Kapitel 18 – Algorithmen und Datenstrukturen

Peter Ulbrich

AG Systemsoftware

Veranstaltungswebseite

Einleitung

- In EidP ging es bisher vor allem um: Syntax, Datentypen, Kontrollstrukturen, Funktionen, Zeiger
- Jetzt der nächste Schritt: Vom „Code schreiben“ zum „Problem lösen“
- Dazu brauchen wir zwei Bausteine:
  - Datenstrukturen: *Wie* speichern/organisieren wir Daten?
  - Algorithmen: *Wie* arbeiten wir effizient mit diesen Daten?
- Fokus heute: typische Datenstrukturen **kennenlernen** und **praktisch einsetzen**
  - Nicht „alles selbst implementieren“, sondern: passende Werkzeuge **auswählen** (STL) und **richtig benutzen**
- Merksatz: Anforderungen → passende Operationen → passende Datenstruktur

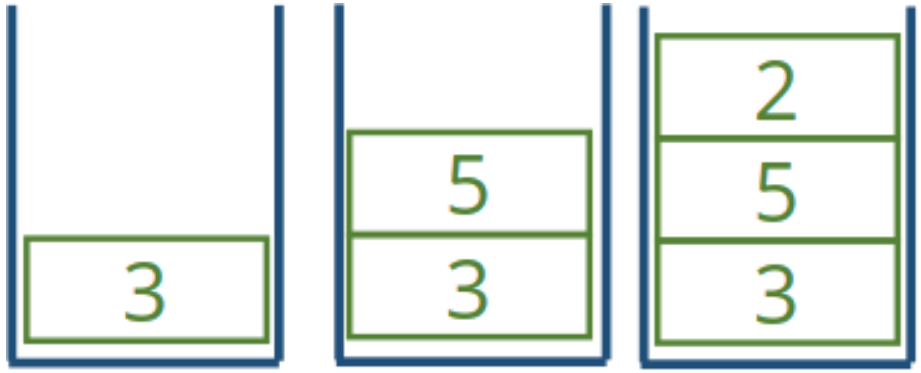
Problem

- Wir bauen (konzeptionell) ein kleines Tool: z.B. digitaler Notizzettel
- Es kommen „Ereignisse“/Aufgaben rein, werden verarbeitet und teilweise rückgängig gemacht
- Anforderungen (Operationen):
  - Neue Aufgaben **in Ankunftsreihenfolge** abarbeiten
  - „Letzte Aktion“ **rückgängig machen** / ggf. wiederherstellen
  - Elemente **vorn/hinten** hinzufügen/entfernen (z.B. Priorisierung)
  - Daten **einfügen/löschen**, während wir gerade „mittendrin“ sind (z.B. Verlauf/Historie)
  - Optional: Werte **schnell finden** (z.B. nach ID/Name)
- Frage, die wir beantworten wollen: Welche Datenstruktur unterstützt *welche* Operationen natürlich und effizient?

Stapel (*Stack*)

- Klassisches Beispiel für **lineare** Datenstruktur: (Keller-)Stapel
- Funktionsweise zur Genüge bekannt (→ Kapitel Zeiger)

  → Hier **nicht** noch mal Thema
- Stattdessen: Typische Operationen der zugrundeliegenden Datenstruktur
  - `push`: legt Element oben auf den Stapel
  - `pop`: entfernt oberstes Element vom Stapel
  - `top`: gibt das oberste Element vom Stapel zurück
  - `empty`: prüft, ob Stapel leer ist
  - `size`: gibt Anzahl der Elemente zurück
- Arbeitsprinzip: *Last In, First Out* (LIFO)



Beispiel - Stapel

- Glücklicherweise müsst **Ihr** den Stack nicht implementieren
- STL bietet bereits eine fertige Lösung: `std::stack`

cpp Run ▶

```cpp
#include <stack>
#include <iostream>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::stack<int> int_stack;
    int_stack.push(42);
    int_stack.push(4711);

    cout << "Top: " << int_stack.top() << endl; // Element wird *nicht* entfernt
    int_stack.pop(); // Wegwerfen. Rückgabe 'void' -> Zugriff nur mit top()
    cout << "New Top: " << int_stack.top() << endl;
}
```

Warteschlange (*Queue*)

- Weitere, verbreitete Datenstruktur: Warteschlange (*Queue*)
- Typische Operationen
  - `enqueue`: fügt Element hinten an
  - `dequeue`: entfernt vorderstes Element
  - `front`: gibt vorderstes Element zurück
  - `back`: gibt letztes Element zurück
  - `empty`: prüft, ob Warteschlange leer ist
  - `size`: gibt Anzahl der Elemente zurück
- Arbeitsprinzip: *First In, First Out* (FIFO)

Beispiel - Warteschlange

- Auch hier gibt es eine STL-Implementierung: `std::queue`

cpp Run ▶

```cpp
#include <queue>
#include <iostream>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::queue<int> int_queue;
    int_queue.push(42);
    int_queue.push(4711);
    int_queue.push(5);
    int_queue.push(3);

    cout << "Front: " << int_queue.front() << endl; // Analog zu Stack: Kein Entfernen
    cout << "Back: " << int_queue.back() << endl; // Analog zu Stack: Kein Entfernen
    int_queue.pop(); // Entfernen ohne Verwenden
    cout << "New Front: " << int_queue.front() << endl;
}
```

Warteschlange (*Queue*)

- Erweiterung der einfachen Warteschlange: *Double-Ended Queue* (*Deque*)
- Im Gegensatz zur einfachen Warteschlange ist hier auch das Hinzufügen am Anfang erlaubt: `push_front`/`push_back` und analog `pop_front`/`pop_back`

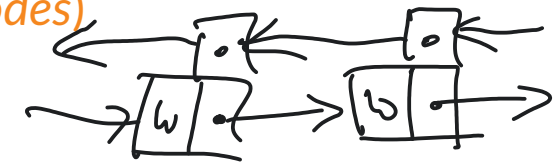
cpp Run ▶

```cpp
#include <deque>
#include <iostream>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::deque<int> int_deque;
    int_deque.push_front(42);
    int_deque.push_back(4711);
    int_deque.push_front(5);
    int_deque.push_back(3);

    cout << "Front: " << int_deque.front() << endl;
```

Verkettete Listen (*Linked Lists*)

- Einfache Grundidee: Aneinanderreihung von Daten
  - Jedes Element kennt Inhalt
  - Jedes Element kennt Nachfolger

    → Kettenglieder bzw. Knoten(*Nodes*)



- Zwei Varianten
  - **Einfach** verkettet: Nur Verweis auf den Nachfolger
  - **Doppelt** verkettet: Verweis auf Nachfolger und Vorgänger
- Einfachste Umsetzung in C++: Mittels Zeigern
  - Erstellen eines Startelements , dann sukzessives Hinzufügen

