein weiteres Element am Feldende seinen „richtigen Platz“.

2. Heapsort

2.6. Laufzeitanalyse

$T(n)$ = Zahl der Elementvergleiche.



n := Zahl der Elemente

k := Zahl der Schichten

2.6.1. Zusammenhang von n und k

$$n = \sum_{i=0}^{k-1} 2^i = 2^k - 1$$

Merke: Geometrische Reihe

$$\sum_{i=0}^{k-1} x^i = \frac{1 - x^k}{1 - x} \quad \text{mit } x \neq 1$$

2.6.2. Analyse Heapaufbau

$$\sum_{l=0}^{k-1} 2^l (k-1-l)$$

$2^l :=$ Anzahl Knoten auf Level l

$(k-1-l) :=$ Leveldifferenz zwischen l und der Blattebene

$$\sum_{l=0}^{k-1} (k-1-l) \cdot 2^l = \sum_{l=0}^{k-1} (k-1) \cdot 2^l - \sum_{l=0}^{k-1} l \cdot 2^l = (k-1)(2^k - 1) - 2 \sum_{l=1}^{k-1} l 2^{l-1}$$

Nebenrechnung

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{k-1} i \cdot x^{i-1} &= \frac{d}{dx} \left(\sum_{i=0}^{k-1} x^i \right) = \frac{d}{dx} \left(\frac{x^k - 1}{x - 1} \right) \\ &= \frac{kx^{k-1}(x-1) - (x^k - 1)}{(x-1)^2} \end{aligned}$$

mit $x = 2$ folgt: $k \cdot 2^{k-1} - 2^k + 1$

$$\begin{aligned} &= (k-1)(2^k - 1) - k2^k + 2^{k+1} - 2 \\ &= k2^k - 2^k - k + 1 - k2^k + 2^{k+1} - 2 \\ &= -2^k - k - 1 + 2^{k+1} \leq 2^{k+1} \approx 2 \cdot n \end{aligned}$$

\Rightarrow Heapaufbau in lineare Zeit

2.6.3. Sortierphase

1. Versuch $n \cdot k$ mit $n = 2^k - 1 \Leftrightarrow k = \log_2(n+1) \approx n \cdot \log_2(n)$

2. Versuch (mit Verkleinerung der Liste)

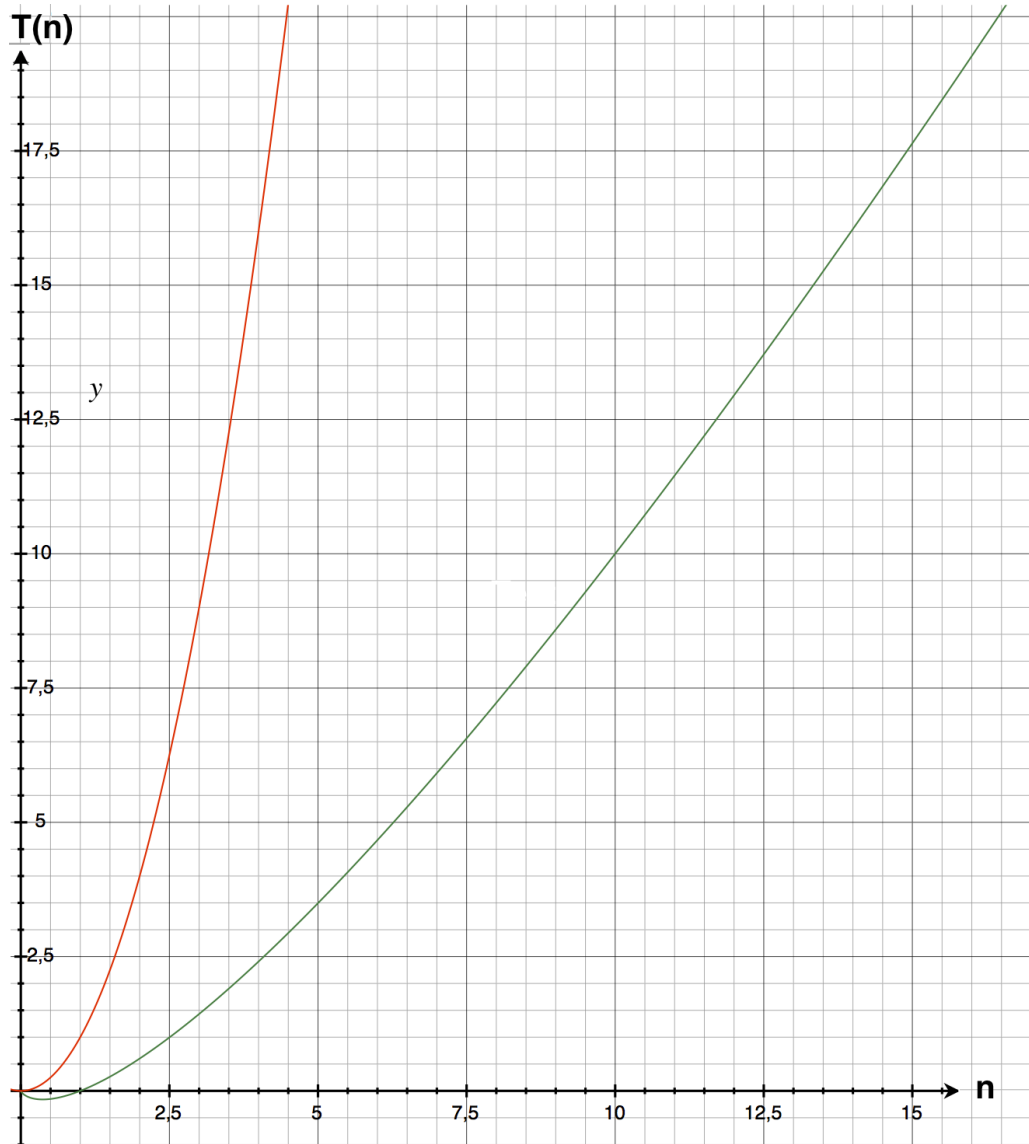
$$\sum_{l=0}^{k-1} 2^l \cdot l = 2 \sum_{l=1}^{k-1} l \cdot 2^{l-1} = 2 \cdot (k \cdot 2^{k-1} - 2^k + 1) \geq k \cdot 2^{k-1} \approx n \cdot \log_2(n)$$

2. Heapsort

2.6.4. Fazit

Laufzeit $c \cdot n \cdot \log_2(n)$ wobei $c \in \mathbb{R}$

Vergleich Bubblesort \leftrightarrow Heapsort



3. Landau-Notation

$$g, f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$$

3.1. $O(n)$

$$g(n) \in O(f(n)) \Leftrightarrow c > 0 \wedge n_0 \in \mathbb{N}, \text{ so dass f\"ur alle } n \geq n_0 \text{ gilt: } g(n) \leq c \cdot f(n) \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \sup \frac{g(n)}{f(n)} < \infty$$

Beispiel

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n \log_2(n)}{n^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log_2(n)}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{\ln(n)}{\ln(2)}}{n} \stackrel{\text{L' Hopital}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\ln(2)} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{\ln(2)} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$$

3.2. $\Omega(n)$

$$g(n) \in \Omega(f(n)) \Leftrightarrow c > 0 \wedge n_0 \in \mathbb{N}, \text{ so dass f\"ur alle } n \geq n_0 \text{ gilt: } g(n) \geq c \cdot f(n) \Leftrightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \inf \frac{g(n)}{f(n)} > 0$$

Beispiel $g(n) = n^p \quad f(n) = n^q \quad p \geq q$

Behauptung $g(n) \in \Omega(f(n))$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^p}{n^q} = \infty > 0$$

3.3. $\Theta(n)$

$$g(n) \in \Theta(f(n)) \Leftrightarrow g(n) \in O(f(n)) \wedge g(n) \in \Omega(f(n))$$

Beispiel $g(n) = n^p + n^{p-1} + c \cdot n^2 \quad f(n) = n^p$

Behauptung $g(n) \in \Theta(f(n))$

.... Rechnung

3.4. $o(n)$

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

Beispiel $g(n) = n \cdot \log_2(n) \quad f(n) = n^2$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{g(n)}{f(n)} = 0 \quad \text{siehe oben}$$

3. Landau-Notation

Erklärung "g ist asymptotisch gesehen vernachlässigbar gegenüber f."

3.4.1. Notation

Häufig wird:

$$O(n) = O(n^2) = O(n^2 \cdot \log_2(n))$$

geschrieben, anstelle von:

$$O(n) \subset O(n^2) \subset O(n^2 \cdot \log_2(n))$$

Missbrauch der Notation !!!

4. Mergesort (Divide and Conquer)

4.1. Pseudo-Code

```
1  int[] a; //Eingabefeld
2  int[] b; //Hilfsfeld
3
4  void mergesort(int links, int rechts) {
5      if (links ≥ rechts) return;
6      int mitte = (links+rechts)/2;
7      mergesort(links, mitte);
8      mergesort(mitte, rechts);
9      merge(links, mitte, rechts);
10 }
11
12 void merge(int links, int mitte, int rechts) {
13     int i = links;
14     int j = mitte+1;
15     int k = links;
16     while (i ≤ mitte && j ≤ rechts) {
17         if (a[i] < a[j])
18             b[k++] = a[i++];
19         else
20             b[k++] = a[j++];
21     }
22     while (i ≤ mitte)
23         b[k++] = a[i++];
24     while (j ≤ rechts)
25         b[k++] = a[j++];
26     for (k=links; k ≤ rechts; k++)
27         a[k] = b[k];
28 }
```

4.2. Laufzeitanalyse

$T(n)$ = Zahl der von Mergesort durchgeführten Elementarvergleiche \approx Laufzeit

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n - 1 \approx 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n \quad \text{mit } T(1) = 0$$

Korrekt wäre $T(n) = T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + T(\lceil \frac{n}{2} \rceil) + n - 1$

Für ungerade Zahlen

4. Mergesort (Divide and Conquer)

$$T(n) = 2 \cdot 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n \stackrel{(1)}{=} 2 \left(2T\left(\frac{n}{4}\right) + \frac{n}{2} \right) + n = 4T\left(\frac{n}{4}\right) + 2n$$

$$\stackrel{(2)}{=} 4 \cdot \left(2T\left(\frac{n}{8}\right) + \frac{n}{4} \right) + 2n = 8T\left(\frac{n}{8}\right) + 3n = \dots = 2^i \cdot T\left(\frac{n}{2^i}\right) + in$$

$$T\left(\frac{n}{2}\right) = 2T\left(\frac{n}{4}\right) + \frac{n}{2} \quad (1)$$

$$T\left(\frac{n}{4}\right) = 2T\left(\frac{n}{8}\right) + \frac{n}{4} \quad (2)$$

....

$$T(1) = 0$$

Rekursionsende $\frac{n}{2^i} = 1 \Leftrightarrow 2^i = n \Leftrightarrow i = \log_2(n)$

$$T(n) = 2^{\log_2(n)} T\left(\frac{n}{2^{\log_2(n)}}\right) + n \log_2(n) = nT(1) + \log_2(n) = \log_2(n)$$

Abstraktion

$T(n)$ = Laufzeit eines Divide & Conquer Algorithmus der ein Problem dadurch löst, das es in a Teilprobleme der Größe $\frac{n}{b}$ zerlegt wird, die rekursiv gelöst werden und anschließend kombiniert werden.

$$T(n) = a \cdot T\left(\frac{n}{b}\right) + n^\alpha \quad \alpha > 0 \quad \text{mit } T(1) = 0$$

$$T(n) = aT\left(\frac{n}{b}\right) + n^\alpha \stackrel{(1)}{=} a^2T\left(\frac{n}{b^2}\right) + a\left(\frac{n}{b}\right)^\alpha + n^\alpha$$

$$(1) \quad T\left(\frac{n}{b}\right) = aT\left(\frac{n}{b^2}\right) + \left(\frac{n}{b}\right)^\alpha \stackrel{(2)}{=} a^3T\left(\frac{n}{b^3}\right) + a^2\left(\frac{n}{b^2}\right)^\alpha + a^1\left(\frac{n}{b^1}\right)^\alpha + a^0\left(\frac{n}{b^0}\right)^\alpha$$

$$(2) \quad T\left(\frac{n}{b^2}\right) = aT\left(\frac{n}{b^3}\right) + \left(\frac{n}{b^2}\right)^\alpha = a^iT\left(\frac{n}{b^i}\right) + \sum_{j=0}^{i-1} a^j \left(\frac{n}{b^j}\right)^\alpha = a^iT\left(\frac{n}{b^i}\right) + n^\alpha \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^j$$

$$\text{mit } i = \log_b(n) \wedge x = \frac{a}{b^\alpha}$$

...

$$T(1) = 0$$

5. Master-Theorem

$$T(n) = T\left(\frac{n}{b} \cdot a + n^\alpha\right)$$

$$T(1) = 0$$

$$T(n) = a^i T\left(\frac{n}{b^i}\right) + n^\alpha \sum_{j=0}^{i-1} \left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^j$$

o.B.d.A

$$n = b^k \Leftrightarrow k = \log_b(n)$$

5.1. Fall 1 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) < 1$

$$\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) < 1 \Leftrightarrow a < b^\alpha \Leftrightarrow \log_b(a) < \alpha$$

$$\sum_{j=0}^{k-1} x^j = \frac{x^k - 1}{x - 1} \quad \text{für } x \neq 1$$

$$\Rightarrow \sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^j \leq \frac{1}{1 - \frac{a}{b^\alpha}} = c'$$

$$\begin{aligned} T(n) &= a^k T(1) + n^\alpha \cdot c' \\ &= c \cdot n^{\log_b(a)} + c' \cdot n^\alpha = \Theta(n^\alpha) \end{aligned}$$

$$\text{Nebenbedingung} \quad a^{\log_b(n)} = \left(b^{\log_b(a)}\right)^{\log_b(n)} = \left(b^{\log_b(n)}\right)^{\log_b(a)} = n^{\log_b(a)}$$

5. Master-Theorem

5.2. Fall 2 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) > 1$

$$\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) > 1 \Leftrightarrow \log_b(a) > \alpha$$

$$\sum_{j=0}^{k-1} \left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^j = \left(\frac{\left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^{\log_b(n)} - 1}{\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) - 1}\right) \leq \left(\frac{a}{b^\alpha}\right)^{\log_b(n)} \cdot c'' = \frac{a^{\log_b(n)}}{b^{\alpha \log_b(n)}} = \frac{n^{\log_b(\alpha)}}{n^\alpha}$$

$$T(n) = c \cdot n^{\log_b(a)} + n^\alpha \cdot \frac{n^{\log_b(a)}}{n^\alpha} \cdot c'' = \Theta\left(n^{\log_b(a)}\right)$$

5.3. Fall 3 : $\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) = 1$

$$\left(\frac{a}{b^\alpha}\right) = 1 \Leftrightarrow a = b^\alpha \Leftrightarrow \log_b(a) = \alpha$$

$$T(n) = c \cdot n^{\log_b(a)} + n^\alpha \cdot \log_b(n) = \Theta(n^\alpha \cdot \log(n))$$

5.3.1. Beispiel: Mergesort

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n$$

$$T(1) = 0$$

Ermittle $a = 2$ $b = 2$ $\alpha = 1$

$$\log_2(2) = 1 = \alpha \Rightarrow 3. \text{ Fall} \Rightarrow \Theta(n \cdot \log(n))$$

6. Schnelle Multiplikation langer Zahlen

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline a_{n-1} & \dots & a_i & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \\ \hline \end{array} \quad a_i \in \mathbb{B} = \{0, 1\}$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

$$B = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline b_{n-1} & \dots & b_2 & b_1 & b_0 \\ \hline \end{array}$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i$$

Frage Wie schnell können wir zwei n-stellige Binärzahlen addieren/subtrahieren/multiplizieren ?

Addition $\Theta(n)$

6.1. Schulmethode zur Multiplikation

1	0	1	1	0	1	·	0	1	0	1	1	1		
		0	0	0	0	0	0							
			1	0	1	1	0	1						
				0	0	0	0	0	0					
					1	0	1	1	0	1				
						1	0	1	1	0	1			
							1	1	0	1	1	0	1	
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1		

n-Partialprodukte
mit höchstens
2n Ziffern

n^2 Aufwand zur Ermittlung der Partialprodukte + $n \cdot$ Kosten für die Addition von Zahlen der Länge $2n \Rightarrow \Theta(n^2)$

Ziel $o(n^2)$ $O(n^{1,58})$

6.2. Karazuba Ofman

$$A = \begin{array}{|c|c|c|} \hline a_{n-1} & \dots & a_{\frac{n}{2}} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline a_{\frac{n}{2}-1} & \dots & a_0 \\ \hline \end{array}$$

$$= A_1 \quad = A_0$$

$$A = A_0 + A_1 2^{\frac{n}{2}}$$

$$A \cdot B = (A_0 + A_1 2^{\frac{n}{2}})(B_0 + B_1 2^{\frac{n}{2}})$$

$$= A_0 B_0 + A_0 B_1 2^{\frac{n}{2}} + A_1 B_0 2^{\frac{n}{2}} + A_1 B_1 2^n$$

6. Schnelle Multiplikation langer Zahlen

Legende ■ markierte Elemente haben die Länge $\frac{n}{2}$

Anmerkung Addition von Zahlen der Länge $2n$

Sei $T(n)$ die Laufzeit dieser rekursiven Methode zur Multiplikation zweier n -stelliger Zahlen:

$$T(n) = 4 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + c \cdot n \quad T(1) = c$$

Mastertheoreme

$$a = 4 \quad b = 2 \quad \alpha = 1 \quad \log_2(4) = 2 > \alpha$$

$$\Rightarrow T(n) = \Theta(n^2)$$

\Rightarrow kein Gewinn bisher!!!

