

ChaosKITs
Karlsruhe Institute of Technology

2.8	Min-Cost-Max-Flow	7
2.9	Maximal Cardinatlity Bipartite Mat- ching	8
2.10	TSP	8
2.11	Bitonic TSP	9
Geometrie		9
3.1	Closest Pair	9
3.2	Geraden	9
3.3	Konvexe Hülle	10
3.4	Formeln - std::complex	10
Mathe		12
4.1	ggT, kgV, erweiterter euklidischer Al- gorithmus	12
4.1.1	Multiplikatives Inverses von x in $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$	12
4.2	Mod-Exponent über \mathbb{F}_p	12
4.3	LGS über \mathbb{F}_p	12
4.4	Chinesischer Restsatz	13
4.5	Primzahlsieb von ERATOSTHENES	13
4.6	MILLER-RABIN-Primzahltest	13
4.7	Binomialkoeffizienten	14
4.8	Maximales Teilfeld	14
4.9	Polynome & FFT	14
4.10	Kombinatorik	15

4.10.1	Berühmte Zahlen	15
4.10.2	Verschiedenes	15
4.11	Satz von SPRAGUE-GRUNDY	15
4.12	3D-Kugeln	16
4.13	Big Integers	16
Strings		18
5.1	KNUTH-MORRIS-PRATT-Algorithmus . .	18
5.2	AHO-CORASICK-Automat	18
5.3	LEVENSHTEIN-Distanz	19
5.4	Trie	19
5.5	Suffix-Array	19
5.6	Longest Common Substring	20
5.7	Longest Common Subsequence	20
Java		20
6.1	Introduction	20
6.2	BigInteger	21
Sonstiges		21
7.1	2-SAT	21
7.2	Zeileneingabe	21
7.3	Bit Operations	21
7.4	Josephus-Problem	21
7.5	Gemischtes	22
7.6	Sonstiges	22

Datenstrukturen

1.1 Union-Find

```

1 // Laufzeit: O(n*alpha(n))
2 // "height" ist obere Schranke für die Höhe der Bäume. Sobald
  Pfadkompression
3 // angewendet wurde, ist die genaue Höhe nicht mehr effizient berechenbar
4 vector<int> parent // Initialisiere mit Index im Array.
5 vector<int> height; // Initialisiere mit 0.
6
7 int findSet(int n) { // Pfadkompression
8     if (parent[n] != n) parent[n] = findSet(parent[n]);
9     return parent[n];
10 }
11
12 void linkSets(int a, int b) { // Union by rank.
13     if (height[a] < height[b]) parent[a] = b;
14     else if (height[b] < height[a]) parent[b] = a;
15     else {
16         parent[a] = b;
17         height[b]++;
18     }
19 }
20
21 void unionSets(int a, int b) { // Diese Funktion aufrufen.
22     if (findSet(a) != findSet(b)) linkSets(findSet(a), findSet(b));
23 }

```

1.2 Segmentbaum

```

1 // Laufzeit: init: O(n), query: O(log n), update: O(log n)
2 // Berechnet das Maximum im Array.
3 int a[MAX_N], m[4 * MAX_N];
4
5 int query(int x, int y, int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
6     if (x <= X && Y <= y) return m[k];
7     if (y < X || Y < x) return -1000000000; // Ein "neutrales" Element.
8     int M = (X + Y) / 2;
9     return max(query(x, y, 2 * k + 1, X, M), query(x, y, 2 * k + 2, M + 1,
10         Y));
11 }
12
13 void update(int i, int v, int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
14     if (i < X || Y < i) return;
15     if (X == Y) { m[k] = v; a[i] = v; return; }
16     int M = (X + Y) / 2;
17     update(i, v, 2 * k + 1, X, M);
18     update(i, v, 2 * k + 2, M + 1, Y);
19     m[k] = max(m[2 * k + 1], m[2 * k + 2]);
20 }

```

```

20
21 // Einmal vor allen anderen Operationen aufrufen.
22 void init(int k = 0, int X = 0, int Y = MAX_N - 1) {
23     if (X == Y) { m[k] = a[X]; return; }
24     int M = (X + Y) / 2;
25     init(2 * k + 1, X, M);
26     init(2 * k + 2, M + 1, Y);
27     m[k] = max(m[2 * k + 1], m[2 * k + 2]);
28 }

```

Mit update() können ganze Intervalle geändert werden. Dazu: Offset in den inneren Knoten des Baums speichern.

1.3 Fenwick Tree

```

1 vector<int> FT; // Fenwick-Tree
2 int n;
3
4 // Addiert val zum Element an Index i. O(log(n)).
5 void updateFT(int i, int val) {
6     i++; while(i <= n) { FT[i] += val; i += (i & (-i)); }
7 }
8
9 // Baut Baum auf. O(n*log(n)).
10 void buildFenwickTree(vector<int>& a) {
11     n = a.size();
12     FT.assign(n+1, 0);
13     for(int i = 0; i < n; i++) updateFT(i, a[i]);
14 }
15
16 // Präfix-Summe über das Intervall [0..i]. O(log(n)).
17 int prefix_sum(int i) {
18     int sum = 0; i++;
19     while(i > 0) { sum += FT[i]; i -= (i & (-i)); }
20     return sum;
21 }

```

1.4 Range Minimum Query

```

1 vector<int> data(RMQ_SIZE);
2 vector<vector<int>> rmq(floor(log2(RMQ_SIZE)) + 1, vector<int>(RMQ_SIZE))
3     ;
4 // Baut Struktur auf. O(n*log(n))
5 void initRMQ() {
6     for(int i = 0, s = 1, ss = 1; s <= RMQ_SIZE; ss=s, s*=2, i++) {
7         for(int l = 0; l + s <= RMQ_SIZE; l++) {
8             if(i == 0) rmq[0][l] = 1;
9             else {
10                 int r = l + ss;

```

```

11         rmq[i][l] = (data[rmq[i-1][l]] <= data[rmq[i-1][r]] ? rmq[i-1][l]
12         : rmq[i-1][r]);
13     }}}}
14 // Gibt den Index des Minimums im Intervall [l,r] zurück. O(1).
15 int queryRMQ(int l, int r) {
16     if(l >= r) return l;
17     int s = floor(log2(r-l)); r = r - (1 << s);
18     return (data[rmq[s][l]] <= data[rmq[s][r]] ? rmq[s][l] : rmq[s][r]);
19 }

```

1.5 STL-Tree

```

1 #include <bits/stdc++.h>
2 #include <ext/pb_ds/assoc_container.hpp>
3 #include <ext/pb_ds/tree_policy.hpp>
4 using namespace std; using namespace __gnu_pbds;
5 typedef tree<int, null_type, less<int>, rb_tree_tag,
6     tree_order_statistics_node_update> Tree;
7 int main() {
8     Tree X;
9     for (int i = 1; i <= 16; i <= 1) X.insert(i); // {1, 2, 4, 8, 16}
10    cout << *X.find_by_order(3) << endl; // => 8
11    cout << X.order_of_key(10) << endl; // => 4 = Nachfolger von 10 =
12    minimales i, sodass X[i] >= 10
13    return 0;
14 }

```

2 Graphen

2.1 Minimale Spannbäume

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 Spannbau.

2.1.1 Kruskal

```

1 //Takes a Graph g (EdgeList!!!) with N nodes and computes the MST and
2 //Cost of it. Runtime: O(|E|*log(|E|))
3 //Requires UnionFind-Datastructure!!!
4 pair<graph,int> buildMST(int N, graph& g) {

```

```

4 UnionFind uf(N);
5 graph mst; int mst_cost = 0; int M = g.size();
6 sort(g.begin(),g.end());
7 for(int i = 0; i < M; i++) {
8     int u = g[i].second.first, v = g[i].second.second;
9     if(uf.findSet(u) != uf.findSet(v)) {
10         mst.push_back(g[i]); mst_cost += g[i].first;
11         uf.unionSets(u,v);
12     }
13 }
14 return make_pair(mst,mst_cost);
15 }

```

2.2 Kürzeste Wege

2.2.1 Algorithmus von DIJKSTRA

Kürzeste Pfade in Graphen ohne negative Kanten.

```

1 // Laufzeit: O((|E|+|V|)*log |V|)
2 void dijkstra(int start) {
3     priority_queue<ii, vector<ii>, greater<ii> > pq;
4     vector<int> dist(NUM_VERTICES, INF), parent(NUM_VERTICES, -1);
5
6     dist[start] = 0;
7     pq.push(ii(0, start));
8
9     while (!pq.empty()) {
10        ii front = pq.top(); pq.pop();
11        int curNode = front.second, curDist = front.first;
12
13        if (curDist > dist[curNode]) continue;
14
15        for (auto n : adjlist[curNode]) {
16            int nextNode = n.first, nextDist = curDist + n.second;
17            if (nextDist < dist[nextNode]) {
18                dist[nextNode] = nextDist; parent[nextNode] = curNode;
19                pq.push(ii(nextDist, nextNode));
20            }
21        }
22    }
23 }

```

2.2.2 BELLMAN-FORD-Algorithmus

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

```

1 // Laufzeit: O(|V|*|E|)
2 struct edge {
3     int from; int to; int cost;
4     edge () {}
5     edge (int from, int to, int cost) : from(from), to(to), cost(cost) {}

