Team Contest Reference

ChaosKITs
Karlsruhe Institute of Technology

4. Dezember 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Datenstrukturen

1.1 Union-Find

```
// Laufzeit: O(n*alpha(n))
// "height" ist obere Schranke für die Höhe der Bäume. Sobald Pfadkompression
// angewendet wurde, ist die genaue Höhe nicht mehr effizient berechenbar.
vector<int> parent // Initialisiere mit Index im Array.
vector<int> height; // Initialisiere mit 0.

int findSet(int n) { // Pfadkompression
  if (parent[n] != n) parent[n] = findSet(parent[n]);
  return parent[n];
}

void linkSets(int a, int b) { // Union by rank.
  if (height[a] < height[b]) parent[a] = b;
  else if (height[b] < height[a]) parent[b] = a;
  else {
    parent[a] = b;
    height[b]++;
  }
}

void unionSets(int a, int b) { // Diese Funktion aufrufen.
  if (findSet(a) != findSet(b)) linkSets(findSet(a), findSet(b));
}
```

1.2 Segmentbaum

```
// Laufzeit: init: O(n), query: O(log n), update: O(log n)
// Berechnet das Maximum im Array.
int a[MAX_N], m[4 * MAX_N];

int query(int x, int y, int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
  if (x <= X && Y <= y) return m[k];
  if (y < X || Y < x) return -1000000000; // Ein "neutrales" Element.
  int M = (X + Y) / 2;
  return max(query(x, y, 2 * k + 1, X, M), query(x, y, 2 * k + 2, M + 1, Y));
}

void update(int i, int v, int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
  if (i < X || Y < i) return;
  if (X == Y) {
    m[k] = v;
    a[i] = v;
    return;
  }
  int M = (X + Y) / 2;
  update(i, v, 2 * k + 1, X, M);
  update(i, v, 2 * k + 2, M + 1, Y);
  m[k] = max(m[2 * k + 1], m[2 * k + 2]);
}

// Einmal vor allen anderen Operationen aufrufen.
void init(int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
  if (X == Y) {
    m[k] = a[X];
    return;
  }
  int M = (X + Y) / 2;
  init(2 * k + 1, X, M);
  init(2 * k + 2, M + 1, Y);
  m[k] = max(m[2 * k + 1], m[2 * k + 2]);
}
```

`update()` kann so umgeschrieben werden, dass ganze Intervalle geändert werden. Dazu muss ein Offset in den inneren Knoten des Baums gespeichert werden.

1.3 Fenwick Tree

```
vector<int> FT; //Fenwick-Tree

//Build an Fenwick-Tree over an array a. Time Complexity: O(n*log(n))
buildFenwickTree(vector<int>& a) {
  n = a.size();
  FT.assign(n+1,0);
  for(int i = 0; i < n; i++)  updateFT(i,a[i]);
}

//Prefix-Sum of intervall [0..i]. Time Complexity: O(log(n))
int prefix_sum(int i) {
  int sum = 0; i++;
  while(i > 0) { sum += FT[i]; i -= (i & (-i)); }
  return sum;
}

//Adds val to index i. Time Complexity O(log(n))
void updateFT(int i, int val) {
  i++; while(i <= n) { FT[i] += val; i += (i & (-i)); }
}
```

1.4 Range Minimum Query

```
vector<int> data(RMQ_SIZE);
vector<vector<int>> rmq(floor(log2(RMQ_SIZE)) + 1, vector<int>(RMQ_SIZE));

//Runtime: O(n*log(n))
void initRMQ() {
  for(int i = 0, s = 1, ss = 1; s <= RMQ_SIZE; ss=s, s*=2, i++) {
    for(int l = 0; l + s <= RMQ_SIZE; l++) {
      if(i == 0) rmq[0][l] = l;
      else {
        int r = l + ss;
        rmq[i][l] = (data[rmq[i-1][l]] <= data[rmq[i-1][r]] ? rmq[i-1][l] : rmq[i-1][r]);
      }
    }
  }
}
//returns index of minimum! [l, r)
//Runtime: O(1)
int queryRMQ(int l, int r) {
  if(l >= r) return l;
  int s = floor(log2(r-l)); r = r - (1 << s);
  return (data[rmq[s][l]] <= data[rmq[s][r]] ? rmq[s][l] : rmq[s][r]);
}
```

1.5 STL-Tree

```
#include <bits/stdc++.h>
#include <ext/pb_ds/assoc_container.hpp>
#include <ext/pb_ds/tree_policy.hpp>
using namespace std; using namespace __gnu_pbds;
typedef tree<int, null_type, less<int>, rb_tree_tag, tree_order_statistics_node_update> Tree;
int main() {
  Tree X;
  for (int i = 1; i <= 16; i <<= 1) X.insert(i); // {1, 2, 4, 8, 16}
  cout << *X.find_by_order(3) << endl; // => 8
  cout << X.order_of_key(10) << endl; // => 4 = successor of 10 = min i such that X[i] >= 10
  return 0;
}
```

2 Graphen

2.1 Minimale Spannbäume

Benutze Algorithmus von Kruskal oder Algorithmus von Prim.

Schnitteigenschaft Für jeden Schnitt C im Graphen gilt: Gibt es eine Kante e, die echt leichter ist als alle anderen Schnittkanten, so gehört diese zu allen minimalen Spannbäumen. ($\Rightarrow$ Die leichteste Kante in einem Schnitt kann in einem minimalen Spannbaum verwendet werden.)

Kreiseigenschaft Für jeden Kreis K im Graphen gilt: Die schwerste Kante auf dem Kreis ist nicht Teil des minimalen Spannbaums.

2.1.1 Kruskal

```
typedef pair<int,int> ii;
typedef vector<pair<int,ii>> graph;

//Takes a Graph g (EdgeList!!!) with N nodes and computes the MST and Cost of it. Runtime: O(|E|*log(|E|))
//Requires UnionFind-Datastructure!!!
pair<graph,int> buildMST(int N, graph& g) {
  UnionFind uf(N);
  graph mst; int mst_cost = 0; int M = g.size();
  sort(g.begin(),g.end());
  for(int i = 0; i < M; i++) {
    int u = g[i].second.first, v = g[i].second.second;
    if(uf.findSet(u) != uf.findSet(v)) {
      mst.push_back(g[i]); mst_cost += g[i].first;
      uf.unionSets(u,v);
    }
  }
  return make_pair(mst,mst_cost);
}
```

2.2 Kürzeste Wege

2.2.1 Algorithmus von Dijkstra

Kürzeste Pfade in Graphen ohne negative Kanten.

```
// Laufzeit: O((|E|+|V|)*log |V|)
void dijkstra(int start) {
  priority_queue<ii, vector<ii>, greater<ii> > pq;
  vector<int> dist, parent;
  dist.assign(NUM_VERTICES, INF);
  parent.assign(NUM_VERTICES, -1);

  dist[start] = 0;
  pq.push(ii(0, start));

  while (!pq.empty()) {
    ii front = pq.top(); pq.pop();
    int curNode = front.second, curDist = front.first;

    if (curDist > dist[curNode]) continue;

    for (int i = 0; i < (int)adjlist[curNode].size(); i++) {
      int nextNode = adjlist[curNode][i].first, nextDist = curDist + adjlist[curNode][i].second;

      if (nextDist < dist[nextNode]) {
        dist[nextNode] = nextDist; parent[nextNode] = curNode;
        pq.push(ii(nextDist, nextNode));
      }
    }
  }
```

```
}
```