Ziel Ermittle Partialprodukte auf anderem Weg

$$1.) (A_0 \oplus A_1) \cdot (B_0 \oplus B_1) = A_0B_0 + A_0B_1 + A_1B_0 + A_1B_1 = P$$

$$2.) A_0 \cdot B_0$$

$$3.) A_1 \cdot B_1$$

$$\Rightarrow (A_0B_1 + A_1B_0) = (P - (A_0B_0) - (A_1B_1))$$

Es verbleiben 3 Multiplikationen und 2 Additionen

$$AB = A_0B_0 \oplus (P - (A_0B_0) - (A_1B_1)) \oplus A_1B_1 2^n$$

Mastertheoreme

$$T(n) = 3 \cdot T\left(\frac{n}{2}\right) + n$$

$$a = 3, \quad b = 2, \quad \alpha = 1$$

$$\log_2(3) > 1 \Rightarrow 2. \text{ Fall}$$

$$\Rightarrow \Theta\left(n^{\log_2(3)}\right) = \Theta\left(n^{1,5849625}\right)$$

7. Akra-Bazzi Theorem

7.1. Beispiel

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \log_2(n)$$

$$T(n) = \begin{cases} aT\left(\frac{n}{b}\right) + g(n) & n > n_0 \\ h(n) & 1 \leq n \leq n_0 \end{cases}$$

$$T(n) = \Theta\left(n^\alpha \left(1 + \int_1^n \frac{g(x)}{x^{\alpha+1}} dx\right)\right) \quad \text{mit } \alpha, \text{ so dass gilt: } \frac{a}{b^\alpha} = 1$$

7.2. Das Theorem

$$T(n) = a \cdot T\left(\frac{n}{b}\right) + g(n)$$

$$T(1) = c$$

$$T(n) = \Theta\left(n^\alpha \left(1 + \int_1^n \frac{g(x)}{x^{1+\alpha}} dx\right)\right) \quad \text{mit } \frac{a}{b^\alpha} = 1 \quad \alpha = \log_b(a)$$

$$\text{z.B. } T(n) = 2 + \frac{n}{2} + \log(n)$$

7.3. Beweisidee

$$T\left(\frac{n}{b}\right) = aT\left(\frac{n}{b^2}\right) + g\left(\frac{n}{b}\right)$$

$$T(n) = a\left(aT\left(\frac{n}{b^2}\right) + g\left(\frac{n}{b}\right)\right) + g(n) = a^2 + \frac{n}{b^2} + a^1 g\left(\frac{n}{b^1}\right) + a^0 g\left(\frac{n}{b^0}\right)$$

$$\Rightarrow a^i T\left(\frac{n}{b^i}\right) + \sum_{j=0}^{i-1} a^j g\left(\frac{n}{b^j}\right) \quad \text{Rekursionsende f\"ur } r = \log_b(b)$$

$$\Theta(a^{\log_b(n)}) = \Theta(n^\alpha)$$

$$\sum_{j=0}^{\log(n)-1} a^j g\left(\frac{n}{b^j}\right) \approx \int_0^{\log_b(n)} a^j g\left(\frac{n}{b^j}\right) dj$$

7. Akra-Bazzi Theorem

Substitution

$$x = \frac{n}{b^j} = n \cdot b^{-j} = n \cdot e^{-j \ln(b)} \qquad \frac{dx}{dj} = n (-\ln(b)) e^{-j \ln(b)} = -n \ln(b) b^j = -\ln(b) x$$

$$\Rightarrow dj = \frac{1}{-\ln(b)x} dx$$

$$a^j = b^{\log_b(a)j} = b^{\alpha j} = (b^j)^\alpha = \left(\frac{n}{x}\right)^\alpha$$

$$= \int_n^1 \left(\frac{n}{x}\right)^\alpha g(x) \left(\frac{1}{-\ln(b)x}\right) dx = \frac{n^\alpha}{\ln(b)} \cdot \int_1^n \frac{g(x)}{x^{1+\alpha}} dx$$

q.e.d

8. Lineare Rekursionsgleichungen

8.1. Fibonacci-Zahlen

$$\begin{aligned} f_n &= f_{n-1} + f_{n-2} \\ f_0 &= 0 \\ f_1 &= 1 \end{aligned}$$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	...
f(n)	0	1	1	2	3	5	8	13	...

Abbildung 8.1.: Fibonacci-Zahlen

8.2. Methode der erzeugenden Funktionen

$$\begin{aligned} F(Z) &= \sum_{n=0}^{\infty} f_n Z^n = f_0 \cdot Z^0 + f_1 \cdot Z^1 + \sum_{n=2}^{\infty} (f_{n-1} + f_{n-2}) \cdot Z^n \\ &= Z + \sum_{n=2}^{\infty} f_{n-1} Z^n + \sum_{n=2}^{\infty} f_{n-2} Z^n \\ &= Z + Z \sum_{n=2}^{\infty} f_{n-1} Z^{n-1} + Z^2 \sum_{n=2}^{\infty} f_{n-2} Z^{n-2} \\ &\Leftrightarrow F(Z) = Z + Z \cdot F(Z) + Z^2 \cdot F(Z) \\ &\Leftrightarrow -Z = Z^2 F(Z) + Z F(Z) - F(Z) = F(Z)(Z^2 + Z - 1) \\ &F(Z) = -\frac{Z}{Z^2 + Z + 1} \end{aligned}$$

8.2.1. Einschub: Beispiel Reihenentwicklung

$$\frac{1}{1-Z} = \sum_{n=0}^{\infty} Z^n$$

$$\Rightarrow F(Z) = -\frac{Z}{Z^2 + Z + 1}$$

8. Lineare Rekursionsgleichungen

8.2.2. Nullstellen des Nennerpolynoms

$Z^2 + Z = 1 \quad + \left(\frac{1}{2}\right)^2$ $\Leftrightarrow \left(Z + \frac{1}{2}\right)^2 = \frac{5}{4}$ $\Leftrightarrow Z_{1/2} = -\frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{5}}{2}$ $\Rightarrow Z^2 + Z + 1 = (Z + \phi)(Z + \bar{\phi})$	Goldener Schnitt $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ $\bar{\phi} = \frac{1-\sqrt{5}}{2}$
--	--

8.2.3. Partialbruchzerlegung

$$\frac{A}{Z + \phi} + \frac{B}{Z + \bar{\phi}} = \frac{A \cdot (Z + \bar{\phi}) + B(Z + \phi)}{(Z + \phi)(Z + \bar{\phi})}$$

$$\Rightarrow AZ + BZ = -Z \Leftrightarrow A + B = 1 \quad (1)$$

$$A\bar{\phi} + B\phi = 0 \Leftrightarrow B = -\frac{A\bar{\phi}}{\phi} \quad (2)$$

$$(2) \text{ in } (1) \quad A - \frac{A\bar{\phi}}{\phi} = -1 \Leftrightarrow A \left(1 - \frac{\bar{\phi}}{\phi}\right) = -1$$

$$\Leftrightarrow A = -\frac{1}{\sqrt{5}}\phi$$

$$\Rightarrow B = \frac{1}{\sqrt{5}}\bar{\phi}$$

8.2.4. Lösung

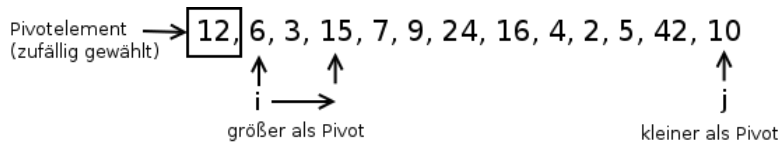
$$F(Z) = \frac{-Z}{Z^2 + Z + 1} = -\frac{1}{\sqrt{5}} \frac{\phi}{Z + \phi} + \frac{1}{\sqrt{5}} \frac{\bar{\phi}}{Z + \bar{\phi}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1}{1 + \frac{Z}{\phi}} - \frac{1}{1 + \frac{Z}{\bar{\phi}}} \right) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\frac{1}{1 - \phi Z} - \frac{1}{1 - \bar{\phi} Z} \right)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{5}} \left(\sum_{n=0}^{\infty} (\phi Z)^n - \sum_{n=0}^{\infty} (\bar{\phi} Z)^n \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^n - \bar{\phi}^n) \cdot Z^n$$

$$f_n = \frac{1}{\sqrt{5}} (\phi^n - \bar{\phi}^n) \quad \text{mit } \phi = 1,681... \quad \bar{\phi} = -0,681...$$

9. Quicksort (Divide and Conquer)



⇒ Tausche 15 mit 10

- Bewege Zeiger erneut

⇒ Tausche 5 und 24

- Bewege Zeiger erneut

⇒ Tausche 16 und 2

- Bewege Zeiger erneut

⇒ i wird größer als j ⇒ Abbruch (tausche Pivotelement mit letztem Element in Teilliste 1)

⇒ es ergeben sich zwei Teillisten

4, 6, 3, 10, 7, 9, 5, 2 | 12 | 16, 24, 42, 15

best-case $T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + n = \Theta(n \log n)$

worst-case $T(n) = T(n-1) + n = \Theta(n^2)$

9.1. Pseudo-Code

```
1 void quicksort(int[] a, int links, int rechts) {
2     if (links ≥ rechts) return;
3     int mitte = partition(a, links, rechts);
4     quicksort(a, links, mitte-1);
5     quicksort(a, mitte+1, rechts);
6 }
7
8 int partition(int[] a, int links, int rechts) {
9     int r = random(links, rechts);
10    swap(a, r, rechts);
11    int pivot = a[rechts];
12    int i = links;
13    int j = rechts-1;
14    while (i ≤ j) {
15        if (a[i] > pivot) {
16            swap(a, i, j);
17            j--;
18        } else {
19            i++;
20        }
21    }
22    swap(a, i, rechts);
23    return i;
24 }
```

9. Quicksort (Divide and Conquer)

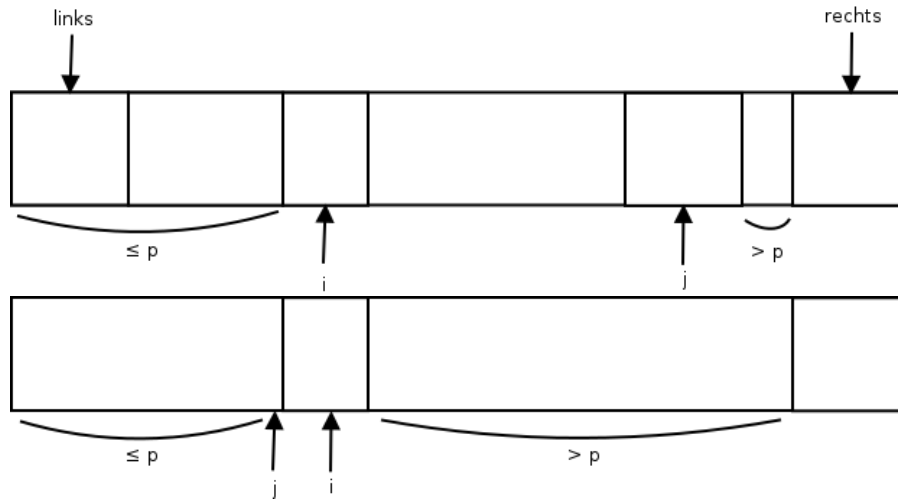


Abbildung 9.1.: Quicksort

Schleifen-Invariante:

$a[k] > p$ für $j < k < rechts$

$a[k] \leq p$ für $links < k < i$

9.1.1. Zufallspermutation

```
1 void randomPermutation(int[] a) {  
2     int n = a.length;  
3     for (int i = n-1; i > 0; i--) {  
4         int r = random(0,i); // gleichverteilte Zufallszahl im Intervall [0,i)  
5         swap(a,r,i);  
6     }  
7 }
```

9.1.2. Einschub: Stochastik

Fairer Würfel (Erwartungswert):

X sei Zufallsvariable $\hat{=}$ Anzahl Augen

$$Pr(X = x_i) \quad x_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^6 x_i \cdot Pr(X = x_i) = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 x_i = \frac{1}{6} \cdot \frac{7 \cdot 6}{2} = 3,5$$

Fairer Würfel (Erste Sechs):

X sei Zufallsvariable $\hat{=}$ Zahl der benötigten Würfe bis zum Auftreten der ersten 6.

$$x_i \in \mathbb{N}$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot Pr(X = i) = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot \left(\frac{5}{6}\right)^{i-1}$$

Mit der Ableitung der geometrischen Reihe, $\frac{1}{(1-x)^2}$ folgt:

$$= \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{5}{6}\right)^2} \right) = 6$$

9.1.3. Laufzeitanalyse

$T(n)$ = Erwartungswert der Laufzeit von Quicksort bei zufällig gleichverteilter Eingabe-Partition.

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

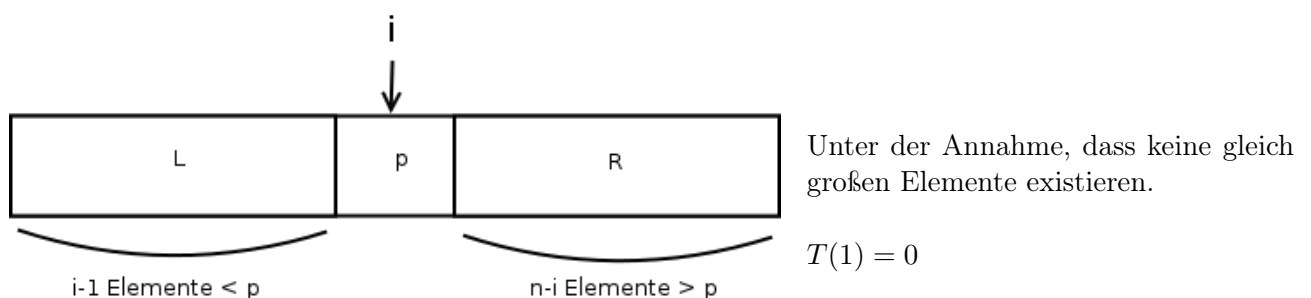


Abbildung 9.2.

9. Quicksort (Divide and Conquer)

Lösen durch Einsetzen

$$T(n) = n + \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n T(i-1) = n + \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} T(i)$$

$$\Leftrightarrow n \cdot T(n) = n^2 + 2 \sum_{i=0}^{n-1} T(i)$$

$$\Leftrightarrow 2(n-1) \cdot T(n-1) = (n-1)^2 + 2 \sum_{i=0}^{n-2} T(i)$$

$$\Leftrightarrow (1) - (2)nT(1) - (n-1)T(n-1) = n^2 - (n-1)^2 + 2T(n-1)$$

$$\Leftrightarrow nT(n) = (n+1)T(n-1) + 2n - 1$$

$$\Leftrightarrow T(n) \leq \frac{n+1}{n} T(n-1) + 2 \leq \frac{n+1}{2} \left(\frac{n}{n+1} \cdot T(n-2) + 2 \right) + 2$$

$$= \frac{n+1}{n-1} T(n-2) + \frac{n+1}{n} \cdot 2 + 2$$

$$\leq \frac{n+1}{n-1} \left(\frac{n-1}{n-2} T(n-3) + 2 \right) + \frac{n+1}{n} \cdot 2 + 2 \cdot 1$$

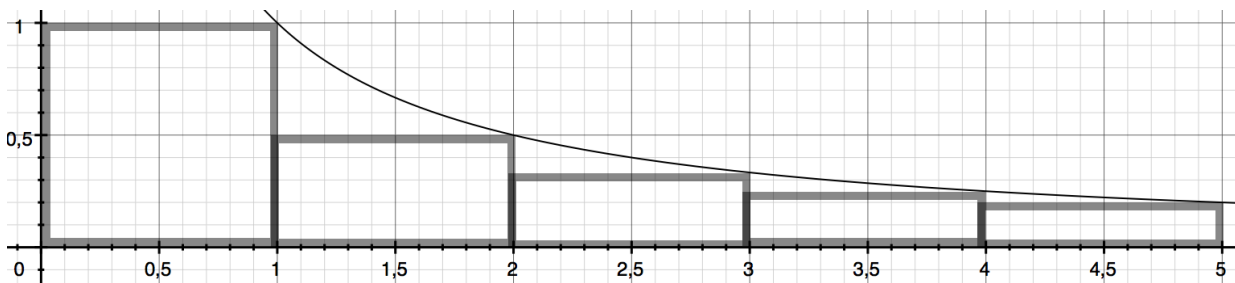
$$= \frac{n+1}{n-2} T(n-3) + 2 \cdot \frac{n+1}{n-1} + 2 \cdot \frac{n+1}{n} + 2 \cdot \frac{n+1}{n+1}$$

$$\Rightarrow T(n) \leq \frac{n+1}{n-(k-1)} T(n-k) + 2(n+1) \sum_{i=1}^{k-2} \frac{1}{n-i} \quad \text{endet für } k = n-1$$

$$T(n) = 2(n+1) \sum_{i=-1}^{n-3} \frac{1}{n-i} = 2(n+1) \sum_{j=3}^{n+1} \frac{1}{j} \leq 2(n+1) H_{n+1} \in O(n \log n) \quad \text{mit } j=n-i$$

Einschub: Harmonische Reihe

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



$$H_n \leq \int_1^n \frac{1}{x} dx + 1 = 1 + [\ln x]_1^n = \ln(n) + 1$$

$$\ln(n+1) \leq H_n \leq \ln(n) + 1$$

10. Median in Linearzeit

Median $\hat{=}$ $\frac{n}{2}$ -kleinste Element in einer Folge von n Elementen

10.1. Verallgemeinerung

Finde das k -t kleinste Elemente in der Folge

Naive Strategie: $O(k \cdot n)$

10.2. Idee

```
1 select(int[] a, int k) {}
```

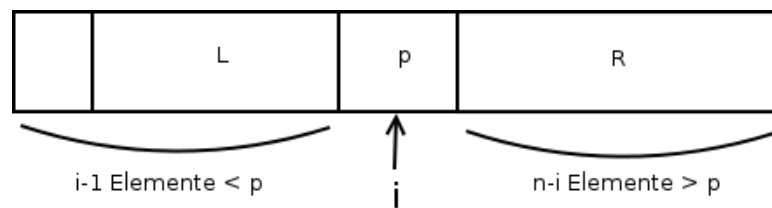


Abbildung 10.1.: Aufruf von Partition

1. **Fall** $k = i \Rightarrow$ Pivotelement war gesucht
2. **Fall** $k < i \Rightarrow$ suche rekursiv das k -t kleinste Element in L
3. **Fall** $k > i \Rightarrow$ suche rekursiv das $(k-i)$ -t kleinste Element in R

11. Quickselect

11.1. Quicksort

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

11.2. Quickselect

$$T(n) = n + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(T(i-1), T(n-i))$$

Behauptung $\text{Select} \in O(n)$, also $T(n) = c \cdot n$

Beweis Induktion

$$\begin{aligned} T(n) &= n + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(c(i-1), c(n-i)) \\ &= n + \frac{1}{n} \cdot c \sum_{i=1}^n \max((i-1), (n-i)) \\ &= n + \frac{1}{n} \cdot c \cdot 2 \left(\sum_{i=1}^{n-1} i - \sum_{i=1}^{\frac{n}{c}-1} i \right) \\ &= n + \frac{1}{n} \cdot c \cdot Z \left(\frac{(n-1)n}{Z} - \frac{(\frac{n}{2}-1)\frac{1}{2}}{Z} \right) \\ &= n + \frac{1}{n} c \left(n(n-1) - \frac{n}{2} \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \right) = n + \frac{1}{n} \cdot c \left(n^2 - n - \frac{n^2}{4} + \frac{n}{2} \right) \\ &= n + \frac{1}{n} c \left(\frac{3}{4} n^2 - \frac{1}{2} n \right) = n + c \left(\frac{3}{4} n - \frac{1}{2} \right) \\ &\Rightarrow cn = n + c \left(\frac{3}{4} n - \frac{1}{2} \right) = n + \frac{3}{4} cn - \frac{1}{2} c \\ &\Rightarrow cn \geq n + \frac{3}{4} cn \Leftrightarrow c \geq 4 \\ &\quad \text{q.e.d} \end{aligned}$$

12. Verallgemeinerung von Akra-Bazzi

$$T_n = \left[\sum_{i=1}^k a_i T\left(\frac{n}{b_i}\right) \right] + g(n)$$

Beispiel

$$T_n = 1 \cdot T\left(\frac{n}{3}\right) + 1 \cdot T\left(\frac{2n}{3}\right) + n$$

$$T_n = \theta \left(n^\alpha \left(1 + \int_1^n \frac{g(x)}{x^{1+\alpha}} dx \right) \right)$$

Klassisch $\alpha = \log_b(a)$, $\frac{a}{b^\alpha} = 1$

Jetzt Bestimme α so, dass gilt:

$$\sum_{i=1}^k \frac{a_i}{b_i^\alpha} = 1$$

$$a_1 = a_2 = 1, \quad b_1 = 3, \quad b_2 = \frac{3}{2}, \quad g(n) = n$$

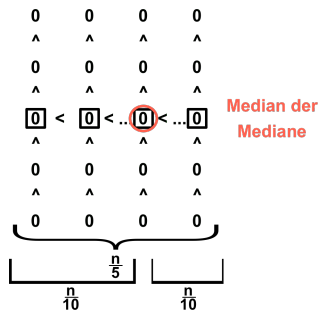
$$\frac{1^\alpha}{3} + \frac{2^\alpha}{3} \stackrel{!}{=} 1 \Rightarrow \alpha = 1$$

$$T(n) = \Theta \left(n \left(1 + \int_1^n \frac{x}{x^{1+1}} dx \right) \right) = \Theta(n \ln(n))$$

13. Median der Mediane

13.1. Ansatz

Gruppierung in 5er Päckchen



Wortlaut Teile die n Elemente in 5-er Gruppen. Bestimme innerhalb jeder Gruppe den Median. Bestimme nun den Median der Mediane. Wähle diesen Median als Pivotelement.

$$\exists \frac{3n}{10} \text{ Elemente} \leq p \leq \exists \frac{3n}{10} \text{ Elemente} (\pm 1 \text{ wegen } p)$$

Abbildung 13.1.: Median der Mediane

13.2. Deterministische Variante für k-Select

Wähle zu Beginn den Median der Mediane als Pivot Element. Unterteile nun die Folge anhand von p in zwei Teilfolgen und verfähre von nun an analog zur randomisierten Variante von k-Select.