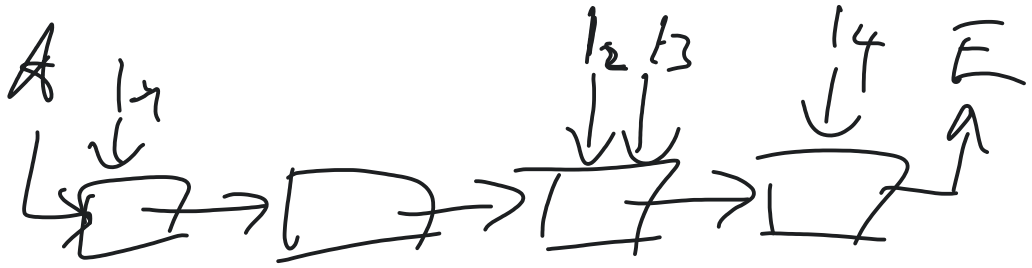
```
1  // Singly Linked
2  template <typename T>
3  struct SNode {
4      SNode * next;
5      T data;
6  };
7
8  // Doubly Linked
9  template <typename T>
10 struct DNode {
11     DNode * next;
12     DNode * previous;
13     T data;
14 };
15
16 // malloc/free
17 // Hantieren mit Zeigern
18 void add_node(Node *) {}
19 void del_node(Node *) {}
```

Verkettete Listen (*Linked Lists*)

- Einfach verkettete Listen sind unkompliziert, aber in der Praxis eher unhandlich
- Falls einmal der Vorgänger benötigt werden sollte, muss im schlechtesten Fall die *gesamte Liste* erneut vom Start aus traversiert werden
- Doppelt verkettete Listen sind hier deutlich handlicher:
  - Bei Bedarf kann einfach ein Element an Ort und Stelle eingefügt werden
- Daraus ergeben sich einige interessante Anwendungsbereiche:
  - Beispiele: Verlaufshistorie im Browser, Textbearbeitung (*Strg-Z*, *Strg-Y*)
  - Bei Änderungen kann einfach ab einem beliebigen Punkt alles Nachfolgende entfernt und neues Element angehängt werden

Beispiel - Verkettete Listen

- C++ bietet bereits doppel-verkettete Liste: `std::list`
- Ähnliche Signatur wie *Deque*
- Wesentlicher Unterschied
  - `insert`: fügt Element an Position *X* ein
  - `erase`: entfernt vorderstes Element



cpp Run ▶

```cpp
#include <list>
#include <iostream>
using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::list<int> l;
    l.push_front(5);
    l.push_front(10);
    l.push_back(20);
    auto pos = l.end();
    l.insert(pos, 42);

    cout << "Back: " << l.back() << endl;
    l.pop_back();
    cout << "Back: " << l.back() << endl;
```

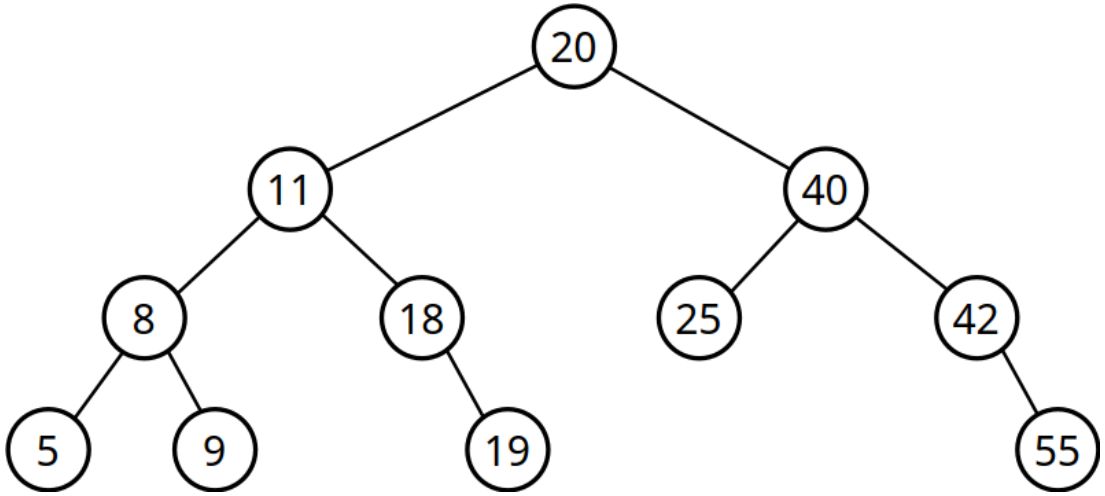
Bäume

- Häufig verwendete Datenstruktur
- Zahlreiche Anwendungen
  - Suchen von Elementen

    → B-Trees (Datenbanken), Rot-Schwarz-Bäume
  - Aufteilen von Raum

    → *Binary Space Partitioning* (z.B. in Videospielen)
  - Min-/Max-Heaps

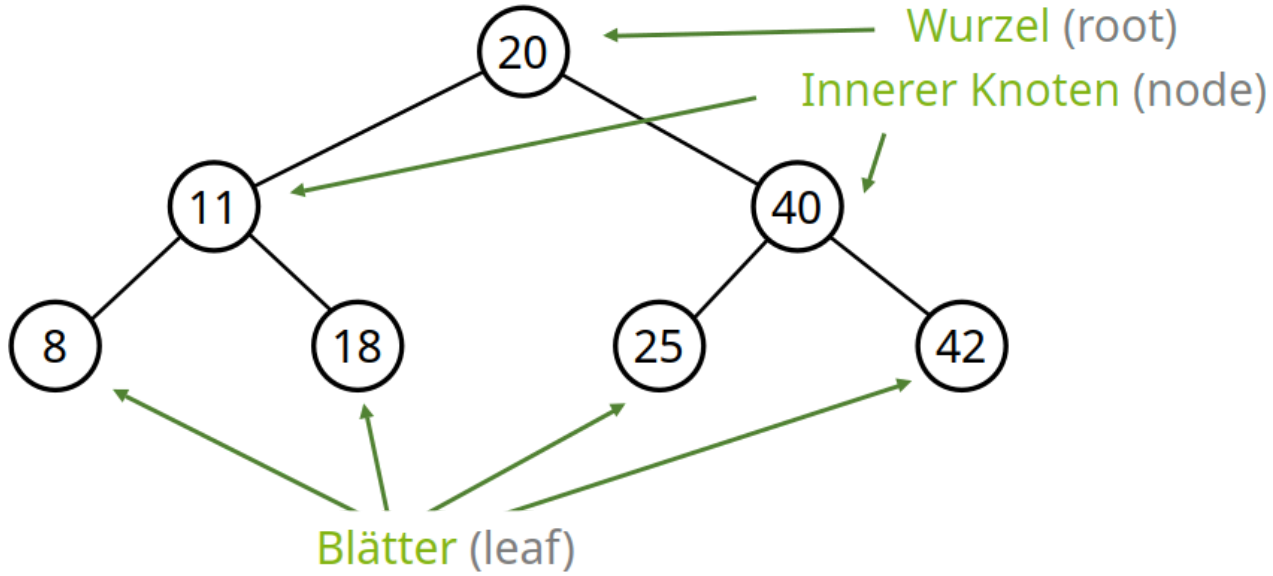
    → Grundlage von Prioritätswarteschlangen



- Hier und heute: Binärbaum - einfachste Form eines Baums

Binärbäume

- Besteht aus Knoten (*Nodes*)
  - Startknoten → Wurzel des Baums (*Root*)
  - Endknoten → Blätter des Baums (*Leafs*)
  - Vorgängerknoten → Elternteil (*Parent*)
  - Nachfolgeknoten → Kind (*Child*)

