



Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Algorithmen und Berechnungskomplexität I

Skript WS 2015/2016

Nach Aufzeichnungen von Rolf Klein, Elmar Langetepe und
Heiko Röglin

Bonn, Oktober 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Algorithmen	1
1.1.1	Anwendungsgebiete	2
1.1.2	Maschinenmodell	4
1.1.3	Algorithmische Paradigmen	4
1.1.4	Analysemethode	5
1.2	Ein einfaches Beispiel: Insertionsort	7
2	Divide-and-Conquer	11
2.1	Sortieren von Zahlenketten, Mergesort	11
2.1.1	Laufzeitanalyse	12
2.1.2	Korrektheit	15
2.1.3	Untere Schranke von Sortieralgorithmen	16
2.2	Closest Pair von n Punkten	17
3	Lösen von Rekursionsgleichungen	21
3.1	Typische Schwierigkeiten	26
4	Dynamische Programmierung	29
4.1	Fibonacci Zahlen	29
4.2	Matrixmultiplikation	32
4.3	Rucksackproblem	37
5	Greedy Algorithmen	41
5.1	Rucksackproblem	42
5.2	Das optimale Bepacken von Behältern	44

5.3	Aktivitätenauswahl	47
6	Datenstrukturen	51
6.1	Stacks	52
6.2	Dynamische Listen	55
6.3	Bäume und Suchbäume	56
6.3.1	Binärbäume und Suchbäume	58
6.4	AVL-Bäume	65
6.4.1	Einfügen eines neuen Knoten	68
6.4.2	Entfernen eines Knoten	76
6.4.3	Sweep	79
6.5	B-Bäume	81
6.6	Mittelwertbildung	85
6.6.1	Amortisierte Kosten: Berechnung der konvexen Hülle	85
6.6.2	Randomisierter Input: Bucketsort	86
6.6.3	Randomisierter Algorithmus: Bestimmung des Maximums	88
6.6.4	Randomisierter Algorithmus: Quicksort	88
6.7	Hashing	90
6.7.1	Kollisionsbehandlung mit verketteten Listen	91
6.8	Union-Find Datenstruktur	95
6.9	Datenstrukturen für Graphen	97
6.9.1	Adjazenzlisten	99
6.9.2	Nachbarschaftsmatrix	102
7	Elementare Graphalgorithmen	103
7.1	Minimale Spannbäume	103
7.1.1	Algorithmus von Kruskal	104
7.2	Kürzeste Wege	109
7.2.1	Single-Source Shortest Path Problem	111
7.2.2	All-Pairs Shortest Path Problem	119
7.3	Flussprobleme	123
7.3.1	Modell	123
7.3.2	Flussvergrößerung durch augmentierende Pfade	125

7.3.3	Das Verfahren von Ford und Fulkerson	127
7.3.4	Der Heiratssatz	131
8	Formale Sprachen und Automaten	135
8.1	Sprachen und Grammatiken	136
8.2	Endliche Automaten	139
8.2.1	Minimierung endlicher Automaten	141
8.2.2	Pumping-Lemma für endliche Automaten	150
8.2.3	Nichtdeterministische endliche Automaten	152
8.3	Reguläre Sprachen, endliche Automaten und reguläre Ausdrücke	155
8.4	Kontextfreie Sprachen	157
8.4.1	Chomsky-Normalform und der Algorithmus von Cocke, Younger und Kasami	159
8.4.2	Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen	164
	Bibliography	167

Kapitel 1

Einführung

In dieser Vorlesung wird die Komplexität von Berechnungsproblemen untersucht und wir werden die dafür notwendigen theoretischen Konzepte entwickeln. Für viele Problemstellungen werden Algorithmen (Lösungspläne) vorgestellt und analysiert.

1.1 Algorithmen

Formal gesehen ist ein *Algorithmus* ein Lösungsplan, der für eine *Probleminstanz* eines definierten Berechnungsproblems die entsprechende *Ausgabe* liefert.

Beispiel: **Sortierproblem**

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

Ausgabe: Eine Permutation π , so dass $(a_{\pi(1)}, a_{\pi(2)}, \dots, a_{\pi(n)})$ eine sortierte Folge der Eingabe ergibt, d.h., $a_{\pi(1)} \leq a_{\pi(2)} \leq \dots \leq a_{\pi(n)}$.

Konkrete Eingabefolgen werden *Instanzen* genannt.

Bezüglich der Algorithmen und der Problemstellung werden wir uns insgesamt zunächst mit drei Begriffen auseinandersetzen:

- **Korrektheit:** Wir wollen für die Algorithmen formal beweisen, dass zu jeder Instanz das richtige Ergebnis berechnet wird.
- **Laufzeitabschätzung:** Wie ist die Laufzeit des Algorithmus in Bezug auf die Eingabegröße n und wie effizient ist der Algorithmus im Vergleich zu anderen möglichen Algorithmen?
- **Speicherplatzabschätzung:** Wieviel Speicher in Bezug auf die Eingabegröße n benötigt der Algorithmus und wie effizient ist das im Vergleich zu anderen möglichen Algorithmen?

Die hier betrachteten Algorithmen sollen mithilfe eines Computers ihre Aufgabe erfüllen, deshalb werden wir uns an gängigen Programmiersprachen orientieren und dazu *Pseudocode* verwenden.

1.1.1 Anwendungsgebiete

Algorithmen spielen in verschiedenen Anwendungsgebieten eine große Rolle. Die Problemstellungen werden durch mathematische Modellierung so formuliert, dass sie durch einen Rechner bearbeitet werden können.

- Human Genome Project: Datenanalyse, DNA-Vergleiche, Matchingalgorithmen, ...
- Internet: Routing, Datenhaltung, Suchmaschinen, Routenplaner, Verschlüsselung, ...
- Industrie: Beladen von Containern, Optimieren von Arbeitsabläufen, ...
- Infrastruktur: Optimieren von Netzen, Umwege minimieren, Kürzeste Wege berechnen/approximieren, ...
- ...

Ein Beispiel aus unserer aktuellen algorithmischen Forschung in Zusammenarbeit mit dem FKIE Wachtberg.

Wir betrachten ein Gebiet, in dem es einen Industrie-Unfall gegeben hat und das von einer Menge von Robotern beobachtet werden soll. Das Gebiet ist durch den Menschen nicht mehr betretbar. Die Roboter haben einen beschränkten Senderadius und sollen den Kontakt untereinander und zur Basisstation halten. Von der Basisstation aus sollen die Roboter zu vorher festgelegten Positionen gefahren werden. Die Positionen und die Wege der einzelnen Positionen zueinander konnten berechnet werden. Damit die Roboter den Kontakt untereinander nicht verlieren, ist es manchmal erforderlich, mehrere Roboter von Position A zu Position B zu bewegen. Für eine Bewegung von A nach B sind somit zum Beispiel mindestens 10 Roboter notwendig.

Die Frage lautet, wieviel Roboter brauchen wir, um von einer Basisstation alle gegebenen Positionen zu besetzen und bei der Bewegung zu gewährleisten, dass die Agenten alle in Kontakt bleiben?

Modellbildung durch einen Graphen $G = (V, E)$ mit ganzzahligen Knotengewichten w_v für $v \in V$ und ganzzahligen Kantengewichten w_e für $e \in E$, ein Startknoten v_s ; siehe Abbildung 1.1.

Folgende Bedingungen:

- Eine Kante e darf nur mit $k \geq w_e$ Agenten traversiert werden.
- Ein Knoten v darf nur mit $k \geq w_v$ Agenten besucht werden.
- Beim ersten Besuch eines Knotens v bleiben w_v Agenten am Knoten zurück.

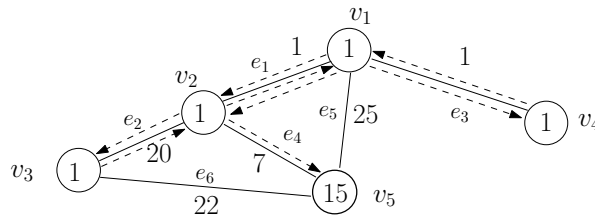


Abbildung 1.1: Falls die Agenten am Knoten v_1 starten, kann eine Tour mit einer minimalen Anzahl an Agenten wie folgt beschrieben werden. 23 Agenten in einer einzelnen Gruppe besuchen Knoten in der Reihenfolge v_1, v_2, v_3, v_4 and v_5 . Die Kanten e_5 and e_6 werden nicht besucht.

Frage: Wieviele Agenten werden benötigt, um alle Knoten v mit w_v Agenten zu füllen? Welchen Weg können die Agenten dabei zurücklegen? Lässt sich ein effizienter Algorithmus formulieren, der dieses Problem für beliebige Instanzen löst?

Die Abbildung zeigt ein Beispiel: Vom festgelegten Basisknoten v_1 aus kommt man mit 23 Agenten aus. Beginnend am Knoten v_1 bleibt zunächst ein Agent zurück und 22 Agenten bewegen sich über die Kante e_1 nach v_2 . Hier wird ein Agent abgelegt und mit 21 Agenten geht es zum Knoten v_3 über die Kante e_2 . Nachdem wir dort einen Agenten abgelegt haben, können wir mit den verbleibenden 20 Agenten gerade noch über die Kante zurück. Hier stellt sich quasi heraus, dass es mit weniger als 23 gar nicht gehen kann!

Mit den 20 Agenten besuchen wir v_4 (über e_1 und e_3) und lassen einen Agenten dort. Dann geht es mit den verbleibenden über e_3 , e_1 und e_4 zu v_5 . Hier werden 15 Agenten benötigt und wir sind fertig.

Es stellt sich heraus, dass dieses Problem für allgemeine Graphen wirklich *schwer* zu lösen ist. Für einfache Graphen (Bäume) gibt es effiziente Algorithmen, durch die die optimale Lösung in best-möglicher Laufzeit (auch durch die Verwendung effizienter Datenstrukturen (Heaps)) ermittelt werden kann. Daraus resultiert auch eine Approximationslösung für allgemeine Graphen. Aus dem Graphen wird ein Baum mit guter Verbindungseigenschaft generiert und darauf der Baumalgorithmus angewendet.

Ein formaler Beweis zeigt jeweils die Güte der Approximation, die Optimalität des Baumalgorithmus und die Schwere des Problems im Allgemeinen.

Dieses Beispiel enthält somit viele Aspekte, die in der Vorlesung vermittelt werden sollen.

1.1.2 Maschinenmodell

Die Laufzeitabschätzungen der Algorithmen soll unabhängig von der jeweils aktuellen Hardware-Rechnerausstattung (z.B. Taktfrequenz, Verarbeitungsbreite etc.) sein, deshalb zählen wir die Anzahl der ausgeführten *Elementaroperationen* in unserem jeweiligen Maschinenmodell. Der Einfachheit halber veranschlagen wir für jede Operation in etwa die gleichen Kosten.

Wir verwenden das Modell einer sogenannten **REAL RAM**, eine *Random Access Maschine*, die mit reellen Zahlen rechnet. In diesem Modell werden Anweisungen nacheinander (sequentiell) ausgeführt. Das REAL RAM Modell orientiert sich an realen Rechnern und hat folgende Spezifikation:

- Abzählbar unendlich viele Speicherzellen, die mit den natürlichen Zahlen adressiert werden.
- Jede Speicherzelle kann eine beliebige reelle oder natürliche Zahl enthalten. Direkter oder indirekter Zugriff ist möglich.
- Elementare Rechenoperationen: Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren, Dividieren, Restbilden, Abrunden, Aufrunden.
- Elementare Relationen: kleiner gleich, größer gleich, gleich, \vee , \wedge .
- Kontrollierende Befehle: Verzweigung, Aufruf von Unterrouinen, Rückgabe.
- Datenbewegende Befehle: Laden, Speichern, Kopieren.

Alle angegebenen Operationen können in konstanter Zeit ausgeführt werden.

Wir nehmen an, dass Integer-Zahlen der Größe m mit $c \log m$ Bits für eine Konstante $c \geq 1$ dargestellt werden können. Reelle Zahlen werden gemäß des IEEE Standards im Rechner durch Binärzahlen approximiert. Innerhalb des Darstellungsbereiches können arithmetische Operationen mit reellen Zahlen im Rechner sehr effizient durchgeführt werden.

1.1.3 Algorithmische Paradigmen

Algorithmen lassen sich häufig bezüglich ihrer Herangehensweise an das jeweilige Problem kategorisieren. Zunächst seien hier einige davon kurz erwähnt. Es geht hier im Wesentlichen darum, wie das Problem gelöst wird.

- Brute-Force (Naive Methode)
- Inkrementelle Konstruktion (Schrittweise Vergrößerung der Eingabe)
- Divide-and-Conquer (Aufteilen und Zusammenfügen)
- Greedy (*gierig*, schnelle Verbesserungen)
- Dynamische Programmierung (Tabellarische Auflistung und Verwertung von Teillösungen)
- Sweep (geometrische Probleme, Dimensionsreduktion)
- ...

Die Methoden können auch kombiniert auftreten, zum Beispiel ein Divide-and-Conquer Algorithmus, der im Merge-Schritt einen Sweep verwendet. Auf die einzelnen Paradigmen werden wir später gezielt für konkrete Problemstellungen eingehen.

1.1.4 Analysemethode

Sei P eine Probleminstanz eines Problems Π und sei A ein Algorithmus mit RAM-Anweisungen, der für jede Instanz $P \in \Pi$ eine Lösung liefert. Im Sprachgebrauch wird eine Instanz P auch oft als Problem bezeichnet, wenn keine Verwechslung zu befürchten ist.

Die Anzahl der Elementaroperationen eines Algorithmus A bei einer Eingabegröße $|P| = n \in \mathbb{N}$ wird durch eine *Kostenfunktion* $T_A : \mathbb{N} \mapsto \mathbb{R}^+$ beschrieben. Die Instanz P könnte beispielsweise eine Menge von n Zahlen sein.

Die exakte Bestimmung dieser Funktion kann vernachlässigt werden, insbesondere, da auf unterschiedlichen Rechnern verschiedene Konstanten für die Elementaroperationen beachtet werden müssten. Also sind wir bei der Analyse nur an der Größenordnung der Funktion T_A in Abhängigkeit der Eingabegröße $|P| = n$ interessiert. Ebenso verhält es sich mit der Eingabegröße selbst, ob wir es mit n Punkten in der Ebene zu tun haben oder mit $2n$ Koordinaten, soll beispielsweise keine Rolle bei der Beschreibung der Größenordnung spielen.

Die Anzahl der Elementaroperationen eines Algorithmus mit Eingabegröße $n \in \mathbb{N}$ kann auch von der Zusammenstellung der Eingabe selbst abhängen. Deshalb können wir verschiedene Kennzahlen verwenden:

- Worst-case: Maximal mögliche Anzahl an Elementaroperationen

- Average-case: Mittlere Anzahl der Elementaroperationen, gemittelt über alle möglichen Eingaben der entsprechenden Größenordnung

Die Analyse kleiner Eingabegrößen ist generell wenig aussagekräftig, da wir in diesem Fall die Summe aller Elementaroperationen unter einer großen Konstante subsumieren können. Deshalb untersuchen wir das *asymptotische Verhalten* der Kostenfunktion.

Das führt zu folgenden Notationen für Klassen von Funktionen:

Definition 1 (O -, Ω -, Θ -Notation)

$$g \in O(f) \quad :\Leftrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{es existiert ein } n_0 \geq 0 \text{ und ein } C > 0, \\ \text{so dass } g(n) \leq C f(n) \text{ für alle } n \geq n_0. \end{array}$$

$$\begin{aligned} g \in \Omega(f) & \quad :\Leftrightarrow \quad f \in O(g) \\ & \quad :\Leftrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{es existiert ein } n_0 \geq 0 \text{ und ein } C > 0, \\ \text{so dass } f(n) \leq C g(n) \text{ für alle } n \geq n_0. \end{array} \end{aligned}$$

$$g \in \Theta(f) \quad :\Leftrightarrow \quad g \in O(f) \text{ und } g \in \Omega(f).$$

Wir erlauben also mit $n \geq n_0$ endliche viele Ausnahmestellen.

Die obige Notation wird in dem Sinne gebraucht, dass $f \in O(g)$ eine *obere Schranke* an die Funktion f durch g liefert, währenddessen $f \in \Omega(g)$, eine *untere Schranke* für f durch g darstellt.

Beispiele:

$3n+2 \in O(n)$, da für alle $n \geq 2$ und für $C = 4$ gilt: $3n+2 \leq 4n$. Desgleichen gilt $3n+2 \in \Omega(n)$, da für alle $n \geq 0$ bereits $n \leq 3n+2$ gilt. Somit gilt $3n+2 \in \Theta(n)$.

Für $g(n) = 2n^3 - 18n^2 - \sin(n) + 16n + 3$ führt zunächst die grobe Abschätzung

$$\begin{aligned} g(n) & \leq 2n^3 + 16n + 3 \\ & \leq (2 + 16 + 3)n^3 \text{ für alle } n \geq 1 \end{aligned}$$

zur Aussage $g \in O(n^3)$. Es gilt aber auch

$$\begin{aligned} g(n) & \geq 2n^3 - 18n^2 \\ & = n^3 + (n-18)n^2 \\ & \geq n^3 \text{ für alle } n \geq 15 \end{aligned}$$

und deshalb gilt hier ebenfalls $g \in \Omega(n^3)$ und $g \in \Theta(n^3)$. Wir sagen auch, dass die Funktion g in der *Größenordnung* n^3 wächst.

Eine weitere hilfreiche Notationskonvention ist, dass wir die obigen Symbole der Einfachheit halber bei einer asymptotischen Betrachtung auch in Formeln verwenden möchten. So drückt $2n^2 + 3n + 1 = 2n^2 + \Theta(n)$ aus, dass wir uns um die Funktion $3n + 1$ in der Größenordnung $\Theta(n)$ nicht genau kümmern möchten. Diese Konvention kann hilfreich sein, wenn beispielsweise eine Laufzeitabschätzung *rekursiv* durch eine Formel $T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + \Theta(n)$ beschrieben werden darf. Wahlweise kann hier auch $T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + C \cdot n$ für ein nicht näher bestimmtes C verwendet werden.

Außerdem kann es sinnvoll sein, die Analyse der Laufzeiten *ausgabesensitiv* vorzunehmen, um die Ausgabekomplexität nicht der algorithmischen Komplexität anzulasten. Falls wir beispielsweise die Menge aller Schnittpunkte von n Liniensegmenten suchen, so ist klar, dass es im worst-case $\binom{n}{2}$ viele Schnittpunkte geben kann, jeder Algorithmus also mindestens diese Laufzeit im worst-case benötigt. Eine ausgabesensitive Analyse könnte zu einem Ergebnis von $O((n+k)\log n)$ führen, wobei k die Anzahl der tatsächlichen Schnittpunkte angibt.

1.2 Ein einfaches Beispiel: Insertionsort

Die obigen Begriffe wollen wir zunächst auf das einfache Beispiel des Sortierens anwenden. Wir nehmen an, die n zu sortierenden Zahlen sind in einem *Array* A gespeichert.

Eingabe: n reelle Zahlen $A[1], A[2], \dots, A[n]$.

Ausgabe: Ein Array B der Zahlen aus A mit $B[1] \leq B[2] \leq \dots \leq B[n]$.

Beachte, dass wir hier eine etwas andere Ausgabe als zu Beginn erwarten (Permutation π). Die Aufgabenstellung ist aber äquivalent.

Eine *Brute-Force* Vorgehensweise wäre, das kleinste Element des Arrays zu ermitteln, dieses zu entfernen und mit dem restlichen Array fortzufahren.

Wir betrachten einen *inkrementellen* Ansatz. Sukzessive wird ein immer größerer Teil des Arrays A in B sortiert. Anders ausgedrückt, falls wir die ersten $j - 1$ Elemente des Arrays A in B bereits sortiert haben, nehmen wir uns danach das j -te Element vor und sortieren es in B ein.

Die Korrektheit des Algorithmus wird durch eine *Schleifeninvariante* gezeigt. Wir zeigen formal, dass für jeden Beginn der FOR-Schleife die folgende Invariante gilt: *Für den aktuellen Wert j gilt, dass B bis zum Index $j - 1$ eine sortierte Folge der ersten $j - 1$ Einträge von A ist und dass A und B ab dem Index j übereinstimmen*

Formal gesehen handelt es sich hier um eine Induktion, die bei einem be-

Algorithmus 1 InsertionSort(A)Array A (nichtleer) sortiert in Array B ausgeben

```

1:  $B[1] := A[1]$ ;
2: for  $j = 2$  to  $length(A)$  do
3:    $key := A[j]$ ;  $i := j - 1$ ;
4:   while  $i > 0$  und  $B[i] > key$  do
5:      $B[i + 1] := B[i]$ ;  $i := i - 1$ ;
6:   end while
7:    $B[i + 1] := key$ ;
8: end for
9: RETURN  $B$ 

```

stimmt Parameter terminiert.

Induktionsanfang: $j = 2$. Die Eigenschaft ist erfüllt, durch die erste Anweisung.

Induktionsschritt: Wir nehmen an, dass die Aussage bereits für $j - 1 \geq 2$ gilt. Jetzt werden in der WHILE-Schleife im Array B solange die Werte um einen Index nach hinten geschoben, bis das Element $key := A[j]$ kleiner gleich dem i -ten Element von B ist. Dann wird key als $(i + 1)$ -tes Element in B eingetragen. Falls das bis $i = 0$ nicht eintritt, wird key als 1-tes Element von B eingetragen. Insgesamt ist B danach bis zum Index j ein sortiertes Array der ersten j -Elemente von A .

Terminierung: Falls $j = length(A) + 1$ wird, gilt zunächst die Invariante, dass für den aktuellen Wert j gilt, dass B bis zum Index $j - 1 = length(A)$ eine sortierte Folge der ersten $length(A)$ Einträge von A ist. Die FOR-Schleife bricht ab und das Ergebnis wird korrekt in B ausgegeben.

Übungsaufgabe: Streng genommen muss die WHILE-Schleife genauso analysiert werden. Welche Schleifeninvariante muss hier gewählt werden?

Für eine Laufzeitabschätzung analysieren wir die einzelnen Programmschritte. Dabei sei t_j die Anzahl der Durchläufe der WHILE-Schleife wenn die FOR-Schleife für j aufgerufen wird. Sei $length(A) = n$.

Es ergibt sich die folgende Tabelle:

Anweisungen in Algorithmus 1	Kosten	Häufigkeit
1:	c_1	1
3:	c_2	$n - 1$
5:	c_3	$\sum_{j=2}^n t_j$
7:	c_4	$n - 1$

Insgesamt ergibt sich nach unseren Konventionen folgende Laufzeit:

$$T(n) = c_3 \sum_{j=2}^n t_j + O(n)$$

Die Laufzeit hängt also von der Größe von t_j ab. Im schlechtesten Fall ist das Array A absteigend sortiert, alle Elemente aus B müssen verschoben werden und das j -te Element wird vorne eingefügt. In diesem Fall gilt $t_j = j$ und wir haben.

$$T(n) \leq c_3 \sum_{j=1}^n j + O(n) = c_3 \frac{n(n+1)}{2} + O(n) \in O(n^2)$$

Die worst-case Analyse ist im allgemeinen sinnvoll, weil ...

- ... wir eine Laufzeit für jede beliebige Eingabe garantieren.
- ... der worst-case in vielen Anwendungsfeldern relativ häufig vorkommen kann.
- ... die Analyse der mittleren Laufzeit nicht unbedingt bessere Ergebnisse erzielt.

Beispielsweise können wir bei der Analyse einer mittleren Laufzeit die Frage stellen, an welcher Stelle im Mittel das j -te Element eingeordnet werden muss. Im Mittel ist die Hälfte der Elemente größer als $A[j]$ und die Hälfte der Elemente kleiner als $A[j]$ und somit könnten wir $t_j = \frac{j}{2}$ betrachten. Das führt asymptotisch gesehen exakt zur gleichen Laufzeit.

Anders kann es aussehen, wenn wir aus der Eingabe durch *Würfeln* zufällig gleichverteilt die Elemente aus A ziehen.

Solche *probabilistische Analysen* werden wir später für sogenannte *randomisierte* Algorithmen durchführen. Im Gegensatz dazu haben wir hier zunächst einen *deterministischen* Algorithmus betrachtet. Der Lösungsplan ist von vorneherein vollständig festgelegt und nicht vom Zufall abhängig.

Kapitel 2

Divide-and-Conquer

In diesem Kapitel behandeln wird die Entwurfsmethode *Divide-and-Conquer* (übersetzt: Teile und herrsche) und eine zugehörige allgemeine Analyse-methode. Gleichzeitig lernen wir dadurch das Prinzip der *Rekursion* kennen, das heißt wir rufen bestimmte Routinen unseres Algorithmus immer wieder auf, um Teilprobleme zu lösen. Am Ende werden die Lösungen der Teilprobleme zur Lösung des Gesamtproblems zusammengefügt bzw. zusammengemischt.

Das allgemeine Schema der Methode für ein Problem P der Größe n funktioniert wie folgt:

1. Divide $\left\{ \begin{array}{l} n > c : \text{ Teile das Problem in } k \geq 2 \text{ Teilprobleme} \\ \text{der Größen } n_1, n_2, \dots, n_k, \text{ gehe zu 2.} \\ n \leq c : \text{ Löse das Problem direkt} \end{array} \right.$
2. Conquer Löse die k Teilprobleme auf dieselbe Art (rekursiv)
3. Merge Füge die k berechneten Teillösungen
zu einer Gesamtlösung zusammen

2.1 Sortieren von Zahlenketten, Mergesort

Hier betrachten wir $k = 2$ und $n_1, n_2 \approx \frac{n}{2}$. Für eine konkrete Zahlenfolge ergibt sich das folgende Aufrufschema eines Divide-and-Conquer Algorithmus:

Eingabe	:	(3, 2, 1, 7, 3, 4, 9, 2)
Divide I.	:	(3, 2, 1, 7)(3, 4, 9, 2)
(Conquer)Divide II.	:	(3, 2)(1, 7)(3, 4), (9, 2)
(Conquer)Divide III.	:	(3)(2)(1)(7)(3)(4)(9)(2)
Merge III.	:	(2,3)(1,7)(3,4)(2,9)
Merge II.	:	(1,2,3,7)(2,3,4,9)
Merge I.	:	(1,2,2,3,3,4,7,9)

Im Pseudocode und unter Verwendung von Arrays könnte eine Implementierung wie folgt aussehen. Wir verwenden ein nichtleeres Array A von Index 1 bis $n = \text{length}(A)$ und rufen zur vollständigen Sortierung $\text{MergeSort}(A, 1, n)$ auf.

Algorithmus 2 MergeSort(A, p, r)

Array A wird zwischen Index p und r sortiert

- 1: **if** $p < r$ **then**
 - 2: $q := \lfloor (p + r) / 2 \rfloor$;
 - 3: MergeSort(A, p, q);
 - 4: MergeSort($A, q + 1, r$);
 - 5: Merge(A, p, q, r);
 - 6: **end if**
-

Die eigentliche Arbeit (bis auf die Anzahl der rekursiven Aufrufe) wird im Merge-Schritt vollzogen. Dafür kopieren wir die bereits von Index p bis q und von Index $q + 1$ bis r sortierten Abschnitte in zwei Arrays L und R und fügen diese dann wieder gemeinsam sortiert in A von Index p bis r ein. Für ein Abbruchkriterium des Merge-Schrittes fügen wir einen Dummywert ∞ am Ende von L und R ein.

Danach werden die beiden Teilarrays gemischt, indem in einem gleichzeitigen Durchlauf jeweils das kleinste momentan vorderste Element von L und R in A eingefügt wird.

2.1.1 Laufzeitanalyse

Für einen einzelnen Merge-Schritt entsteht offensichtlich ein Aufwand von $O(|L| + |R|)$; siehe Prozedur 3. In jedem Schritt der finalen FOR-Schleife wird ein Element von L oder R nicht mehr betrachtet. Deshalb kann die Schleife nicht mehr als $(|L| + |R|)$ Mal aufgerufen werden.

Zur Laufzeitanalyse verwenden wir eine Rekursionsgleichung. Eine klassische Vereinfachung ist dabei, dass wir annehmen, dass n eine Zweierpotenz ist, also

Prozedur 3 Merge(A, p, q, r)

Array A vorsortiert zwischen Index p und q und Index $q + 1$ und r wird zwischen p und r sortiert

```

1:  $n_1 := q - p + 1$ ;  $n_2 := r - q$ ;
2: for  $i = 1$  to  $n_1$  do
3:    $L[i] := A[p + i - 1]$ ;
4: end for
5: for  $j = 1$  to  $n_2$  do
6:    $R[j] := A[q + j]$ ;
7: end for // erzeuge Arrays  $L[1 \dots (n_1 + 1)]$  und  $R[1 \dots (n_2 + 1)]$ 
8:  $L[n_1 + 1] := \infty$ ;  $R[n_2 + 1] := \infty$ ;
9:  $i := 1$ ;  $j := 1$ ;
10: for  $k = p$  to  $r$  do
11:   if  $L[i] \leq R[j]$  then
12:      $A[k] := L[i]$ ;  $i := i + 1$ ;
13:   else
14:      $A[k] := R[j]$ ;  $j := j + 1$ ;
15:   end if
16: end for

```

$n = 2^k$. Wir können die Kostenfunktion dann für den obigen Algorithmus wie folgt beschreiben.

$$T(n) = \begin{cases} c & \text{falls } n = 1 \\ 2T\left(\frac{n}{2}\right) + cn & \text{falls } n > 1 \end{cases} \quad (2.1)$$

In der obigen Gleichung haben wir eine einzelne Konstante c verwendet. Das ist prinzipiell erlaubt, da wir für die Konstanten für das Problem der Größe 1 und den Merge-Schritt einfach die größte der beiden Konstanten wählen können. Die asymptotische Laufzeit ändert sich nicht.

Man beachte, dass in den Kosten cn auch das Aufteilen der Aufgabenstellung in zwei Teilprobleme subsumiert ist. Hier musste lediglich ein Index in der Mitte in konstanter Zeit berechnet werden.

Die Rekursionsgleichung läßt sich nun leicht insbesondere auch wegen der Annahme $n = 2^k$ durch einen Rekursionsbaum abschätzen, siehe Abbildung 2.1. Die allerunterste Ebene des Baumes enthält exakt n Aufrufe für die Arrays der Größe 1. In jeder darüberliegenden Ebene werden jeweils zwei Mengen der darunterliegenden Ebene im Merge-Schritt vereinigt. Die Kosten sind jeweils *linear* zur Summe der Größen der darunterliegenden Arrays. Somit sind die Kosten auf jeder Ebene linear zur Gesamtzahl der Elemente überhaupt. Der Baum hat $k = \log_2 n$ viele Ebenen, da sich die Anzahl der Knoten von unten nach oben jeweils halbiert. Wir können also $T(n) = O(n \log n)$ und sogar $T(n) = \Theta(n \log n)$ folgern. Streng genommen hätten wir die Rekursi-

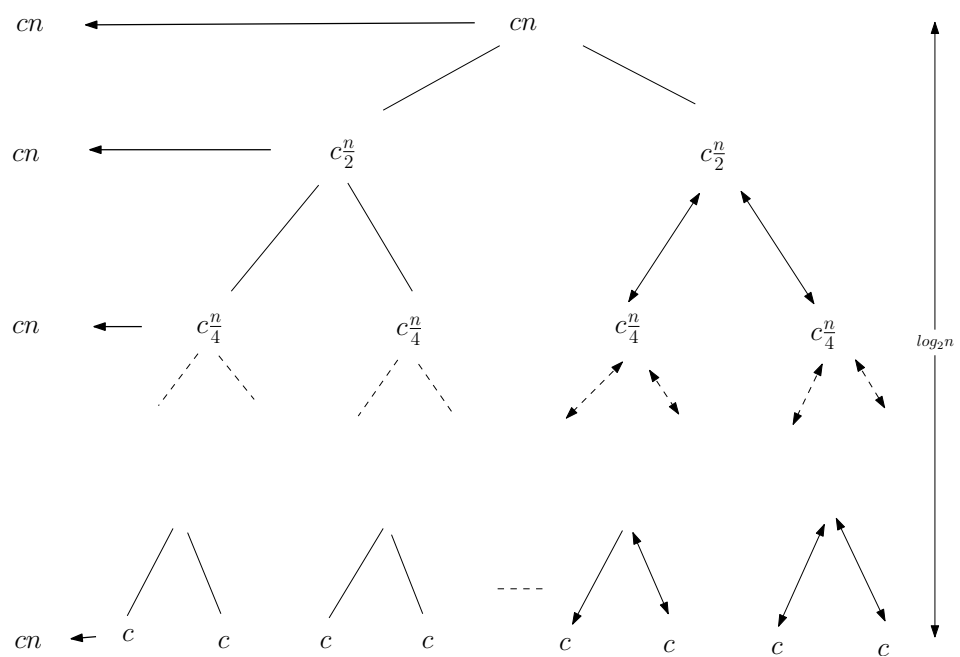


Abbildung 2.1: Nach $k = \log_2 n$ Ebenen sind nur noch einzelne Elemente vorhanden. Auf jeder Ebene des Rekursionsbaumes fällt ein Aufwand von cn für die einzelnen Merge-Schritte an.

ongleichung (2.1) wie folgt formulieren müssen.

$$T(n) = \begin{cases} c & \text{falls } n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + T(\lceil \frac{n}{2} \rceil) + cn & \text{falls } n > 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

In jedem Fall müssen wir uns beim Aufstellen und Lösen der Rekursionsformeln Gedanken darüber machen, ob die Einschränkung $n = 2^k$ nicht das asymptotischen Verhalten der Laufzeit beeinflusst. Im obigen Fall ist das offensichtlich nicht der Fall, der zugehörige Rekursionsbaum wäre zwar nicht so ausgeglichen, wie in Abbildung 2.1. Für jedes n könnten wir aber beispielsweise die nächste Zweierpotenz oberhalb von n nehmen, um eine obere Schranke zu erzielen, sowie die nächste Zweierpotenz unterhalb von n für eine untere Schranke der Laufzeit. Der Algorithmus hat dann entsprechend mehr oder entsprechend weniger Aufrufe zu absolvieren. Darüber müssen wir uns aber Gedanken machen.

Beispielsweise kann eine Rekursionsformel der Form

$$T(n) = \begin{cases} n & \text{falls } n \text{ gerade} \\ n^2 & \text{falls } n \text{ ungerade} \end{cases} \quad (2.3)$$

nicht mit dem Ansatz $n = 2^k$ betrachtet werden.

2.1.2 Korrektheit

Die Korrektheit des obigen Divide-and-Conquer Algorithmus ergibt sich direkt aus der Korrektheit der Merge-Prozedur. Sobald diese gemäß ihrer Spezifikation funktioniert, erhalten wir die richtigen Zwischenergebnisse rekursiv für weitere Aufrufe.

Zunächst ist klar, dass die Merge-Prozedur durch die ersten beiden FOR-Schleifen die Einträge des Arrays A von Index p bis Index q und von Index $q + 1$ bis r in die Kopien L und R der Größen $n_1 := q - p + 1$ $n_2 := r - q$ einträgt. Streng genommen müssen auch diese Behauptungen durch eine Schleifeninvariante bewiesen werden.

Wir beschränken uns hier auf die dritte FOR-Schleife und formulieren eine geeignete Schleifeninvariante.

Zu Beginn jeder Iteration der FOR-Schleife enthält das Array $A[p \dots k - 1]$ die $(k - p)$ kleinsten Einträge aus L und R in sortierter Reihenfolge. $L[i]$ und $R[j]$ sind die kleinsten Einträge der jeweiligen Arrays, die noch nicht in A zurückkopiert wurden.

Induktionsanfang: $k = p$. Das Array $A[p \dots k - 1]$ enthält die $k - p = 0$ kleinsten Elemente von L und R . $L[1]$ und $R[1]$ sind die kleinsten Elemente der Arrays, die noch nicht zurückkopiert wurden.

Induktionsschritt: Wir nehmen an, die Aussage gelte bereits für $k = p + l$ und wollen zeigen, dass die Aussage nach dem Durchlauf der FOR-Schleife für $k' = p + l + 1$ erhalten bleibt. Die Schleife wird mit $k = p + l$ ausgeführt. Es werden die aktuellen Köpfe der beiden Arrays L und R verglichen und das kleinste der beiden Elemente als $k = (p + l)$ -tes Element in A eingetragen. Also besteht danach $A[p \dots k' - 1]$ für $k' = p + l + 1$ aus den $(k' - p)$ kleinsten Einträge aus L und R in sortierter Reihenfolge. Je nachdem, ob $L[i] \leq R[j]$ oder $L[i] > R[j]$ gilt, wird i oder j um eins erhöht und die Aussage gilt auch für $k' = p + l + 1$ und das neue j oder i .

Terminierung: Beim Abbruch gilt $k = r + 1$ und $A[p \dots r]$ enthält die $r + 1 - p$ kleinsten Elemente von L und R in sortierter Reihenfolge. Zusammen enthalten L und R insgesamt $n_1 + n_2 + 2 = r - p + 3$ Elemente. Also muss sowohl i am Index $n_1 + 1$ und j am Index $n_2 + 1$ angekommen sein. Alle Werte außer den Dummywerten ∞ sind in A eingetragen worden.

2.1.3 Untere Schranke von Sortieralgorithmen

Mergesort kann also n Zahlen (a_1, a_2, \dots, a_n) in Zeit $O(n \log n)$ sortieren. Dabei greift der Algorithmus auf die Elemente der Eingabefolge nur durch *paarweise Vergleiche* zu (siehe Zeile 11 der Merge-Prozedur): Es wird getestet, ob zum Beispiel $a_i < a_j$ gilt, und der Ausgang dieses Tests entscheidet, was der Algorithmus als nächstes macht. "Gerechnet" wird mit den a_i aber nicht.

Mit solchen vergleichsbasierten Sortierverfahren kann man deswegen nicht nur Zahlen sortieren, sondern Objekte aus beliebigen vollständig geordneten Mengen, vorausgesetzt, es steht ein Größenvergleichstest zur Verfügung.

Interessanterweise ist Mergesort sogar optimal.

Theorem 2 *Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt im worst-case $\Omega(n \log n)$ viele Vergleiche, um n Objekte zu sortieren.*

Beweis. Sei A ein vergleichsbasierter Sortieralgorithmus. Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass A deterministisch ist; das Theorem gilt aber auch für randomisierte Verfahren. Außerdem setzen wir voraus, dass die a_i paarweise verschieden sind. Weil A den Input (a_1, a_2, \dots, a_n) zunächst nicht kennt, wird stets derselbe Test $a_i < a_j$? als erster ausgeführt. In Abhängigkeit vom Ergebnis verzweigt der Algorithmus. Für alle Eingaben, bei denen $a_i < a_j$ gilt, wird jetzt stets derselbe Test $a_v < a_w$? als nächster ausgeführt. Ebenso kommt für alle Inputs mit $a_i > a_j$ als nächstes stets derselbe Test $a_r < a_s$? an die Reihe, und so fort. So entsteht der Entscheidungsbaum B_A von Algorithmus A , ein Binärbaum, der mindestens so viele Blätter enthält,

wie es Permutationen gibt; denn ein korrekter Sortieralgorithmus darf für unterschiedlich permutierte Eingabefolgen nicht zum selben Ergebnis kommen. Also gilt

$$\begin{aligned} \text{Höhe}(B_A) &\geq \log_2(n!) \geq \log_2\left(\left(\frac{n}{2}\right)^{\frac{n}{2}}\right) = \frac{n}{2} \log_2\left(\frac{n}{2}\right) \\ &\geq \frac{1}{3}n \log_2(n) \end{aligned}$$

für alle $n \geq 8$. Dabei gilt die erste Ungleichung, weil es in $n!$ mindestens $n/2$ viele Faktoren gibt, die mindestens so groß sind wie $n/2$. Es gibt also im Baum B_A mindestens einen Pfad der Länge $\Omega(n \log n)$, und wenn die Eingabe so permutiert ist, wie es den Testergebnissen längs dieses Pfades entspricht, muss Algorithmus A alle diese Vergleiche ausführen. \square

Wenn die zu sortierenden Objekte aber Zahlen sind, mit denen man “rechnen” darf, gilt die untere Schranke von Theorem 2 nicht. Zum Beispiel geht der Algorithmus Radixsort folgendermaßen vor, um n k -stellige Zahlen zu sortieren: Zunächst werden leere 10 Listen L_0, L_1, \dots, L_9 angelegt, je eine für jede Ziffer. Nun werden abwechselnd k Verteilungs- und Sammelphasen ausgeführt. Man beginnt mit der letzten der k Stellen, durchläuft die Eingabereihenfolge und hängt die Zahl a_i an diejenige Liste an, die zur letzten Ziffer von a_i gehört. Anschließend werden die Zahlen aus den Listen wieder eingesammelt, in der Reihenfolge L_0, L_1, \dots, L_9 und unter Beibehalt der Reihenfolgen innerhalb der Listen. Mit der neuen Zahlenfolge verfährt man ebenso, verwendet aber nun die vorletzte Stelle, und so fort. Wenn man schließlich die Zahlen nach der ersten Stelle verteilt und wieder eingesammelt hat, sind sie sortiert (!).

Offensichtlich führt Radixsort nur $O(kn)$ viele Schritte aus. Wenn die Stellenzahl k als konstant betrachtet wird (was bei Standard-Zahlentypen meist der Fall ist), so ergibt sich die Laufzeit $O(n)$.

2.2 Closest Pair von n Punkten

Wir betrachten die folgende geometrische Aufgabenstellung. Für einer Menge S von n Punkten p_1, p_2, \dots, p_n in der Ebene, soll das Punktepaar mit kleinstem Euklidischen Abstand $d(\cdot, \cdot)$ berechnet werden.

Wir suchen also den Wert

$$d_S = \min_{1 \leq i, j \leq n, i \neq j} d(p_i, p_j).$$

Der Brute-Force Ansatz für dieses Problem vergleicht systematisch alle $O(n^2)$ vielen Distanzen und benötigt eine Laufzeit von $\Theta(n^2)$.

Für einen Divide-and-Conquer Algorithmus sortieren wir die Punkte zunächst nach X -Koordinaten und teilen die Punktmenge rekursiv in zwei gleichgroße Mengen anhand der X -Koordinaten auf.

1. Divide Teile das Problem in Teilmengen S_r und S_l gleicher Größe anhand der X -Koordinaten auf.
2. Conquer Bestimme rekursiv d_{S_l} und d_{S_r} .
3. Merge Berechne d_S durch die Verwendung von d_{S_l} und d_{S_r} .

Wir wollen im Merge-Schritt wiederum möglichst wenig Aufwand für die Bestimmung von d_S verwenden. Sei $d := \min\{d_{S_l}, d_{S_r}\}$. Wir brauchen für den Merge nur Punkte betrachten die von S_l zu Punkten aus S_r einen Abstand $< d$ haben. Nur die Punkte innerhalb des Streifens der Breite $2d$ symmetrisch entlang der *Splitvertikalen* können einen solchen Abstand $< d$ zueinander haben; siehe Abbildung 2.2. Im Merge-Schritt wird folgendes Verfahren an-

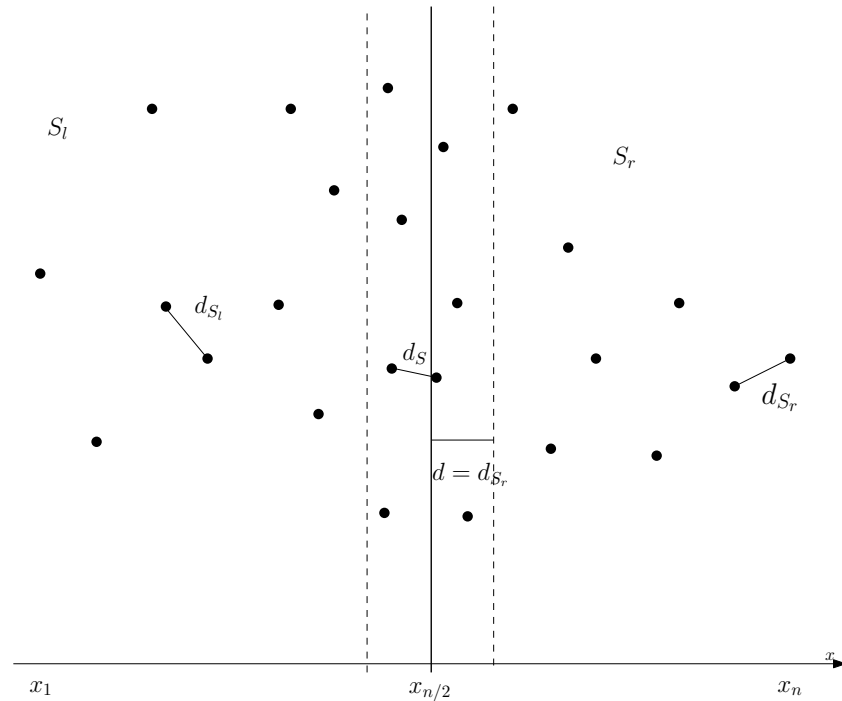


Abbildung 2.2: Für den Merge-Schritt müssen nur die Punkte der beiden Teilstreifen der Breite d entlang der Splitvertikalen betrachtet werden.

gewendet:

- Bestimme die Punkte in den zugehörigen rechten und linken Teilstrei-

fen der Breite d und sortiere diese jeweils nach Y -Koordinaten;

- gehe die Punkte im linken Teilstreifen nach fallenden Y -Koordinaten durch
- für jeden solchen Punkt p betrachte alle Punkte aus dem rechten Teilstreifen deren Y -Koordinaten im Bereich $[p_y - d, p_y + d]$ liegen
- der zugehörige Punktbereich auf der rechten Seite wandert sukzessive nach *unten*.

Behauptung: Zu jedem Zeitpunkt sind nicht mehr als 10 Punkte im zugehörigen Bereich.

Beweis. (Behauptung) Nehmen wir an, dass p und q ein dichtestes Punktepaar mit Abstand $< d$ sind. Dann können wir oBdA annehmen, dass p im linken und q im rechten Teilstreifen liegt. Der Punkt q kann nicht außerhalb des Rechtecks $R(p)$ der Breite d und Höhe $2d$ im rechten Teilstreifen liegen; siehe Abbildung 2.3. Außerdem haben alle Punkte in $R(p)$ einen Abstand von mindestens d zueinander. Dann sind die Kreisumgebungen $U_{\frac{d}{2}}(q)$ in $R(p)$ disjunkt. Für jeden Punkt q in $R(p)$ ist mindestens ein Viertel dieser Kreisfläche in $R(p)$ enthalten. $R(p)$ kann dann höchstens

$$\frac{2d^2}{\frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{32}{\pi} < 11$$

viele Punkte enthalten. □

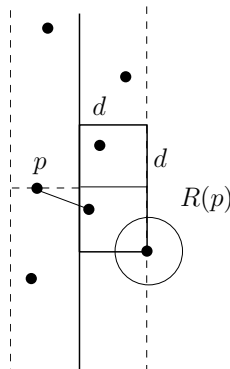


Abbildung 2.3: Für jeden Punkt p des linken Teilstreifens müssen nur konstant viele Punkte im rechten Teilstreifen getestet werden. Die zu testenden Punkte haben Y -Koordinaten, die im Bereich $[p_y - d, p_y + d]$ liegen.

Zur Analyse der Laufzeit betrachten wir nun die Einzelschritte des beschriebenen Algorithmus.

- In einem ersten Schritt werden die Punkte nach X -Koordinaten sortiert. Das kostet $O(n \log n)$ Zeit.
- Der Divide-Schritt kostet dann stets lineare Zeit.
- Für den Merge Schritt ergibt sich folgender Aufwand:
 1. Es müssen die Punkte mit X -Koordinaten aus den Teilstreifen ermittelt werden, das kostet $O(n)$ Zeit.
 2. Danach werden die Punkte in den jeweiligen Bereichen nach Y -Koordinate sortiert. Das kostet $O(n \log n)$ Zeit.
 3. In einem linearen Durchlauf wird für jeden Punkt p zu einer konstanten Anzahl (≤ 10) von Punkten q der Abstand ermittelt und der aktuell kleinste gespeichert. Insgesamt liegt der Aufwand in $O(n)$ für diesen Schritt.

Insgesamt erstellen wir daraus die folgende Rekursionsgleichung.

$$T(n) = \begin{cases} c & \text{falls } n = 1 \\ 2T\left(\frac{n}{2}\right) + c \cdot n \log n & \text{falls } n > 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

Wie wir solche Rekursionsgleichungen im Allgemeinen lösen ist Gegenstand des nächsten Kapitels. Eine Übungsaufgabe besteht dann darin, die obige Gleichung abzuschätzen.

Kapitel 3

Lösen von Rekursionsgleichungen

Für die Analyse von Algorithmen, die das Prinzip der Rekursion verwenden, kann häufig eine Rekursionsgleichung aufgestellt werden.

Zunächst erwähnen wir einige Konventionen. Obwohl unsere Kostenfunktionen auf den natürlichen Zahlen definiert sind ignorieren wir diesen Sachverhalt und nehmen an, dass Funktionen wie $T(n)$ zwischen den ganzzahligen Argumenten monoton interpoliert werden. Deshalb können wir zum Beispiel auch für ungerade Zahlen n eine Formel wie $T(\frac{n}{2})$ hinschreiben. Außerdem können wir statt der genauen Laufzeit $U(n)$ eines Algorithmus, die manchmal nur mit umständlichen Fallunterscheidungen beschrieben werden kann, eine obere Schranke $T(n) \geq U(n)$ verwenden. Wenn wir dann eine Rekursionsgleichung für $T(n)$ aufstellen und lösen, haben wir auch eine Abschätzung von $U(n)$ nach oben. Schließlich lassen wir die Abschätzungen für die Anfangswerte von n oft weg, wenn es sich um Konstanten handelt, und konzentrieren uns auf die Rekursionsformel.

Wir wollen nun einige Beispiele für Rekursionsgleichungen betrachten.

Bei der *binären Suche* ist ein aufsteigend sortiertes Array $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ von Objekten a_i aus einer vollständig geordneten Menge M gegeben. Es soll festgestellt werden, ob ein Objekt $x \in M$ in diesem Array vorkommt. Zu diesem Zweck wird x zunächst mit dem mittleren Element a_{mitte} von A verglichen, wobei

$$\text{mitte} = \left\lfloor \frac{1+n}{2} \right\rfloor$$

gewählt wird. Gilt $x = a_{\text{mitte}}$, so hat man x gefunden und ist fertig. Ist $x < a_{\text{mitte}}$, so braucht man die Objekte rechts von a_{mitte} nicht mehr zu betrachten, denn das Array A ist ja aufsteigend sortiert. Man setzt die binäre Suche also rekursiv auf dem linken Teilstück $(a_1, a_2, \dots, a_{\text{mitte}-1})$ von A fort.

Ganz analog wird die binäre Suche auf dem rechten Teil $(a_{\text{mitte}+1}, \dots, a_n)$ fortgesetzt, falls $x > a_{\text{mitte}}$ gilt. Natürlich endet die Rekursion mit der Meldung “nicht gefunden”, sobald das verbleibende Array keine Objekte mehr enthält.

Egal, ob n gerade oder ungerade ist, das verbleibende Array hat höchstens die Länge $\frac{n}{2}$. Deshalb erhalten wir als Laufzeitabschätzung für binäres Suchen die Rekursionsgleichung

$$T(n) = T\left(\frac{n}{2}\right) + c, \quad (3.1)$$

wobei die Konstante c den Aufwand für die Berechnung von a_{mitte} und den Vergleich mit x abschätzt.

Für das Sortierverfahren *Mergesort* hatten wir in Kapitel 2.1 schon die Formel

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + cn \quad (3.2)$$

aufgestellt, während wir für den Divide-and-Conquer Algorithmus für das Closest-Pair-Problem in Kapitel 2.2 die Gleichung

$$T(n) = 2T\left(\frac{n}{2}\right) + cn \log n \quad (3.3)$$

erhalten hatten.

Eine wichtige und immer wieder auftretende Aufgabe ist die *Multiplikation von Matrizen*. Berechnet man bei der Multiplikation

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix}$$

nach der Schulmethode alle Koeffizienten $c_{i,j}$ einzeln nach der Formel

$$c_{i,j} = \sum_{k=1}^n a_{ik} b_{kj},$$

so ergeben sich n^3 viele Multiplikationen von Zahlen. Ob es mit Divide-and-Conquer schneller geht?

Für gerade Zahlen n können wir die Matrizen durch jeweils vier Blockmatrizen der Größe $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$ darstellen:

$$\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{pmatrix}.$$

Jede der vier Blockmatrizen C_{ij} ergibt sich wegen

$$C_{ij} = A_{i1} \cdot B_{1j} + A_{i2} \cdot B_{2j}$$

durch Multiplikation von zwei Matrizen der Größe $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$. Also erhalten wir die Rekursionsgleichung

$$T(n) = 8T\left(\frac{n}{2}\right) + cn^2, \quad (3.4)$$

bei der cn^2 die Kosten für die insgesamt vier Additionen von $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$ -Matrizen abschätzt. V. Strassen entdeckte 1969 eine Möglichkeit, eine der acht Matrixmultiplikationen einzusparen. Er definierte sieben Hilfsmatrizen

$$\begin{aligned} M_1 &:= (A_{11} + A_{22}) \cdot (B_{11} + B_{22}) \\ M_2 &:= (A_{21} + A_{22}) \cdot B_{11} \\ M_3 &:= A_{11} \cdot (B_{12} - B_{22}) \\ M_4 &:= A_{22} \cdot (B_{21} - B_{11}) \\ M_5 &:= (A_{11} + A_{12}) \cdot B_{22} \\ M_6 &:= (A_{21} - A_{11}) \cdot (B_{11} + B_{12}) \\ M_7 &:= (A_{12} - A_{22}) \cdot (B_{21} + B_{22}), \end{aligned}$$

deren Berechnung jeweils eine Multiplikation von zwei $\frac{n}{2} \times \frac{n}{2}$ -Matrizen erfordert, und konnte nun die C_{ij} folgendermaßen daraus gewinnen:

$$\begin{aligned} C_{11} &= M_1 + M_4 - M_5 + M_7 \\ C_{12} &= M_3 + M_5 \\ C_{21} &= M_2 + M_4 \\ C_{22} &= M_1 - M_2 + M_3 + M_6. \end{aligned}$$

Bei diesem Ansatz werden also in der Rekursion nur 7 Multiplikationen benötigt, allerdings 18 Additionen und Subtraktionen. Somit ergibt sich die Rekursionsgleichung

$$T(n) = 7T\left(\frac{n}{2}\right) + cn^2, \quad (3.5)$$

mit einer etwas größeren Konstante c als in (3.4).

Die Beispiele (3.1) bis (3.5) sind Spezialfälle der allgemeinen Rekursionsgleichung

$$T(n) = aT\left(\frac{n}{b}\right) + f(n). \quad (3.6)$$

Die Konstante a beschreibt die Anzahl der Teile, in die das Problem zerlegt wird, und $\frac{n}{b}$ die Größe der Teilprobleme. Die Funktion $f(n)$ gibt den Gesamtaufwand beim Teilen und Zusammensetzen eines Problems der Größe n

an. Durch iterierte Substitution ergibt sich

$$\begin{aligned}
 T(n) &= aT\left(\frac{n}{b}\right) + f(n) \\
 &= a\left(aT\left(\frac{n}{b^2}\right) + f\left(\frac{n}{b}\right)\right) + f(n) \\
 &= a^2T\left(\frac{n}{b^2}\right) + af\left(\frac{n}{b}\right) + f(n) \\
 &= a^2\left(aT\left(\frac{n}{b^3}\right) + f\left(\frac{n}{b^2}\right)\right) + af\left(\frac{n}{b}\right) + f(n) \\
 &= a^3T\left(\frac{n}{b^3}\right) + a^2f\left(\frac{n}{b^2}\right) + af\left(\frac{n}{b}\right) + f(n),
 \end{aligned}$$

und nun errät man leicht, dass in der i -ten Substitution

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

herauskommt. Strenggenommen muss man diese Gleichung durch vollständige Induktion über i beweisen; der Beweis ist aber so einfach, dass wir ihn weglassen. Nun nehmen wir an, dass $n = b^k$ eine Potenz von b ist und setzen $i = k$ ein. Wegen

$$a^k = a^{\log_b n} = n^{\log_b a}$$

ergibt sich

$$T(n) = n^{\log_b a} T(1) + \sum_{j=0}^{\log_b n - 1} a^j f\left(\frac{n}{b^j}\right). \quad (3.7)$$

Mit dieser Formel können wir nun die Rekursionsgleichungen lösen, die wir oben aufgestellt hatten.