```

```

6 };
7
8 vector<edge> edges; // Kanten einfügen!
9 vector<int> dist, parent;
10
11 void bellmannFord() {
12     dist.assign(NUM_VERTICES, INF); dist[0] = 0;
13     parent.assign(NUM_VERTICES, -1);
14     for (int i = 0; i < NUM_VERTICES - 1; i++) {
15         for (int j = 0; j < (int)edges.size(); j++) {
16             if (dist[edges[j].from] + edges[j].cost < dist[edges[j].to]) {
17                 dist[edges[j].to] = dist[edges[j].from] + edges[j].cost;
18                 parent[edges[j].to] = edges[j].from;
19             }
20         }
21     }
22
23     // "dist" und "parent" sind korrekte kürzeste Pfade.
24     // Folgende Zeilen prüfen nur negative Kreise.
25     for (int j = 0; j < (int)edges.size(); j++) {
26         if (dist[edges[j].from] + edges[j].cost < dist[edges[j].to]) {
27             // Negativer Kreis gefunden.
28         }
29     }
30 }

```

2.2.3 FLOYD-WARSHALL-Algorithmus

```

1 // Laufzeit:  $O(|V|^3)$ 
2 // Initialisiere mat: mat[i][i] = 0, mat[i][j] = INF falls i & j nicht
3 // adjazent, Länge sonst.
4 void floydWarshall() {
5     for (k = 0; k < MAX_V; k++) {
6         for (i = 0; i < MAX_V; i++) {
7             for (j = 0; j < MAX_V; j++) {
8                 if (mat[i][k] != INF && mat[k][j] != INF && mat[i][k] + mat[k][j]
9                     < mat[i][j]) {
10                     mat[i][j] = mat[i][k] + mat[k][j];
11                 }
12             }
13         }
14     }
15 }

```

- Evtl. überschreibt die Eingabe die Nullen auf der Hauptdiagonalen. Nur negative Werte sollten die Nullen überschreiben.
- Von parallelen Kanten sollte nur die günstigste gespeichert werden.
- Knoten i liegt genau dann auf einem negativen Kreis, wenn $\text{dist}[i][i] < 0$ ist.
- Ein u-v-Pfad existiert nicht, wenn $\text{dist}[u][v] == \text{INF}$.

- Gibt es einen Knoten c , sodass $\text{dist}[u][c] \neq \text{INF} \ \&\& \ \text{dist}[c][v] \neq \text{INF} \ \&\& \ \text{dist}[c][c] < 0$, wird der u-v-Pfad beliebig kurz.

2.3 Strongly Connected Components (TARJANS-Algorithmus)

```

1 // Laufzeit:  $O(|V|+|E|)$ 
2 int counter, sccCounter;
3 vector<bool> visited, inStack;
4 vector<vector<int>> adjlist;
5 vector<int> d, low, sccs;
6 stack<int> s;
7
8 void visit(int v) {
9     visited[v] = true;
10    d[v] = counter; low[v] = counter; counter++;
11    inStack[v] = true; s.push(v);
12
13    for (int i = 0; i < (int)adjlist[v].size(); i++) {
14        int u = adjlist[v][i];
15        if (!visited[u]) {
16            visit(u);
17            low[v] = min(low[v], low[u]);
18        } else if (inStack[u]) {
19            low[v] = min(low[v], low[u]);
20        }
21    }
22
23    if (d[v] == low[v]) {
24        int u;
25        do {
26            u = s.top(); s.pop(); inStack[u] = false;
27            sccs[u] = sccCounter;
28        } while (u != v);
29        sccCounter++;
30    }
31 }
32
33 void scc() {
34     // Initialisiere adjlist!
35     visited.clear(); visited.assign(NUM_VERTICES, false);
36     d.clear(); d.resize(NUM_VERTICES);
37     low.clear(); low.resize(NUM_VERTICES);
38     inStack.clear(); inStack.assign(NUM_VERTICES, false);
39     sccs.clear(); sccs.resize(NUM_VERTICES);
40
41     counter = 0;
42     sccCounter = 0;
43     for (i = 0; i < NUM_VERTICES; i++) {
44         if (!visited[i]) {
45             visit(i);
46         }
47     }
48     // sccCounter ist Anzahl der starkem Zusammenhangskomponenten.
49     // sccs enthält den Index der SCC für jeden Knoten.

```

50 }

48 }

2.4 Artikulationspunkte und Brücken

```

1 vector< vector<int> > adjlist;
2 vector<int> low;
3 vector<int> d;
4 vector<bool> isArtPoint;
5 vector< vector<int> > bridges; //nur fuer Bruecken
6 int counter = 0;
7
8 void visit(int v, int parent) {
9     d[v] = low[v] = ++counter;
10    int numVisits = 0, maxlow = 0;
11
12    for (vector<int>::iterator vit = adjlist[v].begin(); vit != adjlist[v].
13        end(); vit++) {
14        if (d[*vit] == 0) {
15            numVisits++;
16            visit(*vit, v);
17            if (low[*vit] > maxlow) {
18                maxlow = low[*vit];
19            }
20
21            if (low[*vit] > d[v]) { //nur fuer Bruecken, evtl. parent
22                betrachten!
23                bridges[v].push_back(*vit);
24                bridges[*vit].push_back(v);
25            }
26
27            low[v] = min(low[v], low[*vit]);
28        } else {
29            if (d[*vit] < low[v]) {
30                low[v] = d[*vit];
31            }
32        }
33
34        if (parent == -1) {
35            if (numVisits > 1) isArtPoint[v] = true;
36        } else {
37            if (maxlow >= d[v]) isArtPoint[v] = true;
38        }
39    }
40
41    void findArticulationPoints() {
42        low.clear(); low.resize(adjlist.size());
43        d.clear(); d.assign(adjlist.size(), 0);
44        isArtPoint.clear(); isArtPoint.assign(adjlist.size(), false);
45        bridges.clear(); isBridge.resize(adjlist.size()); //nur fuer Bruecken
46        for (int v = 0; v < (int)adjlist.size(); v++) {
47            if (d[v] == 0) visit(v, -1);
48        }

```

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 notwendig ist (oder bestimmte Sortierungen verlangt werden), gehts mit einem set einfacher.

```

1 VISIT(v):
2   forall e=(v,w) in E
3   delete e from E
4   VISIT(w)
5   print e

```

```

1 // Laufzeit: O(|V|+|E|)
2 vector< vector<int> > adjlist;
3 vector< vector<int> > otherIdx;
4 vector<int> cycle;
5 vector<int> validIdx;
6
7 void swapEdges(int n, int a, int b) { // Vertauscht Kanten mit Indizes a
8     und b von Knoten n.
9     int neighA = adjlist[n][a];
10    int neighB = adjlist[n][b];
11    int idxNeighA = otherIdx[n][a];
12    int idxNeighB = otherIdx[n][b];
13    swap(adjlist[n][a], adjlist[n][b]);
14    swap(otherIdx[n][a], otherIdx[n][b]);
15    otherIdx[neighA][idxNeighA] = b;
16    otherIdx[neighB][idxNeighB] = a;
17 }
18
19 void removeEdge(int n, int i) { // Entfernt Kante i von Knoten n (und die
20     zugehörige Rückwärtskante).
21     int other = adjlist[n][i];
22     if (other == n) { //Schlingen.
23         validIdx[n]++;
24         return;
25     }
26     int otherIndex = otherIdx[n][i];
27     validIdx[n]++;
28     if (otherIndex != validIdx[other]) {
29         swapEdges(other, otherIndex, validIdx[other]);
30     }

```

```

29 validIdx[other]++;
30 }
31
32 // Findet Eulerzyklus an Knoten n startend.
33 // Teste vorher, dass Graph zusammenhängend ist! Was ist mit isolierten
    Knoten?
34 // Teste vorher, ob Eulerzyklus überhaupt existiert!
35 void euler(int n) {
36     while (validIdx[n] < (int)adjlist[n].size()) {
37         int nn = adjlist[n][validIdx[n]];
38         removeEdge(n, validIdx[n]);
39         euler(nn);
40     }
41     cycle.push_back(n); // Zyklus am Ende in cycle (umgekehrte Reihenfolge)
42 }

```

- 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

```

1 //RMQ muss hinzugefuegt werden!
2 vector<int> visited(2*MAX_N), first(MAX_N, 2*MAX_N), depth(2*MAX_N);
3 vector<vector<int>> graph(MAX_N);
4
5 //Runtime: O(n)
6 void initLCA(int gi, int d, int &c) {
7     visited[c] = gi, depth[c] = d, first[gi] = min(c, first[gi]), c++;
8     for(int gn : graph[gi]) {
9         initLCA(gn, d+1, c);
10        visited[c] = gi, depth[c] = d, c++;
11    }
12 }
13 //[a, b]
14 //Runtime: O(1)
15 int getLCA(int a, int b) {
16     return visited[queryRMQ(min(first[a], first[b]), max(first[a], first[b]
17     ))];
18 }
19 //=> int c = 0; initLCA(0,0,c); initRMQ(); done! [rmq on depth]

```

2.7 Max-Flow

2.7.1 Capacity Scaling

Gut bei dünn besetzten Graphen.

```

1 // Ford Fulkerson mit Capacity Scaling.
2 // Laufzeit: O(|E|^2*log(C))

```

```

3 struct MaxFlow { // Muss mit new erstellt werden!
4     static const int MAX_N = 500; // #Knoten, kein Einfluss auf die
        Laufzeit.
5     struct edge { int dest, rev; ll capacity, flow; };
6     vector<edge> adjlist[MAX_N];
7     int visited[MAX_N] = {0}, target, dfsCounter = 0;
8     ll capacity;
9
10    bool dfs(int x) {
11        if (x == target) return 1;
12        if (visited[x] == dfsCounter) return 0;
13        visited[x] = dfsCounter;
14        for (edge &e : adjlist[x]) {
15            if (e.capacity >= capacity && dfs(e.dest)) {
16                e.capacity -= capacity; adjlist[e.dest][e.rev].capacity +=
                    capacity;
17                e.flow += capacity; adjlist[e.dest][e.rev].flow -= capacity;
18                return 1;
19            }
20        }
21        return 0;
22    }
23
24    void addEdge(int u, int v, ll c) {
25        adjlist[u].push_back(edge {v, (int)adjlist[v].size(), c, 0});
26        adjlist[v].push_back(edge {u, (int)adjlist[u].size() - 1, 0, 0});
27    }
28
29    ll maxFlow(int s, int t) {
30        capacity = 1L << 62;
31        target = t;
32        ll flow = 0L;
33        while (capacity) {
34            while (dfsCounter++, dfs(s)) {
35                flow += capacity;
36            }
37            capacity /= 2;
38        }
39        return flow;
40    }
41 };