2.2.2 Bellmann-Ford-Algorithmus

Kürzestes Pfade in Graphen mit negativen Kanten. Erkennt negative Zyklen.

```
// Laufzeit: O(|V|*|E|)
struct edge {
  int from; int to; int cost;
  edge () {};
  edge (int from, int to, int cost) : from(from), to(to), cost(cost) {};
};

vector<edge> edges; // Kanten einfügen!
vector<int> dist, parent;

void bellmannFord() {
  dist.assign(NUM_VERTICES, INF); dist[0] = 0;
  parent.assign(NUM_VERTICES, -1);
  for (int i = 0; i < NUM_VERTICES - 1; i++) {
    for (int j = 0; j < (int)edges.size(); j++) {
      if (dist[edges[j].from] + edges[j].cost < dist[edges[j].to]) {
        dist[edges[j].to] = dist[edges[j].from] + edges[j].cost;
        parent[edges[j].to] = edges[j].from;
      }
    }
  }

  // "dist" und "parent" sind korrekte kürzeste Pfade.
  // Folgende Zeilen prüfen nur negative Kreise.
  for (int j = 0; j < (int)edges.size(); j++) {
    if (dist[edges[j].from] + edges[j].cost < dist[edges[j].to]) {
      // Negativer Kreis gefunden.
    }
  }
}
```

2.2.3 Floyd-Warshall-Algorithmus

```
// Laufzeit: O(|V|^3)
// Initialize adjmat: adjmat[i][i] = 0, adjmat[i][j] = INF if no edge is between i and j, length otherwise.
void floydWarshall() {
  for (k = 0; k < NUM_VERTICES; k++) {
    for (i = 0; i < NUM_VERTICES; i++) {
      for (j = 0; j < NUM_VERTICES; j++) {
        if (adjmat[i][k] + adjmat[k][j] < adjmat[i][j]) adjmat[i][j] = adjmat[i][k] + adjmat[k][j];
      }
    }
  }
}
```

- Floyd-Warshall findet auch negative Kreise. Es existiert genau dann ein negativer Kreis, wenn `dist[i][i] < 0` ist.
- **Evtl. überschreibt die Eingabe die Nullen auf der Hauptdiagonalen.** Das ist fast immer ungewollt!

2.3 Strongly Connected Components (Tarjans-Algorithmus)

```
// Laufzeit: O(|V|+|E|)
int counter, sccCounter;
vector<bool> visited, inStack;
vector< vector<int> > adjlist;
vector<int> d, low, sccs;
stack<int> s;

void visit(int v) {
  visited[v] = true;
  d[v] = counter; low[v] = counter; counter++;
```

```
  inStack[v] = true; s.push(v);

  for (int i = 0; i < (int)adjlist[v].size(); i++) {
    int u = adjlist[v][i];
    if (!visited[u]) {
      visit(u);
      low[v] = min(low[v], low[u]);
    } else if (inStack[u]) {
      low[v] = min(low[v], low[u]);
    }
  }

  if (d[v] == low[v]) {
    int u;
    do {
      u = s.top(); s.pop(); inStack[u] = false;
      sccs[u] = sccCounter;
    } while(u != v);
    sccCounter++;
  }
}

void scc() {
  // Initialisiere adjlist!
  visited.clear(); visited.assign(NUM_VERTICES, false);
  d.clear(); d.resize(NUM_VERTICES);
  low.clear(); low.resize(NUM_VERTICES);
  inStack.clear(); inStack.assign(NUM_VERTICES, false);
  sccs.clear(); sccs.resize(NUM_VERTICES);

  counter = 0;
  sccCounter = 0;
  for (i = 0; i < NUM_VERTICES; i++) {
    if (!visited[i]) {
      visit(i);
    }
  }
  // sccCounter ist Anzahl der starkem Zusammenhangskomponenten.
  // sccs enthält den Index der SCC für jeden Knoten.
}
```

2.4 Artikulationspunkte und Brücken

```
vector< vector<int> > adjlist;
vector<int> low;
vector<int> d;
vector<bool> isArtPoint;
vector< vector<int> > bridges; //nur fuer Bruecken
int counter = 0;

void visit(int v, int parent) {
  d[v] = low[v] = ++counter;
  int numVisits = 0, maxlow = 0;

  for (vector<int>::iterator vit = adjlist[v].begin(); vit != adjlist[v].end(); vit++) {
    if (d[*vit] == 0) {
      numVisits++;
      visit(*vit, v);
      if (low[*vit] > maxlow) {
        maxlow = low[*vit];
      }

      if (low[*vit] > d[v]) { //nur fuer Bruecken, evtl. parent betrachten!
        bridges[v].push_back(*vit);
        bridges[*vit].push_back(v);
      }

      low[v] = min(low[v], low[*vit]);
    } else {
```

```
      if (d[*vit] < low[v]) {
        low[v] = d[*vit];
      }
    }
  }

  if (parent == -1) {
    if (numVisits > 1) isArtPoint[v] = true;
  } else {
    if (maxlow >= d[v]) isArtPoint[v] = true;
  }
}

void findArticulationPoints() {
  low.clear(); low.resize(adjlist.size());
  d.clear(); d.assign(adjlist.size(), 0);
  isArtPoint.clear(); isArtPoint.assign(adjlist.size(), false);
  bridges.clear(); isBridge.resize(adjlist.size()); //nur fuer Bruecken
  for (int v = 0; v < (int)adjlist.size(); v++) {
    if (d[v] == 0) visit(v, -1);
  }
}
```

2.5 Eulertouren

- Zyklus existiert, wenn jeder Knoten geraden Grad hat (ungerichtet), bzw. bei jedem Knoten Ein- und Ausgangsgrad übereinstimmen (gerichtet).
- Pfad existiert, wenn alle bis auf (maximal) zwei Knoten geraden Grad haben (ungerichtet), bzw. bei allen Knoten bis auf zwei Ein- und Ausgangsgrad übereinstimmen, wobei einer eine Ausgangskante mehr hat (Startknoten) und einer eine Eingangskante mehr hat (Endknoten).
- **Je nach Aufgabenstellung überprüfen, wie isolierte Punkte interpretiert werden sollen.**
- Der Code unten läuft in Linearzeit. Wenn das nicht notwenidg ist (oder bestimmte Sortierungen verlangt werden), gehts mit einem `set` einfacher.

```
  VISIT(v):
    forall e=(v,w) in E
    delete e from E
    VISIT(w)
    print e
```

Abbildung 1: Idee für Eulerzyklen

```
// Laufzeit: O(|V|+|E|)
vector< vector<int> > adjlist;
vector< vector<int> > otherIdx;
vector<int> cycle;
vector<int> validIdx;

void swapEdges(int n, int a, int b) { // Vertauscht Kanten mit Indizes a und b von Knoten n.
  int neighA = adjlist[n][a];
  int neighB = adjlist[n][b];
  int idxNeighA = otherIdx[n][a];
  int idxNeighB = otherIdx[n][b];
  swap(adjlist[n][a], adjlist[n][b]);
  swap(otherIdx[n][a], otherIdx[n][b]);
  otherIdx[neighA][idxNeighA] = b;
  otherIdx[neighB][idxNeighB] = a;
}

void removeEdge(int n, int i) { // Entfernt Kante i von Knoten n (und die zugehörige Rückwärtskante).
  int other = adjlist[n][i];
  if (other == n) { //Schlingen.
    validIdx[n]++;
    return;
  }
```

```
  int otherIndex = otherIdx[n][i];
  validIdx[n]++;
  if (otherIndex != validIdx[other]) {
    swapEdges(other, otherIndex, validIdx[other]);
  }
  validIdx[other]++;
}

// Findet Eulerzyklus an Knoten n startend.
// Teste vorher, dass Graph zusammenhängend ist! Was ist mit isolierten Knoten?
// Teste vorher, ob Eulerzyklus überhaupt existiert!
void euler(int n) {
  while (validIdx[n] < (int)adjlist[n].size()) {
    int nn = adjlist[n][validIdx[n]];
    removeEdge(n, validIdx[n]);
    euler(nn);
  }
  cycle.push_back(n); // Zyklus am Ende in cycle (umgekehrte Reihenfolge).
}
```

Achtung:

- Die Ausgabe erfolgt in falscher Reihenfolge.
- Algorithmus schlägt nicht fehl, falls kein Eulerzyklus existiert. Die Existenz muss separat geprüft werden.