Beim *binären Suchen* (3.1) wird in Formel (3.7) $a = 1, b = 2$ und $f(n) = c$ gesetzt, und wir erhalten

$$T(n) = T(1) + \sum_{j=0}^{\log n - 1} c \in \Theta(\log n),$$

wobei $\log n$ stets $\log_2 n$ bedeutet. Für das Sortierverfahren *Mergesort* (3.2) wird in (3.7) $a = b = 2$ und $f(n) = cn$ gesetzt, und es ergibt sich

$$T(n) = n T(1) + \sum_{j=0}^{\log n - 1} 2^j c \frac{n}{2^j} \in \Theta(n \log n),$$

was wir auch Betrachtung des Rekursionsbaums schon herausgefunden hatten. Beim *Closest-Pair-Problem* (3.3) ist ebenfalls $a = b = 2$ aber $f(n) =$

$cn \log n$. Hier erhalten wir

$$\begin{aligned} T(n) &= n T(1) + \sum_{j=0}^{\log n-1} 2^j c \frac{n}{2^j} \log \left(\frac{n}{2^j} \right) \\ &= n T(1) + cn \left(\log^2 n - \frac{(\log n - 1) \log n}{2} \right) \in \Theta(n \log^2 n), \end{aligned}$$

wobei wir die Formel $\sum_{j=0}^m j = \frac{m(m+1)}{2}$ für $m = \log n - 1$ benutzt haben. Wir werden aber später sehen, dass das Problem *Closest Pair* sich noch effizienter lösen lässt.

Betrachten wir abschließend die *Matrixmultiplikation*. Zur Lösung der Rekursion (3.4) setzen wir in Formel (3.7) die Werte $a = 8, b = 2$ und $f(n) = cn^2$ ein und bekommen

$$\begin{aligned} T(n) &= n^3 T(1) + \sum_{j=0}^{\log n-1} 8^j c \left(\frac{n}{2^j} \right)^2 \\ &= n^3 T(1) + cn^2 \sum_{j=0}^{\log n-1} 2^j \in \Theta(n^3), \end{aligned}$$

denn nach der Formel $\sum_{j=0}^m q^j = \frac{q^{m+1}-1}{q-1}$ ist der Wert der Summe in $\Theta(n)$. Die (naive) Rekursion auf 8 Produkte von Teilmatrizen ist also nicht besser als die Schulmethode. Verwendet man aber den Ansatz von Strassen (3.5), so hat a nur den Wert 7, und es folgt aus (3.7)

$$\begin{aligned} T(n) &= n^{\log 7} T(1) + \sum_{j=0}^{\log n-1} 7^j c \left(\frac{n}{2^j} \right)^2 \\ &= n^{\log 7} T(1) + cn^2 \sum_{j=0}^{\log n-1} \left(\frac{7}{4} \right)^j \in \Theta(n^{2.807\dots}), \end{aligned}$$

denn es ist ja $\left(\frac{7}{4}\right)^{\log n} = \frac{n^{\log 7}}{n^2}$ und $\log 7 = 2.8073549\dots$. Dieses Verfahren ist also deutlich schneller als die Schulmethode. Bis heute ist nicht bekannt, was der kleinstmögliche Exponent ω ist, für den zwei $n \times n$ -Matrizen sich in Zeit $O(n^\omega)$ multiplizieren lassen. Der Rekord liegt gegenwärtig bei $\omega = 2.37\dots$

Man hätte die Lösungen der obigen Rekursionsgleichungen auch durch Untersuchung der Rekursionsbäume erhalten können, wie anfangs am Beispiel von Mergesort vorgeführt. Welchem Verfahren man den Vorzug gibt, mag vom Geschmack abhängen; die Rekursionsbäume sind recht anschaulich, die Substitutionsmethode ist mathematisch präziser.

In der Literatur findet sich eine Diskussion der Formel (3.7) unter der Bezeichnung “Mastertheorem”. Zum Beweis verwendet man ganz ähnliche Argumente wie wir sie gerade benutzt haben; siehe z.B. [1].

Theorem 3 *Seien $a \geq 1$ und $b > 1$ Konstanten und $f(n)$ eine nichtnegative Funktion. Dann gilt für die Rekursionsgleichung (3.6):*

1. Wenn $f(n) \in O(n^{\log_b a - \epsilon})$ für $\epsilon > 0$, dann gilt $T(n) \in \Theta(n^{\log_b a})$.
2. Wenn $f(n) \in \Theta(n^{\log_b a})$, dann gilt $T(n) \in \Theta(n^{\log_b a} \log n)$.
3. Wenn $f(n) \in \Omega(n^{\log_b a + \epsilon})$ für $\epsilon > 0$ und $a f(n/b) \leq c \cdot f(n)$ für $c < 1$ und für hinreichend große n , dann gilt $T(n) \in \Theta(f(n))$.

3.1 Typische Schwierigkeiten

Bei der Lösung von Rekursionsgleichungen können u.a. typischerweise die folgenden Probleme auftreten:

1. Der Induktionsbeweis ist aufgrund der Konstanten fehlerhaft.
2. Die Lösungsform ist zu ungenau.
3. Die Lösungsform erfordert eine Variablentransformation.

Wir geben hier Beispiele für die obigen Probleme an.

Korrekte Konstanten: Für

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

könnten wir

$$\begin{aligned} T(n) &\leq \left(c \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor\right) + n \\ &\leq c \cdot n + n \\ &= O(n) \quad \text{Falsch!!} \end{aligned}$$

folgern, da c eine Konstante ist. Der Fehler liegt darin, dass wir nicht exakt $T(n) \leq cn$ bewiesen haben. Wir müssen die Konstante genau angeben.

Ein ganz ähnliches Problem kann auftreten, wenn man die O -Notation leichtfertig zur Behandlung von Summen nicht-konstanter Länge verwendet. Sind zum Beispiel alle Funktionen $f_i(n)$ in $O(g(n))$, so folgt daraus im allgemeinen *nicht*, dass die Funktion $F(n) = \sum_{i=0}^n f_i(n)$ in $O(n g(n))$ liegt. Beispiel: Alle Funktionen $f_i(n) = i$ sind in $O(1)$, aber $F(n)$ ist quadratisch und nicht linear.

Lösungsform ist zu ungenau: Für

$$T(n) = \begin{cases} 1 & \text{falls } n = 1 \\ T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + T(\lceil \frac{n}{2} \rceil) + 1 & \text{falls } n > 1 \end{cases}$$

vermuten wir $T(n) \leq cn$. Die Induktionsannahme ist für $c > 1$ erfüllt. Leider führt

$$\begin{aligned} T(n) &\leq c \lfloor \frac{n}{2} \rfloor + c \lceil \frac{n}{2} \rceil + 1 \\ &= cn + 1 > cn \end{aligned}$$

im Induktionsschluss durch Substitution nicht zum Ziel. Wir müssen hier $T(n) \leq cn - 1$ wählen und dann für die Induktionsannahme $c > 2$.

Lösung durch Variablentransformation:

Für

$$T(n) = \begin{cases} 1 & \text{falls } n = 1 \\ 2T(\lfloor \sqrt{n} \rfloor) + \log n & \text{falls } n > 1 \end{cases}$$

können wir eine geeignete Umformung vornehmen. Durch $m = \log n$ gelangen wir vereinfacht zu

$T(2^m) = 2T(2^{m/2}) + m$ und erhalten durch Umbenennung die Gleichung $S(m) = 2S(m/2) + m$. Da, wie bereits gezeigt $S(m) = O(m \log m)$ gilt erhalten wir

$$T(n) = T(2^m) = S(m) \in O(m \log m) \in O(\log n \log \log n).$$

Kapitel 4

Dynamische Programmierung

Das Prinzip der dynamischen Programmierung kann dann angewendet werden, wenn eine rekursive Problemzerlegung an vielen Stellen die gleiche Teillösung verlangt. In diesem Fall ist es ratsam, die Lösungen dieser Teilprobleme zu speichern und gegebenenfalls darauf zurückzugreifen.

Falls die Teillösungen immer wieder neu berechnet werden, kann der Rechenaufwand exponentiell steigen. Grundsätzlich besteht die dynamische Programmierung aus einem rekursiven Aufruf für Teilprobleme und aus einer Tabellierung von Zwischenergebnissen die, wiederverwendet werden sollen.

Wir betrachten zunächst ein einfaches klassisches Beispiel, das diese wesentlichen Bestandteile bereits charakterisiert. Generell werden durch die dynamische Programmierung meistens Optimierungsprobleme gelöst. In solche Fällen wird dann versucht, zu jedem Teilproblem eine optimale Lösung zu finden.

Dynamische Programmierung ist dann sinnvoll, wenn das sogenannte *Optimalitätsprinzip von Bellman* vorliegt:

Eine optimale Lösung hat stets eine Zerlegung in optimale Teilprobleme.

Ein solches Beispiel wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

4.1 Fibonacci Zahlen

Wir betrachten die Fibonacci-Zahlen, die rekursiv wie folgt definiert werden.

$$\text{fib}(0) = 1 \quad (1)$$

$$\text{fib}(1) = 1 \quad (2)$$

$$\text{fib}(n) = \text{fib}(n-1) + \text{fib}(n-2) \quad (3)$$

Wollen wir nun beispielsweise $\text{fib}(5)$ berechnen, so ergibt sich folgender Rekursionsbaum für die Aufrufe von fib ; siehe Abbildung 4.1(I). Dieser Baum

hat für $\text{fib}(n)$ eine Größe von $\Omega\left(\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n\right)$, wie eine Übungsaufgabe zeigt.

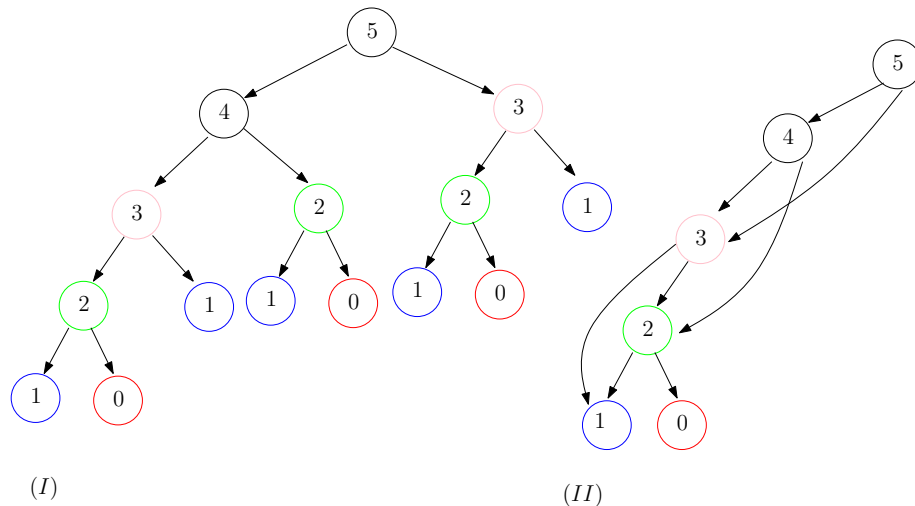


Abbildung 4.1: (I) Der vollständige Rekursionsbaum für $\text{fib}(5)$ enthält einige Redundanzen. (II) Die rekursiven Abhängigkeiten können einfach dargestellt werden.

Offensichtlich ist es ratsam, einige der Ergebnisse zu speichern, die rekursiven Abhängigkeiten können einfacher dargestellt werden, wie in Abbildung 4.1(II). Wir wollen zum Beispiel $\text{fib}(2)$ nicht dreimal wieder aus den Vorgängern neu berechnen, deshalb speichern wir die Werte ab. Es ist hier so, dass sich Teilprobleme überlappen und diese effizient gespeichert werden sollen. Der Abhängigkeitsgraph in Abbildung 4.1(II) hat nur eine Größe von $\Theta(n)$. Das Prinzip der Speicherung von Zwischenergebnissen wird auch *Memoisation* genannt.

Wenn wir nun die Abhängigkeiten nutzen wollen und von oben nach unten (Top-Down) die benötigten Werte $\text{fib}(i)$ bestimmen wollen, könnten wir algorithmisch wie in Algorithmus 4 vorgehen, wobei FibMemo die memoisierende Prozedur 5 ist.

Algorithmus 4 FibTopDown(n)

- 1: $F[1] := 1; F[0] := 1;$
 - 2: **for** $i = 2$ to n **do**
 - 3: $F[i] := 0;$
 - 4: **end for**
 - 5: **RETURN** FibMemo(n, F)
-

Hierbei ist FibMemo die folgende memoisierende Prozedur.

Prozedur 5 FibMemo(n, F)

```

1: if  $F[n] > 0$  then
2:   RETURN  $F[n]$ 
3: end if
4:  $F[n] := \text{FibMemo}(n - 1, F) + \text{FibMemo}(n - 2, F);$ 
5: RETURN  $F[n]$ 

```

In Algorithmus 4 wird das Feld F zunächst mit Nullen initialisiert, und dann beginnt den Aufruf der rekursiven Prozedur 5. Falls der Wert von $F[n]$ bekannt ist, geben wir diesen hier zurück, sonst wird er rekursiv gemäß der Rekursionsformel berechnet.

Laufzeitabschätzung: Wir benötigen im Algorithmus 4 $O(n)$ Zeit für die Initialisierung. Danach wird $\text{FibMemo}(n, F)$ aufgerufen. Jeder Aufruf von $\text{FibMemo}(m, F)$ in Prozedur 5 generiert jeden der Aufrufe $\text{FibMemo}(m - 1, F)$ und $\text{FibMemo}(m - 2, F)$ höchstens einmal. Für jedes $l < n$ wird somit $\text{FibMemo}(l, F)$ höchstens zweimal aufgerufen. Ohne die rekursiven Aufrufe wird nur $O(1)$ Zeit in Prozedur 5 benötigt. Insgesamt gilt für die Laufzeit $T(n) \in O(n)$.

Wir machen nun die folgende Beobachtung. Obwohl im obigen Algorithmus $F[n]$ in einer Top-Down Vorgehensweise errechnet wird, werden die eigentlichen Werte von unten nach oben berechnet. Erst wenn die Rekursion bei $F[1]$ und $F[0]$ angekommen ist, werden neue Felder belegt und die Memoisation setzt ein. Wenn wir beispielsweise $F[5]$ berechnen, rufen wir nacheinander $\text{FibMemo}(5, F)$, $\text{FibMemo}(4, F)$, $\text{FibMemo}(3, F)$, $\text{FibMemo}(2, F)$ und $\text{FibMemo}(1, F)$ auf bis hier zum ersten Mal ein Wert $F[1]$ zurückgegeben wird. Dann wird wieder $\text{FibMemo}(0, F)$ aufgerufen und $F[2]$ belegt. Dann wird $\text{FibMemo}(1, F)$ nochmal aufgerufen und $F[3]$ belegt. Danach rufen wir $\text{FibMemo}(2, F)$ auf und belegen $F[4]$. Dann $\text{FibMemo}(3, F)$ und $F[5]$ wird belegt und ausgegeben.

Deshalb ist es offensichtlich sinnvoller gleich die Werte von unten nach oben (Bottom-Up) zu berechnen. Da für die Berechnung von $F[n]$ nur zwei Werte aus $F[0], \dots, F[n - 1]$ benötigt werden, sparen wir außerdem Speicherplatz. Die obige Memoisation und die Top-Down vorgehensweise ist hier bezüglich des Speicherplatzes nicht effizient.

Insgesamt erhalten wir folgende effiziente dynamische Programmierungslösung.

- Es müssen insgesamt nur $\Theta(n)$ viele Berechnungen durchgeführt werden.
- Die Bottom-Up Berechnung stellt sicher, dass die benötigten Werte stets vorliegen.

Algorithmus 6 FibDynProg(n)

```

1:  $F_{\text{letzt}} := 1; F_{\text{vorletzt}} := 1; F := 1;$ 
2: for  $i = 2$  to  $n$  do
3:    $F := F_{\text{vorletzt}} + F_{\text{letzt}};$ 
4:    $F_{\text{vorletzt}} := F_{\text{letzt}}; F_{\text{letzt}} := F;$ 
5: end for
6: RETURN  $F$ 

```

- Der Speicherplatzbedarf liegt in $O(1)$.

Beachte: Manchmal kann eine Top-Down Vorgehensweise auch sinnvoller sein, wenn zum Beispiel gar nicht alle Werte verwendet werden, die wir Bottom-Up berechnen würden. Die Prinzipien sind also nicht *dogmatisch* zu interpretieren. Es kann auch sinnvoll sein, die Zwischenergebnisse für mehrfache Aufrufe des Algorithmus hintereinander zu speichern.

Grundprinzip der dynamischen Programmierung:

- Formuliere das Problem insgesamt rekursiv. Stelle fest, dass sich Teillösungen überlappen und rekursiv voneinander abhängen.
- Stelle eine Rekursionsgleichung (Top-Down) auf.
- Löse das Problem (Bottom-Up) durch das Ausfüllen von Tabellen mit Teillösungen (Memoisation).
- Ziel: Die Zahl der Tabelleneinträge soll klein gehalten werden.
- Anwendung: Bei einer direkten Ausführung der Rekursion ist mit vielen Mehrfachberechnungen zu rechnen.

Die Korrektheit der dynamischen Programmierung ergibt sich in der Regel dadurch, dass die rekursive Problembeschreibung korrekt durchgeführt wurde. Die Laufzeitanalyse ist in der Regel nicht schwer, da die Algorithmen typischerweise aus geschachtelten FOR-Schleifen bestehen. Das eigentliche Problem der dynamischen Programmierung ist es, eine geeignete rekursive Formulierung des Problems zu finden. Wir werden uns deshalb ein signifikantes Optimierungsbeispiel ansehen in dem auch das *Optimalitätsprinzip von Bellman* zum tragen kommt.

4.2 Matrixmultiplikation

Wir betrachten das Multiplizieren von reellwertigen Matrizen. Seien $A \in \mathbb{R}^{i \times j}$ und $B \in \mathbb{R}^{j \times k}$ Matrizen mit i Zeilen und j Spalten bzw. j Zeilen und

k Spalten, dann beschreibt $A \cdot B$ die Multiplikation dieser beiden Matrizen. Insgesamt sind zur Berechnung von $A \cdot B = C \in \mathbb{R}^{i \times k} \cdot i \cdot k \cdot j$ Floating-Point Berechnungen notwendig. Genauer: Die Matrixeinträge von C werden durch

$$c_{st} = \sum_{l=1}^j a_{sl} \cdot b_{lt}$$

für alle $s = 1, \dots, i$ und alle $t = 1, \dots, k$ berechnet, also $i \cdot j \cdot k$ Multiplikationen und Additionen.

Falls wir nun mehrere Matrizen multiplizieren wollen, also $E = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ dann müssen auch hier die entsprechenden Matrizen gemäß der Größen *zusammenpassen*. Die Anzahl der Spalten von A_i muss der Anzahl der Zeilen von A_{i+1} entsprechen für $i = 1, \dots, n-1$.

Die Matrixmultiplikation ist *assoziativ*, für drei Matrizen $A \in \mathbb{R}^{i \times j}$, $A \in \mathbb{R}^{j \times k}$ und $C \in \mathbb{R}^{k \times l}$ gilt also $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) \in \mathbb{R}^{i \times l}$. Deshalb lassen sich auch allgemeine (zusammenpassende) Ketten beliebig Klammern. Diese Klammerung hat Einfluss auf die Anzahl der Floating-Point Operationen.

Beispiel: Für $A \in \mathbb{R}^{10 \times 50}$, $B \in \mathbb{R}^{50 \times 10}$ und $C \in \mathbb{R}^{10 \times 50}$, benötigt $(A \cdot B) \cdot C$ zuerst $10 \times 50 \times 10$ Operationen für $(A \cdot B)$ und danach $10 \times 10 \times 50$ Operationen für die Multiplikation des Ergebnisses mit C also insgesamt 10000 Operationen. Dahingegen benötigt $A \cdot (B \cdot C)$ zuerst $50 \times 10 \times 50$ Operationen für $(B \cdot C)$ und danach $10 \times 50 \times 50$ Operationen für die Multiplikation des Ergebnisses mit A also insgesamt 50000 Operationen. Die Klammerung $(A \cdot B) \cdot C$ ist also deutlich günstiger.

Allgemeine Problembeschreibung: Bestimme für die Berechnung von $E = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n$ mit Dimensionen $d_0 \times d_1, d_1 \times d_2, \dots, d_{n-1} \times d_n$ die optimale Klammerung für die minimale Anzahl an Operationen.

Dieses Problem wollen wir durch dynamische Programmierung lösen. Deshalb muss zunächst die Lösung rekursiv durch Teillösungen angegeben werden. Falls $M(n)$ alle Möglichkeiten beschreibt, wie man n Matrizen klammert, dann ist $M(n) = \sum_{k=1}^{n-1} M(k) \cdot M(n-k)$ mit $M(1) = 1$. Diese Rekursionsgleichung liegt in $\Omega(2^n)$. Es ist also nicht zweckmäßig, alle Möglichkeiten auszuprobieren.

Wir wollen zunächst herausfinden, wie groß die Anzahl $M(n)$ der Klammern von n Faktoren ist, und dabei auch unsere Kenntnisse über die Lösung von Rekursionen erweitern. Ein Trick besteht darin, die unbekanntenen Zahlen $M(n)$ als Koeffizienten einer formalen Potenzreihe

$$f(X) = \sum_{n=0}^{\infty} M(n) X^n$$

anzusehen und aus der Rekursionsgleichung für die $M(n)$ eine algebraische Gleichung für die sogenannte *erzeugende Funktion* $f(X)$ zu gewinnen. Der

Bequemlichkeit halber setzen wir $M(0) := 0$ und erhalten damit für alle $n \geq 2$ die Rekursionsgleichung

$$M(n) = \sum_{k=0}^n M(k) M(n-k).$$

Genau solche Summen (Faltungen oder Cauchy-Produkte genannt) treten als Koeffizienten von X^n auf, wenn man die Reihe $f(X)$ quadriert:

$$f(X)^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n M(k) M(n-k) \right) X^n \quad (4.1)$$

$$= 0 \cdot X^0 + 0 \cdot X^1 + \sum_{n=2}^{\infty} M(n) X^n \quad (4.2)$$

$$= f(X) - 1 \cdot X^1. \quad (4.3)$$

Die Summation in Gleichung (4.2) darf erst ab $n = 2$ beginnen, denn erst ab da gilt die Rekursionsgleichung. Für $n = 0$ und $n = 1$ hat die innere Summe in (4.1) den Wert 0 wegen $M(0) = 0$.

Lösen der quadratischen Gleichung

$$f(X)^2 - f(X) + X = 0$$

ergibt

$$f(X) = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4X}}{2}, \quad (4.4)$$

und die Wurzel hat die Reihendarstellung

$$\sqrt{1 - 4X} = \sum_{n=0}^{\infty} \binom{2n}{n} \frac{1}{1 - 2n} X^n; \quad (4.5)$$

man kommt darauf, indem man zum Beispiel in der Taylorreihenentwicklung für $\sqrt{1 + X}$ die Variable X durch $-4X$ ersetzt. Der Nenner in (4.5) wird für $n \geq 1$ negativ. Deshalb muss in (4.4) das Minuszeichen verwendet werden, und man erhält

$$\begin{aligned} f(X) &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \binom{2n}{n} \frac{1}{1 - 2n} X^n \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \binom{2n}{n} \frac{1}{2n - 1} X^n, \end{aligned}$$

weil die Summe für $n = 0$ den Koeffizienten 1 hat. Durch Koeffizientenvergleich ergibt sich jetzt

$$M(n) = \frac{1}{2} \binom{2n}{n} \frac{1}{2n - 1}.$$

Zum Beispiel kommt für $n = 4$ der Wert $M(4) = 5$ heraus, und tatsächlich gibt es genau 5 Arten, um 4 Faktoren zu beklammern, nämlich

$$((ab)c)d, (a(bc))d, (ab)(cd), a((bc)d), a(b(cd)).$$

Die Zahl $C_{n-1} := M(n)$ wird die $n - 1$ -te *Catalan'sche Zahl* genannt. Um ihre Größe abzuschätzen, können wir die *Stirling-Formel*

$$n! \sim \sqrt{2\pi n} \frac{n^n}{e^n}$$

als asymptotische Näherung für die Fakultät anwenden (was bedeutet, dass der Quotient der beiden Seiten gegen 1 konvergiert,) und erhalten

$$\binom{2n}{n} \sim \sqrt{4\pi n} \frac{(2n)^{2n}}{e^{2n}} \frac{1}{2\pi n} \frac{(e^n)^2}{(n^n)^2} \in \Theta\left(\frac{2^{2n}}{\sqrt{n}}\right).$$

Also ist $M(n) \in \Theta\left(\frac{4^n}{n\sqrt{n}}\right)$ eine exponentiell wachsende Größe.

Wir wollen nun optimale Teillösungen wiederverwenden. Sei nun $K(l, k)$ der minimale Aufwand bzw. die optimale Klammerung für $A_l \cdot A_{l+1} \cdots A_k$. Zum Beispiel zerlegt sich zu Beginn ein erster Multiplikationsschritt für die Stelle s , d.h. der minimale Aufwand für $(A_1 \cdot A_2 \cdots A_s) \cdot (A_{s+1} \cdot A_{s+2} \cdots A_n)$, rekursiv in die Kosten

$$K(1, s) + K(s + 1, n) + d_0 \cdot d_s \cdot d_n \quad (4.6)$$

Das Ziel ist nun, das optimale s zu finden, und das wollen wir rekursiv beschreiben.

- Offensichtlich ist $K(l, l) = 0$ für $l = 1, \dots, n$
- Die Dimension einer Teilkette $A_l \cdot A_{l+1} \cdots A_k$ ist $d_{l-1} \times d_k$.
- Die Kosten für ein Teilen bei s sind $K(l, s) + d_{l-1} \cdot d_s \cdot d_k + K(s + 1, k)$

Da wir $K(1, n)$ minimieren wollen, erhalten wir insgesamt:

$$K(l, k) = \begin{cases} 0 & \text{falls } l = k \\ \min_{l \leq s \leq k-1} K(l, s) + d_{l-1} \cdot d_s \cdot d_k + K(s + 1, k) & \text{falls } l < k \end{cases} \quad (4.7)$$

Wir stellen fest, dass dynamische Programmierung geeignet ist:

- Wiederverwendung: Hier werden viele Teilprobleme mehrfach benutzt, zum Beispiel $K(1, 2)$ wird verwendet von $K(1, 3), K(1, 4), \dots, K(1, n)$.

- Beschränkte Anzahl: Für alle $1 \leq l < k \leq n$ gibt es genau ein Teilproblem, also insgesamt $\Theta(n^2)$ viele.
- Bearbeitungsreihenfolge: Falls alle Werte $K(l, s)$ und $K(s + 1, k)$ bekannt sind, kann $K(l, k)$ in Zeit $O(k - l) \in O(n)$ berechnet werden.

Die geschickte Auswertung läßt sich sehr gut durch eine Matrix beschreiben. Wir verwenden ein Array $K[1..n, 1..n]$.

Zuerst werden die Diagonalen eingetragen, dann berechnen wir sukzessive die Nebendiagonalen von rechts unten nach links oben, zu jedem Zeitpunkt sind für $K(l, k)$ alle Werte $K(l, s)$ und alle Werte $K(s + 1, k)$ für $l \leq s$ und $s + 1 \leq k$ berechnet worden; siehe Abbildung 4.2.

	1	2	3	4	5
1	0	[1, 2]	[1, 3]	??	
2		0	[2, 3]	[2, 4]	[2, 5]
3			0	[3, 4]	[3, 5]
4				0	[4, 5]
5					0

Abbildung 4.2: Die Nebendiagonalen können von unten nach oben berechnet werden. Nachdem zwei Nebendiagonalen bereits berechnet wurden beginnen wir die Berechnung der dritten Nebendiagonalen. Die benötigten Werte liegen bereits vor.

Korrektheit: Am Ende der Auswertung wird der Wert $[1, n]$ die minimale Anzahl an Operationen enthalten, wir haben den Wert rekursiv genauso festgelegt. Wir wollen uns natürlich auch die optimale Klammerung merken. Dazu müssen wir uns nur für jeden berechneten Matrixeintrag den jeweils optimalen Index $s[l, k]$ merken. Falls beispielsweise der optimale Index für die Berechnung von $[1, 5]$ bei $s = 2$ liegt, ist die Klammerung $(A_1 A_2)(A_3 A_4 A_5)$ rekursiv die beste und wir speichern den Wert $s[1, 5] = 2$. Die optimale Klammerung von $(A_1 A_2)$ zur Berechnung von $[1, 2]$ ist trivialerweise $s = 1$ also $s[1, 2] = 1$. Rekursiv haben wir auch die optimale Klammerung aus

$[3, 5]$ gespeichert, diese kann $s = 3$ oder $s = 4$ sein, somit ist $s[3, 5] \in \{3, 4\}$. Insgesamt erhalten wir so die optimale Klammerung.

Laufzeitanalyse und Speicherplatz: Insgesamt wird Speicherplatz von $O(n^2)$ für beide Matrizen (Einträge $K[l, k]$ und $s[l, k]$) verwendet. Für die Berechnung eines Eintrages $K[l, k]$ und der Klammerung $s[l, k]$ wird ein Aufwand von $O(k-l) \in O(n)$ benötigt. Da wir $O(n^2)$ viele Aufrufe haben, ergibt sich ein Gesamtaufwand von $O(n^3)$.

Übungsaufgabe: Formulieren Sie einen Pseudocode, der den obigen Algorithmus beschreibt.

4.3 Rucksackproblem

Wir betrachten das Problem des optimalen Befüllens eines Rucksackes mit Gesamtgewichtskapazität G . Dazu sei eine Menge von n Gegenständen a_i mit Gewicht $g_i > 0$ und Wert w_i gegeben. Wir wollen den Rucksack *optimal* füllen.

Aufgabenstellung: Bestimme eine Teilmenge $\{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}\}$ der Elemente aus $\{a_1, \dots, a_n\}$, so dass $\sum_{j=1}^k g_{i_j} \leq G$ gilt und $\sum_{j=1}^k w_{i_j}$ maximal ist. Bestimme also den Wert:

$$w_{\max} = \max_{\{a_{i_1}, a_{i_2}, \dots, a_{i_k}\} \subseteq \{a_1, \dots, a_n\}} \left\{ \sum_{j=1}^k w_{i_j} \mid \sum_{j=1}^k g_{i_j} \leq G \right\}.$$

Wenn wir dieses Problem rekursiv lösen wollen, können wir naiv einen Rekursionsbaum angeben, der in jeder Ebene i die Entscheidung für den i -ten Gegenstand berücksichtigt; siehe Abbildung 4.3. Dadurch werden alle möglichen Fälle beschrieben. Das ist aber nicht effizient, da der Baum eine exponentielle Größe hat.

Wir betrachten deshalb die folgende Vereinfachung und wollen Teilergebnisse verwenden. Sei dazu $W(i, j)$ der optimale Wert falls nur die ersten i Gegenstände betrachtet werden und der Rucksack die Kapazität j hat. Am Ende soll $w_{\max} = W(n, G)$ berechnet werden.

Wir können $W(i, j)$ rekursiv wie folgt angeben. Die Frage stellt sich, ob bei Lösungen mit den ersten $i-1$ Gegenständen der i -te Gegenstand hinzugenommen werden soll oder nicht. Falls nicht, bleibt der Wert bei $W(i-1, j)$ stehen. Falls ja, kommt der Wert w_i hinzu. Allerdings müssen wir zur Berechnung von $W(i, j)$ dann rekursiv auf $W(i-1, j-g_i)$ zurückgreifen, $W(i-1, j-g_i) + w_i$ ist dann die Lösung. Der maximale Wert aus diesen beiden Fällen ergibt den Wert $W(i, j)$.

Falls j negativ wird, ist das Ergebnis ungültig. Das wird durch $W(i, j) = -\infty$

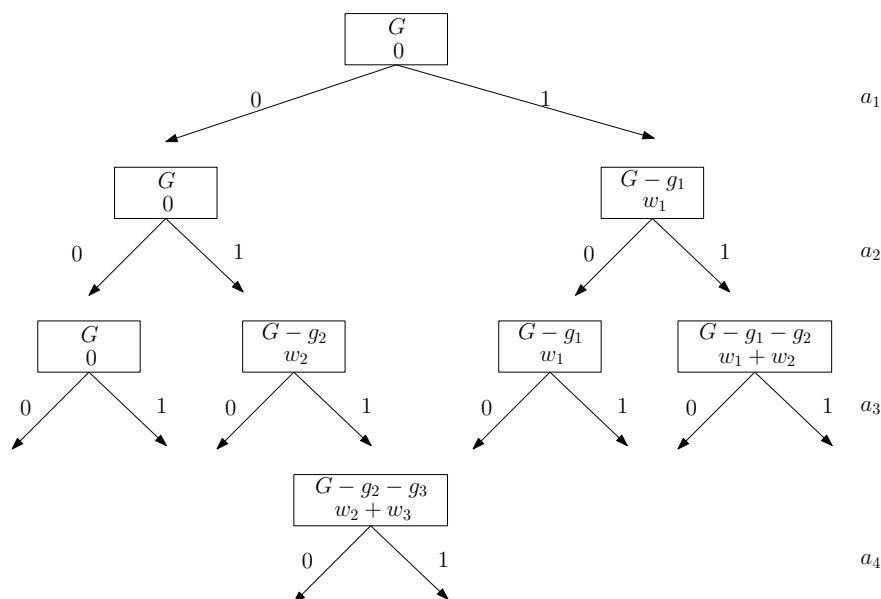


Abbildung 4.3: In Ebene i wird die Entscheidung für den i -ten Gegenstand getroffen. Der Baum hat exponentielle Größe.

ausgedrückt. Falls i null wird, setzen wir den Wert $W(i, j)$ auf null, da kein Gegenstand verwendet wird.

Wir kommen zu folgender Rekursionsgleichung, die wir danach Bottom-Up lösen wollen.

$$W(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{falls } i = 0 \\ -\infty & \text{falls } j < 0 \\ \max\{W(i-1, j), W(i-1, j-g_i) + w_i\} & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.8)$$

Nun wollen wir wiederum die Werte $W(i, j)$ in einem Array $W[0..n, 0..G]$ berechnen und initialisieren $W[0, j]$ und $W[i, 0]$ mit 0. Aus (4.8) ergibt sich offensichtlich, dass wir die Werte am besten Zeilenweise von links nach rechts und mit steigender Zeilenzahl berechnen. Zur Berechnung von $W(i, j)$ muss $W(i-1, j)$ und $W(i-1, j-g_i)$ vorliegen.

Beispiel: Für $n = 5$ notieren $a_i = (g_i, w_i)$ mit $a_1 = (6, 4)$, $a_2 = (1, 2)$, $a_3 = (2, 3)$, $a_4 = (5, 8)$ und $a_5 = (9, 10)$ mit $G = 12$.

Wir beschreiben einen Teilausschnitt der zugehörigen Matrix während der Berechnung. Zur Berechnung von $W(2, 7)$ wird $W(1, 7) = 4$ (ohne a_2) und $W(1, 7-g_2) + w_2 = W(1, 6) + 2 = 4 + 2 = 6$ (mit a_2) verglichen. $W(1, 7)$ ist

also gleich 6. Zeilenweise wird die Matrix von links nach rechts gefüllt.

$$\begin{array}{cccccccccccccc}
 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\
 0 & \left(\begin{array}{cccccccccccc}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\
 0 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & W(2,7)? & x & x & x & x & x & x \\
 0 & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x \\
 0 & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x \\
 0 & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x & x
 \end{array} \right)
 \end{array}$$

Auch für diesen Fall wollen wir uns am Ende die optimale Lösung generieren können. Dazu merken wir uns in einer zweiten Matrix $L[0..n, 0..G]$, woraus $W(i, j)$ entstanden ist. Zum Beispiel merken wir uns für $W(1, 7)$ das a_2 benutzt wird und der Plan aus $L(1, 6)$. Diese Information wird in $L(2, 7)$ gespeichert, zum Beispiel durch $L[2, 7] := (a_2, [1, 6])$. In $L(1, 6)$ steht dann wiederum, dass a_1 benutzt wird.

Korrektheit: Offensichtlich läßt sich nach Berechnung von $W(n, G)$ und $L(n, G)$ der Lösungsplan rekursiv angeben, und das optimale Packen ist berechnet worden. Die Lösung ist rekursiv genauso formuliert worden.

Wir geben hier nochmal explizit die Formulierung im Pseudocode in Algorithmus 7 an und analysieren dann die Korrektheit und die Laufzeit.

Algorithmus 7 RucksackDynProg($a_i = (g_i, w_i), i = 1, \dots, n$, Gesamtgew.: G)

```

1: for  $i = 0$  to  $G$  do
2:    $W[0, i] := 0$ ;
3: end for
4: for  $j = 0$  to  $n$  do
5:    $W[j, 0] := 0$ ;
6: end for
7: for  $i = 1$  to  $n$  do
8:   for  $j = 1$  to  $G$  do
9:     if  $(j - g_i) < 0$  then
10:       $W[i, j] := W[i - 1, j]$ ; //  $a_i$  passt gar nicht rein
11:     else
12:       $W[i, j] := \max\{W[i - 1, j], W[i - 1, j - g_i] + w_i\}$ ;
13:     end if
14:   end for
15: end for
16: RETURN  $W[n, G]$ 

```

Laufzeit und Speicherplatz: In Algorithmus 7 werden nach der Initialisierung der Werte $W[i, 0]$ und $W[0, j]$ zwei *FOR*-Schleifen geschachtelt, wobei

die Äußere von 1 bis n läuft und die Innere von 1 bis G . Im Inneren ist der Aufwand $\Theta(1)$. Also ist der Aufwand insgesamt in $O(n \cdot G)$ und für das Array benötigen wir $O(n \cdot G)$ Speicherplatz.

Übungsaufgabe: Füllen Sie die Matrizen $W[0..5, 0..12]$ und $L[0..5, 0..12]$ für das obige Beispiel. Formulieren Sie die algorithmische Lösung im Pseudocode auch für die Belegung der Matrix L zur Rekonstruktion der optimalen Lösung.

Bemerkungen: Der obige Algorithmus ist für ganzzahlige Gewichte entworfen worden, und seine Laufzeit hängt polynomiell von der Anzahl n der Gegenstände und der Größe G des Rucksacks ab. Während n linear in der Größe der Problem Instanz ist, gilt dies für G nicht, denn die Zahl G wird ja in der Eingabe durch $\log_2 G$ viele Bits dargestellt. Deshalb ist der oben vorgestellte Algorithmus *keine* polynomielle Lösung für das Rucksackproblem, und man vermutet, dass es keine gibt. Darauf werden wir im kommenden Semester noch ausführlicher eingehen.

Das Rucksackproblem wird deutlich einfacher, wenn die Gegenstände beliebig teilbar sind (Zucker, Mehl, ...). Dazu mehr im nächsten Kapitel.

Kapitel 5

Greedy Algorithmen

Neben den bereits behandelten klassischen Entwurfsmethoden der Algorithmik gibt es eine weitere Methode, die sich auf die intuitive Idee stützt, dass lokal optimale Berechnungsschritte auch global optimal sind. Es geht also auch in diesem Kapitel um Optimierungsprobleme. Der lokal optimale Berechnungsschritt soll dabei möglichst nicht wieder rückgängig gemacht werden. Außerdem werden keine Alternativen ausprobiert. In jedem Schritt wird der nächste lokal optimale Schritt berechnet und tatsächlich ausgeführt. In diesem Sinne nennt man diese Vorgehensweise auch *iterativ*. Die Kosten für einen *Iterationsschritt* sollen klein gehalten werden. Das ist meistens möglich, da wir zunächst nicht auf die Gesamtlösung achten. Zur Bestimmung des nächsten Schrittes wird allerdings häufig eine Liste von Kandidaten für den nächsten Schritt vorgehalten. Diese Liste wird nach dem Schritt aktualisiert. Greedy-Verfahren sind dennoch in der Regel einfach zu beschreiben und benötigen wenig Rechenaufwand.

Dieses *Greedy*-Prinzip wird leider nicht immer die optimale Lösung erzielen, drei Szenarien sind denkbar:

1. Wir erhalten die optimale Lösung.
2. Wir erhalten nicht die optimale Lösung, aber wir können zumindest beweisen, dass die Lösung im Vergleich zum Optimum nicht beliebig schlecht ist.
3. Die Lösung ist im Vergleich zum Optimum beliebig schlecht.

Zusammengefasst ergibt sich folgendes Grundprinzip der Greedy-Vorgehensweise:

- Lokal optimale Schritte werden iterativ ausgeführt.
- Eine Kandidatenliste wird dafür bereithalten und ggf. aktualisiert.

- Es werden keine Alternativen ausprobiert oder Zwischenergebnisse tabellarisch abgespeichert.
- Die Kosten für den nächsten Schritt sind nicht sehr hoch.
- Die Lösung kann je nach Aufgabenstellung optimal, beliebig schlecht oder approximativ sein.

5.1 Rucksackproblem

Das bereits bekannte Rucksackproblem aus dem letzten Abschnitt läßt sich leicht in Greedy-Manier formulieren. Lokal optimal erscheint dabei, dass wir den Gegenstand mit dem jeweiligen besten Preis/Gewichtverhältnis als erstes Einfügen.

Beispiel: Für $n = 5$ notieren $a_i = (g_i, w_i)$ mit $a_1 = (6, 4)$, $a_2 = (1, 2)$, $a_3 = (2, 3)$, $a_4 = (5, 8)$ und $a_5 = (9, 10)$ mit $G = 12$. Die optimale Lösung ist hier offensichtlich (a_5, a_2, a_3) mit einem Wert von 15.

Zur Erinnerung: die Gegenstände haben ein Gewicht von g_i und einen Wert von w_i . Deshalb bestimmen wir zunächst eine Kandidatenliste gemäß des Verhältnisses $v_i = \frac{w_i}{g_i}$. Wir haben $v_1 = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}$, $v_2 = \frac{2}{1} = 2$, $v_3 = \frac{3}{2} = 1.5$, $v_4 = \frac{8}{5}$ und $v_5 = \frac{10}{9}$. Das ergibt folgende Sortierung $v_2 > v_4 > v_3 > v_5 > v_1$. Ein Greedy Algorithmus wählt sukzessive den aktuell besten Kandidaten und revidiert diese Entscheidung nicht. Für den Algorithmus 8 nehmen wir zur einfachen Beschreibung an, dass die Gegenstände nach dem Preis/Gewichtsverhältnis sortiert vorliegen, also $v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_n$.

Algorithmus 8 RucksackGreedy($v_i = \frac{w_i}{g_i}$ nach Größe sortiert, Gewicht: G)

```

1: for  $i = 1$  to  $n$  do
2:   if  $g_i \leq G$  then
3:      $\lambda_i := 1$ ;  $G := G - g_i$ ;
4:   else
5:      $\lambda_i := 0$ ;
6:   end if
7: end for
8: RETURN  $\sum_{i=1}^n \lambda_i w_i$ 

```

Mit einer entsprechenden Umbenennung bedeutet das in unserem Beispiel, dass der Algorithmus sukzessive a_2 und a_4 und a_3 auswählt und dann die Kapazität $12 - 1 - 5 - 2 = 4$ verbleibt. Nun kann a_5 und a_1 nicht mehr verwendet werden. Insgesamt ergibt sich ein Gesamtwert von $2 + 8 + 3 = 13$. Der Greedy-Algorithmus liefert hier also keine optimale Lösung.

Schlimmer noch, wir können ein ganz einfaches Beispiel angeben, indem der Greedy-Algorithmus beliebig schlecht wird.

Worst-Case Beispiel: Sei $a_1 = (1, 1)$ und $a_2 = (G, G - 1)$. Dann ist $v_1 = 1 > \frac{G-1}{G} = v_2$. Der Greedy Algorithmus legt $\lambda_1 = 1$ und $\lambda_2 = 0$ fest und das Ergebnis ist 1. Optimal wäre $\lambda_1 = 0$ und $\lambda_2 = 1$ mit Ergebnis $G - 1$. Da G beliebig groß werden kann, wird das Verhältnis zwischen dem Wert der optimalen Lösung und dem Wert der Greedy-Lösung, $\frac{G-1}{1}$, beliebig groß.

Die Situation ändert sich grundlegend, wenn die zu packenden Gegenstände beliebig teilbar sind. Dann können wir von jedem $a_i = (g_i, w_i)$ einen beliebigen Anteil $\lambda_i \in [0, 1]$ in den Rucksack packen, der $\lambda_i \cdot g_i$ wiegt und den Wert $\lambda_i \cdot w_i$ beiträgt. In Algorithmus 8 wird dann in Zeile 5 die Zahl λ_i nicht auf null gesetzt sondern auf G/g_i . Die Gegenstände a_1, \dots, a_{i-1} werden also "ganz" eingepackt, von a_i aber nur so viel, wie gerade noch in den Rucksack hineinpasst.

Bei obigem Beispiel wird also zunächst $a_1 = (1, 1)$ ganz verpackt und von $a_2 = (G, G - 1)$ der Anteil $\lambda_2 = \frac{G-1}{G}$. Damit ist der Rucksack voll und hat den Wert $1 + \lambda_2(G - 1)$, also mehr als zuvor. Dass dieses gute Verhalten des Greedy-Verfahrens beim Rucksackproblem kein Einzelfall ist, zeigt folgendes Theorem.

Theorem 4 *Bei beliebig teilbaren Gegenständen findet der Greedy-Algorithmus in Zeit $O(n \log n)$ stets eine optimale Lösung für das Rucksackproblem.*

Beweis. Es wird zunächst Zeit $O(n \log n)$ gebraucht, um die Gegenstände $a_i = (g_i, w_i)$ nach absteigendem Nutzen $v_i = \frac{w_i}{g_i}$ zu sortieren; danach läuft Algorithmus 8 in linearer Zeit. Zum Nachweis der Optimalität stellen wir uns vor, wir hätten einen Gewichtsanteil γ des Rucksacks mit a_i oder a_j zu füllen, und es sei

$$\frac{w_i}{g_i} = v_i > v_j = \frac{w_j}{g_j}.$$

Nehmen wir a_j , so passt der Anteil $\frac{\gamma}{g_j}$ hinein und liefert den Wert $\frac{\gamma}{g_j} \cdot w_j$. Von a_i können wir den Anteil $\frac{\gamma}{g_i}$ einpacken und erhalten den Wert

$$\frac{\gamma}{g_i} \cdot w_i > \frac{\gamma}{g_j} \cdot w_j.$$

Also sollten stets Gegenstände mit maximalem Nutzen hinzugenommen werden. \square

Es gibt also Fälle, in denen der Greedy-Ansatz versagt, und andere, in denen er optimale Lösungen findet. Manchmal kommt er dem Optimum sehr nahe, ohne es ganz zu erreichen. Um die *Approximationsgüte* für eine Problemklasse Π und die Instanzen $P \in \Pi$ zu messen, betrachten wir folgende Abschätzungen.

Sei Π ein Optimierungsproblem. Sei $Greed(P)$ der Gewinn der Greedy-Lösung und $OPT(P)$ der Gewinn der optimalen Lösung für eine Problem Instanz $P \in \Pi$. Gilt für ein

Maximierungsproblem Π :

$$Greed(P) \geq \frac{1}{C} \cdot OPT(P) - A$$

Minimierungsproblem Π :

$$Greed(P) \leq C \cdot OPT(P) + A$$

für alle Instanzen $P \in \Pi$, so sagen wir, dass der Greedy-Algorithmus eine C -Approximation der optimalen Lösung liefert. Wichtig ist der *Approximationsfaktor* C , der nur von Π , nicht aber von P abhängen darf. Die additive Konstante A ist dazu da, konstanten Mehraufwand abzuschätzen; dazu gleich ein Beispiel beim Bepacken von Behältern.

Diese Definitionen kann man nicht nur für den Greedy-Algorithmus, sondern für beliebige Lösungsverfahren treffen. Solche *Approximationsalgorithmen* spielen eine wichtige Rolle bei der Lösung schwerer Probleme.

5.2 Das optimale Bepacken von Behältern

Das Problem des optimalen Bepackens von mehreren Behältern gleicher Gewichtskapazität G mit verschiedenen Paketen (Binpacking) gestaltet sich wie folgt. Die Pakete p haben keinen Preis sondern lediglich verschiedene Gewichte g . Insgesamt haben wir zunächst n Behälter b_j für $j = 1, \dots, n$ mit Kapazität G und n Gegenstände p_i mit Gewichten g_i für $i = 1, \dots, n$. Wir können $g_i \leq G$ annehmen, sonst brauchen wir einen Gegenstand gar nicht zu betrachten.

Ziel der Aufgabenstellung ist es, die Anzahl der benötigten Behälter zu minimieren. Im Prinzip bestimmen wir eine Zuordnung $Z : \{1, \dots, n\} \mapsto \{1, \dots, k\}$ die jedem p_i einen Behälter b_j über $Z(i) = j$ zuweist. Wir suchen das minimale k , für das es eine gültige Zuordnung Z gibt. Gültig heißt, dass die Summe aller g_i mit $Z(i) = j$ nicht größer als G ist.

Aufgabenstellung: Minimiere k , so dass eine Zuordnung $Z : \{1, \dots, n\} \mapsto \{1, \dots, k\}$ existiert mit

$$\sum_{Z(i)=j} g_i \leq G \text{ für alle } i \in \{1, \dots, n\}. \quad (5.1)$$

Für eine Greedystrategie benutzen wir hier keine besondere Kandidatenliste, wir nehmen die Pakete so wie sie gegeben sind in der Reihenfolge

a_1, a_2, \dots, a_n . Die Annahme ist wirklich sinnvoll, da wir uns vorstellen können, dass die Pakete so vom Band kommen oder so geliefert werden und zugeordnet werden müssen.

Wir berücksichtigen nicht, welche Pakete in der Zukunft auftreten. Die einzige Entscheidung die wir treffen, ist also, in welchen Behälter b_j legen wir das Paket a_i nachdem bereits die Pakete a_1, a_2, \dots, a_{i-1} einsortiert wurden. Der maximale Index j soll klein gehalten werden. Naheliegend sind die folgenden beiden Vorgehensweisen. Angenommen, wir haben bereits a_1, a_2, \dots, a_{i-1} Pakete zugeordnet. Platziere nun a_i .

First-Fit: Unter allen Behältern wähle den ersten aus, in den a_i noch hineinpasst. Genauer: Finde kleinstes j , so dass $g_i + \sum_{1 \leq l \leq (i-1), Z(l)=j} g_l \leq G$ gilt.

Best-Fit: Packe a_i in die aktuell vollste Kiste, in die es noch hinein passt. Genauer: Finde ein j , so dass $g_i + \sum_{1 \leq l \leq (i-1), Z(l)=j} g_l \leq G$ gilt und dabei $\sum_{1 \leq l \leq (i-1), Z(l)=j} g_l$ maximal ist.

Beispiel: Betrachten wir Behälter der Kapazität $G = 10$ und 7 Gegenstände der Größen $g_1 = 2, g_2 = 5, g_3 = 4, g_4 = 7, g_5 = 1, g_6 = 3$ und $g_7 = 8$ dann belegt First-Fit die Behälter wie in Abbildung 5.1 und benötigt 4 Behälter. Optimal wäre es gewesen, drei Behälter jeweils mit $(g_1, g_7), (g_2, g_3, g_5)$ und (g_4, g_6) zu belegen. Beide Algorithmen lassen sich mit einer Laufzeit von

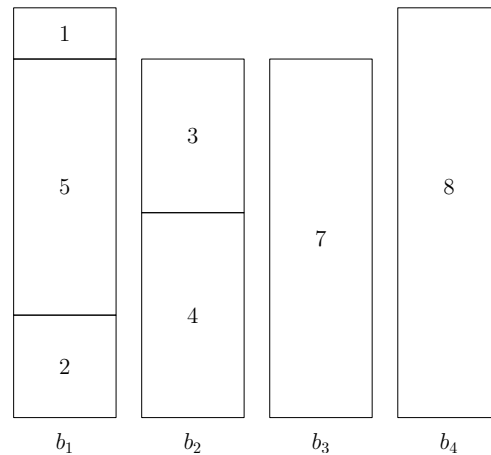


Abbildung 5.1: First-Fit für $g_1 = 2, g_2 = 5, g_3 = 4, g_4 = 7, g_5 = 1, g_6 = 3$ und $g_7 = 8$ benötigt einen Behälter zu viel.

$O(n^2)$ realisieren. Beispielsweise wird bei First-Fit für alle Behälter j der aktuelle Belegungswert gespeichert und wir überprüfen sukzessive von $j =$

$1, \dots, n$ in welchen Behälter der Gegenstand a_i noch hineinpasst. Dieses Verfahren wird wiederum sukzessive für $i = 1, \dots, n$ für die Gegenstände a_i durchgeführt. Insgesamt werden zwei FOR-Schleifen geschachtelt, die von $j = 1, \dots, n$ respektive von $i = 1, \dots, n$ laufen. Ähnlich kann bei Best-Fit vorgegangen werden.

Wir wollen nun zeigen, dass beide Algorithmen eine 2-Approximation der optimalen Anzahl der benötigten Behälter liefern. Wir gehen auch hier der Einfachheit halber davon aus, dass die Gegenstände ganzzahliges Gewicht haben.

Lemma 5 *Für das Binpacking Problem liefern die Algorithmen First-Fit und Best-Fit eine 2-Approximation für die optimale (minimale) Anzahl an benötigten Behältern.*

Beweis. Wir betrachten zunächst den Algorithmus First-Fit. Angenommen, er benötigt k Behälter, während die optimale Lösung mit k_{\min} Behältern auskommt. Wesentlich ist nun die folgende

Beobachtung: Alle bis auf höchstens einen der von First-Fit benutzten Behälter sind mindestens halb voll.

Denn angenommen, es gäbe am Schluss zwei höchstens halb volle Behälter b_i und b_j mit $i < j$. Sei a der erste Gegenstand, der in b_j abgelegt wurde. Er hat höchstens das Gewicht $G/2$ (weil er in dem höchstens halb vollen Behälter b_j liegt) und hätte deshalb in b_i noch Platz gehabt (weil b_i selbst am Ende höchstens halb voll ist). Das ist ein Widerspruch zu $i < j$, denn FirstFit hätte ja erst testen müssen, ob a in b_i hineinpasst.

Aus der Beobachtung folgt:

$$\text{Gesamtgewicht} \geq (k - 1) \cdot \frac{G}{2},$$

also

$$k \leq 2 \frac{\text{Gesamtgewicht}}{G} + 1 \leq 2k_{\min} + 1,$$

denn auch die optimale Lösung benötigt mindestens so viele Behälter wie das Gesamtgewicht aller Gegenstände, geteilt durch die Behälterkapazität. Man sieht, dass hier tatsächlich eine additive Konstante in der Abschätzung auftritt.

Für BestFit wird die obige Beobachtung fast genauso bewiesen: Angenommen, Behälter b_i ist schon benutzt worden, wenn der erste Gegenstand a in b_j abgelegt wird. Dann wäre für a auch in b_i oder in einem anderen, noch volleren Behälter Platz gewesen. \square

Durch schärfere Analyse lässt sich zeigen, dass FirstFit und BestFit sogar $\frac{17}{10}$ -Approximationen liefern, aber nichts Besseres. Wir zeigen jetzt, wie man die beiden Verfahren so “ärgern” kann, dass sie $\frac{5}{3}$ mal so viele Behälter brauchen wie die optimale Lösung.