13.3. Laufzeitanalyse für den worst-case

$$T(n) = T\left(\frac{n}{5}\right) + n + T\left(\frac{7n}{10}\right)$$

$$A_1 = \frac{n}{5}, \quad A_2 = n, \quad A_3 = \frac{7n}{10}$$

A_1 = Laufzeit zur rekursiven Bestimmung des Medians der Mediane

A_2 = Laufzeit zur Aufteilung in Teilfolgen

A_3 = Laufzeit für den Aufruf von k-Select für größere Teilfolgen, die aber sicher $\leq n - \frac{3n}{10} - \frac{7n}{10}$ hat.

Wende die verallgemeinerte Form von Akra-Bazzi an:

$$g(n) = n, \quad a_1 = a_2 = 1, \quad b_1 = 5, \quad b_2 = \frac{10}{7}$$

Bestimme

$$\alpha = \left(\frac{1}{5}\right)^\alpha + \left(\frac{7}{10}\right)^\alpha = 1$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{2}{10}\right)^\alpha + \left(\frac{7}{10}\right)^\alpha = 1$$

$$\Rightarrow 0 < \alpha < 1$$

$$n^\alpha \left(1 + \int_1^n \frac{x}{x^{1+\alpha}} dx\right) = n^\alpha \left(1 + \int_1^n x^{-\alpha} dx\right) = n^\alpha \left(1 + \left[\frac{1}{1-\alpha} x^{-\alpha+1}\right]_1^n\right) = n^\alpha \left(1 + \frac{1}{1-\alpha} (n^{-\alpha+1} - 1)\right)$$

14. Untere Schranke für vergleichsbasierte Sortiervverfahren

14.1. Entscheidungsproblem: (Bubblesort)

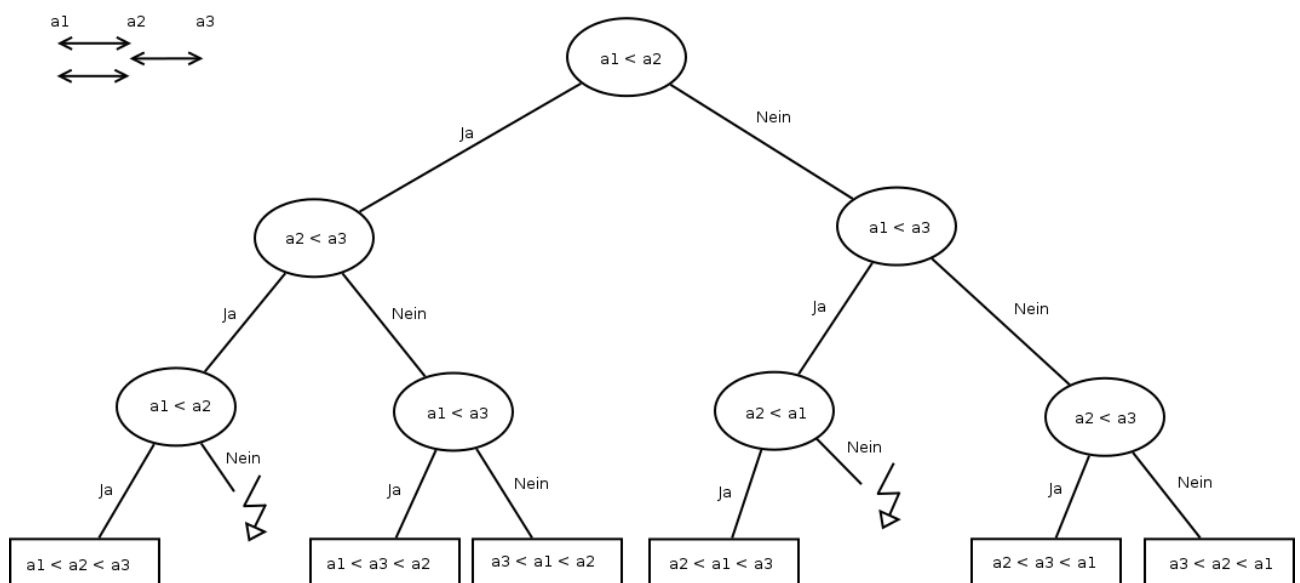


Abbildung 14.1.: Entscheidungsbaum am Beispiel Bubblesort

Ein Entscheidungsbaum für einen vergleichsbasierten Sortieralgorithmus besteht aus inneren Knoten, die mit der Vergleichsoperation $a_i < a_j$ beschriftet sind, wobei sich die Indizes i, j auf die Position der Elemente in der Eingabefolge beziehen.

Die Blätter des Entscheidungsbaums sind mit den Permutationen beschriftet, die sich nach korrekter Sortierung ergeben.

Jeder korrekte Sortieralgorithmus muss zu einem Entscheidungsbaum mit mindestens $n!$ Blättern korrespondieren.

maximale Baumtiefe $\hat{=}$ maximale Anzahl durchgeführter Vergleichsoperationen

mittlere Baumtiefe $\hat{=}$ average-case Laufzeit

14. Untere Schranke für vergleichsbasierte Sortierverfahren

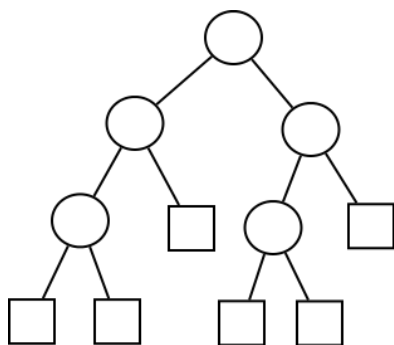
14.2. Worst-case Laufzeit

Worst-case Laufzeit eines vergleichsbasierten Sortieralgorithmus

$\hat{=}$ maximale Tiefe des zugehörigen Entscheidungsbaums

$\hat{=}$ mittlere Tiefe der Blätter im zugehörigen Entscheidungsbaums

Sei T_{max} die maximale Baumtiefe in einem binären Baum. Betrachte nun zunächst den vollständigen binären Baum mit $\# \text{Blätter} \leq 2$.



Untere Schranke $t_{max} \geq \log_2(n!) = \Omega(n \log n) = \log_2(n!) \leq t_{mean}$

Abbildung 14.2.: Binärerbaum

Herleitung

$$\ln(n!) = \ln(n(n-1) \cdot (n-2) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1) = \ln(n) + \ln(n-1) + \dots + 1$$

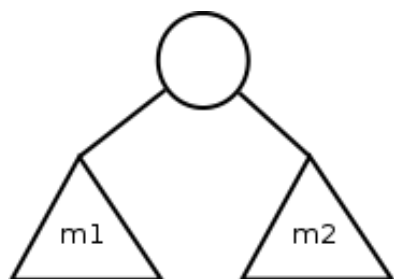
$$= \sum_{i=1}^n \ln(i) \geq \int_1^n \ln(x) dx = [x \ln(x) - x]_1^n = n \ln(n) - n + 1$$

$$\Rightarrow n! \geq e^{n \ln(n) - n + 1} = e \cdot e^{-n} \cdot \left(e^{\ln(n)}\right)^n = e \cdot e^{-n} \cdot n^n = e \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

Stirling $n! \approx \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$

14.2.1. Lemma: Mittlere Tiefe der Blätter in einem Entscheidungsbaum $> \log_2(n)n$

Beweis Induktion nach m (Blattanzahl)



Untere Schranke $m_1, m_2 \hat{=}$ Blattanzahl im linken bzw. rechten Teilbaum der Wurzel

Abbildung 14.3.: Induktions-Ansatz

Induktions Anfang: $m = 1 \quad t_{mean} = \log_2(1) = 0$

Induktions Behauptung: $t_{mean} \geq \log_2(m)$

Induktions Schritt: Sei $m_1 < m, m_2 < m$ (1) und $m_1 + m_2 = m$ (2)

b $\hat{=}$ Blatt im Entscheidungsbaum T_b

l $\hat{=}$ Blatt im linken Teilbaum T_l

r $\hat{=}$ Blatt im rechten Teilbaum T_r

$$t_{mean}^{links} \geq \log_2(m_1) \quad \text{und} \quad t_{mean}^{rechts} \geq \log_2(m_2)$$

$$\frac{1}{m} \sum_l \cdot t_l = t_{mean}^{links} \geq \log_2(m_1)$$

Verfahre analog für rechts.

$$\sum_b T_b = \sum_l (T_l + 1) + \sum_r (T_r + 1) \geq m_1 + m_2 + m_1 \log_2(m_1) + m_2 \log_2(m_2)$$

Unter der Annahme, dass das Minimum bei $\frac{m}{2}$ liegt:

$$m_1 \log_2(m_1) + m_2 \log_2(m_2) \geq \frac{m}{2} \log_2\left(\frac{m}{2}\right) \cdot 2 = m \log_2\left(\frac{m}{2}\right) \quad \text{mit (2)}$$

Es folgt somit:

$$t_{mean} = \frac{1}{m} \sum_b T_b \geq \frac{1}{m} \left(m + m \log_2\left(\frac{m}{2}\right) \right) = 1 + \log_2\left(\frac{m}{2}\right) = 1 + \log_2(m) - 1 = \log_2(m)$$

q.e.d

15. Radix-Sort

15.1. Beispiel:

10	1	0	1	0	1	00	001
01	0	1	0	0	1	01	010
00	1	1	1	0	0	01	011
11	1	1	0	1	0	10	100
10	0	0	0	1	1	10	101
01	1	1	1	1	1	11	110
11	0	0	1	1	0	11	111

Wichtig Beginne die Sortierung mit dem niedrigsten Bit

15.2. Pseudo-Code

```
1 void radixsort(int[] a) { // positives Element
2     int n = a.length;
3     int[] b0 = new int[n];
4     int[] b1 = new int[n];
5     int n0, n1;
6
7     for (int i=0; i<32; i++) {
8         n0 = n1 = 0;
9         for (int j=0; j<n; j++) {
10             if (a[j] & (1<<i)) { // i-tes Bit von a[j]
11                 b1[n1] = a[j];
12                 n1 = n1+1;
13             } else {
14                 b0[n0] = a[j];
15                 n0 = n0+1;
16             }
17         }
18     }
19     for (int j=0; j<n0; j++)
20         a[j] = b0[j];
21     for (int j=0; j<n1; j++)
22         a[n0+j] = b1[j];
23 }
```

16. Binäre Suchbäume

Zahlen 12, 8, 3, 16, 24, 17, 10, 21, 14, 9

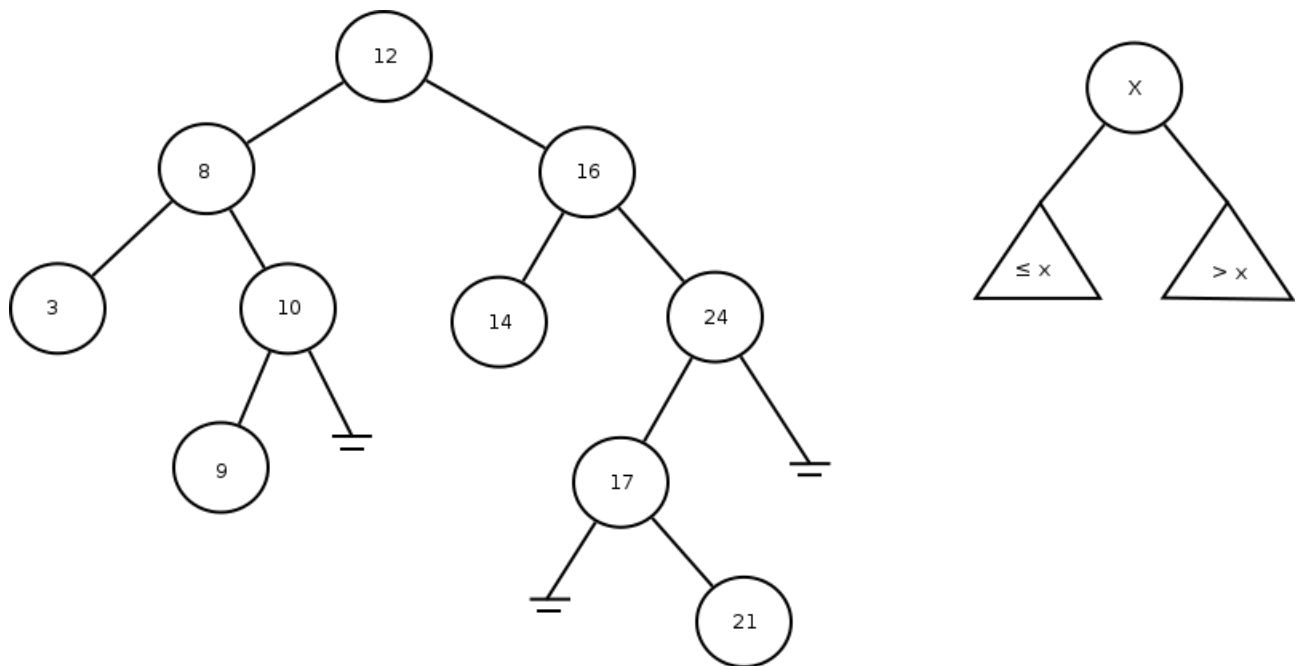


Abbildung 16.1.: Knotenorientierte Speicherung

16. Binäre Suchbäume

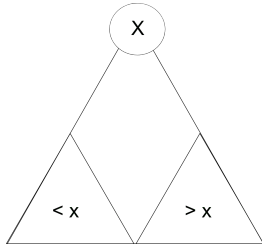


Abbildung 16.2.: Binärer Suchbaum

16.1. Pseudo-Code

```
1
2 class Node {
3     int key, info;           // info ist optional
4     Node left, right, parent; // parent ist optional
5 }
6
7 int height(Node node) {
8     if (node == NULL) return 0;
9     return height;
10 }
11
12 Node insert(Node node, int x) {
13     if (node == NULL)
14         return new Node(x, NULL, NULL);
15
16     if (node.key > x)
17         node.left = insert(node.left, x);
18     else
19         node.right = insert(node.right, x);
20     return node;
21 }
22
23 void inorder(Node node) {
24     if (node == NULL) return;
25     inorder(node.left) // linke Hälfte
26     print(node)
27     inorder(node.right) // rechte Hälfte
28 }
```


17. AVL-Bäume von Adelson-Velsky and Landis

17.1. Allgemein

Ziel Binärer Suchbaum mit garantierter Such-, Einfüge- und Löschezit $O(\log n)$

Idee Definiere eine Balancebedingung, die dafür sorgt, dass die Baumstruktur möglichst nahe an der Idealstruktur eines vollständigen binären Baumes liegt.

Aber gleichzeitig soll es möglich sein "schnell" Strukturänderungen beim Einfügen und Löschen vorzunehmen.

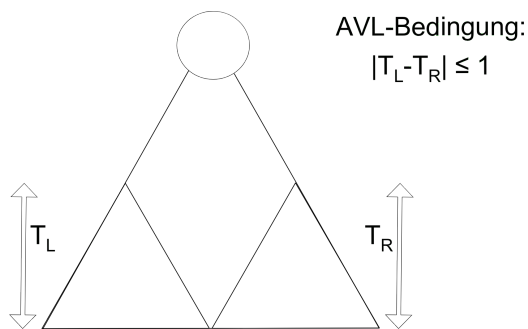
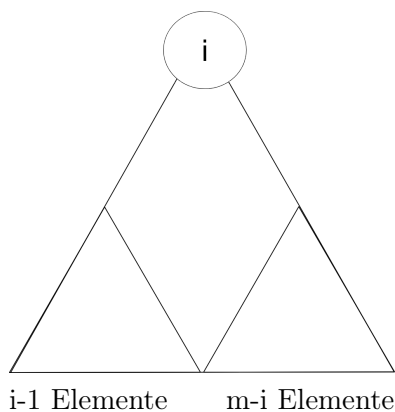


Abbildung 17.1.: AVL-Baum

17.2. Laufzeitanalyse

Ziel Analyse der erwarteten maximalen Tiefe randomisierter binärer Suchbäume

Sei der Schlüssel der Wurzel das i -kleinste Element



$T_n \hat{=}$ maximale Tiefe eines randomisierten Suchbaums mit $\{1, \dots, n\}$ Elementen

Abbildung 17.2.

Für den Fall, dass i als Wurzelknoten gewählt wird gilt:

$$T_n = \max\{T_{i-1}, T_{n-i}\} + 1$$

$$X_n = 2^{T_n} \text{ exponentielle Tiefe}$$

$$2^{T_n} = 2^{1+\max\{T_{i-1}, T_{n-i}\}} = 2 \cdot 2^{\max\{T_{i-1}, T_{n-i}\}} = 2 \cdot \max\{2^{T_{i-1}}, 2^{T_{n-i}}\}$$

$$\Rightarrow X_n = 2 \cdot \max\{X_{i-1}, X_{n-i}\}$$

Mit der Abschätzung: $\max\{2^{T_1}, 2^{T_2}\} \leq 2^{T_1} + 2^{T_2}$ folgt:

$$\begin{aligned} E(X_n) &= E\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot 2 \cdot \max\{X_{i-1}, X_{n-i}\}\right) \\ &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n E(\max\{X_{i-1}, X_{n-i}\}) \leq \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n E(X_{i-1} + X_{n-i}) \\ &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n [E(X_{i-1}) + E(X_{n-i})] \leq \frac{4}{n} \sum_{i=0}^{n-1} E(X_i) \end{aligned}$$

$$n \cdot E(X_n) = 4 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} E(X_i) \quad (1)$$

$$(n-1) \cdot E(X_{n-1}) = 4 \cdot \sum_{i=0}^{n-2} E(X_i) \quad (2)$$

$$nE(X_n) - (n-1)E(X_{n-1}) = 4E(X_n) \quad (1) - (2)$$

$$\Leftrightarrow nE(X_n) = (n+3)E(X_{n-1})$$

$$\begin{aligned} E(X_n) &= \frac{n+3}{n} E(X_{n-1}) = \frac{n+3}{n} \cdot \frac{n+2}{n-1} E(X_{n-2}) = \prod_{i=0}^{n-1} \frac{n+3-i}{n-i} \\ &= \frac{n+3}{n} \cdot \frac{n+2}{n-1} \cdot \frac{n+1}{n-2} \cdot \frac{n}{n-3} \cdot \dots \cdot \frac{6}{3} \cdot \frac{8}{2} \cdot \frac{4}{1} \end{aligned}$$

Mit der "Jensenschen Ungleichung" folgt:

$$\sum_i \Pr(T = t_i) \cdot f(t_i) \geq f\left(\sum_i \Pr(T = t_i) \cdot t_i\right) = \frac{(n+3)(n+2)(n+1)}{3!} \cdot c \Rightarrow E(X_n) \in O(n^3)$$

$$X_n = 2^{T_n}, E(X_n) = E(2^{T_n})$$

$$E(f(T)) \geq f(E(T)) \Leftrightarrow f \text{ konvex}$$

$$c \cdot n^3 \geq 2^{E(T_n)}, E(T_n) \leq \log_2(c \cdot n^3) \in O(\log n)$$

17.3. Baumtiefe

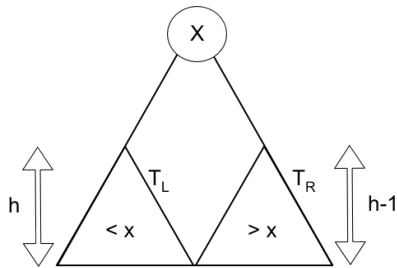


Abbildung 17.3.