2.6 Lowest Common Ancestor

```
//RMQ muss hinzugefuegt werden!
vector<int> visited(2*MAX_N), first(MAX_N, 2*MAX_N), depth(2*MAX_N);
vector<vector<int>> graph(MAX_N);

//Runtime: O(n)
void initLCA(int gi, int d, int &c) {
  visited[c] = gi, depth[c] = d, first[gi] = min(c, first[gi]), c++;
  for(int gn : graph[gi]) {
    initLCA(gn, d+1, c);
    visited[c] = gi, depth[c] = d, c++;
  }
}
//[a, b]
//Runtime: O(1)
int getLCA(int a, int b) {
  return visited[queryRMQ(min(first[a], first[b]), max(first[a], first[b]))];
}
//=> int c = 0; initLCA(0,0,c); initRMQ(); done! [rmq on depth]
```

2.7 Max-Flow

2.7.1 Edmonds-Karp-Algorithmus

```
// Laufzeit: O(|V|*|E|^2)
int s, t, f; // Quelle, Senke, single flow
int res[MAX_V][MAX_V];
vector< vector<int> > adjlist;
int p[MAX_V];

void augment(int v, int minEdge) {
  if (v == s) { f = minEdge; return; }
  else if (p[v] != -1) {
    augment(p[v], min(minEdge, res[p[v]][v]));
    res[p[v]][v] -= f; res[v][p[v]] += f;
}}

// Initialisiere res, adjList, s und t.
int maxFlow() {
  int mf = 0;
```

```
  while (true) {
    f = 0;
    bitset<MAX_V> vis; vis[s] = true;
    queue<int> q; q.push(s);
    memset(p, -1, sizeof(p));
    while (!q.empty()) { // BFS
      int u = q.front(); q.pop();
      if (u == t) break;
      for (int j = 0; j < (int)adjlist[u].size(); j++) {
        int v = adjlist[u][j];
        if (res[u][v] > 0 && !vis[v]) {
          vis[v] = true; q.push(v); p[v] = u;
    }}}

    augment(t, INF); // Pfad zu Fluss hinzufügen.
    if (f == 0) break;
    mf += f;
  }
  return mf;
}
```

2.7.2 Capacity Scaling

```
// Ford Fulkerson with capacity scaling.
// Laufzeit: O(|E|^2 * log C)
const int MAXN = 190000, MAXC = 1<<29;
struct edge { int dest, capacity, rev; };
vector<edge> adj[MAXN];
int vis[MAXN], target, iter, cap;

void addedge(int x, int y, int c) {
  adj[x].push_back(edge {y, c, (int)adj[y].size()});
  adj[y].push_back(edge {x, 0, (int)adj[x].size() - 1});
}

bool dfs(int x) {
  if (x == target) return 1;
  if (vis[x] == iter) return 0;
  vis[x] = iter;
  for (edge& e: adj[x])
    if (e.capacity >= cap && dfs(e.dest)) {
      e.capacity -= cap;
      adj[e.dest][e.rev].capacity += cap;
      return 1;
    }
  return 0;
}

int maxflow(int S, int T) {
  cap = MAXC, target = T;
  int flow = 0;
  while(cap) {
    while(++iter, dfs(S))
      flow += cap;
    cap /= 2;
  }
  return flow;
}
```

2.7.3 Maximum Edge Disjoint Paths

Finde die maximale Anzahl Pfade von s nach t, die keine Kante teilen.

1. Setze s als Quelle, t als Senke und die Kapazität jeder Kante auf 1.
2. Der maximale Fluss entspricht der unterschiedlichen Pfade ohne gemeinsame Kanten.

2.7.4 Maximum Independent Paths

Finde die maximale Anzahl Pfade von *s* nach *t*, die keinen Knoten teilen.

1. Setze *s* als Quelle, *t* als Senke und die Kapazität jeder Kante *und jedes Knotens* auf 1.
2. Der maximale Fluss entspricht der unterschiedlichen Pfade ohne gemeinsame Knoten.

2.8 Min-Cost-Max-Flow

```
// Laufzeit: O(|V|^2 * |E|^2)
int s, t, f, c; // Quelle, Senke, single flow, single cost
int res[MAX_V][MAX_V];
vector<edge> edges;
vector<int> p, dist;

void augment(int v, int minEdge) {
  if (v == s) { f = minEdge; c = minEdge * dist[t]; return; } // c = minEdge * dist[t] added
  else if (p[v] != -1) {
    augment(p[v], min(minEdge, res[p[v]][v]));
    res[p[v]][v] -= f; res[v][p[v]] += f;
}}

// Initialisiere res, edges, s und t.
int minCostMaxFlow(int v) { // v = #Knoten
  int mf = 0, mc = 0, i, j;
  while (true) {
    f = 0; c = 0;
    dist.assign(v, INF); dist[s] = 0;
    p.assign(v, -1);
    for (i = 0; i < v - 1; i++) { // Bellmann-Ford.
      for (j = 0; j < (int)edges.size(); j++) {
        if (res[edges[j].from][edges[j].to] > 0 && dist[edges[j].from] + edges[j].cost < dist[edges[j].to]) {
          dist[edges[j].to] = dist[edges[j].from] + edges[j].cost;
          p[edges[j].to] = edges[j].from;
        }
      }
    }

    augment(t, INF); // Gefunden Pfad zum Fluss hinzufügen.
    if (f == 0) break;
    mf += f; mc += c;
  }
  return mf; // mf is der maximale Fluss, mc sind die minimalen Kosten.
}
```

2.9 Maximal Cardinatlity Bipartite Matching

```
// Laufzeit: O(n*(|V|+|E|))
vector< vector<int> > adjlist; // Gerichtete Kanten, von links nach rechts.
vector<int> pairs; // Zu jedem Knoten der gematchte Knoten rechts, oder -1.
vector<bool> visited;

bool dfs(int i) {
  if (visited[i]) return false;
  visited[i] = true;
  for (vector<int>::iterator vit = adjlist[i].begin(); vit != adjlist[i].end(); vit++) {
    if (pairs[*vit] < 0 || dfs(pairs[*vit])) {
      pairs[*vit] = i; pairs[i] = *vit; return true;
    }
  }
  return false;
}

// n = #Knoten links (0..n-1), m = #Knoten rechts
int kuhn(int n, int m) {
  pairs.assign(n + m, -1);
  int ans = 0;
  for (int i = 0; i < n; i++) {
```

```
    visited.assign(n + m, false);
    ans += dfs(i);
  }
  return ans; // Größe des Matchings.
}
```

2.10 TSP

```
// Laufzeit: O(n*2^n)
// nodes[0] ist Start- und Endknoten.
vector<vector<int>> dist;
vector<int> TSP() {
  int n = dist.size(), m = 1 << n;
  vector<vector<ii>> dp(n, vector<ii>(m, ii(MAX_N, -1)));

  for(int c = 0; c < n; c++) dp[c][m-1].first = dist[c][0], dp[c][m-1].second = 0;

  for(int v = m - 2; v >= 0; v--) {
    for(int c = n - 1; c >= 0; c--) {
      for(int g = 0; g < n; g++) {
        if(g != c && (((1 << g) & v) == 0)) {
          if((dp[g][(v | (1 << g))].first + dist[c][g]) < dp[c][v].first) {
            dp[c][v].first = dp[g][(v | (1 << g))].first + dist[c][g];
            dp[c][v].second = g;
          }
        }
      }
    }
  }

  vector<int> res; res.push_back(0); int v = 0;
  while(res.back() != 0 || res.size() == 1) {
    res.push_back(dp[res.back()][(v |= (1 << res.back()))].second);
  }

  return res;
}
```