Lemma 6 *Für das Binpacking Problem und die Algorithmen First-Fit und Best-Fit gibt es Beispiel-Sequenzen, die beliebig lang sein können und für die die Lösung aus den beiden Algorithmen niemals besser sein kann als $\frac{5}{3}$ mal die optimale Lösung.*

Beweis. Sei dazu $n = 18m$ und $G = 131$. Gegenstände mit Gewicht 20 plus Gewicht 45 plus Gewicht 66 füllen genau einen Behälter.

Insgesamt betrachten wir $18m$ Gegenstände, wobei in der Sequenz der Gegenstände

1. ... die ersten $6m$ ein Gewicht $g_i = 20$ für $i = 1, \dots, 6m$,
2. ... die nächsten $6m$ ein Gewicht von $g_i = 45$ für $i = 6m + 1, \dots, 12m$,
3. ... und die letzten $6m$ ein Gewicht von $g_i = 66$ für $i = 12m + 1, \dots, 18m$

besitzen. Wir haben also drei Sequenzblöcke 1., 2. und 3. und exakt $6m$ Behälter reichen aus.

Wir zeigen, dass für diese Sequenz First-Fit und Best-Fit jeweils $10m$ Behälter befüllen. Beide Algorithmen füllen für den ersten Sequenzblock sukzessive die ersten m Behälter mit Gewichten $6 \times 20 = 120$. Jeder Block hat eine Restkapazität von 11. Danach werden für den zweiten Block $3m$ Behälter mit jeweils 2×45 Gewicht und Restkapazität von 41. Danach werden $6m$ Behälter mit Gewicht 66 gefüllt und Restkapazität jeweils 65.

Insgesamt ergibt sich in beiden Fällen ein Quotient von $\frac{Greedy(P)}{OPT(P)} = \frac{10m}{6m} = \frac{5}{3}$. \square

Wenn die Sequenzen aus dem obigen Beweis in absteigend sortierter Reihenfolge vorgelegen hätten, dann hätten beide Algorithmen die optimale Belegung mit $6m$ Behältern erzielt.

5.3 Aktivitätenauswahl

Wir betrachten das Problem, dass eine Ressource für verschiedene zeitlich beschränkte Aktivitäten benutzt werden soll. Die Aktivitäten können die Ressource nicht zeitgleich benutzen. Es sollen aber soviel wie möglich Aktivitäten eingeplant werden. Beispielsweise soll die Belegung eines Konzertsaals für verschiedene Veranstaltungen geplant werden. Allgemein gibt es eine Menge

von n Aktivitäten $a_i = (s_i, t_i)$ die jeweils durch einen Starttermin, s_i , und einen Endtermin, t_i , mit $s_i < t_i$ bestimmt sind.

Zwei Aktivitäten a_i und a_j sind kompatibel, wenn die Intervalle $[s_i, t_i)$ und $[s_j, t_j)$ nicht überlappen.

Aufgabenstellung Aktivitäten-Auswahl: Für eine Menge von n Aktivitäten $a_i = (s_i, t_i)$ für $i = 1, \dots, n$ finde die maximale Menge gegenseitig kompatibler Aktivitäten. Mit maximal ist hier die Anzahl der einplanbaren Aktivitäten gemeint.

Zunächst ist klar, dass wir die Aktivitäten zwischen dem kleinsten Startzeitpunkt $S = \min\{s_i | i = 1, \dots, n\}$ und dem größten Endzeitpunkt $T = \max\{t_i | i = 1, \dots, n\}$ einplanen müssen. Eine naheliegende Greedy-Idee ist, die bislang nicht verwendete Zeit zu maximieren. Deshalb sortieren wir die Aktivitäten nach den Endzeitpunkten t_i . Nehmen wir an, dass wir die Folge a_i bereits so vorliegen haben, das heißt $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$.

Greedy-Strategie: Wähle stets die Aktivität, die den frühesten Endzeitpunkt hat und noch legal eingeplant werden kann.

Beispiel:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s_i	1	3	0	5	3	5	6	8	8	2	12
t_i	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Hier sind zum Beispiel $\{a_3, a_9, a_{11}\}$ kompatibel, $\{a_1, a_4, a_8, a_{11}\}$ ist eine maximale kompatible Teilmenge, die durch die Greedy Strategie ausgewählt wird. Auch $\{a_2, a_4, a_9, a_{11}\}$ ist optimal bezüglich der Anzahl der einplanbaren Aktivitäten.

Algorithmisch beschreiben wir die Greedy-Strategie ganz einfach wie in Algorithmus 9.

Algorithmus 9 AktivitätenGreedy($a_i = (s_i, t_i)$ nach t_i sortiert)

```

1:  $A_1 := \{a_1\};$ 
2:  $last := 1;$  // last ist der Index der zuletzt eingefügten Aktivität
3: for  $i = 2$  to  $n$  do
4:   if  $s_i \geq t_{last}$  then
5:      $A_i := A_{i-1} \cup \{a_i\}; last := i;$ 
6:   else
7:      $A_i := A_{i-1};$ 
8:   end if
9: end for
10: RETURN  $A_n$ 

```

Laufzeit: Es müssen lediglich vorab die Endzeitpunkte sortiert werden. Das kann in $O(n \log n)$ durchgeführt werden. Danach wird die Liste in $O(n)$ Zeit

in der FOR-Schleife abgearbeitet.

Korrektheit: Der Algorithmus ist einfach und liefert eine Lösung, das ist ein Grundprinzip der Greedy-Algorithmen. Die Analyse, dass die Lösung optimal ist, kann manchmal sehr schwer sein. Im Folgenden versuchen wir die Optimalität formal zu beweisen.

Theorem 7 *Für das Problem der Aktivitäten-Auswahl berechnet der Greedy-Algorithmus 9 in Zeit $O(n \log n)$ eine optimale Lösung.*

Beweis. Am Anfang müssen die Aktivitäten nach Endzeitpunkten sortiert werden; danach kann Algorithmus 9 in linearer Zeit laufen. Die Optimalität lässt sich folgendermaßen beweisen. Angenommen, das Greedy-Verfahren wählt k Aktivitäten $a_{i_j} = (s_{i_j}, t_{i_j})$ aus. Für jedes j sei T_j die Menge aller Aktivitäten aus der Eingabe, die den Endpunkt t_{i_j} enthalten. Alle Intervalle in T_j überlappen sich; also kann auch eine optimale Lösung OPT aus jeder Menge T_j höchstens *ein* Intervall enthalten. Das sind insgesamt höchstens k viele.

Angenommen, in OPT kommt ein weiteres Intervall $a = (s, t)$ vor, das in keiner Menge T_j auftaucht, weil es keinen der Endpunkte t_{i_j} enthält. Dieses Intervall a kann dann nur komplett vor einem Intervall a_{i_j} liegen, oder dessen Startpunkt s_{i_j} enthalten, den Endpunkt t_{i_j} aber nicht. Dann hätte das Greedy-Verfahren aber Intervall a ausgewählt, weil es sich mit $a_{i_{j-1}}$ nicht überlappt und sein Endzeitpunkt t vor t_{i_j} kommt. Widerspruch!

Daraus folgt, dass OPT nicht mehr Intervalle enthalten kann, als das Greedy-Verfahren auswählt. \square

Insgesamt haben wir drei Greedy Beispiele kennengelernt, in denen entweder eine optimale Lösung, eine gute Approximation oder eine beliebig schlechte Lösung erzielt wird.

Kapitel 6

Datenstrukturen

Nachdem wir einige algorithmische Standardtechniken betrachtet haben, wollen wir uns nun mit der geschickten Repräsentation von Daten im Rechner beschäftigen und stellen ein paar einfache Datenstrukturen vor.

Die einfache Datenstruktur des Arrays haben wir bereits kennengelernt, für ein Array $A[1..n]$ können wir die Werte $A[i]$ in $O(1)$ Zeit auslesen oder ändern. Arrays stehen in allen gängigen Programmiersprachen zur Verfügung, über die interne Realisierung müssen wir uns zunächst keine Gedanken machen. Wie bereits gesehen, lassen sich die Arrays auch in mehreren Dimensionen verwenden.

Im Kapitel 2 haben wir gesehen, wie ein Array A mit n Werten sortiert werden kann. Den direkten Zugriff über $A[i]$ kann man zum Beispiel nutzen, um effizient festzustellen, ob ein Element x im Array $A[1..n]$ vorhanden ist. Falls wir die Einträge eines sortierten Arrays A sukzessive mit x vergleichen, liegt die Laufzeit dieser Vorgehensweise in $O(n)$.

Das Prinzip der *binären Suche* erlaubt eine effizientere Lösung. Dabei wird der Wert x jeweils mit dem Wert des Arrays an der Mitte des Suchbereiches verglichen und je nach Ergebnis wird in den Teilbereichen weitergesucht. Algorithmus 10 beschreibt dieses Verfahren.

Laufzeitabschätzung:

Dieser rekursive Algorithmus wird mit $\text{BinarySearch}(A, 1, n, x)$ aufgerufen und testet für $n = 1$ in konstanter Zeit, ob $A[1] = x$ ist. Sonst wird rekursiv ein Array der Größe höchstens $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ betrachtet und konstanter Aufwand c für die konstante Anzahl an zusätzlichen Operationen verwendet.

Die zugehörige Rekursionsgleichung lautet $T(n) = T(\lfloor \frac{n}{2} \rfloor) + c$ und $T(n)$ liegt beweisbar in $O(\log n)$.

Korrektheit: Falls das Array nur einen Eintrag hat, testen wir, ob dieser dem Element x entspricht. Ansonsten betrachten wir das mittlere Element

Algorithmus 10 BinarySearch(A, p, r, x)

Ist x ein Element des aufsteigend sortierten Arrays A zwischen Index p und r ?

```

1: if  $p < r$  then
2:    $q := \lfloor (p + r) / 2 \rfloor$ ;
3:   if  $x < A[q]$  then
4:     BinarySearch( $A, p, q - 1, x$ );
5:   else if  $x > A[q]$  then
6:     BinarySearch( $A, q + 1, r, x$ );
7:   else
8:     RETURN  $A[q] = x$ ;
9:   end if
10: else
11:   if  $A[q] = x$  then
12:     RETURN  $A[q] = x$ ;
13:   else
14:     RETURN  $x \notin A$ ;
15:   end if
16: end if

```

$q := \lfloor (p + r) / 2 \rfloor$ des aufsteigend sortierten Arrays $A[p..r]$, falls $x < A[q]$ suchen wir im linken Teil, sonst im rechten Teil des Arrays. Falls beides nicht zutrifft, muss $x = A[q]$ gelten und wir geben das Element aus.

6.1 Stacks

Die oben beschriebenen Arrays lassen sich auch für die Beschreibung komplizierterer Strukturen verwenden. Wir betrachten hier einen sogenannten *Stack* auch Stapel oder Keller genannt.

Der Stack ist intern realisiert durch ein unendliches Array $S[1..\infty]$ mit einem ausgewiesenen Kopfelement $S[\text{Top}]$ für die Integer-Variable Top . Dabei ist $S[1], S[2], \dots, S[\text{Top}]$ der aktuelle Stack und $S[\text{Top}]$ das Kopfelement, der Stack ist leer, falls $\text{Top} = 0$ gilt.

Extern stehen dem Benutzer folgende Operationen zur Verfügung.

- $\text{Push}(x)$, ein neues Kopfelement x wird auf den Stack gelegt. Intern wird $\text{Top} := \text{Top} + 1$ und $S[\text{Top}] := x$ gesetzt
- $\text{Pop}(x)$, gibt das aktuelle Top-Element in x zurück und löscht es aus dem Stack. Intern wird $x := S[\text{Top}]$ und $\text{Top} := \text{Top} - 1$ gesetzt. Falls Top bereits 0 ist, wird berichtet, dass der Stack leer ist, extern beispielsweise über den Wert NIL.

- $\text{Top}(x)$ gibt das aktuelle Kopfelement in x zurück. Intern über $S[\text{Top}]$.

Wir wollen auch hier ein Beispiel für die effiziente Verwendung von Stacks angeben. Nehmen wir an, die Entwicklung verschiedener Aktien verläuft über einen bestimmten Zeitraum $I = [0, d]$ jeweils linear, das heißt beschrieben durch eine Funktion $f_i(x) = a_i x + b_i$ für $x \in I$. Nun möchte ein Analyst für jedes einzelne $x \in I$ schnell ermitteln, welche Aktie den größten Wert erzielt.

Naiv müsste man für den jeweiligen Wert x alle n Funktionswerte $f_i(x)$ miteinander vergleichen und könnte dann den maximalen Wert ermitteln.

Besser wäre es, gleich die sogenannte *obere Kontur* aller Funktionen explizit anzugeben. Zu jedem Zeitpunkt beschreibt eine der Funktionen f_i die momentan maximalen Werte. Wenn wir die Übergänge der jeweiligen *maximalen* Funktionen speichern könnten, können wir für die jeweiligen Teil-Intervalle schnell den optimalen Wert angeben.

Aufgabenstellung: Wir wollen die Funktion

$$f_{\max} : x \mapsto \max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}$$

explizit durch Intervalle und zugehörige Teil-Funktionen beschreiben. f_{\max} bezeichnen wir als die *obere Kontur* von f_1, f_2, \dots, f_n über dem Intervall $I = [0, d]$, siehe auch Abbildung 6.1.

Der Einfachheit halber nehmen wir an, dass die Werte b_i paarweise verschieden sind. Zunächst sortieren wir die Funktionen an der Stelle $x = 0$ nach den Y -Koordinaten b_i . Nehmen wir nun an, das o.B.d.A. $b_1 > b_2 > b_3 > \dots > b_n$ gilt.

Wir verwenden einen Stack, und der Stack soll am Ende sukzessive die maximalen Funktionen und die Übergänge enthalten.

Zunächst ist f_1 maximal und wir legen $(f_1, (0, b_1))$ auf den Stack als Kopfelement. Das ist die momentane obere Kontur der betrachteten Funktionen. Nun nehmen wir f_2 und betrachten den aktuellen Stack. Falls die beiden Funktionen einen Schnittpunkt $s(f_1, f_2) = (x_{f_1, f_2}, y_{f_1, f_2})$ besitzen, wechselt ab diesem Punkt das Maximum von f_1 zu f_2 . Wir legen somit f_2 mit $\text{Push}((f_2, s(f_1, f_2)))$ auf den Stack, der Stack repräsentiert die aktuelle obere Kontur. Das unterste Element f_1 startet bei $(0, b_1)$ und wird durch das nächste Element f_2 bei $s(f_1, f_2)$ abgewechselt.

Nun betrachten wir f_3 . Falls f_3 keinen Schnittpunkt mit f_2 bildet, kann f_3 ausgelassen werden, die Funktion liegt vollständig unterhalb von f_2 . Falls jedoch f_3 mit f_2 einen Schnittpunkt $s(f_2, f_3) = (x_{f_2, f_3}, y_{f_2, f_3})$ hat, entscheidet die Lage des Schnittpunktes über die aktuelle Kontur der beteiligten Funktionen.

Fall 1.: Liegt der Punkt $s(f_2, f_3)$ mit seiner X -Koordinate x_{f_2, f_3} links vom X -Wert x_{f_1, f_2} des Startpunktes $s(f_1, f_2)$ des aktuellen Top-Elementes f_2 , so

kann f_2 offensichtlich insgesamt gar nicht an der oberen Kontur teilnehmen. In diesem Fall wird f_2 durch $\text{Pop}(x)$ vom Stack genommen. Der gleiche Test wird mit dem nächsten Top-Element (hier f_1) wiederholt.

Fall 2.: Der Punkt $s(f_2, f_3)$ liegt mit seiner X -Koordinate x_{f_2, f_3} rechts vom X -Wert x_{f_1, f_2} des Startpunktes $s(f_1, f_2)$ des aktuellen Top-Elementes f_2 . Dann wird mit $\text{Push}((f_3, s(f_2, f_3)))$ der nächste Abschnitt der Kontur auf den Stack *gepusht* und der aktuelle Stack beschreibt tatsächlich die obere Kontur der beteiligten Funktionen mit den jeweiligen Übergängen.

In Abbildung 6.1 sehen wir, wie dieses Prinzip im Allgemeinen funktioniert. Nachdem bereits sukzessive $(f_1, (0, b_1))$, $(f_2, s(f_1, f_2))$, $(f_3, s(f_2, f_3))$, $(f_4, s(f_3, f_4))$ auf den Stack *gepusht* wurden, wird nun f_5 betrachtet. Wir betrachten jeweils die Lage des Schnittpunktes mit dem Top-Element. Da die Schnittpunkte $s(f_4, f_5)$ und $s(f_3, f_5)$ jeweils links von den Punkten $s(f_3, f_4)$ respektive $s(f_2, f_3)$ liegen, werden f_4 und f_3 nacheinander vom Stack *gepoppt*. Dann wird mit dem dann aktuellen Top-Element $(f_2, s(f_1, f_2))$ der Schnittpunkttest mit f_5 durchgeführt. Der Test der Schnittpunkte $s(f_2, f_5)$ und $s(f_1, f_2)$ ergibt, dass $s(f_2, f_5)$ rechts von $s(f_1, f_2)$ liegt und somit $(f_5, s(f_2, f_5))$ auf den Stack *gepusht* werden muss, $(f_2, s(f_1, f_2))$ bleibt erhalten. Der Stack gibt die aktuelle Kontur wieder.

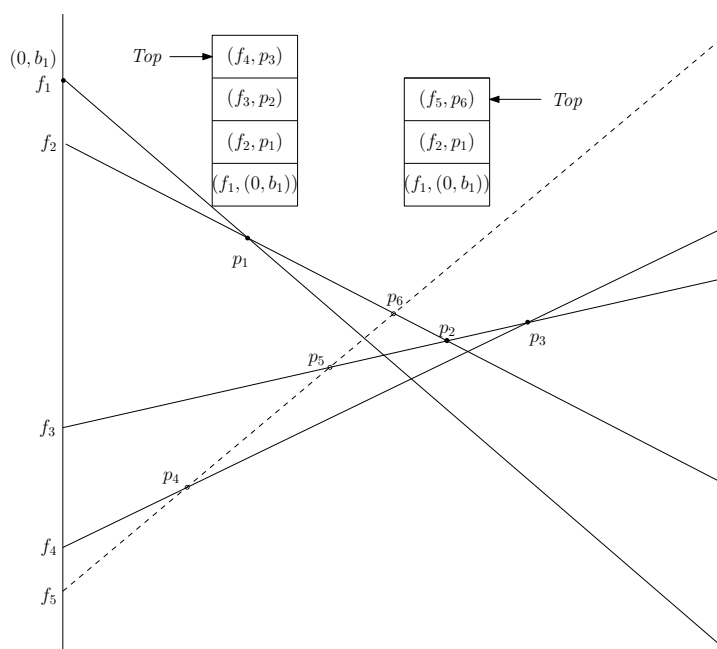


Abbildung 6.1: Vor dem Einfügen von f_5 beschreibt der Stack die obere Kontur durch die Funktionen f_1, f_2, f_3 und f_4 mit den jeweiligen Intervallgrenzen. Wenn f_5 betrachtet wird, müssen f_3 und f_4 den Stack verlassen.

Korrektheit: Wir wissen, dass sich zwei Geraden nur einmal schneiden können. Induktiv nehmen wir an, dass der aktuelle Stack die obere Kontur für die ersten f_1, f_2, \dots, f_{k-1} Geraden wiedergibt. Für das erste Element f_1 ist das der Fall.

Das aktuelle Top-Element $(f_j, s(f_i, f_j))$ des Stacks ist das letzte Stück der Kontur und wird mit der nächsten Geraden f_k verglichen.

Falls der Schnittpunkt $s(f_j, f_k)$ links von $s(f_i, f_j)$ liegt, kann f_j nicht zur oberen Kontur gehören. Rechts von $s(f_j, f_k)$ dominiert f_k die Gerade f_j , links von $s(f_i, f_j)$ dominiert die Gerade f_i die Gerade f_j . Die Push-Operation ist also in diesem Fall korrekt und das nächste Top-Element des Stacks wird mit f_k verglichen.

Falls der Schnittpunkt $s(f_j, f_k)$ rechts von $s(f_i, f_j)$ liegt, wird korrekterweise $(f_k, s(f_j, f_k))$ ans Ende der Kontur und in den Stack eingefügt.

Zu jedem Zeitpunkt ist die Kontur korrekt, am Ende gibt der Stack die Kontur mit den jeweiligen Intervallen korrekt wieder.

Laufzeitabschätzung: Gemäß der Beschreibung betrachten wir sukzessive die Geraden f_1, f_2, \dots, f_n und vergleichen diese mit dem jeweiligen Top-Element. Jede Gerade kann nur einmal auf den Stack *gepusht* werden wird aber auch nur einmal vom Stack *gepoppt*. Insgesamt haben wir somit nur $O(n)$ viele Push- und Pop-Operationen, das gleiche gilt dann für die Top-Operationen. Für die Vergleiche muss das Top-Element betrachtet werden, das geht dann aber stets einer Push- oder Pop-Operation voraus. Insgesamt bestimmen wir die obere Kontur in $O(n)$ Zeit, für das anfängliche Sortieren war $O(n \log n)$ Zeit nötig.

6.2 Dynamische Listen

Eine weitere sehr nützliche Datenstruktur ist die verkettete Liste. Hierbei besitzt jedes Datenelement einen *Zeiger* auf das nachfolgende Element. Der Zeiger gibt an, in welcher Speicherzelle das nächste Listenobjekt zu finden ist.

Eine schematische Darstellung einer linearen Liste findet sich in Abbildung 6.2. Die Liste ist als Zeiger auf das Kopfelement gegeben, jedes weitere Element enthält einen Dateneintrag und einen Zeiger auf das nächste Element. Das letzte Element enthält den speziellen Zeiger NIL. Rechnerintern

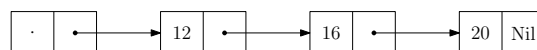


Abbildung 6.2: Die schematische Darstellung einer Liste.

kann man sich eine lineare Liste wie folgt vorstellen. Eine Liste von Zahlen (16, 20, 33, 14, 5), die mit Adresse 7 angesprochen wird, kann beispielsweise so abgespeichert sein.

Adresse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
Wert	20		33	16			.	5		14	12	...
Zeiger	3		10	1			4	NIL		8		...

Im Gegensatz zum Array mit fester Länge lassen sich verkettete Listen sehr effizient dynamisch verändern. Es gibt dazu (programmiersprachenspezifische) Befehle zum *allokieren* von neuen Speicherelementen mit Datenobjekt und zugehörigem Zeiger. Außerdem können die Zeiger entsprechend umgelenkt werden.

Soll in die obige Liste nach dem Wert 33 ein neues Element 17 eingefügt werden, so wird zunächst (programmiersprachenspezifisch) eine freie Adresse $A = 6$ für ein neues Datenobjekt mit noch nicht spezifiziertem Wert W_A und noch nicht spezifiziertem Zeiger Z_A erzeugt. Danach wird $W_A := 17$ eingetragen. Der Zeiger vom Element 33 wird auf die Adresse 6 des neuen Eintrags gesetzt und der Zeiger Z_A verweist auf 10, also auf das nachfolgende Element 14. In Java läßt sich das beispielsweise durch *Listenobjekte* mit der entsprechenden Ausgestaltung realisieren. Für ein neues Element wird ein neues Listenobjekt angelegt.

Der Vorteil der Listen liegt in der einfachen dynamischen Veränderung, für das Einfügen und Löschen von Listenelementen ist jeweils nur konstanter Aufwand notwendig. Will man bei Arrays den Zusammenhang erhalten, dann sind Kopiervorgänge mit linearer Laufzeit für das Einfügen und Löschen notwendig.

6.3 Bäume und Suchbäume

Eine natürliche Verallgemeinerung von Listen sind Bäume. Formal können Bäume wie folgt rekursiv definiert werden.

1. Ein *Baum* $T = (w, T_1, T_2, \dots, T_m)$ besteht aus der *Wurzel* w und Teilbäumen T_i , wobei alle T_i Bäume mit paarweise disjunkten Knotenmengen sein müssen.
2. T_i ist dann der i -te *direkte Teilbaum* von T .
3. m ist der *Grad* des Knoten w .
4. Ein Knoten von Grad 0 ist ein *Blatt*, ein Knoten vom Grad > 0 ist ein *innerer Knoten*.

5. Eine Liste lässt sich als ein Baum interpretieren, bei dem jeder Knoten bis auf den letzten den Grad 1 hat und der letzte Grad 0.

Bei Abbildung 6.3 handelt es sich um ein Beispiel einer *grafischen Realisation* eines Baumes. Im Folgenden werden wir die grafische Realisation und die obige formale Definition als identisch betrachten. Der *i*-te *direkte Teilbaum* soll von links nach rechts betrachtet an der *i*-ten Stelle per Kante angefügt werden.

Klassische Bezeichnungen: Für einen Baum T mit Wurzel v und direkten Teilbäumen T_1, T_2, \dots, T_m mit Wurzeln w_1, w_2, \dots, w_m heißt w_i der *i*-te *Sohn von v* und v der *Vater von w_i*. Kurzschreibweisen $v = \text{Wurzel}(T)$, $v = \text{Vater}(w_i)$, $w_i = \text{Sohn}(v, i)$. Ein Knoten v ist *Nachfolger* eines Knoten w innerhalb eines Baumes T falls es eine Folge von Knoten (v_1, v_2, \dots, v_n) mit $v_1 = v$ und $v_n = w$, so dass $v_{i+1} = \text{Vater}(v_i)$ für $i = 1, 2, \dots, n - 1$ gilt.

Die Tiefe eines Knoten $v \in T$ wird rekursiv wie folgt definiert.

$$\text{Tiefe}(v, T) = \begin{cases} 0 & \text{falls } v = \text{Wurzel}(T) \\ 1 + \text{Tiefe}(v, T_i) & \text{falls } T_i \text{ direkter Teilbaum} \\ & \text{von } T \text{ mit } v \in T_i \end{cases} \quad (6.1)$$

Die Höhe eines Baumes T wird durch

$$\text{Höhe}(T) = \max\{\text{Tiefe}(b, T) \mid b \text{ ist Blatt von } T\} \quad (6.2)$$

festgelegt und entspricht damit der Anzahl der Kanten auf dem längsten Pfad von der Wurzel zu einem Blatt.

Equivalent ist die rekursive Definition

$$\text{Höhe}(T) = \begin{cases} 0 & \text{falls } v = \text{Wurzel}(T) \text{ ein Blatt ist} \\ 1 + \max \text{Höhe}(T_i) & \text{falls } T_i \text{ direkter Teilbaum von } T \end{cases} \quad (6.3)$$

Die Abbildung 6.3 zeigt ein Beispiel eines Baumes der Höhe 4. Die Blätter v_{12} und v_{13} haben die maximale Tiefe 4.

Interne Realisation: Intern kann ein Baum analog zur verketteten Liste durch Zeiger realisiert werden. Ein Datenobjekt *Knoten* enthält dabei zum Beispiel einen Datensatz, einen Schlüssel (siehe unten) und eine Liste von Zeigern auf die Knoten der jeweiligen Söhne und ggf. einen Zeiger auf den Vaterknoten. Methoden für den Knoten erlauben es, auf den *i*-ten Sohn zuzugreifen, die Daten auszugeben oder die Zeiger zu verändern. Blätter werden als spezielle Knoten realisiert (zum Beispiel durch NIL-Zeiger, wenn keine Information in den Blättern gebraucht wird).

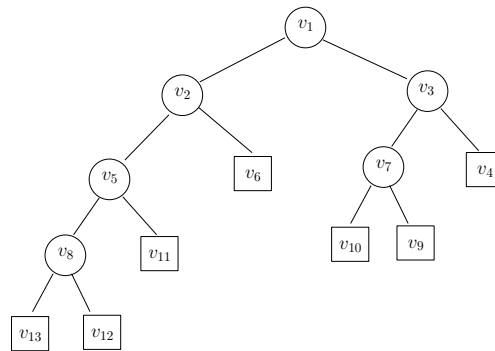


Abbildung 6.3: Die grafische Darstellung eines Baumes der Höhe 4.

6.3.1 Binärbäume und Suchbäume

Bäume, deren innere Knoten alle den Grad 2 haben werden Binärbäume genannt. Die beiden direkten Teilbäume eines inneren Knotens bezeichnet man dann als linken und rechten Teilbaum gemäß der eindeutigen grafischen Realisation. In den Knoten sollen außerdem Schlüssel abgespeichert werden. Über diese Schlüssel soll dann auf bestimmte Daten zugegriffen werden können. Je nachdem, ob sich die Schlüssel in den inneren Knoten oder nur in den Blättern befinden, gibt es die folgende allgemeine Unterteilung:

Art der Informationsspeicherung:

Suchbaum: Die Schlüssel befinden sich nur an den inneren Knoten, die Blätter sind leer (klassisch).

Blattsuchbaum: Die Schlüssel befinden sich nur in den Blättern, in den inneren Knoten gibt es nur *Wegweiser* zu den Knoten. Blattsuchbäume erlauben beispielsweise effiziente Bereichsanfragen.

Abbildung 6.4 zeigt einen Suchbaum (I) und einen Blattsuchbaum (II) für die Schlüssel (1, 3, 5, 7, 12, 15).

Im Folgenden werden wir zunächst Suchbäume betrachten, in den Blättern gibt es also keine Informationen. Insgesamt ergeben sich nun Möglichkeiten, wie man bei einem Durchlauf (Besuch aller Knoten) durch den Baum die Ausgabe der Schlüssel oder Daten (oder die Besuchsreihenfolge der Knoten) einfach beschreiben kann.

Präorder: Besuche die Wurzel (gebe die Daten aus), besuche dann den linken Teilbaum rekursiv und danach den rechten Teilbaum rekursiv, kurz *wLR*.

Postorder: Besuche zuerst den linken Teilbaum rekursiv und danach den rechten Teilbaum rekursiv und danach die Wurzel (gebe die Daten aus), kurz *LRw*.

Lexikographische Ordnung (In-Order): Besuche zuerst den linken Teilbaum rekursiv und danach die Wurzel (gebe die Daten aus) und dann den rechten Teilbaum rekursiv, kurz *LwR*.

Wird beispielsweise der Baum in Abbildung 6.4(I) nach der lexikographischen Ordnung durchlaufen, erhalten wir die Schlüssel in der Reihenfolge (1, 3, 5, 7, 12, 15). Die Präorder-Ausgabe ergibt: (7, 5, 3, 1, 15, 12).

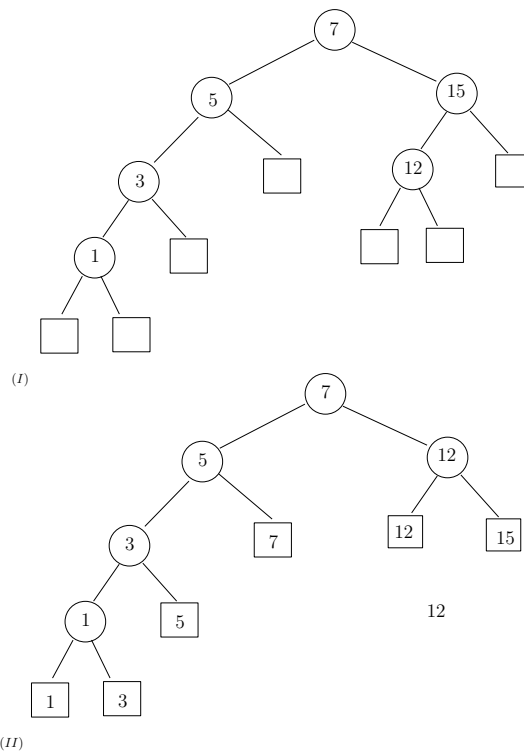


Abbildung 6.4: (I) Der Baum speichert Daten(Schlüssel) in den inneren Knoten, der Durchlauf nach *lexikographischer Ordnung LwR* gibt die Schlüssel sortiert in der Reihenfolge (1, 3, 5, 7, 12, 15) aus. (II) Ein Blattsuchbaum für die gleichen Schlüssel. Innere Knoten enthalten als Wegweiser zu den Blättern den maximalen Schlüssel des linken Teilbaums.

Für einen Knoten v eines Baumes bezeichne $\text{Schlüssel}(v)$ den zugehörigen Schlüssel. Ein binärer Suchbaum hat die sogenannte *Suchbaumeigenschaft* falls für die Knoten und Schlüssel des Baumes gilt:

- Falls v ein Knoten des binären Suchbaumes ist und w ein Knoten im linken Teilbaum von v ist, dann gilt $\text{Schlüssel}(w) \leq \text{Schlüssel}(v)$.
- Falls v ein Knoten des binären Suchbaumes ist und w ein Knoten im rechten Teilbaum von v ist, dann gilt $\text{Schlüssel}(w) > \text{Schlüssel}(v)$.

In den Blattsuchbäumen erfüllen die Wegweiser zusammen mit den Schlüsseln der Blätter die Suchbaumeigenschaft. Suchbäume sollen es ermöglichen, möglichst effizient auf Daten über die Schlüssel zuzugreifen. Datenstrukturen sollen es insgesamt ermöglichen einfache Operationen effizient durchzuführen.

Ein klassisches Beispiel ist das **Wörterbuch-Problem** (Dictionary-Problem). Für eine Menge von Wörtern(Daten) wird dabei wie bereits oben erwähnt für jedes Wort ein Zahlenschlüssel verwendet, über den auf das Wort zugegriffen werden soll. Typische Operationen für dieses Problem sind:

Suche: Suche das Datenobjekt zu einem vorgegebenen Schlüssel k .

Einfügen: Füge ein neues Datenobjekt mit dem Schlüssel k ein.

Entfernen: Entferne ein Datenobjekt mit Schlüssel k .

Berichte Min/Max: Gebe das Datenobjekt mit kleinsten/größten Schlüssel aus.

Nächster Nachbar: Für einen Schlüssel m , finde ein Datenobjekt mit größten (kleinsten) Schlüssel $k \leq m$ ($k \geq m$).

Bereichsanfrage: Für ein Intervall $[l, r]$ finde alle Datenobjekte mit Schlüssel $k \in [l, r]$.

Im Folgenden beschreiben wir die Operationen jeweils für einen binären Suchbaum mit zugehörigen Schlüsseln. Dafür nehmen wir an, dass wir für einen Knoten mit Schlüssel(v) auf den gespeicherten Schlüssel zugreifen können. Die leeren Blätter werden als BLATT repräsentiert; so können Knoten als Blatt identifiziert werden. Die Operation Suchen kann nun wie folgt implementiert werden.

Laufzeit: Mit jedem rekursiven Aufruf der Funktion steigen wir definitiv eine Stufe tiefer in den Baum ab, Die Laufzeit der Suchoperation hängt somit von der Höhe des Baumes ab. Für $h = \text{Höhe}(T)$ liegt die Laufzeit in $O(h)$. Für einen Baum mit n Knoten kann die Laufzeit sogar n Schritte betragen, falls der Baum zu einer Liste entartet ist.

Korrektheit: Wenn der Baum die Suchbaumeigenschaft erfüllt, dann rufen wir die Funktion rekursiv jeweils mit den richtigen Teilbaum auf, solange wir den Schlüssel k noch nicht gefunden haben. Falls der Schlüssel existiert,

Algorithmus 11 $\text{Search}(T, k)$, mit $T = (w, T_1, T_2)$ oder $T = \text{BLATT}$.
Suche im Suchbaum T den Knoten v mit Schlüssel k oder gebe BLATT zurück, wenn kein solcher Knoten vorhanden ist.

```

1: if  $T = \text{BLATT}$  then
2:   RETURN  $\text{BLATT}$ 
3: else if  $k = \text{Schlüssel}(w)$  then
4:   RETURN  $w$ 
5: else if  $k < \text{Schlüssel}(w)$  then
6:   RETURN  $\text{Search}(T_1, k)$ 
7: else if  $k > \text{Schlüssel}(w)$  then
8:   RETURN  $\text{Search}(T_2, k)$ 
9: end if

```

treffen wir auf den entsprechenden Knoten in T und geben ihn zurück, andernfalls enden wir an einem Blatt und geben es zurück.

Bei den Operationen Einfügen und Entfernen soll natürlich die Suchbaumeigenschaft erhalten bleiben. Wir stellen hier das Einfügen vor. Zunächst wurde dabei bereits ein Knoten v mit $\text{Schlüssel}(v) = k$ als Datenobjekt angelegt.

Algorithmus 12 $\text{Insert}(T, v)$, mit $T = (w, T_1, T_2)$ oder $T = \text{BLATT}$.
Füge einen Knoten v mit neuem Schlüssel $(v) = k$ sortiert in Suchbaum T ein und gib T zurück.

```

1: if  $T = \text{BLATT}$  then
2:    $T := (v, \text{BLATT}, \text{BLATT})$ 
3: else if  $k \leq \text{Schlüssel}(w)$  then
4:    $T := (w, \text{Insert}(T_1, v), T_2)$ 
5: else if  $k > \text{Schlüssel}(w)$  then
6:    $T := (w, T_1, \text{Insert}(T_2, v))$ 
7: end if
8: RETURN  $T$ 

```

Korrektheit und Laufzeit: Auch hier steigen wir mit jedem rekursiven Aufruf tiefer in den Baum T hinab, um das Element an der richtigen Stelle einzufügen. Der neue Knoten v ersetzt ein Blatt von T . Der neue Teilbaum, der den eingefügten Knoten enthält wird zurückgegeben und rekursiv im jeweiligen Vaterknoten aktualisiert. Die Laufzeit liegt wiederum in $O(h)$, wobei $h = \text{Höhe}(T)$ gilt.

Das Löschen eines Knoten v eines binären Suchbaumes ist nicht ganz so einfach und hängt davon ab, welche Söhne der jeweilige Knoten besitzt. Der Knoten wird wiederum über seinen Schlüssel in $O(h)$ Zeit gefunden. Wir unterscheiden folgende Fälle.

Entfernen eines Knoten v :

- Falls der Knoten v nur Blätter als Söhne hat, entfernen wir ihn einfach und ersetzen ihn durch ein Blatt. Zum Beispiel beim Entfernen des Knoten mit Schlüssel 1 in der Abbildung 6.4(I).
- Falls der Knoten v ein Blatt als Sohn hat und einen Teilbaum T_1 mit Wurzel w , ersetzt der Knoten w den Knoten v , der Knoten v wird ausgeschnitten. Zum Beispiel beim Entfernen des Knoten mit Schlüssel 5 in der Abbildung 6.4(I).
- Falls der Knoten v zwei echte Teilbäume T_1 und T_2 als Unterbäume hat, wählen wir den am weitesten links gelegenen Knoten w in T_2 aus. Dieser enthält den nächstgrößeren Schlüssel als v und hat mindestens ein Blatt als Sohn. Dieser Nachfolgerknoten w wird ausgeschnitten und durch seinen Nachfolger wie in den ersten beiden Fällen ersetzt. Der Knoten v wird nun allerdings durch w ersetzt. Zum Beispiel beim Entfernen des Knoten mit Schlüssel 7 in der Abbildung 6.4(I), kann der Knoten mit Schlüssel 12 den Knoten mit Schlüssel 7 ersetzen.

In jedem der beschriebenen Fälle haben wir im von der Struktur her einen Teilbaum durch seinen linken oder rechten Unterbaum ersetzt, der andere Teilbaum war dabei stets ein Blatt. Wir mussten dabei den Knoten des zugehörigen Schlüssels finden und ggf. den Knoten des Nachfolgerschlüssels. Die Operation kann in $O(h)$ ausgeführt werden.

Übungsaufgabe: Man zeige: falls ein Knoten v mit Schlüssel k in einem Suchbaum zwei echte Unterbäume hat, dann hat der Knoten mit dem k nachfolgenden Schlüssel mindestens ein Blatt als Unterbaum.

Für Binäräume lassen sich viele interessante Eigenschaften ableiten bzw. beweisen. Exemplarisch beweisen wir hier, dass für einen Binärbaum mit n Blättern die Höhe in $\Omega(\log n)$ liegt. Außerdem hängt die Anzahl der inneren Knoten fest von der Anzahl der Blätter ab und umgekehrt.

Lemma 8

1. Ein Binärbaum mit n inneren Knoten hat $n + 1$ Blätter.
2. Ein Binärbaum mit n Blättern hat $n - 1$ innere Knoten.
3. In jedem Binärbaum gibt es maximal 2^i Knoten der Tiefe i .
4. Die Höhe eines Binärbaumes mit insgesamt n Knoten (oder Blättern) liegt in $\Omega(\log n)$.

Beweis. 1.: Zunächst beweisen wir induktiv die Aussage über die Anzahl der Blätter bei n inneren Knoten:

Induktionsanfang: $n = 0$. Ein Baum mit keinem inneren Knoten hat genau ein Blatt.

Induktionsschritt: Sei w die Wurzel eines Binärbaumes mit insgesamt $n \geq 1$ inneren Knoten. Dann teilt sich der Baum bei w in zwei Teilbäume T_1 und T_2 auf, die beide zusammen $n_1 + n_2 = n - 1$ innere Knoten besitzen. Nach Induktionsannahme gilt: T_1 hat genau $n_1 + 1$ und T_2 hat genau $n_2 + 1$ Blätter, insgesamt hat T genau $n_1 + n_2 + 2 = n + 1$ Blätter.

2.: Der Beweis kann analog zum obigen Beweis geführt werden, eine leichte Übungsaufgabe. Man kann aber auch einfach $n := n - 1$ setzen.

3.: Dass es in jedem Binärbaum nur maximal 2^i Knoten der Tiefe i geben kann, lässt sich leicht induktiv zeigen bzw. folgt direkt aus der Definition der Tiefe und ist eine leichte Übungsaufgabe.

4.: Nun betrachten wir die Höhe eines Binärbaumes T_n mit n Knoten. Wir zeigen direkt, dass $\text{Höhe}(T_n) \geq \lceil \log(n + 1) \rceil - 1$ für alle $n \geq 1$ gilt.

Die Höhe des Baumes ist die maximale Tiefe und deshalb wollen wir einen Binärbaum erstellen, dessen Knoten eine kleinstmögliche Tiefe haben. Nach obiger Aussage kann der Baum maximal $\sum_{i=1}^l 2^i = 2^{l+1} - 1$ Knoten der Tiefe $\leq l$ besitzen. Somit muss für n Knoten eine gewisse Mindestdtiefe gelten, um alle Knoten unterzubringen.

Sei nun $k = \min_l \{l | 2^{l+1} - 1 \geq n\}$, offensichtlich ist k eine kleinstmögliche Höhe eines Baumes für n Knoten. Dann gilt offensichtlich $k \geq \lceil \log(n + 1) \rceil - 1$ denn aus $2^{k+1} - 1 \geq n$ folgt $2^{k+1} \geq n + 1$ und wenn wir darauf den Logarithmus anwenden, dann folgt wegen der Ganzzahligkeit von $k + 1$, dass $k + 1 \geq \lceil \log(n + 1) \rceil$ gilt. Kein Baum mit geringerer Höhe kann alle n Knoten unterbringen und die Aussage gilt. \square

Vorbereitend auf das nächste Kapitel wollen wir zeigen, dass wir in einem Suchbaum Knoten lokal umorganisieren können, ohne die Suchbaumeigenschaft zu verletzen. Die sogenannten Rotationen wollen wir dann im nächsten Kapitel für die Einhaltung von Höhenbalancen nutzen.

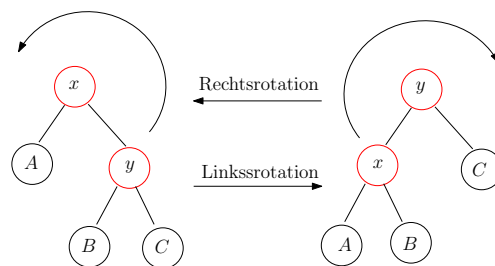


Abbildung 6.5: Bei einer Links- bzw. Rechtsrotation bleibt die Suchbaumeigenschaft erhalten.

Linksrotation eines Knoten y mit Knoten x : Sei T ein Teilbaum mit folgender Eigenschaft. Die Wurzel x von T ist ein innerer Knoten mit linken Teilbaum A und rechten Teilbaum mit Wurzel y und seien B und C die Teilbäume (links und rechts) von y wie in der Abbildung 6.5. Dann können die Knoten y und x so nach *links* rotiert werden, dass y die Wurzel von T bildet mit rechten Teilbaum C . Der Knoten x wird linker Teilbaum von y mit linken und rechten Teilbäumen A und B .

Rechtsrotation eines Knoten x mit Knoten y : Symmetrisch zur Linksrotation, siehe Abbildung 6.5.

Bei einer Linksrotation werden die Tiefen der Knoten in C um eins verringert, die Tiefen in B bleiben erhalten und die Tiefen in A werden um eins erhöht.

Bei einer Rechtsrotation werden die Tiefen der Knoten in A um eins verringert, die Tiefen in B bleiben erhalten und die Tiefen in C werden um eins erhöht.

Lemma 9 *Die Linksrotation erhält die Suchbaumeigenschaft des Teilbaumes T und des Gesamtbaumes. Der In-Order-Durchlauf gibt die gleiche Reihenfolge aus. Die Rotation kann mit konstanten Aufwand implementiert werden.*

Beweis. Dass die Rotation mit konstanten Aufwand implementiert werden kann, ergibt sich daraus, dass bei einer Implementierung mit Zeigern nur konstant viele Zeiger für die Rotation verändert werden müssen.

Die Schlüssel in A sind kleiner gleich Schlüssel(x) und die Schlüssel in B und C sind größer gleich Schlüssel(x). Es gilt Schlüssel(x) \leq Schlüssel(y). Schlüssel(y) ist größer gleich den Schlüsseln in B aber kleiner gleich den Schlüsseln in C . Somit bleibt die Suchbaumeigenschaft insgesamt erhalten.

Der In-Order-Durchlauf beginnt jeweils mit einem In-Order-Durchlauf in A , gibt dann x aus, führt einen In-Order-Durchlauf von B durch, gibt dann y aus und endet mit einem In-Order-Durchlauf von C . \square

Naheliegend ist folgende Eigenschaft. Übungsaufgabe: Ein binärer Baum mit disjunkten Schlüsseln erfüllt genau dann die Suchbaumeigenschaft, wenn der In-Order-Durchlauf die Schlüssel in aufsteigend sortierter Reihenfolge ausgibt.

Im Allgemeinen werden auch Bäume mit einem Grad von ≤ 2 für jeden inneren Knoten als Binärbäume bezeichnet. In diesem Kontext wird ein Binärbaum mit Grad exakt 2 für jeden inneren Knoten als *vollständig* bezeichnet. Insbesondere weil für die Suchbäume manchmal auch die eigentlichen Blätter weggelassen werden, findet man in der Literatur auch allgemeine Binärbäume. Wir werden stets die (leeren) Blätter mit notieren und somit vollständige Binärbäume betrachten.

6.4 AVL-Bäume

Wie wir bereits im letzten Abschnitt gesehen haben, ist die Höhe des Baumes entscheidend für elementare Operationen auf der Datenstruktur eines Binärbaumes. Das Lemma 8 zeigt uns allerdings bereits, dass eine bessere Laufzeit als $\Omega(\log n)$ für das Einfügen, Suchen und Entfernen nicht zu erwarten ist. Als Beispiel für balancierte Bäume, die möglichst nahe an dieser Grenze bleiben, betrachten wir nun AVL-Bäume.

Ein binärer Suchbaum heißt AVL-Baum, falls für *jeden* Knoten v gilt, dass die Höhe der beiden Teilbäume von v sich nur um Eins unterscheiden.

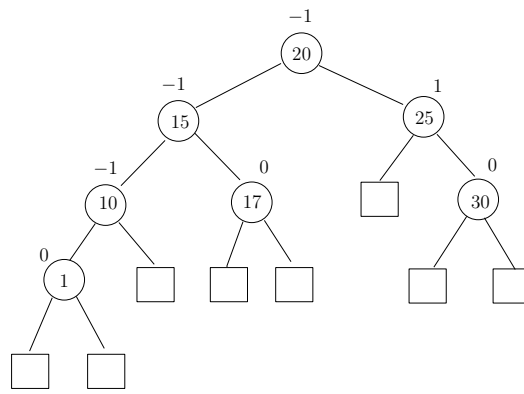


Abbildung 6.6: An jedem Knoten eines AVL-Baumes beträgt der Höhenunterschied der Teilbäume maximal 1.

Für jeden Knoten v gibt es einen sogenannten *Balancefaktor*.

$$\text{bal}(v) := \text{Höhe}(\text{rechts}(v)) - \text{Höhe}(\text{links}(v)) \quad (6.4)$$

In AVL-Bäumen (AVL nach Adelson, Velskij und Landis) gilt für alle Knoten $\text{bal}(v) \in \{-1, 0, 1\}$; ein Beispiel zeigt die Abbildung 6.6. Wir wollen nun die Höhe eines AVL-Baumes ermitteln. Dazu geben wir eine Höhe h vor und stellen fest, wieviele Knoten $n(h)$ ein AVL-Baum der Höhe h mindestens hat. Dann können wir umgekehrt feststellen, welche maximale Höhe ein AVL-Baum für n Knoten aufweisen kann.

Ein AVL-Baum der Höhe h mit minimaler Knotenanzahl $n(h)$ heißt auch *minimaler AVL-Baum der Höhe h* . Wir zählen die Blätter $b(h)$ eines solchen Baumes und können nach Lemma 8 dann die Anzahl der Knoten ermitteln. Sei T_h ein minimaler AVL-Baum mit $b(h)$ Blättern. Betrachte Abbildung 6.7. Offensichtlich gilt:

- Ein minimaler AVL-Baum der Höhe 0 hat ein Blatt, $b(0) = 1$.

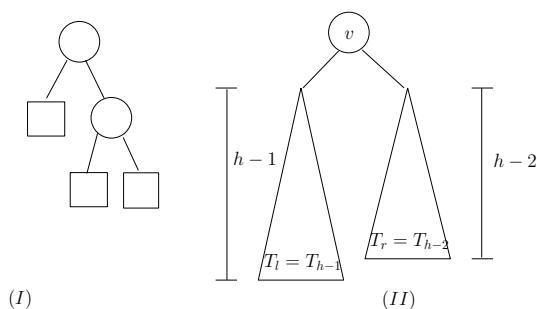


Abbildung 6.7: (I) Der minimale AVL-Baum der Höhe 2 hat $b(2) = 3$ Blätter. (II) Der minimale AVL-Baum der Höhe $h \geq 2$ hat $b(h) = b(h-1) + b(h-2)$ Blätter.

- Ein minimaler AVL-Baum der Höhe 1 hat zwei Blätter, $b(1) = 2$.
- Ein minimaler AVL-Baum der Höhe 2 hat drei Blätter, $b(2) = 3$.
- Sei T_h ein minimaler AVL-Baum der Höhe h mit Wurzel v und seien T_l und T_r die Teilbäume von v . Dann hat zumindest einer der beiden Teilbäume eine Höhe von $h-1$ und der andere muss mindestens eine Höhe von $h-2$ haben. Da wir die Anzahl der Blätter minimieren wollen, wählen wir o.B.d.A. $T_l = T_{h-1}$ und $T_r = T_{h-2}$ und für $h \geq 2$ gilt somit:

$$b(h) = b(h-1) + b(h-2) \quad (6.5)$$

Die Zahlen $b(h)$ sind die Fibonacci-Zahlen $b(h) = \text{fib}(h+1)$, die wir beim dynamischen Programmieren betrachtet hatten. Wir leiten jetzt eine geschlossene Formel für die Fibonacci-Zahlen her und gewinnen daraus eine obere Schranke für die Höhe von AVL-Bäumen.

Mit der Abkürzung $f_i = \text{fib}(i)$ haben wir also die Rekursion

$$f_0 = 1, f_1 = 1, f_{i+2} = f_{i+1} + f_i$$

für alle $i \geq 0$. Wie bei der Anzahl der Beklammerungen von n Faktoren verwenden wir die Methode *erzeugender Funktionen*, um die Rekursion zu lösen. Sei also $f(X) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i X^i$. Dann ist

$$\begin{aligned} f(X) &= f_0 + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3 + \dots \\ X f(X) &= f_0 X + f_1 X^2 + f_2 X^3 + \dots \\ X^2 f(X) &= f_0 X^2 + f_1 X^3 + \dots \end{aligned}$$

Zieht man die zweite und dritte Gleichung von der ersten ab, ergibt sich

$$f(X) - X f(X) - X^2 f(X) = f_0 + (f_1 - f_0) X = 1,$$

also

$$f(X) = \frac{1}{1 - X - X^2}. \quad (6.6)$$

Wir würden hieraus gern eine Potenzreihe machen, um dann die f_i durch Koeffizientenvergleich bestimmen zu können. Bei einem linearen Nenner wie $1 - \lambda X$ könnten wir einfach die Formel für die geometrische Reihe anwenden und bekämen

$$\frac{1}{1 - \lambda X} = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^i X^i.$$

Deshalb wenden wir Partialbruchzerlegung an und suchen Zahlen ϕ, ψ und a, b mit

$$\frac{1}{1 - X - X^2} = \frac{a}{1 - \phi X} + \frac{b}{1 - \psi X}. \quad (6.7)$$

Weil $1/\phi$ und $1/\psi$ Nullstellen des Nenners $1 - X - X^2$ sein sollen, müssen ϕ und ψ die Nullstellen der Gleichung

$$X^2 - X - 1$$

sein, die sich aus der vorigen ergibt, wenn man X durch $1/X$ ersetzt und mit X^2 multipliziert. Also ist etwa

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad \text{und} \quad \psi = \frac{1 - \sqrt{5}}{2}. \quad (6.8)$$

Außerdem folgt aus (6.7) durch Addition der beiden Brüche

$$a + b = 1 \quad \text{und} \quad a\psi + b\phi = 0.$$

Setzt man in der zweiten Gleichung $b = 1 - a$ und $\psi - \phi = -\sqrt{5}$ ein, ergibt sich $a = \frac{\phi}{\sqrt{5}}$ und $b = 1 - \frac{\phi}{\sqrt{5}} = -\frac{\psi}{\sqrt{5}}$. Also folgt aus (6.7)

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{5}} \sum_{i=0}^{\infty} \phi^{i+1} X^i - \frac{1}{\sqrt{5}} \sum_{i=0}^{\infty} \psi^{i+1} X^i,$$

und durch Koeffizientenvergleich erhalten wir folgende Formel für die Fibonacci-Zahlen:

Lemma 10 Für die i -te Fibonacci Zahl f_i mit $f_0 = f_1 = 1$ und $f_{i+2} = f_{i+1} + f_i$ gilt

$$f_i = \frac{1}{\sqrt{5}} \phi^{i+1} - \frac{1}{\sqrt{5}} \psi^{i+1},$$

wobei

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.6180\dots \quad \text{und} \quad \psi = \frac{1 - \sqrt{5}}{2} = -0.6180\dots$$

Die Zahl ϕ ist der "goldene Schnitt": Teilt man eine Strecke so in zwei Teile mit Längen v und w , dass $v = \phi w$ gilt, so ist auch $v + w = \phi v$.

Das Wachstum von f_i ist durch den ersten Term in Lemma 10 bestimmt, denn der zweite Term ist eine (alternierende) Nullfolge in i .

Nun können wir eine scharfe obere Schranke für die Höhe von AVL-Bäumen angeben.

Theorem 11 *Ein AVL-Baum mit n Blättern (und $n - 1$ inneren Knoten) hat höchstens die Höhe $\log_\phi(n + 1) \in O(\log n)$.*

Beweis. Für einen AVL-Baum der Höhe h gilt

$$n \geq b(h) = f_{h+1} \geq \frac{1}{\sqrt{5}} \phi^{h+2} - 1,$$

also haben wir

$$h \leq \log_\phi(\sqrt{5}(n + 1)) - 2 \leq \log_\phi(n + 1).$$

□

Als nächstes wollen wir die Operationen Einfügen und Entfernen für AVL-Bäume betrachten. Diese Operationen sollen

- ... *strukturerhaltend* durchgeführt werden, die AVL-Eigenschaft soll erhalten bleiben.
- ... *kostengünstig* durchgeführt werden, der Durchlauf in $O(\log n)$ und eventuelles Ausbalancieren in konstanter Zeit durch Umhängen von Zeigern.