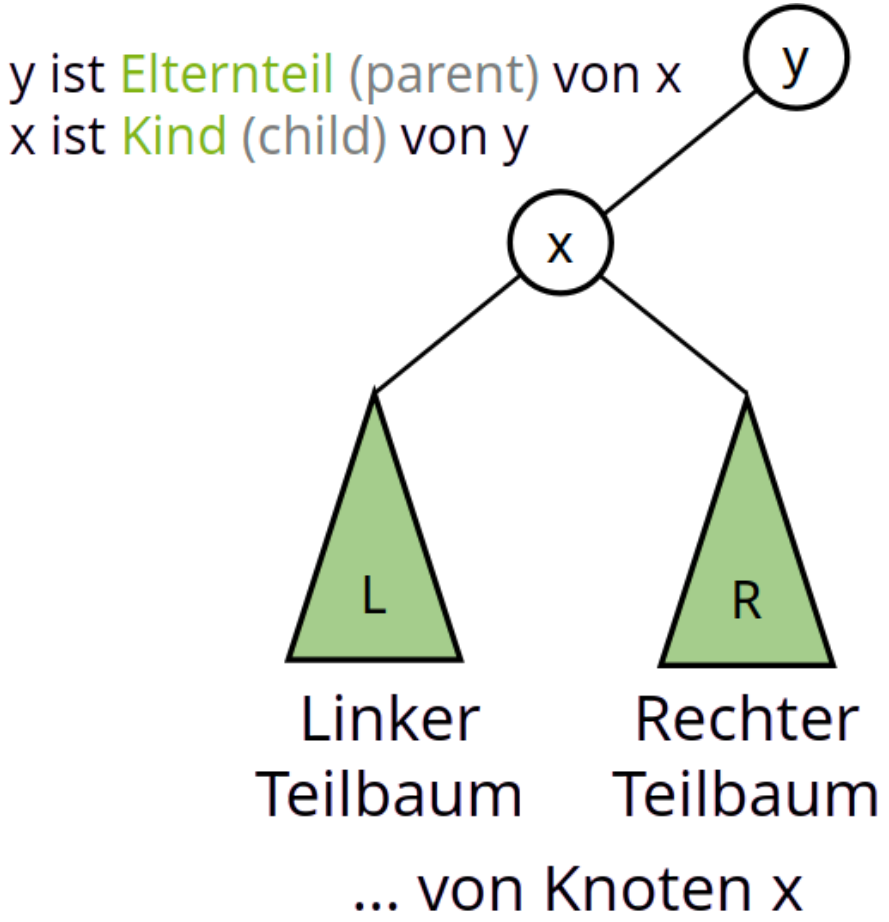


- Jedem Knoten wird ein Wert zugewiesen
- Jeder Knoten hat **höchstens zwei** Kindknoten → binär
- Suchbaumeigenschaft
  - Linkes Kind ist **kleiner**
  - Rechtes Kinds ist **größer**

Eigenschaften von Binärbäumen

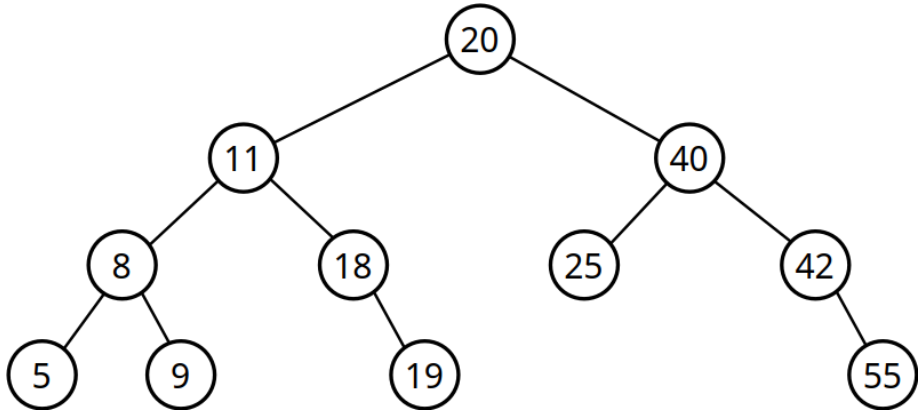
- Wurzel hat **keine** Vorfahren
- Blätter hingegen haben **keine** Kinder

  → *Linkes* und *rechtes* Kind
- Darf aber auch nur einen/keinen Kindknoten besitzen
- Pfad: Folge von zusammenhängenden Eltern-Kind-Knoten
- Definition erfolgt rekursiv



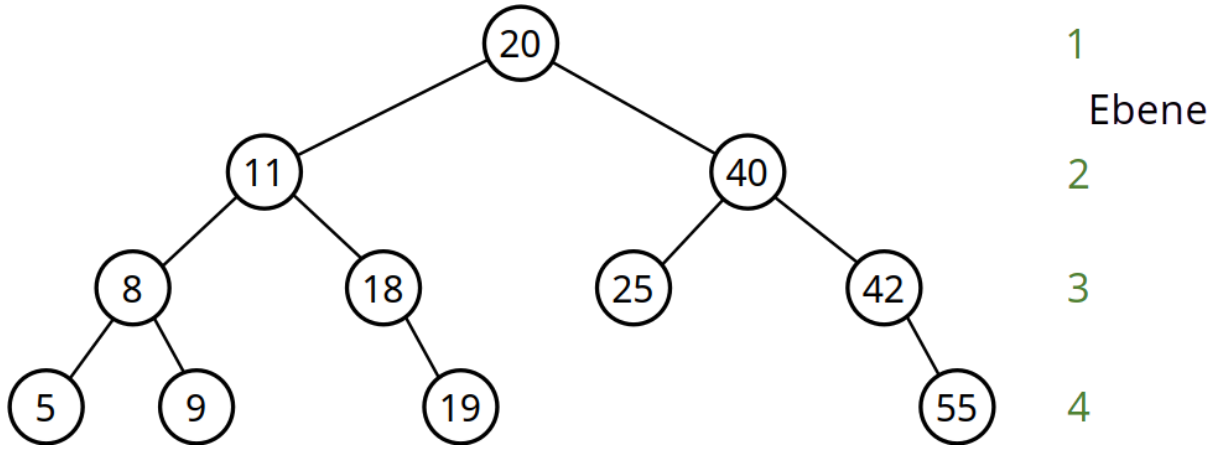
Höhe eines Baumes

- Höhe eines Baums ist die Anzahl der Knoten auf dem **längsten Pfad** im gesamten Baum
- Betrachtung von Wurzel zu Blatt
- Höhe eines leeren Baums: `0`, da keine Knoten vorhanden
- Beispiel: $20, 40, 42, 55$



Größe eines Baumes

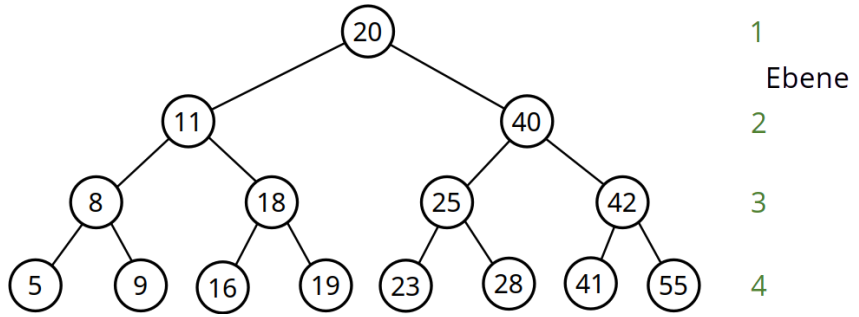
- Ebene k: Knoten mit Abstand $k-1$ zur Wurzel
- Auf Ebene k können jeweils zwischen 1 und 2^{k-1} Elemente liegen