```

2.7.2 Push Relabel

Gut bei sehr dicht besetzten Graphen.

```

1 // Laufzeit: O(|V|^3)
2 struct PushRelabel {
3     ll capacities[MAX_V][MAX_V], flow[MAX_V][MAX_V], excess[MAX_V];
4     int height[MAX_V], list[MAX_V - 2], seen[MAX_V], n;
5
6     PushRelabel(int n) {
7         this->n = n;
8     }
9 };

```

```

8  memset(capacities, 0L, sizeof(capacities)); memset(flow, 0L, sizeof(
9  flow));
10 memset(excess, 0L, sizeof(excess)); memset(height, 0, sizeof(height))
11 ;
12 memset(list, 0, sizeof(list)); memset(seen, 0, sizeof(seen));
13 }
14 inline void addEdge(int u, int v, ll c) { capacities[u][v] += c; }
15 void push(int u, int v) {
16     ll send = min(excess[u], capacities[u][v] - flow[u][v]);
17     flow[u][v] += send; flow[v][u] -= send;
18     excess[u] -= send; excess[v] += send;
19 }
20
21 void relabel(int u) {
22     int minHeight = INT_MAX / 2;
23     for (int v = 0; v < n; v++) {
24         if (capacities[u][v] - flow[u][v] > 0) {
25             minHeight = min(minHeight, height[v]);
26             height[u] = minHeight + 1;
27         }
28     }
29 void discharge(int u) {
30     while (excess[u] > 0) {
31         if (seen[u] < n) {
32             int v = seen[u];
33             if (capacities[u][v] - flow[u][v] > 0 && height[u] > height[v])
34                 push(u, v);
35             else seen[u]++;
36         } else {
37             relabel(u);
38             seen[u] = 0;
39         }
40     }
41 void moveToFront(int u) {
42     int temp = list[u];
43     for (int i = u; i > 0; i--)
44         list[i] = list[i - 1];
45     list[0] = temp;
46 }
47 ll maxFlow(int source, int target) {
48     for (int i = 0, p = 0; i < n; i++) if (i != source && i != target)
49         list[p++] = i;
50
51     height[source] = n;
52     excess[source] = LLONG_MAX / 2;
53     for (int i = 0; i < n; i++) push(source, i);
54
55     int p = 0;
56     while (p < n - 2) {
57         int u = list[p], oldHeight = height[u];
58         discharge(u);
59         if (height[u] > oldHeight) {

```

```

59         moveToFront(p);
60         p = 0;
61         } else p++;
62     }
63
64     ll maxflow = 0L;
65     for (int i = 0; i < n; i++) maxflow += flow[source][i];
66     return maxflow;
67 }
68 };

```

2.7.3 Anwendungen

- **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.

- **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.

- **Min-Cut**

Der maximale Fluss ist gleich dem minimalen Schnitt. Bei Quelle s und Senke t , partitioniere in S und T . Zu S gehören alle Knoten, die im Residualgraphen von s aus erreichbar sind (Rückwärtskanten beachten).

2.8 Min-Cost-Max-Flow

```

1  typedef long long ll;
2  static const ll flowlimit = 1LL << 60; // Should be bigger than the max
3  flow.
4  struct MinCostFlow { // Should be initialized with new.
5      static const int maxn = 400; // Should be bigger than the #vertices.
6      static const int maxm = 5000; // #edges.
7      struct edge { int node; int next; ll flow; ll value; } edges[maxm <<
8      1];
9      int graph[maxn], queue[maxn], pre[maxn], con[maxn], n, m, source,
10      target, top;
11      bool inqueue[maxn];
12      ll maxflow, mincost, dis[maxn];
13
14      MinCostFlow() { memset(graph, -1, sizeof(graph)); top = 0; }
15
16      inline int inverse(int x) { return 1 + ((x >> 1) << 2) - x; }

```

```

15 // Directed edge from u to v, capacity c, weight w.
16 inline int addedge(int u, int v, int c, int w) {
17     edges[top].value = w; edges[top].flow = c; edges[top].node = v;
18     edges[top].next = graph[u]; graph[u] = top++;
19     edges[top].value = -w; edges[top].flow = 0; edges[top].node = u;
20     edges[top].next = graph[v]; graph[v] = top++;
21     return top - 2;
22 }
23
24 bool SPFA() {
25     int point, node, now, head = 0, tail = 1;
26     memset(pre, -1, sizeof(pre));
27     memset(inqueue, 0, sizeof(inqueue));
28     memset(dis, 0x7F, sizeof(dis));
29     dis[source] = 0; queue[0] = source;
30     pre[source] = source; inqueue[source] = true;
31
32     while (head != tail) {
33         now = queue[head++];
34         point = graph[now];
35         inqueue[now] = false;
36         head %= maxn;
37
38         while (point != -1) {
39             node = edges[point].node;
40             if (edges[point].flow > 0 && dis[node] > dis[now] + edges[point].
41                 value) {
42                 dis[node] = dis[now] + edges[point].value;
43                 pre[node] = now; con[node] = point;
44                 if (!inqueue[node]) {
45                     inqueue[node] = true; queue[tail++] = node;
46                     tail %= maxn;
47                 }
48             }
49             point = edges[point].next;
50         }
51         return pre[target] != -1;
52     }
53
54 void extend() {
55     ll w = flowlimit;
56     for (int u = target; pre[u] != u; u = pre[u]) {
57         w = min(w, edges[con[u]].flow);
58     }
59     maxflow += w;
60     mincost += dis[target] * w;
61     for (int u = target; pre[u] != u; u = pre[u]) {
62         edges[con[u]].flow -= w;
63         edges[inverse(con[u])].flow += w;
64     }
65 }
66
67 void mincostflow() {
68     maxflow = 0;

```

```

69     mincost = 0;
70     while (SPFA()) {
71         extend();
72     }
73 }
74 };

```

2.9 Maximal Cardinality Bipartite Matching

```

1 // Laufzeit: O(n*(|V|+|E|))
2 vector<vector<int>> > adjlist; // Gerichtete Kanten, von links nach
3 // rechts.
4 vector<int> pairs; // Zu jedem Knoten der gematchte Knoten rechts, oder
5 // -1.
6 vector<bool> visited;
7
8 bool dfs(int v) {
9     if (visited[v]) return false;
10    visited[v] = true;
11    for (auto w : adjlist[v]) if (pairs[w] < 0 || dfs(pairs[w])) {
12        pairs[w] = v; pairs[v] = w; return true;
13    }
14    return false;
15 }
16
17 // n = #Knoten links (0..n-1), m = #Knoten rechts
18 int kuhn(int n, int m) {
19     pairs.assign(n + m, -1);
20     int ans = 0;
21     // Greedy Matching. Optionale Beschleunigung.
22     for (int i = 0; i < n; i++) for (auto w : adjlist[i]) if (pairs[w] ==
23         -1) {
24             pairs[i] = w; pairs[w] = i; ans++; break;
25         }
26     for (int i = 0; i < n; i++) if (pairs[i] == -1) {
27         visited.assign(n + m, false);
28         ans += dfs(i);
29     }
30     return ans; // Größe des Matchings.
31 }

```

2.10 TSP

```

1 // Laufzeit: O(n^2*2^n)
2 vector<vector<int>> dist; // Entfernung zwischen je zwei Punkten.
3 vector<int> TSP() {
4     int n = dist.size(), m = 1 << n;
5     vector<vector<ii>> dp(n, vector<ii>(m, ii(INF, -1)));
6
7     for (int c = 0; c < n; c++) dp[c][m-1].first = dist[c][0], dp[c][m-1].
8         second = 0;

```



```

8
9 for(int v = m - 2; v >= 0; v--) {
10     for(int c = n - 1; c >= 0; c--) {
11         for(int g = 0; g < n; g++) {
12             if(g != c && !((1 << g) & v)) {
13                 if((dp[g][(v | (1 << g))].first + dist[c][g]) < dp[c][v].first)
14                     {
15                         dp[c][v].first = dp[g][(v | (1 << g))].first + dist[c][g];
16                         dp[c][v].second = g;
17                     }
18             }
19         }
20     }
21     vector<int> res; res.push_back(0); int v = 0;
22     while(res.back() != 0 || res.size() == 1) {
23         res.push_back(dp[res.back()][(v | (1 << res.back()))].second);
24     }
25     return res; // Enthält Knoten 0 zweimal. An erster und letzter Position
26 }

```

2.11 Bitonic TSP

```

1 // Laufzeit: O(|V|^2)
2 vector< vector<double> > dp; // Initialisiere mit -1
3 vector< vector<double> > dist; // Initialisiere mit Entfernungen zwischen
4 // Punkten.
5 vector<int> lr, rl; // Links-nach-rechts und rechts-nach-links Pfade.
6 int n; // #Knoten
7 // get(0, 0) gibt die Länge der kürzesten bitonischen Route.
8 double get(int p1, int p2) {
9     int v = max(p1, p2) + 1;
10    if (v == n - 1) return dist[p1][v] + dist[v][p2];
11    if (dp[p1][p2] > -0.5) return dp[p1][p2];
12    double tryLR = dist[p1][v] + get(v, p2), tryRL = dist[v][p2] + get(p1,
13        v);
14    if (tryLR < tryRL) lr.push_back(v); // Baut die Pfade auf. Fügt v zu rl
15        hinzu, falls beide gleich teuer.
16    else rl.push_back(v); // Ändert das, falls nötig.
17    return min(tryLR, tryRL);
18 }