6.4.1 Einfügen eines neuen Knoten

Dazu betrachten wir das Beispiel aus Abbildung 6.6. Im Baum notieren wir den Wert $\text{bal}(v)$ für jeden Knoten. Wir merken uns an jedem Knoten die Höhe des linken und rechten Teilbaumes, so können wir schnell den Wert $\text{bal}(v)$ bestimmen bzw. neu berechnen. Wir wollen einen Knoten z mit Schlüssel 5 einfügen.

Zunächst fügen wir dabei **abwärtslaufend** wie in der Prozedur 12 den Knoten ein; siehe Abbildung 6.8. Danach werden **aufwärtslaufend** die $\text{bal}(v)$ -Werte geändert bis zum ersten Mal eine Disbalance auftritt. Die neuen $\text{bal}(v)$ -Werte werden durch die veränderten Höhen sukzessive berechnet. Am Knoten y mit Schlüssel 10 tritt zum ersten Mal eine Disbalance auf. Die Teilbäume des Knoten sollen umgeordnet werden. Eine einfache Rechtsrotation am Knoten x mit y führt hier leider nicht zum Erfolg, der neu eingefügte Knoten z (Baum

B aus Abbildung 6.5) würde seine Höhe nicht verlieren und am neuen Knoten x wird dann lediglich der Wert $\text{bal}(x) = +2$ notiert.

Deshalb führen wir hier die folgende *Doppelrotation* aus:

1. Zunächst eine Linksrotation des Knoten z mit x .
2. Danach eine Rechtsrotation des Knoten z mit y .

Zunächst verliert dabei der Knoten x an Höhe, das wird aber durch die zweite Rotation wieder ausgeglichen. In Abbildung 6.9 sehen wir die Zwischener-

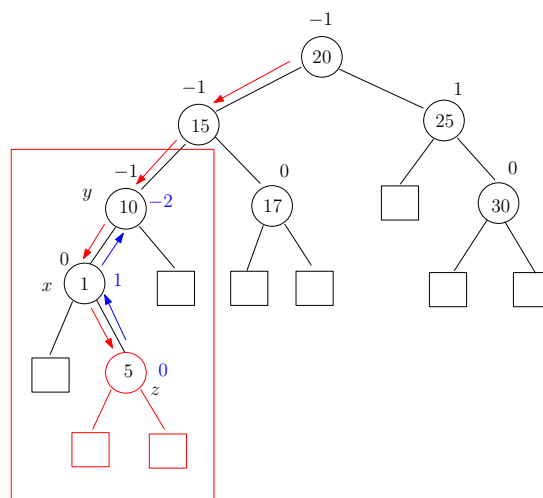


Abbildung 6.8: Das Einfügen eines Knoten z mit Schlüssel 5 in den AVL-Baum aus Abbildung 6.6 durch einen **Abwärtslauf** zum entsprechenden Blatt. Danach werden **aufwärtslaufend** die $\text{bal}(v)$ -Werte geändert, bis zum ersten Mal eine Disbalance auftritt. Der Teilbaum in der eingezeichneten Box muss ausbalanciert werden.

gebnisse der Rotationen. Der zugehörige Teilbaum ist danach ausbalanciert. Abschließend stellt sich die Frage ob gegebenenfalls noch die $\text{bal}(v)$ Einträge bis Wurzel aktualisiert müssen. Wir haben den Teilbaum des Knoten y ausbalanciert aber er hat seine Höhe behalten, somit ändern sich die Werte nicht. Die Abbildung 6.10 zeigt das Ergebnis nach dem Einfügen.

Das Einfügen gestaltet sich insgesamt in den folgenden Schritten:

1. Abwärtsdurchlauf gemäß der Schlüssel und Eintrag des neues Knoten. Laufzeit: $O(\log n)$
2. Aufwärtsdurchlauf zum Anpassen der $\text{bal}(v)$ -Werte bis die erste Disbalance an einem Knoten v auftritt. Laufzeit: $O(\log n)$.

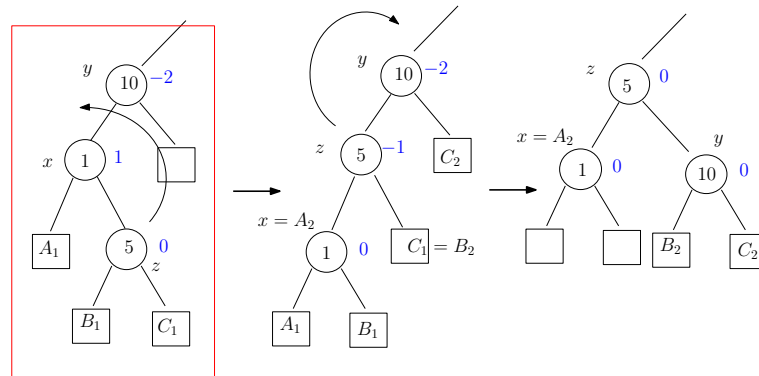


Abbildung 6.9: Zuerst wird eine Linksrotation am Knoten z mit x vorgenommen, danach eine Rechtsrotation am Knoten z mit y . Der Teilbaum ist danach balanciert.

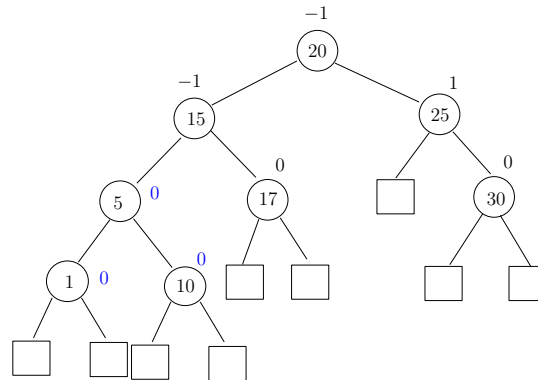


Abbildung 6.10: Der ausbalancierte Baum nach dem Einfügen des Knoten z des Schlüssels 5. Die $\text{bal}(v)$ -Werte aller anderen Knoten bleiben gleich, da die Höhe des Originalteilbaumes erhalten bleibt.

3. Ausbalancierung des zugehörigen Teilbaums durch Rotation. Laufzeit: $O(1)$, inklusive umsetzen der Zeiger.

Kategorisierung der Rotationen:

Die Doppelrotation (erst links, dann rechts) im obigen Beispiel war notwendig, weil der Weg vom Knoten y der ersten Disbalance zum neu eingefügten Knoten z zuerst links und danach rechts abgebogen ist. Der neue Knoten liegt also vom Knoten y aus gesehen im rechten Unterbaum des linken Unterbaumes. Dieser rechte Unterbaum muss an Höhe verlieren.

Falls der besagte Weg zuerst rechts und danach links abbiegt, wird die Doppelrotation in der Reihenfolge rechts/links ausgeführt. Der neue Knoten liegt dann also vom Knoten y aus gesehen im linken Unterbaum des rechten Unterbaumes.

Manchmal reicht auch eine einfache Rechts- oder Linksrotation aus. Das ist der Fall, wenn der Weg vom Knoten y der ersten Disbalance zum neu eingefügten Knoten z nur rechts oder nur links abbiegt.

Falls wir beispielsweise in den neuen Baum aus Abbildung 6.10 einen weiteren Knoten z mit Schlüssel 32 einfügen, so erhalten wir wie in Abbildung 6.11 die erste Disbalance am Knoten y und führen eine einfache Linksrotation des Knoten x mit y aus. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.12 zu sehen.

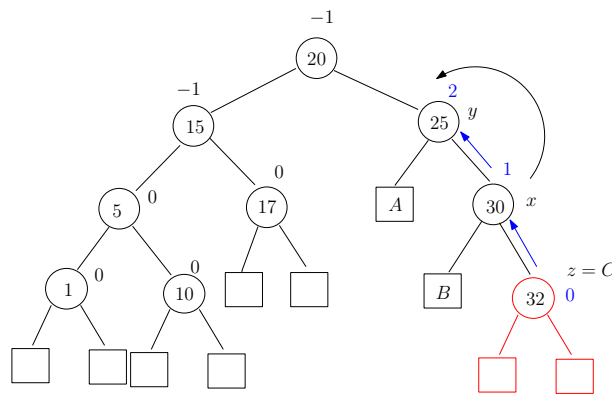


Abbildung 6.11: Nach dem Einfügen des Knoten z mit Schlüssel 32 reicht eine einfache Linksrotation.

Nach diesen Beispielen beschreiben wir die Doppelrotation (links/rechts) und die einfache Rotation (links) schematisch. Die Doppelrotation (rechts/links) und die einfache Rotation (rechts) verlaufen analog.

Doppelrotation (links/rechts): Nach dem Einfügen eines Knoten z und dem Ermitteln des untersten Disbalance-Knoten y läuft der Weg zum Knoten z in den rechten Unterbaum des linken Unterbaumes, siehe Abbildung 6.13.

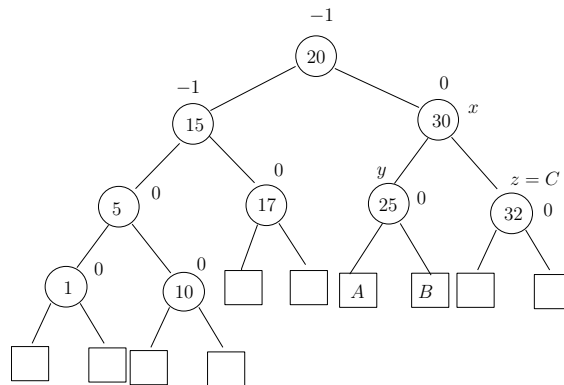


Abbildung 6.12: Die Höhe des ausbalancierten Baumes ändert sich nicht, alle anderen $\text{bal}(v)$ -Werte bleiben gleich.

Zunächst wird eine Linksrotation des Knoten w mit x ausgeführt, siehe das

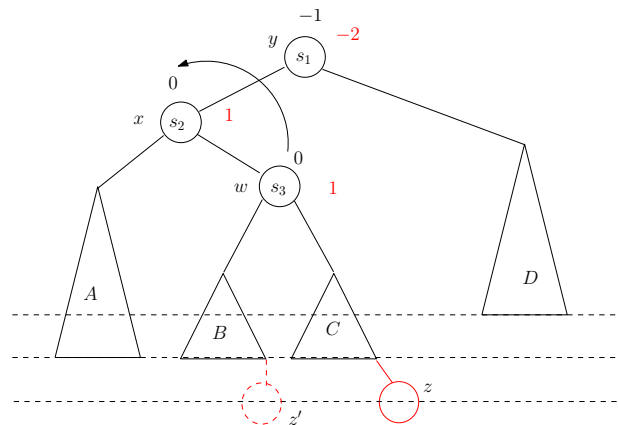


Abbildung 6.13: Die Situation vor einer (links/rechts) Doppelrotation. Der Knoten z könnte auch in B eingefügt worden sein.

Ergebnis in Abbildung 6.14. Danach wird eine Rechtsrotation des Knoten w mit y ausgeführt, siehe das Ergebnis in Abbildung 6.14. Der Baum ist ausgeglichen und das wäre auch der Fall, wenn der Knoten z in B eingefügt worden wäre, siehe z' in Abbildung 6.14.

Einfache Rotation (links): Nach dem Einfügen eines Knoten z und dem Ermitteln des untersten Disbalance-Knoten y läuft der Weg zum Knoten z in den rechten Unterbaum des rechten Unterbaumes, siehe Abbildung 6.16.

Wir beschreiben nun in der Prozedur 13, wie die Zeiger bei einer Linksrotation verändert werden müssen.

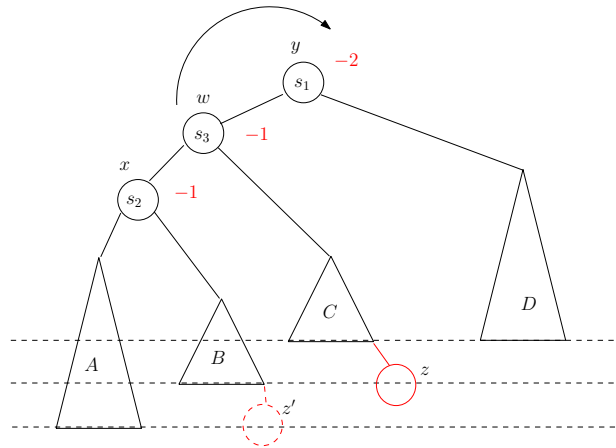


Abbildung 6.14: Die Situation vor der zweiten Rotation. Der Knoten z könnte auch in B eingefügt worden sein.

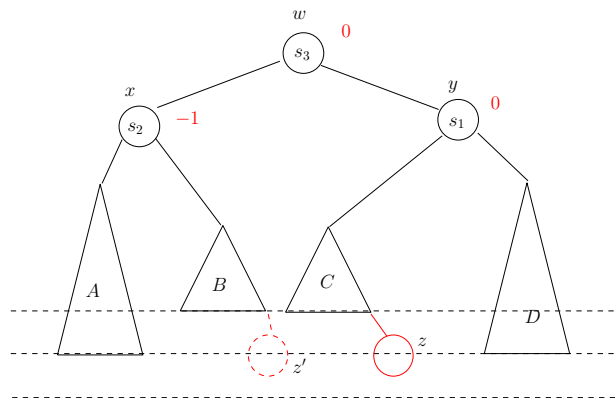


Abbildung 6.15: Nach der zweiten Rotation ist der Baum ausgeglichen. Falls der Knoten z in den Teilbaum B eingefügt worden wäre, wäre der Baum ebenfalls ausgeglichen. In jedem Fall ist die Höhe des Baumes wieder identisch zur Ausgangshöhe und damit alle $bal(v)$ -Werte von w an aufwärts unverändert.

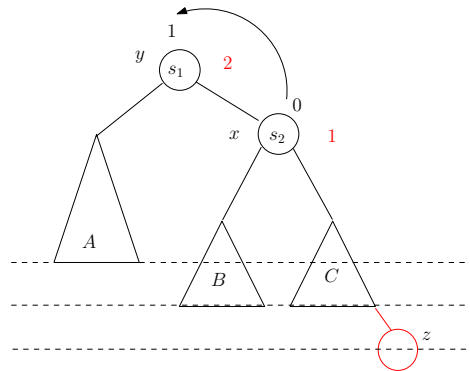


Abbildung 6.16: Die Situation vor einer einfachen Rotation (links). Der neue Knoten z liegt im rechten Unterbaum des rechten Unterbaumes von y .

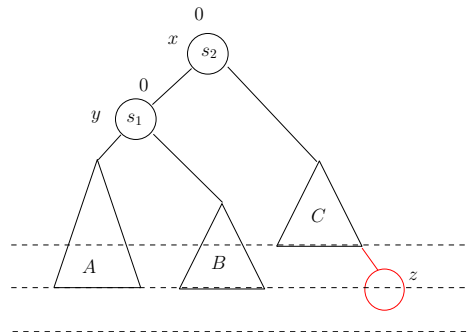


Abbildung 6.17: Die Situation nach einer einfachen Rotation (links). Der Teilbaum C hat an Höhe verloren, der Teilbaum A an Höhe gewonnen, der Baum ist ausgeglichen. Außerdem ist die Höhe des Baumes wieder identisch zur Ausgangshöhe.

Prozedur 13 Linksrotation(T, x)Linksrotation des Knoten x mit $y = \text{Vater}(x)$

```

1:  $y := \text{Vater}(x); w := \text{Vater}(y);$ 
2: if  $w \neq \text{NIL}$  and  $y = \text{LinkerSohn}(w)$  then
3:    $\text{marker} := \text{links};$ 
4: else
5:    $\text{marker} := \text{rechts};$ 
6: end if
7:  $\text{rechts}(y) := \text{links}(x);$ 
8:  $\text{links}(x) := y;$ 
9: if  $\text{marker} := \text{links}$  then
10:   $\text{links}(w) := x;$ 
11: else if  $\text{marker} := \text{rechts}$  then
12:   $\text{rechts}(w) := x;$ 
13: end if

```

Eine Rechtsrotation kann analog ausgeführt werden. Die Doppelrotation (links/rechts) die für einen Disbalance-Knoten y ausgeführt wird, kann dann durch folgende Prozedur beschrieben werden.

Prozedur 14 DoppelrotationLR(T, y)Doppelrotation (links/rechts) am Disbalance-Knoten y

```

1:  $x := \text{links}(y);$ 
2:  $w := \text{rechts}(x);$ 
3: Linksrotation( $T, w$ );
4: Rechtsrotation( $T, w$ );

```

Übungsaufgabe: Beschreiben Sie die Schemata für eine Doppelrotation (rechts/links) und eine einfache Rotation (rechts) und die zugehörigen Zeigerprozeduren.

Korrektheit: Von der Logik her können Disbalancen am Knoten y durch das Einfügen eines Knoten z nur durch einen der vier Einfügefälle von z (links/rechts, rechts/links, links/links, rechts/rechts) entstehen. Wird der Knoten z beispielsweise direkt nur links unter y eingefügt dann kann $\text{rechts}(y)$ nur aus einem Blatt oder einem Baum der Höhe 1 bestanden haben. In jedem Fall entsteht bei y gar keine Disbalance. Der andere Fall geht analog.

Außerdem wird durch das Beseitigen der Disbalance beim Knoten y stets der gesamte Baum ausgeglichen. Falls beispielsweise die Doppelrotation (links/rechts) durchgeführt wurde, muss der Knoten y vor dem Einfügen den Wert -1 gehabt haben. Nach der Rotation hat der Teilbaum mit neuer Wurzel w zwar den bal-Wert 0 aber die Höhe des Teilbaumes bleibt erhalten. Das heißt, alle anderen $\text{bal}(v)$ -Werte bleiben erhalten. Der Baum ist insgesamt

ausgeglichen. Die anderen Fälle gelten analog.

Insgesamt führen wir ein korrektes Einfügen eines Knoten z in Laufzeit $O(\log n)$ durch.

6.4.2 Entfernen eines Knoten

Beim Entfernen von Knoten kommen analoge Operationen zur Anwendung. Wie bereits in Abschnitt 6.3.1 bemerkt, wird stets ein Knoten v durch seinen linken oder rechten Teilbaum w ersetzt, der andere Teilbaum war dabei ein Blatt. Wenn der Baum nach dieser Operation am Knoten w unbalanciert ist, muss der Baum rebalanciert werden.

Wir geben zunächst ein Beispiel an und beschreiben dann die allgemeine Vorgehensweise. Wenn in Abbildung 6.12 der Knoten mit Schlüssel 15 und zwei echten Teilbäumen entfernt werden soll, so wird der Knoten zuerst durch den Knoten mit nächstgrößtem Schlüssel 17 ersetzt und der vormalige Knoten mit Schlüssel 17 entfernt. Dieser hatte mindestens ein Blatt, in unserem Fall sogar zwei Blätter. Der Teilbaum wurde entfernt und in diesem Fall durch ein Blatt ersetzt. Auf dem Weg zur Wurzel werden dann die $\text{bal}(v)$ -Werte angepasst, bis zum ersten Mal eine Disbalance entdeckt wird. Nun müssen wiederum Rotationen ausgeführt werden, um die Disbalance zu beseitigen. Offensichtlich reicht hier eine einfache Rechtsrotation am Knoten mit Schlüssel 5 aus, siehe Abbildung 6.18. Es kann ebenfalls sein, dass Dop-

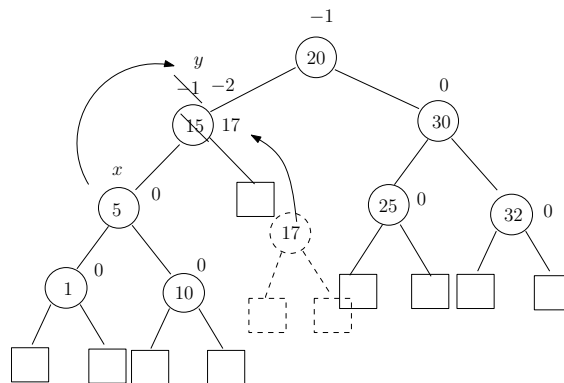


Abbildung 6.18: Die Situation vor einer einfachen Rotation nach dem Entfernen des Knoten mit Schlüssel 15. Der ehemalige Knoten des Schlüssels 17 wird entfernt.

pelrotationen notwendig sind. Wir beschreiben kurz das allgemeine Schema. Im Gegensatz zur Beschreibung des Einfügens eines Knoten beschreiben wir hier die einfache Rotation (rechts) und die Doppelrotation (links/rechts) die durch eine -2 Disbalance entstehen. Analoge Operationen einfache Rotation

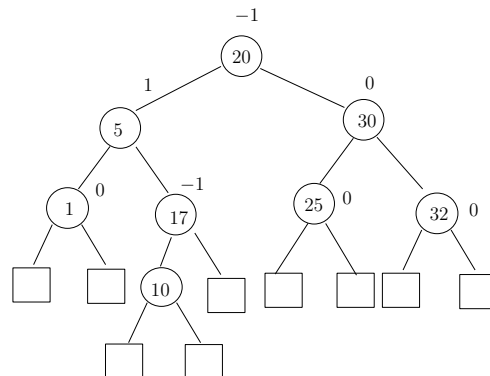


Abbildung 6.19: Nach der Rotation ist der Baum ausgeglichen.

(links) und Doppelrotation (rechts/links) entstehen bei $+2$ Disbalancen.

Angenommen die Disbalance tritt am Knoten y zuerst auf. Falls die Disbalance im Knoten y durch einen -2 Wert gegeben ist, wurde ein rechter Teilbaum C von y angehoben. Für den linken Nachfolger x ergeben sich zwei Fälle. Falls der bisherige $\text{bal}(x)$ -Wert 0 oder -1 war, reicht eine einfache Rechtsrotation am Knoten x mit Knoten y aus, siehe Abbildung 6.20. Der Teilbäume A von x wird um eins angehoben, der Teilbaum C um eins gesenkt. Der Teilbaum B respektive B' behält seine Höhe. Es kann auch vorkommen (Fall B'), dass die Höhe des Baumes insgesamt um Eins sinkt.

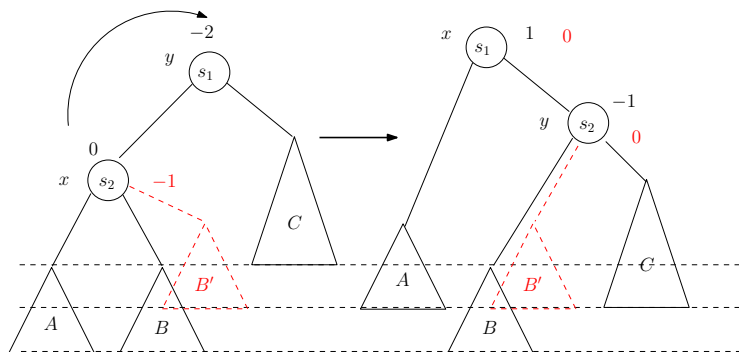


Abbildung 6.20: Die Situation vor einer einfachen Rotation. Der Disbalance-Knoten y ($\text{bal}(y) = -2$) hat einen linken Nachfolger x mit $\text{bal}(x) \in \{0, -1\}$. Dann reicht eine einfache Rechtsrotation des Knoten x mit y aus.

Falls allerdings der $\text{bal}(x)$ Wert $+1$ war, hat der rechte Nachfolger w von x zwei Teilbäume B und C , von denen mindestens einer zusammen mit w eine höhere Tiefe als der linke Nachfolger A von x aufweist. Eine einfache Rechtsrotation von x mit y wird die Höhe des Baumes w erhalten, die Höhe

von A aber absenken, somit entsteht eine $+2$ Disbalance.

Hier ist somit wiederum eine Doppelrotation notwendig. Zunächst eine Linksrotation des Knoten w mit x und danach eine Rechtsrotation des Knoten w mit y . Das vollständige Ergebnis ist in Abbildung 6.21 zu sehen. Beachte, dass C und B auch die Rollen tauschen können. Das heißt, dass entweder B oder C die Disbalance am Knoten y zusammen mit D verursacht. In jedem Fall wird der Baum rebalanciert, hat aber insgesamt in jedem Fall die Höhe um Eins verringert. Übungsaufgabe: Beschreiben Sie die Schemata für die

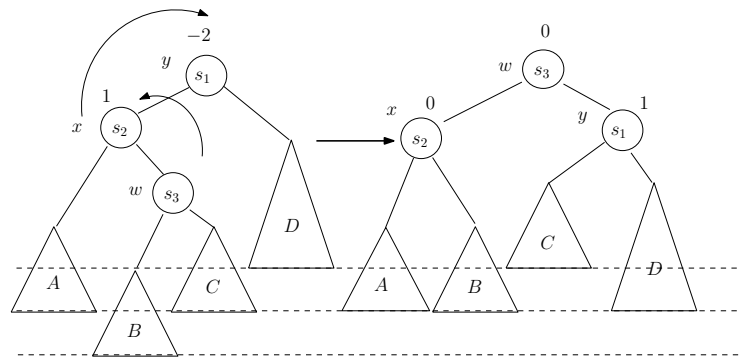


Abbildung 6.21: Die Situation vor einer Doppelrotation (links/rechts). Der Disbalance-Knoten y ($\text{bal}(y) = -2$) hat einen linken Nachfolger x mit $\text{bal}(x) = 1$. Dann ist eine Doppelrotation (zuerst Linksrotation Knoten w mit x und danach Rechtsrotation Knoten w mit y) notwendig.

Rotationen nach dem Entfernen, falls sich die Disbalance durch einen ersten -2 Wert an einem Knoten y ergibt und somit ein rechter Teilbaum von y an Höhe verloren hat. Beschreiben Sie die zwei Unterfälle, dass der linke Nachfolger x von y den Wert $\text{bal}(x) = -1$ bzw. $\text{bal}(x) \in \{0, 1\}$ aufweist.

Korrektheit: Für den ersten Disbalance Knoten y gibt es nur die beiden Möglichkeiten $\text{bal}(y) \in \{2, -2\}$, wobei die Disbalance nur durch die jeweils beschriebenen Fälle aufgetreten sein konnten. Entweder wurde die Höhe eines rechten oder eines linken Teilbaumes von y reduziert. Für den jeweils anderen Nachfolger x von y ergeben sich dann die zwei möglichen Unterfälle. Insgesamt wird zur Rebalancierung von y entweder eine einfache Rotation (links oder rechts) oder eine Doppelrotation (links/rechts oder rechts/links) ausgeführt. Danach ist der Knoten y rebalanciert. Wir sehen aber, dass der Teilbaum von y (im Vergleich zur Situation vor dem Entfernen) insgesamt immer um 1 an Höhe verliert, deshalb kann es sein, dass die verringerte Höhe von y weitere $\text{bal}(v)$ -Werte auf dem Weg zur Wurzel verändert.

Das ist nicht weiter tragisch. Wir wenden die Argumentation sukzessive wieder an. Für den nächsten Disbalance-Knoten auf dem Weg zur Wurzel führen wir die gleichen Operationen durch. Spätestens wenn wir an der Wurzel an-

gekommen sind, ist der gesamte Baum ausgeglichen.

Laufzeit: Für das Entfernen wird zunächst ein Aufwand in $O(\log n)$ benötigt. Für die Rebalancierung laufen wir aufsteigend zu den nächsten zu rebalancierenden Knoten. Der Weg zur Wurzel hat eine Länge von $O(\log n)$. Jede einzelne Balancierungsoperation kostet $O(1)$ Zeit. Insgesamt wird nur $O(\log n)$ Zeit benötigt.

Damit haben wir folgendes Ergebnis:

Theorem 12 *In einem AVL-Baum mit n Blättern kann man einen Schlüssel in Zeit $O(\log n)$ suchen, einfügen oder entfernen.*

Theoretisch könnte man AVL-Bäume auch zum Sortieren benutzen: Erst fügt man die n Schlüssel nacheinander in einen anfangs leeren Baum ein, mit Kosten n mal $O(\log n)$, dann gibt man sie in Zeit $O(n)$ durch einen In-Order-Durchlauf sortiert aus. In der Praxis würde man aber Mergesort oder andere spezielle Sortierverfahren bevorzugen, weil sie einfacher zu implementieren sind und kleinere Konstanten in den O -Abschätzungen stecken.

Man kann AVL-Bäume auch als Blattsuchbäume verwenden; dann stehen die Schlüssel in den Blättern, und die internen Knoten enthalten Wegweiser, zum Beispiel jeweils den maximalen Schlüssel im linken Teilbaum. Beim Einfügen und Entfernen müssen die Wegweiser ebenfalls aktualisiert werden. An der logarithmischen Laufzeit ändert sich dadurch nichts.

Manchmal möchte man neben Suchen, Einfügen und Entfernen auch *Bereichsanfragen* beantworten: Für ein beliebiges Intervall $[l, r]$ berichte alle Datenobjekte, deren Schlüssel in diesem Intervall liegt. Bei AVL-Blattsuchbäumen kann man diese Aufgabe auf verschiedene Arten lösen. Sehr bequem ist es, die Blätter mit Zeigern zu verketteten. Dann kann man zum Beispiel nach der linken Intervallgrenze l suchen, und von dem Blatt, in dem die Suche endet, den Zeigern nach rechts folgen, bis man den ersten Schlüssel mit Wert $> r$ trifft; das geht offenbar in Zeit $O(\log n + k)$, wobei k die Anzahl der gefundenen Schlüssel bedeutet. Weil die Verzeigerung der Blätter sich bei Rotationen nicht ändert, müssen die zusätzlichen Zeiger nur beim Einfügen und Entfernen aktualisiert werden, was genauso funktioniert wie bei dynamischen Listen.

6.4.3 Sweep

Als Beispiel betrachten wir noch einmal das Problem des dichtesten Punktpaars: Gegeben sind n Punkte in der Ebene, gesucht ist ein Paar mit minimalem Abstand.

Mit Divide-and-Conquer hatten wir eine Laufzeit von $O(n \log^2 n)$ erreicht. Jetzt wenden wir eine Technik an, die in der algorithmischen Geometrie

als *Sweep* bekannt ist. Der Einfachheit halber sei vorausgesetzt, dass alle n Punkte paarweise verschiedene X - und Y -Koordinaten besitzen und dass alle Punktepaare unterschiedliche Abstände haben; dann dürfen wir auch von *dem* dichtesten Paar sprechen.

Wir stellen uns vor, dass wir die Ebene von links nach rechts mit einer senkrechten Geraden L , der sogenannten *Sweep*line, überstreichen. Zu jedem Zeitpunkt wollen wir das dichteste Punktepaar *aller Punkte links von L* kennen. Anfangs liegen genau zwei Punkte links von L und bilden das dichteste Paar. Am Ende liegen alle n Punkte links von L , und unser Problem ist gelöst. Was passiert zwischendurch?

Angenommen, das dichteste Paar aller Punkte links von L hat zur Zeit den Abstand M . Daran kann sich frühestens dann etwas ändern, wenn L auf einen neuen Punkt p trifft. Wenn tatsächlich p zu einem alten Punkt q links von L einen Abstand $< M$ hat, kann q von L nicht weit entfernt sein: q muss in einem senkrechten Streifen der Breite M links von L liegen, und zwar in einem Rechteck R der Höhe $2M$ mit p als Mittelpunkt der rechten Kante; siehe Abbildung 6.22.

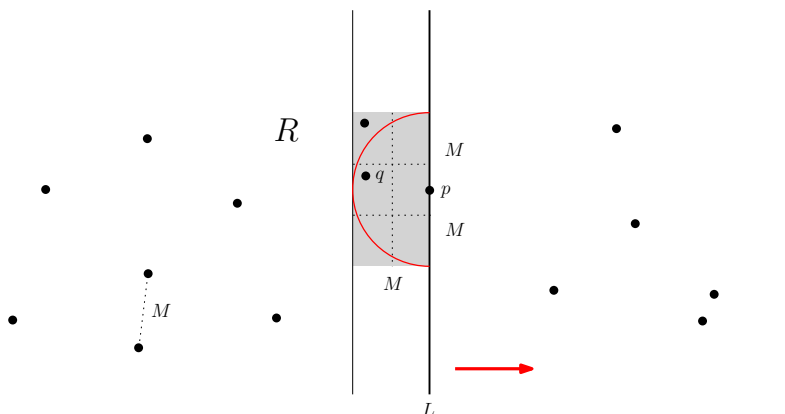


Abbildung 6.22: Wenn p einen Abstand $< M$ zu einem Punkt q links der Sweepline L hat, muss q im Rechteck R liegen.

Erfreulicherweise kann das Rechteck R nicht beliebig viele Punkte enthalten:

Lemma 13 *Ein Rechteck R mit Kantenlängen $M \times 2M$ kann höchstens 6 Punkte enthalten, die paarweise einen Abstand $\geq M$ haben.*

Beweis. Wir teilen R in sechs gleich große Rechtecke der Größe $\frac{2M}{3} \times \frac{M}{2}$

auf. Die kleinen Rechtecke haben Diagonalen der Länge

$$\sqrt{\left(\frac{2M}{3}\right)^2 + \left(\frac{M}{2}\right)^2} = M \sqrt{\frac{4}{9} + \frac{1}{4}} = M \frac{5}{6} < M,$$

also kann jedes kleine Rechteck höchstens einen solchen Punkte enthalten. \square

Der Sweep-Algorithmus funktioniert nun folgendermaßen: Anfangs sortieren wir die gegebenen n Punkte nach X -Koordinaten, in Zeit $O(n \log n)$. Während des Sweeps speichern wir nur die Punkte im senkrechten Streifen der Breite M ; dazu verwenden wir einen AVL-Blattsuchbaum T mit verketteten Blättern.

Wenn Sweepline L einen neuen Punkt $p = (p_x, p_y)$ erreicht, löschen wir zunächst alle alten Punkte aus T , die nicht mehr im Streifen liegen, weil ihre X -Koordinaten $< p_x - M$ sind. Dann starten wir eine Bereichsabfrage auf T und berichten alle Punkte, deren Y -Koordinaten im Intervall $[p_y - M, p_y + M]$ liegen; nach Lemma 13 sind das höchstens sechs Stück. Wir berechnen ihre Abstände zu p , prüfen, ob ein Abstand $< M$ darunter vorkommt, verkleinern gegebenenfalls den Streifen durch Löschen weiterer Punkte aus T , aktualisieren M und fügen p als neuen Punkt in T ein.

Jeder der n Punkte wird genau einmal in T eingefügt und genau einmal gelöscht, zusammen in Zeit $O(\log n)$. Die n Bereichsabfragen kosten jeweils $O(\log n + k)$ Zeit, wobei k die Anzahl der berichteten Punkte ist; aber nach Lemma 13 ist $k \leq 6$. Insgesamt haben wir damit folgendes verbesserte Ergebnis:

Theorem 14 *Das dichteste Punktepaar von n Punkten in der Ebene lässt sich in Zeit $O(n \log n)$ und linearem Platz bestimmen.*

Man kann zeigen, dass diese Schranken optimal sind.

6.5 B-Bäume

Wenn die Datenmenge so groß wird, dass sie nicht mehr in den schnellen Hauptspeicher passt, muss sie in langsamere Speicher ausgelagert werden. Hier gilt das Modell der REAL RAM nur noch bedingt, denn die Laufzeit von Algorithmen wird jetzt von der *Anzahl der Zugriffe auf das langsame Speichermedium* dominiert.

Zum Beispiel muss bei externen Festplatten ein Schreib-/Lesekopf auf die richtige Spur bewegt werden; das dauert zwar nur einige Millisekunden, aber doch fast 10^3 mal so lang wie ein Hauptspeicherzugriff. Dafür liefert ein Festplattenzugriff nicht nur einen einzelnen Wert, sondern eine Datenseite (Datenblock) mit Volumen 512 Byte bis 1 KByte.

Diesem Umstand trägt das Modell der *B-Bäume* Rechnung.

Definition 15 Ein *B-Baum der Ordnung k* ist durch folgende Eigenschaften bestimmt:

1. Alle Blätter haben dieselbe Tiefe.
2. Alle Knoten außer der Wurzel haben mindestens k und höchstens $2k-1$ viele Söhne.
3. Die Wurzel hat mindestens 2 und höchstens $2k-1$ viele Söhne.

Wenn h die Höhe eines solchen B-Baums bezeichnet und n die Anzahl seiner Blätter, so gilt

$$2 \cdot k^{h-1} \leq n \leq (2k-1)^h,$$

die untere Schranke wird erreicht, wenn die Wurzel nur 2 und alle anderen internen Knoten nur k Söhne haben, die obere, wenn alle Knoten maximal viele, nämlich $2k-1$, Kinder besitzen. Daraus folgt

$$\log_{2k-1} n \leq h \leq 1 + \log_k \frac{n}{2} \quad (6.9)$$

Abbildung 6.23 zeigt, wie ein Knoten eines B-Suchbaums aufgebaut ist.

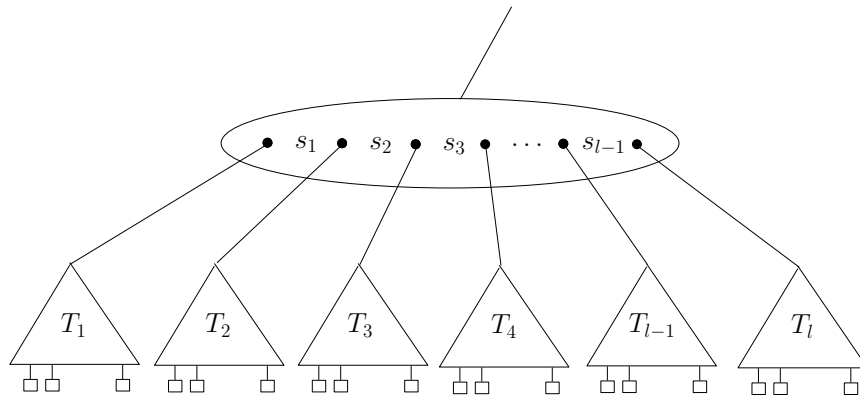


Abbildung 6.23: Im Knoten eines B-Baums wechseln Zeiger auf Teilbäume und Schlüssel einander ab. Alle Schlüssel in T_i sind kleiner als s_i , und s_i ist kleiner als die Schlüssel in T_{i+1} .

Schlüssel stehen nur in den inneren Knoten, zwischen den Zeigern auf die Teilbäume. Sie sind aufsteigend sortiert: Für alle i gilt

$$\text{Schlüssel von } T_i < s_i < \text{Schlüssel von } T_{i+1}.$$

Der Parameter k wird meist so gewählt, dass ein maximal voller Knoten mit $2k-1$ Zeigern und $2k-2$ Schlüsseln gerade auf eine Datenseite passt. Wegen

der unteren Schranke k für die Anzahl der Söhne ist dann jede Datenseite (außer der Wurzel) zumindest halb voll.

Beim *Suchen* eines Schlüssels x startet man im Wurzelknoten und durchläuft von links nach rechts die dort gespeicherten Schlüssel s_1, \dots, s_{l-1} , bis man zum letzten Schlüssel s_i mit $s_i \leq x$ gelangt. Gilt $s_i = x$, so ist man fertig. Andernfalls setzt man die Suche im Teilbaum T_{i+1} fort.

Um einen Schlüssel x *einzufragen*, wird x zunächst gesucht. Kommt x bereits vor, so wird eine Meldung generiert. Andernfalls endet die Suche erfolglos in einem Blatt b , das in seinem Vaterknoten v hinter einem Schlüssel $s_i < x$ angehängt ist. Wir fügen x als neuen Schlüssel hinter s_i in die Liste ein und ein neues Blatt b' hinter x . Wenn Knoten v jetzt immer noch $\leq 2k - 1$ viele Söhne hat, ist man fertig. Wenn nicht, hat v jetzt genau $2k$ viele Söhne und wird in zwei gleich große Knoten v_1 und v_2 aufgeteilt; dabei wandert der k -te Schlüssel (nach Einfügen von x) in den Vater v' von v , siehe Abbildung 6.24. Möglicherweise ist jetzt auch Knoten v' überfüllt und muss geteilt werden. Das kann sich bis zur Wurzel w fortpflanzen; in dem Fall wird w in zwei Knoten aufgeteilt und eine neue Wurzel darübersetzt, die genau diese zwei Söhne hat.

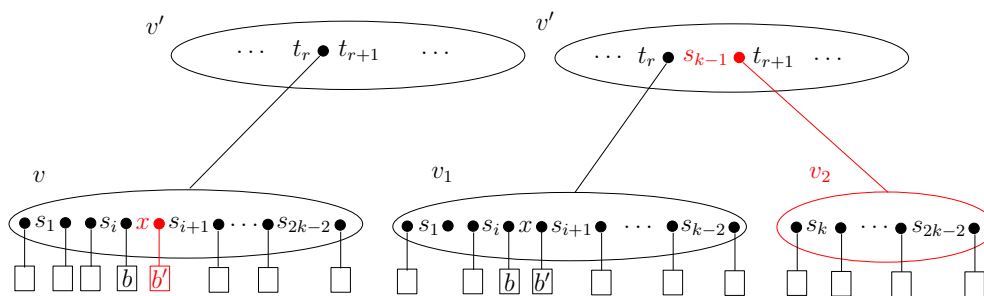


Abbildung 6.24: Knoten v wird geteilt, wenn er nach Einfügen von Schlüssel x und einem neuen Blatt b' nun $2k$ viele Söhne hat.

Auch beim *Entfernen* eines Schlüssels x wird dieser zunächst gesucht. Falls x nicht vorkommt, wird eine Meldung generiert. Andernfalls steht x in einem Knoten v hinter dem Zeiger auf einen Teilbaum T_j . Im ersten Fall sind T_j und alle anderen Söhne von v Blätter. Dann werden T_j und x einfach entfernt. Dabei kann es passieren, dass v nur noch $k - 1$ Söhne bleiben; wir überlegen uns gleich, was dann zu tun ist. Im zweiten Fall hat v echte Teilbäume als Söhne. Dann sei s der größte Schlüssel in T_j , enthalten in einem

Knoten w . Rechts von s steht in w nur noch der Zeiger auf ein Blatt b ; siehe Abbildung 6.25. Schlüssel s ist der Vorgänger von x im Baum. Darum ersetzen wir im Knoten v den Schlüssel x durch s und entfernen dann im Knoten w den Schlüssel s und das Blatt b (so, als hätten wir von Anfang an s entfernen wollen, wie im ersten Fall). Auch hier kann es passieren, dass w nur $k - 1$ Söhne behält.

Dann wird w mit einem Nachbarknoten u mit $l \geq k$ Söhnen vereinigt; das ist gerade die Umkehrung der Knotenteilung beim Einfügen. Falls $l > k$ war, können wir den Vereinigungsknoten gleich wieder in zwei Knoten mit jeweils $\geq k$ vielen Söhnen teilen und sind nach dieser Umverteilung von Schlüsseln fertig. Andernfalls hat der Vater w' von w und u durch die Vereinigung einen Sohn verloren und könnte jetzt selbst unterbelegt sein. Dann muss w' mit einem Nachbarknoten vereinigt werden, und so fort. Sollte die Wurzel nur noch einen Sohn haben, wird sie entfernt, und der Sohn wird zur neuen Wurzel.

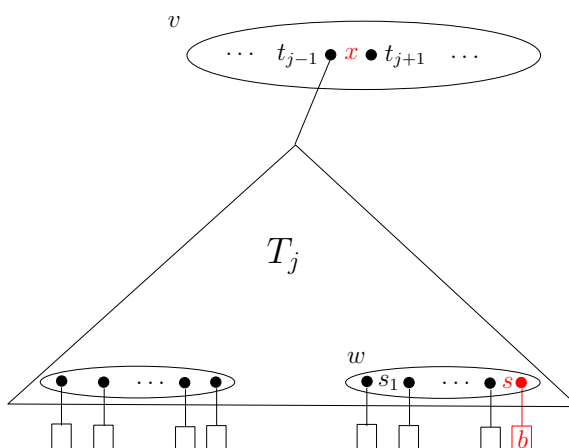


Abbildung 6.25: Der zu entfernende Schlüssel x wird durch seinen Vorgänger s ersetzt. Blatt b wird entfernt.

Bei den Operationen Suchen, Einfügen und Entfernen erfordert jeder Knotenbesuch einen Externzugriff auf eine Datenseite. Beim Einfügen läuft man erst längs des Suchpfads zu einem Blatt hinab; dann kann es nötig sein, zur Wurzel hinaufzulaufen und dabei jeden Knoten zu teilen. Mit der Abschätzung (6.9) für die Höhe eines B-Baums erhalten wir also folgendes Ergebnis:

Theorem 16 *In einem B-Baum der Ordnung k lassen sich Suchen, Einfügen und Entfernen mit maximal*

$$3 \log_k n + 3 \in O(\log_k n)$$

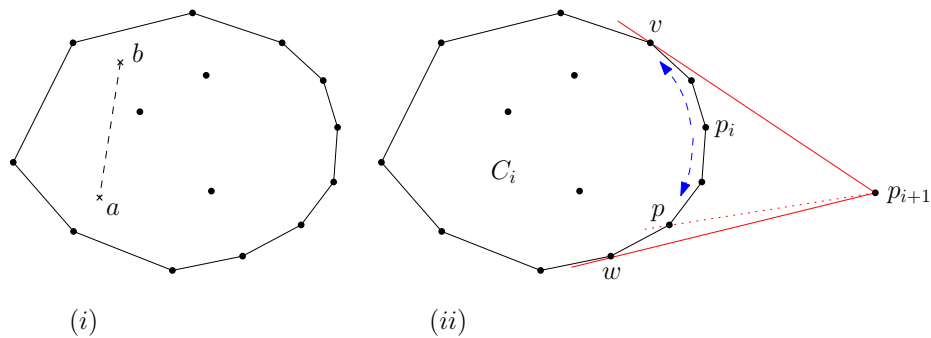


Abbildung 6.26: (i) Die konvexe Hülle von Punkten in der Ebene. (ii) Punkt p_{i+1} kommt hinzu.

Externzugriffen ausführen, wobei n die Anzahl der Schlüssel bedeutet.

Für $k = 2$ sind B-Bäume auch als 2-3-Bäume bekannt und können als Alternative zu AVL-Bäumen als interne Datenstrukturen im Hauptspeicher verwendet werden.

6.6 Mittelwertbildung

Bevor wir weitere Datenstrukturen betrachten, wollen wir im Hinblick auf spätere Anwendungen verschiedene Arten der Mittelwertbildung diskutieren, die bei der Analyse vorkommen können, und jeweils typische Anwendungen untersuchen.

6.6.1 Amortisierte Kosten: Berechnung der konvexen Hülle

Manchmal muss eine Folge von n gleichartigen Aktionen ausgeführt werden, von denen einige hohe Kosten verursachen, andere aber nur geringe. Dann ist es vernünftig, die Gesamtkosten aller Aktionen zu betrachten und durch n zu teilen, um ein Maß für die mittleren Kosten pro Aktion zu bekommen. Dabei kann eine teure Aktion als "Investition in die Zukunft" angesehen werden, die sich später durch viele Aktionen mit niedrigen Kosten "amortisiert".

Als Beispiel betrachten wir einen Algorithmus zur Konstruktion der *konvexen Hülle* von n Punkten in der Ebene, also der (bezüglich Inklusion) kleinsten Menge, die die gegebenen Punkte enthält und mit je zwei beliebigen Punkten a und b auch das Liniensegment \overline{ab} von a nach b . Ihren Rand kann man sich als ein gespanntes Gummiband vorstellen, das die gegebenen Punkte umschließt; siehe Abbildung 6.26 (i).

Zu Beginn werden die n Punkte nach aufsteigenden X -Koordinaten sortiert; der Einfachheit halber wird angenommen, dass diese Koordinaten paarweise verschieden sind und dass außerdem keine drei Punkte auf einer Geraden liegen. Jetzt verfährt man inkrementell. Die konvexe Hülle von p_1, p_2, p_3 ist einfach das Dreieck mit diesen Eckpunkten. Angenommen, die konvexe Hülle C_i von p_1, \dots, p_i ist schon konstruiert, und p_{i+1} soll nun als weiterer Punkt hinzugenommen werden. Wegen der Sortierung liegt C_i links von der Senkrechten durch p_i , und p_{i+1} liegt rechts davon; siehe Abbildung 6.26 (ii). Deshalb kann p_{i+1} den Punkt p_i sehen. Wir starten bei p_i und durchlaufen den Rand von C_i nach oben und unten, bis die beiden Tangentenpunkte v und w gefunden sind. Unterwegs muss man bei jedem Eckpunkt p testen, ob die Halbgerade von p_{i+1} durch p die konvexe Hülle C_i berührt oder schneidet; das geht in konstanter Zeit, weil man nur die beiden Kanten von C_i betrachten muss, die sich in p treffen.

Wenn v und w gefunden sind, ergibt sich die neue konvexe Hülle C_{i+1} , indem man die Segmente $\overline{vp_{i+1}}$ und $\overline{wp_{i+1}}$ hinzufügt und das Randstück von C_i zwischen v und w , welches p_i enthält, entfernt.

Diese Aktion kann Kosten in $O(n)$ verursachen, wenn zwischen v und w viele Eckpunkte p liegen, die besucht werden müssen. Aber alle diese Eckpunkte werden anschließend entfernt und kommen nie wieder vor, weil sie jetzt innerhalb von C_{i+1} liegen. Also betragen die Gesamtkosten aller Einfügeoperationen $O(n)$, weil es ja nur n Punkte gibt, und eine einzelne Operation braucht im Mittel nur konstante Zeit. Damit haben wir folgendes Ergebnis:

Theorem 17 *Die konvexe Hülle von n Punkten in der Ebene lässt sich nach Sortieren der Punkte in Zeit $O(n)$ konstruieren, insgesamt also in Zeit $O(n \log n)$.*

Der Speicherplatzbedarf ist linear, wenn man die konvexen Hüllen als verkettete Listen verwaltet. Beide Schranken sind optimal. Der oben vorgestellte Algorithmus ist sowohl ein Beispiel für *Inkrementelle Konstruktion* als auch für *Sweep*, je nach Betrachtungsweise.

6.6.2 Randomisierter Input: Bucketsort

Bei manchen Algorithmen hängt die Laufzeit stark von der Eingabe ab. Dann kann es sinnvoll sein, die *mittlere Laufzeit* zu betrachten. Dazu muss man wissen, mit welcher Wahrscheinlichkeit jede mögliche Eingabe an die Reihe kommt.

Betrachten wir als Beispiel den Algorithmus *Bucketsort*, einen einfachen Verwandten vom Radixsort aus Kapitel 2. Um n reelle Zahlen x aus dem Intervall $[0, 1)$ zu sortieren, werden zunächst alle Eingabewerte in denselben Behälter (Bucket) gelegt, die im gleichen Intervall $[\frac{i}{n}, \frac{i+1}{n})$ liegen, für

$i = 0, 1, 2, \dots, n - 1$. Nun werden die Zahlen eines jeden Behälters einzeln sortiert, zum Beispiel mit einem quadratischen Verfahren wie Insertionsort. Schließlich werden die sortierten Behälterinhalte von links nach rechts ausgegeben.

Offensichtlich braucht Bucketsort Zeit $\Omega(n^2)$, wenn alle n Eingabewerte im selben Intervall $[\frac{i}{n}, \frac{i+1}{n})$ liegen, denn dann wird die gesamte Arbeit von der quadratischen Prozedur Insertionsort geleistet. Allgemein hat Bucketsort die Laufzeit

$$T(n) = dn + c \sum_{i=0}^{n-1} B_i^2,$$

wobei B_i die Anzahl der Eingabewerte im Intervall $[\frac{i}{n}, \frac{i+1}{n})$ bedeutet; dabei misst dn den Aufwand für die Aufteilung in Buckets.

Die Summe der Quadrate der B_i entspricht genau der Anzahl aller Paare (x, y) von Eingabewerten, bei denen x und y im selben Intervall liegen. Das sind alle Paare (x, x) , und außerdem gewisse Paare (x, y) mit $x \neq y$. Wenn man nun annehmen darf, dass die Eingabewerte gleichverteilt und unabhängig aus dem Intervall $[0, 1)$ gezogen werden, dann liegt zu gegebenem x der Wert y genau mit Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{n}$ im gleichen Intervall wie x , denn die Intervalle haben alle die gleiche Länge $\frac{1}{n}$, und die Ziehung von y hängt nicht von der Ziehung von x ab. Für den Erwartungswert der Laufzeit ergibt sich demnach

$$\begin{aligned} E(T(n)) &= dn + c \left(\sum_x 1 + \sum_x \sum_{y \neq x} \frac{1}{n} \right) \\ &= dn + c \left(n + n(n-1) \frac{1}{n} \right) \\ &< (d+2c)n \end{aligned}$$

aus der Linearität des Erwartungswerts. Also gilt:

Theorem 18 *Bei gleichverteilten und unabhängig gezogenen Eingabewerten aus $[0, 1)$ hat Bucketsort die mittlere Laufzeit $O(n)$.*

Auch bei Bucketsort finden, wie schon bei Radixsort, nicht nur Schlüsselvergleiche statt, denn die Eingabewerte x müssen ja ihren Intervallen zugeordnet werden. Um die Bedingung $\frac{i}{n} \leq x < \frac{i+1}{n}$, oder äquivalent: $i \leq nx < i+1$, testen zu können, wird die Rundungsfunktion $\lfloor nx \rfloor$ benötigt. Daher widerspricht Theorem 18 nicht der unteren Schranke in Theorem 2.

In manchen Fällen ist man nicht daran interessiert, die Laufzeit über alle möglichen Eingaben zu mitteln, sondern nur in der Umgebung besonders "schwieriger" Inputs; so kann man Aufschluss darüber gewinnen, ob es sich um singuläre Ausreißer handelt.

6.6.3 Randomisierter Algorithmus: Bestimmung des Maximums

In den meisten Fällen ist nicht bekannt, welcher Wahrscheinlichkeitsverteilung die Eingaben unterliegen; dann muss ein Algorithmus mit den konkreten Eingabewerten arbeiten, die er bekommt. Trotzdem kann er Zufall ins Spiel bringen, indem er würfelt, welche von mehreren möglichen Aktionen als nächste ausgeführt werden soll.

Wir beginnen mit einem ganz einfachen Beispiel. Um das Maximum von n Schlüsseln a_i zu bestimmen, verfährt man wie folgt: Eine Variable \max wird zunächst auf a_1 gesetzt. Dann wird für $i = 2$ bis n getestet, ob $\max < a_i$ gilt, und gegebenenfalls das bisherige Maximum durch $\max := a_i$ aktualisiert. Das erfordert $n - 1$ Tests und schlimmstenfalls $n - 1$ Aktualisierungen, wenn die Schlüssel aufsteigend sortiert sind.

Angenommen, ein Test kostet Zeit T , eine Aktualisierung aber Zeit $A \gg T$, weil dabei Daten bewegt werden müssen. Dann würde man gern die Anzahl der Aktualisierungen begrenzen. Ein naheliegender Ansatz besteht darin, die gegebenen n Schlüssel zunächst in eine zufällige Reihenfolge zu bringen und dann obigen Algorithmus zu starten.

Wie wahrscheinlich ist es nun, dass die Aktualisierung $\max := a_i$ ausgeführt werden muss? Das geschieht genau dann, wenn a_i der größte Schlüssel in $A_i := \{a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_i\}$ ist. Die Wahrscheinlichkeit hierfür beträgt $\frac{1}{i}$, denn nach der anfänglichen Zufallspermutation ist a_i eine beliebige Zahl in der i -elementigen Menge A_i . Also hat der randomisierte Algorithmus die zu erwartenden Kosten

$$E(T(n)) = (n-1) \cdot T + \sum_{i=2}^n A \cdot \frac{1}{i} \quad (6.10)$$

$$< (n-1) \cdot T + A \cdot \int_1^n \frac{1}{x} dx \quad (6.11)$$

$$< n \cdot T + \ln(n) \cdot A, \quad (6.12)$$

was deutlich besser ist als der Worst Case $n \cdot (T + A)$. Die Abschätzung der Summe durch das Integral ergibt sich durch Vergleich der Flächen unter den Funktionen.