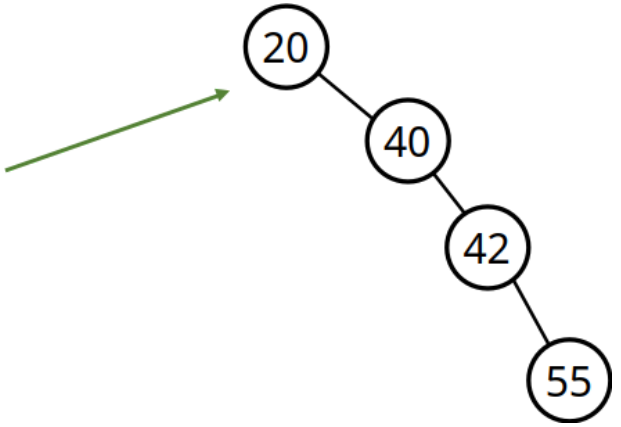
- Max. Anzahl Elemente bei Höhe h: $\sum_{k=1}^{h} 2^{k-1} = 2^h - 1$

Eigenschaften von Binärbäumen

- vollständiger Baum der Höhe h besitzt $2^h - 1$ Knoten
  - Sei $n = 2^h - 1$: Dann braucht man höchstens nur $\lceil log_2(n) \rceil$ Schritte, um ein Element zu suchen!
  - Beispiel: $n = 100 \Rightarrow \lceil log_2(100) \rceil = \lceil 6.64 \rceil = 7$

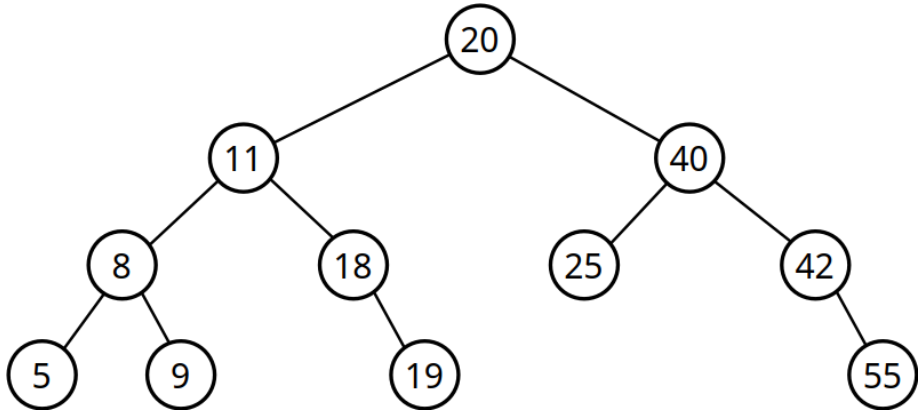


- Degenerierter Baum
  - Aus Baum wird eine Liste
  - Bei n Knoten wären dann wieder n Vergleiche notwendig ($O(n)$ statt $O(log\ n)$)
  - Ein extremes Gegenbeispiel (*Worst Case*) → entspricht Liste



Vorteile von Binärsuchbäumen

- Erlaubt schnelle Suche
- Ablauf
  - Falls gleich → Ende der Suche, alle sind glücklich
  - Ansonsten
    - Gesuchtes Element ist **kleiner** → nach Links
    - Gesuchtes Element ist **größer** → nach rechts



- Großartige Eigenschaft: Bei Auswahl des nächsten Teilbaums fallen alle anderen Teilbäume weg
- Bei (balancierten) Binärbäumen halbiert sich der verbleibende Suchraum im besten Fall automatisch

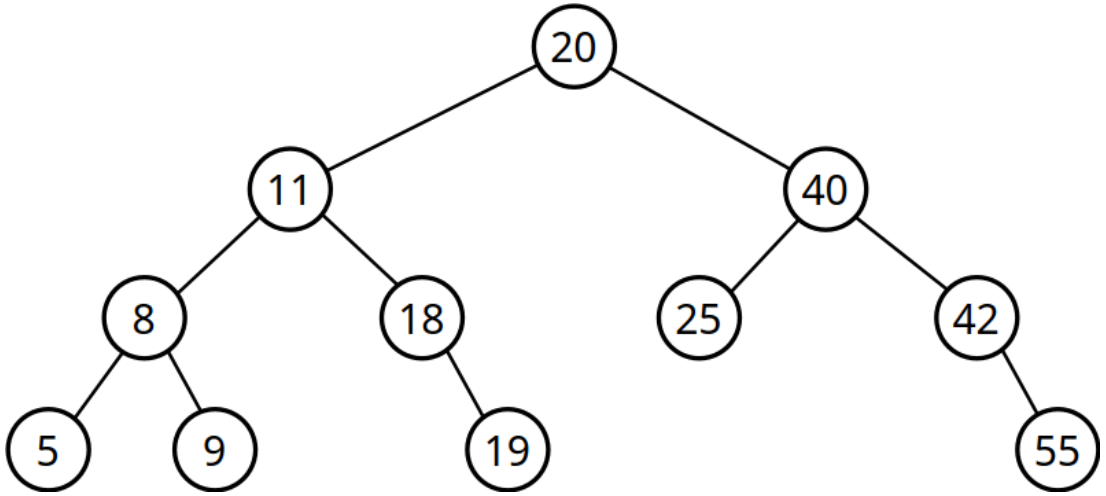
Stolpersteine

- Nur ein Baum mit gefüllten Ebenen benötigt wenig Schritte für die Traversierung
- Ziel: gleichmäßig befüllen **oder** nachträglich balancieren
- Nur bei balancierten Bäumen liegt die Suchzeit bei $O(log\ n)$
- Zur Balancierung gibt es eine Reihe von verschiedenen Algorithmen
- Klassisches Beispiel: *Rot-Schwarz*-Bäume
  - Abwechselnde Einfärbung der Ebenen mit **rot** und **schwarz**
  - Anschließend Balancieren basierend auf der Farbe

Durchlaufstrategien

- Zwei Arten der Traversierung
- Breitensuche (Breadth-First Search)
- Tiefensuche (Depth-First Search)
  - *Preorder*: Zuerst ganz nach links, dann schrittweise nach rechts
  - *Inorder*: Reihenfolge der Knotenwerte (aufsteigend)
  - *Postorder*: Erst alle Kinder, dann den aktuellen Knoten
- Unterschiedliche Suchmuster können bei der Ausgabe/Darstellung des Baums hilfreich sein