```

3 Geometrie

3.1 Closest Pair

```

1 double squaredDist(point a, point b) {
2     return (a.first-b.first) * (a.first-b.first) + (a.second-b.second) * (a
3         .second-b.second);
4 }

```

```

4 bool compY(point a, point b) {
5     if (a.second == b.second) return a.first < b.first;
6     return a.second < b.second;
7 }
8
9 double shortestDist(vector<point> &points) {
10    //check that points.size() > 1 and that ALL POINTS ARE DIFFERENT
11    set<point, bool(*) (point, point)> status(compY);
12    sort(points.begin(), points.end());
13    double opt = 1e30, sqrtOpt = 1e15;
14    auto left = points.begin(), right = points.begin();
15    status.insert(*right); right++;
16
17    while (right != points.end()) {
18        if (fabs(left->first - right->first) >= sqrtOpt) {
19            status.erase(*(left++));
20        } else {
21            auto lower = status.lower_bound(point(-1e20, right->second -
22                sqrtOpt));
23            auto upper = status.upper_bound(point(-1e20, right->second +
24                sqrtOpt));
25            while (lower != upper) {
26                double cand = squaredDist(*right, *lower);
27                if (cand < opt) {
28                    opt = cand;
29                    sqrtOpt = sqrt(opt);
30                }
31                ++lower;
32            }
33            status.insert(*(right++));
34        }
35    }
36    return sqrtOpt;
37 }

```

3.2 Geraden

```

1 struct pt { //complex<double> does not work here, because we need to set
2     // pt.x and pt.y
3     double x, y;
4     pt() {};
5     pt(double x, double y) : x(x), y(y) {};
6 };
7
8 struct line {
9     double a, b, c; //a*x+b*y+c, b=0 ==> vertical line, b=1 ==> otherwise
10 };
11
12 line pointsToLine(pt p1, pt p2) {
13     line l;
14     if (fabs(p1.x - p2.x) < EPSILON) {
15         l.a = 1; l.b = 0.0; l.c = -p1.x;
16     }
17 }

```

```

15 } else {
16     l.a = -(double)(p1.y - p2.y) / (p1.x - p2.x);
17     l.b = 1.0;
18     l.c = -(double)(l.a * p1.x) - p1.y;
19 }
20 return l;
21 }
22
23 bool areParallel(line l1, line l2) {
24     return (fabs(l1.a - l2.a) < EPSILON) && (fabs(l1.b - l2.b) < EPSILON);
25 }
26
27 bool areSame(line l1, line l2) {
28     return areParallel(l1, l2) && (fabs(l1.c - l2.c) < EPSILON);
29 }
30
31 bool areIntersect(line l1, line l2, pt &p) {
32     if (areParallel(l1, l2)) return false;
33     p.x = (l2.b * l1.c - l1.b * l2.c) / (l2.a * l1.b - l1.a * l2.b);
34     if (fabs(l1.b) > EPSILON) p.y = -(l1.a * p.x + l1.c);
35     else p.y = -(l2.a * p.x + l2.c);
36     return true;
37 }

```

3.3 Konvexe Hülle

```

1 // Laufzeit: O(n*log(n))
2 typedef pair<ll, ll> pt;
3
4 // >0 => PAB dreht gegen den Uhrzeigersinn.
5 // <0 => PAB dreht im Uhrzeigersinn.
6 // =0 => PAB sind kollinear.
7 ll cross(const pt p, const pt a, const pt b) {
8     return (a.first - p.first) * (b.second - p.second) -
9           (a.second - p.second) * (b.first - p.first);
10 }
11
12 // Punkte auf der konvexen Hülle, gegen den Uhrzeigersinn sortiert.
13 // Kollineare Punkte sind nicht enthalten. Entferne "=" im CCW-Test um
14 // sie aufzunehmen.
15 // Achtung: Der erste und letzte Punkt im Ergebnis sind gleich.
16 // Achtung: Alle Punkte müssen verschieden sein.
17 vector<pt> convexHull(vector<pt> p){
18     int n = p.size(), k = 0;
19     vector<pt> h(2 * n);
20     sort(p.begin(), p.end());
21     // Untere Hülle.
22     for (int i = 0; i < n; i++) {
23         while (k >= 2 && cross(h[k - 2], h[k - 1], p[i]) <= 0.0) k--;
24         h[k++] = p[i];
25     }
26     // Obere Hülle.
27     for (int i = n - 2, t = k + 1; i >= 0; i--) {

```

```

27 while (k >= t && cross(h[k - 2], h[k - 1], p[i]) <= 0.0) k--;
28 h[k++] = p[i];
29 }
30 h.resize(k);
31 return h;
32 }

```

3.4 Formeln - std::complex

```

1 // Komplexe Zahlen als Darstellung für Punkte.
2 // Wenn immer möglich complex<int> verwenden. Achtung: Funktionen wie abs
3 // () geben dann int zurück.
4 typedef pt complex<double>;
5
6 // Winkel zwischen Punkt und x-Achse in [0, 2 * PI), Winkel zwischen a
7 // und b.
8 double angle = arg (a), angle_a_b = arg (a - b);
9
10 // Punkt rotiert um Winkel theta.
11 pt a_rotated = a * exp (pt (0, theta));
12
13 // Mittelpunkt des Dreiecks abc.
14 pt centroid = (a + b + c) / 3.0;
15
16 // Skalarprodukt.
17 double dot(pt a, pt b) {
18     return real(conj(a) * b);
19 }
20
21 // Kreuzprodukt, 0, falls kollinear.
22 double cross(pt a, pt b) {
23     return imag(conj(a) * b);
24 }
25
26 // Flächeninhalt eines Dreiecks bei bekannten Eckpunkten.
27 double areaOfTriangle(pt a, pt b, pt c) {
28     return abs(cross(b - a, c - a)) / 2.0;
29 }
30
31 // Flächeninhalt eines Dreiecks bei bekannten Seitenlängen.
32 double areaOfTriangle(double a, double b, double c) {
33     double s = (a + b + c) / 2;
34     return sqrt(s * (s-a) * (s-b) * (s-c));
35 }
36
37 // Sind die Dreiecke a1, b1, c1, und a2, b2, c2 ähnlich?
38 // Erste Zeile testet Ähnlichkeit mit gleicher Orientierung,
39 // zweite Zeile testet Ähnlichkeit mit unterschiedlicher Orientierung
40 bool similar (pt a1, pt b1, pt c1, pt a2, pt b2, pt c2) {
41     return (
42         (b2 - a2) * (c1 - a1) == (b1 - a1) * (c2 - a2) ||
43         (b2 - a2) * (conj (c1) - conj (a1)) == (conj (b1) - conj (a1)) * (c2
44             - a2)

```

```

42 );
43 }
44
45 // -1 => gegen den Uhrzeigersinn, 0 => kollinear, 1 => im Uhrzeigersinn.
46 // Einschränken der Rückgabe auf [-1,1] ist sicherer gegen Overflows.
47 double orientation(pt a, pt b, pt c) {
48     double orien = cross(b - a, c - a);
49     if (abs(orien) < EPSILON) return 0; // Might need large EPSILON: ~1e-6
50     return orien < 0 ? -1 : 1;
51 }
52
53 // Test auf Streckenschnitt zwischen a-b und c-d.
54 bool lineSegmentIntersection(pt a, pt b, pt c, pt d) {
55     if (orientation(a, b, c) == 0 && orientation(a, b, d) == 0) { // Falls
        kollinear.
56         double dist = abs(a - b);
57         return (abs(a - c) <= dist && abs(b - c) <= dist) || (abs(a - d) <=
            dist && abs(b - d) <= dist);
58     }
59     return orientation(a, b, c) * orientation(a, b, d) <= 0 && orientation(
        c, d, a) * orientation(c, d, b) <= 0;
60 }
61
62 // Berechnet die Schnittpunkte der Strecken a-b und c-d.
63 // Enthält entweder keinen Punkt, den einzigen Schnittpunkt oder die
    Endpunkte der Schnittstrecke.
64 // Achtung: operator<, min, max müssen selbst geschrieben werden!
65 vector<pt> lineSegmentIntersection(pt a, pt b, pt c, pt d) {
66     vector<pt> result;
67     if (orientation(a, b, c) == 0 && orientation(a, b, d) == 0 &&
        orientation(c, d, a) == 0 && orientation(c, d, b) == 0) {
68         pt minAB = min(a, b), maxAB = max(a, b), minCD = min(c, d), maxCD =
            max(c, d);
69         if (minAB < minCD && maxAB < minCD) return result;
70         if (minCD < minAB && maxCD < minAB) return result;
71         pt start = max(minAB, minCD), end = min(maxAB, maxCD);
72         result.push_back(start);
73         if (start != end) result.push_back(end);
74         return result;
75     }
76     double x1 = real(b) - real(a), y1 = imag(b) - imag(a);
77     double x2 = real(d) - real(c), y2 = imag(d) - imag(c);
78     double u1 = (-y1 * (real(a) - real(c)) + x1 * (imag(a) - imag(c))) / (-
        x2 * y1 + x1 * y2);
79     double u2 = (x2 * (imag(a) - imag(c)) - y2 * (real(a) - real(c))) / (-
        x2 * y1 + x1 * y2);
80     if (u1 >= 0 && u1 <= 1 && u2 >= 0 && u2 <= 1) {
81         double x = real(a) + u2 * x1, y = imag(a) + u2 * y1;
82         result.push_back(pt(x, y));
83     }
84     return result;
85 }
86
87 // Entfernung von Punkt p zur Geraden durch a-b.
88 double distToLine(pt a, pt b, pt p) {