Ziel: Zeige, dass die maximale Tiefe eines AVL-Baums mit n Knoten ($\hat{=}$ n gespeicherten Schlüsseln) $O(\log(n))$ beträgt.

17.3.1. AVL-Eigenschaft:

$|h(T_L) - h(T_R)| \leq 1$ muss für jeden Knoten des Baums gelten. \Rightarrow Suchzeit $O(\log(n))$ im worst-case.

$n(h)$ = minimale Anzahl von Knoten in AVL-Baum der Tiefe h

$$n(h) \geq 1 + n(h-2) + n(h-1) \text{ mit } n(0) = 0 \text{ und } n(1) = 1$$

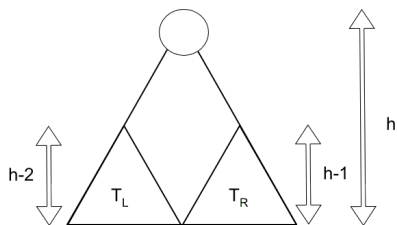


Abbildung 17.4.

$$n \geq f(h)^I = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot (\phi^h - \phi^{-h}) \text{ mit}$$

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \approx 1,61 \dots$$

$$\Rightarrow n \geq c \cdot \phi^h$$

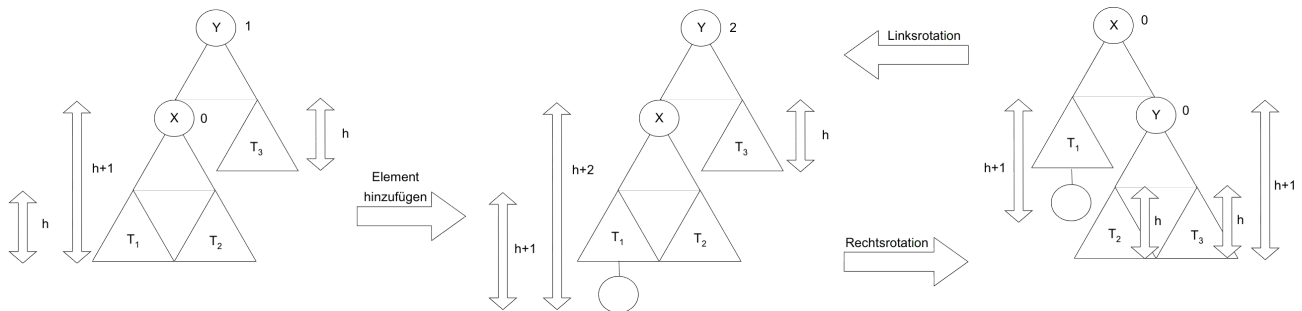
$$\Leftrightarrow h \leq \log\left(\frac{n}{c}\right)$$

$$\Rightarrow h \in O(\log n)$$

q.e.d.

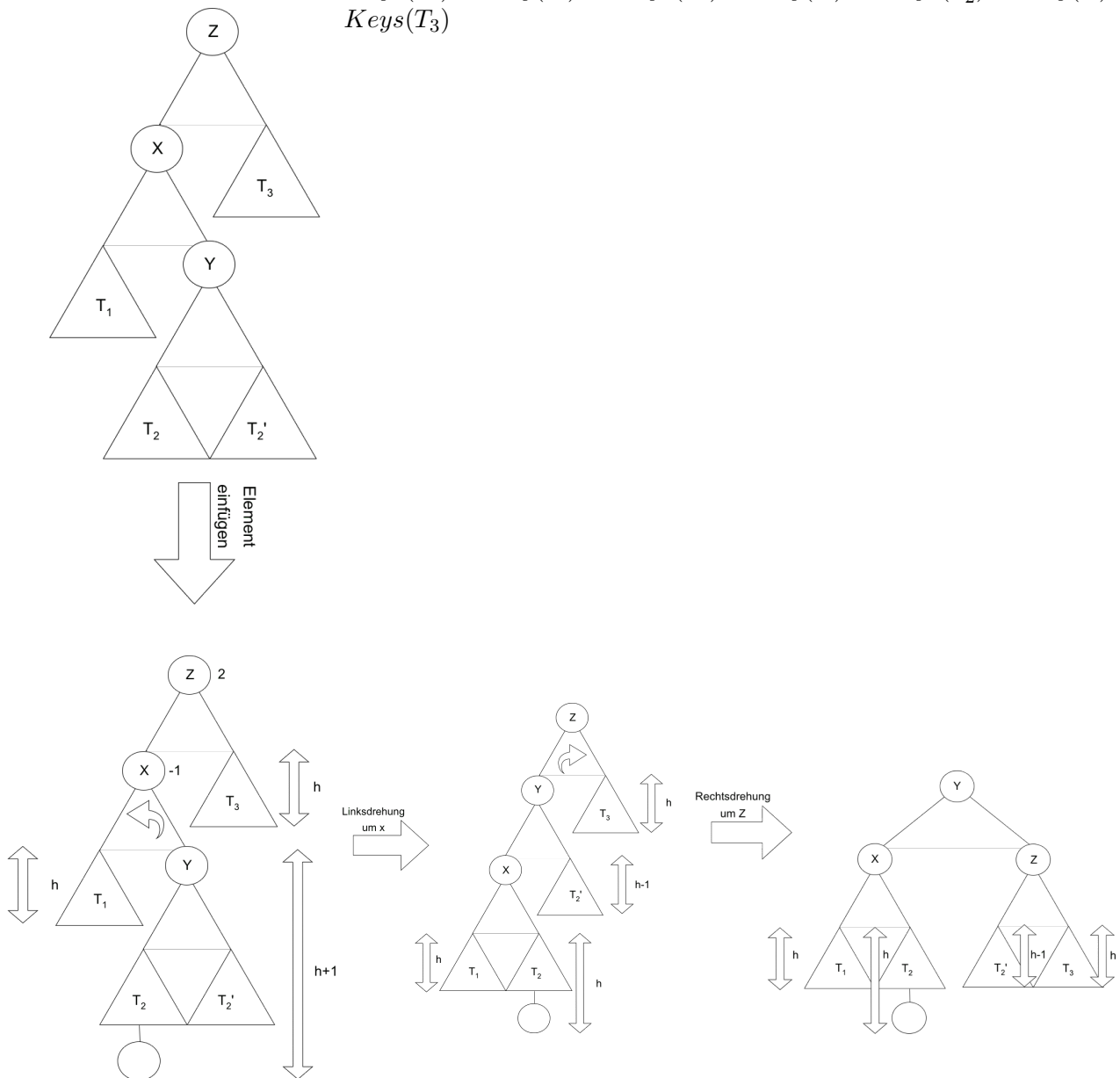
^I $f(h)$ meint hierbei die h -te Fibonacci-Zahl

17.4. Rotationen



$Keys(T_1) < Key(X) < Keys(T_2) < Key(Y) < Keys(T_3)$
 $balance(Y) = height(Y.left) - height(Y.right)$

$Keys(T_1) < Key(X) < Keys(T_2) < Key(Y) < Keys(T'_2) < Key(Z) < Keys(T_3)$



17.5. Pseudo-Code

```

1
2 class Node {
3     int key;
4     Node left, right;
5     int height;
6 }
7
8 int height(Node node) {
9     if (node == null) return 0;
10    return height;
11 }
12
13 Node rotateRight(Node y) {
14     Node x = y.left;
15     Node T2 = x.right;
16     y.left = T2;
17     T2.right = y;
18     y.height = 1+max(height(y.left), height(y.right));
19     x.height = 1+max(height(x.left), height(x.right));
20     return x;
21 }
22
23 Node rotateLeft(Node y) {
24     //analog
25 }
26
27 Node insert(Node node, int key) {
28     if (node == null) return new Node(key);
29     if (key < node.key)
30         node.left = insert(node.left, key);
31     else
32         node.right = insert(node.right, key);
33
34     if (balance(node)>1 && key < node.left.key)
35         return rotateRight(node);
36     if (balance(node)<-1 && key > node.right.key)
37         return rotateLeft(node);
38     if (balance(node)>1 && key > node.left.key) {
39         node.left = rotateLeft(node.left);
40         return rotateRight(node);
41     }
42     if (balance(node)<-1 && key < node.right.key) {
43         node.right = rotateRight(node.right);
44         return rotateLeft(node);
45     }
46     return node;
47 }

```

Anmerkung: Die Laufzeit des Einfügens bleibt in $O(\text{Baumtiefe}) = O(\log n)$. Nur einer der vier Fälle ist notwendig, um die Balance herzustellen.

18. (a,b)-Suchbäume

Blattorientierte Speicherung der Elemente

Innere Knoten haben mindestens a und höchstens b Kinder und tragen entsprechende Schlüsselwerte, um die Suche zu leiten.

Beispiel:

$$h \hat{=} \text{Tiefe} \Rightarrow a^h \leq n \leq b^h \Rightarrow \log_b n \leq h \leq \log_a n$$

18.1. Aufspaltung bei Einfügen

18.2. Verschmelzen von Knoten beim Löschen

Aufspalte- und Verschmelze-Operationen können sich von der Blattebene bis zur Wurzel kaskadenartig fortpflanzen. Sie bleiben aber auf den Suchpfad begrenzt.

\Rightarrow Umbaukosten sind beschränkt durch die Baumentiefe $= O(\log n)$

19. Amortisierte Analyse

	000	
	001	Kosten(1) = 1
	010	= 2
	011	= 1
Beispiel: Binärzähler	100	= 3
	101	= 1
	110	= 2
	111	= 1
		<u>11</u>

Kosten der Inkrement-Operation $\hat{=}$ Zahl der Bit-Flips

Naive Analyse $2^k = n$

$$1 \cdot \frac{n}{2} + 2 \cdot \frac{n}{4} + 3 \cdot \frac{n}{8} + \dots + k \cdot \frac{n}{2^k} = \frac{n}{2} \sum_{i=1}^k i \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1} = 2^{k+1} - k - 2 = 2n - k - 2$$

Von 0 bis n im Binärsystem zu zählen kostet $\leq 2n$ Bit-Flips

Sprechweise: amortisierte Kosten einer Inkrement-Operation sind 2
Folge von n -Ops kostet $2n$

19.1. Bankkonto-Methode

$$\text{Konto}(i+1) = \text{Konto}(i) - \text{Kosten}(i) + \text{Einzahlung}(i)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{Kosten}(i) = \text{tatsächliche Gesamtkosten} = \sum_{i=1}^n (\text{Einzahlung}(i) + \text{Konto}(i) - \text{Konto}(i+1))$$

$$= \sum_{i=1}^n \text{Einzahlung}(i) + \text{Konto}(1) - \text{Konto}(n+1)$$

000	
001€	Kosten(1) = 1
01€0	= 2
01€1€	= 1
1€00	= 3
1€01€	= 1
1€1€0	= 2
1€1€1€	= 1
	<u>11</u>

19. Amortisierte Analyse

19.1.1. Kontoführungsschema: für Binärzähler

1€ pro 1 in der Binärdarstellung

Jeder Übergang $1€ \rightarrow 0$ kann dann mit dem entsprechenden Euro Betrag auf dieser 1 bezahlt werden.

Es gibt pro Inkrement Operation nur einen $0 \rightarrow 1$ Übergang

2€ Einzahlung für jede Inc-Operation reichen aus um:

1. diesen $0 \rightarrow 1$ Übergang zu bezahlen
2. die neu entstandene 1€ mit einem Euro zu besparen.

$$GK = 2(2^k - 1) + 0^I - k^I = 2n - k - 2$$

19.1.2. Kontoführungsschema für einen 2-5 Baum

Satz: Ausgehend von einem leeren 2-5-Baum betrachten wir die Rebalancierungskosten C (Split- und Fusionsoperationen) für eine Folge von m Einfüge- oder Löschooperationen. Dann gilt: $C \in O(m)$

d.h. Amortisierte Kosten der Split- und Fusionsoperationen sind konstant.

! Dies bezieht sich nicht auf die Suchkosten, die in $O(\log n)$ liegen.

Beweisidee:

Kontoführung:

1	2	3	4	5	6
2€	1€	0€	0€	1€	2€

regelmäßige Einzahlung: 1€

Durch eine Einfüge- oder Löschooperation steigt oder fällt der Knotengrad des direkt betroffenen Knotens um höchstens 1. \Rightarrow 1€ Einzahlung reicht zur Aufrechterhaltung dieses Sparplanes.

Jetzt Beseitigung der temporären 1- und 6-Knoten:

Ein 6-Knoten nutzt 1€ um seinen Split zu bezahlen. Die beiden neu entstehenden 3-Knoten benötigen kein Kapital. Der Vaterknoten des gesplitteten 6-Knotens benötigt ggf. den zweiten verfügbaren €.

Analoge Betrachtung für Fusion eines temp. 1-Knotens.

19.2. Hashing

$U \subseteq \mathbb{N}$ z.B. 64-Bit-Integer

n = Zahl der zu verwaltenden Schlüssel

$$|U| \gg n$$

Hashfunktion h :

$$h : U \rightarrow [0, \dots, m-1]$$

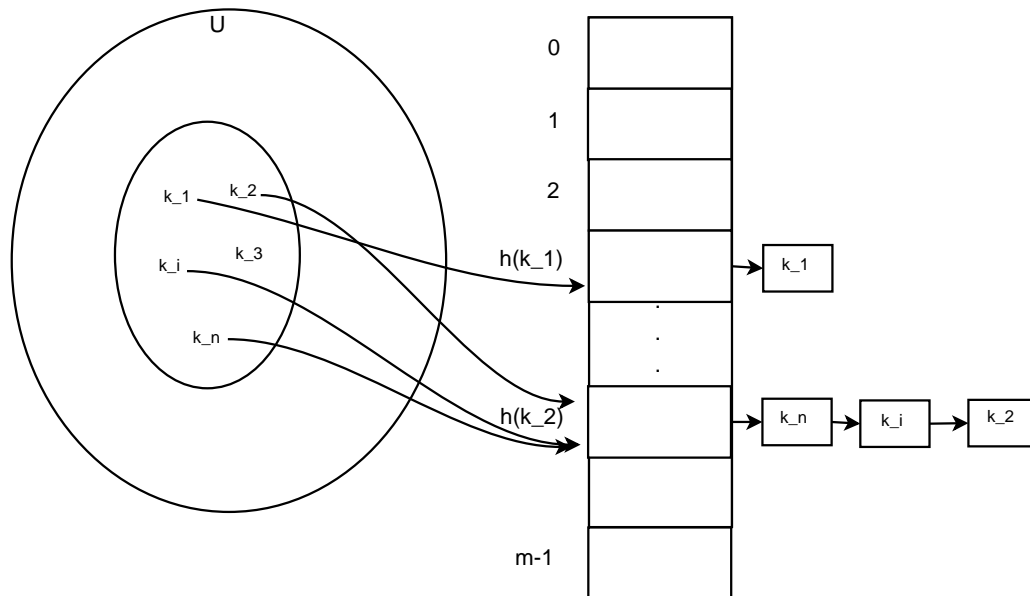
$$\text{z.B. } k \mapsto k \bmod m$$

Einfache Annahme: (einfaches uniformes Hashing)

$$\forall k_i, k_j \in U : Pr(h(k_i) = h(k_j)) = \frac{1}{m}$$

^IZählerstand(000)

^{II}Zählerstand($\overbrace{111 \dots 1}^k$)

Abbildung 19.1.: Universum und Hashtabelle der Größe m **Analyse der Laufzeit zum Einfügen eines neuen Elementes k**

- $h(k)$ berechnen $\rightarrow O(1)$
- Einfügen am Listenanfang in Fach $h(k)$. $\rightarrow O(1)$

Analyse der Suchzeit für einen Schlüssel k

- $h(k) \rightarrow O(1)$
- Listenlänge zum Fach $h(k)$ sei $n_{h(k)}$ also beim Durchlauf der kompletten Liste $\rightarrow O(n_{h(k)})$

$$E(n_{h(k)}) = \frac{n}{m} = \alpha^{\text{III}}$$

$$\text{Suchzeit(Einfügen)} \in O(1 + \alpha)$$

Laufzeit beim Löschen von Schlüssel k

- $h(k) \rightarrow O(1)$
- Durchlaufen der Liste $\rightarrow O(n_{h(k)})$
- Löschen durch „Pointer-Umbiegen“ $\rightarrow O(1)$

19.2.1. Universelles Hashing

Idee Arbeite nicht mit einer festen Hashfunktion sondern wähle am Anfang eine zufällige Hashfunktion aus einer Klasse von Hashfunktionen aus.

^{III}Belegungsfaktor

19. Amortisierte Analyse

z.B.

$$h_{a,b}(k) = ((a \cdot k + b) \bmod p) \bmod m$$

p sei eine hinreichend große Primzahl $0 < a < p, 0 \leq b < p$

$$\mathcal{H}_{p,m} = \{h_{a,b}(k) | 0 < a < p, 0 \leq b < p\}$$

$$|\mathcal{H}_{p,m}| = p(p-1)$$

Definition \mathcal{H} heißt universell $\Leftrightarrow \forall k, l \in U : Pr(h(k) = h(l)) \leq \frac{1}{m}$

Suchzeit

$$X_{k,l} = \begin{cases} 1 & \text{für } h(k) = h(l) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$E(n_{h(k)}) = E\left(\sum_{l \in T, l \neq k}\right) = \sum_{l \in T, l \neq k} E(X_{k,l}) = \sum_{l \in T, l \neq k} Pr(h(k) = h(l)) = \sum_{l \in T, l \neq k} \frac{1}{m} = \frac{n-1}{m} = \alpha$$

20. Vorlesung

Universelles Hashing (Fortsetzung)

Könnte ein boshafter Mitspieler n Schlüssel bei gegebener fester Hashfunktion wählen, so würde er solche wählen, die auf den gleichen Slot unter gegebener Hashfunktion abgebildet werden. \rightsquigarrow Durchschnittliche Ablaufzeit von $O(n)$

Idee zufällige Wahl der Hashfunktion aus einer Familie von Funktionen derart, dass die Wahl unabhängig von den zu speichernden Schlüssel ist (universelles Hashing).

20.0.1. Definition

Sei \mathcal{H} eine endliche Menge von Hashfunktionen, welche ein gegebenes Universum U von Schlüssel auf $\{0, \dots, m-1\}$ abbildet. Sie heißt universell, wenn für jedes Paar von Schlüssel $k, l \in U$ $l \neq k$ die Anzahl der Hashfunktionen $h \in \mathcal{H}$ mit $h(l) = h(k)$ höchstens $\frac{|\mathcal{H}|}{m}$. Anders: Für ein zufälliges $h \in \mathcal{H}$ beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass zwei unterschiedliche Schlüssel k, l kollidieren nicht mehr als $\frac{1}{m}$ ist.

20.0.2. Beispiel

p Primzahl, so groß, dass alle möglichen Schlüssel $k \in U$ im $0, \dots, p-1$ liegen. $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ bezeichnet den Restklassenring $\text{mod } p$ (weil p prim, ist $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ ein Körper). $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}^*$ ist die Einheitengruppe.