Beispiel - Durchlaufstrategien



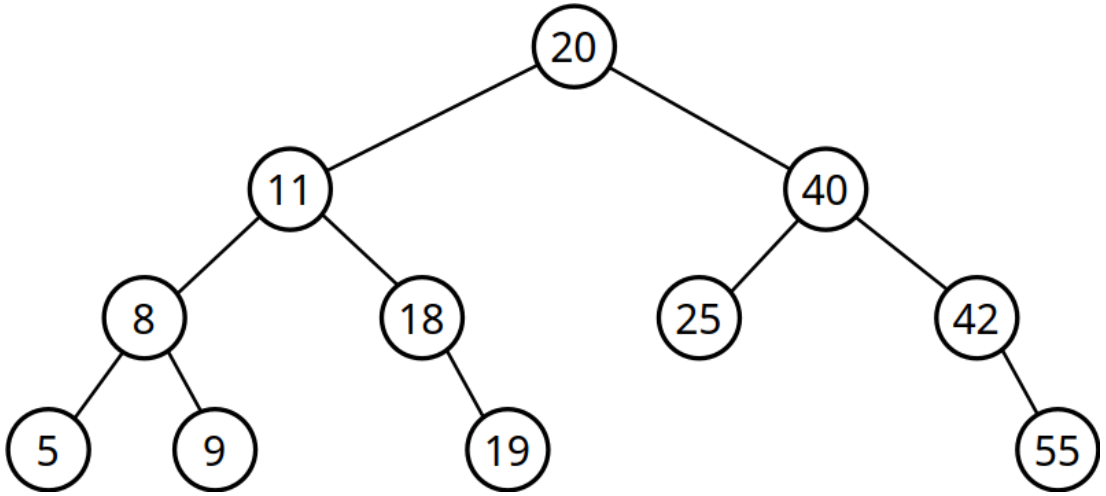
- Für Tiefensuche (DFS): Rekursion verwenden
- Breitensuche (BFS) verwendet hingegen eine Warteschlange (hier nicht dargelegt)

```
1  void preorder(Node * node) {
2      cout << node->value;
3      preorder(node->left);
4      preorder(node->right);
5  }
6  preorder(root); // != NULL
```

```
1  void inorder(Node * node) {
2      inorder(node->left);
3      cout << node->value;
4      inorder(node->right);
5  }
6  inorder(root); // != NULL
```

```
1  void postorder(Node * node) {
2      postorder(node->left);
3      postorder(node->right);
4      cout << node->value;
5  }
6  postorder(root); // != NULL
```

Beispiel - Durchlaufstrategien



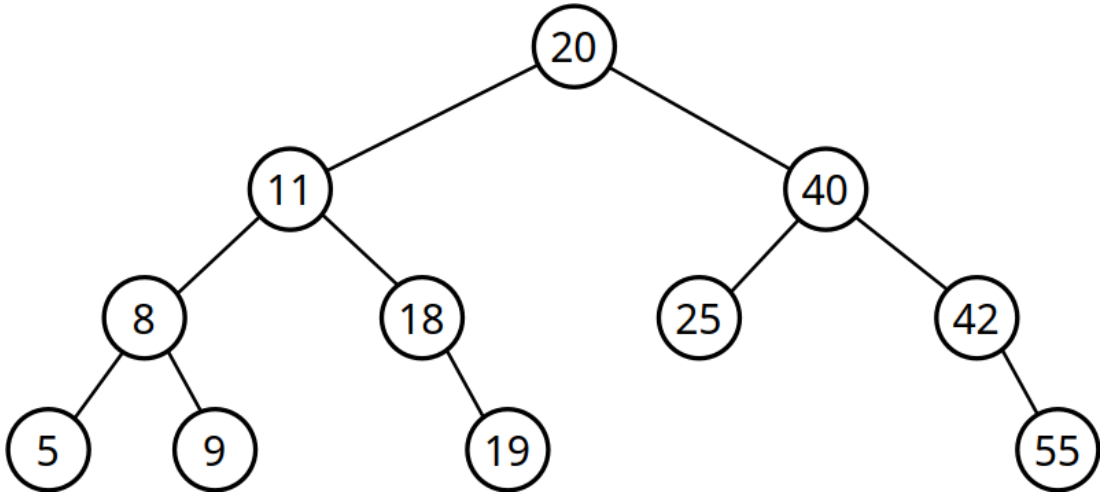
- Je nach Strategie andere Ausgabe:
  - Preorder: $20, 11, 8, 5, 9, 18, 19, 40, 25, 42, 55$
  - Inorder: $5, 8, 9, 11, 18, 19, 20, 25, 40, 42, 55$
  - Postorder: $5, 9, 8, 19, 18, 11, 25, 55, 42, 40, 20$

```
1  void preorder(Node * node) {
2      cout << node->value;
3      preorder(node->left);
4      preorder(node->right);
5  }
6  preorder(root); // != NULL
```

```
1  void inorder(Node * node) {
2      inorder(node->left);
3      cout << node->value;
4      inorder(node->right);
5  }
6  inorder(root); // != NULL
```

```
1  void postorder(Node * node) {
2      postorder(node->left);
3      postorder(node->right);
4      cout << node->value;
5  }
6  postorder(root); // != NULL
```

Beispiel - Durchlaufstrategien



- Praktische Anwendung:
  - Erstellen einer Kopie (*Preorder*)
  - Ausgabe des Baums (*Inorder*)
  - Löschen des Baums (*Postorder*)

```
1  void preorder(Node * node) {
2      cout << node->value;
3      preorder(node->left);
4      preorder(node->right);
5  }
6  preorder(root); // != NULL
```

```
1  void inorder(Node * node) {
2      inorder(node->left);
3      cout << node->value;
4      inorder(node->right);
5  }
6  inorder(root); // != NULL
```

```
1  void postorder(Node * node) {
2      postorder(node->left);
3      postorder(node->right);
4      cout << node->value;
5  }
6  postorder(root); // != NULL
```

Hashing

- Hashing ist ebenso wie Binärbäume weit verbreitet
- Ziel: Erstellen einer **eindeutigen** Kennung, um Daten identifizieren zu können
  - Abstraktes Beispiel: Postleitzahl schränkt Zustellungsort ein
  - 44227 → Dortmund (Eichlinghofen)
- Abbildung von Daten erfolgt mit Hashfunktionen
  - Mathematische Abbildung, erzeugt aus Daten einen sogenannten Hashwert

    → eindeutiger Indentifizierer
- Nützliche Eigenschaften von Hashwerten
  - In der Regel deutlich kleiner als die Daten
  - Rückschluss auf zugrundeliegende Daten im Allgemeinen **nicht** möglich

Hashing

- Großer Zahlenraum der Hashwerte notwendig
  - Erlaubt eindeutige Zuordnung zwischen Hashwert und Daten
  - Ansonsten: Mehrere Daten haben den gleichen Hashwert (→ Hashkollision)
- Beispiel: $h(x) = x \mod 10$ → schlechte Hashfunktion
  - Sehr einfach, aber maximal 10 mögliche Hashwerte (0 - 9) → **viele Kollisionen**
  - Zahlenraum der **möglichen** Werte der Hashfunktion sollte deutlich größer sein als die Zahl der *tatsächlichen* Hashwerte
- Eigenschaften einer guten Hashfunktion
  - Vermeidet Kollisionen oder macht sie zumindest **sehr** unwahrscheinlich
    - Voraussetzung: Möglichst „zufällig“, damit der Hashwert möglichst gleichverteilt im Zahlenraum liegt
  - Einfach zu berechnen!