6.6.4 Randomisierter Algorithmus: Quicksort

Eine einfache und weit verbreitete Variante des Sortierens mit Schlüsselvergleichen funktioniert folgendermaßen: Gegeben ist ein Array A mit n Schlüsseln a_1, \dots, a_n , die sortiert werden sollen. Eine dieser Zahlen wird als sogenanntes *Pivotelement* p ausgewählt. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten; zum Beispiel könnte man einfach $p := a_n$ setzen. Jetzt werden alle

$a_i < p$ in einer Folge L zusammengefasst, und alle $a_j > p$ in einer Folge R ; das geht in Zeit $O(n)$. Nun wendet man Quicksort rekursiv auf L und R an, schreibt die sortierten Teilfolgen hintereinander, dazwischen p , und ist fertig. (In der Literatur wird beschrieben, wie man direkt im Array A die Folge L links von p anordnet und R rechts von p , ohne zusätzlichen Speicherplatz zu benutzen.)

Die Effizienz von Quicksort hängt von der Größe von L und R ab und damit von der Wahl des Pivotelements p . Im besten Fall sind L und R stets gleich groß. Dann ergibt sich für die Laufzeit die Rekursion $T(n) = 2T(\frac{n}{2}) + cn$, woraus $T(n) \in O(n \log n)$ folgt; vergleiche Kapitel 3. Tatsächlich könnte man in Zeit $O(n)$ den sogenannten *Median* von a_1, \dots, a_n bestimmen, also das Element, welches in der Mitte der sortierten Folge liegt, und damit $|L| \approx |R|$ garantieren. Der Median-Algorithmus ist aber selbst rekursiv, und die Konstante in der $O(n)$ -Abschätzung recht hoch.

Der schlimmste Fall für Quicksort tritt ein, wenn die Eingabefolge bereits aufsteigend sortiert ist. Wir müssen dann $O(n)$ Zeit aufwenden, um festzustellen, dass die ersten $n - 1$ Elemente kleiner als $p = a_n$ sind. Dann enthält L diese $n - 1$ Elemente, und R ist leer. In diesem Fall braucht Quicksort quadratische Laufzeit.

Es liegt deshalb nahe, das Pivotelement p *zufällig* in a_1, \dots, a_n auszuwählen. Dann ist jede Position von p in der sortierten Folge gleich wahrscheinlich, und für die mittlere Laufzeit ergibt sich die Rekursion

$$E(T(n)) = c(n+1) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(E(T(i-1)) + E(T(n-i)) \right) \quad (6.13)$$

$$= c(n+1) + \frac{2}{n} \sum_{i=0}^{n-1} E(T(i)), \quad (6.14)$$

denn bei beiden Summanden läuft der Index von 0 bis $n - 1$. Zur Abkürzung sei $e_i := E(T(i))$. In der Rekursion (6.14) können wir die Summation durch Differenzenbildung eliminieren und bekommen die Gleichungen

$$\begin{aligned} e_{n+1}(n+1) - e_n n &= c \left((n+2)(n+1) - (n+1)n \right) + 2 \sum_{i=0}^n e_i - 2 \sum_{i=0}^{n-1} e_i \\ &= 2c(n+1) + 2e_n \\ (n+1)e_{n+1} &= 2c(n+1) + (n+2)e_n \\ \frac{e_{n+1}}{n+2} &= \frac{2c}{n+2} + \frac{e_n}{n+1} \end{aligned}$$

Aus der letzten Zeile ergibt sich durch iteriertes Einsetzen

$$\begin{aligned} \frac{e_{n+1}}{n+2} &= 2c \left(\frac{1}{n+2} + \frac{1}{n+1} + \dots + \frac{1}{2} \right) + \frac{e_0}{1} \\ &< 2c \ln(n+2) \end{aligned}$$

wie in (6.12), wobei $e_0 = 0$ ist. Damit haben wir folgendes Ergebnis:

Theorem 19 *Die mittlere Laufzeit von Quicksort, angesetzt auf eine beliebige Eingabe von n Schlüsseln, liegt in $O(n \log n)$.*

Quicksort und Mergesort sind beides Algorithmen vom Typ Divide-and-Conquer. Quicksort leistet die Hauptarbeit bei der Aufteilung in Teilmengen, Mergesort beim Zusammenfügen der Ergebnisse.

Im nächsten Kapitel werden wir Hash-Verfahren untersuchen, bei denen sowohl randomisierte Eingaben als auch amortisierte Kosten eine Rolle spielen.

6.7 Hashing

Wir haben gesehen, dass sich balancierte Bäume sehr gut dazu eignen, sortierte Schlüssel zu speichern. Für einen gegebenen Schlüssel findet sich so der zugehörige Datensatz in $O(\log n)$ Zeit. Das Einfügen und Entfernen eines neuen Objektes mit neuem Schlüssel hat die gleiche Zeitkomplexität.

Wie man sich leicht überlegt, gelten die gleichen Laufzeiten auch für die *mittlere* Laufzeit dieser Operationen. Wenn wir also eine Folge von n Operationen betrachten und $K(i)$ die Kosten der i -ten Operation beschreibt, so erhalten wir durch

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(i)$$

die mittleren Kosten der Operationen.

Für das Einfügen und Entfernen liegen die mittleren Kosten in jedem Fall in $\Theta(\log n)$, da bei jedem Einfügen und bei jedem Entfernen die Mindestdiefe $O(\log n)$ aus dem Beweis von Lemma 8 zu durchlaufen ist und andererseits die Kosten nach den Betrachtungen des vorherigen Kapitels stets in $O(\log n)$ liegen.

Für Datenbanken mit sehr großen Datenmengen verzichtet man beim erwähnten **Wörterbuch-Problem** auf die sortierte Speicherung der Schlüssel. Stattdessen sollen die Operationen (Exakte) Suche, Einfügen und Entfernen im Mittel nur *konstante* Zeit verursachen.

In solchen Fällen kommt das sogenannte *Hashing* zur Anwendung. Gegeben ist also eine Menge von Objekten (Daten) die über einen eindeutigen Schlüssel (ganze Zahl) identifizierbar sind und es wird eine Struktur zur Speicherung gesucht, die mindestens die Operationen

- (Exakte) Suche eines Objektes mit Schlüssel x
- Einfügen eines Objektes mit Schlüssel x

- Entfernen eines Objektes mit Schlüssel x

effizient (im Mittel konstant) ausgeführt werden können. Dafür wird das Schlüsseluniversum partitioniert. Die Position des Datenelementes im Speicher ergibt sich durch eine Berechnung aus dem Schlüssel.

Formal steht uns für die Verwaltung einer ungeordneten Menge S von Schlüsseln zu zur Verfügung:

1. ... ein Feld $T[0..m-1]$ für m Behälter $T[0], T[1], \dots, T[m-1]$ die sogenannte *Hashtabelle* und
2. ... eine *Hash-Funktion* $h : U \rightarrow [0..m-1]$ die das Universum der Schlüssel auf das Feld T abbildet

Ziel ist es, für eine Schlüsselmenge $S \subseteq U$ für jedes Element $x \in S$ das zugehörige Datenobjekt in $T[h(x)]$ zu speichern. Im Folgenden lassen wir der Übersichtlichkeit halber die Datenobjekte weg und speichern lediglich die Schlüssel in der Hashtabelle.

Beispiel: Sei $m = 5$ und $S = \{8, 22, 16, 29\}$ und $h(x) = x \bmod 5$. Die Hashtafel sieht dann wie folgt aus:

0	
1	16
2	22
3	8
4	29

Falls wir hier einen weiteren Schlüssel 21 verwenden gilt $h(21) = 1$ und wir sprechen dann von einer *Kollision*. Für eine Menge S von n Schlüsseln und für eine Menge von m Behältern $T[0], \dots, T[m-1]$ mit $n \leq m$ heißt die Hashfunktion h *perfekt für S* falls es keine Kollisionen bei der Zuordnung gibt. Die Hashfunktion soll effizient ausgewertet werden können.

6.7.1 Kollisionsbehandlung mit verketteten Listen

Eine sehr einfache Lösung in der Kollisionsbehandlung ist die Verwendung verketteter Listen in den Einträgen $T[i]$ der Hashtabelle. Neue Einträge werden dann an den Anfang der Liste gesetzt und somit kann nach Auswertung der Hashfunktion in konstanter Zeit ein neuer Schlüssel eingefügt werden.

Beispiel: Wie betrachten die Schlüsselmenge $S = \{10, 22, 16, 29, 17, 3\}$ für $m = 3$ und die Hashfunktion $h(x) = x \bmod 3$. Die Abbildung beschreibt die Hashtabelle nach dem sukzessiven Einfügen der Schlüssel mit Kollisionsvermeidung mittels verketteter Listen.

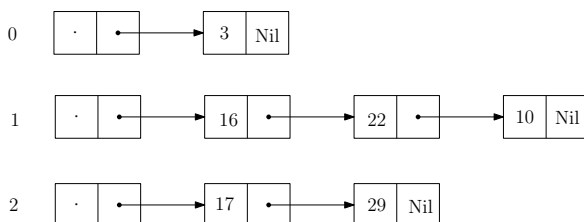


Abbildung 6.27: Die Kollisionsbehandlung durch die Verwendung von verketteten Listen $S = \{10, 22, 16, 29, 17, 3\}$ und $h(x) = x \bmod 3$.

Wir wollen nun die Verwendung von verketteten Listen für die Kollisionsbehandlung analysieren und dabei die mittleren Kosten berücksichtigen. Die Kosten einer Operation (Exakte) Suche und Entfernen ergeben sich jeweils durch das Berechnen des Hashwertes und den anschließenden linearen Suchdurchlauf durch die Liste des entsprechenden Eintrags.

Die Funktion $\delta_h(x, S)$ bezeichnet die Anzahl der Elemente $y \in S$ für die Funktion $h(x) = h(y)$ gilt. Dann kann eine Operation (Exakte) Suche und Entfernen für einen Schlüssel x in Zeit $O(1 + \delta_h(x, S))$ ausgeführt werden.

Wir betrachten dabei auch eine Folge von n möglichen zufälligen Operationen (Exakte) Suche, Einfügen und Entfernen und wollen die gesamte Laufzeit dafür nach oben abschätzen.

Wir machen dafür die folgende Annahmen:

1. Die Hashfunktion $h : U \rightarrow [0..m]$ streut das Universum gleichmäßig über das Intervall $[0..m]$. Das ist zum Beispiel für $h(x) = x \bmod m$ gegeben.
2. Sämtliche Elemente des Universums sind mit gleicher Wahrscheinlichkeit Argument der nächsten Operation.

Falls nun x_k der Schlüssel ist, der in der k -ten Aktion verwendet wird, dann folgt nun, dass die Wahrscheinlichkeit, dass $h(x_k) = i$ ist für $i \in [0..m]$ durch $\frac{1}{m}$ gegeben ist, kurz $\text{prob}(h(x_k) = i) = \frac{1}{m}$.

Theorem 20 *Für die einzelnen Operationen (Exakte) Suche, Einfügen und Entfernen bezüglich einer Hashtabelle für die Schlüsselmenge S wird im worst-case $\Omega(|S|)$ Zeit benötigt.*

Unter den obigen Annahmen ist der Erwartungswert für die von einer Folge von n Operationen (Exakte) Suche, Einfügen und Entfernen verursachten Kosten kleiner gleich $(1 + \frac{\alpha}{2})n$, wobei $\alpha = \frac{n}{m}$ der maximale Belegungsfaktor der Hashtafel ist.

Beweis. Der erste Teil des Theorems ist leicht zu sehen. Im schlechtesten Fall gilt für alle Schlüssel $x \in S$, dass $h(x)$ auf den gleichen Wert i_0 abbildet, dann muss im schlimmsten Fall bei jeder Operation eine Liste der Größe $|S|$ vollständig durchlaufen werden.

Für den zweiten Teil der Behauptung verwenden wir für die ersten k Operationen und für $i = 1, \dots, m$ einen Zähler $l_k(i)$, so dass $l_k(i)$ nach k Operationen in jedem Fall einen Wert größer gleich der dann aktuellen Listenlänge der Liste von $T_k[i]$ hat. Falls nun eine weitere Operation die i -te Liste betrifft, wird $l_{k+1}(i) := l_k(i) + 1$ gesetzt und $l_k(i)$ ist dann stets eine obere Schranke der aktuellen Listenlänge nach k Operationen.

Anfangs sind alle Zähler auf 0 gesetzt. Immer wenn eine Operation die i -te Liste betrifft, erhöhen wir den Wert von $l_k(i)$ um Eins, unabhängig von der Art der Operation. Sei EK_{k+1} der Erwartungswert des Aufwandes der $(k+1)$ -ten Operation bei insgesamt n Operationen. Nehmen wir an, dass x_{k+1} der Schlüssel der $(k+1)$ -ten Operation ist, und es gelte $h(x_{k+1}) = i$. Sei nun $\text{prob}(l_k(i) = j)$ die Wahrscheinlichkeit, dass der Zähler $l_k(i)$ nach der k -ten Operation den Wert j hat. Dann ist

$$EK_{k+1} = 1 + \sum_{j=0}^k \text{prob}(l_k(i) = j) \cdot j,$$

da wir den Schlüssel auswerten müssen und relativ zur Wahrscheinlichkeit der Größe von $l_k(i) = j$ die entsprechende Länge j durchlaufen müssen.

Für $j \geq 1$ gilt nun aber

$$\text{prob}(l_k(i) = j) = \binom{k}{j} \left(\frac{1}{m}\right)^j \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{k-j}.$$

Diese Aussage läßt sich leicht kombinatorisch erklären. Es gibt insgesamt $\binom{k}{j}$ j -elementige Sequenzen aus den ersten k -Operationen die zu beachten sind. Für jede dieser Sequenzen ist die Wahrscheinlichkeit, dass genau j -Operationen die i -te Liste betreffen $\left(\frac{1}{m}\right)^j \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{k-j}$. Genauer, das Produkt der jeweiligen Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{m}$, dass eine einzelne der j -Operation die i -te Liste betrifft mal dem Produkt der jeweiligen Wahrscheinlichkeit $\left(1 - \frac{1}{m}\right)$, dass eine einzelne der restlichen $k-j$ -Operationen *nicht* die i -te Liste betrifft.

Zunächst berechnen wir nun EK_{k+1} :

$$\begin{aligned}
\text{EK}_{k+1} &= 1 + \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} \left(\frac{1}{m}\right)^j \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{k-j} \cdot j \\
&= 1 + \frac{k}{m} \sum_{j=1}^k \binom{k-1}{j-1} \left(\frac{1}{m}\right)^{j-1} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{k-j} \\
&\quad \left(\frac{k}{j} \text{ und } \frac{1}{m} \text{ Ausklammern}\right) \\
&= 1 + \frac{k}{m} \sum_{j=0}^{k-1} \binom{k-1}{j} \left(\frac{1}{m}\right)^j \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{(k-1)-j} \\
&= 1 + \frac{k}{m} \left(\frac{1}{m} + \left(1 - \frac{1}{m}\right)\right)^{k-1} \\
&\quad \text{(Binominaltheorem)} \\
&= 1 + \frac{k}{m}
\end{aligned}$$

Nun kann der Erwartungswert aller n Operationen, $\text{EK}(n)$, folgendermaßen abgeschätzt werden.

$$\begin{aligned}
\text{EK}(n) &= \sum_{k=1}^n \text{EK}_k = \sum_{k=0}^{n-1} \text{EK}_{k+1} \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} \left(1 + \frac{k}{m}\right) \\
&= n + \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{n-1} k = n + \frac{1}{m} \frac{n(n-1)}{2} \\
&= n \cdot \left(1 + \frac{n-1}{2m}\right) < \left(1 + \frac{n}{2m}\right) \cdot n
\end{aligned}$$

Somit gilt für $\alpha = \frac{n}{m}$, dass $\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)n$ eine obere Schranke für den erwarteten Aufwand der n Operationen darstellt. \square

Falls $\alpha = \frac{n}{m}$ konstant bleibt, sagt das obige Theorem, dass im Mittel nur konstant viel Aufwand zu erwarten ist, also eine deutliche Verbesserung im Vergleich zur AVL-Baumlösung.

Abschließend erwähnen wir noch, wie sich die Bedingung, dass $\alpha = \frac{n}{m}$ konstant bleibt, gewährleisten lässt, ohne an Performanz zu verlieren.

Wir passen das m sukzessive an. Dazu verwenden wir eine Folge von Hashtafeln $T_0, T_1, T_2, \dots, T_i, \dots$ der Größen $m, 2m, \dots, 2^i m, \dots$ mit Hashfunktionen

$h_i : U \rightarrow [0..2^i m - 1]$. Die Tafeln werden so verwendet, dass der aktuelle Belegungsfaktor α stets strikt zwischen $\frac{1}{4}$ und 1 liegt.

Die Tabelle T_i muss dann umkopiert werden, wenn der Belegungsfaktor aus dem Intervall herausfällt:

α wird zu 1: Wir speichern alle $2^i m$ Elemente von T_i nach T_{i+1} in $\Theta(2^i m)$ Zeit. Der Belegungsfaktor von T_{i+1} ist dann $\frac{1}{2}$. Bis zur nächsten Umspeicherung müssen mindestens $\frac{1}{4}2^{i+1}m$ Operationen durchgeführt werden bevor die nächste Umspeicherung notwendig wird.

α wird zu $\frac{1}{4}$: Wir können alle $\frac{1}{4}2^i m$ Elemente in $\Theta(\frac{1}{4}2^i m)$ Zeit von T_i nach T_{i-1} speichern. Der Belegungsfaktor von T_{i-1} ist dann $\frac{1}{2}$ und mindestens $\frac{1}{4}2^{i-1}m$ Operationen können durchgeführt werden bevor die nächste Umspeicherung notwendig wird.

In beiden Fällen sind die Kosten für die Umspeicherung maximal zweimal so groß, wie die Anzahl der Operationen. Die Kosten für das Umspeichern verteilen wir deshalb auf die einzelnen Operationen. Der Erwartungswert $O(1)$ für die mittleren Kosten bleibt dann erhalten. Der Aufwand amortisiert sich hier über die Zeit. Auch wenn gelegentlich viele Elemente umkopiert werden müssen, so ist der Aufwand im Mittel gering.

6.8 Union-Find Datenstruktur

Neben der Speicherung einer Menge von Objekten ist es manchmal nützlich, ein System von Mengen zu speichern. Die Union-Find Datenstruktur dient zur Verwaltung einer Menge von disjunkten Mengen S_1, \dots, S_k . Ein Universum $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ von Elementen ist gegeben und wir haben anfangs n disjunkte Mengen $S_i = \{x_i\}$. Über ein Array $U[1..n]$ können wir stets auf die Elemente durch $U[i] = x_i$ zugreifen. Jede Menge besitzt einen eindeutigen Repräsentanten $s_i \in S_i$. Im Folgenden beschreiben wir die Mengen der Einfachheit halber über die Indizes des Arrays U , das heißt $S_i = \{i\}$ und auch $s_i = i$.

Die Datenstruktur soll die folgenden Operationen effizient unterstützen:

- **UNION(x, y):** Falls zwei Mengen S_x und S_y mit $x \in S_x$ und $y \in S_y$ existieren, so werden diese entfernt und durch die Menge $S_x \cup S_y$ ersetzt. Der neue Repräsentant von $S_x \cup S_y$ kann ein beliebiges Element dieser vereinigten Menge sein.
- **FIND(x):** Liefert den Repräsentanten der Menge S mit $x \in S$ zurück.

Beispiel: Im folgenden Beispiel soll $x : A$ bedeuten, dass wir eine Menge A mit Repräsentant x gespeichert haben. Welches Element nach einer UNION-

Operation Repräsentant der neuen Menge wird, ist nicht eindeutig bestimmt. Es wurde jeweils ein beliebiges Element dafür ausgewählt.

Operation	Zustand der Datenstruktur
Initialisierung	1 : {1}, 2 : {2}, 3 : {3}, 4 : {4}, 5 : {5}
FIND(3)	Ausgabe: 3, keine Zustandsänderung
UNION(1,2)	2 : {1, 2}, 3 : {3}, 4 : {4}, 5 : {5}
UNION(3,4)	2 : {1, 2}, 3 : {3, 4}, 5 : {5}
FIND(1)	Ausgabe: 2, keine Zustandsänderung
UNION(1,5)	2 : {1, 2, 5}, 3 : {3, 4}
FIND(3)	Ausgabe: 3, keine Zustandsänderung
UNION(5,4)	3 : {1, 2, 3, 4, 5}

Intern kann eine solche Struktur effizient wie folgt realisiert werden. Eine einzelne Menge S_i wird durch eine verkettete Liste dargestellt, wobei aber jedes einzelne Listenelement auch einen Zeiger auf den Kopf S_i der Liste speichert. Der Kopf der Liste enthält den Namen S_i , den Repräsentanten i und die Größe der Liste. Zusätzlich verwenden wir ein Feld $U[1..n]$ dass für jedes Element j durch $U[j]$ einen Zeiger auf das Listenelement j in einer Liste S_i bereithält. Abbildung 6.28 illustriert die Situation für eine Menge $S_5 = \{1, 5, 4, 8\}$. Die Operation FIND(x) kann nun in $O(1)$ auf das Element

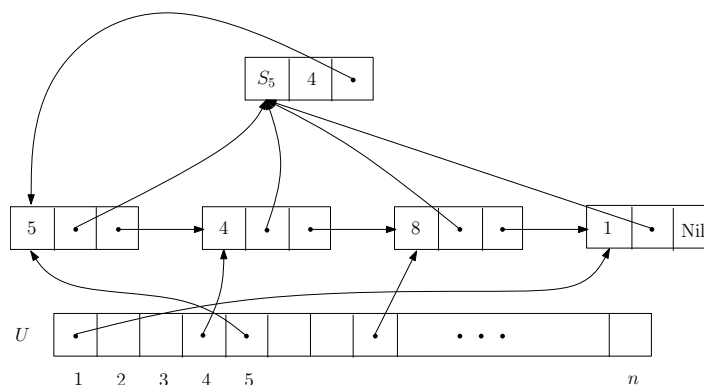


Abbildung 6.28: Die Zeigerstruktur einer Union-Find Realisierung der Menge $S_5 = \{1, 5, 4, 8\}$.

x über $U[x]$ zugreifen und findet das Kopfelement und den Repräsentanten i von S_i durch maximal zwei Verweise.

Die Operation UNION(x, y) kann wie folgt realisiert werden. Sei $|S_x| \geq |S_y|$.

- Jeder Namenszeiger von S_y wird auf den Namen von S_x gesetzt.
- Die Verkettete Liste von S_x wird an S_y angehängt. Der Mengenanfangszeiger von S_x wird auf den Anfang von S_y gesetzt. Die Größen

werden addiert und im Kopfelement S_x eingetragen.

- Das alte Kopfelement S_y wird entfernt.

Es ergibt sich ein Aufwand von $O(|S_y|)$.

Theorem 21 *Eine Folge von m FIND-Operationen und $k < n$ UNION-Operationen läßt sich in Zeit $O(m + n \log n)$ ausführen.*

Beweis. Die Laufzeit $O(m)$ für die FIND-Operationen ist klar. Die abschließende Frage lautet, wie oft ein Namenszeiger eines Elementes x insgesamt umgehängt wird. Das Element gehörte dann immer zur kleineren Menge. Nach dem ersten Umhängen gehört x zu einer Menge mit größer gleich 2 Elementen. Nach dem zweiten Umhängen gehört x zu einer Menge mit größer gleich 4 Elementen. Nach dem i -ten Umhängen gehört x also zu einer Menge mit größer gleich 2^i Elementen. Eine solche Menge S_j kann aber nur maximal n Elemente enthalten. Also kann x nur maximal $\log n$ mal umgehängt worden sein. Das gilt für jedes $x \in U$ und somit ergibt sich die Laufzeit. \square

Gelegentlich wird in einigen Beschreibungen zur Union-Find Datenstruktur auch eine Operation MAKE-SET(x) angegeben, die eine Menge $S_x = \{x\}$ initialisiert. Wir haben hier diese Initialisierung vorweggenommen. An den Laufzeiten ändert sich nichts.

6.9 Datenstrukturen für Graphen

Im nächsten Kapitel wollen wir einige klassische Algorithmen betrachten, die auf ein Netzwerk von Knoten und Kanten angewendet werden und viele praktische Anwendungen haben. Dazu betrachten wir zunächst geeignete Datenstrukturen für solche Netzwerke.

Ein sogenannter *Graph* ist eine natürliche Erweiterung der Bäume. Formal beschreiben wir einen (ungerichteten) Graphen durch eine Menge $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ von Knoten und eine Menge $E \subseteq V \times V$ von Kanten, kurz $G = (V, E)$. Jeder formale Graph G kann grafisch (oder geometrisch) in der Ebene analog zu den Bäumen realisiert werden. Für die Knoten $v_i \in V$ legen wir disjunkte Punkte in der Ebene fest und für je zwei Knoten v_1, v_2 in V mit $(v_1, v_2) \in E$ *zeichnen* wir einen einfachen Weg (ohne Selbstschnitte) zwischen den zugehörigen Orten. Falls wir eine bestimmte geometrische Realisation meinen, sprechen wir auch von einem *geometrischen* Graphen.

Nicht jeder Graph läßt sich so geometrisch realisieren, dass die Kantenwege paarweise schnittfrei bleiben. Graphen, die eine schnittfreie geometrische Realisation erlauben, heißen auch *planare* Graphen. Die Realisation selbst,

also der geometrische Graph heißt dann auch *kreuzungsfrei*. Bei einem kreuzungsfreien geometrischen Graphen kann man in der Ebene eindeutige Flächen charakterisieren, die von Kanten eingeschlossen sind.

Wir erlauben auch Kanten der Form (v, v) . Der *Grad* eines Knoten v ist die Anzahl der Kanten, die diesen Knoten als Endpunkt haben. Für *ungerichtete* Graphen ist die Kante (v_i, v_j) gleichbedeutend mit (v_j, v_i) . Bei *gerichteten* Graphen wird durch (v_i, v_j) eine Kante beschrieben, die von v_i zu v_j verläuft. Im Allgemeinen kann E auch eine Multimenge sein, das heißt es können mehrere Kanten (v_i, v_j) in E enthalten sein. In diesem Fall wird der Graph auch als *Multigraph* bezeichnet.

Für $G = (\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_1, v_1), (v_2, v_3), (v_4, v_5), (v_3, v_4), (v_1, v_5)\})$ zeigt Abbildung 6.29 eine kreuzungsfreie geometrische Realisation von G . Wir interessieren uns hier zunächst dafür, wie Graphen im Allgemei-

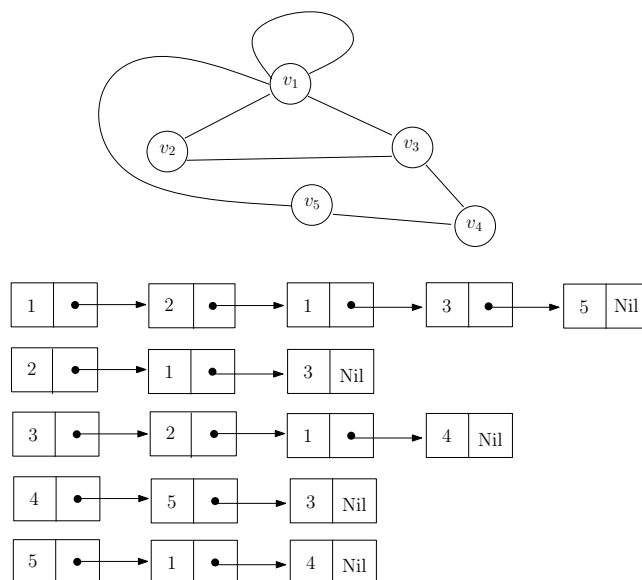


Abbildung 6.29: Eine geometrische Realisation des Graphen $G = (\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_1, v_1), (v_2, v_3), (v_4, v_5), (v_3, v_4), (v_1, v_5)\})$. Die Adjazenzliste speichert für jeden Knoten die adjazenten Knoten in einer Liste ab. Es gibt Crossreferenzen zu den jeweiligen Listen.

nen so abgespeichert werden, dass wir effizient auf die notwendigen Informationen zugreifen können. Ein *Weg* in einem Graphen ist eine Folge von Knoten, die über Kanten miteinander verbunden sind. Bei gerichteten Graphen muss die Kantenfolge entsprechend *gerichtet* sein.

Beispielsweise möchten wir nun wissen, ob tatsächlich alle Knoten von einem Startknoten aus sukzessive über Kanten erreichbar sind. Wir stellen also die

Frage, ob der Graph insgesamt *zusammenhängend* ist. Zusammenhangskomponenten (maximale zusammenhängende Teilmengen) des Graphen werden über die Knoten definiert. Außerdem kann es sinnvoll sein, alle Knoten und Kanten (bzw. weitere Daten dazu) des Graphen sukzessive auszugeben.

6.9.1 Adjazenzlisten

Eine klassische Speichermethode ist die sogenannte *Adjazenzliste*. Falls für einen Graphen $G = (V, E)$ eine Kante (v_i, v_j) existiert, sind v_i und v_j *Nachbarknoten* und werden als *adjazent* bezeichnet.

Für jeden Knoten v gibt es in der Adjazenzliste eine verkettete Liste aller Knoten, die zu v adjazent sind, also eine Kante bilden, siehe das Beispiel in Abbildung 6.29 ist ein Beispiel angegeben. Genauer handelt es sich um eine verkettete Liste von den zu v adjazenten Knoten.

Der Einfachheit halber können wir Knoten v_i auch durch Indizes $i = 1, \dots, n$ repräsentieren. Dann können wir von einem Knoten in einer Adjazenzliste leicht zu seiner Adjazenzliste gelangen und auch für jeden Knoten global eine Information abspeichern. Die Listenköpfe lassen sich dann beispielsweise durch ein Array $A[1..n]$ erreichen und die Information für die Knoten wird in $V[1..n]$ gespeichert. Das läßt sich aber genauso durch Zeiger und Namen v_i realisieren.

Offensichtlich benötigen wir für die Adjazenzliste einen Speicherplatz von $O(|V| + |E|)$. Das ist in dem Sinne optimal, dass unser Graph auch $|V| + |E|$ Objekte enthält. Wir stellen nun klassische Traversierungsmöglichkeiten für Graphen vor. Wir wollen alle Knoten des Graphen von einem Startknoten aus berichten.

Tiefensuche (DFS): Geht von einem Startknoten aus rekursiv in die *Tiefe* und besucht rekursiv den nächsten noch nicht besuchten Nachbarknoten. Falls kein solcher Knoten mehr existiert, wird zum letzten Ausgangsknoten der rekursiven Suche zurückgegangen (Backtracking). Dort wird rekursiv der nächste noch nicht besuchte Knoten in die Tiefe *exploriert*.

Breitensuche (BFS): Geht von einem Startknoten aus rekursiv in die *Breite* und besucht zunächst sukzessive durch Vorwärts- und Rückwärtsbewegung alle unbesuchten Nachbarknoten mit Abstand 1 zum Startknoten. Wenn alle Nachbarknoten besucht wurden, geht die Suche rekursiv beim ersten Nachbarknoten weiter.

Wir beschreiben das Verfahren DFS zunächst als Pseudocode und geben ein Beispiel an. Hierbei markieren wir die Knoten in der DFS Reihenfolge. Wir verwenden einen Stack S .

Prozedur 15 DFS(A, s)

Graph $G = (V, E)$ repräsentiert durch (kopierte) Adjazenzliste A . $A[v]$ ist Zeiger auf Nachbarschaftsliste von v . Vom Startknoten s aus werden alle Knoten markiert, die schon besucht wurden.

```

1: Push( $s$ );
2: Markiere  $s$ 
3: Top( $v$ );
4: while  $v \neq \text{NIL}$  do
5:   if  $A[v] \neq \text{NIL}$  then
6:      $v' := \text{first}(A[v])$ ;
7:     Lösche  $v'$  aus  $A[v]$ 
8:     if  $v'$  nicht markiert then
9:       Push( $v'$ );
10:      Markiere  $v'$ 
11:    end if
12:  else
13:    Pop( $v$ );
14:  end if
15:  Top( $v$ );
16: end while

```

Wenn wir beispielsweise den Graphen aus Abbildung 6.29 betrachten, und den Knoten v_5 als Startknoten verwenden, dann können wir die Markierungen leicht in einem Array $M[1..5]$ festhalten. Die Abbildung 6.30 zeigt einen Zwischenstand bei der Durchführung des Algorithmus für Startknoten v_5 . Jeder Knoten wird nur einmal markiert und somit gibt es $|V|$ Push-Operationen. Da in jedem While-Durchlauf entweder ein Element aus einer nichtleeren Liste gestrichen wird, oder ein Element vom Stack gepoppt wird, liegt die Laufzeit des Algorithmus in $O(|V| + |E|)$.

Bei einem *gerichteten Graphen* G hat jede Kante $e = (v, w)$ eine Richtung, nämlich vom Knoten v zum Knoten w . In der Adjazenzliste eines Knotens v stehen dann nur diejenigen Knoten w , für die eine gerichtete Kante (v, w) vorhanden ist.

Betrachten wir als Beispiel den vollständigen Binärbaum T mit 15 inneren Knoten, die von oben nach unten und von links nach rechts mit den Buchstaben a, b, c, \dots, o bezeichnet sind (in Tiefe 3 befinden sich also die Knoten h bis o). Angenommen, die Kanten sind jeweils vom Vater zu den Söhnen gerichtet, und in den Adjazenzlisten steht jeweils erst der linke Sohn, dann der rechte.

Wenn wir den DFS-Algorithmus in Prozedur 15 auf die Wurzel als Startknoten anwenden, werden die Knoten in der Reihenfolge $a, b, d, h, i, e, j, k, c, f, l, m, g, n, o$ erstmals besucht und markiert; das entspricht genau der

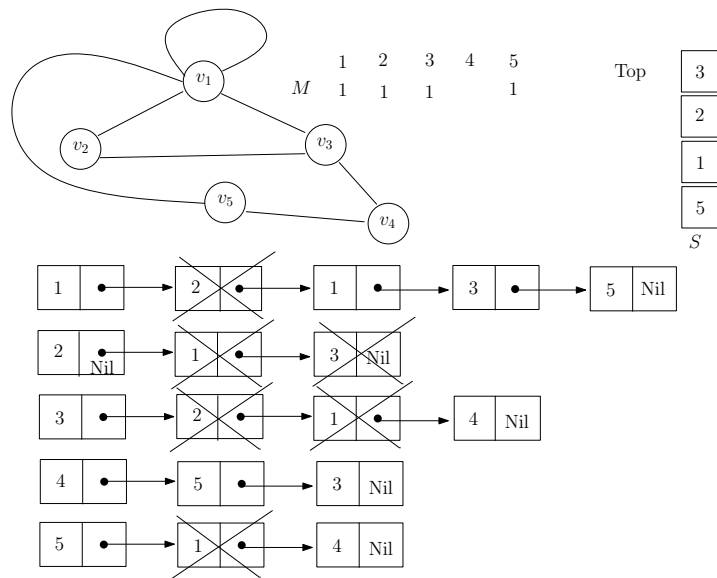


Abbildung 6.30: Ein Zwischenstand des DFS-Aufrufs für den Startknoten v_5 . Im nächsten Durchlauf der While-Schleife wird das verbleibende Element der Liste von v_3 betrachtet.

Präorder-Besuchsreihenfolge aus Section 6.3 und illustriert die Bezeichnung "Tiefensuche".

In einem beliebigen Graphen bildet die Menge aller Kanten, über die ein Knoten zum ersten Mal besucht wird, einen Baum mit Wurzel im Startknoten s . Der Stack enthält zu jedem Zeitpunkt genau die Knoten auf dem Pfad vom Startknoten s zum zuletzt markierten Knoten.

Das Verfahren DFS hat zahlreiche Anwendungen. Zum Beispiel kann man die zeitlichen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Schritten in einem Ablaufplan ("erst a , dann b ") durch einen gerichteten Graphen darstellen. Von Interesse ist die Frage, ob es in diesem Graphen gerichtete Kreise gibt; falls ja, läßt sich der Plan nicht implementieren. Solch ein gerichteter Kreis entsteht zum Beispiel, wenn man zu obigem Baum T die Kante (k, b) hinzufügt. Dagegen würden die zusätzlichen Kanten (a, g) oder (c, e) keine Kreise verursachen. Das heißt: Ein Kreis entsteht genau dann, wenn DFS eine sogenannte *Rückwärtskante* vom zuletzt markierten Knoten zu einem Vorfahren (oder zu ihm selbst), also zu einem Knoten im Stack, entdeckt. Ob ein markierter Knoten sich im Stack befindet, läßt sich leicht testen, indem man ihn während dieser Zeit färbt. Damit haben wir folgendes Ergebnis:

Theorem 22 *Ob ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ einen Kreis enthält, läßt*

sich mit DFS in Zeit und Speicherplatz $O(|V| + |E|)$ testen.

Besser geht es nicht, denn die Adjazenzlisten der Eingabe müssen zumindest einmal gelesen werden.

Jetzt ersetzen wir in Prozedur 15 den Stack durch eine *Queue* (Schlange); hier werden neue Elemente stets am Ende der Schlange hinzugefügt, während sich Top und Pop auf das Element am Kopf der Schlange beziehen. Aus der Tiefensuche wird dadurch die *Breitensuche*, und die Knoten des Binärbaums werden nun in der Reihenfolge des Alphabets erstmals besucht und markiert.

6.9.2 Nachbarschaftsmatrix

Eine weitere simple Methode, um einen Graphen effizient abzuspeichern, ist die Verwendung einer Nachbarschaftsmatrix. Wir identifizieren die n Knoten des Graphen wiederum durch die ganzzahligen Indizes und für $V = \{1, 2, \dots, n\}$ verwenden wir eine $n \times n$ Matrix N mit Einträgen

$$N_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls } (i, j) \in E \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Matrix im Beispiel aus Abbildung 6.29 sieht dann wie folgt aus:

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{array} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Der Vorteil der Speicherung in einer Nachbarschaftsmatrix liegt darin, dass wir in konstanter Zeit testen können, ob eine Kante zwischen zwei Knoten existiert. Allerdings benötigen wir $\Omega(|V|^2)$ viel Speicherplatz.

Literatur

Eine andere Darstellung der hier betrachteten Datenstrukturen findet sich beispielsweise in [2].

Kapitel 7

Elementare Graphalgorithmen

7.1 Minimale Spann­b­ume

Sei $G = (V, E)$ ein ungerichteter zusammenh­angender Graph. Sei $w : E \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ eine *Gewichtung der Kanten*, d.h. eine Funktion, die jeder Kante $e \in E$ ein Gewicht $w(e)$ zuordnet. Ein Graph hei­st *kreisfrei*, falls keine Folge von Kanten $(v_1, v_2)(v_2, v_3), \dots, (v_{n-1}, v_n)$ mit $v_1 = v_n$ existiert.

Definition 23 *Eine Kantenmenge $T \subseteq E$ hei­st Spannbaum von G , wenn der Graph $G = (V, T)$ zusammenh­angend und kreisfrei ist. Wir erweitern die Funktion w auf Teilmengen von E , indem wir definieren*

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

und wir nennen $w(T)$ das Gewicht von T . Ein Spannbaum $T \subseteq E$ hei­st minimaler Spannbaum von G (kurz auch MST f­ur Minimum Spanning Tree) wenn es keinen Spannbaum von G gibt, der ein kleineres Gewicht als T hat.

Die Berechnung eines minimalen Spannbaumes ist ein Problem, das in vielen Anwendungskontexten auftritt, da der MST den Graphen bez­uglich des Zusammenhanges gut approximiert und eine geringere Komplexit­at hat. F­ur unser Anwendungsbeispiel der optimalen Platzierung von Agenten aus Kapitel 1 und Abschnitt 1.1.1 l­asst sich beispielsweise zeigen, dass die beste L­osung f­ur den MST des Graphen stets eine 2-Approximation der optimalen L­osung f­ur den gesamten Graphen ergibt.

Wir entwerfen in diesem Abschnitt einen Algorithmus, der effizient f­ur einen gegebenen Graphen einen minimalen Spannbaum berechnet.

7.1.1 Algorithmus von Kruskal

Mit Hilfe einer Union-Find-Datenstruktur können wir den *Algorithmus von Kruskal* zur Berechnung eines minimalen Spannbaumes angeben. Er ist nach Joseph Kruskal benannt, der diesen Algorithmus 1956 veröffentlichte.

```

    KRUSKAL( $G, w$ )
1   Teste mittels DFS, ob  $G$  zusammenhängend ist. Falls nicht Abbruch.
2   for all  $v \in V$  { MAKE-SET( $v$ ) }
3    $T = \emptyset$ 
4   Sortiere die Kanten in  $E$  gemäß ihrem Gewicht. Danach gelte  $E = \{e_1, \dots, e_m\}$  mit  $w(e_1) \leq w(e_2) \leq \dots \leq w(e_m)$ . Außerdem sei  $e_i = (u_i, v_i)$ .
5   for  $i = 1$  to  $m$  {
6       if FIND( $u_i$ )  $\neq$  FIND( $v_i$ ) {
7            $T = T \cup \{e_i\}$ 
8           UNION( $u_i, v_i$ )
9       }
10  }
11  return  $T$ 

```

Die Mengen, die in der Union-Find-Datenstruktur im Algorithmus verwendet werden, entsprechen den Zusammenhangskomponenten des Graphen $G = (V, T)$. Wir gehen die Kanten in der Reihenfolge ihres Gewichtes durch und fügen eine Kante zur Menge T hinzu, wenn sie nicht innerhalb einer bereits zusammenhängenden Menge verläuft.

Abbildung 7.1 demonstriert das Verhalten von Kruskal an einem Beispiel.

Korrektheit

Die Korrektheit des Algorithmus folgt aus dem folgenden Lemma.

Lemma 24 Sei V_1, \dots, V_k eine disjunkte Zerlegung von V . Sei $E_i \subseteq E$ die Menge der Kanten $(u, v) \in E$ mit $u, v \in V_i$ und sei $T_i \subseteq E_i$ ein Spannbaum des Graphen (V_i, E_i) .

Ferner sei $E' = E \setminus (E_1 \cup \dots \cup E_k)$, also

$$E' = \{(u, v) \in E \mid u \in V_i, v \in V_j, i \neq j\},$$

und sei e eine Kante mit dem kleinsten Gewicht aus E' .

Unter allen Spann bäumen von $G = (V, E)$, die die Kanten aus $T_1 \cup \dots \cup T_k$ enthalten, gibt es einen mit kleinstem Gewicht, der zusätzlich auch die Kante e enthält.

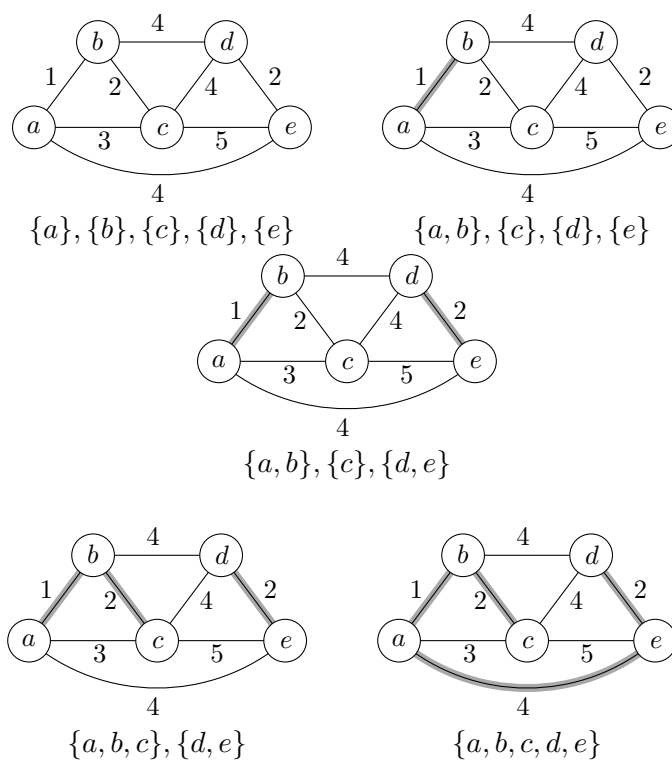


Abbildung 7.1: Verhalten des Kruskal-Algorithmus an einem Beispielgraph. Kruskal wählt die jeweils markierten Kanten aus.

Beweis. Sei T ein Spannbaum von $G = (V, E)$, der $T_1 \cup \dots \cup T_k$ aber nicht e enthält. Wir konstruieren einen Spannbaum T' , der $T_1 \cup \dots \cup T_k$ und e enthält und für den gilt $w(T') \leq w(T)$. Daraus folgt direkt das Lemma, denn angenommen wir haben einen Spannbaum T mit kleinstmöglichem Gewicht, der e nicht enthält, so können wir einen anderen Spannbaum T' konstruieren, der e enthält und ebenfalls das kleinstmögliche Gewicht hat.

Sei $T'' = T \cup \{e\}$. Dann enthält der Graph (V, T'') einen Kreis, auf dem e liegt. Da e zwei verschiedene Komponenten V_i und V_j mit $i \neq j$ verbindet, muss auf diesem Kreis noch eine weitere Kante $e' \in E'$ liegen, die zwei verschiedene Komponenten verbindet. Diese Situation ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

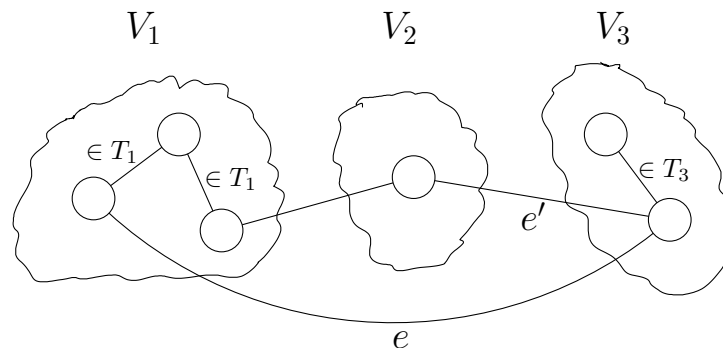


Abbildung 7.2: e verbindet die Komponenten V_1 und V_2 . e' liegt auf demselben Kreis wie e und verbindet die Komponenten V_2 und V_3 .

Aufgrund der Voraussetzung, dass e die billigste Kante aus E' ist, muss $w(e) \leq w(e')$ gelten. Wir betrachten nun die Menge $T' = T'' \setminus \{e'\} = (T \cup \{e\}) \setminus \{e'\}$.

Zunächst können wir festhalten, dass (V, T') zusammenhängend ist. Der Graph (V, T) ist nach Voraussetzung zusammenhängend. Gibt es in (V, T) zwischen zwei Knoten $u, v \in V$ einen Weg, der Kante e' nicht benutzt, so gibt es diesen Weg auch in (V, T') . Gibt es in (V, T) einen Weg P zwischen u und v , der Kante $e' = (w_1, w_2)$ benutzt, so erhält man auch in (V, T') einen Weg zwischen u und v , indem man P nimmt und die Kante e' durch den Weg zwischen w_1 und w_2 über die Kante e ersetzt.

Ebenso können wir argumentieren, dass (V, T') kreisfrei ist: Angenommen es gibt in (V, T') einen Kreis C . Wenn C die Kante e nicht enthält, so gibt es den Kreis C auch in (V, T) , im Widerspruch zur Definition von T . Enthält der Kreis die Kante $e = (u_1, u_2)$, so erhalten wir einen Kreis in (V, T) , indem wir in C die Kante e durch den Weg zwischen u_1 und u_2 über e' ersetzen.

Somit können wir festhalten, dass (V, T') ein Spannbaum ist. Außerdem gilt

$$w(T') = w(T) + w(e) - w(e') \leq w(T).$$

Damit ist das Lemma bewiesen. \square

Wir können nun das folgende Theorem beweisen.

Theorem 25 *Der Algorithmus von Kruskal berechnet einen minimalen Spannbaum.*

Beweis. Wir benutzen die folgende Invariante, die aus drei Teilen besteht:

1. Die Mengen, die in der Union-Find-Datenstruktur gespeichert werden, entsprechen am Ende des Schleifenrumpfes der for-Schleife stets den Zusammenhangskomponenten des Graphen (V, T) , wobei T die in Zeilen 3 und 7 betrachtete Kantenmenge ist.
2. Die Zusammenhangskomponenten von (V, T) stimmen am Ende des Schleifenrumpfes der for-Schleife stets mit den Zusammenhangskomponenten von $(V, \{e_1, \dots, e_i\})$ überein.
3. Die Kantenmenge $T \subseteq E$ kann am Ende des Schleifenrumpfes der for-Schleife stets zu einer Kantenmenge $T' \supseteq T$ erweitert werden, sodass T' ein minimaler Spannbaum von G ist. Insbesondere ist (V, T) azyklisch.

Ist diese Invariante korrekt, so ist auch der Algorithmus korrekt. Das sehen wir wie folgt: Am Ende des letzten Schleifendurchlaufes garantiert uns der zweite Teil der Invariante, dass die Zusammenhangskomponenten von (V, T) mit denen von $G = (V, E)$ übereinstimmen. Da G laut Voraussetzung zusammenhängend ist, ist also auch (V, T) zusammenhängend. Ist G keine korrekte Eingabe, da er nicht zusammenhängend ist, wird dies im ersten Schritt des Algorithmus erkannt.

Der dritte Teil der Invariante garantiert uns, dass T zu einer Kantenmenge $T' \supseteq T$ erweitert werden kann, sodass T' ein minimaler Spannbaum von G ist. Da (V, T) bereits zusammenhängend ist, würde die Hinzunahme jeder Kante einen Kreis schließen. Somit muss $T' = T$ gelten, woraus direkt folgt, dass $T = T'$ ein minimaler Spannbaum von G ist.

Nun müssen wir nur noch die Korrektheit der Invariante zeigen. Dazu überlegen wir uns zunächst, dass die Invariante nach dem ersten Schleifendurchlauf gilt. In diesem ersten Durchlauf fügen wir die billigste Kante e_1 in die bisher leere Menge T ein, da ihre beiden Endknoten u_1 und v_1 zu Beginn in verschiedenen einelementigen Mengen liegen. Nach dem Einfügen von e_1 vereinigen wir diese beiden einelementigen Mengen, so dass nach dem ersten Schleifendurchlauf die Knoten u_1 und v_1 in derselben und alle anderen

Knoten in getrennten einelementigen Mengen liegen. Dies sind genau die Zusammenhangskomponenten von $(V, T) = (V, \{e_1\})$. Damit sind der erste und zweite Teil der Invariante gezeigt. Für den dritten Teil wenden wir Lemma 24 an. Wählen wir in diesem Lemma $V_1 = \{v_1\}, \dots, V_m = \{v_m\}$, wobei wir $V = \{v_1, \dots, v_m\}$ annehmen, so impliziert es direkt, dass wir die Menge $T = \{e_1\}$ zu einem minimalen Spannbaum von G erweitern können.

Schauen wir uns nun einen Schleifendurchlauf an und nehmen an, dass die Invariante am Ende des vorherigen Schleifendurchlaufs erfüllt war.

1. Falls wir Kante e_i nicht in T einfügen, so ändern sich weder die Mengen in der Union-Find-Datenstruktur noch die Zusammenhangskomponenten von (V, T) . Teil eins der Invariante bleibt dann also erhalten. Fügen wir e_i in T ein, so fallen die Zusammenhangskomponenten von u_i und v_i in (V, T) zu einer gemeinsamen Komponente zusammen. Diese Veränderung bilden wir in der Union-Find-Datenstruktur korrekt ab. Also bleibt auch dann der erste Teil erhalten.
2. Bezeichne V_1, \dots, V_k die Zusammenhangskomponenten von (V, T) am Ende des vorherigen Schleifendurchlaufs und bezeichne T_1, \dots, T_k die Kanten innerhalb dieser Komponenten. Falls wir e_i nicht zu T hinzufügen, so verläuft es innerhalb einer der gerade definierten Komponenten V_1, \dots, V_k . Das heißt die Komponenten von $(V, \{e_1, \dots, e_{i-1}\})$ und $(V, \{e_1, \dots, e_i\})$ sind identisch und die Invariante bleibt erhalten. Fügen wir e_i zu T hinzu, so verschmelzen in $(V, \{e_1, \dots, e_i\})$ die Komponenten, die u_i und v_i enthalten. Diese Verschmelzung passiert aber genauso in (V, T) , da wir e_i zu T hinzufügen. Also stimmen die Zusammenhangskomponenten von (V, T) wieder mit den Zusammenhangskomponenten von $(V, \{e_1, \dots, e_i\})$ überein.
3. Aufgrund der Invariante können wir $T = T_1 \cup \dots \cup T_k$ zu einem minimalen Spannbaum von $G = (V, E)$ erweitern. Fügen wir in dieser Iteration e_i zu T hinzu, so garantiert Lemma 24, dass wir auch $T \cup \{e_i\}$ zu einem minimalen Spannbaum erweitern können: Da alle Kanten e_1, \dots, e_{i-1} aufgrund des zweiten Teils der Invariante innerhalb der Komponenten V_1, \dots, V_k verlaufen, ist e_i die billigste Kante, die zwei verschiedene Komponenten miteinander verbindet. Somit sind die Voraussetzungen von Lemma 24 erfüllt.

□

Laufzeit

Nachdem wir die Korrektheit des Algorithmus von Kruskal bewiesen haben, analysieren wir nun noch die Laufzeit. Wir haben bereits im letzten Kapi-

tel gesehen, wie effizient wir die Operationen der Union-Find-Datenstruktur implementieren können, siehe Theorem 21.

Nun können wir die Laufzeit des Algorithmus von Kruskal abschließend bestimmen.

Theorem 26 *Für zusammenhängende ungerichtete Graphen mit m Kanten benötigt der Algorithmus von Kruskal Laufzeit $O(m \log m) = O(|E| \cdot \log |V|)$.*

Beweis. Die Tiefensuche im ersten Schritt benötigt Zeit $O(|V| + m)$. Da der Graph laut Voraussetzung zusammenhängend ist, gilt $m \geq |V| - 1$, also $O(|V| + m) = O(m)$. Das Sortieren der Kanten benötigt Zeit $O(m \log m)$. Die for-Schleife wird m mal durchlaufen und abgesehen von UNION und FIND werden in jedem Durchlauf nur konstant viele Operationen durchgeführt, so dass wir eine Laufzeit von $O(m)$ für alle Operationen in der Schleife abgesehen von UNION und FIND ansetzen können.

Wir führen in der Union-Find-Datenstruktur $2m$ FIND-Operationen und $m - 1$ UNION-Operationen durch. Mit Theorem 21 ergibt sich also eine Laufzeit von $O(m \log m + 2m) = O(m \log m)$. Wegen $|E| \leq |V|^2$ folgt $O(m \log m) = O(|E| \cdot \log |V|^2) = O(|E| \cdot \log |V|)$. Damit ist das Theorem bewiesen. \square

Literatur

Der Algorithmus von Kruskal kann in Kapitel 23 von [1] nachgelesen werden. Kapitel 21 enthält zudem eine Beschreibung von Union-Find-Datenstrukturen.

7.2 Kürzeste Wege

Sei $G = (V, E)$ ein gerichteter Graph und sei $w : E \rightarrow \mathbb{R}$ eine Gewichtung der Kanten. Da wir uns in diesem Abschnitt mit kürzesten Wegen beschäftigen, werden wir $w(e)$ auch als die *Länge der Kante e* bezeichnen.