Annahme: Die Menge der Schlüssel im Universum U ist größer als die Anzahl der Slots in der Hashtabelle. Für $a \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}^*$ und $b \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ betrachte:

$$h_{a,b}(k) := (a \cdot k + b \text{ mod } p) \text{ mod } m \quad (*)$$

Damit ergibt sich die Familie

$$\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}^* = \{1, \dots, p-1\} \quad \mathbb{Z}/p\mathbb{Z} = \{0, \dots, p-1\} \quad \mathcal{H}_{p,m} = \{h_{a,b} | a \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}^*, b \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \quad |\mathcal{H}| = p(p-1)\}$$

Satz Die in $(*)$ eingeführte Klasse von Hashfunktionen ist universell.

Beweis Seien k, l Schlüssel auf $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ mit $k \neq l$

Für $h_{a,b} \in \mathcal{H}_{p,m}$ betrachten wir

$$r = (a \cdot k + b) \text{ mod } p$$

$$s = (a \cdot l + b) \text{ mod } p$$

Es ist $r \neq s$

Dazu:

$$r - s = a \cdot (k - l) \text{ mod } p \quad (*2)$$

20. Vorlesung

Angenommen $r - s = 0$

$$0 = a \cdot (k - l) \pmod{p}, \text{ aber } a \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}^* \Rightarrow a \neq 0 \text{ und } k \neq l \Rightarrow k - l \neq 0$$

Da p prim ist $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ ein Körper \Rightarrow kein Nullteiler $\Rightarrow a \cdot (k - l) \neq 0 \Rightarrow r \neq s$

Daher bilden $h_{a,b} \in \mathcal{H}_{p,m}$ unterschiedliche Schlüssel k, l auf unterschiedliche Elemente ab. („Auf dem level \pmod{p} gibt es keine Kollisionen“).

Aus (*2) folgt:

$$(r - s)(k - l)^{-1} = a \pmod{p}$$

$$r - a \cdot k = b \pmod{p} \text{ Bijektion zwischen } (k, l) \text{ und } (a, b)$$

Daher ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Schlüssel $h \neq l$ kollidieren, gerade die Wahrscheinlichkeit, dass $r \equiv s \pmod{m}$, falls $r \neq s$ zufällig gewählt (aus $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$).

Für gegebenes r gibt es unter den übrigen $p-1$ Werten für s höchstens $\lceil \frac{p-1}{m} \rceil \leq \lceil \frac{p}{m} \rceil - 1$ Möglichkeiten, sodass $s \neq r \pmod{p}$ aber $r = s \pmod{m}$

20.0.3. Abschätzung nach oben

$$\lceil \frac{p}{m} \rceil - 1 \leq \frac{(p + m - 1)}{m} - 1 = \frac{p - 1}{m} \text{ Kollisionsmöglichkeiten}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass r und s kollidieren \pmod{m} Kollisionsmöglichkeiten / Gesamtzahl der Werte

$$= \frac{p - 1}{m} \cdot \frac{1}{p - 1} = \frac{1}{m}$$

\Rightarrow Für ein Paar von Schlüsseln $k, l \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ mit $k \neq l$

$$P[h_{a,b}(k) = h_{a,b}(l)] \leq \frac{1}{m} \Rightarrow \mathcal{H}_{p,m} \text{ universell!}$$

20.1. Perfektes Hashing

Wichtig Menge der Schlüssel ist im Vorhinein bekannt und ändert sich nicht mehr.

Beispiele reserved words bei Programmiersprachen, Dateinamen auf einer CD

20.1.1. Definition

Eine Hashmethode heißt perfektes Hashing, falls $O(1)$ Speicherzugriffe benötigt werden, um die Suche nach einem Element durchzuführen.

Idee Zweistufiges Hashing mit universellen Hashfunktionen.

1. Schritt n Schlüssel, m Slots durch Verwendung der Hashfunktion h , welche aus einer Familie universeller Hashfunktionen stammt.
2. Schritt Statt einer Linkedlist im Slot anzulegen, benutzen wir eine kleine zweite Hashtabelle S_j mit Hashfunktion h_j

Bild Schlüssel $k = \{10, 22, 37, 49, 52, 60, 72, 75\}$

Äußere Hashfunktion $h(k) = ((a \cdot b) \bmod p) \bmod m$

$$a = 3, \quad b = 42, \quad p = 101, \quad m = 9$$

$$h(10) = \underbrace{(3 \cdot 10 + 42 \bmod 101)}_{=72} \bmod 9 = 0$$

Um zu garantieren, dass keine Kollision auf der zweiten Ebene auftreten, lassen wir die Größe von S_j

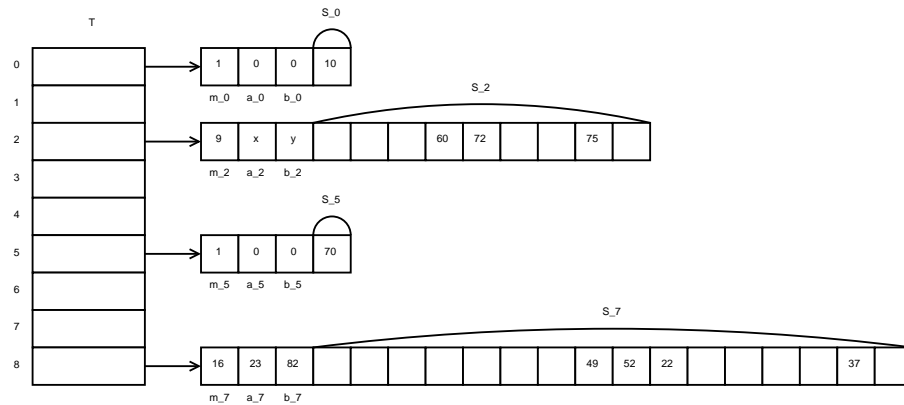


Abbildung 20.1.: Perfekte Hashtabelle

gerade n_j^2 sein ($n_j \neq \#\text{Schlüssel} \rightarrow j\text{Slot}$).

Wir verwenden für die Hashfunktion der ersten Ebene eine Funktion aus $\mathcal{H}_{p,m}$. Schlüssel die im j-ten Slot werden in der sekundären Hashtabelle S_j der Größe m_j mittels h_j gehasht. $h_j \in \mathcal{H}_{p,m}$

Wir zeigen: 2 Dinge:

1. Wie versichern wir, dass die zweite Hashfunktion keine Kollision hat.
2. Der erwartete Speicherbedarf ist $O(n)$

zu 1.

Satz Beim Speichern von n Schlüsseln in einer Hashtabelle der Größe $m = n^2$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Kollision auftritt $< \frac{1}{2}$

Beweis: Es gibt $\binom{n}{2}$ mögliche Paare, die kollidieren können. Jedes kollidiert mit der Wahrscheinlichkeit $\leq \frac{1}{m}$, falls $h \in \mathcal{H}$ zufällig gewählt wurde.

Sei X eine zufallsvariable(ZV), X zählt Kollisionen:

Für $m = n^2$ ist die erwartete Zahl der Kollisionen:

$$E[X] = \binom{n}{2} \cdot \frac{1}{m} = \binom{n}{2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{n!}{2!(n-2)!n^2} = \frac{(n-1)}{2n} \leq \frac{1}{2}$$

Anwenden der Markow-Ungleichung (a=1):

$$P[X \geq 1] \leq \frac{E[X]}{1} = \frac{1}{2} \Rightarrow \text{Wahrscheinlichkeit für irgendeine Kollision ist } < \frac{1}{2}$$

q.e.d

20.1.2. Nachteil

Für große n ist $m = n^2$ nicht haltbar!

zu 2. Wenn die Größe der primären Hashtabelle $m = n$ ist, dann ist der Platzverbrauch in $O(n) \rightsquigarrow$ Betrachte Platzverbrauch der sekundären Hashtabellen.

Satz Angenommen wir wollen n Schlüssel in einer Hashtabelle der Größe $m = n$ mit Hashfunktion $h \in \mathcal{H}$. Dann gilt:

$$E \left[\sum_{j=0}^{m-1} n_j^2 \right] < 2n$$

Beweis

Betrachte

$$a^2 = a + 2 \cdot \binom{a}{2} = a + 2 \cdot \frac{a^2 - a}{2} \quad (*3)$$

Betrachte

$$E \left[\sum_{j=0}^{m-1} n_j^2 \right] \stackrel{(*3)}{=} E \left[\sum_{j=0}^{m-1} \left(n_j + 2 \binom{n_j}{2} \right) \right]$$

$$\stackrel{\text{lini. des EW}}{=} E \left[\underbrace{\sum_{j=0}^{m-1} n_j}_{=n} \right] + 2E \left[\sum_{j=0}^{m-1} \binom{n_j}{2} \right] = n + 2E \left[\sum_{j=0}^{m-1} \binom{n_j}{2} \right] \# \text{ der Kollisionen}$$

Da unsere Hashfunktion universell ist, ist die erwartete Zahl dieser Paare:

$$\binom{n}{2} \frac{1}{m} = \frac{n(n-1)}{2m} = \frac{n-1}{2}, \text{ da } m = n$$

Somit

$$E \left[\sum_{j=0}^{m-1} n_j^2 \right] \leq n + 2 \frac{n-1}{2} = 2n - 1 < 2n$$

Korollar Speichern wir n Schlüssel in einer Hashtabelle der Größe $m = n$ mit einer zufälligen universellen Hashfunktion und setzen die Größe der Hashtabellen der zweiten Ebene auf $m_j = n_j^2$ für $j = 0, m = 1$, so ist der Platzverbrauch des perfekten Hashings weniger als $2n$. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Platzverbrauch der zweiten Hashtabellen $\geq 4n$ ist, ist $\leq \frac{1}{2}$ ohne Beweis.

21. Vorlesung

Bei n Elementen sollte die Hashtabelle $m = n^2$ groß sein.
Für die universellen Hashfunktionen

$$\mathcal{H}_{p,m} = \{h_{a,b}(k) = (a \cdot k + b) \bmod p \bmod m \mid 0 < a < p, 0 \leq b < p\}$$

$\binom{n}{1}$ Schlüsselpaare (k, l) mit $k \neq l$

$$E(\# \text{Kollisionen}) \leq \binom{n}{2} \cdot \frac{1}{m} = \frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{1}{n^2} \leq \frac{1}{2}$$

Idee Zweistufiges Verfahren:

- primäre Hashfunktion für Tabelle der Größe $m = n$

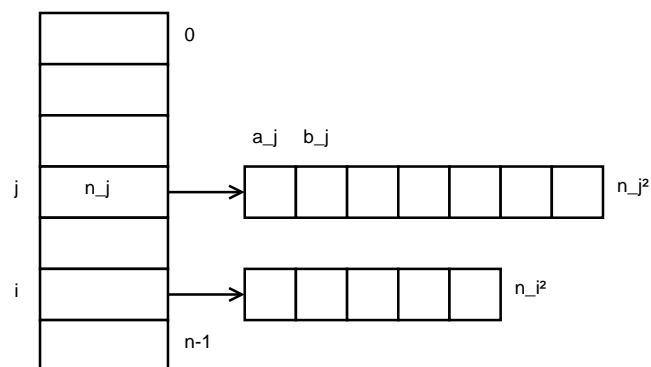


Abbildung 21.1.: Perfektes Hashing

¹Universalität von \mathcal{H}

Teil II.

Graphen-Algorithmen

21.0.1. Einführung

$$G = (V, E) \quad V \text{ vertices, } E \text{ edges} \quad E \subseteq V \times V$$

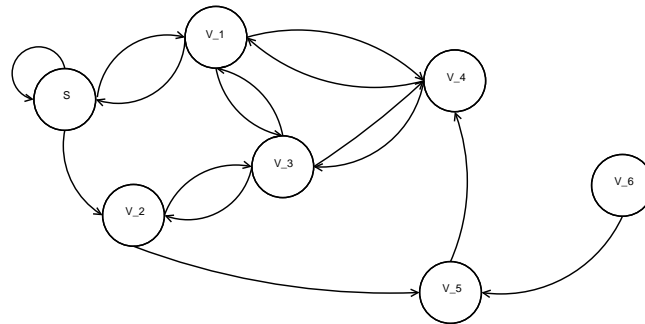


Abbildung 21.2.: Gerichteter Graph

Planare Graphen können ohne Überkreuzung der Kanten in die Ebene eingebettet werden.

Eulerische Polyederformel

$$|V| + |F| = |E| + 2$$

$$8 + 6 = 12 + 2$$

Es gilt:

$$2 \cdot |E| \geq 3 \cdot |F|$$

$$\# \text{gerichtete Kanten} = 2 \cdot |E| = \sum_{i=1}^{|F|} \# \text{Kanten}(f_i)^{\text{II}} \geq 3 \cdot |F|$$

$$|F| \leq \frac{2}{3}|E|, \quad |V| + |F| = |E| + 2 \leq |V| + \frac{2}{3}|E| \Rightarrow \frac{1}{3}|E| + 2 \leq |V|$$

$$\Rightarrow |E| \leq 3 \cdot |V| - 6$$

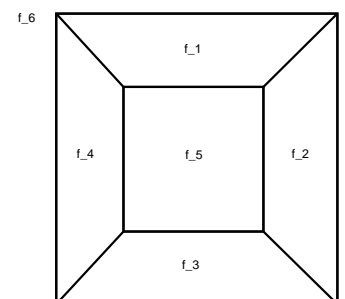


Abbildung 21.3.: Würfel

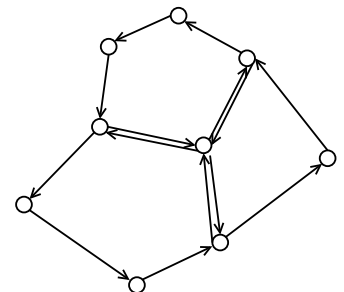


Abbildung 21.4.: Placeholder

^{II}Jedes f_i hat mindestens 3 Kanten

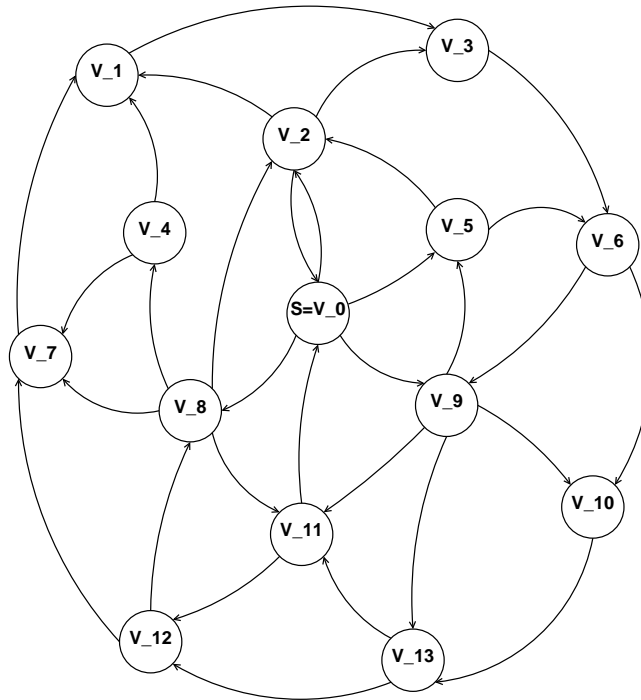


Abbildung 21.5.: Beispiel

Adjazenzmatrix

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

= A

$$a \in B^{|V| \times |V|}$$

falls G ungerichtet $\Rightarrow A = A^T$

Adjazenzlisten Repräsentation

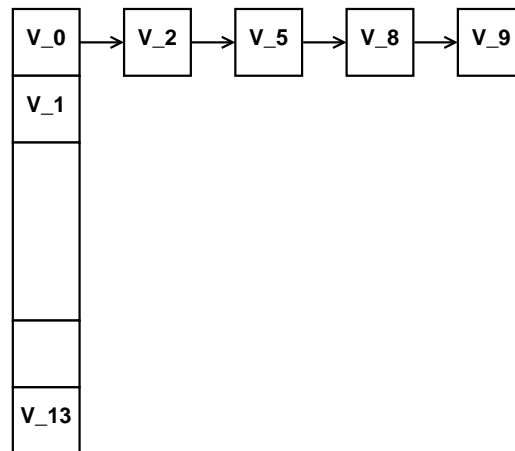


Abbildung 21.6.: Adjazenzliste

Platzbedarf

$$\mathcal{O}(|V| + |E|) = \mathcal{O} \left(|V| + \sum_{i=0}^{|V|-1} \text{outdeg}(v_i) \right)$$

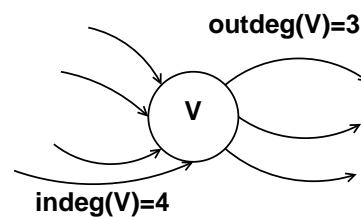


Abbildung 21.7.: indeg und outdeg

21.0.2. BFS (Breadth-First Search) Breitensuche

```

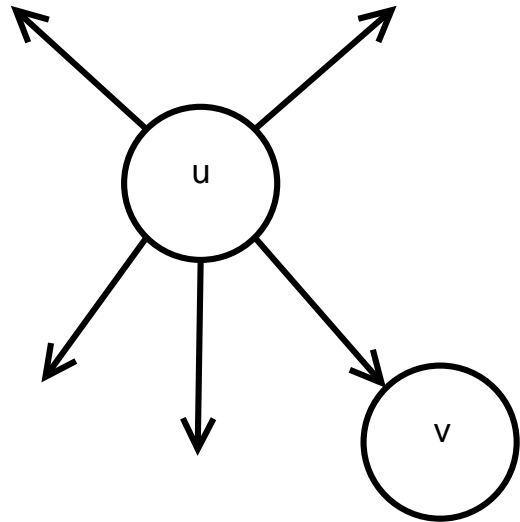
1 forall (v in V \ {S}) {
2   col[v]=white;    // Farbe weiß = unbekannt, grau = bekannt, schwarz = vollkommen bekannt
3   d[v] = infinity; // Distanz
4   pi[v] = NULL;    // pi ist Vorgänger
5 }
6 col[s] = grey;     // s ist Startknoten
7 d[s] = 0;
8 pi[s] = NULL;
```

Queue	vs	Stack
Schlange		Stapel
empty()		"
push()		"
pop()		
FIFO		FILO
First-In-First-Out		First-In-First-Out

```

1 Queue Q;
2 Q.push(s);
3 while(!Q.empty()) {
4     u = Q.pop();
5     forall( (u,v) in E) {
6         if (col[v] == white) {
7             col[v] == grey;
8             d[v] = d[u]+1;
9             pi[v] = u;
10            Q.push(v);
11        }
12    }
13    col[u] = black;
14 }

```



Laufzeit

$$\mathcal{O}(|V| + |E|)$$

Abbildung 21.8.: Grafik zum Beispielcode

Begründung: Jeder von s aus erreichbare Knoten wird nur einmal in die Queue aufgenommen und auch ihr entfernt. Für jeden Knoten muss nur einmal seine Adjazenzliste durchlaufen werden.