2.11 Bitonic TSP

```
// Laufzeit: O(|V|^2)
vector< vector<double> > dp; // Initialisiere mit -1
vector< vector<double> > dist; // Initialisiere mit Entfernungen zwischen Punkten.
vector<int> lr, rl; // Links-nach-rechts und rechts-nach-links Pfade.
int n; // #Knoten

// get(0, 0) gibt die Länge der kürzesten bitonischen Route.
double get(int p1, int p2) {
  int v = max(p1, p2) + 1;
  if (v == n - 1) return dist[p1][v] + dist[v][p2];
  if (dp[p1][p2] > -0.5) return dp[p1][p2];
  double tryLR = dist[p1][v] + get(v, p2), tryRl = dist[v][p2] + get(p1, v);
  if (tryLR < tryRL) lr.push_back(v); // Baut die Pfade auf. Fügt v zu rl hinzu, falls beide gleich teuer.
  else rl.push_back(v); // Änder das, falls nötig.
  return min(tryLR, tryRL);
}
```

3 Geometrie

3.1 Closest Pair

```
double squaredDist(point a, point b) {
  return (a.first-b.first) * (a.first-b.first) + (a.second-b.second) * (a.second-b.second);
}

bool compY(point a, point b) {
  if (a.second == b.second) return a.first < b.first;
  return a.second < b.second;
}

double shortestDist(vector<point> &points) {
  //check that points.size() > 1 and that ALL POINTS ARE DIFFERENT
  set<point, bool(*)(point, point)> status(compY);
  sort(points.begin(), points.end());
  double opt = 1e30, sqrtOpt = 1e15;
  auto left = points.begin(), right = points.begin();
  status.insert(*right); right++;

  while (right != points.end()) {
    if (fabs(left->first - right->first) >= sqrtOpt) {
      status.erase(*(left++));
    } else {
      auto lower = status.lower_bound(point(-1e20, right->second - sqrtOpt));
      auto upper = status.upper_bound(point(-1e20, right->second + sqrtOpt));
      while (lower != upper) {
        double cand = squaredDist(*right, *lower);
        if (cand < opt) {
          opt = cand;
          sqrtOpt = sqrt(opt);
        }
        ++lower;
      }
      status.insert(*(right++));
    }
  }
  return sqrtOpt;
}
```

3.2 Geraden

```
struct pt { //complex<double> does not work here, becuase we need to set pt.x and pt.y
  double x, y;
  pt() {};
  pt(double x, double y) : x(x), y(y) {};
};

struct line {
  double a, b, c; //a*x+b*y+c, b=0 <=> vertical line, b=1 <=> otherwise
};

line pointsToLine(pt p1, pt p2) {
  line l;
  if (fabs(p1.x - p2.x) < EPSILON) {
    l.a = 1; l.b = 0.0; l.c = -p1.x;
  } else {
    l.a = -(double)(p1.y - p2.y) / (p1.x - p2.x);
    l.b = 1.0;
    l.c = -(double)(l.a * p1.x) - p1.y;
  }
  return l;
}

bool areParallel(line l1, line l2) {
  return (fabs(l1.a - l2.a) < EPSILON) && (fabs(l1.b - l2.b) < EPSILON);
}

bool areSame(line l1, line l2) {
  return areParallel(l1, l2) && (fabs(l1.c - l2.c) < EPSILON);
}
```

```

bool areIntersect(line l1, line l2, pt &p) {
  if (areParallel(l1, l2)) return false;
  p.x = (l2.b * l1.c - l1.b * l2.c) / (l2.a * l1.b - l1.a * l2.b);
  if (fabs(l1.b) > EPSILON) p.y = -(l1.a * p.x + l1.c);
  else p.y = -(l2.a * p.x + l2.c);
  return true;
}
```

3.3 Konvexe Hülle

```
struct point {
  double x, y;
  point(){} point(double x, double y) : x(x), y(y) {}
  bool operator <(const point &p) const {
    return x < p.x || (x == p.x && y < p.y);
  }
};

// 2D cross product.
// Return a positive value, if OAB makes a counter-clockwise turn,
// negative for clockwise turn, and zero if the points are collinear.
double cross(const point &O, const point &A, const point &B){
  double d = (A.x - O.x) * (B.y - O.y) - (A.y - O.y) * (B.x - O.x);
  if (fabs(d) < 1e-9) return 0.0;
  return d;
}

// Returns a list of points on the convex hull in counter-clockwise order.
// Colinear points are not in the convex hull, if you want colinear points in the hull remove "=" in the CCW-
    Test
// Note: the last point in the returned list is the same as the first one.
vector<point> convexHull(vector<point> P){
  int n = P.size(), k = 0;
  vector<point> H(2*n);

  // Sort points lexicographically
  sort(P.begin(), P.end());

  // Build lower hull
  for (int i = 0; i < n; i++) {
    while (k >= 2 && cross(H[k-2], H[k-1], P[i]) <= 0.0) k--;
    H[k++] = P[i];
  }

  // Build upper hull
  for (int i = n-2, t = k+1; i >= 0; i--) {
    while (k >= t && cross(H[k-2], H[k-1], P[i]) <= 0.0) k--;
    H[k++] = P[i];
  }

  H.resize(k);
  return H;
}
```