```

```

90     return abs(cross(p - a, b - a)) / abs(b - a);
91 }
92
93 // Liegt p auf der Geraden a-b?
94 bool pointOnLine(pt a, pt b, pt p) {
95     return orientation(a, b, p) == 0;
96 }
97
98 // Liegt p auf der Strecke a-b?
99 bool pointOnLineSegment(pt a, pt b, pt p) {
100     if (orientation(a, b, p) != 0) return false;
101     return real(p) >= min(real(a), real(b)) && real(p) <= max(real(a), real
        (b)) &&
102         imag(p) >= min(imag(a), imag(b)) && imag(p) <= max(imag(a), imag(b)
        );
103 }
104
105 // Entfernung von Punkt p zur Strecke a-b.
106 double distToSegment(pt a, pt b, pt p) {
107     if (a == b) return abs(p - a);
108     double segLength = abs(a - b);
109     double u = ((real(p) - real(a)) * (real(b) - real(a)) +
        (imag(p) - imag(a)) * (imag(b) - imag(a))) /
110         (segLength * segLength);
111     pt projection(real(a) + u * (real(b) - real(a)), imag(a) + u * (imag(
        b) - imag(a)));
112     double projectionDist = abs(p - projection);
113     if (!pointOnLineSegment(a, b, projection)) projectionDist = 1e30;
114     return min(projectionDist, min(abs(p - a), abs(p - b)));
115 }
116
117 // Kürzeste Entfernung zwischen den Strecken a-b und c-d.
118 double distBetweenSegments(pt a, pt b, pt c, pt d) {
119     if (lineSegmentIntersection(a, b, c, d)) return 0.0;
120     double result = distToSegment(a, b, c);
121     result = min(result, distToSegment(a, b, d));
122     result = min(result, distToSegment(c, d, a));
123     return min(result, distToSegment(c, d, b));
124 }
125
126 // Liegt d in der gleichen Ebene wie a, b, und c?
127 bool isCoplanar(pt a, pt b, pt c, pt d) {
128     return abs((b - a) * (c - a) * (d - a)) < EPSILON;
129 }
130
131 // Berechnet den Flächeninhalt eines Polygons (nicht selbstschneidend).
132 double areaOfPolygon(vector<pt> &polygon) { // Jeder Eckpunkt nur einmal
    im Vektor.
133     double res = 0; int n = polygon.size();
134     for (int i = 0; i < n; i++)
135         res += real(polygon[i]) * imag(polygon[(i + 1) % n]) - real(polygon[(
            i + 1) % n]) * imag(polygon[i]);
136     return 0.5 * res; // Positiv, wenn Punkte gegen den Uhrzeigersinn
        gegeben sind. Sonst negativ.
137 }
138 }

```

```

139
140 // Testet, ob sich zwei Rechtecke (p1, p2) und (p3, p4) schneiden (
    jeweils gegenüberliegende Ecken).
141 bool rectIntersection(pt p1, pt p2, pt p3, pt p4) {
142     double minx12 = min(real(p1), real(p2)), maxx12 = max(real(p1), real(p2)
    );
143     double minx34 = min(real(p3), real(p4)), maxx34 = max(real(p3), real(p4)
    );
144     double miny12 = min(imag(p1), imag(p2)), maxy12 = max(imag(p1), imag(p2)
    );
145     double miny34 = min(imag(p3), imag(p4)), maxy34 = max(imag(p3), imag(p4)
    );
146     return (maxx12 >= minx34) && (maxx34 >= minx12) && (maxy12 >= miny34)
    && (maxy34 >= miny12);
147 }
148
149 // Testet, ob ein Punkt im Polygon liegt (beliebige Polygone).
150 bool pointInPolygon(pt p, vector<pt> &polygon) { // Jeder Eckpunkt nur
    einmal im Vektor.
151     pt rayEnd = p + pt(1, 1000000);
152     int counter = 0, n = polygon.size();
153     for (int i = 0; i < n; i++) {
154         pt start = polygon[i], end = polygon[(i + 1) % n];
155         if (lineSegmentIntersection(p, rayEnd, start, end)) counter++;
156     }
157     return counter & 1;
158 }

```

4 Mathe

4.1 ggT, kgV, erweiterter euklidischer Algorithmus

```

1 // Laufzeiten: O(log(a) + log(b))
2 ll gcd(ll a, ll b) {
3     return b == 0 ? a : gcd(b, a % b);
4 }
5
6 ll lcm(ll a, ll b) {
7     return a * (b / gcd(a, b)); // Klammern gegen Overflow.
8 }

```

```

1 // Accepted in Aufgabe mit Forderung: |X|+|Y| minimal (primaer) und X<=Y
    (sekundaer).
2 // Hab aber keinen Beweis dafuer :)
3 ll x, y, d; // a * x + b * y = d = ggT(a,b)
4 void extendedEuclid(ll a, ll b) {
5     if (!b) {
6         x = 1; y = 0; d = a; return;
7     }
8     extendedEuclid(b, a % b);
9     ll x1 = y; ll y1 = x - (a / b) * y;

```

```

10 x = x1; y = y1;
11 }

```

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 $\alpha x + \beta n \equiv \alpha x \equiv 1 \pmod{n}$.
- $x^{-1} := \alpha \pmod{n}$

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

```

1 // Laufzeit: O(log(n) + log(p))
2 ll multInv(ll n, ll p) { // Berechnet das multiplikative Inverse von n in
    F_p.
3     extendedEuclid(n, p); // Implementierung von oben.
4     x += ((x / p) + 1) * p;
5     return x % p;
6 }

```

4.2 Mod-Exponent über \mathbb{F}_p

```

1 // Laufzeit: O(log(b))
2 ll mult_mod(ll a, ll b, ll n) {
3     if(a == 0 || b == 0) return 0;
4     if(b == 1) return a % n;
5
6     if(b % 2 == 1) return (a + mult_mod(a, b-1, n)) % n;
7     else return mult_mod((a + a) % n, b / 2, n);
8 }
9
10 // Laufzeit: O(log(b))
11 ll pow_mod(ll a, ll b, ll n) {
12     if(b == 0) return 1;
13     if(b == 1) return a % n;
14
15     if(b % 2 == 1) return mult_mod(pow_mod(a, b-1, n), a, n);
16     else return pow_mod(mult_mod(a, a, n), b / 2, n);
17 }

```

4.3 LGS über \mathbb{F}_p

```

1 // Laufzeit: O(n^3)
2 void normalLine(ll n, ll line, ll p) { // Normalisiert Zeile line.
3     ll factor = multInv(mat[line][line], p); // Implementierung von oben.
4     for (ll i = 0; i <= n; i++) {
5         mat[line][i] *= factor;
6         mat[line][i] %= p;

```

```

7   }
8   }
9
10  void takeAll(ll n, ll line, ll p) { // Zieht Vielfaches von line von
    allen anderen Zeilen ab.
11      for (ll i = 0; i < n; i++) {
12          if (i == line) continue;
13          ll diff = mat[i][line];
14          for (ll j = 0; j <= n; j++) {
15              mat[i][j] -= (diff * mat[line][j]) % p;
16              while (mat[i][j] < 0) {
17                  mat[i][j] += p;
18              }
19          }
20      }
21  }
22
23  void gauss(ll n, ll p) { // nx(n+1)-Matrix, Koerper F_p.
24      for (ll line = 0; line < n; line++) {
25          normalline(n, line, p);
26          takeAll(n, line, p);
27      }
28  }

```

```

14      res %= M;
15  }
16  return res;
17  }
18
19  // Fügt Kongruenz l * x = r (mod m) hinzu.
20  void addEquation(ll l, ll r, ll m) {
21      lhs.push_back(l);
22      rhs.push_back(r);
23      module.push_back(m);
24  }
25
26  // Löst das System.
27  ll solve() {
28      M = accumulate(module.begin(), module.end(), 1ll(1), multiplies<ll>
        >());
29      inv.resize(lhs.size());
30      for (int i = 0; i < (int)lhs.size(); i++) {
31          ll x = (M / module[i]) % module[i];
32          inv[i] = (multInvers(x, module[i]) * (M / module[i]));
33      }
34      return (multInvers(g(lhs), M) * g(rhs)) % M;
35  }
36  };

```

4.4 Chinesischer Restsatz

- Extrem anfällig gegen Overflows. Evtl. häufig 128-Bit Integer verwenden.
- Direkte Formel für zwei Kongruenzen $x \equiv a \pmod n, x \equiv b \pmod m$:

$$x \equiv a - y * n * \frac{a - b}{d} \pmod{\frac{mn}{d}} \quad \text{mit} \quad d := \text{ggT}(n, m) = yn + zm$$

Formel kann auch für nicht teilerfremde Moduli verwendet werden.