$$\Rightarrow \mathcal{O} \left(|V| + \sum_{v \in V} \text{outdeg}(v) \right)$$

22. Vorlesung

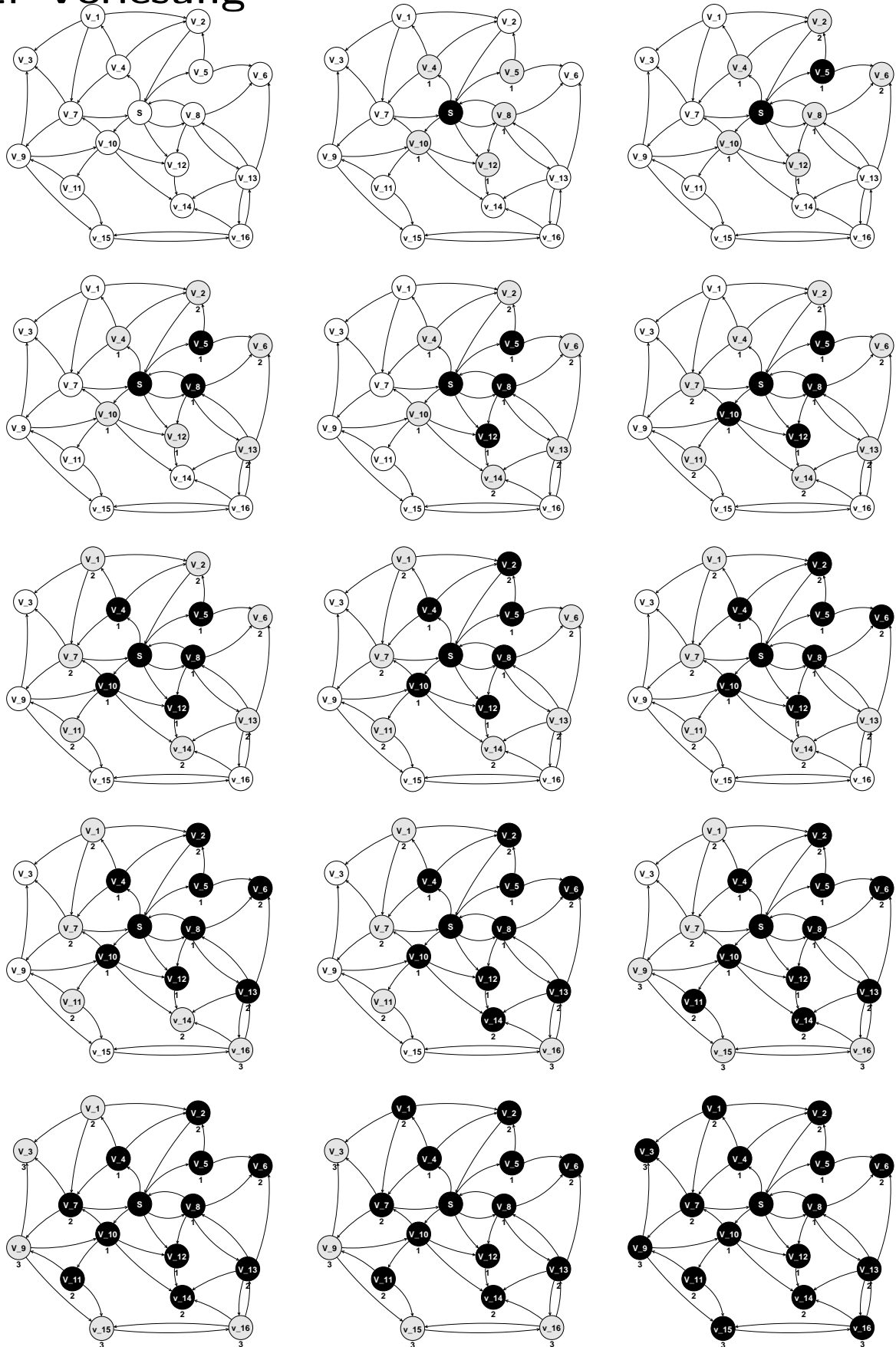


Abbildung 22.1.: Beispiel

Definition: Länge kürzesten Weges

$\delta(s, v)$ = Länge eines kürzesten Weges vom Startknoten s zum Knoten v .
 Setze $\delta(s, v) = \infty$, falls v nicht erreichbar von s aus.

Satz: Richtigkeit des Algorithmus

Nach Ablauf von BFS^I gilt

$$\forall v \in V : d[v] = \delta(s, v)$$

Lemma 1: Dreiecksungleichung für kürzeste Wege

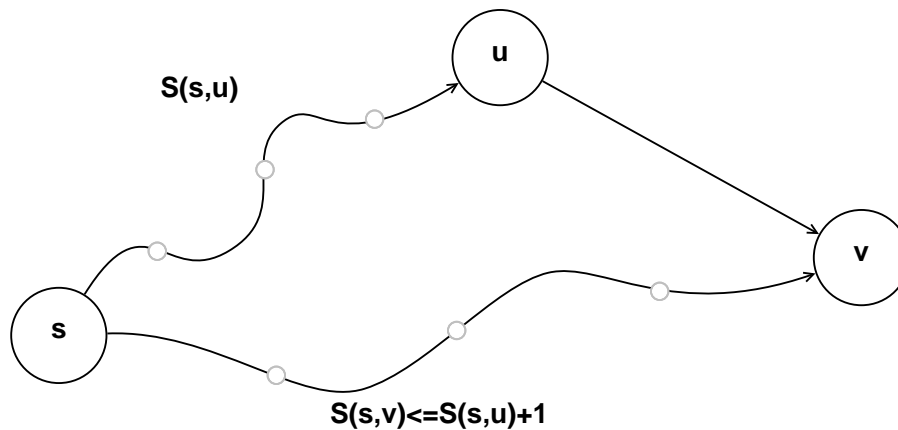


Abbildung 22.2.

Lemma 2

Zu jedem Zeitpunkt im Verlauf von BFS gilt:

$$\forall v \in V : d[v] \geq \delta(s, v)$$

Beweis (induktiv über Zahl der Operationen, die d-Wert verändern)

Induktions-Anfang

$$d[s] = 0$$

Induktions-Schritt Knoten v wird von u aus neu entdeckt

$$d[u] \geq \delta(s, u)$$

$$d[v] = d[u] + 1 \geq \delta(s, u) + 1 \stackrel{D.U.}{\geq} \delta(s, v)$$

Lemma 3

Sei $Q = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ eine Queue, dann gilt stets:

$$d[v_1] \leq d[v_2] \leq \dots \leq d[v_k] \leq d[v_1] + 1$$

^IBreitensuche

Beweis (induktiv über die Zahl der push- und pop-Operationen)

Induktions-Anfang

$$d[s] = 0 \checkmark$$

Induktions-Schritt

pop

$$d[v_1] \leq d[v_2] \leq \dots \leq d[v_k] \leq d[v_1] + 1 \stackrel{!}{\leq} d[v_2] + 1$$

push

$$d[u] = d[v_1] \leq d[v_2] \leq \dots \leq d[v_k] \leq d[u] + 1$$

Beachte Kante (u, v) v ist weiß

$v = v_{k+1}$ wird gepusht

$$d[v_{k+1}] = d[v_1] + 1$$

Zustand von Q nach push

$$d[v_2] \leq d[v_3] \leq \dots \leq d[v_k] \leq d[v_1] + 1 = d[v_{k+1}] \quad \checkmark$$

Satz: Richtigkeit des Algorithmus

Nach Ablauf von BFS^{II} gilt

$$\forall v \in V : d[v] = \delta(s, v)$$

Beweis durch Widerspruch

Sei $v \in V$, so dass $d[v] \neq \delta(s, v)$ am Ende des Algorithmus $\stackrel{\text{Lemma 2}}{\implies} d[v] > \delta(s, v)$

Sei v so gewählt, dass es der erste Knoten ist mit der Eigenschaft, dass sein d-Wert falsch gesetzt wird.

d.h. Alle d-Werte bis zu diesem Zeitpunkt sind korrekt.

Sei $s \mapsto u' \rightarrow v$ ein kürzester Weg s zu v

Betrachte die Situation bei Bearbeitung von u' :

1. Fall v ist in diesem Moment schwarz.

$$d[v] > \delta(s, v) = \delta(s, u') + 1 \geq \text{III} d[v] \quad \nexists$$

2. Fall v ist in diesem Moment weiß.

$$d[v] > \delta(s, u') + 1 = d[u'] + 1 = \text{IV} d[v] \quad \nexists$$

^{II}Breitensuche

^{III} v vor u' aus Q entfernt und Lemma 3.

^{IV}wegen Wahl von v ; d-Wert von u' muss also korrekt sein

22. Vorlesung

3. Fall v ist grau.

$$d[v] > \delta(s, u') + 1 = d[u'] + 1 \geq d[u] + 1 = d[v]$$

$d[u] \leq d[u']$, weil u vor u' aus Q entfernt \nmid

q.e.d.

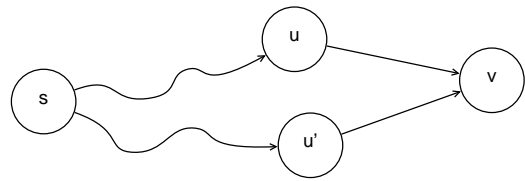


Abbildung 22.3.

22.1. Kürzeste Wege Algorithmen

22.2. Dijkstra-Algorithmus

$$G = (V, E) \quad w : E \rightarrow \mathbb{R}_0^+$$

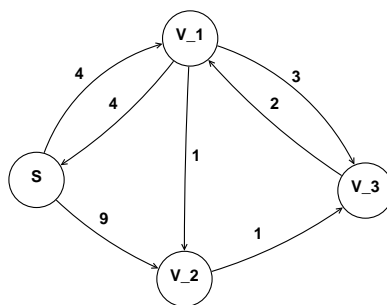


Abbildung 22.4.

Sei $p = (s = v_0, v_1, v_2, \dots, v_k)$



Abbildung 22.5.

$$w(p) = \sum_{i=0}^{k-1} w(v_i, v_{i+1}) = \delta(s, v_k)$$

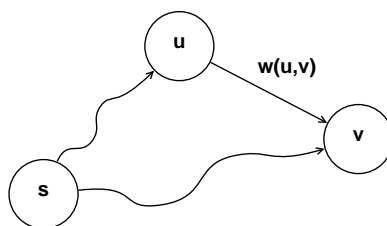


Abbildung 22.6.

$$\delta(s, v) \leq \delta(s, u) + w(u, v)$$

```

1 relax(u,v,w) {
2   if(d[v] > d[u]+w(u,v) ) {
3     d[v] = d[u] + w(u,v);
4     Π[v] = u;
5   }
6 }
```


Betrachte Algorithmen zur kürzesten Wege Berechnung, die Distanzwerte nur mit Hilfe dieser relax-Funktion verändern, dann gilt:

$$d[v] \geq \delta(s, v) \quad \forall v \in V$$

Beweis

$$d[v] = d[u] + w(u, v) \stackrel{I.A.}{\geq} \delta(s, u) + w(u, v) \geq \delta(s, v)$$

Induktion über Zahl der reflex-Aufrufe

23. Vorlesung

Dijkstra Algorithmus (Fortsetzung)

$$G = (V, E) \quad w : E \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$$

```
1  forall (v ∈ V) {
2    d[v] = ∞;
3    Π[v] = NULL;
4  }
5  d[s] = 0;
6  S = ∅;
7  PriorityQueue PQ;
8  forall (v ∈ V)
9    PQ.insert((d[v], v));
10 while (!PQ.empty()) {
11   u = PQ.deleteMin();
12   forall ( (u, v) ∈ E ) {
13     if ( d[v] > d[u] + w(u, v) ) {
14       d[v] = d[u] + w(u, v);
15       Π[v] = u;
16       PQ.decreaseKey((d[v], v));
17     }
18   }
19   S = S ∪ {u};
20 }
```

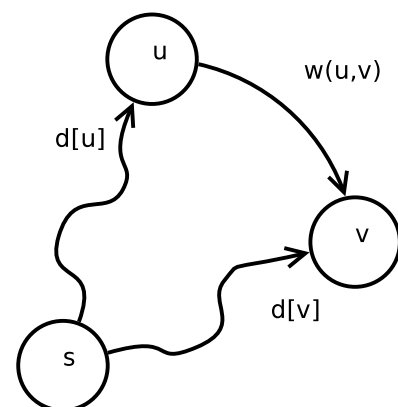


Abbildung 23.1.

Satz: Der Dijkstra Algorithmus berechnet alle d-Werte, so dass nach Ablauf des Algorithmus $\forall v \in V$ gilt: $d[v] = \delta(s, v)$.

Beweis:

Annahme:

$$\exists v \in V : d[v] \neq \delta(s, v)$$

$$\xRightarrow{\text{LemmaRelax}} d[v] > \delta(s, v)$$

Sei v so gewählt, dass v der erste Knoten mit der Eigenschaft ist, der mit deleteMin der PQ entnommen wird und nach Relaxation aller von ihm ausgehenden Kanten der Menge S hinzugefügt wird.

Betrachte einen kürzesten Weg $s \rightsquigarrow v$

$$d[v] > \delta(s, v) \geq \text{I} \delta(s, y) = d[y] = \text{II} d[x] + w(x, y) = d[y] \geq \text{III} d[v] \quad \nlessdot$$

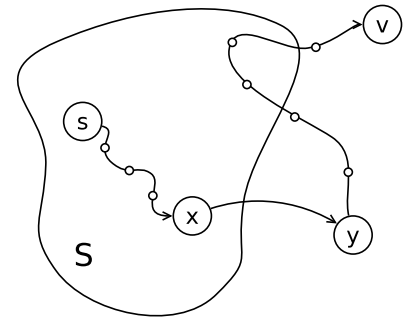


Abbildung 23.2.: Skizze

23.0.1. Vorläufige Laufzeitanalyse von Dijkstra

PQ.insert	x	V
PQ.empty	x	V
PQ.deleteMin	x	V
PQ.decreaseKey	x	E

Mit balanciertem Suchbaum oder mit binärem Heap (siehe 2) können diese Operationen alle in Zeit $\mathcal{O}(\log |V|)$ realisiert werden. \Rightarrow Gesamtlaufzeit: $\mathcal{O}((|V| + |E|) \log |V|)$

Wir werden später zeigen, dass eine Laufzeit von $\mathcal{O}(|V| \log |V| + |E|)$ möglich ist.

23.1. Bellman-Ford-Algorithmus

$$G = (V, E) \quad w : E \rightarrow \mathbb{R}$$

Voraussetzung G enthält keine negativen Zyklen

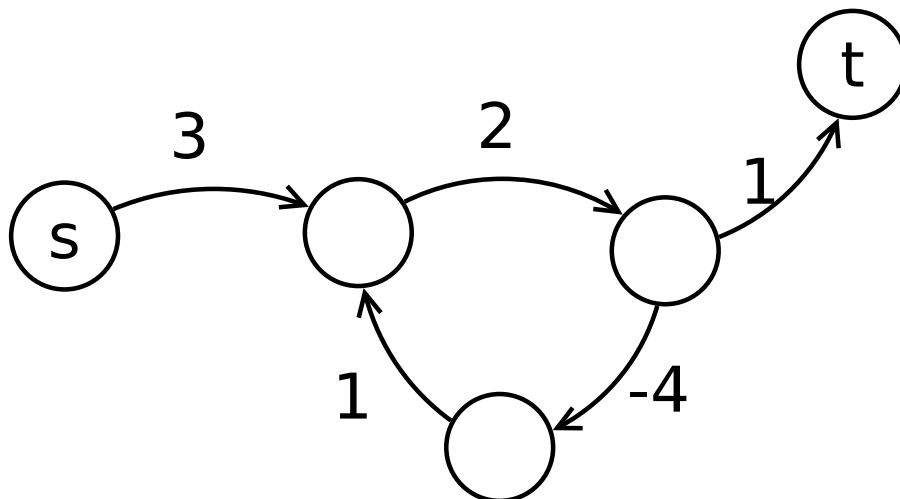


Abbildung 23.3.: Ein verbotener, negativer Zyklus

^Iweil Kantengewichte nicht negativ sein dürfen

^{II} x wurde schon zu S hinzugefügt, hat also korrekten d -Wert $d[x] = \delta(s, x)$

^{III}weil v vor y aus der PQ entnommen wird.

23. Vorlesung

23.1.1. Pseudocode

```
1 forall(v ∈ V) {
2     d[v] = ∞;
3     Π[v] = NULL;
4 }
5 d[s] = 0;
6 for(i = 1; i < |V|; i++)
7     forall((u,v) ∈ E)
8         if( d[v] > d[u] + w(u,v) ) {
9             d[v] = d[u] + w(u,v);
10            Π[v] = u;
11        }
```

23.1.2. Laufzeit: Bellman-Ford

$$\mathcal{O}(|V| \cdot |E|)$$

23.1.3. Korrektheitsbeweis: Bellman-Ford

Invariante: Nach den i -ten Schleifendurchlauf sind alle Kürzesten Wege korrekt berechnet, die $\leq i$ Kanten benutzen.

Beweis: Induktion über i

Induktionsanfang

$i = 0$ $d[s] = 0 = \delta(s, s)$, da keine negativen Zyklen vorliegen.

23.1.4. Induktionsschritt: $i \rightarrow i + 1$

Betrachte kürzesten Weg mit $i + 1$ Kanten:

$$s = v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_i \rightarrow v_{i+1}$$

Aufgrund der Induktionsannahme^{IV} gilt: $d[v_i] = \delta(s, v_i)$, weil $s = v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow \dots \rightarrow v_i$ ein kürzester Weg $s \rightsquigarrow v_i$ mit i Kanten ist. Da alle Kanten in der inneren Schleife einmal relaxiert werden, trifft dies insbesondere auf die Kante (v_i, v_{i+1}) zu:

$$d[v_{i+1}] = d[v_i] + w(v_i, v_{i+1}) = \delta(s, v_i) + w(v_i, v_{i+1}) = \delta(s, v_{i+1})$$

Frage: Warum folgt aus der Gültigkeit dieser Invariante die Korrektheit des Algorithmus?