3.4 Formeln - `std::complex`

```
//komplexe Zahlen als Darstellung fuer Punkte
typedef pt complex<double>;
//Winkel zwischen Punkt und x-Achse in [0, 2 * PI), Winkel zwischen a und b
double angle = arg (a), angle_a_b = arg (a - b);
//Punkt rotiert um Winkel theta
pt a_rotated = a * exp (pt (0, theta));
//Mittelpunkt des Dreiecks abc
pt centroid = (a + b + c) / 3;
//Skalarprodukt
```

```
double dot(pt a, pt b) {
  return real(conj(a) * b);
}
//Kreuzprodukt, 0, falls kollinear
double cross(pt a, pt b) {
  return imag(conj(a) * b);
}
//wenn Eckpunkte bekannt
double areaOfTriangle(pt a, pt b, pt c) {
  return abs(cross(b - a, c - a)) / 2.0;
}
//wenn Seitenlaengen bekannt
double areaOfTriangle(double a, double b, double c) {
  double s = (a + b + c) / 2;
  return sqrt(s * (s-a) * (s-b) * (s-c));
}
// Sind die Dreiecke a1, b1, c1, and a2, b2, c2 aehnlich?
// Erste Zeile testet Aehnlichkeit mit gleicher Orientierung,
// zweite Zeile teststst Aehnlichkeit mit unterschiedlicher Orientierung
bool similar (pt a1, pt b1, pt c1, pt a2, pt b2, pt c2) {
  return (
    (b2 - a2) * (c1 - a1) == (b1 - a1) * (c2 - a2) ||
    (b2 - a2) * (conj (c1) - conj (a1)) == (conj (b1) - conj (a1)) * (c2 - a2)
  );
}
//Linksknick von a->b nach a->c
double ccw(pt a, pt b, pt c) {
  return cross(b - a, c - a); //<0 => falls Rechtsknick, 0 => kollinear, >0 => Linksknick
}
//Streckenschnitt, Strecken a-b und c-d
bool lineSegmentIntersection(pt a, pt b, pt c, pt d) {
  if (ccw(a, b, c) == 0 && ccw(a, b, d) == 0) { //kollinear
    double dist = abs(a - b);
    return (abs(a - c) <= dist && abs(b - c) <= dist) || (abs(a - d) <= dist && abs(b - d) <= dist);
  }
  return ccw(a, b, c) * ccw(a, b, d) <= 0 && ccw(c, d, a) * ccw(c, d, b) <= 0;
}
//Entfernung von p zu a-b
double distToLine(pt a, pt b, pt p) {
  return abs(cross(p - a, b - a)) / abs(b - a);
}
//liegt p auf a-b
bool pointOnLine(pt a, pt b, pt p) {
  return abs(distToLine(a, b, p)) < EPSILON;
}
//testet, ob d in der gleichen Ebene liegt wie a, b, und c
bool isCoplanar(pt a, pt b, pt c, pt d) {
  return (b - a) * (c - a) * (d - a) == 0;
}
//berechnet den Flaecheninhalt eines Polygons (nicht selbstschneidend)
double areaOfPolygon(vector<pt> &polygon) { //jeder Eckpunkt nur einmal im Vektor
  double res = 0; int n = polygon.size();
  for (int i = 0; i < (int)polygon.size(); i++)
    res += real(polygon[i]) * imag(polygon[(i + 1) % n]) - real(polygon[(i + 1) % n]) * imag(polygon[i]);
  return 0.5 * abs(res);
}
//testet, ob sich zwei Rechtecke (p1, p2) und (p3, p4) schneiden (jeweils gegenueberliegende Ecken)
bool rectIntersection(pt p1, pt p2, pt p3, pt p4) {
  double minx12 = min(real(p1), real(p2)), maxx12 = max(real(p1), real(p2));
  double minx34 = min(real(p3), real(p4)), maxx34 = max(real(p3), real(p4));
  double miny12 = min(imag(p1), imag(p2)), maxy12 = max(imag(p1), imag(p2));
  double miny34 = min(imag(p3), imag(p4)), maxy34 = max(imag(p3), imag(p4));
  return (maxx12 >= minx34) && (maxx34 >= minx12) && (maxy12 >= miny34) && (maxy34 >= miny12);
}
//testet, ob ein Punkt im Polygon liegt (beliebige Polygone)
bool pointInPolygon(pt p, vector<pt> &polygon) { //jeder Eckpunkt nur einmal im Vektor
  pt rayEnd = p + pt(1, 1000000);
  int counter = 0, n = polygon.size();
  for (int i = 0; i < n; i++) {
    pt start = polygon[i], end = polygon[(i + 1) % n];
    if (lineSegmentIntersection(p, rayEnd, start, end)) counter++;
```

```
  }
  return counter & 1;
}
```

4 Mathe

4.1 ggT, kgV, erweiterter euklidischer Algorithmus

```
ll gcd(ll a, ll b) {
  return b == 0 ? a : gcd (b, a % b);
}

ll lcm(ll a, ll b) {
  return a * (b / gcd(a, b)); //Klammern gegen Overflow
}
```

```
//Accepted in Aufgabe mit Forderung: |X|+|Y| minimal (primaer) und X<=Y (sekundaer)
//hab aber keinen Beweis dafuer :)
ll x, y, d; //a * x + b * y = d = ggT(a,b)
void extendedEuclid(ll a, ll b) {
  if (!b) {
    x = 1; y = 0; d = a; return;
  }
  extendedEuclid(b, a % b);
  ll x1 = y; ll y1 = x - (a / b) * y;
  x = x1; y = y1;
}
```

4.1.1 Multiplikatives Inverses von x in $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

Sei $0 \leq x < n$. Definiere $d := gcd(x, n)$.
Falls $d = 1$:

- Erweiterter euklidischer Algorithmus liefert α und β mit $\alpha x + \beta n = 1$
- Nach Kongruenz gilt $\alpha x + \beta n \equiv \alpha x \equiv 1 \mod n$
- $x^{-1} :\equiv \alpha \mod n$

Falls $d \neq 1$: es existiert kein x^{-1}

```
ll multInv(ll n, ll p) { //berechnet das multiplikative Inverse von n in F_p
  extendedEuclid(n, p); //implementierung von oben
  x += ((x / p) + 1) * p;
  return x % p;
}
```

4.2 Primzahlsieb von Eratosthenes

```
vector<int> primes;
void primeSieve(ll n) { //berechnet die Primzahlen kleiner n
  vector<int> isPrime(n,true);
  for(ll i = 2; i < n; i+=2) {
    if(isPrime[i]) {
      primes.push_back(i);
      if(i*i <= n) {
        for(ll j = i; i*j < n; j+=2) isPrime[i*j] = false;
      }
    }
    if(i == 2) i--;
  }
}
```

4.2.1 Faktorisierung

```
const ll PRIME_SIZE = 10000000;
vector<int> primes; //call primeSieve(PRIME_SIZE); before

//Factorize the number n
vector<int> factorize(ll n) {
  vector<int> factor;
  ll num = n;
  int pos = 0;
  while(num != 1)  {
    if(num % primes[pos] == 0) {
      num /= primes[pos];
      factor.push_back(primes[pos]);
    }
    else pos++;
    if(primes[pos]*primes[pos] > num) break;
  }
  if(num != 1) factor.push_back(num);
  return factor;
}
```

4.2.2 Mod-Exponent über $\mathbb{F}_p$

```
//0<=a,b <=n and n <= MAX(ll)/2
ll mult_mod(ll a, ll b, ll n) {
  if(a == 0 || b == 0) return 0;
  if(b == 1) return a % n;

  if(b % 2 == 1) return (a + mult_mod(a, b-1, n)) % n;
  else return mult_mod((a + a) % n, b / 2, n);
}

//0<=a,b<=n and n <= MAX(ll)/2
ll pow_mod(ll a, ll b, ll n) {
  if(b == 0) return 1;
  if(b == 1) return a % n;

  if(b % 2 == 1) return mult_mod(pow_mod(a, b-1, n), a, n);
  else return pow_mod(mult_mod(a, a, n), b / 2, n);
}
```

4.3 LGS über $\mathbb{F}_p$

```
void normalLine(ll n, ll line, ll p) { //normalisiert Zeile line
  ll factor = multInv(mat[line][line], p); //Implementierung von oben
  for (ll i = 0; i <= n; i++) {
    mat[line][i] *= factor;
    mat[line][i] %= p;
  }
}

void takeAll(ll n, ll line, ll p) { //zieht Vielfaches von line von allen anderen Zeilen ab
  for (ll i = 0; i < n; i++) {
    if (i == line) continue;
    ll diff = mat[i][line]; //abziehen
    for (ll j = 0; j <= n; j++) {
      mat[i][j] -= (diff * mat[line][j]) % p;
      while (mat[i][j] < 0) {
        mat[i][j] += p;
      }
    }
  }
}

void gauss(ll n, ll p) { //n x n+1-Matrix, Koerper F_p
```

```
  for (ll line = 0; line < n; line++) {
    normalLine(n, line, p);
    takeAll(n, line, p);
  }
}
```

4.4 Binomialkoeffizienten

```
ll calc_binom(ll N, ll K) {
   ll r = 1, d;
   if (K > N) return 0;
   for (d = 1; d <= K; d++) {
      r *= N--;
      r /= d;
   }
   return r;
}
```

4.5 Satz von Sprague-Grundy

Weise jedem Zustand X wie folgt eine Grundy-Zahl $g(X)$ zu:

$$g(X) := \min\{\mathbb{Z}_0^+ \backslash \{g(Y) \mid Y \text{ von } X \text{ aus direkt erreichbar}\}\}$$

X ist genau dann gewonnen, wenn $g(X) > 0$ ist.