Hashing

- Es existieren zahlreiche Hashfunktionen mit unterschiedlichen Einsatzgebieten
- Einige Anwendungen
  - Indexierung: unter anderem Datenbanken, Caches, **Dictionaries**
  - Kryptographie: z.B. Hashwert aus Passwort berechnen, Abspeichern des Hashes (`bcrypt`)
  - [Dateivergleich: Prüfen der Integrität von großen Dateien durch separaten Hashwert (`SHA1`, `MD5`)
  - Bloom-Filter: unter anderem Spam-Filter, schnelles Nachschauen von Symbolen

    → Linker des GCC-Compilers bei dynamischen Bibliotheken
  - Blockchain: Bei Bitcoins wird fortwährend `SHA-256` (kryptographische Hashfunktion) berechnet

Dictionary

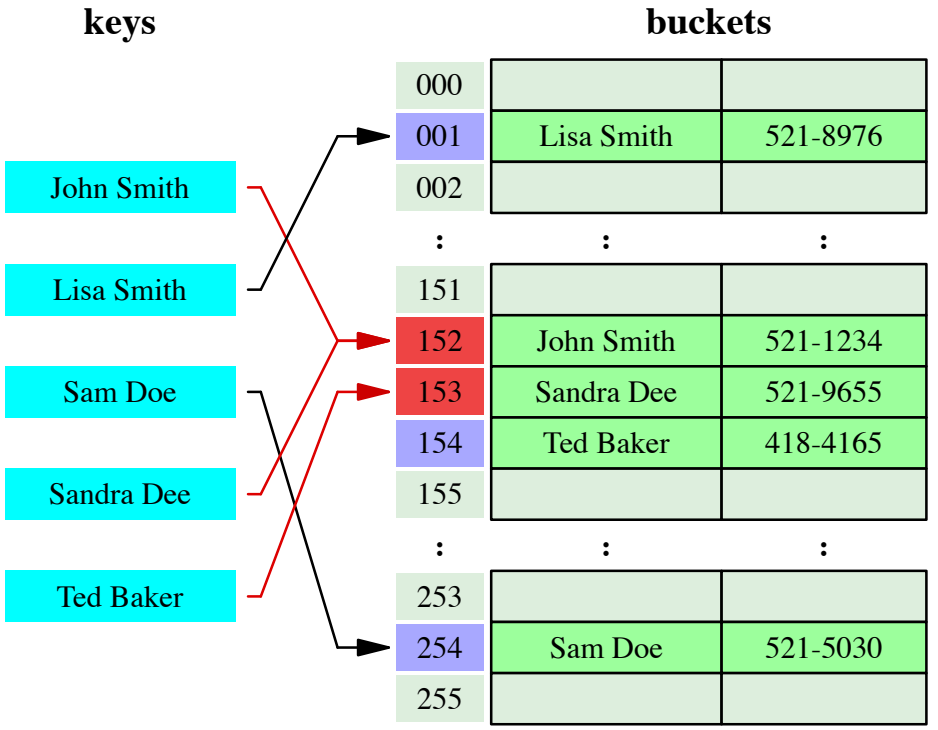
- Dictionary (*Wörterbuch*) ist eine spezielle Datenstruktur
- Speichert Schlüssel zusammen mit Wert (*Key-Value-Pairs*)
- Drei Kernoperationen:
  - *Insert*
  - *Delete*
  - *Search*
- Gute Umsetzung: Mittels Hashtabelle

Dictionary

- Speichern für jeden Hash assoziierte Daten
- Hashkollisionen: Erstellen einer Linked-List für diesen Hashwert
- Gute Hashfunktion → wenig/keine Kollisionen
- Unwahrscheinliche Kollision

  → i.d.R. wenige Schritte für Nachschlagen

  → konstante Zeit
- Dictionaries sind gut für schnelles und zuverlässiges Nachschauen geeignet



Dictionary in Programmiersprachen

- Dictionaries existieren in zahlreichen Programmiersprachen
  - Java: `HashMap<K,V>`
  - C#: `Dictionary<K,V>`
  - Python: `dict()` bzw. `{}` (*sehr starke Verwendung*)
  - … und noch vielen weiteren mehr
- C++: STL-Container namens `std::unordered_map`
- Achtung Verwechslungsgefahr: In C++ gibt es außerdem `std::map`
  - `std::map` ist allerdings mit Red-Black-Bäumen umgesetzt (→ keine Hashtabelle)

Beispiel - `std::unordered_map`

cpp Run ▶

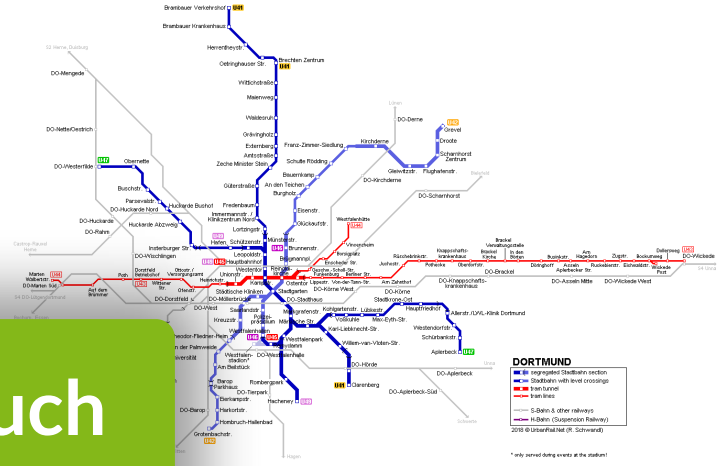
```cpp
#include <iostream>
#include <string>
#include <unordered_map>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::unordered_map<
        {1, "Eins"}, //
        {2, "Zwei"},
    };

    // Insert
    int_str_dict.insert({42, "Zweiundvierzig"});
    int_str_dict.insert({4711, "Siebenvierzigelf"});
```

Dictionaries werden Euch noch oft begegnen. Es lohnt sich, sie zu kennen!

Exkurs: Graphen

- Weiteres großes Gebiet der Mathematik und Informatik: die Graphentheorie
- Ein Graph ist eine abstrakte Struktur, die verschiedene Objekte (**Knoten**) r