- Sind die Moduli nicht teilerfremd, existiert genau dann eine Lösung, wenn $a_i \equiv a_j \pmod{\text{gcd}(m_i, m_j)}$. In diesem Fall sind keine Faktoren auf der linken Seite erlaubt.

```

1 // Laufzeit: O(n * log(n)), n := Anzahl der Kongruenzen
2 // Nur für teilerfremde Moduli.
3 // Berechnet das kleinste, nicht negative x, das die Kongruenzen simultan
  löst.
4 // Alle Lösungen sind kongruent zum kgV der Moduli (Produkt, falls alle
  teilerfremd sind).
5 struct ChineseRemainder {
6     typedef __int128 lll;
7     vector<lll> lhs, rhs, module, inv;
8     lll M; // Produkt über die Moduli. Kann leicht überlaufen.
9
10    ll g(vector<lll> &vec) {
11        lll res = 0;
12        for (int i = 0; i < (int)vec.size(); i++) {
13            res += (vec[i] * inv[i]) % M;

```

4.5 Primzahlsieb von ERATOSTHENES

```

1 // Laufzeit: O(n * log log n)
2 #define N 1000000001 // Bis 10^8 in unter 64MB Speicher.
3 bitset<N / 2> isPrime;
4
5 inline bool check(int x) { // Diese Methode zum Lookup verwenden.
6     if (x < 2) return false;
7     else if (x == 2) return true;
8     else if (!(x & 1)) return false;
9     else return !isPrime[x / 2];
10 }
11
12 inline int primeSieve(int n) { // Gibt die Anzahl der Primzahlen <= n zur
  rück.
13     int counter = 1;
14     for (int i = 3; i <= min(N, n); i += 2) {
15         if (!isPrime[i / 2]) {
16             for (int j = 3 * i; j <= min(N, n); j += 2 * i) isPrime[j / 2] = 1;
17             counter++;
18         }
19     }
20     return counter;
21 }

```

4.6 MILLER-RABIN-Primzahltest

```

1 // Theoretisch: n < 318,665,857,834,031,151,167,461 (> 10^23)
2 // Praktisch: n <= 10^18 (long long)
3 // Laufzeit: O(log n)
4 bool isPrime(ll n) {
5     if(n == 2) return true;
6     if(n < 2 || n % 2 == 0) return false;
7     ll d=n-1,j=0;
8     while(d % 2 == 0) d >>= 1, j++;
9     for(int a = 2; a <= min((ll)37, n-1); a++) {
10         ll v = pow_mod(a, d, n);
11         if(v == 1 || v == n-1) continue;
12         for(int i = 1; i <= j; i++) {
13             v = mult_mod(v, v, n);
14             if(v == n-1 || v <= 1) break;
15         }
16         if(v != n-1) return false;
17     }
18     return true;
19 }

```

4.7 Binomialkoeffizienten

Vorberechnen, wenn häufig benötigt.

```

1 // Laufzeit: O(k)
2 ll calc_binom(ll n, ll k) {
3     ll r = 1, d;
4     if (k > n) return 0;
5     for (d = 1; d <= k; d++) {
6         r *= n--;
7         r /= d;
8     }
9     return r;
10 }

```

4.8 Maximales Teilfeld

```

1 // N := Länge des Feldes.
2 // Laufzeit: O(N)
3 int maxStart = 1, maxLen = 0, curStart = 1, len = 0;
4 double maxValue = 0, sum = 0;
5 for (int pos = 0; pos < N; pos++) {
6     sum += values[pos];
7     len++;
8     if (sum > maxValue) { // Neues Maximum.
9         maxValue = sum; maxStart = curStart; maxLen = len;
10    }
11    if (sum < 0) { // Alles zurücksetzen.
12        curStart = pos + 2; len = 0; sum = 0;
13    }

```

```

14 }
15 // maxSum := maximaler Wert, maxStart := Startposition, maxLen := Länge
    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 Maximalen und Allem ohne dem Minimalen.

4.9 Polynome & FFT

Multipliziert Polynome A und B .

- $\deg(A * B) = \deg(A) + \deg(B)$
- Vektoren a und b müssen mindestens Größe $\deg(A * B) + 1$ haben. Größe muss eine Zweierpotenz sein.
- Für ganzzahlige Koeffizienten: `(int)round(real(a[i]))`

```

1 // Laufzeit: O(n log(n)).
2 typedef complex<double> cplx; // Eigene Implementierung ist noch deutlich
    schneller.
3 vector<cplx> fft(const vector<cplx> &a, bool inverse = 0) { // a.size()
    muss eine Zweierpotenz sein!
4     int logn = 1, n = a.size();
5     vector<cplx> A(n);
6     while ((1 << logn) < n) logn++;
7     for (int i = 0; i < n; i++) {
8         int j = 0;
9         for (int k = 0; k < logn; k++) j = (j << 1) | ((i >> k) & 1);
10        A[j] = a[i];
11    }
12    for (int s = 2; s <= n; s <= 1) {
13        double angle = 2 * PI / s * (inverse ? -1 : 1);
14        cplx ws(cos(angle), sin(angle));
15        for (int j = 0; j < n; j += s) {
16            cplx w = 1;
17            for (int k = 0; k < s / 2; k++) {
18                cplx u = A[j + k], t = A[j + s / 2 + k];
19                A[j + k] = u + w * t;
20                A[j + s / 2 + k] = u - w * t;
21                if (inverse) A[j + k] /= 2, A[j + s / 2 + k] /= 2;
22                w *= ws;
23            }
24        }
25    }
26    return A;
27 }
28
29 // Polynome: a[0] = a_0, a[1] = a_1, ... und b[0] = b_0, b[1] = b_1, ...
30 // Integer-Koeffizienten: Runde beim Auslesen der Koeffizienten: (int)
    round(a[i].real())
31 vector<cplx> a = {0,0,0,0,1,2,3,4}, b = {0,0,0,0,2,3,0,1};

```



```

32 a = fft(a); b = fft(b);
33 for (int i = 0; i < (int)a.size(); i++) a[i] *= b[i];
34 a = fft(a,1); // a = a * b

```

4.10 Kombinatorik

4.10.1 Berühmte Zahlen

FIBONACCI-Zahlen	$f(0) = 0$	$f(1) = 1$	$f(n+2) = f(n+1) + f(n)$	
CATALAN-Zahlen	$C_0 = 1$	$C_n = \sum_{k=0}^{n-1} C_k C_{n-1-k} = \frac{1}{n+1} \binom{2n}{n} = \frac{2(2n-1)}{n+1} \cdot C_{n-1}$		
EULER-Zahlen (I)	$\langle n \rangle_0 = \langle n \rangle_{n-1} = 1$	$\langle n \rangle_k = (k+1) \langle n-1 \rangle_k + (n-k) \langle n-1 \rangle_{k-1}$		
EULER-Zahlen (II)	$\langle\langle n \rangle\rangle_0 = 1$	$\langle\langle n \rangle\rangle_k = 0$	$\langle\langle n \rangle\rangle_k = (k+1) \langle\langle n-1 \rangle\rangle_k + (2n-k-1) \langle\langle n-1 \rangle\rangle_{k-1}$	
STIRLING-Zahlen (I)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 1$	$\begin{bmatrix} n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ n \end{bmatrix} = 0$	$\begin{bmatrix} n \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n-1 \\ k-1 \end{bmatrix} + (n-1) \begin{bmatrix} n-1 \\ k \end{bmatrix}$	
STIRLING-Zahlen (II)	$\begin{Bmatrix} n \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} n \\ n \end{Bmatrix} = 1$	$\begin{Bmatrix} n \\ k \end{Bmatrix} = k \begin{Bmatrix} n-1 \\ k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} n-1 \\ k-1 \end{Bmatrix}$		
Integer-Partitions	$f(1,1) = 1$	$f(n,k) = 0$ für $k > n$	$f(n,k) = f(n-k,k) + f(n,k-1)$	

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 nicht unterscheidbaren 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 (zwischen gegenüberliegenden Ecken) in einem $n \times n$ -Gitter, die nicht die Diagonale kreuzen.

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 Anstieg in zwei gesplittet 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 eigenen 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 Element $\leq k$.

4.10.2 Verschiedenes

Türme von Hanoi, minimale Schrittzahl:	$T_n = 2^n - 1$
#Regionen zwischen n Gearden	$n(n+1)/2 + 1$
#Abgeschlossene Regionen zwischen n Geraden	$(n^2 - 3n + 2)/2$
#Markierte, gewurzelte Bäume	n^{n-1}
#Markierte, nicht gewurzelte Bäume	n^{n-2}

4.11 Satz von SPRAGUE-GRUNDY

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

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

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

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

```

1 // Laufzeit: O(#game)
2 bool WinNimm(vector<int> game) {
3     int result = 0;
4     for(int s: game) result ^= s;
5     return s > 0;
6 }

```

4.12 3D-Kugeln

```

1 // Great Circle Distance mit Längen- und Breitengrad.
2 double gcDist(double pLat, double pLon, double qLat, double qLon, double
  radius) {
3     pLat *= PI / 180; pLon *= PI / 180; qLat *= PI / 180; qLon *= PI / 180;
4     return radius * acos(cos(pLat) * cos(pLon) * cos(qLat) * cos(qLon) +
5                           cos(pLat) * sin(pLon) * cos(qLat) * sin(qLon) +
6                           sin(pLat) * sin(qLat));
7 }
8
9 // Great Circle Distance mit kartesischen Koordinaten.
10 double gcDist(point p, point q) {
11     return acos(p.x * q.x + p.y * q.y + p.z * q.z);
12 }
13
14 // 3D Punkt in kartesischen Koordinaten.
15 struct point{
16     double x, y, z;
17     point() {}
18     point(double x, double y, double z) : x(x), y(y), z(z) {}
19     point(double lat, double lon) {
20         lat *= PI / 180.0; lon *= PI / 180.0;
21         x = cos(lat) * sin(lon); y = cos(lat) * cos(lon); z = sin(lat);
22     }
23 };

```

4.13 Big Integers