Wenn man k Spiele in den Zuständen $X_1, \ldots, X_k$ hat, dann ist die Grundy-Zahl des Gesamtzustandes $g(X_1) \oplus \ldots \oplus g(X_k)$.

```
#Most important function!!!11elf
bool WinNimm(vector<int> game) {
  int result = 0;
  for(int s: game) result ^= s;
  return s > 0;
}
```

4.6 Maximales Teilfeld

```
//N :=  length of field
int maxStart = 1, maxLen = 0, curStart = 1, len = 0;
double maxValue = 0, sum = 0;
for (int pos = 0; pos < N; pos++) {
  sum += values[pos];
  len++;
  if (sum > maxValue) { // neues Maximum
    maxValue = sum; maxStart = curStart; maxLen = len;
  }
  if (sum < 0) { // alles zuruecksetzen
    curStart = pos +2; len = 0; sum = 0;
  }
}
//maxSum := maximaler Wert, maxStart := Startposition, maxLen := Laenge der Sequenz
```

Obiger Code findet kein maximales Teilfeld, das über das Ende hinausgeht. Dazu:

1. finde maximales Teilfeld, das nicht übers Ende geht
2. berechne minimales Teilfeld, das nicht über den Rand geht (analog)
3. nimm Maximum aus gefundenem Maximalem und Allem\Minimalem

4.7 Kombinatorik

4.7.1 Berühmte Zahlen

FIBONACCI-Zahlen	$f(0)=0 \quad f(1)=1 \quad f(n+2)=f(n+1)+f(n)$	Bem. 1, 2
CATALAN-Zahlen	$C_0=1 \quad C_n=\sum\limits_{k=0}^{n-1} C_k C_{n-1-k} = \frac{1}{n+1}\binom{2n}{n} = \frac{2(2n-1)}{n+1}\cdot C_{n-1}$	Bem. 3, 4
EULER-Zahlen (I)	$\left\langle {n \atop 0} \right\rangle = \left\langle {n \atop n-1} \right\rangle = 1 \quad \left\langle {n \atop k} \right\rangle = (k+1)\left\langle {n-1 \atop k} \right\rangle + (n-k)\left\langle {n-1 \atop k-1} \right\rangle$	Bem. 5
EULER-Zahlen (II)	$\left\langle\!\!\left\langle {n \atop 0} \right\rangle\!\!\right\rangle = 1 \quad \left\langle\!\!\left\langle {n \atop n} \right\rangle\!\!\right\rangle = 0 \quad \left\langle\!\!\left\langle {n \atop k} \right\rangle\!\!\right\rangle = (k+1)\left\langle\!\!\left\langle {n-1 \atop k} \right\rangle\!\!\right\rangle + (2n-k-1)\left\langle\!\!\left\langle {n-1 \atop k-1} \right\rangle\!\!\right\rangle$	Bem. 6
STIRLING-Zahlen (I)	$\left[{0 \atop 0} \right] = 1 \quad \left[{n \atop 0} \right] = \left[{0 \atop n} \right] = 0 \quad \left[{n \atop k} \right] = \left[{n-1 \atop k-1} \right] + (n-1)\left[{n-1 \atop k} \right]$	Bem. 7
STIRLING-Zahlen (II)	$\left\{ {n \atop 1} \right\} = \left\{ {n \atop n} \right\} = 1 \quad \left\{ {n \atop k} \right\} = k\left\{ {n-1 \atop k} \right\} + \left\{ {n-1 \atop k-1} \right\}$	Bem. 8
Integer-Partitions	$f(1,1)=1 \quad f(n,k)=0$ für $k>n \quad f(n,k)=f(n-k,k)+f(n,k-1)$	Bem. 9

Bemerkung 1 $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^n \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_n \\ f_{n+1} \end{pmatrix}$

Bemerkung 2 (ZECKENDORFS Theorem) *Jede positive natürliche Zahl kann eindeutig als Summe einer oder mehrerer verschiedener* FIBONACCI*-Zahlen geschrieben werden, sodass keine zwei aufeinanderfolgenden* FIBONACCI*-Zahlen in der Summe vorkommen.*
Lösung: *Greedy, nimm immer die größte* FIBONACCI*-Zahl, die noch hineinpasst.*

Bemerkung 3
- *Die erste und dritte angegebene Formel sind relativ sicher gegen Overflows.*
- *Die erste Formel kann auch zur Berechnung der* CATALAN*-Zahlen bezüglich eines Moduls genutzt werden.*

Bemerkung 4 *Die* CATALAN*-Zahlen geben an:* $C_n =$
- *Anzahl der Binärbäume mit n Knoten*
- *Anzahl der validen Klammerausdrücke mit n Klammerpaaren*
- *Anzahl der korrekten Klammerungen von* $n+1$ *Faktoren*
- *Anzahl der Möglichkeiten ein konvexes Polygon mit* $n+2$ *Ecken in Dreiecke zu zerlegen.*
- *Anzahl der monotonen Pfade in einem* $n \times n$*-Gitter, die nicht die Diagonale kreuzen. (zwischen gegenüberliegenden Ecken)*

Bemerkung 5 (EULER-Zahlen 1. Ordnung) *Die Anzahl der Permutationen von* $\{1,\dots,n\}$ *mit genau k Anstiegen.*
Begründung: Für die n-te Zahl gibt es n mögliche Positionen zum Einfügen. Dabei wird entweder ein Ansteig in zwei gesplitted oder ein Anstieg um n ergänzt.

Bemerkung 6 (EULER-Zahlen 2. Ordnung) *Die Anzahl der Permutationen von* $\{1,1,\dots,n,n\}$ *mit genau k Anstiegen.*

Bemerkung 7 (STIRLING-Zahlen 1. Ordnung) *Die Anzahl der Permutationen von* $\{1,\dots,n\}$ *mit genau k Zyklen.*
Begründung: Es gibt zwei Möglichkeiten für die n-te Zahl. Entweder sie bildet einen eigene Zyklus, oder sie kann an jeder Position in jedem Zyklus einsortiert werden.

Bemerkung 8 (STIRLING-Zahlen 2. Ordnung) *Die Anzahl der Möglichkeiten n Elemente in k nichtleere Teilmengen zu zerlegen.*
Begründung: Es gibt k Möglichkeiten die n in eine $n-1$*-Partition einzuordnen. Dazu kommt der Fall, dass die n in ihrer eigenen Teilmenge (alleine) steht.*

Bemerkung 9 *Anzahl der Teilmengen von* $\mathbb{N}$*, die sich zu n aufaddieren mit maximalem Elment* $\leq k$*.*

4.7.2 Verschiedenes

Hanoi Towers (min steps)	$T_n = 2^n - 1$
#regions by n lines	$n(n+1)/2+1$
#bounded regions by n lines	$\left(n^2-3n+2\right)/2$
#labeled rooted trees	n^{n-1}
#labeled unrooted trees	n^{n-2}

5 Strings

5.1 Knuth-Morris-Pratt-Algorithmus

```
//Preprocessing Substring sub for KMP-Search
vector<int> kmp_preprocessing(string& sub) {
  vector<int> b(sub.size() + 1);
  b[0] = -1;
  int i = 0, j = -1;
  while(i < sub.size()) {
    while(j >= 0 && sub[i] != sub[j])
      j = b[j];
    i++; j++;
    b[i] = j;
  }
  return b;
}

//Searching after Substring sub in s
vector<int> kmp_search(string& s, string& sub) {
  vector<int> pre = kmp_preprocessing(sub);
  vector<int> result;
  int i = 0, j = -1;
  while(i < s.size()) {
    while(j >= 0 && s[i] != sub[j])
      j = pre[j];
    i++; j++;
    if(j == sub.size()) {
      result.push_back(i-j);
      j = pre[j];
    }
  }
  return result;
}
```