Übrigens: Ein Binärbaum ist auch nur ein spezieller Graph 😊

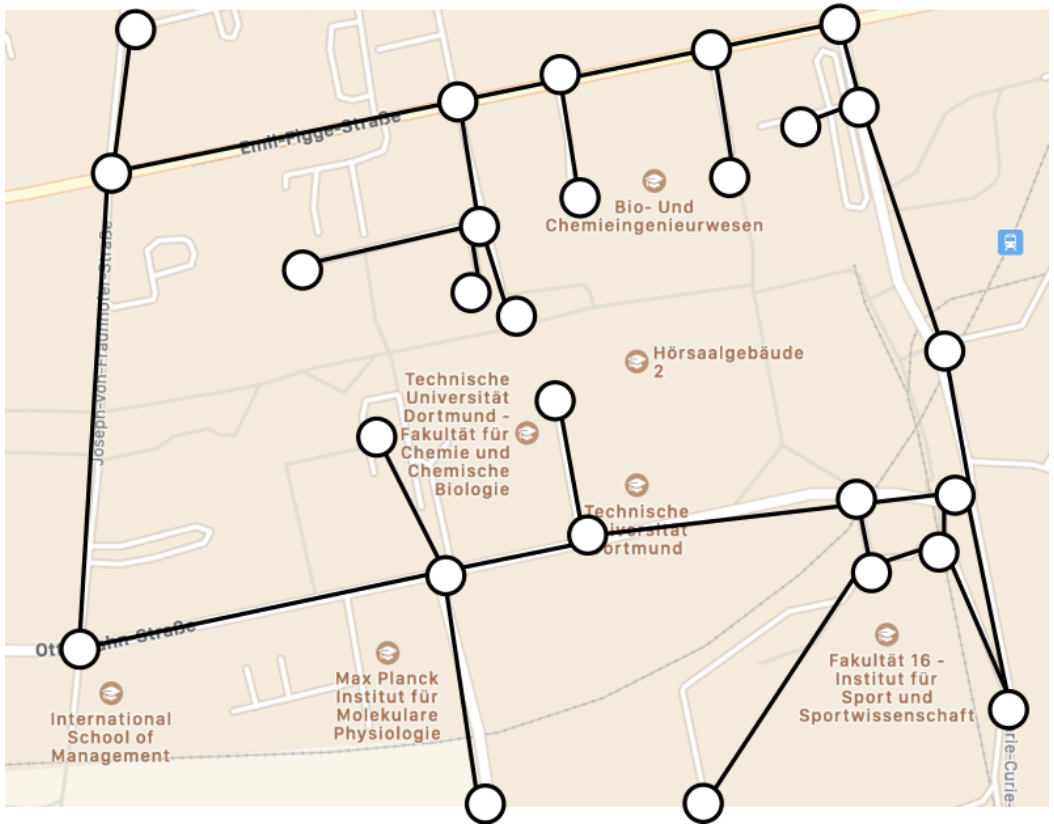


…etz Dortmund (© R. Schwandl – UrbanRail.net)

- Einfache Anwendungsbeispiele
  - Navigation → Straßenbahn und Verkehr
  - Netzwerke → **Computernetzwerke/Internet**, aber auch Funkverbindungen (z.B. überlappendes Mobilfunknetz)
  - *Soziale* Netzwerke → Abbildungen von Interaktionen und Gruppen (*Social Media Bubbles*)
  - Layout-Fragen bei elektronischen Schaltungen

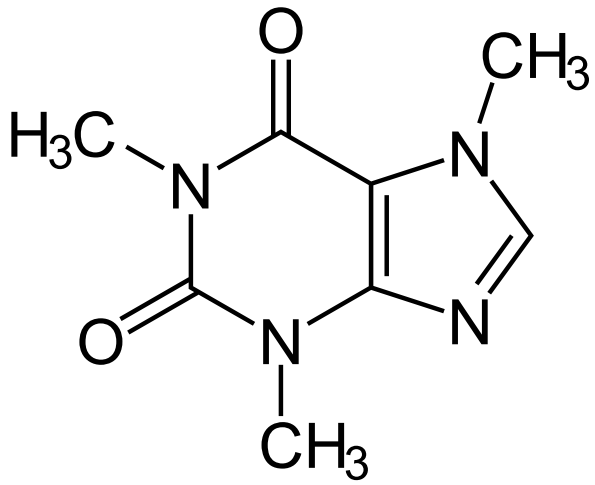
Beispiele für Graphen

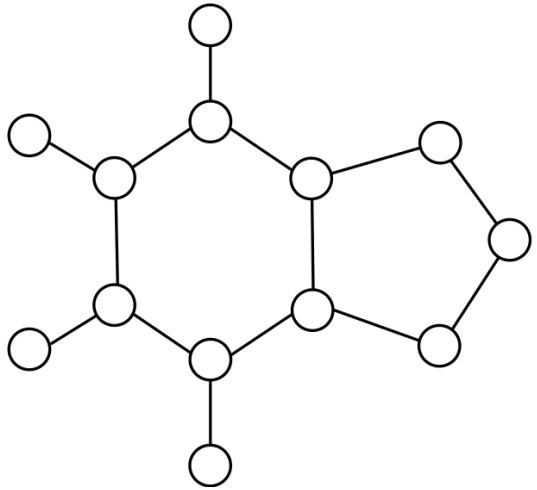
- Einfaches Beispiel: Nord-Campus als Graph
- Kreuzungen sind Knoten, Straßen sind Kanten



Beispiele für Graphen

- Graphen sind sehr vielseitig: Chemische Verbindungen als Graph darstellbar
- Beispiel: Koffein als Graph dargestellt
  - Atome → Knoten, Bindungen → Kanten

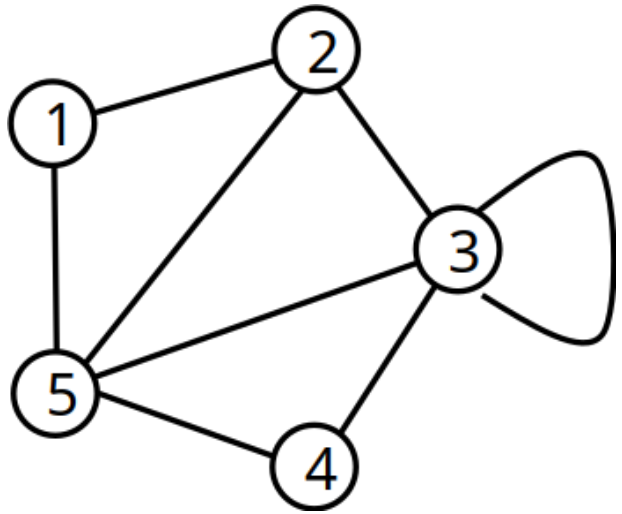




Definition von Graphen

- Graph $G = (V, E)$ besteht aus
  - einer Menge V von Knoten (*Vertex* bzw. Plural *Vertices*) und
  - einer Menge Kanten E (*Edges*) mit $E \subseteq V \times V$ (→ „jedes E wird aus zwei V gebildet")
- $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- E

  $= \{(1, 2), (1, 5), (2, 3), (2, 5), (3, 3), (3, 4), (3, 5), (4, 5)\}$



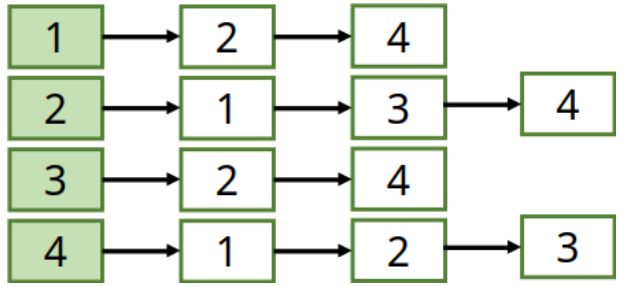
- Grad (*degree*) eines Knotens $v \in V$ ist die Anzahl an adjazenten Knoten
  - Mit anderen Worten: Alle zu v durch eine Kante verbundenen Knoten sind adjazent
  - Beispiel: $deg(5) = 4$ → „5 hat vier Nachbarn"