Definition 27 *Für zwei gegebene Knoten $s, t \in V$ ist $P = (v_0, v_1, \dots, v_\ell)$ ein Weg von s nach t , wenn $v_0 = s$, $v_\ell = t$ und wenn $(v_i, v_{i+1}) \in E$ für alle $i \in \{0, 1, \dots, \ell - 1\}$ gilt. Wir definieren die Länge von P als $w(P) = \sum_{i=0}^{\ell-1} w(v_i, v_{i+1})$. Wir sagen, dass P ein kürzester Weg von s nach t ist, falls es keinen anderen Weg P' von s nach t mit $w(P') < w(P)$ gibt. Wir nennen die Länge $w(P)$ des kürzesten Weges P die Entfernung von s nach t und bezeichnen diese mit $\delta(s, t)$. Existiert kein Weg von s nach t , so gelte $\delta(s, t) = \infty$.*

Zur Veranschaulichung können wir uns im Folgenden vorstellen, dass die Knoten des Graphen Kreuzungen entsprechen und dass für jede Straße von

Kreuzung $u \in V$ zu Kreuzung $v \in V$ eine Kante $e = (u, v)$ in E enthalten ist, wobei $w(e) = w((u, v))$ die Länge der Straße angibt. Es gibt jedoch auch zahlreiche andere Anwendungskontexte, in denen kürzeste Wege gefunden werden müssen. Insbesondere auch solche, in denen negative Kantengewichte auftreten können.

Wir sind an der Lösung der folgenden zwei Probleme interessiert:

1. Im *Single-Source Shortest Path Problem (SSSP)* ist zusätzlich zu G und w ein Knoten $s \in V$ gegeben und wir möchten für jeden Knoten $v \in V$ einen kürzesten Weg von s nach v und die Entfernung von s nach v berechnen.
2. Im *All-Pairs Shortest Path Problem (APSP)* sind nur G und w gegeben und wir möchten für jedes Paar $u, v \in V$ einen kürzesten Weg von u nach v und die Entfernung von u nach v berechnen.

Für den Spezialfall, dass $w(e) = 1$ für alle Kanten $e \in E$ gilt, haben wir mit Breitensuche bereits einen Algorithmus kennengelernt, der das SSSP löst. Breitensuche lässt sich allerdings nicht direkt auf den Fall verallgemeinern, dass wir beliebige Kantengewichte haben.

Bevor wir Algorithmen für das SSSP und das APSP beschreiben, schauen wir uns zunächst einige strukturelle Eigenschaften von kürzesten Wegen an.

Optimale Substruktur

Für die Algorithmen, die wir vorstellen werden, ist es wichtig, dass ein kürzester Weg von $v_0 \in V$ nach $v_\ell \in V$ aus kürzesten Wegen zwischen anderen Knoten zusammengesetzt ist.

Lemma 28 Sei $P = (v_0, \dots, v_\ell)$ ein kürzester Weg von $v_0 \in V$ nach $v_\ell \in V$. Für jedes Paar i, j mit $0 \leq i < j \leq \ell$ ist $P_{ij} = (v_i, v_{i+1}, \dots, v_j)$ ein kürzester Weg von v_i nach v_j .

Beweis. Wir zerlegen den Weg $P = P_{0\ell}$ in die drei Teilwege P_{0i} , P_{ij} und $P_{j\ell}$. Dies schreiben wir als

$$P = v_0 \xrightarrow{P_{0i}} v_i \xrightarrow{P_{ij}} v_j \xrightarrow{P_{j\ell}} v_\ell.$$

Insbesondere gilt $w(P) = w(P_{0i}) + w(P_{ij}) + w(P_{j\ell})$.

Nehmen wir nun an, dass P_{ij} kein kürzester Weg von v_i nach v_j ist. Dann gibt es einen Weg P'_{ij} von i nach j mit $w(P'_{ij}) < w(P_{ij})$. Dann erhalten wir ebenfalls einen anderen Weg P' von v_0 nach v_ℓ :

$$P' = v_0 \xrightarrow{P_{0i}} v_i \xrightarrow{P'_{ij}} v_j \xrightarrow{P_{j\ell}} v_\ell.$$

Für diesen Weg gilt $w(P') = w(P) - w(P_{ij}) + w(P'_{ij}) < w(P)$ im Widerspruch zur Voraussetzung, dass P ein kürzester Weg von v_0 nach v_ℓ ist. Also kann es keinen kürzeren Weg als P_{ij} von v_i nach v_j geben. \square

Daraus erhalten wir direkt das folgende Korollar.

Corollary 29 Sei $P = (v_0, \dots, v_\ell)$ ein kürzester Weg von $v_0 \in V$ nach $v_\ell \in V$. Dann gilt

$$\delta(v_0, v_\ell) = \delta(v_0, v_{\ell-1}) + w(v_{\ell-1}, v_\ell).$$

Negative Kantengewichte

Wir haben in der obigen Definition auch erlaubt, dass Kantengewichte negativ sein können. Dies kann in einigen Anwendungskontexten tatsächlich auftreten, es führt jedoch zu zusätzlichen Schwierigkeiten, insbesondere dann, wenn der Graph einen Kreis mit negativem Gesamtgewicht enthält. Dann ist nämlich für einige Paare von Knoten kein kürzester Weg mehr definiert, da man beliebig oft den Kreis mit negativem Gesamtgewicht entlang laufen könnte. Abbildung 7.3 zeigt einen solchen Graphen.

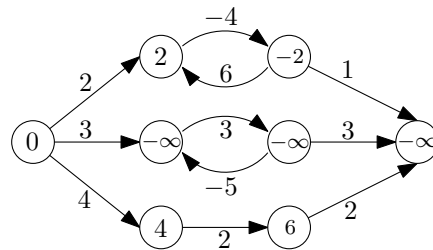


Abbildung 7.3: Ein Graph, der einen negativen Kreis enthält. Die Zahlen in den Knoten entsprechen dabei den Entfernungen der Knoten vom linken Knoten.

Der *Algorithmus von Dijkstra*, den wir für das SSSP kennenlernen werden, funktioniert nur für Graphen, die keine negativen Kantengewichte haben. Der *Floyd-Warshall-Algorithmus* für APSP funktioniert auch für negative Kantengewichte solange es keine negativen Kreise gibt. Gibt es einen negativen Kreis, so kann der Floyd-Warshall-Algorithmus zumindest benutzt werden, die Existenz eines solchen zu verifizieren.

7.2.1 Single-Source Shortest Path Problem

Es sei ein Graph $G = (V, E)$, eine Gewichtung $w : E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ und ein Startknoten $s \in V$ gegeben. In diesem Abschnitt gehen wir davon aus, dass

alle Kantengewichte nicht-negativ sind.

Darstellung kürzester Wege

Zunächst halten wir fest, dass ein kürzester Weg in einem Graphen ohne negativen Kreis keinen Knoten mehrfach besuchen muss. Wäre $P = (v_0, \dots, v_\ell)$ nämlich ein kürzester Weg von $v_0 \in V$ nach $v_\ell \in V$ und gäbe es v_i und v_j mit $i < j$ und $v_i = v_j$, so wäre der Teilweg $P_{ij} = (v_i, \dots, v_j)$ ein Kreis, der laut Voraussetzung keine negativen Gesamtkosten hat. Das heißt, er hat entweder Kosten 0 oder echt positive Kosten. In jedem Falle können wir einen neuen Weg P' von v_0 nach v_ℓ konstruieren, indem wir den Kreis überspringen: $P' = (v_0, \dots, v_i, v_{j+1}, \dots, v_\ell)$. Für diesen neuen Weg P' gilt $w(P') \leq w(P)$. Somit können wir davon ausgehen, dass die kürzesten Wege zwischen zwei Knoten, die wir berechnen werden, aus höchstens $n - 1$ Kanten bestehen.

Beim SSSP berechnen wir n kürzeste Wege, nämlich einen vom Startknoten s zu jedem anderen Knoten. Beim APSP berechnen wir sogar $\binom{n}{2}$ kürzeste Wege. Da wir als obere Abschätzung für die Anzahl Kanten auf einem kürzesten Weg nur $n - 1$ haben, müssten wir damit rechnen, dass wir Platz $\Theta(n^2)$ bzw. $\Theta(n^3)$ brauchen, um alleine die Ausgabe aufzuschreiben. Wir wollen uns nun überlegen, wie man die Ausgabe effizienter kodieren kann. Dabei machen wir uns die Eigenschaft der optimalen Substruktur aus Lemma 28 zu Nutze.

Wir betrachten in diesem Abschnitt nur das SSSP. Statt alle n Wege separat zu speichern, wird der Algorithmus von Dijkstra einen Kürzeste-Wege-Baum mit Wurzel s gemäß der folgenden Definition berechnen.

Definition 30 *Wir nennen $G' = (V', E')$ mit $V' \subseteq V$ und $E' \subseteq E$ einen Kürzeste-Wege-Baum mit Wurzel s , wenn die folgenden Eigenschaften erfüllt sind.*

1. V' ist die Menge der Knoten, die von s aus in G erreichbar sind.
2. G' ist ein gewurzelter Baum mit Wurzel s . (Das bedeutet, dass G' azyklisch ist, selbst wenn wir die Richtung der Kanten ignorieren, und dass alle Kanten von s weg zeigen.)
3. Für alle $v \in V'$ ist der eindeutige Weg von s nach v in G' ein kürzester Weg von s nach v in G .

Kürzeste-Wege-Bäume benötigen Platz $O(n)$, da wir für jeden Knoten nur seinen Vorgänger speichern müssen. Sie sind also eine platzsparende Möglichkeit, um alle kürzesten Wege von s zu den anderen Knoten des Graphen zu kodieren. Abbildung 7.4 zeigt ein Beispiel.

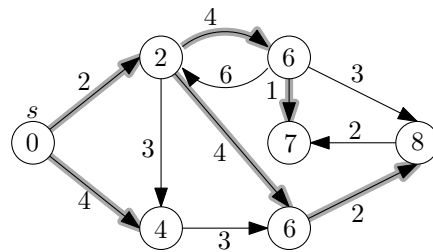


Abbildung 7.4: Ein gerichteter Graph. Die markierten Kanten formen einen Kürzeste-Wege-Baum.

Relaxation von Kanten

Der Algorithmus von Dijkstra verwaltet für jeden Knoten $v \in V$ zwei Attribute: $\pi(v) \in V \cup \{\text{nil}\}$ und $d(v) \in \mathbb{R}$. Der Knoten $\pi(v)$ wird am Ende des Algorithmus der Vorgänger von v in einem Kürzeste-Wege-Baum mit Wurzel s sein (sofern $\pi(v) \neq \text{nil}$) und die Zahl $d(v) \in \mathbb{R}$ wird am Ende die Entfernung von s nach v angeben. Wir initialisieren $\pi(v)$ und $d(v)$ wie folgt:

```

INITIALIZE-DIJKSTRA( $G, s$ )
1  for each  $v \in V$  {
2       $d(v) = \infty$ 
3       $\pi(v) = \text{nil}$ 
4  }
5   $d(s) = 0$ 

```

Im Algorithmus wird $d(v) \geq \delta(s, v)$ zu jedem Zeitpunkt und für jeden Knoten $v \in V$ gelten. Das heißt, $d(v)$ ist stets eine obere Schranke für die Länge des kürzesten Weges von s nach v . Direkt nach der Initialisierung ist dies sicherlich der Fall. Die Idee ist nun, die oberen Schranken Schritt für Schritt zu verbessern, bis irgendwann $d(v) = \delta(s, v)$ für alle Knoten v gilt. Dazu benutzen wir die folgende Beobachtung.

Lemma 31 Für $x, y, z \in V$ gilt stets

$$\delta(x, y) \leq \delta(x, z) + w(z, y).$$

Beweis. Wir konstruieren einen Weg von x nach y , indem wir von x auf einem kürzesten Weg nach z laufen und dann der direkten Kante von z zu y folgen. Dieser Pfad hat Länge $\delta(x, z) + w(z, y)$. Da er offensichtlich nicht kürzer sein kann als der kürzeste Weg von x nach y , muss $\delta(x, z) + w(z, y) \geq \delta(x, y)$ gelten. \square

Aus dieser Beobachtung folgt direkt eine Möglichkeit, neue obere Schranken zu erhalten: Seien $u, v \in V$ und gelte $d(u) \geq \delta(s, u)$. Dann gilt

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

Das nutzen wir, um die oberen Schranken mittels der folgenden Methode zu verbessern.

```

RELAX( $u, v$ )
1  if ( $d(v) > d(u) + w(u, v)$ ) {
2       $d(v) = d(u) + w(u, v)$ 
3       $\pi(v) = u$ 
4  }
```

Aus den bisherigen Überlegungen folgt direkt das folgende Lemma.

Lemma 32 *Nach einem Aufruf von INITIALIZE-DIJKSTRA gefolgt von einer beliebigen Sequenz von RELAX-Aufrufen gilt $d(v) \geq \delta(s, v)$ für alle Knoten v . Das heißt, der Wert $d(v)$ ist zu jedem Zeitpunkt eine obere Schranke für die Entfernung $\delta(s, v)$ von s nach v .*

Algorithmus von Dijkstra

Der Algorithmus von Dijkstra wird eine Folge von RELAX-Aufrufen durchführen und sicherstellen, dass am Ende tatsächlich $d(v) = \delta(s, v)$ für alle Knoten v gilt. In der folgenden Implementierung wird $S \subseteq V$ eine Menge von Knoten bezeichnen, sodass für jeden Knoten $v \in S$ bereits $d(v) = \delta(s, v)$ gilt. Es sei außerdem $Q = V \setminus S$. Wir gehen davon aus, dass der Graph G in Adjazenzlistendarstellung gegeben ist. Die Methode EXTRACT-MIN(Q) entfernt einen Knoten $u \in Q$ aus Q , der unter all diesen Knoten den kleinsten Wert $d(u)$ hat, und gibt diesen Knoten zurück.

```

DIJKSTRA( $G, w, s$ )
1  INITIALIZE-DIJKSTRA( $G, s$ )
2   $S = \emptyset; Q = V;$ 
3  while  $Q \neq \emptyset$  {
4       $u = \text{EXTRACT-MIN}(Q)$ 
5       $S = S \cup \{u\}$ 
6      for each  $v \in \text{Adj}[u]$  {
7          RELAX( $u, v$ )
8      }
9  }
```

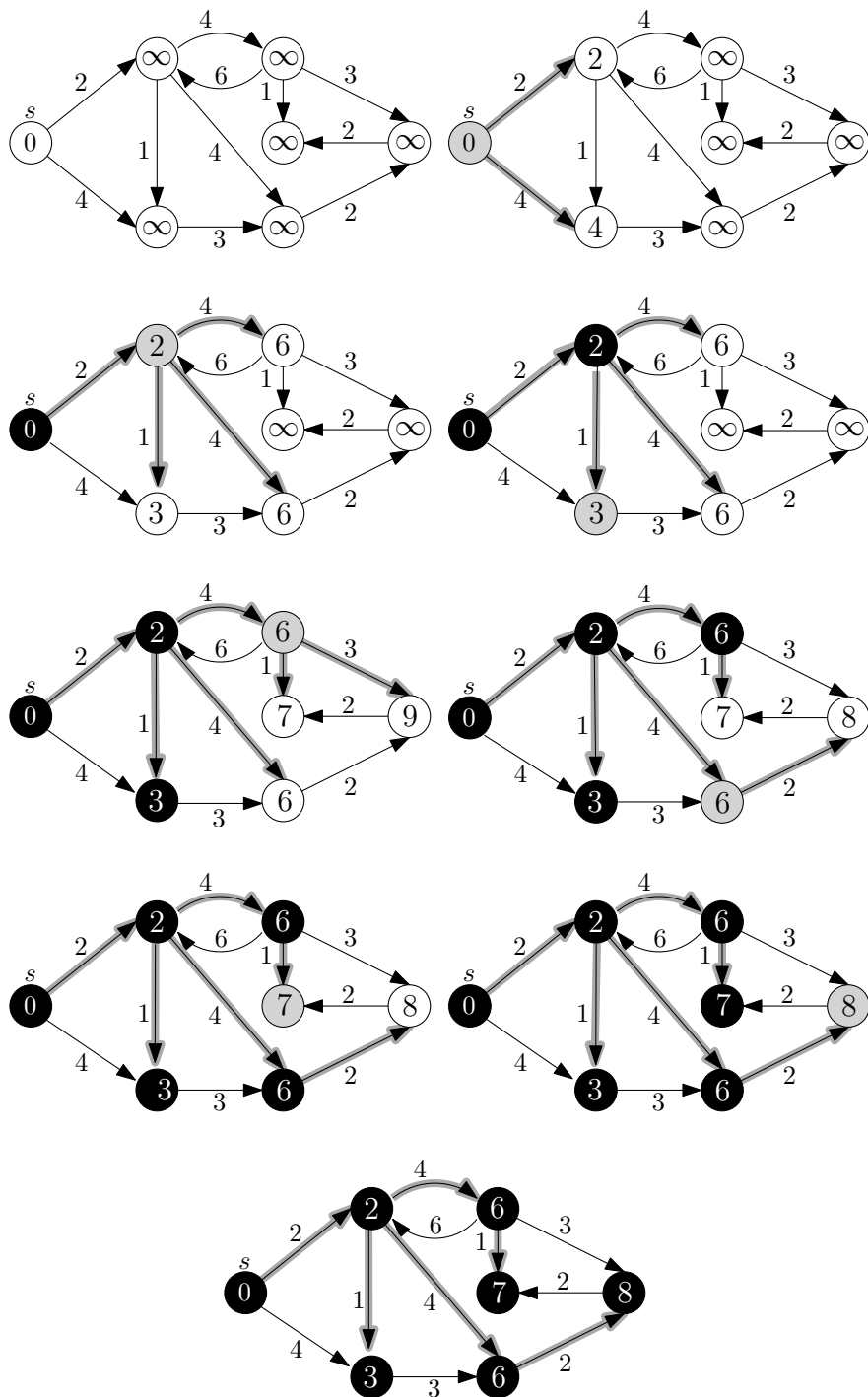


Abbildung 7.5: Beispiel für den Ablauf des Dijkstra-Algorithmus. Schwarze Knoten gehören zu S und der graue Knoten ist jeweils der Knoten u , der aus Q extrahiert wird. Eine graue Kanten (u, v) bedeutet, dass $\pi(v) = u$ gilt.

Ein Beispiel für die Ausführung des Algorithmus von Dijkstra findet sich in Abbildung 7.5.

Theorem 33 *Der Algorithmus von Dijkstra terminiert auf gerichteten Graphen $G = (V, E)$ mit nicht-negativen Kantengewichten $w : E \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ und Startknoten $s \in V$ in einem Zustand, in dem $d(v) = \delta(s, v)$ für alle $v \in V$ gilt.*

Beweis. Wir beweisen das Theorem mit Hilfe der folgenden Invariante, bei der wir die Konvention $w((u, v)) = \infty$ für $(u, v) \notin E$ anwenden.

Am Ende jeder Ausführung der **while**-Schleife in Zeilen 4–8 gilt:

1. $\forall v \in S : d(v) = \delta(s, v)$,
2. $\forall v \in Q = V \setminus S : d(v) = \min\{\delta(s, x) + w(x, v) \mid x \in S\}$.

Gilt diese Invariante, so folgt aus ihr direkt das Theorem: In jedem Schritt der **while**-Schleife fügen wir einen weiteren Knoten aus Q zu der Menge S hinzu. Da zu jedem Zeitpunkt $S \cup Q = V$ gilt, muss nach n Durchläufen der **while**-Schleife $S = V$ gelten. Dann ist $Q = \emptyset$ und der Algorithmus terminiert. Die Invariante besagt dann, dass $d(v) = \delta(s, v)$ für alle Knoten $v \in S = V$ gilt.

Am Ende des ersten Schleifendurchlaufs gilt $S = \{s\}$ und $d(s) = \delta(s, s) = 0$. Somit ist der erste Teil der Invariante erfüllt. Den zweiten Teil der Invariante können wir in diesem Falle umschreiben zu: $\forall v \in V \setminus \{s\} : d(v) = \delta(s, s) + w(s, v) = w(s, v)$. Die Gültigkeit dieser Aussage folgt daraus, dass wir für jeden Knoten $v \in \text{Adj}[s]$ die Methode $\text{RELAX}(s, v)$ aufgerufen haben, die laut ihrer Definition $d(v) = \min\{d(s) + w(s, v), \infty\} = w(s, v)$ gesetzt hat.

Wir müssen uns nun nur noch überlegen, dass die Invariante erhalten bleibt. Gehen wir also davon aus, wir befinden uns in einem Durchlauf der **while**-Schleife und am Ende des vorherigen Durchlaufs galt die Invariante. Während dieser Iteration fügen wir den Knoten $u \in Q$, der momentan unter allen Knoten aus Q den kleinsten Wert $d(u)$ hat, zur Menge S hinzu.

Wir zeigen zunächst den ersten Teil der Invariante, indem wir zeigen, dass für diesen Knoten $d(u) = \delta(s, u)$ gilt. Sei dazu P ein kürzester Weg von s nach u und sei y der erste Knoten auf dem Pfad P , der nicht zur Menge S gehört. Da u selbst noch nicht zu S gehört, muss es einen solchen Knoten y geben. Im Zweifelsfall ist u dieser Knoten. Weiterhin muss y einen Vorgänger haben, da der erste Knoten auf dem Weg P der Knoten $s \in S$ ist. Wir nennen diesen Vorgänger x . Den Teilweg von P von s nach x nennen wir P_1 und den Teilweg von y nach u nennen wir P_2 . Diese Teilwege können auch leer sein. Abbildung 7.6 veranschaulicht diese Notation.

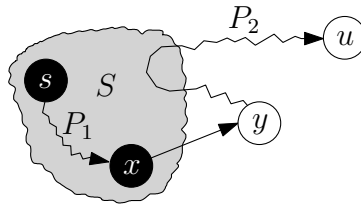


Abbildung 7.6: Ein kürzester Weg von s nach u . y ist der erste Knoten auf diesem Weg, der nicht zu S gehört.

Wegen Lemma 28 muss P_1 ein kürzester Weg von s nach x sein. Somit gilt

$$\delta(s, u) = w(P_1) + w(x, y) + w(P_2) = \delta(s, x) + w(x, y) + w(P_2) \geq d(y) + w(P_2) \geq d(y),$$

wobei wir bei der vorletzten Ungleichung den zweiten Teil der Invariante für $y \in Q$ ausgenutzt haben. Wegen Lemma 32 gilt $d(u) \geq \delta(s, u)$ und somit folgt insgesamt $d(u) \geq d(y)$. Da u ein Knoten aus Q mit kleinstem d -Wert ist, muss auch gelten $d(u) \leq d(y)$. Alles in allem erhalten wir die Ungleichungskette

$$d(u) \geq \delta(s, u) \geq d(y) \geq d(u),$$

deren einzige Lösung $d(u) = \delta(s, u)$ ist. Dies ist genau die Aussage, die wir für den ersten Teil der Invariante zeigen mussten.

Der zweite Teil der Invariante folgt nun einfach daraus, dass vorher $d(v) = \min\{\delta(s, x) + w(x, v) \mid x \in S\}$ für alle $v \in Q$ galt und dass nun für jeden Knoten aus $v \in \text{Adj}[u]$ die Operation $\text{RELAX}(u, v)$ aufgerufen wird, die dazu führt, dass gilt:

$$\begin{aligned} d(v) &= \min\{\min\{\delta(s, x) + w(x, v) \mid x \in S\}, \delta(s, u) + w(u, v)\} \\ &= \min\{\delta(s, x) + w(x, v) \mid x \in S \cup \{u\}\}. \end{aligned}$$

□

Nun fehlt nur noch der Beweis, dass die Vorgänger-Relation, die in π berechnet wird, wirklich einen Kürzesten-Wege-Baum mit Wurzel s ergibt. Dies folgt unmittelbar aus dem folgenden Lemma, welches wir in der Vorlesung jedoch nicht beweisen werden.

Lemma 34 *Es gelte nach einem Aufruf von INITIALIZE-DIJKSTRA gefolgt von einer Sequenz von RELAX-Aufrufen $d(v) = \delta(s, v)$ für jeden Knoten v . Sei*

$$V_\pi = \{v \in V \mid \pi(v) \neq \text{nil}\} \cup \{s\} \quad \text{und} \quad E_\pi = \{(\pi(v), v) \in E \mid v \in V_\pi \setminus \{s\}\}.$$

Dann ist der Graph (V_π, E_π) ein Kürzeste-Wege-Baum mit Wurzel s .

Implementierung und Laufzeit Wir werden nun die Laufzeit des Algorithmus von Dijkstra analysieren. Dazu müssen wir uns zunächst überlegen, in welcher Datenstruktur wir die Menge Q verwalten. Diese Datenstruktur muss eine Menge verwalten können und sollte die folgenden drei Operationen möglichst effizient unterstützen:

- $\text{INSERT}(Q, x, d)$: Füge ein neues Element x mit Schlüssel $d \in \mathbb{R}$ in die Menge Q ein.
- $\text{EXTRACT-MIN}(Q)$: Entferne aus Q ein Element mit dem kleinsten Schlüssel und gib dieses Element zurück.
- $\text{DECREASE-KEY}(Q, x, d_1, d_2)$: Ändere den Schlüssel des Objektes $x \in Q$ von d_1 auf d_2 .

Eine solche Datenstruktur heißt *Min-Priority Queue* und sie lässt sich leicht durch z. B. eine verkettete Liste realisieren, wenn wir auf Effizienz keinen Wert legen. Sei n die Anzahl der Einträge der Priority Queue, dann würde eine Realisierung als verkettete Liste Zeit $\Theta(n)$ für EXTRACT-MIN und DECREASE-KEY benötigen. Dies wollen wir nun verbessern.

Wir haben mit AVL-Bäumen schon eine Möglichkeit in der Vorlesung kennengelernt, um Priority Queues effizienter zu realisieren. Wir legen dafür einen AVL-Baum an und fügen bei $\text{INSERT}(Q, x, d)$ einfach das Objekt x mit Schlüssel d in den AVL-Baum ein. Wir müssen auf den Fall aufpassen, dass wir zwei Objekte x und y mit dem gleichen Schlüssel einfügen wollen. Wir nehmen für diesen Fall an, dass es eine inhärente Ordnung auf den Objekten gibt und dass bei eigentlich gleichem Schlüssel d diese inhärente Ordnung entscheidet, welcher Schlüssel als kleiner betrachtet wird. In unserem Beispiel sind die Objekte in Q die Knoten aus V . Wir können davon ausgehen, dass diese mit v_1, \dots, v_n durchnummeriert sind und falls wir v_i und v_j mit gleichem Schlüssel d in Q einfügen, so wird v_i als kleiner als v_j betrachtet, wenn $i < j$ gilt. Auf diese Weise ist stets eine eindeutige Ordnung auf den Schlüsseln gegeben. Da die Höhe eines AVL-Baumes mit n Knoten durch $O(\log(n))$ beschränkt ist, können wir $\text{INSERT}(Q, x, d)$ in Zeit $O(\log(n))$ ausführen.

$\text{EXTRACT-MIN}(Q)$ können wir in einem AVL-Baum realisieren, indem wir ausgehend von der Wurzel immer dem Zeiger zum linken Kind folgen. Auf diese Weise finden wir das Objekt mit dem kleinsten Schlüssel. Auch dies geht wegen der beschränkten Höhe in Zeit $O(\log(n))$. Haben wir es einmal gefunden, so können wir es in Zeit $O(\log n)$ löschen und zurückgeben. Ebenso können wir DECREASE-KEY in Zeit $O(\log(n))$ realisieren, indem wir zunächst nach x suchen (dafür ist wichtig, dass wir seinen momentanen Schlüssel d_1 übergeben bekommen), es dann löschen und mit dem neuen Schlüssel d_2 wieder einfügen.

Theorem 35 Die Laufzeit des Algorithmus von Dijkstra beträgt $O((n + m) \log n)$.

Beweis. Die Initialisierung erfolgt in Zeit $O(n)$. Da die Adjazenzliste eines Knoten $v \in V$ dann das einzige Mal durchlaufen wird, wenn der Knoten v der Menge S hinzugefügt wird, wird für jede Kante $e = (u, v) \in E$ genau einmal die Operation $\text{RELAX}(u, v)$ aufgerufen. Innerhalb des Aufrufs von $\text{RELAX}(u, v)$ wird gegebenenfalls der Wert $d(v)$ reduziert. Dies entspricht einem Aufruf von DECREASE-KEY , welcher Laufzeit $O(\log n)$ benötigt. Alle Aufrufe der RELAX -Methode zusammen haben somit eine Laufzeit von $O(m \log n)$. Wir benötigen außerdem genau n Aufrufe von EXTRACT-MIN . Diese haben eine Gesamtlaufzeit von $O(n \log n)$. Damit folgt das Theorem. \square

7.2.2 All-Pairs Shortest Path Problem

In diesem Abschnitt beschäftigen wir uns mit dem APSP. Dazu sei ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ mit Kantengewichten $w : E \rightarrow \mathbb{R}$ gegeben. Im Gegensatz zum Dijkstra-Algorithmus funktioniert der Floyd-Warshall-Algorithmus, den wir gleich beschreiben werden, auch, wenn es negative Kantengewichte gibt. Enthält der Graph einen negativen Kreis, so stellt der Algorithmus dies fest und bricht ab.

Für den Floyd-Warshall-Algorithmus gehen wir davon aus, dass $V = \{1, \dots, n\}$ gilt, und wir untersuchen Wege, die nur bestimmte Knoten benutzen dürfen. Sei $P = (v_0, \dots, v_\ell)$ ein kürzester Weg von v_0 nach v_ℓ . Wir haben bereits im SSSP argumentiert, dass es für jedes Paar von Knoten u und v in einem Graphen ohne negativen Kreis stets einen kürzesten Weg von u nach v gibt, der keinen Knoten mehrfach besucht. Wir nehmen an, dass dies auf P zutrifft, das heißt, die Knoten v_0, \dots, v_ℓ seien paarweise verschieden. Wir nennen einen solchen Weg auch *einfachen Weg*. Dann nennen wir $v_1, \dots, v_{\ell-1}$ die *Zwischenknoten von P* . Wir schränken nun die Menge der erlaubten Zwischenknoten ein.

Wir betrachten für jedes Paar $i, j \in V$ alle einfachen Wege von i nach j , die nur Zwischenknoten aus der Menge $\{1, \dots, k\}$ für ein bestimmtes k benutzen dürfen. Sei P_{ij}^k der kürzeste solche Weg von i nach j und sei $\delta_{ij}^{(k)}$ seine Länge. Wir überlegen uns, wie wir den Weg P_{ij}^k und $\delta_{ij}^{(k)}$ bestimmen können, wenn wir für jedes Paar $i, j \in V$ bereits den Weg P_{ij}^{k-1} kennen, also den kürzesten Weg von i nach j , der als Zwischenknoten nur Knoten aus $\{1, \dots, k-1\}$ benutzen darf. Hierzu unterscheiden wir zwei Fälle:

- Enthält der Weg P_{ij}^k den Knoten k nicht als Zwischenknoten, so enthält er nur die Knoten aus $\{1, \dots, k-1\}$ als Zwischenknoten und somit

ist P_{ij}^k auch dann ein kürzester Weg, wenn wir nur diese Knoten als Zwischenknoten erlauben. Es gilt dann also $\delta_{ij}^{(k)} = \delta_{ij}^{(k-1)}$ und $P_{ij}^k = P_{ij}^{k-1}$.

- Enthält der Weg P_{ij}^k den Knoten k als Zwischenknoten, so zerlegen wir ihn wie folgt in zwei Teile:

$$P_{ij}^k = i \xrightarrow{P} k \xrightarrow{P'} j.$$

Da P_{ij}^k ein einfacher Weg ist, kommt k nur einmal vor und ist somit nicht in den Teilwegen P und P' enthalten. Diese müssen laut Lemma 28 kürzeste Wege von i nach k bzw. von k nach j sein, die nur Knoten aus $\{1, \dots, k-1\}$ als Zwischenknoten benutzen. Somit gilt in diesem Fall

$$\delta_{ij}^{(k)} = \delta_{ik}^{(k-1)} + \delta_{kj}^{(k-1)}$$

und

$$P_{ij}^k = i \xrightarrow{P_{ik}^{k-1}} k \xrightarrow{P_{kj}^{k-1}} j.$$

Aus dieser Beobachtung können wir direkt rekursive Formeln zur Berechnung der Entfernungen $\delta^{(k)}(i, j)$ und der Wege P_{ij}^k herleiten. Wir betrachten zunächst nur die Entfernungen. Für alle $i, j \in V$ gilt

$$\delta_{ij}^{(k)} = \begin{cases} w(i, j) & \text{für } k = 0 \\ \min\{\delta_{ij}^{(k-1)}, \delta_{ik}^{(k-1)} + \delta_{kj}^{(k-1)}\} & \text{für } k > 0. \end{cases}$$

Für $k = n$ erlauben wir alle Knoten $\{1, \dots, n\}$ als Zwischenknoten. Demzufolge besteht für $n = k$ keine Einschränkung mehr und es gilt $\delta(i, j) = \delta_{ij}^{(n)}$ für alle $i, j \in V$.

Wir weisen an dieser Stelle nochmals explizit darauf hin, dass wir für diese Rekursionsformel essentiell ausgenutzt haben, dass es im Graphen G keinen Kreis mit negativem Gesamtgewicht gibt. Gibt es nämlich einen solchen Kreis, der von einem Knoten $i \in V$ erreichbar ist und von dem aus der Knoten $j \in V$ erreichbar ist, so ist der kürzeste Weg von i nach j nicht mehr einfach. Er würde stattdessen den Kreis unendlich oft durchlaufen und demzufolge die Knoten auf dem Kreis mehrfach besuchen.

Floyd-Warshall-Algorithmus

Der Floyd-Warshall-Algorithmus nutzt die rekursive Darstellung der $\delta_{ij}^{(k)}$, die wir soeben hergeleitet haben, um das APSP zu lösen. Zur Vereinfachung der Notation gehen wir davon aus, dass $V = \{1, \dots, n\}$ gilt und dass der Graph als $(n \times n)$ -Adjazenzmatrix $W = (w_{ij})$ gegeben ist. Die Adjazenzmatrix W

enthält bei gewichteten Graphen an der Stelle w_{ij} das Gewicht der Kante (i, j) . Existiert diese Kante nicht, so gilt $w_{ij} = \infty$. Des Weiteren gilt $w_{ii} = 0$ für alle $i \in V$.

```

    FLOYD-WARSHALL( $W$ )
1   $D^{(0)} = W$ 
2  for  $k = 1$  to  $n$  {
3      Erzeuge  $(n \times n)$ -Nullmatrix  $D^{(k)} = (\delta_{ij}^{(k)})$ 
4      for  $i = 1$  to  $n$  {
5          for  $j = 1$  to  $n$  {
6               $\delta_{ij}^{(k)} = \min\{\delta_{ij}^{(k-1)}, \delta_{ik}^{(k-1)} + \delta_{kj}^{(k-1)}\}$ 
7          }
8      }
9  }
10 return  $D^{(n)}$ 

```

Theorem 36 *Der Floyd-Warshall-Algorithmus löst das APSP für Graphen ohne Kreise mit negativem Gesamtgewicht, die als Adjazenzmatrix dargestellt sind und n Knoten enthalten, in Zeit $\Theta(n^3)$.*

Beweis. Die Korrektheit des Algorithmus folgt direkt aus der rekursiven Formel für $\delta_{ij}^{(k)}$, die wir oben hergeleitet haben, da der Algorithmus exakt diese rekursive Formel berechnet. Die Laufzeit von $\Theta(n^3)$ ist leicht ersichtlich, da wir drei ineinander geschachtelte **for**-Schleifen haben, die jeweils über n verschiedene Werte zählen, und innerhalb der innersten Schleifen nur Operationen ausgeführt werden, die konstante Zeit benötigen. Das Erstellen der Nullmatrizen benötigt insgesamt ebenfalls Zeit $\Theta(n^3)$. \square

Wenn wir zusätzlich zu den Entfernungen auch die kürzesten Wege ermitteln wollen, so können wir dies auch wieder mittels einer rekursiv definierten Vorgängerfunktion π machen. Sei $\pi_{ij}^{(k)}$ der Vorgänger von j auf dem Pfad P_{ij}^k , das heißt auf dem kürzesten Pfad von i nach j , der als Zwischenknoten nur Knoten aus $\{1, \dots, k\}$ benutzen darf. Da für $k = 0$ überhaupt keine Zwischenknoten erlaubt sind, gilt für alle Knoten $i, j \in V$

$$\pi_{ij}^{(0)} = \begin{cases} \text{nil} & \text{falls } i = j \text{ oder } w_{ij} = \infty, \\ i & \text{falls } i \neq j \text{ und } w_{ij} < \infty. \end{cases}$$

Das heißt, $\pi_{ij}^{(0)}$ ist genau dann gleich i , wenn es eine direkte Kante von i nach j gibt. Für $k > 0$ orientieren wir uns an der rekursiven Formel für $\delta_{ij}^{(k)}$, die wir oben hergeleitet haben. Ist $\delta_{ij}^{(k)} = \delta_{ij}^{(k-1)}$, so ist auch $P_{ij}^k = P_{ij}^{k-1}$ und

somit ist der Vorgänger von j auf dem Pfad P_{ij}^k derselbe wie der auf dem Pfad P_{ij}^{k-1} . Ist $\delta_{ij}^{(k)} < \delta_{ij}^{(k-1)}$, so gilt

$$P_{ij}^k = i \xrightarrow{P_{ik}^{k-1}} k \xrightarrow{P_{kj}^{k-1}} j,$$

und damit ist insbesondere der Vorgänger von j auf dem Pfad P_{ij}^k derselbe wie auf dem Pfad P_{kj}^{k-1} . Zusammenfassend halten wir für $k > 0$ fest

$$\pi_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \pi_{ij}^{(k-1)} & \text{falls } \delta_{ij}^{(k-1)} \leq \delta_{ik}^{(k-1)} + \delta_{kj}^{(k-1)}, \\ \pi_{kj}^{(k-1)} & \text{falls } \delta_{ij}^{(k-1)} > \delta_{ik}^{(k-1)} + \delta_{kj}^{(k-1)}. \end{cases}$$

Die $\pi_{ij}^{(k)}$ können zusammen mit den $\delta_{ij}^{(k)}$ im Floyd-Warshall-Algorithmus berechnet werden, ohne dass sich die Laufzeit signifikant ändert.

Negative Kreise Wir wollen nun noch kurz diskutieren, wie man den Floyd-Warshall-Algorithmus benutzen kann, um die Existenz eines Kreises mit negativem Gesamtgewicht zu detektieren. Dazu müssen wir uns nur überlegen, was die Einträge $\delta_{ii}^{(k)}$ auf der Diagonalen der Matrix $D^{(k)}$ bedeuten. Für $k = 0$ werden diese Einträge alle mit 0 initialisiert. Gibt es nun für $k > 0$ einen Kreis mit negativem Gesamtgewicht, der den Knoten i enthält und sonst nur Knoten aus der Menge $\{1, \dots, k\}$, so gilt $\delta_{ii}^{(k)} < 0$ und somit auch $\delta_{ii}^{(n)} < 0$, da es einen Pfad negativer Länge von i nach i gibt. Also genügt es, am Ende des Algorithmus, die Einträge auf der Hauptdiagonalen zu betrachten. Ist mindestens einer von diesen negativ, so wissen wir, dass ein Kreis mit negativem Gesamtgewicht existiert. In diesem Fall, gibt die vom Algorithmus berechnete Matrix $D^{(n)}$ nicht die korrekten Abstände an.

Vergleich mit Algorithmus von Dijkstra Wir haben weiter oben bereits angesprochen, dass das APSP auch dadurch gelöst werden kann, dass wir einen Algorithmus für das SSSP für jeden möglichen Startknoten einmal aufrufen. Hat der Algorithmus für das SSSP eine Laufzeit von $O(f)$, so ergibt sich zur Lösung des APSP eine Laufzeit von $O(nf)$. Für den Dijkstra-Algorithmus ergibt sich also eine Laufzeit von $O(nm \log n)$.

Für Graphen mit nicht-negativen Kantengewichten stellt sich somit die Frage, ob es effizienter ist, den Floyd-Warshall-Algorithmus mit Laufzeit $O(n^3)$ oder den Dijkstra-Algorithmus mit Lösung $O(nm \log n)$ zur Lösung des APSP zu nutzen. Diese Frage lässt sich nicht allgemein beantworten. Für dichte Graphen mit $m = \Theta(n^2)$ vielen Kanten ist zum Beispiel der Floyd-Warshall-Algorithmus schneller. Für dünne Graphen mit $m = O(n)$ Kanten ist hingegen die n -malige Ausführung des Dijkstra-Algorithmus schneller.

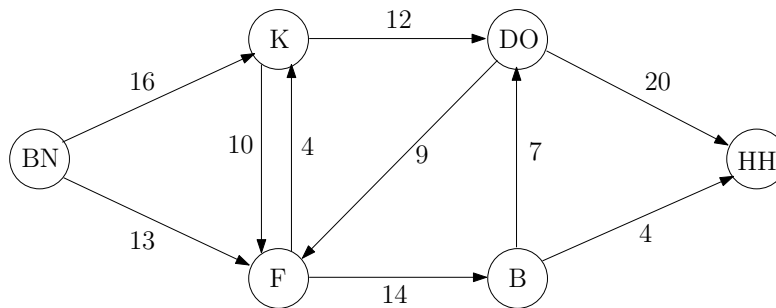


Abbildung 7.7: Ein Netzwerk mit Kapazitäten.

Literatur

Das SSSP und APSP werden in den Kapiteln 24 und 25 von [1] beschrieben. Außerdem sind sie in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.3 von [2] erklärt.

7.3 Flussprobleme

In diesem Abschnitt geht es um die Optimierung von Transportproblemen. Abbildung 7.7 zeigt einen Graphen mit gerichteten Kanten. Die Kapazität einer Kante gibt an, wieviele Mengeneinheiten eines Guts pro Zeiteinheit in Kantenrichtung bewegt werden können. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um diskrete Objekte (z.B. Container) oder um eine Flüssigkeit handelt. Gesucht ist ein *maximaler Fluss* von der Quelle BN (links) zur Senke (HH) rechts, der die Kapazitätsbeschränkungen der Kanten respektiert.

Ein solcher Fluss ist in Abbildung 7.8 dargestellt; die Notation “11/16” an der Kante von BN nach K bedeutet, daß hier 11 von 16 möglichen Einheiten fließen. An der Kante von K nach F ist statt “0/10” nur die Kapazität 10 eingetragen, weil dort kein Fluss vorliegt. Insgesamt fließen 19 Einheiten aus dem Startknoten heraus, und ebenso viele kommen im Zielknoten an, denn an allen anderen Knoten fließt genau so viel hinein wie hinaus.

7.3.1 Modell

Das Problem wird folgendermaßen formalisiert: Ein *Flussnetzwerk* ist ein gerichteter Graph $G = (V, E)$, bei dem zwei Knoten ausgezeichnet sind, die *Quelle* s und die *Senke* t . Zu G gibt es eine Funktion c , die jeder gerichteten Kante (u, v) in E eine reelle Zahl $c(u, v) > 0$ als *Kapazität* zuordnet.

Definition 37 Ein Fluss auf (G, c) ist eine Abbildung f von E in die reellen Zahlen mit folgenden Eigenschaften:

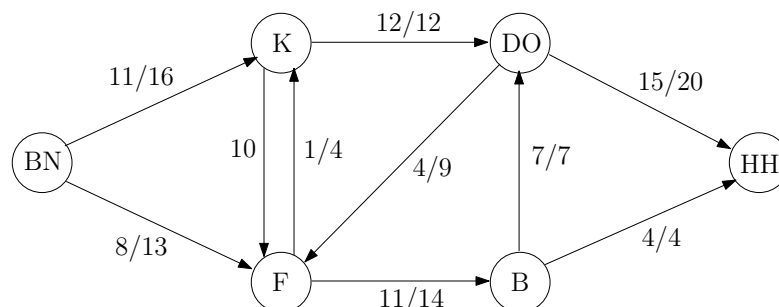


Abbildung 7.8: Ein Fluss mit Wert 19.

- (i) Für alle $(a, b) \in E$ ist $0 \leq f(a, b) \leq c(a, b)$ (Kapazitätsbeschränkung).
- (ii) Für alle $u \in V \setminus \{s, t\}$ ist $\sum_{(v,u) \in E} f(v, u) = \sum_{(u,w) \in E} f(u, w)$ (Flusserhaltung).

Bedingung (ii) drückt aus, daß bei einem gewöhnlichen Knoten u ebensoviel hinein fließt wie hinaus. Für s und t gilt das nicht: In der Quelle wird “produziert”, in der Senke “konsumiert”.

Im Netzwerk in Abbildung 7.8 hat die Quelle s nur ausgehende Kanten und die Senke t nur eingehende. Im Allgemeinen muß das nicht so sein. Den Wert $|f|$ des in s erzeugten Flusses definiert man deshalb als Nettobilanz

$$|f| := \sum_{(s,v) \in E} f(s, v) - \sum_{(u,s) \in E} f(u, s).$$

Wir wollen nun beweisen, daß in einem Flussnetzwerk nichts versickert und in der Senke t tatsächlich ein Fluss mit Wert $|f|$ ankommt (nach Abzug der aus t möglicherweise abfließenden Güter). Dazu werden die Funktionen $c(u, v)$ und $f(u, v)$ formal auch für solche Knotenpaare (u, v) definiert, die in G nicht mit einer Kante verbunden sind; dort wird aber $c(u, v) := 0$ und $f(u, v) := 0$ gesetzt. Die Formel (ii) für die Flusserhaltung aus Definition 37 kann man dann allgemeiner so formulieren: Für alle Knoten $u \notin s, t$ gilt

$$\sum_{v \in V} f(v, u) = \sum_{v \in V} f(u, v), \quad (7.1)$$

denn für alle nicht zu u benachbarten Knoten v sind die Flusswerte gleich null.

Lemma 38 Sei f ein Fluss in einem Flussnetzwerk G . Dann gilt für die Senke t :

$$\sum_{(v,t) \in E} f(v, t) - \sum_{(t,u) \in E} f(t, u) = |f|.$$

Beweis. Offenbar ist

$$\sum_{u \in V} \sum_{v \in V} f(v, u) = \sum_{u \in V} \sum_{v \in V} f(u, v),$$

denn in beiden Summen kommt jedes Knotenpaar genau einmal vor. Für fast alle u sind die inneren Summen nach (7.1) ohnehin gleich. Daher folgt:

$$\sum_{u \in \{s, t\}} \sum_{v \in V} f(v, u) = \sum_{u \in \{s, t\}} \sum_{v \in V} f(u, v),$$

Das bedeutet nach Umformung:

$$\sum_{v \in V} f(s, v) - \sum_{v \in V} f(v, s) = |f| = \sum_{v \in V} f(v, t) - \sum_{v \in V} f(t, v),$$

und daraus folgt die Behauptung, indem man rechts alle nicht benachbarten Knotenpaare fortläßt. \square

7.3.2 Flussvergrößerung durch augmentierende Pfade

Nun stellt sich die Frage, ob man den Fluss in Abbildung 7.8 noch vergrößern kann. Einige Kanten haben noch freie Restkapazitäten, zum Beispiel die Kanten von BN nach F und von DO nach HH. Aber wie schafft man zusätzliche Einheiten von F nach DO? Eine Möglichkeit besteht darin, auf den Transport der vier Einheiten von DO nach F zu verzichten. Würde man dann vier zusätzliche Einheiten von BN nach F schicken, wäre der Mangel in F ausgeglichen. Und die vier einbehaltenen Einheiten in DO könnten zusätzlich von DO nach HH fließen. Insgesamt würde der Wert des Flusses auf diese Weise um 4 auf 23 steigen; siehe Abbildung 7.11.

Bei der Modellierung dieser Idee wird das Nichtschicken von vier Gütern von DO nach F durch einen Rückwärtsfluß mit Wert vier längs einer zusätzlichen Kante von F nach DO simuliert.

Allgemein definiert man zu einem Netzwerk (G, c) mit vorhandenem Fluss f das *Restnetzwerk* G_f folgendermaßen: Die Knotenmenge von G_f ist V . Für jede Kante (u, v) von G enthält G_f

- die (Restkapazitäts-)Kante (u, v) mit Kapazität $c_f(u, v) := c(u, v) - f(u, v)$, falls diese Differenz positiv ist, und
- die (Rück-)Kante (v, u) mit Kapazität $c_f(v, u) := f(u, v)$, falls der Fluss $f(u, v)$ positiv ist.

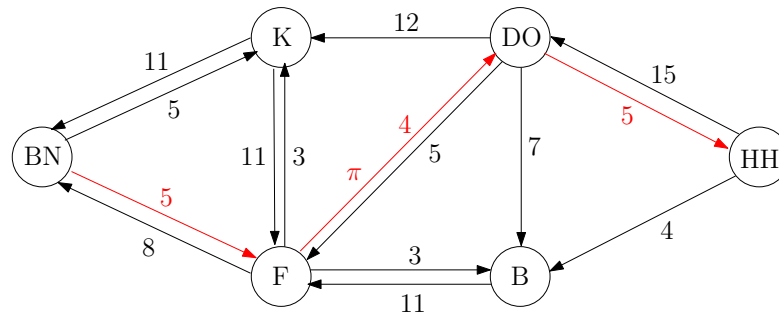


Abbildung 7.9: Das Restnetzwerk G_f . Die roten Kanten ergeben einen augmentierenden Pfad π mit $c_\pi = 4$.

Abbildung 7.9 zeigt das Restkapazitätsnetzwerk für Netz und Fluss aus Abbildung 7.8. Die freie Kapazität 10 der Kante von K nach F wurde mit dem Rückwärtsfluß 1 von K nach F zusammengefaßt.

Sei nun π ein einfacher Pfad von s nach t in G_f , und sei c_π die minimale Kapazität der Kanten von π . Weil alle Kanten von G_f positive Kapazitäten haben, muß $c_\pi > 0$ sein; im Beispiel von Abbildung 7.9 ist $c_\pi = 4$.

Nun definiert man für das Originalnetzwerk (G, c) mit Fluss f die Abbildung

$$g(u, v) := \begin{cases} f(u, v) + c_\pi & \text{falls } (u, v) \in E \text{ und } (u, v) \in \pi \\ f(u, v) - c_\pi & \text{falls } (u, v) \in E \text{ und } (v, u) \in \pi \\ f(u, v) & \text{sonst.} \end{cases}$$

Im ersten Fall werden c_π Einheiten der Restkapazität von (u, v) ausgenutzt, im zweiten Fall ist (v, u) eine Rückkante von G_f , und der Fluss längs (u, v) in G wird um c_π verringert.

Lemma 39 *Abbildung g ist ein Fluss auf (G, c) .*

Beweis. Nach Definition 37 müssen wir zunächst beweisen, daß g die Kapazitätsbeschränkungen einhält. Sei also $(u, v) \in E$. Kommt (u, v) in π vor, ist $g(u, v) = f(u, v) + c_\pi$, und wir haben

$$0 \leq f(u, v) < f(u, v) + c_\pi \leq f(u, v) + (c(u, v) - f(u, v)) = c(u, v),$$

denn c_π ist kleiner gleich der Kapazität $c(u, v) - f(u, v)$ von Kante (u, v) auf π . Wenn aber (v, u) als Rückkante in π vorkommt, ist $g(u, v) = f(u, v) - c_\pi$, und es gilt

$$0 \leq f(u, v) - c_\pi < c(u, v),$$

denn c_π ist kleiner gleich der Kapazität $f(u, v)$ von Kante (v, u) auf π .

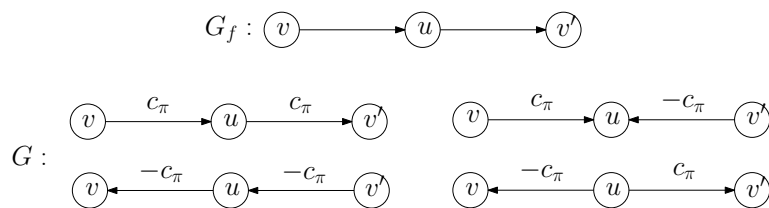


Abbildung 7.10: Der Fluss in Knoten u bleibt unter g in jedem der vier Fälle erhalten. Links ändern sich Inflow und Outflow in gleicher Weise, rechts neutralisieren sich die Änderungen.

Zum Nachweis von Bedingung (ii) in Definition 37 der Flusserhaltung sei $u \notin \{s, t\}$ ein Knoten in V . Wenn u nicht auf Pfad π liegt, ist auch keine zu u adjazente Kante in π enthalten und (ii) gilt unverändert, weil g auf diesen Kanten mit f übereinstimmt.

Wenn u Knoten von π ist, gibt es in π Kanten (v, u) und (u, v') . Jede von ihnen kann in E vorkommen oder Rückkante zu einer Kante in E sein; der Flusswert unter g ist entsprechend um c_π Einheiten höher oder niedriger als unter f . Abbildung 7.10 zeigt, daß in jedem der vier Fälle der Fluss in u erhalten bleibt. \square

Nach Konstruktion hat Fluss g auf G den Wert $|g| = |f| + c_\pi > |f|$. Weil der Pfad π dazu dient, diese Flussvergrößerung zu erzielen, nennt man π einen *flußvergrößernden* oder *augmentierenden* Pfad.

7.3.3 Das Verfahren von Ford und Fulkerson

Ein naheliegender Ansatz wäre nun, mit einem Fluss $f = 0$ zu beginnen und die Schritte

- Konstruktion des Restnetzwerks G_f
- Berechnung eines augmentierenden Pfads π in G_f (mit Tiefen- oder Breitensuche)
- Vergrößerung des Flusses f in G um c_π

zu iterieren, solange es geht. Dabei stellen sich drei Fragen: Terminiert das Verfahren? Wenn ja, nach wievielen Iterationen? Ist dann am Ende der Fluss maximal?

Ford und Fulkerson fanden ein Beispiel mit irrationalen Kapazitäten, bei dem das Verfahren nicht terminiert sondern gegen einen Grenzfluss konvergiert,

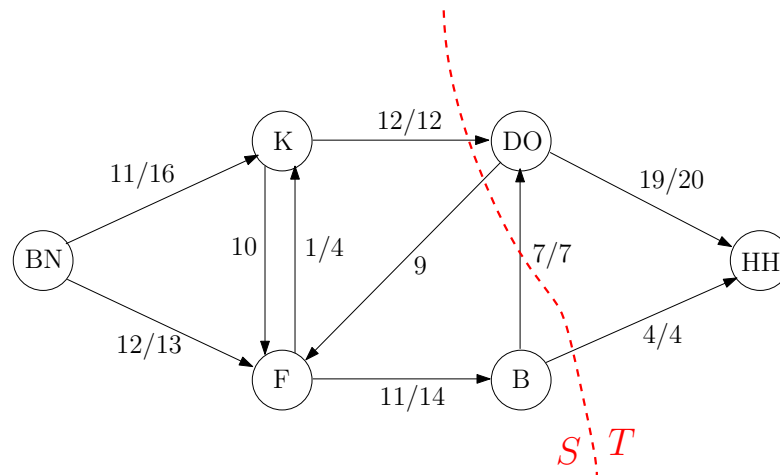


Abbildung 7.11: Dieser Fluss mit Wert 23 ist maximal. Die gestrichelte Linie zeigt einen Schnitt des Graphen.

der nicht maximal ist. Wenn aber alle Kapazitäten $c(u, v)$ ganzzahlig sind, kann das nicht passieren, denn dann sind auch die Inkremente c_π ganzzahlig und positiv, also größer gleich 1. Wenn K die maximale Kantenkapazität ist, muß das Verfahren nach $K \cdot |V|$ Schritten terminieren, denn spätestens dann sind die Kapazitäten aller von der Quelle s ausgehenden Kanten (und das sind höchstens $|V|$ viele) verbraucht. Im Restnetzwerk G_f gibt es dann keinen Pfad mehr von s nach t .