```

1 // Bislang keine Division. Multiplikation nach Schulmethode.
2 #define PLUS 0
3 #define MINUS 1
4 #define BASE 1000000000
5
6 struct bigint {
7     int sign;
8     vector<ll> digits;
9
10    // Initialisiert mit 0.
11    bigint(void) {
12        sign = PLUS;
13    }
14
15    // Initialisiert mit kleinem Wert.
16    bigint(ll value) {
17        if (value == 0) sign = PLUS;
18        else {
19            sign = value >= 0 ? PLUS : MINUS;
20            value = abs(value);
21            while (value) {
22                digits.push_back(value % BASE);
23                value /= BASE;

```

```

24    }
25    }
26 }
27
28 // Initialisiert mit C-String. Kann nicht mit Vorzeichen umgehen.
29 bigint(char *str, int length) {
30     int base = 1;
31     ll digit = 0;
32     for (int i = length - 1; i >= 0; i--) {
33         digit += base * (str[i] - '0');
34         if (base * 10 == BASE) {
35             digits.push_back(digit);
36             digit = 0;
37             base = 1;
38         } else base *= 10;
39     }
40     if (digit != 0) digits.push_back(digit);
41     sign = PLUS;
42 }
43
44 // Löscht führende Nullen und macht -0 zu 0.
45 void trim() {
46     while (digits.size() > 0 && digits[digits.size() - 1] == 0) digits.
47         pop_back();
48     if (digits.size() == 0 && sign == MINUS) sign = PLUS;
49 }
50
51 // Gibt die Zahl aus.
52 void print() {
53     if (digits.size() == 0) {
54         printf("0");
55         return;
56     }
57     if (sign == MINUS) printf("-");
58     printf("%lld", digits[digits.size() - 1]);
59     for (int i = digits.size() - 2; i >= 0; i--) {
60         printf("%09lld", digits[i]);
61     }
62 }
63
64 // Kleiner-oder-gleich-Vergleich.
65 bool operator<=(bigint &a, bigint &b) {
66     if (a.digits.size() == b.digits.size()) {
67         int idx = a.digits.size() - 1;
68         while (idx >= 0) {
69             if (a.digits[idx] < b.digits[idx]) return true;
70             else if (a.digits[idx] > b.digits[idx]) return false;
71             idx--;
72         }
73         return true;
74     }
75     return a.digits.size() < b.digits.size();
76 }
77

```



```

78 // Kleiner-Vergleich.
79 bool operator<(bigint &a, bigint &b) {
80     if (a.digits.size() == b.digits.size()) {
81         int idx = a.digits.size() - 1;
82         while (idx >= 0) {
83             if (a.digits[idx] < b.digits[idx]) return true;
84             else if (a.digits[idx] > b.digits[idx]) return false;
85             idx--;
86         }
87         return false;
88     }
89     return a.digits.size() < b.digits.size();
90 }
91
92 void sub(bigint *a, bigint *b, bigint *c);
93
94 // a+b=c. a, b, c dürfen gleich sein.
95 void add(bigint *a, bigint *b, bigint *c) {
96     if (a->sign == b->sign) c->sign = a->sign;
97     else {
98         if (a->sign == MINUS) {
99             a->sign ^= 1;
100             sub(b, a, c);
101             a->sign ^= 1;
102         } else {
103             b->sign ^= 1;
104             sub(a, b, c);
105             b->sign ^= 1;
106         }
107         return;
108     }
109
110     c->digits.resize(max(a->digits.size(), b->digits.size()));
111     ll carry = 0;
112     int i = 0;
113     for (; i < (int)min(a->digits.size(), b->digits.size()); i++) {
114         ll sum = carry + a->digits[i] + b->digits[i];
115         c->digits[i] = sum % BASE;
116         carry = sum / BASE;
117     }
118     if (i < (int)a->digits.size()) {
119         for (; i < (int)a->digits.size(); i++) {
120             ll sum = carry + a->digits[i];
121             c->digits[i] = sum % BASE;
122             carry = sum / BASE;
123         }
124     } else {
125         for (; i < (int)b->digits.size(); i++) {
126             ll sum = carry + b->digits[i];
127             c->digits[i] = sum % BASE;
128             carry = sum / BASE;
129         }
130     }
131     if (carry) {
132         c->digits.push_back(carry);

```

```

133     }
134 }
135
136 // a-b=c. c darf a oder b sein. a und b müssen verschieden sein.
137 void sub(bigint *a, bigint *b, bigint *c) {
138     if (a->sign == MINUS || b->sign == MINUS) {
139         b->sign ^= 1;
140         add(a, b, c);
141         b->sign ^= 1;
142         return;
143     }
144
145     if (a < b) {
146         sub(b, a, c);
147         c->sign = MINUS;
148         c->trim();
149         return;
150     }
151
152     c->digits.resize(a->digits.size());
153     ll borrow = 0;
154     int i = 0;
155     for (; i < (int)b->digits.size(); i++) {
156         ll diff = a->digits[i] - borrow - b->digits[i];
157         if (a->digits[i] > 0) borrow = 0;
158         if (diff < 0) {
159             diff += BASE;
160             borrow = 1;
161         }
162         c->digits[i] = diff % BASE;
163     }
164     for (; i < (int)a->digits.size(); i++) {
165         ll diff = a->digits[i] - borrow;
166         if (a->digits[i] > 0) borrow = 0;
167         if (diff < 0) {
168             diff += BASE;
169             borrow = 1;
170         }
171         c->digits[i] = diff % BASE;
172     }
173     c->trim();
174 }
175
176 // Ziffernmultiplikation a*b=c. b und c dürfen gleich sein. a muss
    kleiner BASE sein.
177 void digitMul(ll a, bigint *b, bigint *c) {
178     if (a == 0) {
179         c->digits.clear();
180         c->sign = PLUS;
181         return;
182     }
183     c->digits.resize(b->digits.size());
184     ll carry = 0;
185     for (int i = 0; i < (int)b->digits.size(); i++) {
186         ll prod = carry + b->digits[i] * a;

```

```

187     c->digits[i] = prod % BASE;
188     carry = prod / BASE;
189 }
190 if (carry) c->digits.push_back(carry);
191 c->sign = (a > 0) ? b->sign : 1 ^ b->sign;
192 c->trim();
193 }
194
195 // Zifferndivision b/a=c. b und c dürfen gleich sein. a muss kleiner BASE
    sein.
196 void digitDiv(ll a, bigint *b, bigint *c) {
197     c->digits.resize(b->digits.size());
198     ll carry = 0;
199     for (int i = (int)b->digits.size() - 1; i >= 0; i--) {
200         ll quot = (carry * BASE + b->digits[i]) / a;
201         carry = carry * BASE + b->digits[i] - quot * a;
202         c->digits[i] = quot;
203     }
204     c->sign = b->sign ^ (a < 0);
205     c->trim();
206 }
207
208 // a*b=c. c darf weder a noch b sein. a und b dürfen gleich sein.
209 void mult(bigint *a, bigint *b, bigint *c) {
210     bigint row = *a;
211     bigint tmp;
212     c->digits.clear();
213     for (int i = 0; i < (int)b->digits.size(); i++) {
214         digitMul(b->digits[i], &row, &tmp);
215         add(&tmp, c, c);
216         row.digits.insert(row.digits.begin(), 0);
217     }
218     c->sign = a->sign != b->sign;
219     c->trim();
220 }
221
222 // Berechnet eine kleine Zehnerpotenz.
223 inline ll pow10(int n) {
224     ll res = 1;
225     for (int i = 0; i < n; i++) res *= 10;
226     return res;
227 }
228
229 // Berechnet eine große Zehnerpotenz.
230 void power10(ll e, bigint *out) {
231     out->digits.assign(e / 9 + 1, 0);
232     if (e % 9) out->digits[out->digits.size() - 1] = pow10(e % 9);
233     else out->digits[out->digits.size() - 1] = 1;
234 }
235
236 // Nimmt eine Zahl module einer Zehnerpotenz 10^e.
237 void mod10(int e, bigint *a) {
238     int idx = e / 9;
239     if ((int)a->digits.size() < idx + 1) return;
240     if (e % 9) {

```

```

241         a->digits.resize(idx + 1);
242         a->digits[idx] %= pow10(e % 9);
243     } else {
244         a->digits.resize(idx);
245     }
246     a->trim();
247 }

```

5 Strings

5.1 KNUTH-MORRIS-PRATT-Algorithmus

```

1 // Laufzeit: O(n + m), n = #Text, m = #Pattern
2 vector<int> kmp_preprocessing(string &sub) {
3     vector<int> b(sub.length() + 1);
4     b[0] = -1;
5     int i = 0, j = -1;
6     while (i < (int)sub.length()) {
7         while (j >= 0 && sub[i] != sub[j]) j = b[j];
8         i++; j++;
9         b[i] = j;
10    }
11    return b;
12 }
13
14 vector<int> kmp_search(string &s, string &sub) {
15     vector<int> pre = kmp_preprocessing(sub);
16     vector<int> result;
17     int i = 0, j = 0;
18     while (i < (int)s.length()) {
19         while (j >= 0 && s[i] != sub[j]) j = pre[j];
20         i++; j++;
21         if (j == (int)sub.length()) {
22             result.push_back(i - j);
23             j = pre[j];
24         }
25     }
26     return result;
27 }

```

5.2 AHO-CORASICK-Automat

```

1 // Laufzeit: O(n + m + z), n = Suchstringlänge, m = Summe der Patternlängen, z = #Matches
2 // Findet mehrere Patterns gleichzeitig in einem String.
3 // 1) Wurzel erstellen: vertex *automaton = new vertex();
4 // 2) Mit addString(automaton, s, idx); Patterns hinzufügen.
5 // 3) finishAutomaton(automaton) aufrufen.

```

