

22. Gierige (Greedy) Algorithmen

Gebrochenes Rucksack Problem, Huffman Coding [Cormen et al, Kap. 16.1, 16.3]

Das Gebrochene Rucksackproblem

Menge von $n \in \mathbb{N}$ Gegenständen $\{1, \dots, n\}$ gegeben. Jeder Gegenstand i hat Nutzwert $v_i \in \mathbb{N}$ und Gewicht $w_i \in \mathbb{N}$. Das Maximalgewicht ist gegeben als $W \in \mathbb{N}$. Bezeichnen die Eingabe mit $E = (v_i, w_i)_{i=1, \dots, n}$.

Gesucht: Anteile $0 \leq q_i \leq 1$ ($1 \leq i \leq n$) die die Summe $\sum_{i=1}^n q_i \cdot v_i$ maximieren unter $\sum_{i=1}^n q_i \cdot w_i \leq W$.

Gierige (Greedy) Heuristik

Sortiere die Gegenstände absteigend nach Nutzen pro Gewicht v_i/w_i .

Annahme $v_i/w_i \geq v_{i+1}/w_{i+1}$

Sei $j = \max\{0 \leq k \leq n : \sum_{i=1}^k w_i \leq W\}$. Setze

- $q_i = 1$ für alle $1 \leq i \leq j$.
- $q_{j+1} = \frac{W - \sum_{i=1}^j w_i}{w_{j+1}}$.
- $q_i = 0$ für alle $i > j + 1$.

Das ist schnell: $\Theta(n \log n)$ für Sortieren und $\Theta(n)$ für die Berechnung der q_i .

Korrektheit

Annahme: Optimale Lösung (r_i) ($1 \leq i \leq n$).

Der Rucksack wird immer ganz gefüllt: $\sum_i r_i \cdot w_i = \sum_i q_i \cdot w_i = W$.

Betrachte k : kleinstes i mit $r_i \neq q_i$. Die gierige Heuristik nimmt per Definition so viel wie möglich: $q_k > r_k$. Sei $x = q_k - r_k > 0$.

Konstruiere eine neue Lösung (r'_i) : $r'_i = r_i \forall i < k$. $r'_k = q_k$. Entferne Gewicht $\sum_{i=k+1}^n \delta_i = x \cdot w_k$ von den Gegenständen $k + 1$ bis n . Das geht, denn $\sum_{i=k}^n r_i \cdot w_i = \sum_{i=k}^n q_i \cdot w_i$.

Korrektheit

$$\begin{aligned}\sum_{i=k}^n r'_i v_i &= r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n (r_i w_i - \delta_i) \frac{v_i}{w_i} \\ &\geq r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n r_i w_i \frac{v_i}{w_i} - \delta_i \frac{v_k}{w_k} \\ &= r_k v_k + x w_k \frac{v_k}{w_k} - x w_k \frac{v_k}{w_k} + \sum_{i=k+1}^n r_i w_i \frac{v_i}{w_i} = \sum_{i=k}^n r_i v_i.\end{aligned}$$

Also ist (r'_i) auch optimal. Iterative Anwendung dieser Idee erzeugt die Lösung (q_i) .

Huffman-Codierungen

Ziel: Speicherplatzeffizientes Speichern einer Folge von Zeichen mit einem binären *Zeichencode* aus *Codewörtern*.

Huffman-Codierungen

Ziel: Speicherplatzeffizientes Speichern einer Folge von Zeichen mit einem binären *Zeichencode* aus *Codewörtern*.

Beispiel

File aus 100.000 Buchstaben aus dem Alphabet $\{a, \dots, f\}$

	a	b	c	d	e	f
Häufigkeit (Tausend)	45	13	12	16	9	5
Codewort fester Länge	000	001	010	011	100	101
Codewort variabler Länge	0	101	100	111	1101	1100

Huffman-Codierungen

Ziel: Speicherplatzeffizientes Speichern einer Folge von Zeichen mit einem binären *Zeichencode* aus *Codewörtern*.

Beispiel

File aus 100.000 Buchstaben aus dem Alphabet $\{a, \dots, f\}$

	a	b	c	d	e	f
Häufigkeit (Tausend)	45	13	12	16	9	5
Codewort fester Länge	000	001	010	011	100	101
Codewort variabler Länge	0	101	100	111	1101	1100

Speichergrösse (Code fixe Länge): 300.000 bits.

Speichergrösse (Code variabler Länge): 224.000 bits.

Huffman-Codierungen

- Betrachten *Präfixcodes*: kein Codewort kann mit einem anderen Codewort beginnen.

Huffman-Codierungen

- Betrachten *Präfixcodes*: kein Codewort kann mit einem anderen Codewort beginnen.
- Präfixcodes können im Vergleich mit allen Codes die optimale *Datenkompression* erreichen (hier ohne Beweis).