Weil eine Iteration $O(|E|)$ Zeit kostet, folgt:

Theorem 40 *Sei (G, c) ein Netzwerk mit ganzzahligen Kapazitäten $c(u, v) \leq K$. Dann terminiert das Ford-Fulkerson-Verfahren nach spätestens $O(K \cdot |V| \cdot |E|)$ Schritten.*

Theorem 40 läßt sich auf rationale Kapazitäten verallgemeinern, indem man mit dem Hauptnenner aller Kapazitäten multipliziert. Wie schon bei der Lösung des Rucksack-Problems mit dynamischer Programmierung in Kapitel 4 ist auch hier der Laufzeitfaktor K nicht polynomiell in der Eingabegröße, denn K wird durch $\log K$ viele Bits dargestellt.

Im Beispiel aus Abbildung 7.8 ergibt sich nach der ersten Iteration der Fluss in Abbildung 7.11. Eine weitere Iteration ist nicht möglich, denn im zugehörigen Restnetzwerk gibt es keinen Pfad von s nach t . Überraschend ist folgendes Ergebnis:

Theorem 41 *Wenn das Ford-Fulkerson-Verfahren terminiert, ist der gefundene Fluss maximal.*

Der Beweis von Theorem 41 stützt sich auf eine strukturelle Eigenschaft von Flussnetzwerken, die für sich selbst genommen interessant ist.

Definition 42 Sei (G, c) ein Flussnetz mit Quelle s und Senke t . Dann heißt eine Aufteilung der Knotenmenge $V = S \cup T$ in disjunkte Teilmengen S, T mit $s \in S$ und $t \in T$ ein Schnitt mit Kapazität

$$c(S, T) := \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v).$$

Im Beispiel von Abbildung 7.11 gilt $c(S, T) = 23$, denn die Kante von DO nach F verläuft nicht von S nach T .

Anschaulich ist klar, daß alle Güter, die von s nach t fließen, irgendwo "über den Schnitt müssen". Das läßt sich durch folgende Verallgemeinerung von Lemma 38 präzisieren:

Lemma 43 Sei f ein Fluss im Netzwerk (G, c) und (S, T) ein Schnitt. Dann gilt für die Nettobilanz

$$f(S, T) := \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(v, u) = |f|.$$

Beweis. Der Beweis beruht wiederum auf Manipulation von Summen. Wir summieren zunächst über alle Kanten, die innerhalb der Menge S verlaufen. Wir erhalten die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \sum_{v \in S} f(s, v) + \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in S} f(u, v) &= \sum_{v \in S} f(v, s) + \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in S} f(v, u) \\ &\iff \\ \sum_{v \in S} f(s, v) - \sum_{v \in S} f(v, s) &= \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in S} f(v, u) - \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in S} f(u, v). \end{aligned} \quad (7.2)$$

Für alle Knoten $u \in S \setminus \{s\}$ gilt die Flusserhaltung. Dafür müssen wir aber auch die Kanten betrachten, die von u in die Menge T führen, und die Kanten, die von der Menge T zu u führen. Wir erhalten

$$\sum_{v \in S} f(u, v) + \sum_{v \in T} f(u, v) = \sum_{v \in S} f(v, u) + \sum_{v \in T} f(v, u).$$

Damit können wir Gleichung 7.2 schreiben als

$$\sum_{v \in S} f(s, v) - \sum_{v \in S} f(v, s) = \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in T} f(v, u). \quad (7.3)$$

Für die Quelle s gilt entsprechend

$$\begin{aligned} \sum_{v \in S} f(s, v) + \sum_{v \in T} f(s, v) &= |f| + \sum_{v \in S} f(v, s) + \sum_{v \in T} f(v, s) \\ &\iff \\ \sum_{v \in S} f(s, v) - \sum_{v \in S} f(v, s) &= |f| + \sum_{v \in T} f(v, s) - \sum_{v \in T} f(s, v). \end{aligned} \quad (7.4)$$

Wir setzen Gleichung 7.4 in Gleichung 7.3 ein und erhalten

$$\begin{aligned} |f| + \sum_{v \in T} f(v, s) - \sum_{v \in T} f(s, v) &= \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{u \in S \setminus \{s\}} \sum_{v \in T} f(v, u) \\ &\iff \\ |f| &= \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(v, u) = f(S, T). \end{aligned}$$

Die Ungleichung folgt einfach aus obiger Gleichung, da $f(u, v) \leq c(u, v)$ und $f(v, u) \geq 0$ für alle $u, v \in V$:

$$f(S, T) \leq \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) \leq \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) \leq c(S, T).$$

□

Eine direkte Konsequenz aus Lemma 43 ist

$$|f| = f(S, T) \leq \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) \leq \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) = c(S, T). \quad (7.5)$$

Das berühmte *Max Flow - Min Cut* - Theorem besagt nun, daß für einen maximalen Fluss und einen minimalen Schnitt in (7.5) die Gleichheit gilt. Das folgt aus

Theorem 44 *Sei f ein Fluss im Netzwerk (G, c) . Dann sind folgende Aussagen äquivalent:*

- a) f ist ein maximaler Fluss.
- b) Das Restnetzwerk G_f enthält keinen flussvergrößernden Pfad.
- c) Es gibt einen Schnitt (S, T) mit $c(S, T) = |f|$.

Beweis. Daß aus a) die Behauptung b) folgt, ist klar: Gäbe es einen flussvergrößernden Pfad, wäre f nicht maximal.

Gelte nun b). Dann sind s und t in G_f nicht durch einen Pfad verbunden. Wenn also S die Menge aller in G_f von s aus erreichbaren Knoten bedeutet und $T = V \setminus S$ den Rest, ist (S, T) ein Schnitt. Sei nun (u, v) eine Kante

in E mit $u \in S$ und $v \in T$. Weil v zu T gehört, kann diese Kante in G_f nicht existieren, denn sonst wäre auch v von s aus erreichbar. Also ist ihre Restkapazität $c(u, v) - f(u, v)$ gleich 0, d. h. es gilt $c(u, v) = f(u, v)$. Ist andererseits $(v, u) \in E$ mit $u \in S$ und $v \in T$, so kann die zugehörige Rückkante (u, v) in G_f ebenso nicht existieren, und deshalb muß $f(v, u) = 0$ gelten. Damit folgt

$$\begin{aligned} c(S, T) &= \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} c(u, v) &= \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(u, v) - \sum_{u \in S} \sum_{v \in T} f(v, u) \\ &= f(S, T) = |f| \leq c(S, T); \end{aligned}$$

in der unteren Zeile wurden Lemma 43 und Formel (7.5) verwendet. Also ist $c(S, T) = |f|$, das heißt, Behauptung c) ist bewiesen.

Wenn wir schließlich c) voraussetzen, folgt a) sofort aus Formel (7.5), denn einen Fluss mit größerem Wert als $c(S, T)$ kann es nicht geben. Damit sind Theorem 44 und Theorem 41 bewiesen. \square

Nebenbei haben wir auch gezeigt, daß ein maximaler Fluss ganzzahlig ist, wenn die Kapazitäten es sind.

Man kann man das Verfahren von Ford und Fulkerson so modifizieren, daß nicht irgendein Pfad von s nach t in G_f bestimmt wird sondern einer mit möglichst wenig Kanten. Bei dieser Variante von Edmonds und Karp sind höchstens $O(|V| \cdot |E|)$ Iterationen erforderlich. Die Rechenzeit liegt damit in $O(|V| \cdot |E|^2)$.

7.3.4 Der Heiratssatz

Flussmaximierung hat zahlreiche überraschende Anwendungen in anderen Gebieten. Als Beispiel betrachten wir den Satz von Hall, der auch als *Heiratssatz* bekannt ist. Gegeben sind eine Menge V_1 von Damen und eine Menge V_2 von Herren. Jede Dame $a \in V_1$ hat eine nicht leere Menge $F(a) \subseteq V_2$ von Freunden in V_2 .

Die Mengen $F(a)$ brauchen nicht disjunkt zu sein. Deshalb stellt sich die Frage, ob jede Dame a einen ihrer Freunde in $F(a)$ heiraten kann, ohne daß es zu Polygamie kommt; gesucht wird also eine *injektive* Abbildung

$$h : V_1 \longrightarrow V_2$$

mit $h(a) \in F(a)$ für alle $a \in V_1$.

Eine (scheinbar) schwächere Forderung ist durch die sogenannte *Party-Bedingung* gegeben: Wenn eine Teilmenge von Damen alle ihre Freunde einlädt, gibt es genügend viele Tanzpartner (die aber keine Freunde zu sein brauchen). Das

heißt, für jede Teilmenge $W \subseteq V_1$ gilt

$$|W| \leq \left| \bigcup_{a \in W} F(a) \right|$$

Überraschenderweise gilt nun folgendes

Theorem 45 *Eine Heirat h existiert genau dann, wenn die Party-Bedingung erfüllt ist.*

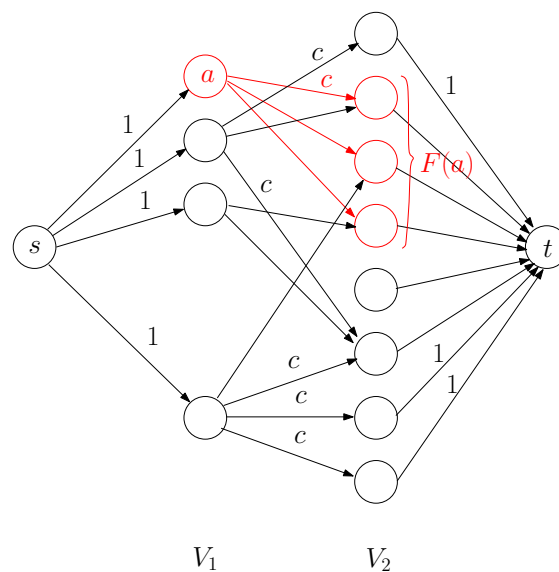


Abbildung 7.12: Die Kapazität c hat den Wert $|V_1| + 1$.

Beweis. Wenn eine Heirat h existiert, kann jede Dame a auf jeder Party mit ihrem Ehemann $h(a) \in F(a)$ tanzen; deshalb ist die Party-Bedingung erfüllt. Umgekehrt nehmen wir nun an, daß die Party-Bedingung erfüllt ist, und betrachten das in Abbildung 7.12 gezeigte Flussnetzwerk. Links stehen die Damen, rechts die Herren, und von jeder Dame gehen Kanten mit Kapazität $c := |V_1| + 1$ zu ihren Freunden aus. Quelle s ist mit allen Damen verbunden, und alle Herren sind mit der Senke verbunden; diese Kanten haben alle die Kapazität 1.

Behauptung: Die von s ausgehenden Kanten bilden einen minimalen Schnitt mit Kapazität $|V_1|$.

Zum Beweis nehmen wir an, es gäbe einen Schnitt mit Kapazität $< |V_1|$. Kanten von V_1 nach V_2 können darin nicht vorkommen, denn deren Kapazität c ist zu groß. Also kann der Schnitt nur Kanten von s zu einer Teilmenge V_1^0

von V_1 enthalten sowie Kanten von einer Teilmenge $V_2^0 \subseteq V_2$ nach t , und es gilt $|V_1^0| + |V_2^0| < |V_1|$.

Sei nun $a \in V_1 \setminus V_1^0$ und $w \in F(a)$. Dann muß w zu V_2^0 gehören, denn sonst gäbe es ja den Pfad $s \rightarrow a \rightarrow w \rightarrow t$ im Widerspruch zur Eigenschaft eines Schnitts. Das bedeutet

$$\bigcup_{a \in V_1 \setminus V_1^0} F(a) \subseteq V_2^0,$$

also

$$\left| \bigcup_{a \in V_1 \setminus V_1^0} F(a) \right| \leq |V_2^0| < |V_1| - |V_1^0| = |V_1 \setminus V_1^0|$$

im Widerspruch zur Party-Bedingung. Also ist die Behauptung richtig, und aus Theorem 44 folgt, daß es einen Fluss mit Wert $|V_1|$ geben muß. Dieser Fluss muß über $|V_1|$ *verschiedene* Knoten von V_2 zur Senke laufen und markiert deshalb eine Heirat. \square

Kapitel 8

Formale Sprachen und Automaten

In diesem Teil der Vorlesung werden wir uns mit *formalen Sprachen* beschäftigen. Eine solche Sprache ist nichts anderes als eine Menge von Zeichenketten über einem gegebenen Alphabet. So bildet zum Beispiel die Menge aller gültigen Java-Programme eine formale Sprache ebenso wie die Menge aller gültigen HTML-Dateien. Für den Entwurf von Programmiersprachen und Compilern ist es unerlässlich eine formale Beschreibung zu entwickeln, welche Zeichenfolgen ein gültiges Programm darstellen.

Diese Beschreibung muss dergestalt sein, dass der Compiler möglichst effizient die *lexikalische Analyse* und die *syntaktische Analyse* durchführen kann. Die lexikalische Analyse ist der erste Schritt, den ein Compiler durchführt; dabei wird der Quelltext in logisch zusammenhängende *Tokens* wie zum Beispiel Schlüsselwörter, Zahlen und Operatoren zerlegt. Der zweite Schritt ist die syntaktische Analyse, in der überprüft wird, ob der Quelltext ein syntaktisch korrektes Programm ist, und in der der Quelltext in einen sogenannten *Syntaxbaum* umgewandelt wird.

Wir werden zunächst *Grammatiken* kennenlernen. Dabei handelt es sich um Regelsysteme, die beschreiben, wie die Wörter einer Sprache erzeugt werden. Grammatiken werden gemäß ihrer Mächtigkeit in verschiedene Klassen eingeteilt, und wir werden uns mit *regulären* und *kontextfreien Grammatiken* im Detail beschäftigen. Während reguläre Grammatiken bei der lexikalischen Analyse eine große Rolle spielen, kommen kontextfreie Grammatiken bei der Syntaxanalyse zum Einsatz, da alle gängigen Programmiersprachen durch kontextfreie Grammatiken beschrieben werden, wenn man von einigen nicht ganz so wichtigen Details, auf die wir hier nicht eingehen werden, absieht.

8.1 Sprachen und Grammatiken

In diesem Kapitel gehen wir stets davon aus, dass Σ eine beliebige endliche Menge ist, die wir auch das *Alphabet* nennen werden. Ein *Wort* ist eine endliche Folge von Zeichen aus dem Alphabet Σ , und mit Σ^* bezeichnen wir die Menge aller Wörter, das heißt die Menge aller endlichen Zeichenfolgen über Σ . Das *leere Wort* ϵ ist die Zeichenkette der Länge 0, und wir definieren, dass ϵ zu Σ^* gehört. Wir definieren außerdem $\Sigma^+ = \Sigma^* \setminus \{\epsilon\}$ als die Menge aller Wörter mit mindestens einem Buchstaben. Nun können wir das zentrale Konzept dieses Kapitels definieren.

Definition 46 Eine Menge $L \subseteq \Sigma^*$ bezeichnen wir als (formale) Sprache über Σ .

Wir benötigen noch die folgenden Schreibweisen.

Definition 47 Sei Σ ein Alphabet, $a \in \Sigma$ und $n \in \mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$. Mit a^n bezeichnen wir das Wort $a \cdots a$, in dem der Buchstabe a genau n mal vorkommt. Außerdem bezeichnet a^0 das leere Wort ϵ . Sei $w \in \Sigma^*$ ein Wort, dann bezeichnet $|w|$ die Länge von w und $|w|_a$ gibt an, wie oft der Buchstabe a in dem Wort w enthalten ist. Außerdem bezeichnet w^R das gespiegelte Wort, das heißt für $w = w_1 \dots w_n$ ist $w^R = w_n \dots w_1$.

Fangen wir mit dem einfachen Beispiel $\Sigma = \{1\}$ an, bei dem das Alphabet aus nur einem einzigen Element besteht. Für dieses Beispiel gilt $\Sigma^* = \{\epsilon, 1, 11, 111, 1111, \dots\} = \{1^0, 1^1, 1^2, 1^3, \dots\}$. Sprachen über diesem Alphabet sind zum Beispiel $L = \{1^n \mid n \text{ ist gerade}\}$ und $L = \{1^n \mid n \text{ ist eine Primzahl}\}$.

Ein bei Informatikern sehr beliebtes Alphabet ist $\Sigma = \{0, 1\}$. Über diesem Alphabet kann man beispielsweise die folgenden Sprachen definieren.

- $L = \{01, 1111, 010, \epsilon\}$: Eine Sprache, die vier willkürlich gewählte Wörter enthält.
- $L = \{0^m 1^n \mid m, n \in \mathbb{N}\}$: Die Sprache aller Wörter, die aus einem Block von Nullen bestehen, dem ein Block von Einsen folgt.
- $L = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$: Die Sprache aller Wörter, die aus einem Block von Nullen bestehen, dem ein Block von Einsen folgt, wobei beide Blöcke die gleiche Länge haben.
- $L = \{w \in \Sigma^* \mid |w|_0 = |w|_1\}$: Die Sprache aller Wörter, die genauso viele Nullen wie Einsen enthalten.
- $L = \{w \in \Sigma^* \mid w = w^R\}$: Die Sprache aller *Palindrome*.

Eine geeignete Wahl für Programmiersprachen ist es, als Alphabet Σ die Menge aller Unicode-Zeichen zu wählen. Dann kann man L zum Beispiel als die Menge aller syntaktisch korrekten Java-Klassen definieren.

Um Sprachen kompakt zu beschreiben, werden wir Grammatiken verwenden.

Definition 48 Eine Grammatik G besteht aus vier Komponenten (Σ, V, S, P) mit den folgenden Bedeutungen:

- Σ ist das endliche Alphabet, über dem die Sprache definiert ist. Wir nennen die Elemente aus Σ auch Terminalsymbole.
- V ist eine endliche Menge von Nichtterminalsymbolen, die disjunkt zu Σ ist.
- $S \in V$ ist das Startsymbol.
- P ist eine endliche Menge von Ableitungsregeln. Dabei ist eine Ableitungsregel ein Paar (l, r) mit $l \in V^+$ und $r \in (V \cup \Sigma)^*$. Wir werden statt (l, r) auch $l \rightarrow r$ schreiben. Enthält P zwei Regeln (l, r) und (l, r') , so schreiben wir auch $l \rightarrow r, r'$.

Wörter werden nun wie folgt erzeugt. Man startet mit dem Startsymbol S und wendet solange Ableitungsregeln an, bis nur noch Terminale vorhanden sind. Das Anwenden einer Ableitungsregel (l, r) bedeutet, dass wir ein Vorkommen von l durch r ersetzen.

Definition 49 Für eine Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ bezeichnen wir mit $L(G) \subseteq \Sigma^*$ die von ihr erzeugte Sprache, das heißt die Menge aller Wörter, die aus dem Startsymbol mit Hilfe der Ableitungsregeln aus P erzeugt werden können.

Schauen wir uns Beispiele für Grammatiken an, um diese Definition zu verdeutlichen. Dabei sei stets $\Sigma = \{0, 1\}$ angenommen.

- Es sei $V = \{S\}$ und P enthalte die Regeln $S \rightarrow \epsilon$ und $S \rightarrow 11S$. Für diese Grammatik G gilt $L(G) = \{1^n \mid n \text{ ist gerade}\}$. Eine Ableitung des Wortes 1111 sieht zum Beispiel wie folgt aus:

$$S \rightarrow 11S \rightarrow 1111S \rightarrow 1111\epsilon = 1111.$$

- Es sei $V = \{S, A, B\}$ und P enthalte die Regeln

$$S \rightarrow AB \quad A \rightarrow \epsilon, 0A \quad B \rightarrow \epsilon, 1B.$$

Für diese Grammatik G gilt $L(G) = \{0^m 1^n \mid m, n \in \mathbb{N}\}$. Eine Ableitung des Wortes 011 sieht zum Beispiel wie folgt aus:

$$S \rightarrow AB \rightarrow 0AB \rightarrow 0\epsilon B = 0B \rightarrow 01B \rightarrow 011B \rightarrow 011\epsilon = 011.$$

- Es sei $V = \{S\}$ und P enthalte die Regeln

$$S \rightarrow \epsilon, 0S1.$$

Für diese Grammatik G gilt $L(G) = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$. Eine Ableitung des Wortes 0011 sieht zum Beispiel wie folgt aus:

$$S \rightarrow 0S1 \rightarrow 00S11 \rightarrow 00\epsilon 11 = 0011.$$

- Es sei $V = \{S\}$ und P enthalte die Regeln

$$S \rightarrow \epsilon, 0, 1, 0S0, 1S1.$$

Für diese Grammatik G gilt $L(G) = \{w \in \Sigma^* \mid w = w^R\}$. Wir geben beispielhaft eine Ableitung des Palindroms 1101011 an:

$$S \rightarrow 1S1 \rightarrow 11S11 \rightarrow 110S011 \rightarrow 1101011.$$

Für eine gegebene Grammatik und ein gegebenes Wort ist es ein wichtiges Problem, zu entscheiden, ob das Wort zu der von der Grammatik erzeugten Sprache gehört, ob also zum Beispiel ein gegebener Quelltext ein syntaktisch korrektes Programm einer bestimmten Programmiersprache darstellt. Dieses Problem wird auch *Wortproblem* genannt und es kann für allgemeine Grammatiken so komplex sein, dass es keine Algorithmen gibt, um es zu lösen. Deshalb müssen wir die erlaubten Ableitungsregeln einschränken, um eine Klasse von Grammatiken zu erhalten, für die das Wortproblem effizient gelöst werden kann. Auf der anderen Seite müssen wir natürlich aufpassen, dass wir die Grammatiken nicht zu stark einschränken, weil wir ansonsten keine mächtigen Programmiersprachen wie C++ oder Java beschreiben können. Die Chomsky-Hierarchie enthält vier Klassen, die verschiedene Kompromisse zwischen Ausdrucksstärke und Komplexität des Wortproblems bilden.

Definition 50 Die Chomsky-Hierarchie teilt Grammatiken in die folgenden Klassen ein.

0. Grammatiken ohne Einschränkungen heißen Chomsky-0-Grammatiken.
1. In Chomsky-1-Grammatiken oder kontextsensitiven Grammatiken haben alle Ableitungsregeln die Form $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$ oder $S \rightarrow \epsilon$, wobei $\alpha, \beta \in V^*$, $A \in V$ und $\gamma \in (V \cup \Sigma)^+$ gilt. Außerdem darf S auf keiner rechten Seite einer Produktionsregel vorkommen.
2. In Chomsky-2-Grammatiken oder kontextfreien Grammatiken haben alle Ableitungsregeln die Form $A \rightarrow v$ mit $A \in V$ und $v \in (V \cup \Sigma)^*$.
3. In Chomsky-3-Grammatiken, rechtslinearen Grammatiken oder regulären Grammatiken haben alle Ableitungsregeln die Form $A \rightarrow v$ mit $A \in V$ und $v = \epsilon$ oder $v = aB$ mit $a \in \Sigma$ und $B \in V$.

Die Chomsky-Hierarchie wurde nach dem berühmten amerikanischen Linguisten Noam Chomsky benannt, der sie 1956 eingeführt hat.

In dieser Vorlesung sind nur die regulären und die kontextfreien Grammatiken von Interesse. Die anderen beiden Klassen haben wir nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Wir werden Sprachen, die von regulären oder kontextfreien Grammatiken erzeugt werden, im Folgenden auch *reguläre Sprachen* bzw. *kontextfreie Sprachen* nennen.

8.2 Endliche Automaten

In diesem Abschnitt werden wir sehen, dass das Wortproblem für reguläre Grammatiken sehr effizient gelöst werden kann. Dazu führen wir mit *endlichen Automaten* ein sehr einfaches Rechnermodell ein, und wir zeigen, dass die Sprachen, die von diesem einfachen Rechnermodell entschieden werden können, genau die regulären Sprachen sind. Bevor wir den Zusammenhang zu regulären Grammatiken herstellen, beschäftigen wir uns zunächst im Detail mit endlichen Automaten, die auch für sich genommen ein interessantes Rechnermodell darstellen, das beispielsweise als Modell sequentieller Schaltwerke dient.

Definition 51 *Ein endlicher Automat (deterministic finite automaton, kurz: DFA) M besteht aus fünf Komponenten $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit den folgenden Bedeutungen:*

- Q ist eine endliche Menge, die Zustandsmenge.
- Σ ist eine endliche Menge, das Eingabealphabet.
- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ ist die Zustandsüberföhrungsfunktion.
- $q_0 \in Q$ ist der Startzustand.
- $F \subseteq Q$ ist die Menge der akzeptierenden Zustände.

Ein solcher DFA M erhalt als Eingabe ein Wort $w = w_1 \dots w_n$ über dem Alphabet Σ und arbeitet die Buchstaben von links nach rechts ab. Er startet im Startzustand q_0 und wechselt nach dem Lesen des ersten Buchstabens in den Zustand $q_1 := \delta(q_0, w_1)$. Nach dem Lesen des zweiten Buchstabens wechselt der DFA in den Zustand $q_2 := \delta(q_1, w_2)$ und so weiter. Nach dem Lesen des letzten Buchstabens stoppt der DFA im Zustand $q_n := \delta(q_{n-1}, w_n)$. Formal erweitern wir die Funktion δ zu einer Funktion $\delta^* : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$, sodass für alle $q \in Q$ und für alle $a \in \Sigma$ gilt

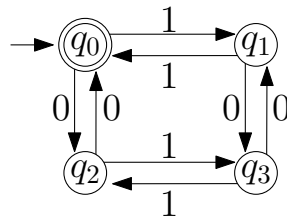
$$\delta^*(q, \epsilon) = q \quad \text{und} \quad \delta^*(q, a) = \delta(q, a).$$

Außerdem definieren wir rekursiv für jedes Wort $w = w_1 \dots w_n \in \Sigma^*$ der Länge $n \geq 2$

$$\delta^*(q, w) = \delta^*(\delta(q, w_1), w_2 \dots w_n).$$

Erhält der DFA nun ein Wort $w \in \Sigma^*$ als Eingabe, so terminiert er im Zustand $q_n = \delta^*(q_0, w)$. Falls $q_n \in F$ gilt, sagen wir, dass der DFA, das Wort w *akzeptiert*. Gilt $q_n \notin F$, so sagen wir, dass der DFA das Wort w *verwirft*. Mit $L(M) \subseteq \Sigma^*$ bezeichnen wir für einen DFA M die Menge aller Wörter, die M akzeptiert. Wir sagen, dass M die Sprache $L(M)$ *entscheidet* oder *akzeptiert*. Wir sagen auch, dass M ein DFA für die Sprache $L(M)$ ist.

Anschaulich kann man einen DFA anhand eines Übergangsgraphen darstellen. Das folgende Beispiel, in dem $\Sigma = \{0, 1\}$ gilt, ist aus dem Buch von Ingo Wegener übernommen [2].



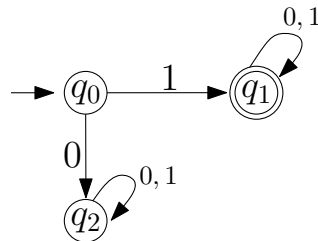
Jeder Zustand aus Q ist durch einen Kreis dargestellt, Zustände aus F sind durch doppelte Kreise dargestellt und der Startzustand ist durch einen eingehenden Pfeil markiert, der von keinem anderen Zustand kommt. Die Funktion δ wird durch die Pfeile zwischen den Zuständen dargestellt. Liest der DFA beispielsweise im Zustand q_0 eine 1, so geht er in den Zustand q_1 über. Liest er im Zustand q_0 eine 0, so geht er in den Zustand q_2 über.

Nun sollten wir noch klären, welche Sprache der Automat M in diesem Beispiel entscheidet. Dazu ist es zunächst wichtig, festzuhalten, dass der einzige akzeptierende Zustand der Zustand q_0 ist. Das heißt, nur wenn der DFA nach dem Lesen aller Zeichen des Eingabewortes w wieder im Startzustand ist, so akzeptiert er w . Man kann nun weiterhin beobachten, dass der Automat sich genau dann in einem der beiden linken Zustände (q_0 oder q_2) befindet, wenn er eine gerade Anzahl an Einsen gelesen hat. Weiterhin befindet sich der Automat genau dann in einem der beiden oberen Zustände (q_0 oder q_1), wenn er eine gerade Anzahl an Nullen gelesen hat. Der DFA befindet sich also genau dann im Zustand q_0 , wenn er eine gerade Anzahl an Nullen und eine gerade Anzahl an Einsen gelesen hat. Es gilt also

$$L(M) = \{w \in \Sigma^* \mid |w|_0 \text{ ist gerade und } |w|_1 \text{ ist gerade} \}.$$

Es kann auch vorkommen, dass ein DFA beim Lesen eines Zeichens gar keinen Zustandswechsel durchführt. In der grafischen Darstellung bedeutet das, dass es Schleifen gibt, die von einem Knoten zu sich selbst führen. Der folgende DFA akzeptiert beispielsweise genau diejenigen Wörter, die mit einer Eins

beginnen. Mehrere mit Komma getrennte Zeichen sind eine gängige Schreibweise für der Übersicht halber zu einem Pfeil zusammengefügte Übergänge.



Im Folgenden werden wir uns damit beschäftigen, wie man Automaten mit möglichst wenig Zuständen konstruiert, wir werden untersuchen, welche Sprachen von DFAs entschieden werden können, und wir werden mit *nichtdeterministischen Automaten* eine Erweiterung von DFAs kennenlernen.

8.2.1 Minimierung endlicher Automaten

Bei den Algorithmen und Datenstrukturen, die wir bisher in der Vorlesung kennengelernt haben, haben wir stets die Laufzeit analysiert, und unser Ziel war es, möglichst effiziente Algorithmen und Datenstrukturen zu entwerfen. Die Laufzeit eines DFA ist linear in der Länge des Eingabewortes, da jeder Buchstabe des Eingabewortes zu genau einem Zustandsübergang führt. Bei Automaten ist es stattdessen interessant, die Anzahl der Zustände zu minimieren. Deshalb werden wir uns nun damit beschäftigen, wie man zu einem gegebenen DFA einen DFA mit möglichst wenig Zuständen konstruieren kann, der die gleiche Sprache entscheidet.

Zunächst besteht die Möglichkeit, dass gewisse Zustände eines DFA nicht vom Startzustand aus erreicht werden können. Solche Zustände nennen wir *überflüssig* und wir können sie mit Hilfe einer Tiefensuche finden.

Theorem 52 *Die Menge der überflüssigen Zustände eines DFA kann in Zeit $O(|Q| \cdot |\Sigma|)$ berechnet werden.*

Beweis. Wir stellen den DFA als gerichteten Graph dar, wobei die Knotenmenge der Zustandsmenge Q entspricht und es eine Kante von $q \in Q$ zu $q' \in Q$ gibt, falls $q' = \delta(q, a)$ für mindestens einen Buchstaben $a \in \Sigma$ gilt. Für einen Zustand q , der in diesem Graphen nicht vom Startzustand q_0 erreicht werden kann, gibt es kein Wort $w \in \Sigma^*$ mit $\delta^*(q_0, w) = q$. Ein solcher Zustand ist also überflüssig. Auf der anderen Seite gibt es für jeden von q_0 erreichbaren Zustand q ein Wort w mit $\delta^*(q_0, w) = q$.

Somit sind die Zustände, die in dem Graphen nicht von q_0 erreicht werden können, genau die überflüssigen Zustände. Die Menge dieser Zustände kann

mit einer Tiefensuche gefunden werden, deren Laufzeit $O(n+m)$ für Graphen mit n Knoten und m Kanten beträgt. Der von uns konstruierte Graph hat $n = |Q|$ und höchstens $m = |Q| \cdot |\Sigma|$ Kanten. Somit hat die Tiefensuche eine Laufzeit von $O(|Q| \cdot |\Sigma|)$. \square

Wir gehen nun davon aus, dass wir einen Automaten haben, in dem kein Zustand überflüssig ist. Das alleine bedeutet allerdings noch nicht, dass der Automat minimal ist, wie das folgende Beispiel zeigt.

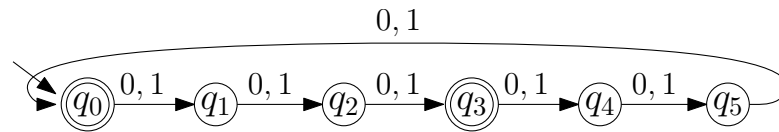


Abbildung 8.1: Beispiel für einen nicht-minimalen DFA ohne überflüssige Zustände

Ähnlich zu dem vorangegangenen Beispiel kann man sich leicht überlegen, dass dieser Automat genau diejenigen Wörter $w \in \{0,1\}^*$ akzeptiert, die eine Länge haben, die ein Vielfaches von drei ist. Keiner der Zustände ist überflüssig im Sinne der obigen Definition, aber trotzdem kann der Leser sich leicht selbst davon überzeugen, dass es einen DFA mit nur drei Zuständen gibt, der die gleiche Sprache entscheidet.

Um DFAs zu minimieren, die keine überflüssigen Zustände enthalten, führen wir zunächst die folgende Definition ein.

Definition 53 Zwei Zustände p und q eines DFA heißen äquivalent, wenn für alle Wörter $w \in \Sigma^*$ gilt:

$$\delta^*(p, w) \in F \iff \delta^*(q, w) \in F.$$

Wir schreiben dann $p \equiv q$. Mit $[p]$ bezeichnen wir die Menge aller Zustände, die äquivalent zu p sind.

Wenn zwei Zustände p und q äquivalent sind, dann spielt es für das Akzeptanzverhalten des DFA keine Rolle, ob er sich in p oder q befindet. Liest er in p oder q startend das gleiche Wort w , so akzeptiert er entweder in beiden Fällen oder verwirft in beiden Fällen. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass \equiv eine Äquivalenzrelation auf der Zustandsmenge Q ist. Das bedeutet es gelten die folgenden drei Eigenschaften, die alle direkt aus der Definition von \equiv folgen:

- Reflexivität: Für alle Zustände $q \in Q$ gilt $q \equiv q$.
- Symmetrie: Gilt $p \equiv q$ für zwei Zustände $p, q \in Q$, so gilt auch $q \equiv p$.
- Transitivität: Gilt $p \equiv q$ und $q \equiv r$ für drei Zustände $p, q, r \in Q$, so gilt auch $p \equiv r$.

Das bedeutet insbesondere, dass die Relation \equiv die Zustandsmenge in Äquivalenzklassen einteilt. Wir konstruieren nun einen DFA, der nur so viele Zustände hat wie die Relation \equiv Äquivalenzklassen besitzt.

Definition 54 Die Komponenten des Äquivalenzklassenautomaten $M' = (Q', \Sigma', \delta', q'_0, F')$ zu einem DFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ sind wie folgt definiert:

- $Q' = \{[q] \mid q \in Q\}$: Die Zustände sind genau die Äquivalenzklassen der Relation \equiv .
- $\Sigma' = \Sigma$: Da der Äquivalenzklassenautomat die gleiche Sprache wie M entscheiden soll, muss er auf dem gleichen Alphabet arbeiten.
- $q'_0 = [q_0]$: Der Startzustand ist die Äquivalenzklasse des Startzustands.
- $F' = \{[q] \mid q \in F\}$: Die akzeptierenden Zustände sind die Äquivalenzklassen der akzeptierenden Zustände von M .
- $\delta' : Q' \times \Sigma \rightarrow Q'$ mit $\delta'([q], a) = [\delta(q, a)]$ für alle $q \in Q$ und $a \in \Sigma$.

Die Definition von δ' ist insofern heikel, als dass nicht klar ist, dass sie wohldefiniert ist. Für zwei Zustände $p, q \in Q$ mit $[p] = [q]$ und ein $a \in \Sigma$ könnte beispielsweise $[\delta(p, a)] \neq [\delta(q, a)]$ gelten, in welchem Falle die obige Definition keinen Sinn ergeben würde. Wir zeigen im Folgenden, dass dieser Fall nicht eintreten kann.

Theorem 55 Der Äquivalenzklassenautomat M' ist wohldefiniert und entscheidet die gleiche Sprache wie M .

Beweis. Zunächst zeigen wir, dass δ' wohldefiniert ist. Dazu genügt es zu zeigen, dass für $p, q \in Q$ mit $p \equiv q$ und $a \in \Sigma$ stets $\delta(p, a) \equiv \delta(q, a)$ gilt. Dies folgt aus der Definition von \equiv :

$$\begin{aligned}
 p \equiv q &\Rightarrow \forall w \in \Sigma^* : && [\delta^*(p, w) \in F \iff \delta^*(q, w) \in F] \\
 &\Rightarrow \forall a \in \Sigma : \forall w \in \Sigma^* : && [\delta^*(p, aw) \in F \iff \delta^*(q, aw) \in F] \\
 &\Rightarrow \forall a \in \Sigma : \forall w \in \Sigma^* : && [\delta^*(\delta(p, a), w) \in F \iff \delta^*(\delta(q, a), w) \in F] \\
 &\Rightarrow \forall a \in \Sigma : && \delta(p, a) \equiv \delta(q, a).
 \end{aligned}$$

Es bleibt noch zu zeigen, dass M' die gleiche Sprache wie M akzeptiert. Als erstes beobachten wir, dass auch die Menge F' in folgendem Sinne wohldefiniert ist: Gilt $p \equiv q$ für zwei Zustände $p, q \in Q$, so sind entweder p und q akzeptierende Zustände oder p und q sind beide keine akzeptierenden Zustände. Dies folgt direkt aus der Definition von \equiv , denn $p \equiv q$ impliziert,

dass für alle $w \in \Sigma^*$ die Äquivalenz $\delta^*(p, w) \in F \iff \delta^*(q, w) \in F$ gilt. Wir können insbesondere $w = \epsilon$ einsetzen und erhalten

$$p = \delta^*(p, \epsilon) \in F \iff q = \delta^*(q, \epsilon) \in F.$$

Sei nun $w \in \Sigma^*$ und sei q_0, q_1, \dots, q_n die Zustandsfolge, die der DFA M beim Lesen von w durchläuft. Gemäß der Definition des Äquivalenzklassenautomaten durchläuft M' die Zustandsfolge $[q_0], [q_1], \dots, [q_n]$. Der DFA M akzeptiert w genau dann, wenn $q_n \in F$ gilt. Der DFA M' akzeptiert w genau dann, wenn $[q_n] \in F'$ gilt. Nach Definition von F' ist aber $[q_n] \in F'$ genau dann, wenn $q_n \in F$. Somit akzeptieren entweder M und M' das Wort w oder beide DFA verwerfen w . \square

Der entscheidende Schritt bei der Konstruktion des Äquivalenzklassenautomaten M' ist die Berechnung der Äquivalenzklassen der Relation \equiv . Wir werden nun einen Algorithmus angeben, der für einen Automaten M diese Äquivalenzklassen berechnet. Sind zwei Zustände p und q nicht äquivalent, so gibt es ein Wort $w \in \Sigma^*$ für das entweder ($\delta^*(p, w) \in F$ und $\delta^*(q, w) \notin F$) oder ($\delta^*(p, w) \notin F$ und $\delta^*(q, w) \in F$) gilt. Ein solches Wort w nennen wir einen *Zeugen* für die Nichtäquivalenz von p und q .

Zunächst ist es nicht ausgeschlossen, dass es nur sehr lange Wörter gibt, die die Nichtäquivalenz zweier Zustände p und q bezeugen. Sei $w \in \Sigma^+$ ein kürzester Zeuge für die Nichtäquivalenz von p und q . Ferner sei $w = aw'$ für $a \in \Sigma$ und $w' \in \Sigma^*$. Dann ist w' ein Zeuge für die Nichtäquivalenz von $\delta(p, a)$ und $\delta(q, a)$. Es muss sich dabei sogar um einen kürzesten solchen Zeugen handeln, denn wäre w'' ein kürzerer Zeuge für die Nichtäquivalenz von $\delta(p, a)$ und $\delta(q, a)$, so wäre aw'' ein kürzerer Zeuge als w für die Nichtäquivalenz von p und q . Diese Beobachtung ist grundlegend für den folgenden Algorithmus und sie impliziert, dass kürzeste Zeugen für die Nichtäquivalenz zweier Zustände nicht zu lang sein können.

Der folgende Algorithmus markiert im Laufe seiner Ausführung Zustandspaare $\{p, q\}$. Wir zeigen unten, dass ein Zustandspaar am Ende des Algorithmus genau dann markiert ist, wenn p und q nicht äquivalent sind. Aus den Markierungen können somit die Äquivalenzklassen der Relation \equiv direkt abgelesen werden. Der Algorithmus wird außerdem für jedes Paar $\{p, q\}$ eine Liste $L(\{p, q\})$ von Zustandsparen verwalten. Dabei werden nur solche Paare $\{p', q'\}$ in die Liste $L(\{p, q\})$ eingetragen, für die gilt: Wenn p und q nicht äquivalent sind, so sind auch p' und q' nicht äquivalent.

Wir interpretieren diese Listen als Adjazenzlisten eines gerichteten Graphen G , dessen Knotenmenge die Menge aller Paare $\{p, q\} \subseteq Q$ mit $p \neq q$ ist. Eine Kante von $\{p, q\}$ zu $\{p', q'\}$ bedeutet dann, dass p' und q' nicht äquivalent sind, wenn p und q es nicht sind. Wenn in diesem Graphen ein Knoten $\{p, q\}$ markiert ist, so können wir gemäß dieser Interpretation auch alle Knoten $\{p', q'\}$ markieren, die von $\{p, q\}$ aus erreichbar sind.


```

ERZEUGE-ÄQUIVALENZKLASSEN-AUTOMAT( $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ )
// Markiere die Paare  $\{p, q\}$ , für die das leere Wort ihre Nichtäquiva-
// lenz bezeugt.
1   $A = \emptyset$ ;
2  for each  $\{p, q\}$  {
3       $L(\{p, q\}) = \emptyset$ ;
4      if  $(p \in F \text{ and } q \notin F) \text{ or } (p \notin F \text{ and } q \in F)$  {
5          Markiere  $\{p, q\}$ ;
6           $A.add(\{p, q\})$ ;
7      }
8  }
// Erzeuge die Adjazenzlistendarstellung des Graphen  $G$ .
9  for each  $\{p, q\}$  {
10     for each  $a \in \Sigma$  {
11         if  $\delta(p, a) \neq \delta(q, a)$  then  $L(\{\delta(p, a), \delta(q, a)\}).add(\{p, q\})$ ;
12     }
13 }
// Erzeuge die restlichen Markierungen.
14 Markiere mittels Tiefensuche jeden Knoten  $\{p, q\}$  in  $G$ , der von einem
    Knoten in  $A$  erreichbar ist.

```

Theorem 56 *Der Algorithmus ERZEUGE-ÄQUIVALENZKLASSEN-AUTOMAT markiert in Zeit $O(|Q|^2 \cdot |\Sigma|)$ alle Zustandspaare $\{p, q\}$ mit $p \neq q$.*

Beweis. Zunächst überzeugen wir uns davon, dass ein Paar $\{p, q\}$ nur dann einer Liste $L(\{p', q'\})$ hinzugefügt wird, wenn die Nichtäquivalenz von p' und q' die von p und q impliziert. Aus Zeile 11 folgt, dass $p' = \delta(p, a)$ und $q' = \delta(q, a)$ für ein $a \in \Sigma$ gelten muss. Ist nun $w \in \Sigma^*$ ein Zeuge für die Nichtäquivalenz von p' und q' , so ist aw ein Zeuge für die Nichtäquivalenz von p und q , da $\delta^*(p', w) = \delta^*(p, aw)$ und $\delta^*(q', w) = \delta^*(q, aw)$ gilt.

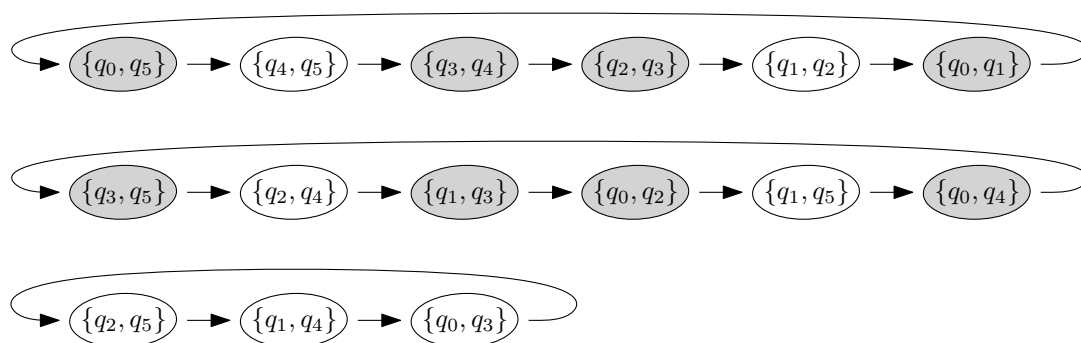
Dies zeigt, dass unsere Interpretation der Kanten im Graphen G korrekt ist. Weiterhin werden in der ersten Phase des Algorithmus in den Zeilen 1 bis 8 nur Zustandspaare markiert, die nicht äquivalent sind; nämlich all jene, für die bereits das leere Wort die Nichtäquivalenz bezeugt. Zusammen bedeutet das, dass der Algorithmus auch in der dritten Phase in Zeile 14 nur Zustandspaare markiert, die nicht äquivalent sind.

Es bleibt zu zeigen, dass alle nicht äquivalenten Zustandspaare markiert werden. Nehmen wir an, es gäbe am Ende des Algorithmus nicht äquivalente Zustandspaare, die nicht markiert sind, und sei $\{p, q\}$ ein solches nicht äquivalentes Zustandspaar, das unter allen nicht markierten nicht äquivalenten Zustandspaaren den kürzesten Zeugen w hat. Wegen der ersten Phase des

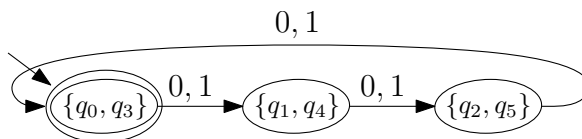
Algorithmus kann w nicht das leere Wort sein und somit können wir w als $w = aw'$ für ein $a \in \Sigma$ und $w' \in \Sigma^*$ schreiben. Das Wort w' ist dann ein Zeuge für die Nichtäquivalenz von $p' = \delta(p, a)$ und $q' = \delta(q, a)$. Da $\{p, q\}$ unter allen nicht markierten nicht äquivalenten Zustandspaaren den kürzesten Zeugen besitzt, muss das Paar $\{p', q'\}$ markiert sein. Außerdem wird $\{p, q\}$ in Zeile 11 in die Liste $L(\{p', q'\})$ eingefügt. Somit ist $\{p, q\}$ von $\{p', q'\}$ aus durch eine direkte Kante erreichbar. Wird also $\{p', q'\}$ markiert, so markiert die Tiefensuche in Zeile 14 auch den Knoten $\{p, q\}$ im Widerspruch zu unserer Annahme. Damit ist gezeigt, dass jedes nicht äquivalente Zustandspaar markiert wird und der Algorithmus korrekt ist.

Betrachten wir nun noch die Laufzeit. Für die ersten beiden Phasen brauchen wir lediglich die Anzahl der Iterationen der **for**-Schleifen zu zählen. Für die erste Phase ergibt sich eine Laufzeit von $\Theta(|Q|^2)$ und für die zweite Phase eine Laufzeit $\Theta(|Q|^2 \cdot |\Sigma|)$. Die Laufzeit einer Tiefensuche ist linear in der Größe des Graphen. Der betrachtete Graph hat $\binom{|Q|}{2} = \Theta(|Q|^2)$ Knoten und $O(|Q|^2 \cdot |\Sigma|)$ Kanten. Somit folgt die behauptete Laufzeit. \square

Wir wenden den Algorithmus auf den DFA in Abbildung 8.1 an. Nach den ersten beiden Phasen hat der Algorithmus den folgenden Graph konstruiert, in dem die grauen Knoten markiert sind.



In der letzten Phase werden dann alle Knoten markiert, die von den grauen Knoten aus erreichbar sind. Als einzige Knoten bleiben $\{q_2, q_5\}$, $\{q_1, q_4\}$ und $\{q_0, q_3\}$ unmarkiert. Das bedeutet, der Algorithmus hat drei Paare von äquivalenten Zuständen identifiziert. Es ergibt sich der folgende Äquivalenzklassenautomat.



Wir haben nun einen effizienten Algorithmus kennengelernt, der den Äquivalenzklassenautomat M' zu einem gegebenen Automaten M berechnet. Es

ist aber nicht klar, dass der Äquivalenzklassenautomat wirklich der Automat mit den wenigsten Zuständen ist, der die gleiche Sprache wie M akzeptiert. Dass dies tatsächlich der Fall ist, werden wir im Rest dieses Abschnittes beweisen.

Theorem 57 *Der Äquivalenzklassenautomat M' zu einem gegebenen DFA M ohne überflüssige Zustände ist der minimale DFA, der die gleiche Sprache wie M akzeptiert.*

Um dieses Theorem zu beweisen, müssen wir zunächst eine Hilfsaussage beweisen, für die wir den Begriff einer *rechtsinvarianten Äquivalenzrelation* einführen.

Definition 58 *Sei $R \subseteq \Sigma^* \times \Sigma^*$ eine Äquivalenzrelation. Wir nennen R rechtsinvariant, wenn*

$$x R y \Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : xz R yz.$$

Die Anzahl der Äquivalenzklassen von R nennen wir den Index von R und schreiben dafür $\text{index}(R)$.

Wenn wir R_M für einen DFA M so definieren, dass $x \in \Sigma^*$ und $y \in \Sigma^*$ genau dann in Beziehung stehen, wenn sie zum gleichen Zustand führen, also $x R_M y \iff \delta^*(q_0, x) = \delta^*(q_0, y)$, so erhalten wir ein einfaches Beispiel für eine rechtsinvariante Äquivalenzrelation.

Ein weiteres wichtiges Beispiel für eine rechtsinvariante Äquivalenzrelation ist die *Nerode-Relation*.

Definition 59 *Sei $L \subseteq \Sigma^*$ eine Sprache. Zwei Wörter $x, y \in \Sigma^*$ stehen bezüglich der Nerode-Relation R_L genau dann in Beziehung (d. h. $x R_L y$), wenn gilt:*

$$\forall z \in \Sigma^* : xz \in L \iff yz \in L.$$

Dass es sich bei der Nerode-Relation um eine Äquivalenzrelation handelt, kann leicht überprüft werden. Auch ist es nicht schwer einzusehen, dass sie rechtsinvariant ist, denn es gilt:

$$\begin{aligned} x R_L y &\Rightarrow \forall w \in \Sigma^* : && (xw \in L \text{ und } yw \in L) \\ &&& \text{oder } (xw \notin L \text{ und } yw \notin L) \\ &\Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : \forall w \in \Sigma^* : && (xzw \in L \text{ und } yzw \in L) \\ &&& \text{oder } (xzw \notin L \text{ und } yzw \notin L) \\ &\Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : && xz R_L yz. \end{aligned}$$

Nun können wir das wesentliche Lemma für den Beweis von Theorem 57 formulieren.

Lemma 60 Sei $L \subseteq \Sigma^*$ eine Sprache. Die folgenden drei Aussagen sind äquivalent.

- a) Es gibt einen DFA, der L entscheidet.
- b) L ist die Vereinigung einiger Äquivalenzklassen einer rechtsinvarianten Äquivalenzrelation R mit endlichem Index.
- c) Die Nerode-Relation R_L hat einen endlichen Index.

Beweis. Wir beweisen die Äquivalenz der drei Aussagen durch einen Ringschluss.

a) \Rightarrow b) Sei L eine Sprache, die von einem DFA M entschieden wird. Wir betrachten nun die rechtsinvariante Äquivalenzrelation R_M , die wir in dem Beispiel nach Definition 58 angegeben haben. Der Index dieser Äquivalenzrelation ist gleich der Anzahl nicht überflüssiger Zustände von M und somit endlich. Die Sprache L ist die Vereinigung aller Äquivalenzklassen von R_M , die zu akzeptierenden Zuständen gehören.

b) \Rightarrow c) Sei R die rechtsinvariante Äquivalenzrelation mit endlichem Index. Wir zeigen, dass die Nerode-Relation R_L eine Vergrößerung von R ist. Formal bedeutet das, dass für alle $x, y \in \Sigma^*$ mit $x R y$ auch $x R_L y$ gilt. Das bedeutet, dass die Äquivalenzklassen von R_L Vereinigungen von Äquivalenzklassen von R sind. Somit ist der Index von R_L höchstens so groß wie der von R und damit endlich.

Seien nun $x, y \in \Sigma^*$ mit $x R y$ gegeben. Da R rechtsinvariant ist, gilt $xz R yz$ für alle $z \in \Sigma^*$. Da L die Vereinigung von Äquivalenzklassen von R ist, gilt $xz \in L \iff yz \in L$ für alle $z \in \Sigma^*$. Damit folgt gemäß der Definition der Nerode-Relation, dass $x R_L y$ gilt.

c) \Rightarrow a) Wir konstruieren einen DFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$, der L entscheidet, wie folgt:

$$\begin{aligned} Q &= \text{Menge der Äquivalenzklassen von } R_L, \\ \delta([x], a) &= [xa] \text{ für alle } x \in \Sigma^* \text{ und } a \in \Sigma, \\ q_0 &= [\epsilon], \\ F &= \{[x] \mid x \in L\}. \end{aligned}$$

Da R_L rechtsinvariant ist, ist die Übergangsfunktion δ wohldefiniert: Für zwei $x, y \in \Sigma^*$ mit $[x] = [y]$ und $a \in \Sigma$ folgt nämlich aus der Rechtsinvarianz $[xa] = [ya]$. Seien $x, y \in \Sigma^*$ mit $y \in [x]$ und $x \in L$ beliebig. Dann gilt auch $y \in L$, denn $x R_L y$ impliziert insbesondere $x \in L \iff y \in L$. Liest der DFA nun ein Wort $w = w_1 \dots w_n$, so befindet er sich hinterher im Zustand $[w]$, denn

$$\begin{aligned} \delta^*(q_0, w) &= \delta^*([\epsilon], w_1 \dots w_n) \\ &= \delta^*([w_1], w_2 \dots w_n) = \dots = \delta^*([w_1 \dots w_{n-1}], w_n) = [w]. \end{aligned}$$

Er akzeptiert das Wort w also genau dann, wenn $[w] \in F$ gilt. Nach obiger Überlegung ist das genau dann der Fall, wenn $w \in L$ gilt.

□

Wir haben zwei verschiedene Konzepte eingeführt und benutzt: erstens die Äquivalenz von Zuständen eines DFAs und zweitens die Nerode-Relation, die eine Äquivalenzrelation auf der Menge der Wörter aus Σ^* bildet. Aus dem Beweis von Lemma 60 kann man die folgende Beobachtung über den Zusammenhang dieser beiden Konzepte ableiten.

Beobachtung: Sei M der minimale DFA für eine Sprache L . Dann entspricht die Äquivalenzrelation R_M , die wir in dem Beispiel nach Definition 58 angegeben haben, der Nerode-Relation R_L .

Diese Beobachtung kann auch dazu genutzt werden, die Äquivalenzklassen der Nerode-Relation zu bestimmen, wenn man den minimalen DFA für eine Sprache kennt. Aus dem Beweis von Lemma 60 folgt auch Theorem 57.

Beweis.[Beweis von Theorem 57] Der Beweis ist in zwei Schritte gegliedert. Zunächst zeigen wir, dass der Automat, der in dem Beweisschritt von c) nach a) in Lemma 60 konstruiert wird, minimal ist. Dann zeigen wir dass der Äquivalenzklassenautomat genauso viele Zustände enthält, also ebenfalls minimal ist.

Sei M ein beliebiger DFA für eine Sprache L mit Zustandsmenge Q' . Aus dem Beweisschritt von a) nach b) in Lemma 60 folgt, dass L als Vereinigung einiger Äquivalenzklassen einer Äquivalenzrelation R mit Index höchstens $|Q'|$ dargestellt werden kann. Aus dem Beweisschritt von b) nach c) folgt, dass der Index der Nerode-Relation höchstens so groß wie der von R ist. Die Anzahl der Zustände in der Menge Q des Automaten, der im Beweisschritt von c) nach a) konstruiert wird, ist so groß wie der Index von R_L . Zusammen erhalten wir

$$|Q'| \geq \text{index}(R_M) \geq \text{index}(R_L) = |Q|.$$

Damit muss der DFA, der im Beweisschritt von c) nach a) konstruiert wird, minimal sein, da er höchstens so viele Zustände enthält wie jeder beliebige DFA für L . Insbesondere folgt, dass der Index der Nerode-Relation R_L mit der Anzahl Zustände eines minimalen DFA für L übereinstimmt.