Antwort Alle kürzesten Wege benutzen höchstens $|V| - 1$ Kanten, ansonsten hätten sie einen Zyklus mit Gewicht ≥ 0 , den man auch weglassen kann.

```
1 //Erkennung der Existenz negativer Zyklen
2 forall((u,v) ∈ E)
3     if(d[v] > d[u] + w(u,v))
4         negativer Zyklus
```

^{IV}Die Invariante

24. Vorlesung

24.1. All-Pairs-Shortest Path Algorithmen

Distanzmatrix D für einen Graphen $G = (V, E)$ $V = v_1, v_2, \dots, v_n$, $w : E \mapsto \mathbb{R}$

$$d_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{für } i = j \\ w(v_i, v_j) & \text{für } (v_i, v_j) \in E \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

$$D = (d_{ij})_{\substack{i=1,\dots,n \\ j=1,\dots,n}} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

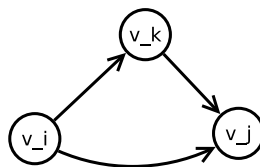


Abbildung 24.1.: Grafik

$$d_{ij}^{(2)} = \min(d_i^{(1)} j, \min_{k=1,\dots,n} (d_{ik}^{(1)} + d_k^{(1)} j))$$

$$D^{(2)} = D^{(1)} \circ D^{(1)} = \min(d_{ik}^{(1)} + d_k^{(1)} j)$$

Vergleich zu Matrixmultiplikation

$$C = A \circ B, \text{ mit } A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{kj}$$

im Ring $(\mathbb{R}, +, \cdot)$

$$C_{ij} = \left(\sum_{k=1,\dots,n} A_{ik} + B_{kj} \right)$$

Kommutativgesetz

$$\min(\min(a, b), c) = \min(a, b, c)$$

im „Ring“¹ $(\mathbb{R}, \min, +)$

Distributivgesetz

$$a + \min(b, c) = \min(a + b, a + c)$$

¹der keiner ist

24. Vorlesung

Assoziativgesetz

$$A \circ (B \circ C) = (A \circ B) \circ C$$

Ziel: $D^{(n)\text{II}} = D^{(1)} \circ D^{(1)} \circ \dots \circ D^{(1)}$

Es gilt: $D^{(n)} = D^{(n+m)}$ für $m \geq 1$

24.1.1. Laufzeit zur Berechnung von $D^{(n)}$

Naiv: $\mathcal{O}(n^4)$

$$D^{(2)} = D^{(1)} \circ D^{(1)}$$

$$D^{(4)} = D^{(2)} \circ D^{(2)}$$

$$D^{(8)} = D^{(4)} \circ D^{(4)}$$

\vdots

$$D^{(2^i)} = D^{(2^{i-1})} \circ D^{(2^{i-1})}$$

Schrittzahl i so wählen, dass $2^i \geq n$

sukzessives Quadrieren: $\mathcal{O}(n^3 \log n)$

24.2. Floyd-Warshall-Algorithmus

```
1  for (k = 1; k ≤ n; k++)
2    for (i = 1; i ≤ n; i++)
3      for (j = 1; j ≤ n; j++)
4        d[i][j] = min(d[i][j], d[i][k] + d[k][j])
```

Laufzeit $\mathcal{O}(n^3)$

24.2.1. Korrektheitsbeweis:

Invariante Nach dem k -ten Schleifendurchlauf entspricht d_{ij} der Weglänge eines kürzesten Weges p von v_i nach v_j , wobei nur Zwischenknoten erlaubt sind, mit Index $\leq k$

$$p : v_i \rightarrow v_{l_1} \rightarrow v_{l_2} \rightarrow \dots \rightarrow v_{l_m} \rightarrow v_j$$

d.h. $1 \leq l_1, l_2, \dots, l_m \leq k$

^{II}In der Potenz stehen die Anzahl der betrachteten Kanten. n entspricht allen Kanten

24.2.2. Beweis der Invariante durch Induktion nach k

$k = 0$: Nach der Initialisierung von D , also vor dem 1. Schleifendurchlauf, gilt obige Invariante.

$k - 1 \rightarrow k$:

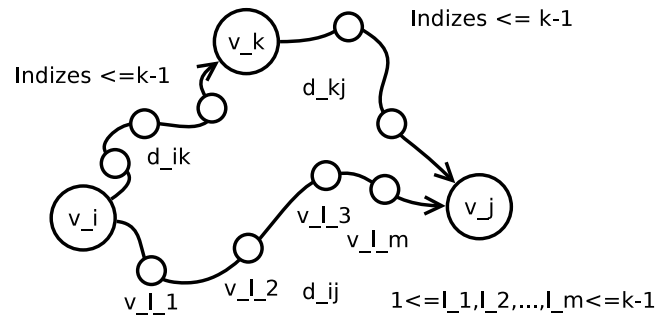


Abbildung 24.2.: Beweis der Invariante

Durch die Operation $d_{ij} = \min(d_{ij}, d_{ik} + d_{kj})$ wird die Invariante sichergestellt.

24.3. Naive Lösung des All-Pairs Problems durch $|V|$ -malige Anwendung von Bellman-Ford oder Dijkstra-Algorithmus

Bellman-Ford $\mathcal{O}(|V| \cdot |V| \cdot |E|) = \mathcal{O}(|V|^2 \cdot |E|)$

Dijkstra $\mathcal{O}(|V| \cdot (|V| \cdot \log |V| + |E|)) = \mathcal{O}(|V| \cdot |E| + |V|^2 \cdot \log |V|)$

24.4. Johnson-Algorithmus

Idee: Neugewichtung der Kanten, so dass keine negativen Kantengewichte mehr vorhanden sind. Anschließend $|V|$ -mal Dijkstra-Algorithmus ausführen.

Naiver Ansatz

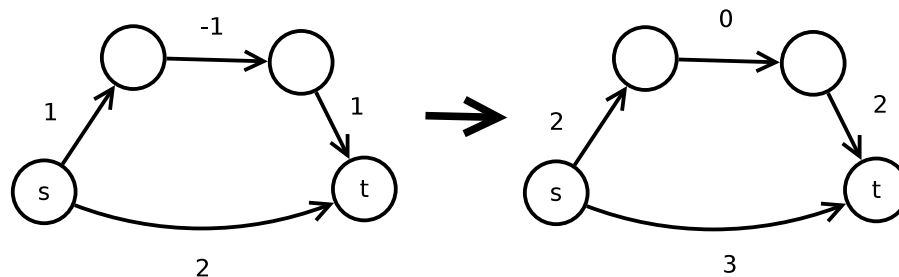


Abbildung 24.3.: Naiver Ansatz, kürzester Weg wird zerstört

Neuer Ansatz

$$w'(u, v) = \text{pot}^{\text{III}}(u) - \text{pot}(v) + w(u, v) \geq 0$$

Mit dieser Neugewichtung gilt, dass kürzeste Wege bzgl. w den kürzesten Wegen bzgl. w' entsprechen.

$$p : s = v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots v_i \rightarrow v_{i+1} \rightarrow \dots v_k = t$$

$$w'(p) = \sum_{i=0}^{k-1} w'(v_i, v_{i+1}) = \sum_{i=0}^{k-1} [\text{pot}(v_i) - \text{pot}(v_{i+1}) + w(v_i, v_{i+1})]$$

$$\stackrel{\text{Teleskopsumme}}{=} \text{pot}(v_0) - \text{pot}(v_k) + \sum_{i=1}^{k-1} w(v_i, v_{i+1}) = \text{pot}(s) - \text{pot}(t) + w(p)$$

d.h. Alle kürzesten Wege $s \rightsquigarrow t$ unterscheiden sich bzgl. w' im Vergleich zu w nur um eine feste additive Konstante $\text{pot}(s) - \text{pot}(t)$

$$\text{pot}(u) - \text{pot}(v) + w(u, v) \geq 0$$

$$\text{pot}(v) \leq \text{pot}(u) + w(u, v)^{\text{IV}}$$

$$\text{pot}(v) = \delta(z, v)$$

$$G' = (V', E') \quad V' = V \cup z, E' = E \cup (z, v) | v \in V \quad \text{mit } w'(z, v) = 0$$

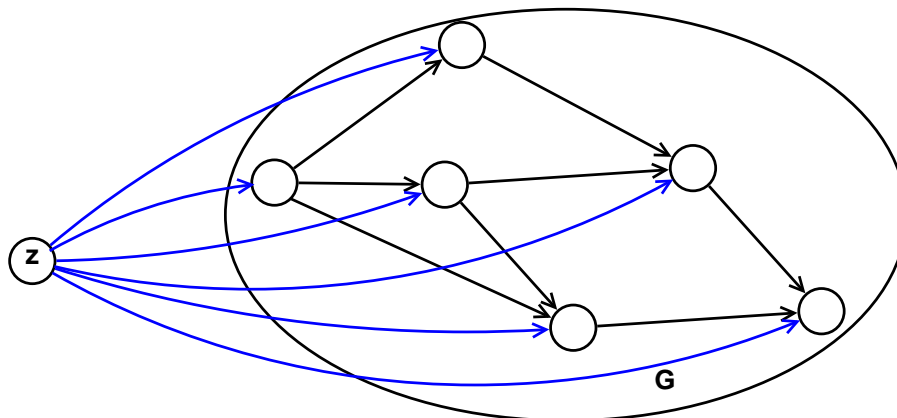


Abbildung 24.4.: Die blau markierten Kanten haben die Länge 0

- Löse single-source-shortest-Path Problem in G' mit z als Startknoten
- setze $\text{pot}(v) = \delta_{G'}(z, v)^{\text{V}}$
- Neugewichtung
- $|V|$ -mal Dijkstra

24.4.1. Laufzeit des Johnson-Algorithmus

$$\mathcal{O}(|V| \cdot |E| + |V| \cdot (|V| \cdot \log |V| + |E|)) = \mathcal{O}(|V| \cdot |E| + |V|^2 \cdot |V|)$$

^{III}Potentialfunktion

^{IV}Dreiecksungleichung

^Vberechnet mit Bellman-Ford

25. Vorlesung

25.1. Minimal aufspannende Bäume MST

Eingabe

$G = (V, E)$ E ungerichtet $(u, v) \in E \Rightarrow (v, u) \in E$ mögliche Notation $\{u, v\}$

$w : E \rightarrow \mathbb{R}$

Gesucht

Baum $T \subseteq E$

$G_T = (V, T)$ zusammenhängend (zyklfrei)

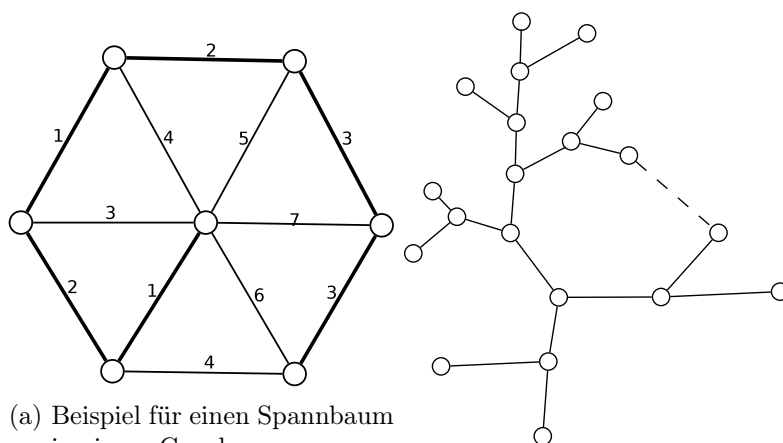
$$w(T) = \sum_{e \in T} w(e) \text{ minimal}$$

Frage $|T| = ?$

Antwort $|T| = |V| - 1$

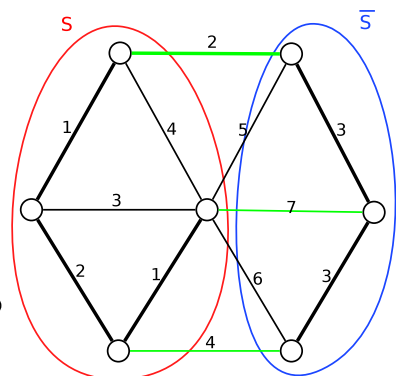
25.1.1. Greedy-Algorithmen zur Lösung des MST-Problems:

Starte mit $T = \emptyset$, nehme sukzessive Kanten zu T hinzu, so dass nach $|V| - 1$ Schritten der gesuchte MST entstanden ist. Dabei benötigen wir ein Kriterium, das sicherstellt, dass gewählte Kanten zur Gesamtlösung dazugehören.



(a) Beispiel für einen Spannbaum in einem Graphen

(b) Beispiel für einen Spannbaum



(c) Grün markiert sind alle Kanten, die von S nach \bar{S} verlaufen. Wähle die Kante mit dem kleinsten Gewicht, also 2, aus.

25.1.2. Schnitt-Lemma:

Betrachte eine Aufteilung (Schnitt) der Knotenmenge V in S und $\bar{S} = V \setminus S$

und Kanten $(u, v) \in E \cap S \times \bar{S}$

Sei $e \in E \cap S \times \bar{S}$ mit $w(e) \leq w(e') \forall e' \in E \cap S \times \bar{S}$ dann gibt es einen MST mit $e \in \text{MST}$

25.1.3. Beweis für das Schnitt-Lemma

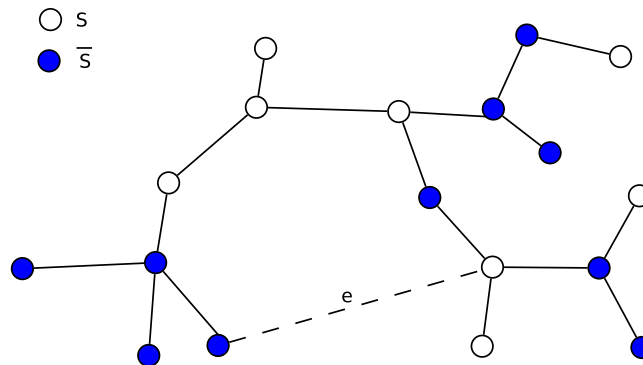


Abbildung 25.2.

Sei e eine „sichere“ Kante aus dem Schnitt-Lemma.

o.B.d.A. $u \in S$ und $v \in \bar{S}$.

Es gibt einen Zykel in $T \cup \{e\}$ und darin eine Kante $e' \in S \times \bar{S}$ mit $w(e') \geq w(e)$.

Ersetze $T' = T \cup \{e\} \setminus \{e'\}$

$w(T') \leq w(T) \Rightarrow w(T') = w(T)$ weil T ein MST.

q.e.d.

25.1.4. Algorithmus von Kruskal

sortiere Kanten nach ihrem Gewicht aufsteigend

$T = \emptyset$

```

1 forall (u,v) ∈ E in sortierter Reihenfolge {
2     if (find(u) == find(v)) continue;
3     T = T ∪ {(u,v)};
4     union(u,v);
5 }
```

Effizienz von Kruskal

Sortieren: $\mathcal{O}(|E| \cdot \log |E|) = \mathcal{O}(|E| \log |V|)$

$2|E|$ viele find-Operationen $\mathcal{O}(1)$

$|V| - 1$ viele union-Operationen $\mathcal{O}(|V|)$ naiv

$\mathcal{O}(|E| \log |V| + |E| \cdot 1 + (|V| - 1)|V|) =$

$\mathcal{O}(|E| \log |V| + |V|^2)$

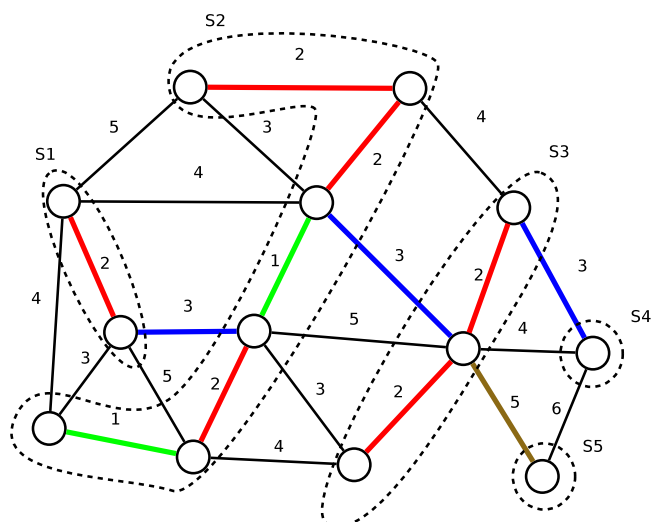


Abbildung 25.3.: Reihenfolge
grün → rot → blau → braun

Idee zum Aufbau einer Union-Find-Datenstruktur

Jeder Knoten trägt eine Komponentennummer, die in einem Feld vermerkt ist. Die find-Operation ist durch einen Feld-Zugriff realisierbar. Um die union-Operation zu realisieren, verwalten wir die Knoten einer Komponente in einer einfach verketteten Liste und merken uns die Listenlänge. Wenn zwei Komponenten fusionieren, benennen wir die Komponente mit der kleineren Knotenzahl um, indem wir die zugehörige Liste durchlaufen und die Umbenennung im Feld vornehmen. Und die beiden betroffenen Listen müssen konkateniert werden.

Beobachtung: Ein einzelner Knoten erfährt höchstens $\log |V|$ viele Umbenennungen seiner Komponentennummer, da sich bei jeder Umbenennung die Größe der Komponente zu der er gehört, verdoppelt.

26. Vorlesung

26.0.1. Einfache Union-Find-Datenstruktur

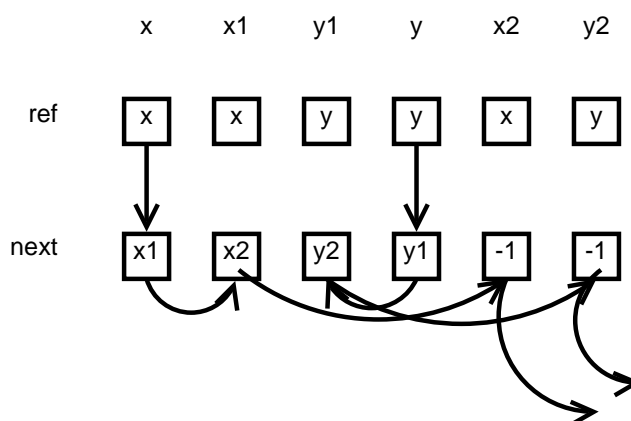
	0	1	2	...	$n-1$
ref	0	1	2	...	$n-1$
size	1	1	1	...	1
next	-1	-1	-1	...	-1

$n = |V|$

```

1  class Partition
2      int[] ref, size, next;
3      Partition(int n) {
4          ref = new int[n];
5          size = new int[n];
6          next = new int[n];
7          for (int i = 0; i < n; i++) {
8              ref[i] = i;
9              size[i] = 1;
10             next[i] = -1;
11         }
12     }
13     int find(int v) {
14         return ref[v];
15     }
16     void union(int u, int v) {
17         int x = ref[u];
18         int y = ref[v];
19
20         if (size[x] > size[y]) {
21             x = ref[v];
22             y = ref[u];
23         }
24         int h = next[y];
25         next[y] = x;
26         int z = y;
27         while (next[z] ≥ 0) {
28             z = next[z];
29             ref[z] = y;
30         }
31         next[z] = h;
32         size[y] = size[y] + size[x];
33     }

```

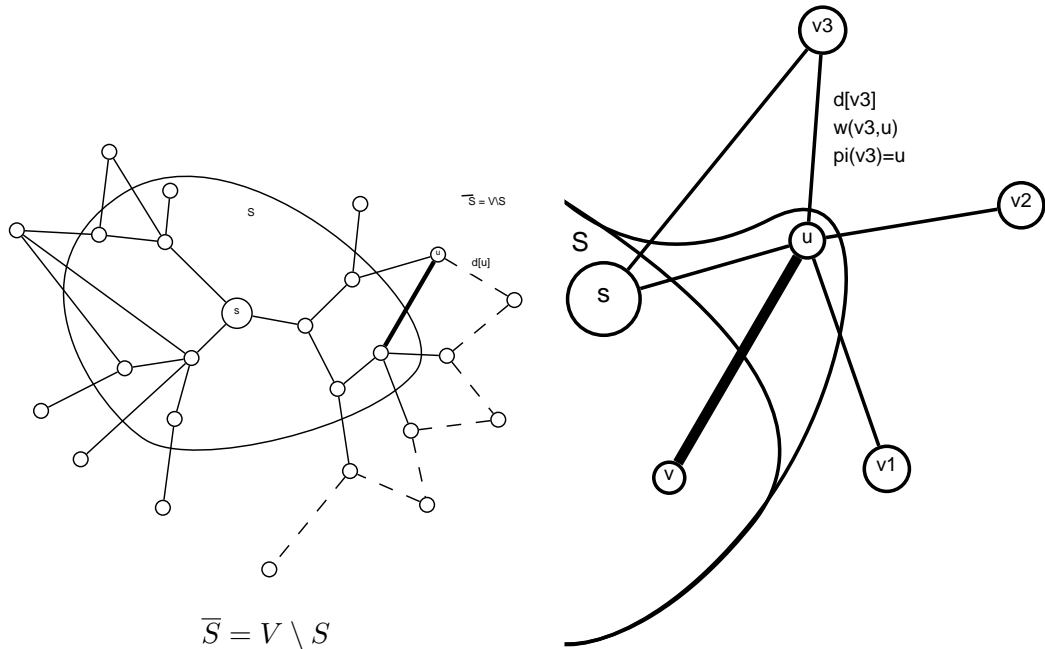


Laufzeit Kruskal

$$O(|E| \cdot \log |V| + |E| + |V| \cdot \log |V|)$$

$$O(|E| \cdot \log |V|)$$

26.0.2. Prim-Algorithmus zur Berechnung eines MST



$$T = T \cup \{(u, v)\}$$

$$T_{MST} = \{(v, \pi(v)) \mid v \in V \setminus \{s\}\}$$

```

1  PriorityQueue PQ;
2  forall(v ∈ V) {
3      d[v] = ∞;
4      π[v] = NULL;
5      inTree[v] = false;
6      PQ.insert(v, d[v]);
7  }
8  d[s] = 0;
9  PQ.decreaseKey(s, d[s]); //  $\bar{S} \triangleq PQ$ 
10 T = ∅ //  $S \triangleq \{v \in V \mid \text{inTree}[v] = \text{true}\}$ 
11 while(!PQ.empty()) {
12     u = PQ.deleteMin();
13     forall((u, v) ∈ E) {
14         if(inTree[v] == true) continue;
15         if(d[v] > w(u, v)) {
16             d[v] = w(u, v);
17             π[v] = u;
18             PQ.decreaseKey(v, d[v]);
19         }
20     }
21     inTree[u] = true;
22     T = T ∪ (u, v); //  $T = T \cup \{(u, \pi[u])\}$  u ≠ s
23 }
```