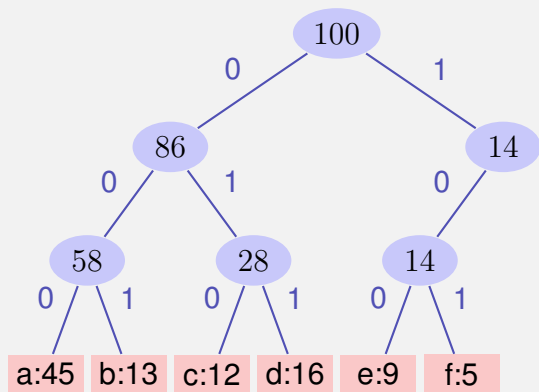
Huffman-Codierungen

- Betrachten *Präfixcodes*: kein Codewort kann mit einem anderen Codewort beginnen.
- Präfixcodes können im Vergleich mit allen Codes die optimale *Datenkompression* erreichen (hier ohne Beweis).
- Codierung: Verkettung der Codewörter ohne Zwischenzeichen (Unterschied zum Morsen!)
 $af fe \rightarrow 0 \cdot 1100 \cdot 1100 \cdot 1101 \rightarrow 0110011001101$

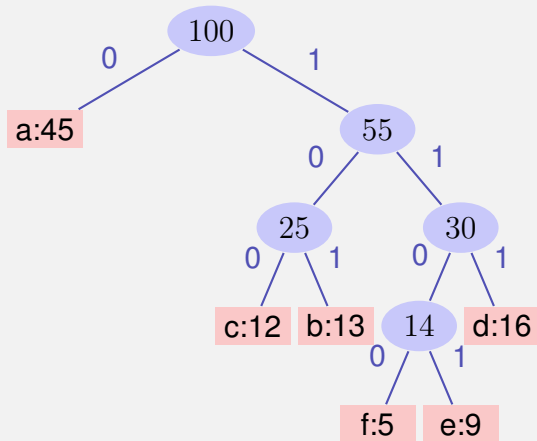
Huffman-Codierungen

- Betrachten *Präfixcodes*: kein Codewort kann mit einem anderen Codewort beginnen.
- Präfixcodes können im Vergleich mit allen Codes die optimale *Datenkompression* erreichen (hier ohne Beweis).
- Codierung: Verkettung der Codewörter ohne Zwischenzeichen (Unterschied zum Morsen!)
 $af fe \rightarrow 0 \cdot 1100 \cdot 1100 \cdot 1101 \rightarrow 0110011001101$
- Decodierung einfach da Präfixcode
 $0110011001101 \rightarrow 0 \cdot 1100 \cdot 1100 \cdot 1101 \rightarrow af fe$

Codebäume



Codewörter fixer Länge



Codewörter variabler Länge

Eigenschaften der Codebäume

- Optimale Codierung eines Files wird immer durch vollständigen binären Baum dargestellt: jeder innere Knoten hat zwei Kinder.

Eigenschaften der Codebäume

- Optimale Codierung eines Files wird immer durch vollständigen binären Baum dargestellt: jeder innere Knoten hat zwei Kinder.
- Sei C die Menge der Codewörter, $f(c)$ die Häufigkeit eines Codeworts c und $d_T(c)$ die Tiefe eines Wortes im Baum T . Definieren die **Kosten** eines Baumes als

$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c) \cdot d_T(c).$$

(Kosten = Anzahl Bits des codierten Files)

Eigenschaften der Codebäume

- Optimale Codierung eines Files wird immer durch vollständigen binären Baum dargestellt: jeder innere Knoten hat zwei Kinder.
- Sei C die Menge der Codewörter, $f(c)$ die Häufigkeit eines Codeworts c und $d_T(c)$ die Tiefe eines Wortes im Baum T . Definieren die **Kosten** eines Baumes als

$$B(T) = \sum_{c \in C} f(c) \cdot d_T(c).$$

(Kosten = Anzahl Bits des codierten Files)

Bezeichnen im folgenden einen Codebaum als optimal, wenn er die Kosten minimiert.

Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.

a:45

b:13

c:12

d:16

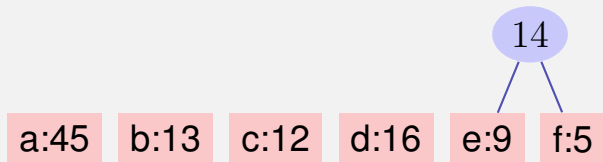
e:9

f:5

Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

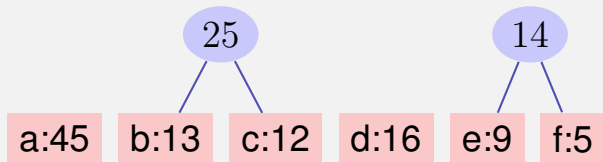
- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

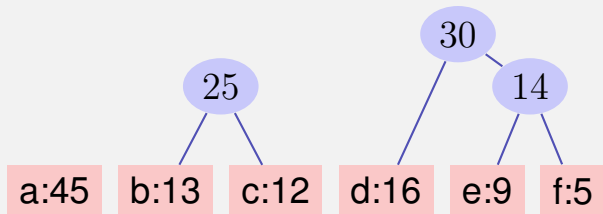
- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

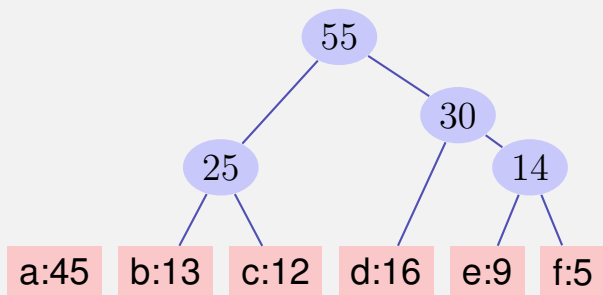
- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

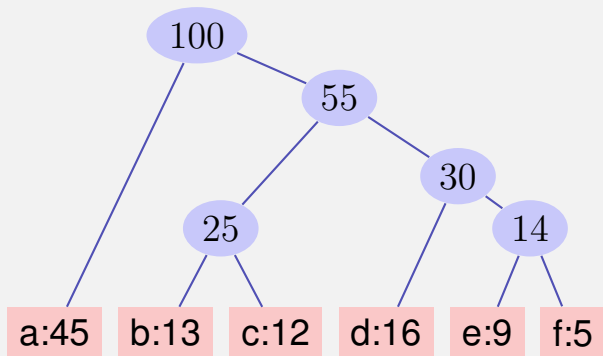
- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



Algorithmus Idee

Baum Konstruktion von unten nach oben

- Starte mit der Menge C der Codewörter
- Ersetze iterativ die beiden Knoten mit kleinster Häufigkeit durch ihren neuen Vaterknoten.



Algorithmus Huffman(C)

Input: Codewörter $c \in C$

Output: Wurzel eines optimalen Codebaums

$n \leftarrow |C|$

$Q \leftarrow C$

for $i = 1$ **to** $n - 1$ **do**

Alloziere neuen Knoten z

$z.\text{left} \leftarrow \text{ExtractMin}(Q)$ // Extrahiere Wort mit minimaler Häufigkeit.

$z.\text{right} \leftarrow \text{ExtractMin}(Q)$

$z.\text{freq} \leftarrow z.\text{left}.\text{freq} + z.\text{right}.\text{freq}$

Insert(Q, z)

return ExtractMin(Q)

Analyse

Verwendung eines Heaps: Heap bauen in $\mathcal{O}(n)$. Extract-Min in $\mathcal{O}(\log n)$ für n Elemente. Somit Laufzeit $\mathcal{O}(n \log n)$.

Das gierige Verfahren ist korrekt

Theorem

Seien x, y zwei Symbole mit kleinsten Frequenzen in C und sei $T'(C')$ der optimale Baum zum Alphabet $C' = C - \{x, y\} + \{z\}$ mit neuem Symbol z mit $f(z) = f(x) + f(y)$. Dann ist der Baum $T(C)$ der aus $T'(C')$ entsteht, indem der Knoten z durch einen inneren Knoten mit Kindern x und y ersetzt wird, ein optimaler Codebaum zum Alphabet C .

Beweis

Es gilt $f(x) \cdot d_T(x) + f(y) \cdot d_T(y) = (f(x) + f(y)) \cdot (d_{T'}(z) + 1) = f(z) \cdot d_{T'}(x) + f(x) + f(y)$. Also $B(T') = B(T) - f(x) - f(y)$.

Annahme: T sei nicht optimal. Dann existiert ein optimaler Baum T'' mit $B(T'') < B(T)$. Annahme: x und y Brüder in T'' . T''' sei der Baum T'' in dem der innere Knoten mit Kindern x und y gegen z getauscht wird. Dann gilt

$$B(T''') = B(T'') - f(x) - f(y) < B(T) - f(x) - f(y) = B(T').$$

Widerspruch zur Optimalität von T' .

Die Annahme, dass x und y Brüder sind in T'' kann man rechtfertigen, da ein Tausch der Elemente mit kleinster Häufigkeit auf die unterste Ebene den Wert von B höchstens verkleinern kann.