5.2 Levenshtein-Distanz

```
int levenshtein(string& s1, string& s2) {
  int len1 = s1.size(), len2 = s2.size();
  vector<int> col(len2 + 1), prevCol(len2 + 1);
  for (int i = 0; i < len2 + 1; i++) prevCol[i] = i;
  for (int i = 0; i < len1; i++) {
    col[0] = i + 1;
    for (int j = 0; j < len2; j++)
      col[j+1] = min(min(prevCol[j+1] + 1, col[j] + 1), prevCol[j] + (s1[i]==s2[j] ? 0 : 1));
    col.swap(prevCol);
  }
  return prevCol[len2];
}
```

5.3 Trie

```
//nur fuer kleinbuchstaben!
struct node {
  node *(e)[26];
  int c = 0;//anzahl der woerter die an dem node enden.
  node() { for(int i = 0; i < 26; i++) e[i] = NULL; }
};

void insert(node *root, string *txt, int s) {
  if(s >= txt->length()) root->c++;
  else {
    int idx = (int)((*txt).at(s) - 'a');
    if(root->e[idx] == NULL) {
      root->e[idx] = new node();
```

```
    }
    insert(root->e[idx], txt, s+1);
  }
}

int contains(node *root, string *txt, int s) {
  if(s >= txt->length()) return root->c;
  int idx = (int)((*txt).at(s) - 'a');
  if(root->e[idx] != NULL) {
      return contains(root->e[idx], txt, s+1);
  } else return 0;
}
```

5.4 Suffix-Array

```
//longest common substring in one string (overlapping not excluded)
//contains suffix array:--------------------------------------------------------------------
int cmp(string &s,vector<vector<int>> &v, int i, int vi, int u, int l) {
  int vi2 = (vi + 1) % 2, u2 = u + i / 2, l2 = l + i / 2;
  if(i == 1) return s[u] - s[l];
  else if (v[vi2][u] != v[vi2][l]) return (v[vi2][u] - v[vi2][l]);
  else { //beide groesser tifft nicht mehr ein, da ansonsten vorher schon unterschied in Laenge
    if(u2 >= s.length()) return -1;
    else if(l2 >= s.length()) return 1;
    else return v[vi2][u2] - v[vi2][l2];
  }
}

string lcsub(string s) {
  if(s.length() == 0) return "";
  vector<int> a(s.length());
  vector<vector<int>> v(2, vector<int>(s.length(), 0));
  int vi = 0;
  for(int k = 0; k < a.size(); k++) a[k] = k;
  for(int i = 1; i <= s.length(); i *= 2, vi = (vi + 1) % 2) {
    sort(a.begin(), a.end(), [&] (const int &u, const int &l) {
      return cmp(s, v, i, vi, u, l) < 0;
    });
    v[vi][a[0]] = 0;
    for(int z = 1; z < a.size(); z++) v[vi][a[z]] = v[vi][a[z-1]] + (cmp(s, v, i, vi, a[z], a[z-1]) == 0 ? 0 :
          1);
  }
//------------------------------------------------------------------------------------------
  int r = 0, m=0, c=0;
  for(int i = 0; i < a.size() - 1; i++) {
    c = 0;
    while(a[i]+c < s.length() && a[i+1]+c < s.length() && s[a[i]+c] == s[a[i+1]+c]) c++;
    if(c > m) r=i, m=c;
  }
  return m == 0 ? "" : s.substr(a[r], m);
}
```

5.5 Longest Common Substring

```
//longest common substring.
struct lcse {
  int i = 0, s = 0;
};
string lcp(string s[2]) {
  if(s[0].length() == 0 || s[1].length() == 0) return "";
  vector<lcse> a(s[0].length()+s[1].length());
  for(int k = 0; k < a.size(); k++) a[k].i=(k < s[0].length() ? k : k - s[0].length()), a[k].s = (k < s[0].
        length() ? 0 : 1);
  sort(a.begin(), a.end(), [&] (const lcse &u, const lcse &l) {
    int ui = u.i, li = l.i;
    while(ui < s[u.s].length() && li < s[l.s].length()) {
```

```
      if(s[u.s][ui] < s[l.s][li]) return true;
      else if(s[u.s][ui] > s[l.s][li]) return false;
      ui++; li++;
    }
    return !(ui < s[u.s].length());
  });
  int r = 0, m=0, c=0;
  for(int i = 0; i < a.size() - 1; i++) {
    if(a[i].s == a[i+1].s) continue;
    c = 0;
    while(a[i].i+c < s[a[i].s].length() && a[i+1].i+c < s[a[i+1].s].length() && s[a[i].s][a[i].i+c] == s[a[i
        +1].s][a[i+1].i+c]) c++;
    if(c > m) r=i, m=c;
  }
  return m == 0 ? "" : s[a[r].s].substr(a[r].i, m);
}
```

5.6 Longest Common Subsequence

```
string lcss(string &a, string &b) {
  int m[a.length() + 1][b.length() + 1], x=0, y=0;
  memset(m, 0, sizeof(m));
  for(int y = a.length() - 1; y >= 0; y--) {
    for(int x = b.length() - 1; x >= 0; x--) {
      if(a[y] == b[x]) m[y][x] = 1 + m[y+1][x+1];
      else m[y][x] = max(m[y+1][x], m[y][x+1]);
    }
  } //for length only: return m[0][0];
  string res;
  while(x < b.length() && y < a.length()) {
    if(a[y] == b[x]) res += a[y++], x++;
    else if(m[y][x+1] > m[y+1][x+1]) x++;
    else y++;
  }
  return res;
}
```

6 Java

6.1 Introduction

- Compilen: `javac main.java`
- Ausführen: `java main < sample.in`
- Eingabe:

```
Scanner in = new Scanner(System.in); //java.util.Scanner
String line = in.nextLine(); //reads the next line of the input
int num = in.nextInt(); //reads the next token of the input as an int
double num2 = in.nextDouble(); //reads the next token of the input as a double
```

- Ausgabe:

```
//Ausgabe in StringBuilder schreiben und am Ende alles auf einmal ausgeben -> viel schneller
StringBuilder sb = new StringBuilder(); //java.lang.StringBuilder
sb.append("Hallo Welt");
System.out.print(sb.toString());
```

6.2 BigInteger

Hier ein kleiner überblick über die Methoden der Klasse BigInteger:

```
//Returns this +,*,/,- val
BigInteger add(BigInteger val), multiply(BigInteger val), divide(BigInteger val), substract(BigInteger val)

```

```
//Returns this^e
BigInteger pow(BigInteger e)

//Bit-Operations
BigInteger and(BigInteger val), or(BigInteger val), xor(BigInteger val), not(), shiftLeft(int n), shiftRight(
    int n)

//Returns the greatest common divisor of abs(this) and abs(val)
BigInteger gcd(BigInteger val)

//Returns this mod m, this^-1 mod m, this^e mod m
BigInteger mod(BigInteger m), modInverse(BigInteger m), modPow(BigInteger e, BigInteger m)

//Returns the next number that is greater than this and that is probably a prime.
BigInteger  nextProbablePrime()

//Converting BigInteger. Attention: If the BigInteger is to big the lowest bits were choosen which fits into
    the converted data-type.
int intValue(), long longValue(), float floatValue(), double doubleValue()
```

7 Sonstiges

7.1 2-SAT

1. Bedingungen in 2-CNF formulieren.
2. Implikationsgraph bauen, $(a \vee b)$ wird zu $\neg a \Rightarrow b$ und $\neg b \Rightarrow a$.
3. Finde die starken Zusammenhangskomponenten.
4. Genau dann lösbar, wenn keine Variable mit ihrer Negation in einer SCC liegt.

7.2 Sortieren in Linearzeit

Wenn die Eingabe aus einem kleinen Intervall $[0, n)$ stammt ist Bucketsort schneller.