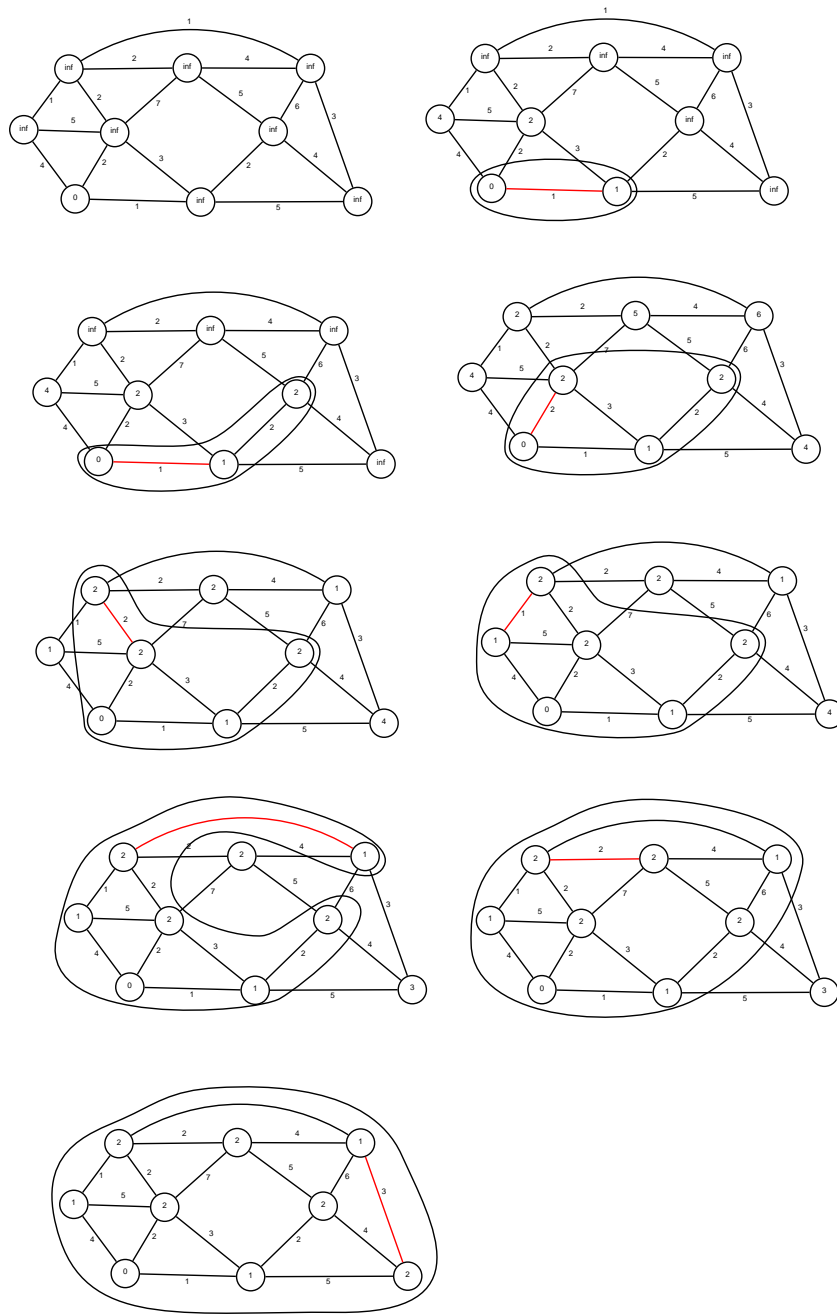
Korrektheit des Prim-Algorithmus

Korrektheit von Prim folgt unmittelbar aus dem Schnitt-Lemma, denn der Algorithmus stellt sicher, dass stets eine Kante gewählt wird, die mit minimalem Gewicht über den Schnitt (S, \overline{S}) führt. ■

Laufzeit des Prim-Algorithmus

$ V \times \text{PQ.insert}$	$\mathcal{O}(1)$	In Summe $\mathcal{O}(E + V \cdot \log V)$
$ V \times \text{PQ.empty}$	$\mathcal{O}(1)$	
$ V \times \text{PQ.deleteMin}$	$\mathcal{O}(\log V)$	
$ E \times \text{PQ.decreaseKey}$	$\mathcal{O}(1)$	

26.0.3. Beispiel des Prim-Algorithmus:



- insert
- deleteMin
- decreaseKey

Idee Für jeden Knoten wird gelten, dass die Zahl aller Nachfahren $\geq \Phi^k$ k = Knotengrad

Insert

Einzelner Knoten wird einfach in die Wurzelliste gehängt und Minimum wird aktualisiert.

DeleteMin

Lösche den Minimumsknoten und übernehme alle seine Kindknoten in die Wurzelliste. Konsolidiere anschließend die Wurzelliste. Nach dem Konsolidieren hat die Wurzelliste nur noch eine „kleine“ Länge und wir bestimmen das neue Minimum durch einen Durchlauf durch diese Liste.

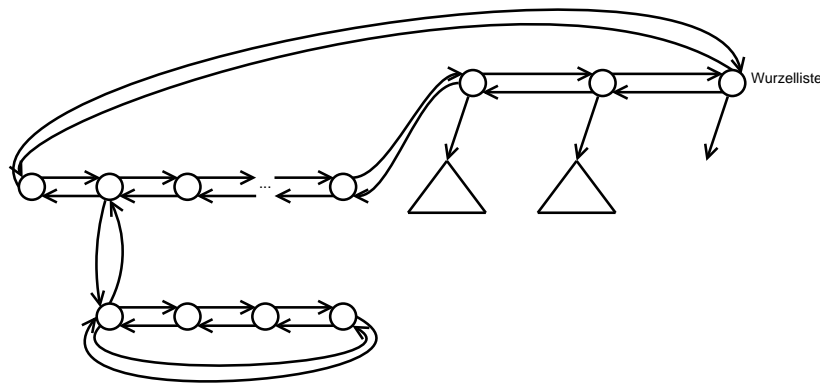


Abbildung 27.3.: DeleteMin-Operation

decreaseKey

Wir können davon ausgehen, dass wir den betroffenen Knoten kennen. Falls der erniedrigte Schlüssel des Knotens kleiner als der Schlüssel des Vaterknotens wird, lösen wir den Knoten aus der Kindliste des Vaters und setzen ihn in die Wurzelliste. Wir markieren den Vater, dass er einen Kindknoten verloren hat. Sollte der Vater schon eine Markierung tragen, so wird auch der Vater Knoten abgelöst und in die Wurzelliste gesetzt. Dieser Prozess kann sich kaskadenartig bis zur jeweiligen Wurzel fortsetzen. Bei Aufnahme eines abgelösten Knotens in die Wurzelliste, muss auch das Minimum aktualisiert werden.

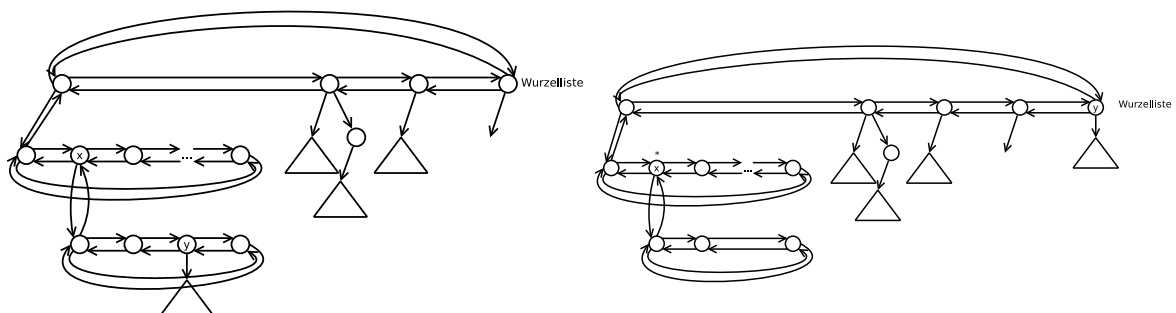


Abbildung 27.4.: decreaseKey-Operation

Konsolidierung der Wurzelliste

Nach dem „Lazy Evaluation“-Prinzip wird dieser Vorgang nur nach einem **deleteMin** angestoßen, um die Wurzelliste zu verkürzen. Wir nutzen ein einfaches Feld hinreichender Größe, um temporär Knoten, entsprechend ihren Grades, zu verwalten. Wir durchlaufen die Wurzelliste. Wenn wir einen Knoten vom Grad k antreffen, schreiben wir ihn in das Feld an Position k bzw. verschmelzen ihn mit dem Knoten von Grad k , den wir dort antreffen. Dadurch entsteht gegebenenfalls ein neuer Knoten vom Grad $k + 1$ der an Position $k + 1$ im Feld zu setzen ist. Es kann also zu weiteren Fusionsoperationen kommen. Analogie zu der Übertragungsfortpflanzung beim Binärzähler.

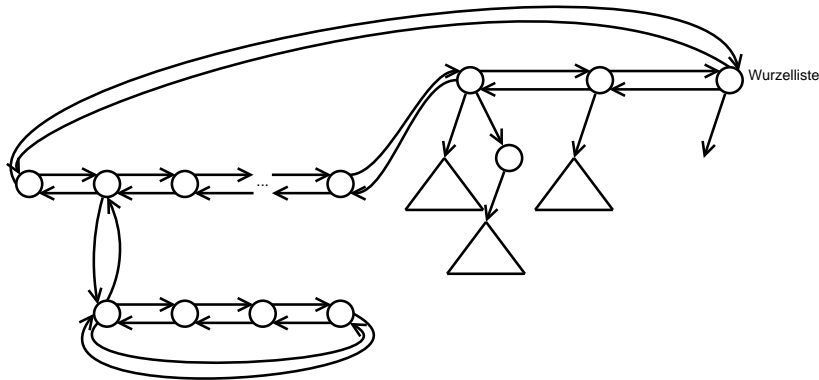


Abbildung 27.5.: Konsolidierungs-Operation

28. Vorlesung

28.1. Priority-Queue mittels Fibonacci-Heaps (Fortsetzung)

28.1.1. Lemma

Für jeden Knoten x in einem Fibonacci-Heap gilt, dass die Zahl aller Knoten im Unterbaum von x mindestens Φ^k beträgt, wobei $k = \text{grad}(x)$.

28.1.2. Beweis

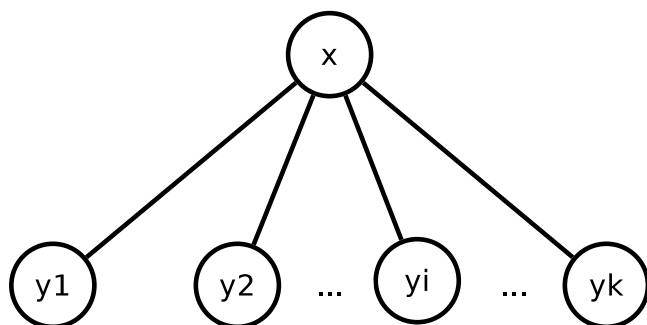


Abbildung 28.1.: Schaubild zum Beweis

Seien y_1, y_2, \dots, y_k die aktuellen Kindknoten von x , nummeriert in der Reihenfolge, wie sie (letztendlich) Kindknoten von x geworden sind. Zum Zeitpunkt, zu dem y_i Kindknoten von x geworden ist, existieren bereits die $i - 1$ Kindknoten y_1, y_2, \dots, y_{i-1} . $\Rightarrow \text{grad}(x) \geq i - 1$
 y_i kann nur Kind von x werden, wenn x und y_i gleichen Grad haben. $\Rightarrow \text{grad}(y_i) \geq i - 1$
 Da y_i im Folgenden höchstens einen Kindknoten verlieren kann, gilt:

$$\text{grad}(y_i) \geq i - 2$$

Sei S_k die Mindestanzahl von Knoten in einem Unterbaum eines Knoten x vom Grad k

$$S_k \geq 1 + 1 + \sum_{i=2}^k S_{i-2}$$

Wir zeigen

$$S_k \stackrel{(2)}{\geq} f_{k+2} \stackrel{(1)}{\geq} \Phi^k$$

(1)

$$f_{k+2} \geq \Phi^k$$

f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	\dots
0	1	1	2	3	5	

$$k = 0 : f_2 = 1 \geq \Phi^0 = 1$$

$$k = 1 : f_3 = 2 \geq \Phi^1 = 1,6181\dots$$

$$f_{k+2} = f_{k+1} + f_k \geq \Phi^{k-1} + \Phi^k - 2 = {}^{\text{II}}\Phi^k - 2(\Phi + 1) = \Phi^k - 2 \dots \Phi^2 = \Phi^k$$

^I $k - 2$ -te Fibonacci Zahl

^{II} $\Phi^2 = \Phi + 1$

(2)

$$S_k \geq f_{k+2}?$$

$$S_k \geq 2 + \sum_{i=2}^k S_{i-2}$$

$$k = 0 : S_0 \geq f_2 = 1 \quad \checkmark$$

$$k = 1 : S_1 \geq f_3 = 2 \quad \checkmark$$

$$S_k \geq 2 + \sum_{i=2}^k f_i, \text{ da wegen Induktions-Annahme } S_{i-2} \geq f_{(i-2)+2} = f_i \text{ f\"ur } i < k$$

Zu zeigen:

$$2 + \sum_{i=2}^k f_i \geq f_{k+2}$$

Es gilt:

$$1 + \sum_{i=1}^k f_i = f_{k+2}$$

$$k = 0 : 1 = f_2 \quad \checkmark$$

$$k = 1 : 1 + f_1 = f_3 = 2 \quad \checkmark$$

$$1 + \sum_{i=1}^{k+1} f_i = (1 + \sum_{i=1}^k f_i) + f_{k+1} = f_{k+2} + f_{k+1} = f_{k+3}$$

q.e.d.

Aus dem Lemma folgt, dass in einem Fibonacci-Heap für n^{III} Elemente zu keinem Zeitpunkt ein Knoten vom Grad $\log_{\phi} n = k$ auftauchen kann. Insbesondere ist die Wurzelliste nach einer Konsolidierung auch nur $\log_{\phi} n$ lang, weil dort nur Knoten unterschiedlichen Grades auftauchen.

 $^{\text{III}}\Phi^k \leq n$

28.1.3. Satz

Mit einem Fibonacci-Heap lassen sich die Operationen `insert`, `deleteMin` und `decreaseKey` mit folgenden amortisierten Kosten realisieren:

`insert` $\mathcal{O}(1)$
`deletemin` $\mathcal{O}(\log n)$
`decreaseKey` $\mathcal{O}(1)$

28.1.4. Beweis

Wir verwenden die Bankkonto-Methode zur amortisierten Analyse nach folgendem Schema:

Jeder Knoten in der Wurzelliste wird mit einer RE^{IV} bespart und jeder markierte Knoten der einen Kindknoten verloren hat wird mit 2 RE bespart.

Bemerkung Wurzelknoten tragen keine Markierung, obwohl sie eventuell Kindknoten verloren haben.

Wir zeigen nun, dass die oben genannten Kosten für die einzelnen Operationen ausreichen, damit im gesamten Verlauf das Kontoführungsschema, ohne Schulden machen zu müssen, aufrecht erhalten werden kann.

`insert` Einfügen in Wurzelliste +1RE Investition $\in \mathcal{O}(1)$

`deleteMin` Alle Kindknoten des gelöschten Knotens wandern in die Wurzelliste.

Dafür müssen wir $\log_{\phi} n$ viele RE investieren. Die Konkatenation der doppelt verketteten Listen kostet nur konstante Zeit. Der ganze Konsolidierungsprozess kann bezahlt werden durch die RE auf den Wurzelknoten. Die anschließende Minimumsuche kostet nur $\mathcal{O}(\log n)$, weil die Wurzelliste höchstens $\log_{\phi} n$ viele Elemente hat.

`decreaseKey`

Behauptung Es genügen 4 RE pro Operation
 Vorgehensweise:

- 1RE für die Aufnahme eines abgelösten Knotens in die Wurzelliste
- 2RE für die Markierung des Vaterknotens
- 1RE für „sonstige“ konstante Kosten(Pointeraktualisierungen).

Ein Vaterknoten, der schon markiert ist, hat aufgrund der Gültigkeit der Bankkontoführung schon 2RE und bekommt vom abgelösten Kindknoten noch 2 RE. Damit hat er 4RE für seine eigene Ablösung zur Verfügung. Dieses Schema lässt sich also fortsetzen und die Kosten einer Ablösekaskade lassen sich damit decken.

q.e.d.

^{IV}Rechen Einheit

Abbildungsverzeichnis

1.1. Bubblesort	2
2.1. Heapsort (Ausgangssituation)	4
2.2. Indices	4
2.3. Heap-Eigenschaft	4
8.1. Fibonacci-Zahlen	19
9.1. Quicksort	22
9.2.	23
10.1. Aufruf von Partition	25
13.1. Median der Mediane	28
14.1. Entscheidungsbaum am Beispiel Bubblesort	29
14.2. Binärerbaum	30
14.3. Induktions-Ansatz	30
16.1. Knotenorientierte Speicherung	33
16.2. Binärer Suchbaum	34
17.1. AVL-Baum	35
17.2.	35
17.3.	37
17.4.	37
19.1. Universum und Hashtabelle der Größe m	43
20.1. Perfekte Hashtabelle	47
21.1. Perfektes Hashing	49
21.2. Gerichteter Graph	51
21.3. Würfel	51
21.4. Placeholder	51
21.5. Beispiel	52
21.6. Adjazenzliste	53
21.7. indeg und outdeg	53
21.8. Grafik zum Beispielcode	54
22.1. Beispiel	55
22.2.	56
22.3.	58
22.4.	58
22.5.	58
22.6.	58

23.1.	60
23.2. Skizze	61
23.3. Ein verbotener, negativer Zyklus	61
24.1. Grafik	63
24.2. Beweis der Invariante	65
24.3. Naiver Ansatz, kürzester Weg wird zerstört	65
24.4. Die blau markierten Kanten haben die Länge 0	66
25.2.	68
25.3. Reihenfolge grün→rot→blau→braun	68
26.2.	73
27.1. Binomial-Bäume	74
27.2. Aufbau	74
27.3. DeleteMin-Operation	75
27.4. decreaseKey-Operation	75
27.5. Konsolidierungs-Operation	76
28.1. Schaubild zum Beweis	77