Sei M' der Äquivalenzklassenautomat eines Automaten $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ ohne überflüssige Zustände, der die Sprache L entscheidet. Wir argumentieren nun, dass die Anzahl Zustände von M' genau gleich dem Index der Nerode-Relation R_L ist. Da M' ebenfalls keine überflüssigen Zustände enthält, genügt es zu zeigen, dass zwei Wörter $x, y \in \Sigma^*$ mit $x R_L y$ zum gleichen Zustand führen, dass also $\delta^*(q_0, x) \equiv \delta^*(q_0, y)$ gilt. Dies folgt aus den Defi-

inition von R_L und der Relation \equiv :

$$\begin{aligned} x R_L y &\Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : (xz \in L \iff yz \in L) \\ &\Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : (\delta^*(q_0, xz) \in F \iff \delta^*(q_0, yz) \in F) \\ &\Rightarrow \forall z \in \Sigma^* : (\delta^*(\delta^*(q_0, x), z) \in F \iff \delta^*(\delta^*(q_0, y), z) \in F) \\ &\Rightarrow \delta^*(q_0, x) \equiv \delta^*(q_0, y). \end{aligned}$$

Damit ist das Theorem bewiesen. \square

8.2.2 Pumping-Lemma für endliche Automaten

Eine wichtige Frage für ein Rechnermodell ist, wie mächtig es ist, das heißt, welche Sprachen es entscheiden kann. In diesem Abschnitt möchten wir herausfinden, welche Sprachen von DFAs entschieden werden können, und welche zu komplex für DFAs sind. Dazu werden wir das sogenannte *Pumping-Lemma* kennenlernen, mit dessen Hilfe wir zeigen können, dass es für manche Sprachen keinen DFA gibt.

Fangen wir mit der Sprache $L = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ an, die wir bereits am Anfang dieses Kapitels als Beispiel gesehen haben. Der Leser sollte an dieser Stelle selbst versuchen, einen DFA für L zu konstruieren. Er wird dabei auf folgendes Problem stoßen. Solange der DFA Nullen liest, muss er sich die Anzahl der bereits gelesenen Nullen merken, um sie später mit der Anzahl der gelesenen Einsen vergleichen zu können. Ein DFA hat aber per Definition nur eine endliche Zustandsmenge und er kann deshalb die Anzahl Nullen für beliebig lange Wörter nicht korrekt zählen. Bei dieser einfachen Sprache können wir diese Intuition formalisieren und zeigen, dass es keinen DFA gibt, der L entscheidet. Angenommen es gibt einen solchen DFA M mit Zustandsmenge Q . Dann betrachten wir die Menge der Wörter $\{\epsilon, 0, 0^2, \dots, 0^{|Q|}\}$. Da es sich hierbei um mehr Wörter als Zustände handelt, muss es zwei Wörter 0^i und 0^j mit $i \neq j$ aus dieser Menge geben, nach deren Lesen M im gleichen Zustand ist, also $\delta^*(q_0, 0^i) = \delta^*(q_0, 0^j)$. Da M die Sprache L entscheidet muss $\delta^*(q_0, 0^i 1^i) \in F$ gelten. Damit gilt auch

$$\delta^*(q_0, 0^j 1^i) = \delta^*(\delta^*(q_0, 0^j), 1^i) = \delta^*(\delta^*(q_0, 0^i), 1^i) = \delta^*(q_0, 0^i 1^i) \in F.$$

Damit akzeptiert M das Wort $0^j 1^i$ für $j \neq i$ und entscheidet somit nicht die Sprache L .

Im Allgemeinen ist ein solcher direkter Beweis jedoch schwierig. Eine andere Möglichkeit, um zu zeigen, dass eine Sprache L von keinem DFA entschieden wird, ist zu zeigen, dass der Index der Nerode-Relation R_L nicht endlich ist. Dann folgt die gewünschte Aussage aus Lemma 60. Aber auch das zu beweisen ist im Allgemeinen schwierig. Das folgende *Pumping-Lemma* liefert hingegen eine notwendige Bedingung dafür, dass L von einem DFA entschieden werden kann, die für viele Sprachen leicht falsifiziert werden kann. Mit

dem Pumping-Lemma kann man also für viele Sprachen einfach zeigen, dass sie von keinem DFA entschieden werden. Es trägt seinen Namen, da es zeigt, dass man bei jedem Wort $w \in L$, das zu einer Sprache gehört, die von einem DFA entschieden wird, gewisse Teile vervielfältigen kann ohne dabei die Sprache L zu verlassen. Man kann also in gewisser Weise die Wörter in L „aufpumpen“.

Lemma 61 (Pumping-Lemma) *Sei L eine Sprache, die von einem DFA entschieden wird. Dann gibt es eine Konstante n , sodass für alle $z \in L$ mit $|z| \geq n$ gilt: Das Wort z kann in drei Teile $z = uvw$ mit $|uv| \leq n$ und $|v| \geq 1$ zerlegt werden, sodass $uv^i w \in L$ für alle $i \geq 0$ gilt.*

Beweis. Es sei M ein DFA für die Sprache L mit der Zustandsmenge Q und es sei $n = |Q|$ die Anzahl der Zustände von M . Beim Lesen eines Wortes $z \in L$ der Länge mindestens n durchläuft der DFA M eine Folge von mindestens $n+1$ Zuständen. Da der DFA nur n Zustände besitzt, muss mindestens einer von diesen mehrfach in dieser Folge auftreten. Wir bezeichnen mit q einen solchen Zustand und zwar denjenigen, dessen erste Wiederholung von allen mehrfach auftretenden Zuständen als erstes erfolgt.

Außerdem sei u das Präfix von z , nach dessen Lesen M zum ersten Mal in Zustand q ist, und es sei uv das Präfix von z , nach dessen Lesen M zum zweiten Mal in Zustand q ist. Dann gilt gemäß obiger Argumentation $|uv| \leq n$ und $|v| \geq 1$. Das Wort w sei nun einfach so gewählt, dass $z = uvw$ gilt. Die zentrale Eigenschaft dieser Wahl ist, dass M , wenn er im Zustand q startet und das Wort v liest, zum Zustand q zurückkehrt. Aus der Wahl von v folgt nämlich $\delta^*(q, v) = q$. Außerdem gilt $\delta^*(q_0, u) = q$.

Sei $q' = \delta^*(q_0, z) \in F$ der Zustand, den M nach dem Lesen von uvw erreicht. Da M sich nach dem Lesen des Präfix uv in Zustand q befindet, können wir diesen Zustand auch als $q' = \delta^*(q, w)$ schreiben. Für die obige Wahl von u , v und w und für alle $i \geq 0$ gilt $uv^i w \in L$, denn

$$\begin{aligned} \delta^*(q_0, uv^i w) &= \delta^*(\delta^*(q_0, u), v^i w) \\ &= \delta^*(q, v^i w) = \delta^*(\delta^*(q, v), v^{i-1} w) = \delta^*(q, v^{i-1} w) = \dots = \delta^*(q, vw) \\ &= \delta^*(q, w) = q' \in F. \end{aligned}$$

Stellen wir uns den DFA wieder als Graphen vor, so läuft dieser beim Lesen von u zunächst zum Zustand q . Beim Lesen von v läuft er im Kreis wieder zu q zurück. Wie oft dieser Kreis durchlaufen wird, spielt für den DFA keine Rolle, denn anschließend läuft er beim Lesen von w immer zu demselben Zustand $q' \in F$. \square

Wir wenden das Pumping-Lemma auf zwei Beispiele an. Zunächst betrachten wir wieder die Sprache $L = \{0^i 1^i \mid i \in \mathbb{N}\}$. Wie nehmen an, dass es einen

DFA für diese Sprache L gibt. Dann können wir das Pumping-Lemma anwenden. Es sei n die Konstante mit den dort genannten Eigenschaften. Wir betrachten das Wort $z = 0^n 1^n \in L$ der Länge $|z| = 2n \geq n$. Sei $z = uvw$ mit $|uv| \leq n$ und $|v| \geq 1$ eine beliebige Zerlegung dieses Wortes. Wir betrachten nun das Wort uv^2w . Da $|uv| \leq n$ ist und z mit n Nullen beginnt, gilt $v = 0^{|v|}$. Demzufolge gilt $uv^2w = 0^{n+|v|}1^n$. Wegen $|v| \geq 1$ gehört dieses Wort nicht zu L . Dies ist ein Widerspruch zu der Aussage des Pumping-Lemmas. Demzufolge ist die Annahme falsch, dass es einen DFA für L gibt.

Nun betrachten wir noch die Sprache $L = \{w \in \{0,1\}^* \mid w = w^R\}$ aller Palindrome. Angenommen es gibt einen DFA für L . Sei dann n die Konstante aus dem Pumping-Lemma und sei $z := 0^n 10^n \in L$. Sei nun $z = uvw$ mit $|uv| \leq n$ und $|v| \geq 1$ eine beliebige Zerlegung dieses Wortes. Wir betrachten nun das Wort uv^2w . Da $|uv| \leq n$ ist und z mit n Nullen beginnt, gilt $v = 0^{|v|}$. Demzufolge gilt $uv^2w = 0^{n+|v|}10^n$. Wegen $|v| \geq 1$ gehört dieses Wort nicht zu L . Somit ist gezeigt, dass es keinen DFA für L gibt.

8.2.3 Nichtdeterministische endliche Automaten

Ein in der theoretischen Informatik sehr zentraler Begriff ist der des *Nicht-determinismus*. Wir werden diesen Begriff im zweiten Teil der Vorlesung ausführlich behandeln und deshalb ist es gut, sich bereits jetzt bei dem einfachen Modell der endlichen Automaten mit ihm vertraut zu machen.

Definition 62 *Ein nichtdeterministischer endlicher Automat (nondeterministic finite automaton, NFA) M besteht aus fünf Komponenten $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$. Der einzige Unterschied zu einem DFA ist die Zustandsüberföhrungsfunktion, die bei einem NFA eine Zustandsüberföhrungsrelation ist. Es ist also $\delta \subseteq (Q \times \Sigma) \times Q$.*

Wir können δ ebenso als eine Abbildung von $Q \times \Sigma$ in die Potenzmenge von Q auffassen. Dann ist $\delta(q, a)$ die Menge aller Zustände q' , für die $((q, a), q') \in \delta$ gilt. Wenn der Automat im Zustand q das Zeichen a liest, so ist der Nachfolgezustand q' nicht mehr eindeutig, sondern es gibt stattdessen eine Menge von möglichen Nachfolgezuständen, die erreicht werden können. Genau wie bei DFAs erweitern wir diese Abbildung von $Q \times \Sigma$ in die Potenzmenge von Q zu einer Abbildung δ^* von $Q \times \Sigma^*$ in die Potenzmenge von Q . Dabei sei für alle $q \in Q$ und $a \in \Sigma$

$$\delta^*(q, \epsilon) = \{q\} \quad \text{und} \quad \delta^*(q, a) = \delta(q, a).$$

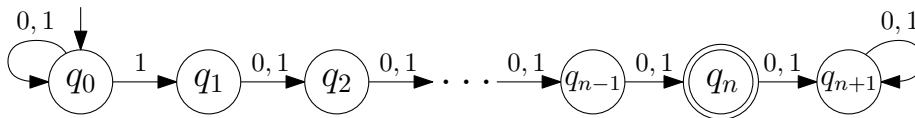
Außerdem definieren wir rekursiv für jedes Wort $w = w_1 \dots w_n \in \Sigma^*$ der Länge $n \geq 2$

$$\delta^*(q, w) = \bigcup_{p \in \delta(q, w_1)} \delta^*(p, w_2 \dots w_n).$$

Erhält der NFA nun ein Wort $w \in \Sigma^*$ als Eingabe, so ist $\delta^*(q_0, w)$ die Menge der Zustände, die er erreichen kann. Falls $\delta^*(q_0, w) \cap F \neq \emptyset$ gilt, falls also die Möglichkeit besteht, dass der NFA nach dem Lesen von w einen akzeptierenden Zustand erreicht, so sagen wir, dass der NFA, das Wort w *akzeptiert*. Ansonsten sagen wir, dass der NFA das Wort w *verwirft*. Mit $L(M) \subseteq \Sigma^*$ bezeichnen wir für einen NFA M die Menge aller Wörter, die M akzeptiert. Wir sagen, dass M die Sprache $L(M)$ *entscheidet* oder *akzeptiert*. Wir sagen auch, dass M ein NFA für die Sprache $L(M)$ ist.

Wir werden gleich sehen, dass es Sprachen gibt, für die der minimale NFA sehr viel weniger Zustände besitzt als der minimale DFA. In diesem Sinne können NFAs benutzt werden, um manche Sprachen kompakter zu beschreiben. Wir werden jedoch auch sehen, dass DFAs und NFAs in dem Sinne gleich mächtig sind, dass es zu jedem NFA einen DFA gibt, der die gleiche Sprache entscheidet (wenn auch mit mehr Zuständen). Wir werden NFAs hauptsächlich als theoretisches Hilfsmittel in einigen der folgenden Überlegungen einsetzen.

Auch NFAs können wir uns wieder als Übergangsgraphen vorstellen. Der einzige Unterschied zu DFAs ist, dass nun ein Knoten mehrere ausgehende Kanten haben kann, die mit demselben Zeichen aus Σ beschriftet sind. Betrachten wir das folgende Beispiel.



In diesem Beispiel ist der Zustand q_0 der einzige Zustand, bei dem vom Nichtdeterminismus Gebrauch gemacht wird. Wird in diesem Zustand eine Eins gelesen, so kann sich der NFA entscheiden, ob er im Zustand q_0 bleibt, oder ob er in den Zustand q_1 wechselt. Alle anderen Zustandsübergänge sind deterministisch. Die Sprache, die dieser NFA entscheidet, ist

$$L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid \text{das } n\text{-letzte Zeichen von } w \text{ ist } 1\}.$$

Um dies zu zeigen, sei zunächst w ein Wort, dessen n -letztes Zeichen 1 ist. Dieses Wort können wir als $w = u1v$ mit $u \in \{0, 1\}^*$ und $v \in \{0, 1\}^{n-1}$ schreiben. Der NFA kann dann beim Lesen von u im Zustand q_0 bleiben und danach beim Lesen der Eins in den Zustand q_1 wechseln. Dann wechselt er anschließend deterministisch beim Lesen von v in den akzeptierenden Zustand q_n . Somit akzeptiert der NFA das Wort w , da er den Zustand q_n erreichen kann. Nun müssen wir noch zeigen, dass er kein Wort $w \in \{0, 1\}^*$ akzeptiert, dessen n -letztes Zeichen eine Null ist. Sei $w = u0v$ mit $u \in \{0, 1\}^*$ und $v \in \{0, 1\}^{n-1}$. Um nach dem Lesen von w im einzigen akzeptierenden Zustand q_n zu sein, muss der NFA genau beim Lesen des n -letzten Zeichens vom Zustand q_0 in den Zustand q_1 wechseln. Wechselt er früher von q_0 nach

q_1 , so erreicht er den Zustand q_{n+1} , wechselt er später oder gar nicht, so erreicht er einen Zustand q_i mit $i < n$. Der Wechsel von q_0 nach q_1 beim Lesen des n -letzten Zeichens ist aber nicht möglich, da dies eine Null ist. Somit gibt es keine Möglichkeit für den NFA nach dem Lesen von w in einem akzeptierenden Zustand zu sein.

Bei der Konstruktion eines DFA für L besteht die Schwierigkeit darin, dass wir beim Lesen eines Zeichens noch nicht wissen, ob es das n -letzte Zeichen ist. Beim NFA konnten wir dieses Problem einfach dadurch umgehen, dass wir dem NFA zwei mögliche Zustandsübergänge gegeben haben, wenn er im Startzustand eine Eins liest. Er hat dann gewissermaßen die Möglichkeit, zu raten, ob es sich bei der gerade gelesenen Eins um das n -letzte Zeichen handelt. Rät er richtig, so erreicht er den akzeptierenden Zustand. Tatsächlich können wir zeigen, dass jeder DFA für die Sprache L deutlich mehr Zustände haben muss.

Theorem 63 *Jeder DFA für die oben definierte Sprache L hat mindestens 2^n Zustände.*

Beweis. Gemäß dem Beweis von Theorem 57 genügt es zu zeigen, dass die Nerode-Relation R_L von L einen Index von mindestens 2^n hat. Dazu genügt es zu zeigen, dass alle Wörter $x \in \{0, 1\}^n$ in unterschiedlichen Äquivalenzklassen der Nerode-Relation liegen. Seien $x, y \in \{0, 1\}^n$ mit $x \neq y$ gegeben. Dann gibt es einen Index $i \in \{1, \dots, n\}$ mit $x_i \neq y_i$. Nehmen wir ohne Beschränkung der Allgemeinheit an, dass $x_i = 0$ und $y_i = 1$ gilt. Es gilt dann $x0^{i-1} \notin L$, weil $x_i = 0$ der n -letzte Buchstabe von $x0^{i-1}$ ist. Andererseits gilt aber aus dem gleichen Grund $y0^{i-1} \in L$. Damit ist gezeigt, dass x und y nicht in Relation bezüglich der Nerode-Relation R_L stehen. \square

Es stellt sich nun sofort die Frage, ob es eine Sprache gibt, die von einem NFA entschieden wird, für die es aber keinen DFA gibt. Das folgende Theorem zeigt, dass dies nicht der Fall ist.

Theorem 64 *Zu jedem NFA mit n Zuständen gibt es einen DFA mit 2^n Zuständen, der dieselbe Sprache entscheidet.*

Beweis. Wir beweisen diesen Satz, indem wir für einen beliebigen NFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit $n = |Q|$ einen DFA $M' = (Q', \Sigma, \delta', q'_0, F')$ mit $L(M) = L(M')$ und $|Q'| = 2^n$ konstruieren. Für diesen DFA gilt:

- Q' ist die Potenzmenge von Q ,
- $q'_0 = \{q_0\}$,
- $F' = \{q \in Q' \mid q \cap F \neq \emptyset\}$,
- $\delta' : Q' \times \Sigma \rightarrow Q'$ ist für $q \in Q'$ und $a \in \Sigma$ definiert als

$$\delta'(q, a) = \bigcup_{p \in q} \delta(p, a).$$

Diese Konstruktion wird auch *Potenzmengenkonstruktion* genannt, und es gilt wie gewünscht $|Q'| = 2^n$. Wir müssen nur noch zeigen, dass M' die gleiche Sprache wie M entscheidet. Dazu genügt es zu zeigen, dass die Menge $(\delta')^*(q_0, w)$ genau diejenigen Zustände enthält, die der Automat M beim Lesen des Eingabewortes w erreichen kann. Dies folgt unmittelbar aus der Definition von δ' . Formal kann es durch eine Induktion über die Länge von w gezeigt werden. \square

Damit haben wir gezeigt, dass jede Sprache, die von einem NFA entschieden werden kann, auch von einem DFA entschieden werden kann. Andersherum sind DFAs nur spezielle NFAs und somit kann auch jede Sprache, die von einem DFA entschieden wird, von einem NFA entschieden werden. Somit sind diese beiden Klassen von Sprachen identisch und DFAs und NFAs sind gleich mächtig.

8.3 Reguläre Sprachen, endliche Automaten und reguläre Ausdrücke

Wir kommen jetzt zum Beginn dieses Kapitels zurück und stellen den Zusammenhang zwischen regulären Sprachen und endlichen Automaten her. Einer der wesentlichen Gründe, warum wir uns mit Automaten beschäftigen haben, ist das folgende Theorem.

Theorem 65 *Die Klasse der Sprachen, die von DFAs entschieden werden können, ist genau die Klasse der regulären Sprachen.*

Beweis. Zuerst zeigen wir, wie man für einen DFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ eine reguläre Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ konstruieren kann, für die $L(G) = L(M)$ gilt. Die Idee besteht darin, mit Hilfe der regulären Grammatik die Berechnung des DFA zu simulieren. Dazu setzen wir $V = Q$ und $S = q_0$. Die Menge P enthält für alle $q, q' \in Q$ und $a \in \Sigma$ mit $\delta(q, a) = q'$ eine Regel $q \rightarrow aq'$. Des Weiteren gibt es in P für alle $q \in F$ die Regel $q \rightarrow \epsilon$.

Sei $w = w_1 \dots w_n \in L(M)$ ein Wort, das der DFA M akzeptiert, und sei q_0, q_1, \dots, q_n die Zustandsfolge, die M beim Lesen von w durchläuft. Dann gilt $\delta(q_{i-1}, w_i) = q_i$ für alle $i \geq 1$ und $q_n \in F$. Demzufolge enthält P die Ableitungsregeln $q_{i-1} \rightarrow w_i q_i$ sowie $q_n \rightarrow \epsilon$ und wir können das Wort w wie folgt ableiten:

$$q_0 \rightarrow w_1 q_1 \rightarrow w_1 w_2 q_2 \rightarrow \dots \rightarrow w_1 \dots w_n q_n \rightarrow w_1 \dots w_n \epsilon = w.$$

Sei umgekehrt $w = w_1 \dots w_n \in L(G)$ ein Wort, das wir mit der Grammatik ableiten können. Wegen der eingeschränkten Regeln der Grammatik muss die Ableitung von w wieder die obige Form für eine Zustandsfolge q_0, \dots, q_n mit

$q_n \in F$ haben. Weiterhin muss für diese Zustandsfolge wegen der Definition von P wieder $q_{i-1} \rightarrow w_i q_i$ für alle $i \geq 1$ gelten. Demzufolge gilt $\delta(q_{i-1}, w_i) = q_i$ für alle $i \geq 1$ und somit akzeptiert auch der DFA M das Wort w . Insgesamt haben wir gezeigt, dass tatsächlich $L(G) = L(M)$ gilt.

Nun zeigen wir, wie man für eine reguläre Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ einen DFA konstruieren kann, der die Sprache $L(G)$ entscheidet. Nach Theorem 64 genügt es, einen NFA $M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ mit $L(M) = L(G)$ zu konstruieren. Wir setzen $Q = V$, $q_0 = S$ und $F = \{A \in V \mid (A \rightarrow \epsilon) \in P\}$. Außerdem sei

$$\delta(A, a) = \{B \in V \mid (A \rightarrow aB) \in P\}.$$

Sei $w = w_1 \dots w_n \in L(G)$. Dann gibt es eine Ableitung

$$S \rightarrow w_1 A_1 \rightarrow w_1 w_2 A_2 \rightarrow \dots \rightarrow w_1 \dots w_n A_n \rightarrow w_1 \dots w_n \epsilon = w.$$

Es gibt also die Regeln $S \rightarrow w_1 A_1$ und $A_{i-1} \rightarrow w_i A_i$ für $i \geq 2$ in P . Des Weiteren gibt es die Regel $A_n \rightarrow \epsilon$ in P . Dementsprechend gilt $A_1 \in \delta(S, w_1)$ und $A_i \in \delta(A_{i-1}, w_i)$ für $i \geq 2$. Erhält der NFA M das Wort w als Eingabe, so kann er also die Zustandsfolge S, A_1, \dots, A_n durchlaufen. Wegen $(A_n \rightarrow \epsilon) \in P$ ist $A_n \in F$. Somit akzeptiert der NFA M das Wort w .

Sei umgekehrt $w = w_1 \dots w_n \in L(M)$ ein Wort, das der NFA M akzeptiert. Dann gibt es eine Folge S, A_1, \dots, A_n von Zuständen mit $A_n \in F$ und mit $A_1 \in \delta(S, w_1)$ und $A_i \in \delta(A_{i-1}, w_i)$ für $i \geq 2$. Dementsprechend muss es in P die Ableitungsregeln $S \rightarrow w_1 A_1$, $A_{i-1} \rightarrow w_i A_i$ für $i \geq 2$ und $A_n \rightarrow \epsilon$ geben. Damit gilt auch $w \in L(G)$:

$$S \rightarrow w_1 A_1 \rightarrow w_1 w_2 A_2 \rightarrow \dots \rightarrow w_1 \dots w_n A_n \rightarrow w_1 \dots w_n \epsilon = w.$$

□

Es gibt noch eine weitere gängige Möglichkeit, die Klasse der regulären Sprachen zu charakterisieren, nämlich über sogenannte *reguläre Ausdrücke*.

Definition 66 Sei Σ ein endliches Alphabet. Die Menge der regulären Ausdrücke über Σ ist genau die Menge der Ausdrücke, die sich aus den folgenden beiden Regeln erzeugen lassen.

- a) Die Ausdrücke \emptyset , ϵ und a für $a \in \Sigma$ sind reguläre Ausdrücke. Dabei ist \emptyset ein regulärer Ausdruck, der die leere Sprache $\emptyset \subseteq \Sigma^*$ beschreibt, ϵ ist ein regulärer Ausdruck, der die Sprache $\{\epsilon\}$ beschreibt, die nur aus dem leeren Wort besteht, und a ist ein regulärer Ausdruck, der die Sprache $\{a\}$ beschreibt, die nur aus dem Wort a besteht.
- b) Sind A_1 und A_2 reguläre Ausdrücke, die die Sprachen L_1 und L_2 beschreiben, dann gilt:

- $(A_1) + (A_2)$ ist ein regulärer Ausdruck für die Sprache $L_1 \cup L_2$.
- $(A_1) \cdot (A_2)$ ist ein regulärer Ausdruck für die Sprache $L_1 \cdot L_2 := \{w_1w_2 \in \Sigma^* \mid w_1 \in L_1, w_2 \in L_2\}$, die sogenannte Konkatenation von L_1 und L_2 .
- $(A_1)^*$ ist ein regulärer Ausdruck für den Kleeneschen Abschluss L_1^* von L_1 . Dabei handelt es sich um die Sprache $L_1^* = \cup_{i \geq 0} L_1^i$ mit $L_1^0 = \{\epsilon\}$ und $L_1^i = L_1 \cdot L_1^{i-1}$ für $i \geq 1$.

Wir sparen Klammern, indem wir die Klammern um die elementaren Ausdrücke \emptyset , ϵ und a weglassen und indem wir definieren, dass $*$ eine höhere Priorität als \cdot hat, was wiederum eine höhere Priorität als $+$ hat. Außerdem lassen wir wie bei der Multiplikation von Zahlen und Variablen oft das Zeichen \cdot weg. Dann ist

$$0(01)^* + (01 + 10)^*$$

zum Beispiel ein regulärer Ausdruck für die Sprache aller Wörter $w \in \{0, 1\}^*$, die entweder mit einer Null beginnen und anschließend beliebig viele Wiederholungen von 01 enthalten oder die aus beliebig vielen Wiederholungen der Blöcke 01 und 10 in einer beliebigen Reihenfolge bestehen.

Leser, die mit dem Unix-Programm `grep` vertraut sind, haben reguläre Ausdrücke bereits gesehen. `grep` kann man als Parameter nämlich einen regulären Ausdruck übergeben und es sucht dann in Dateien nach Wörtern, die zu der Sprache dieses regulären Ausdrucks gehören.

Das folgende Theorem werden wir aus Zeitgründen in der Vorlesung nicht beweisen.

Theorem 67 *Die Klasse der Sprachen, die mit regulären Ausdrücken beschrieben werden können, ist genau die Klasse der regulären Sprachen.*

8.4 Kontextfreie Sprachen

Wir wenden uns nun den kontextfreien Sprachen zu. Diese Sprachen sind besonders deshalb wichtig, weil durch sie alle gängigen Programmiersprachen beschrieben werden können, wenn man von einigen nicht ganz so wichtigen Details absieht. Wir werden uns zunächst mit dem Wortproblem für kontextfreie Sprachen beschäftigen und einen Algorithmus angeben, der für eine gegebene kontextfreie Grammatik G und ein Wort w entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt. Dieser Algorithmus kann also zum Beispiel dazu benutzt werden, um zu entscheiden, ob ein gegebener Quelltext ein syntaktisch korrektes Java-Programm darstellt. Anschließend werden wir untersuchen, wie mächtig kontextfreie Grammatiken sind und welche Sprachen sie nicht beschreiben können. Dazu werden wir eine Variante des Pumping-Lemma für

kontextfreie Sprachen kennenlernen. Zum Schluss werden wir auch für kontextfreie Sprachen ein Automatenmodell einführen, mit dem man genau die kontextfreien Sprachen entscheiden kann. Bei diesem Modell handelt es sich um eine Erweiterung von endlichen Automaten.

Als erste Beobachtung können wir festhalten, dass kontextfreie Grammatiken tatsächlich mächtiger sind als reguläre Grammatiken. Ein einfaches Beispiel dafür ist die Sprache $L = \{0^n 1^n \mid n \in \mathbb{N}\}$, von der wir mit Hilfe des Pumping-Lemmas gezeigt haben, dass sie nicht regulär ist, für die wir aber nach Definition 49 eine kontextfreie Grammatik angegeben haben.

Um die Ableitung von Wörtern einer kontextfreien Sprache zu visualisieren, bietet sich ein *Syntaxbaum* an. An der Wurzel eines solchen Baumes steht das Startsymbol, jeder innere Knoten ist entweder mit einem Zeichen aus Σ oder einer Variablen aus V beschriftet und jedes Blatt ist mit einem Zeichen aus Σ oder mit ϵ beschriftet. Ist ein innerer Knoten mit $A \in V$ beschriftet und sind seine Söhne von links nach rechts mit $\alpha_1, \dots, \alpha_r \in V \cup \Sigma \cup \{\epsilon\}$ beschriftet, so muss $A \rightarrow \alpha_1 \dots \alpha_r$ eine Ableitungsregel der Grammatik sein. Das Zeichen ϵ wird nur bei Regeln vom Typ $A \rightarrow \epsilon$ benutzt. Hier haben wir ausgenutzt, dass bei kontextfreien Grammatiken die linken Seiten der Ableitungsregeln aus genau einem Nichtterminal bestehen. Mit Hilfe eines solchen Syntaxbaumes kann man nun Ableitungen von Wörtern einer kontextfreien Sprache darstellen. Insbesondere ist es für den Bau von Compilern interessant, zu einem gegebenen Wort einen Syntaxbaum zu berechnen.

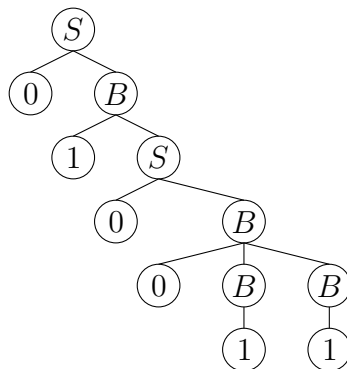
Betrachten wir als Beispiel die kontextfreie Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ mit $\Sigma = \{0, 1\}$, $V = \{S, A, B\}$ und den folgenden Ableitungsregeln:

$$S \rightarrow 0B, 1A \quad A \rightarrow 0, 0S, 1AA \quad B \rightarrow 1, 1S, 0BB.$$

Es ist eine interessante Übungsaufgabe, sich zu überlegen, dass diese Grammatik die Sprache $L = \{w \in \{0, 1\}^* \mid |w|_0 = |w|_1 \geq 1\}$ erzeugt. Wir möchten hier aber nur als Beispiel einen Syntaxbaum für das Wort 010011 angeben, das wie folgt abgeleitet werden kann:

$$S \rightarrow 0B \rightarrow 01S \rightarrow 010B \rightarrow 0100BB \rightarrow 01001B \rightarrow 010011.$$

Der zugehörige Syntaxbaum sieht wie folgt aus:



Zu einer gegebenen Ableitung eines Wortes ist der zugehörige Syntaxbaum eindeutig bestimmt. Andersherum bestimmt der Syntaxbaum aber nicht in welcher Reihenfolge die Variablen abgeleitet werden. Zu einem Syntaxbaum gibt es also unter Umständen mehrere Ableitungen. Es gibt jedoch stets nur eine *Linksableitung*. Das ist eine Ableitung, in der in jedem Schritt die linkeste Variable abgeleitet wird.

8.4.1 Chomsky-Normalform und der Algorithmus von Cocke, Younger und Kasami

Der Algorithmus zur Lösung des Wortproblems für kontextfreie Sprachen, den wir in diesem Abschnitt angeben werden, setzt voraus, dass alle Ableitungsregeln der Grammatik eine bestimmte Form haben.

Definition 68 *Eine kontextfreie Grammatik ist in Chomsky-Normalform, wenn alle Ableitungsregeln die Form $A \rightarrow BC$ oder $A \rightarrow a$ für $A, B, C \in V$ und $a \in \Sigma$ haben.*

Wir werden als erstes zeigen, dass wir jede kontextfreie Grammatik G mit $\epsilon \notin L(G)$ in Chomsky-Normalform bringen können ohne die von ihr beschriebene Sprache zu verändern. Die Tatsache, dass Grammatiken in Chomsky-Normalform das leere Wort nicht erzeugen können, folgt direkt aus den erlaubten Regeln. Dies stellt für praktische Zwecke jedoch keine wirkliche Einschränkung dar, da der Spezialfall des leeren Wortes immer gesondert betrachtet werden kann.

Sei nun also eine kontextfreie Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ mit $\epsilon \notin L(G)$ gegeben. Wir werden diese in mehreren Schritten in eine kontextfreie Grammatik in Chomsky-Normalform umbauen. Dabei werden wir darauf achten, dass wir die Größe der Grammatik nicht zu stark vergrößern. Formal definieren wir die Größe $s(G)$ einer Grammatik G als die Zahl der Variablen und Terminale in allen Regeln.

Der folgende Algorithmus besteht aus vier Schritten. Im ersten Schritt wird die gegebene Grammatik G in eine Grammatik G_1 überführt. Im zweiten Schritt wird G_1 in eine neue Grammatik G_2 überführt und so weiter. Wir werden diese Indizes jedoch oft weglassen, um die Notation zu vereinfachen. Das bedeutet, wenn wir in Schritt i über die Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ sprechen, so bezeichnen wir damit die Grammatik G_{i-1} , die in Schritt $i - 1$ erzeugt wurde. Mit G bezeichnen wir also nicht unbedingt die gegebene Grammatik, sondern die aktuelle Grammatik, die durch die Ausführung der vorherigen Schritte entstanden ist. Außerdem werden wir mit s stets die Größe $s(G)$ der am Anfang gegebenen Grammatik G bezeichnen.

1. Schritt: (Entfernung von Terminalen bei rechten Seiten der Länge mindestens zwei)

Nach dem ersten Schritt soll es nur noch Regeln der Form $A \rightarrow v$ geben, wobei $v \in V^+$ oder $v \in \Sigma$ ist. Das heißt entweder wird A auf genau ein Terminal abgeleitet oder auf eine Folge von Variablen. Dies ist einfach zu erreichen: Für jedes $a \in \Sigma$ führen wir eine neue Variable Y_a ein, deren einzige Ableitungsregel $Y_a \rightarrow a$ ist. Nun ersetzen wir jedes Vorkommen von a in den rechten Seiten der Regeln in P durch Y_a . Dann haben alle Regeln die gewünschte Form und die Sprache, die erzeugt wird, ändert sich nicht.

Wenn wir die Variable Y_a nur für solche $a \in \Sigma$ einführen, für die das Zeichen a in mindestens einer Regel aus P vorkommt, dann vergrößern wir die Grammatik in diesem Schritt um höchstens einen konstanten Faktor. Die Größe der neuen Grammatik G_1 nach dem ersten Schritt ist also $O(s)$.

2. Schritt: (Entfernung zu langer rechter Seiten)

Nach dem ersten Schritt sind die Regeln $Y_a \rightarrow a$ die einzigen Regeln in G , die Terminale erzeugen. Diese Regeln bleiben im Folgenden unverändert und wir betrachten nur noch die anderen Regeln. Diese haben alle die Form $A \rightarrow \epsilon$ oder $A \rightarrow B_1 \dots B_m$ für $A, B_1, \dots, B_m \in V$ und $m \geq 1$. Wir möchten erreichen, dass für jede dieser Regeln $m = 2$ gilt. In diesem zweiten Schritt werden wir nun aber zunächst nur Regeln eliminieren, für die $m \geq 3$ gilt.

Für jede solche Regel mit $m \geq 3$ führen wir $m - 2$ neue Variablen C_1, \dots, C_{m-2} ein und ersetzen die Regel $A \rightarrow B_1 \dots B_m$ durch die Regeln $A \rightarrow B_1 C_1$, $C_i \rightarrow B_{i+1} C_{i+1}$ für $i \in \{1, \dots, m - 3\}$ und $C_{m-2} \rightarrow B_{m-1} B_m$. Dabei ist zu beachten, dass wir für jede zu ersetzende Regel andere Variablen C_i hinzufügen. Da sich aus C_1 nur $B_2 \dots B_m$ ableiten lässt, ändern wir durch diese Ersetzung die Sprache nicht. Da wir eine Regel mit insgesamt $m + 1$ Variablen durch $m - 1$ Regeln mit jeweils drei Variablen ersetzt haben, haben wir die Größe der

Grammatik höchstens verdreifacht. Also gilt auch für die Grammatik G_2 , die wir nach diesem Schritt erhalten, $s(G_2) = O(s(G_1)) = O(s)$.

Haben wir alle Regeln mit $m \geq 3$ auf diese Weise ersetzt, so gibt es insgesamt in der Grammatik G nur noch Regeln der Form $A \rightarrow B_1$, $A \rightarrow B_1B_2$, $A \rightarrow a$ und $A \rightarrow \epsilon$ für $A, B_1, B_2 \in V$ und $a \in \Sigma$.

3. Schritt: (Entfernung von Regeln der Form $A \rightarrow \epsilon$)

In diesem Schritt eliminieren wir Regeln der Form $A \rightarrow \epsilon$. Die erste Etappe dieses Schrittes besteht in der Bestimmung aller Variablen $A \in V$, für die es eine Ableitung $A \rightarrow \dots \rightarrow \epsilon$ gibt. Diese Menge nennen wir $W \subseteq V$, und um sie zu bestimmen, berechnen wir zunächst die Menge $W_1 \subseteq V$ mit

$$W_1 = \{A \in V \mid (A \rightarrow \epsilon) \in P\}.$$

Für $i \geq 2$ berechnen wir

$$W_i = W_{i-1} \cup \{A \in V \mid (A \rightarrow \alpha) \in P \text{ und } \alpha \in W_{i-1}^*\}$$

solange bis das erste Mal $W_{i+1} = W_i$ gilt. Dies muss spätestens für $i = |V|$ der Fall sein, da $W_{|V|} = V$ gilt, wenn W_i in jedem Schritt vorher um mindestens ein Element gewachsen ist. Die Menge W , die wir suchen, ist dann die Menge $W_i = W_{i+1} = W_{i+2} = W_{i+3} = \dots$, bei der wir gestoppt haben. Man kann induktiv beweisen, dass W_i genau diejenigen Variablen enthält, für die es eine Ableitung auf ϵ gibt, deren Syntaxbaum höchstens Tiefe i hat. Diese einfache Übung überlassen wir hier dem Leser.

Nun, da wir die Menge W kennen, führen wir die folgende Transformation durch. Zunächst streichen wir alle Regeln der Form $A \rightarrow \epsilon$. Diese Streichung kann zu einer Veränderung der Sprache führen, was wir durch die Hinzunahme anderer Regeln kompensieren müssen. Für alle Regeln der Form $A \rightarrow BC$ mit $A, B, C \in V$ fügen wir die Regel $A \rightarrow B$ hinzu, falls $C \in W$ gilt, und wir fügen die Regel $A \rightarrow C$ hinzu, falls $B \in W$ gilt.

Mit diesen neuen Regeln können wir keine neuen Wörter erzeugen, denn gilt zum Beispiel $C \in W$, so gibt es in G eine Ableitung $A \rightarrow BC \rightarrow \dots \rightarrow B$, welche wir nun mit den neuen Regeln lediglich direkt in einem Schritt erlauben. Auf der anderen Seite können wir mit den neuen Regeln aber immer noch alle Wörter ableiten, die wir in G ableiten können. Um dies einzusehen, betrachten wir ein beliebiges Wort $w \in L(G)$ und eine Ableitung dieses Wortes in der Grammatik G . Zu dieser Ableitung gehört ein Syntaxbaum, der unter Umständen ϵ -Blätter enthält. Solange dies der Fall ist, wählen wir einen Knoten v im Syntaxbaum mit der folgenden Eigenschaft aus: Alle Blätter im

Teilbaum mit Wurzel v sind ϵ -Blätter, in dem Teilbaum unterhalb des Vaters u von v im Syntaxbaum gibt es jedoch mindestens ein Blatt, das nicht mit ϵ beschriftet ist. Ein solcher Knoten v existiert wegen $w \neq \epsilon$. Ist v zum Beispiel der linke Sohn von u und sind u und v mit $A \in V$ bzw. $B \in V$ beschriftet, so wurde in der Ableitung eine Regel der Form $A \rightarrow BC$ angewendet. Von B gibt es aber eine Ableitung zu ϵ , weshalb $B \in W$ gilt. Wir haben somit die Regel $A \rightarrow C$ eingefügt. Wir können nun in der Ableitung diese neue Regel anwenden, was gleichbedeutend damit ist, den Teilbaum mit Wurzel v komplett zu streichen. Diese Operation führen wir solange durch, bis es keine ϵ -Blätter mehr gibt. Dann haben wir eine Ableitung von w in der neuen Grammatik G_3 gefunden.

Da wir für jede Regel der Form $A \rightarrow BC$ höchstens die Regeln $A \rightarrow B$ und $A \rightarrow C$ hinzugefügt haben, wächst die Grammatik auch in diesem Schritt um höchstens einen konstanten Faktor und es gilt $s(G_3) = O(s(G_2)) = O(s(G_1)) = O(s)$.

4. Schritt: (Entfernung von Kettenregeln der Form $A \rightarrow B$)

Der letzte Schritt des Algorithmus besteht nun darin Kettenregeln der Form $A \rightarrow B$ mit $A, B \in V$ zu entfernen. Dazu betrachten wir den Graphen dessen Knoten den Variablen aus V entsprechen und der eine Kante von $A \in V$ nach $B \in V$ genau dann enthält, wenn die Regel $A \rightarrow B$ in P enthalten ist. Finden wir in diesem Graphen einen Kreis

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_r \rightarrow A_1,$$

so sind die Variablen A_1, \dots, A_r äquivalent und man kann aus jeder von ihnen exakt die gleichen Wörter ableiten. Deshalb können wir alle Variablen A_2, \dots, A_r durch A_1 ersetzen ohne die Sprache zu ändern. Einen solchen Kreis kann man zum Beispiel mit Hilfe einer Tiefensuche finden, falls er existiert. Da mit der Auflösung jedes Kreises mindestens eine Variable wegfällt, erhalten wir nach der Beseitigung von höchstens $|V|$ Kreisen einen kreisfreien Graphen auf den übriggebliebenen Variablen.

Da der Graph nun kreisfrei ist, können wir seine Knoten topologisch sortieren. Das bedeutet, wir können die übrig gebliebenen Variablen so mit A_1, \dots, A_m nummerieren, dass $i < j$ für jede Kante von A_i nach A_j gilt. Nun gehen wir die Variablen in der Reihenfolge $A_{m-1}, A_{m-2}, \dots, A_1$ durch. Wenn wir zu Variable A_k kommen, dann sind alle Regeln der Form $A_\ell \rightarrow \alpha$ mit $\ell > k$ keine Kettenregeln mehr und wir fügen für jedes α , für das es Regeln $A_k \rightarrow A_\ell$ und $A_\ell \rightarrow \alpha$ mit $\ell > k$ gibt, die Regel $A_k \rightarrow \alpha$ zur Grammatik hinzu. Haben wir das für alle α getan, dann löschen wir alle Kettenregeln der Form $A_k \rightarrow A_\ell$. Danach existieren keine Kettenregeln $A_i \rightarrow A_j$ mit $i \geq k$ mehr. Mit den neuen Regeln können wir keine neuen Wörter ableiten, da für die Regel

$A_k \rightarrow \alpha$ auch schon vorher eine Ableitung $A_k \rightarrow A_\ell \rightarrow \alpha$ existierte. Auch können wir alle Wörter noch ableiten, die wir vorher ableiten konnten, denn die Ableitung $A_k \rightarrow A_\ell$ musste ja irgendwann durch ein $A_\ell \rightarrow \alpha$ fortgesetzt werden.

Dieser letzte Schritt kann die Größe der Grammatik deutlich erhöhen, da wir jede Regel $A_k \rightarrow \alpha$ maximal $|V|$ oft kopieren. Damit gilt $s(G_4) = O(|V| \cdot s(G_3)) = O(s(G_3)^2) = O(s^2)$.

Aus den Überlegungen, die wir bei der Beschreibung des Algorithmus angestellt haben, folgt direkt das folgende Ergebnis.

Theorem 69 *Der oben vorgestellte Algorithmus berechnet zu einer beliebigen kontextfreien Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ mit $\epsilon \notin L(G)$ eine Grammatik G' in Chomsky-Normalform mit $L(G) = L(G')$ und $s(G') = O(s(G)^2)$.*

Grammatiken in Chomsky-Normalform haben eine übersichtliche Struktur, die es uns ermöglicht, das Wortproblem effizient zu lösen. Der Algorithmus, den wir vorstellen werden, heißt *Cocke-Younger-Kasami-Algorithmus* oder einfach *CYK-Algorithmus*.

Theorem 70 *Es gibt einen Algorithmus, der in Zeit $O(|P|n^3)$ für eine kontextfreie Grammatik $G = (\Sigma, V, S, P)$ in Chomsky-Normalform und ein Wort $w \in \Sigma^*$ mit $|w| = n$ entscheidet, ob $w \in L(G)$ gilt.*

Beweis. Der CYK-Algorithmus basiert auf der Methode der dynamischen Programmierung, die wir bereits mehrfach in der Vorlesung angewendet haben. Das bedeutet, das Gesamtproblem, zu entscheiden, ob $w \in L(G)$ gilt, wird in kleinere Teilprobleme zerlegt, deren Lösungen zu einer Lösung des Gesamtproblems zusammengesetzt werden. Für jedes Paar von Indizes i und j mit $1 \leq i \leq j \leq n$ bezeichnen wir mit $V_{ij} \subseteq V$ die Menge aller Variablen $A \in V$, für die es eine Ableitung $A \rightarrow \dots \rightarrow w_i \dots w_j$ gibt. Wir möchten entscheiden, ob das Startsymbol zu der Menge V_{1n} gehört, ob es also eine Ableitung $S \rightarrow \dots \rightarrow w_1 \dots w_n = w$ gibt.

Wir berechnen die Mengen V_{ij} nacheinander sortiert nach wachsender Differenz $\ell = j - i$. Das heißt, wir fangen zunächst mit allen Mengen an, für die $\ell = 0$ gilt. Dies sind die Mengen V_{ii} für $i \in \{1, \dots, n\}$. Da G in Chomsky-Normalform ist, besteht die Menge V_{ii} aus genau denjenigen Variablen $A \in V$, für die es die Regel $A \rightarrow w_i$ in P gibt. Somit können wir jedes V_{ii} in Zeit $O(|P|)$ berechnen.

Sei nun $\ell > 0$ und seien alle V_{ij} für $j - i < \ell$ bereits berechnet. Nun betrachten wir nacheinander alle V_{ij} mit $i - j = \ell$. Für $A \in V_{ij}$ gibt es wegen der Chomsky-Normalform und $\ell > 0$ eine Ableitung der Form $A \rightarrow BC \rightarrow \dots \rightarrow w_i \dots w_j$. Das bedeutet auch, es muss einen Index $k \in \{i, \dots, j - 1\}$

und Ableitungen $B \rightarrow \dots \rightarrow w_i \dots w_k$ und $C \rightarrow \dots \rightarrow w_{k+1} \dots w_j$ geben. Dies ist die zentrale Beobachtung, die wir zur Berechnung von V_{ij} benötigen. Es gilt nämlich

$$V_{ij} = \{A \in V \mid \exists k \in \{i, \dots, j-1\} : \exists B, C \in V : \\ (A \rightarrow BC) \in P \text{ und } B \in V_{ik} \text{ und } C \in V_{(k+1)j}\}.$$

Wegen $k - i < \ell$ und $j - (k + 1) < \ell$ sind die Mengen V_{ik} und $V_{(k+1)j}$ bereits bekannt. Wir können V_{ij} also für jedes Paar mit $j - i = \ell$ in Zeit $O(n|P|)$ berechnen, indem wir alle möglichen Stellen $k \in \{i, \dots, j - 1\}$ und alle Regeln $(A \rightarrow BC) \in P$ durchgehen.

Da es $O(n^2)$ viele Paare i und j mit $1 \leq i \leq j \leq n$ gibt und wir jedes V_{ij} in Zeit $O(n|P|)$ berechnen können, ergibt sich insgesamt eine Laufzeit von $O(n^3|P|)$ für die Berechnung von V_{1n} . Es gilt $w \in L(G)$ genau dann, wenn $S \in V_{1n}$. \square

Der CYK-Algorithmus hat für eine feste Menge von Ableitungsregeln eine kubische Laufzeit in der Länge des Wortes. Eine solche Laufzeit ist zwar in der Theorie effizient, sie kann aber bei langen Quelltexten in der Praxis zu Problemen führen. Aus diesem Grunde werden bei dem Entwurf von Programmiersprachen Unterklassen von kontextfreien Grammatiken betrachtet, die noch mächtig genug sind, um gängige Programmiersprachen zu erzeugen, für die das Wortproblem aber in linearer Laufzeit gelöst werden kann. Bei diesen Sprachen handelt es sich um *deterministisch kontextfreie Sprachen*. Was das bedeutet, werden wir im weiteren Verlauf der Vorlesung kurz diskutieren.

8.4.2 Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen

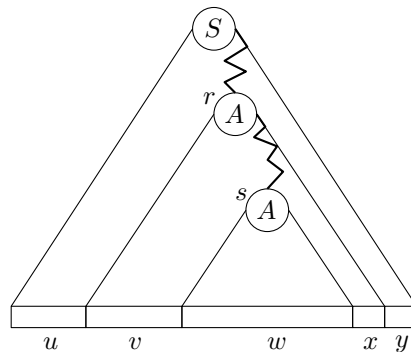
Nun möchten wir uns aber zunächst damit beschäftigen, welche Sprachen überhaupt durch kontextfreie Grammatiken beschrieben werden können. Ähnlich wie bei regulären Sprachen werden wir auch hier eine Variante des Pumping-Lemmas herleiten, mit deren Hilfe man für gewisse Sprachen nachweisen kann, dass sie nicht kontextfrei sind.

Lemma 71 (Pumping-Lemma) *Sei L eine kontextfreie Sprache mit $\epsilon \notin L$. Dann gibt es eine Konstante n , sodass für alle $z \in L$ mit $|z| \geq n$ gilt: Das Wort z kann in fünf Teile $z = uvwxy$ mit $|vx| \geq 1$ und $|vwx| \leq n$ zerlegt werden, sodass $uv^iwx^i y \in L$ für alle $i \geq 0$ gilt.*

Beweis. Bei dem Beweis des Pumping-Lemmas für reguläre Sprachen haben wir ausgenutzt, dass eine Sprache genau dann regulär ist, wenn es einen DFA für sie gibt. Bei kontextfreien Sprachen kennen wir noch keine solche

Charakterisierung über ein Rechnermodell, wir können aber die Chomsky-Normalform ausnutzen. Sei dazu $G = (\Sigma, V, S, P)$ eine kontextfreie Grammatik für die Sprache L . Der zu einer Ableitung gehörige Syntaxbaum ist wegen der Chomsky-Normalform ein Baum, in dem jeder innere Knoten entweder genau zwei Söhne hat, die keine Blätter sind, oder genau einen Sohn, der ein Blatt ist. Hat ein solcher Baum mindestens 2^k Blätter, so muss er Höhe mindestens $k + 1$ haben.

Wir setzen nun $k - 1 = |V|$ und $n = 2^k$. Sei $z \in L$ ein beliebiges Wort mit $|z| \geq n$. Dann muss jeder zu z gehörige Syntaxbaum Höhe mindestens $|V| + 1$ haben. Wir betrachten ein Blatt, das maximale Entfernung zur Wurzel hat, und bezeichnen mit W einen Weg von der Wurzel des Syntaxbaums zu diesem Blatt. Dieser Weg W enthält mindestens $|V| + 1$ Kanten. Entlang dieses Weges gibt es mindestens $|V| + 2$ Knoten, von denen nur der letzte mit einem Terminalzeichen aus Σ beschriftet ist. Die anderen mindestens $|V| + 1$ Knoten sind mit Variablen aus V beschriftet, von denen also mindestens eine doppelt vorkommen muss. Wir betrachten nun die untersten beiden Knoten auf dem Pfad W , die mit der gleichen Variable beschriftet sind. Wir nennen diese Knoten r und s und die Variable $A \in V$, und wir gehen davon aus, dass r der höhere der beiden Knoten ist. Die Anzahl Kanten auf dem Teilpfad von r zum Blatt ist dann gemäß obiger Argumentation höchstens $|V| + 1$. Wir befinden uns dann in der Situation, die in folgender Abbildung dargestellt ist.



In obiger Abbildung haben wir das Wort z bereits in fünf Teile zerlegt: $vw x$ ist der Teil des Wortes z , der unterhalb von Knoten r im Syntaxbaum abgeleitet wird, und w ist der Teil, der unterhalb von s abgeleitet wird. Dadurch ergeben sich auch eindeutig die anderen Teile. Da gemäß der Wahl von W der Teilbaum mit Wurzel r Höhe höchstens $|V| + 1$ hat, gilt $|vw x| \leq 2^{|V|} = n$. Des Weiteren repräsentiert der Knoten r mit seinen beiden Söhnen eine Ableitungsregel der Form $A \rightarrow BC$, wobei entweder B oder C nicht auf dem Weg W liegt. Da keine der Variablen zu ϵ abgeleitet werden kann, impliziert dies sofort, dass $|vx| \geq 1$ gelten muss.

Damit sind die Voraussetzungen an die Zerlegung erfüllt und wir müssen uns

nur noch überlegen, dass für jedes $i \geq 0$ das Wort $uv^iwx^i y$ mit der Grammatik G abgeleitet werden kann. Der Syntaxbaum sagt uns, dass folgende Ableitungen möglich sind:

$$S \rightarrow \dots \rightarrow uAy \quad A \rightarrow \dots \rightarrow vAx \quad A \rightarrow \dots \rightarrow w.$$

Damit erhalten wir sofort für $i = 0$ die Ableitung

$$S \rightarrow \dots \rightarrow uAy \rightarrow \dots \rightarrow uwy = uv^0wx^0y$$

und für $i \geq 1$ die Ableitung

$$S \rightarrow \dots \rightarrow uAy \rightarrow \dots \rightarrow uvAxy \rightarrow \dots \rightarrow uv^2Ax^2y \rightarrow \dots \rightarrow uv^iAx^i y \rightarrow \dots \rightarrow uv^iwx^i y.$$

Damit ist das Pumping-Lemma für kontextfreie Sprachen bewiesen. \square

Genau wie für das Pumping-Lemma für reguläre Sprachen interessiert uns auch hier für die Anwendung die Negation der im Lemma formulierten Aussage:

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N} : \\ \exists z \in L, |z| \geq n : \\ \quad \forall \text{ Zerlegung } z = uvwxy, |vwx| \leq n, |vx| \geq 1 : \\ \quad \quad \exists i \geq 0 : uv^iwx^i y \notin L : \\ \Rightarrow L \text{ ist nicht kontextfrei} \end{aligned}$$

Literaturverzeichnis

- [1] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. Introduction to Algorithms. MIT Press, 3. Auflage, 2009.
- [2] Norbert Blum. Algorithmen und Datenstrukturen: Eine anwendungsorientierte Einführung. Oldenbourg Verlag, 2004.