7.2.1 Bucketsort

```
vector<int> res;
void bucketSort(vector<int> &a) { //stores result in global vector res
  int c[BUCKETS] = {0};
  for (int i = 0; i < (int)a.size(); i++) c[a[i]]++;
  int C = 0;
  for (int i = 0; i < BUCKETS; i++) {
    int tmp = C;
    C += c[i];
    c[i] = tmp;
  }
  res.resize(a.size());
  for (int i = 0; i < (int)a.size(); i++) {
    res[c[a[i]]] = a[i];
    c[a[i]]++;
  }
}
```

7.2.2 LSD-Radixsort

```
//Comparable with sort from <algorithms> in a range from 0 to 5000, for values greater than 5000 use sort
const int p[10] = {1,10,100,1000,10000,100000,1000000,10000000,100000000,1000000000};

int getLongestNumber(vector<int> &a) {
  int res = 0;
  for (int i = 0; i < (int)a.size(); i++) res = max(res, (int)ceil(log10(a[i]) + 1));
  return res;
}

```

```cpp
int getIthDigit(int digit, int i) {
  return (digit / p[i]) % 10;
}

void radixSort(vector<int> &a) {
  int digits = getLongestNumber(a);
  for (int d = 0; d < digits; d++) {
    vector<int> bucket[10];
    for(int i = 0; i < (int)a.size(); i++)
      bucket[getIthDigit(a[i],d)].push_back(a[i]);
    a.clear();
    for(int i = 0; i < 10; i++)
      copy(bucket[i].begin(), bucket[i].end(), back_inserter(a));
  }
}
```

7.3 Bit Operations

```cpp
//lsb: 0-th bit, msb: n-th bit
//get j-th bit
(a & (1 << j)) != 0
//set j-th bit
a |= (1 << j)
//clear j-th bit
a &= ~(1 << j)
//toggle j-th bit
a ^= (1 << j)
//get value of least significant bit set
(a & -a)
//turn on all bits
a = -1
//turn on first n bits (be aware of overflows)
a = (1 << n) - 1
```

7.4 Roman-Literal-Converting

```cpp
map<char,int> m; map<int,char> o;
int num[7] = {1000,500,100,50,10,5,1};

void buildMap() {
  m['M'] = 1000; m['D'] = 500; m['C'] = 100; m['L'] = 50; m['X'] = 10; m['V'] = 5; m['I'] = 1; m[' '] = 0;
  o[1000] = 'M'; o[500] = 'D'; o[100] = 'C'; o[50] = 'L'; o[10] = 'X'; o[5] = 'V'; o[1] = 'I';
}

int convertToInt(string &s) {
  int res = m[s[0]];
  for(int i = 1; i < s.size(); i++) {
    if(m[s[i-1]] < m[s[i]])
      res -= 2*m[s[i-1]];
    res += m[s[i]];
  }
  return res;
}

string convertToRoman(int n) {
  string roman = "";
  for(int i = 0; i < 7; i++) {
    while(n >= num[i]) {
      roman += o[num[i]];
      n -= num[i];
    }
  }
  int pos = roman.find("CCCC"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,4,"CD");
  pos = roman.find("XXXX"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,4,"XL");
  pos = roman.find("IIII"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,4,"IV");
  pos = roman.find("DCD"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,3,"CM");
```

```
  pos = roman.find("LXL"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,3,"XC");
  pos = roman.find("VIV"); if(pos != string::npos) roman.replace(pos,3,"IX");
  return roman;
}
```

7.5 Josephus-Problem

n Personen im Kreis, jeder k-te wird erschossen.

Spezialfall $k = 2$: Betrachte Binärdarstellung von n. Für $n = 1b_1b_2b_3..b_n$ ist $b_1b_2b_3..b_n1$ die Position des letzten Überlebenden. (Rotiere n um eine Stelle nach links)

```
int rotateLeft(int n) { //returns the number of the last survivor (1 based)
  for (int i = 31; i >= 0; i--)
    if (n & (1 << i)) {
      n &= ~(1 << i);
      break;
    }
  n <<= 1; n++; return n;
}
```

Allgemein: Sei $F(n,k)$ die Position des letzten Überlebenden. Nummeriere die Personen mit $0,1,\dots,n-1$. Nach Erschießen der k-ten Person, hat der Kreis noch Größe $n-1$ und die Position des Überlebenden ist jetzt $F(n-1,k)$. Also: $F(n,k) = (F(n-1,k)+k)\%n$. Basisfall: $F(1,k) = 0$.

```
int josephus(int n, int k) { //returns the number of the last survivor (0 based)
  if (n == 1) return 0;
  return (josephus(n - 1, k) + k) % n;
}
```

Beachte bei der Ausgabe, dass die Personen im ersten Fall von $1,\dots,n$ nummeriert sind, im zweiten Fall von $0,\dots,n-1$!

7.6 Gemischtes

- Johnsons *Reweighting Algorithmus:* Füge neue Quelle `s` hinzu, mit Kanten mit Gewicht 0 zu allen Knoten. Nutze Bellmann-Ford zum Betsimmen der Entfernungen `d[i]` von `s` zu allen anderen Knoten. Stoppe, wenn es negative Zyklen gibt. Sonst ändere die gewichte von allen Kanten `(u,v)` im ursprünglichen Graphen zu `d[u]+w[u,v]-d[v]`. Dann sind alle Kantengewichte nichtnegativ, Dijkstra kann angewendet werden.

- Für ein System von Differenzbeschränkungen: Ändere alle Bedingungen in die Form $a - b \leq c$. Für jede Bedingung füge eine Kante `(b,a)` mit Gweicht `c` ein. Füge Quelle `s` hinzu, mit Kanten zu allen Knoten mit Gewicht 0. Nutze Bellmann-Ford, um die kürzesten Pfade von `s` aus zu finden. `d[v]` ist mögliche Lösung für `v`.

- Min-Weight-Vertex-Cover im bipartiten Graph: Partitioniere in `A`, `B` und füge Kanten `s -> A` mit Gewicht `w(A)` und Kanten `B -> t` mit Gewicht `w(B)` hinzu. Füge Kanten mit Kapazität ∞ von `A` nach `B` hinzu, wo im originalen Graphen Kanten waren. Max-Flow ist die Lösung.
  Im Residualgraphen:
  - Das Vertex-Cover sind die Knoten inzident zu den Brücken. *oder*
  - Die Knoten in `A`, die *nicht* von `s` erreichber sind und die Knoten in `B`, die von `erreichber` sind.

- Allgemeiner Graph: Das Komplement eines Vertex-Cover ist ein Independent Set. $\Rightarrow$ Max Weight Independent Set ist Komplement von Min Weight Vertex Cover.

- Bipartiter Graph: Min Vertex Cover (kleinste Menge Kanten, die alle Knoten berühren) = Max Matching.

- Bipartites Matching mit Gewichten auf linken Knoten. Minimiere Matchinggewicht. Lösung: Sortiere Knoten links aufsteigend nach Gewicht, danach nutze normlen Algorithmus (Kuhn, Seite 10)

- **Tobi, cool down!**

8 Convenience-Methoden

8.1 Zeileneingabe

```
vector<string> split(string &s, string delim) { //zerlegt s anhand aller Zeichen in delim
  vector<string> result; char *token;
  token = strtok((char*)s.c_str(), (char*)delim.c_str());
  while (token != NULL) {
    result.push_back(string(token));
    token = strtok(NULL, (char*)delim.c_str());
  }
  return result;
}
```

8.2 Template

```
#include <bits/stdc++.h>

using namespace std;

void solve() {}

int main() {
  solve();
  return 0;
}
```

8.3 Keyboard Layout

`setxkbmap de` setzt deutsched Tastaturlayout.