Speicherung von Graphen

- Abschließend: Exemplarische Speicherung von Graphen
- Zwei Möglichkeiten: Adjazenzliste oder Adjazenzmatrix
  - In der Praxis: Adjazenzliste, weil Matrix $O(n^2)$ Speicher und Zeit braucht
  - Außerdem: Viele Graphen haben Lücken (*sparse*) → viele `0` in Matrix
- Adjazenzmatrix: Setze in 2D-Array bei Kante 1, sonst `0`

	1	2	3	4
1	0	1	0	1
2	1	0	1	1
3	0	1	0	1
4	1	1	1	0

- Adjazenzliste: Erstelle für jeden Knoten Liste mit Nachbarn



Weitere Algorithmen der STL

- STL besteht hauptsächlich aus von Containern, Algorithmen und Iteratoren
  - Container: Die Wichtigsten wurden vorgestellt ✅
  - Iteratoren: Bereits kurz vorgestellt ✅
  - Algorithmen: Implementierung besonders häufig verwendeter Funktionen (noch nicht betrachtet)
- Zum Abschluss noch einige interessante Teile des Algorithmen-Teils
  - Algorithmen arbeiten meist mit Iteratoren (oder wandeln Eingabe automatisch in einen Iterator um)
  - Sind in Headern `<algorithm>`, `numeric` und `memory` zu finden (Link)
    - Unbedingt reinschauen! Sehr viele Funktionen, die einem das Leben erleichtern!

Beispiel - `std::accumulate`

- `std::accumulate` : Addiert die Zahlenwerte in einem STL-Container automatisch

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <numeric>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::vector<int> vec = {1, 3, 5, 10};
    // Parameter 3: 0 ist der Startwert der Summe
    int result = std::accumulate(vec.begin(), vec.end(), 0);
    cout << "Sum of vector: " << result << endl;
}
```

Beispiel - `std::count`

- Zählt die Anzahl der Elemente, die einen vorgegebenen Werten haben

cpp Run ▶

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::vector<int> vec = {1,2,3, 3, 5, 10, 14, 17, 3, 18, 22, 42};
    int count_3 = std::count(vec.begin(), vec.end(), 3);
    cout << "Number of 3: " << count_3 << endl;
}
```

Beispiel - `std::sort`

- Sortiert vorgegebene Elemente in **aufsteigender** Reihenfolge
  - *Absteigende* Reihenfolge: `std::greater()` und ggf. Operator `operator<` implementieren

cpp Run ▶

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

using std::cout, std::endl;

int main() {
    std::vector<int> vec = {5, 2, 1, 10, 4, 42};
    cout << "Original: \t";
    for (const int& i: vec) {
        cout << i << ", ";
    }

    std::sort(vec.begin(), vec.end());
    cout << "\nSorted: \t";
```

Beispiel - `std::transform`

- Wendet eine Operation schrittweise auf jedes Element eines Containers an

cpp Run ▶

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

using std::cout, std::endl;

template <typename T>
T double_val(T value) {
    return value * 2;
}

int main() {
    std::vector<int> vec = {5, 2, 1, 10, 4, 42};
    cout << "Original: \t";
    for (const int& i: vec) {
```

Ausblick

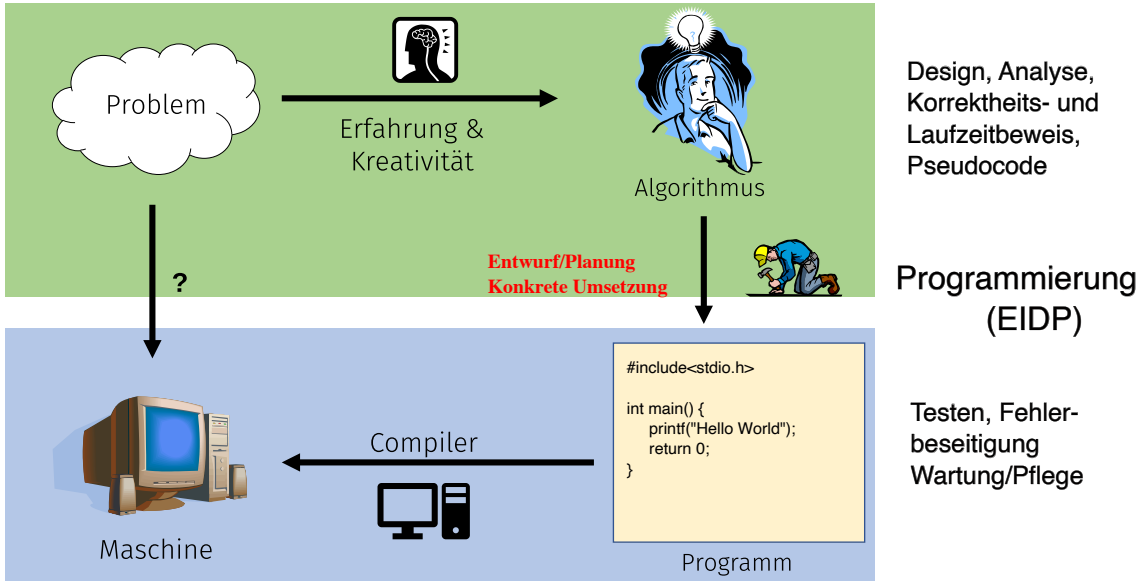
- Ein **sehr** kleiner Einblick in die Welt der Algorithmen und Datenstrukturen
- Für ein gutes Programm ist auch ein Verständnis dieses Bereichs notwendig
- Anders ausgedrückt: Gute Entwickler:innen müssen neben dem Programmieren auch verstehen, **was** entwickelt werden muss und wie dies **effizient** möglich ist

  → Mischung aus gutem Verständnis der Programmiersprache und der Algorithmen

Ausblick

Wir waren hiermit gestartet …

- Programmierung als Bindeglied
  - zur echten Welt und
  - praktische Umsetzung von theoretischen Problemen
- TODO Abschließende weise Worte



Ausblick: Wo geht die Reise weiter?

- Für diejenigen, die nach EidP noch weiter programmieren wollen

1. Modul **Datenstrukturen, Algorithmen und Programmierung 2** (DAP2)
   - Pflichtmodul für Informatiker:innen, im Sommersemester
   - Die Inhalte, die in diesem Kapitel angesprochen wurden, in detaillierter Form und noch einiges mehr!
   - Viele Algorithmen und Datenstrukturen mit praktischer Umsetzung. Macht Spaß 😊
2. Modul **Betriebssysteme** (BS)
   - Pflichtmodul für Informatiker:innen, ebenfalls im Sommersemester
   - Wichtige, weiterführende Konzepte: nebenläufige Programmierung, Speicher/Caches, …
   - **Sehr wichtig** zum Verständnis des Embedded-Bereichs!

Abschlussarbeiten

- Ihr schreibt bestimmt irgendwann einmal eine Abschlussarbeit 😀
- Wenn Euch Hardware-nahe und/oder Betriebssystem-nahe Themen interessieren, denkt gerne an uns! 😀
- Wir interessieren uns auch für Themen aus der E-Technik.
- Meldet Euch dann gerne bei uns: https://sys.cs.tu-dortmund.de/

Tschüss!

🤞 Viel Erfolg 🤞
und vielen Dank für die Aufmerksamkeit! 🙏

Am Donnerstag gibt es eine Fragestunde!

Bitte bereitet Fragen zum Stoff vor.