```

6 // 4) Mit automaton = go(automaton, c) in nächsten Zustand wechseln.
  DANACH: Wenn patterns-Vektor nicht leer
7 // ist: Hier enden alle enthaltenen Patterns.
8 // ACHTUNG: Die Zahlenwerte der auftretenden Buchstaben müssen zusammenhängend sein und bei 0 beginnen!
9 struct vertex {
10     vertex *next[ALPHABET_SIZE], *failure;
11     char character;
12     vector<int> patterns; // Indizes der Patterns, die hier enden.
13     vertex() { for (int i = 0; i < ALPHABET_SIZE; i++) next[i] = NULL; }
14 };
15
16 void addString(vertex *v, string &pattern, int patternIdx) {
17     for (int i = 0; i < (int)pattern.length(); i++) {
18         if (!v->next[(int)pattern[i]]) {
19             vertex *w = new vertex();
20             w->character = pattern[i];
21             v->next[(int)pattern[i]] = w;
22         }
23         v = v->next[(int)pattern[i]];
24     }
25     v->patterns.push_back(patternIdx);
26 }
27
28 void finishAutomaton(vertex *v) {
29     for (int i = 0; i < ALPHABET_SIZE; i++)
30         if (!v->next[i]) v->next[i] = v;
31
32     queue<vertex*> q;
33     for (int i = 0; i < ALPHABET_SIZE; i++) {
34         if (v->next[i] != v) {
35             v->next[i]->failure = v;
36             q.push(v->next[i]);
37         }
38     }
39     while (!q.empty()) {
40         vertex *r = q.front(); q.pop();
41         for (int i = 0; i < ALPHABET_SIZE; i++) {
42             if (r->next[i]) {
43                 q.push(r->next[i]);
44                 vertex *f = r->failure;
45                 while (f->next[i]) f = f->failure;
46                 r->next[i]->failure = f->next[i];
47                 for (int j = 0; j < (int)f->next[i]->patterns.size(); j++) {
48                     r->next[i]->patterns.push_back(f->next[i]->patterns[j]);
49                 }
50             }
51         }
52     }
53
54     vertex* go(vertex *v, char c) {
55         if (v->next[(int)c]) return v->next[(int)c];
56         else return go(v->failure, c);
57     }
58 }

```

5.3 LEVENSHTAIN-Distanz

```

1 // Laufzeit: O(nm), Speicher: O(m), n = #s1, m = #s2
2 int levenshtein(string& s1, string& s2) {
3     int len1 = s1.size(), len2 = s2.size();
4     vector<int> col(len2 + 1), prevCol(len2 + 1);
5     for (int i = 0; i < len2 + 1; i++) prevCol[i] = i;
6     for (int i = 0; i < len1; i++) {
7         col[0] = i + 1;
8         for (int j = 0; j < len2; j++)
9             col[j+1] = min(min(prevCol[j+1] + 1, col[j] + 1), prevCol[j] + (s1[i] == s2[j] ? 0 : 1));
10        col.swap(prevCol);
11    }
12    return prevCol[len2];
13 }

```

5.4 Trie

```

1 // Implementierung für Kleinbuchstaben.
2 struct node {
3     node *e[26];
4     int c = 0; // Anzahl der Wörter, die an diesem node enden.
5     node() { for(int i = 0; i < 26; i++) e[i] = NULL; }
6 };
7
8 void insert(node *root, string &txt, int s) { // Laufzeit: O(|txt|)
9     if(s == (int)txt.size()) root->c++;
10    else {
11        int idx = (int)(txt[s] - 'a');
12        if(root->e[idx] == NULL) root->e[idx] = new node();
13        insert(root->e[idx], txt, s+1);
14    }
15 }
16
17 int contains(node *root, string &txt, int s) { // Laufzeit: O(|txt|)
18     if(s == txt.size()) return root->c;
19     int idx = (int)(txt[s] - 'a');
20     if(root->e[idx] != NULL) return contains(root->e[idx], txt, s + 1);
21     else return 0;
22 }

```

5.5 Suffix-Array

```

1 //longest common substring in one string (overlapping not excluded)
2 //contains suffix array
3 :-----
4
5 int cmp(string &s, vector<vector<int>> &v, int i, int vi, int u, int l) {
6     int vi2 = (vi + 1) % 2, u2 = u + i / 2, l2 = l + i / 2;
7     if(i == 1) return s[u] - s[l];
8     else if (v[vi2][u] != v[vi2][l]) return (v[vi2][u] - v[vi2][l]);
9 }

```

```

7  else { //beide groesser tiff nicht mehr ein, da ansonsten vorher schon
    unterschied in Laenge
8      if(u2 >= s.length()) return -1;
9      else if(l2 >= s.length()) return 1;
10     else return v[vi2][u2] - v[vi2][l2];
11 }
12 }
13
14 string lcsb(string s) {
15     if(s.length() == 0) return "";
16     vector<int> a(s.length());
17     vector<vector<int>> v(2, vector<int>(s.length(), 0));
18     int vi = 0;
19     for(int k = 0; k < a.size(); k++) a[k] = k;
20     for(int i = 1; i <= s.length(); i *= 2, vi = (vi + 1) % 2) {
21         sort(a.begin(), a.end(), [&] (const int &u, const int &l) {
22             return cmp(s, v, i, vi, u, l) < 0;
23         });
24         v[vi][a[0]] = 0;
25         for(int z = 1; z < a.size(); z++) v[vi][a[z]] = v[vi][a[z-1]] + (cmp(
26             s, v, i, vi, a[z], a[z-1]) == 0 ? 0 : 1);
27     }
28
29     int r = 0, m=0, c=0;
30     for(int i = 0; i < a.size() - 1; i++) {
31         c = 0;
32         while(a[i]+c < s.length() && a[i+1]+c < s.length() && s[a[i]+c] == s[
33             a[i+1]+c]) c++;
34         if(c > m) r=i, m=c;
35     }
36     return m == 0 ? "" : s.substr(a[r], m);
37 }

```

```

16     return !(ui < s[u.s].length());
17 });
18 int r = 0, m=0, c=0;
19 for(int i = 0; i < a.size() - 1; i++) {
20     if(a[i].s == a[i+1].s) continue;
21     c = 0;
22     while(a[i].i+c < s[a[i].s].length() && a[i+1].i+c < s[a[i+1].s].
23         length() && s[a[i].s][a[i].i+c] == s[a[i+1].s][a[i+1].i+c]) c++;
24     if(c > m) r=i, m=c;
25 }
26 return m == 0 ? "" : s[a[r].s].substr(a[r].i, m);

```

5.7 Longest Common Subsequence

```

1 string lcsc(string &a, string &b) {
2     int m[a.length() + 1][b.length() + 1], x=0, y=0;
3     memset(m, 0, sizeof(m));
4     for(int y = a.length() - 1; y >= 0; y--) {
5         for(int x = b.length() - 1; x >= 0; x--) {
6             if(a[y] == b[x]) m[y][x] = 1 + m[y+1][x+1];
7             else m[y][x] = max(m[y+1][x], m[y][x+1]);
8         }
9     } //for length only: return m[0][0];
10    string res;
11    while(x < b.length() && y < a.length()) {
12        if(a[y] == b[x]) res += a[y++], x++;
13        else if(m[y][x+1] > m[y+1][x+1]) x++;
14        else y++;
15    }
16    return res;
17 }

```

5.6 Longest Common Substring

```

1 //longest common substring.
2 struct lcse {
3     int i = 0, s = 0;
4 };
5 string lcp(string s[2]) {
6     if(s[0].length() == 0 || s[1].length() == 0) return "";
7     vector<lcse> a(s[0].length()+s[1].length());
8     for(int k = 0; k < a.size(); k++) a[k].i=(k < s[0].length() ? k : k - s
9         [0].length()), a[k].s = (k < s[0].length() ? 0 : 1);
10    sort(a.begin(), a.end(), [&] (const lcse &u, const lcse &l) {
11        int ui = u.i, li = l.i;
12        while(ui < s[u.s].length() && li < s[l.s].length()) {
13            if(s[u.s][ui] < s[l.s][li]) return true;
14            else if(s[u.s][ui] > s[l.s][li]) return false;
15            ui++; li++;
16        }
17    }

```

6 Java

6.1 Introduction

- Compilen: javac main.java
- Ausführen: java main < sample.in
- Eingabe: Scanner ist sehr langsam. Bei großen Eingaben muss ein Buffered Reader verwendet werden.

```

1 Scanner in = new Scanner(System.in); // java.util.Scanner
2 String line = in.nextLine(); // Liest die nächste Zeile.
3 int num = in.nextInt(); // Liest das nächste Token als int.
4 double num2 = in.nextDouble(); // Liest das nächste Token als double

```

- Ausgabe:

```

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

```

6.2 BigInteger

```

1 // Berechnet this +,*,/,- val.
2 BigInteger add(BigInteger val), multiply(BigInteger val), divide(
  BigInteger val), subtract(BigInteger val)
3
4 // Berechnet this^e.
5 BigInteger pow(BigInteger e)
6
7 // Bit-Operationen.
8 BigInteger and(BigInteger val), or(BigInteger val), xor(BigInteger val),
  not(), shiftLeft(int n), shiftRight(int n)
9
10 // Berechnet den ggT von abs(this) und abs(val).
11 BigInteger gcd(BigInteger val)
12
13 // Berechnet this mod m, this^-1 mod m, this^e mod m.
14 BigInteger mod(BigInteger m), modInverse(BigInteger m), modPow(BigInteger
  e, BigInteger m)
15
16 // Berechnet die nächste Zahl, die größer und wahrscheinlich prim ist.
17 BigInteger nextProbablePrime()
18
19 // Berechnet int/long/float/double-Wert. Ist die Zahl zu groß werden
  // die niedrigsten Bits konvertiert.
20 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 Zeileneingabe

```

1 vector<string> split(string &s, string delim) { // Zerlegt s anhand aller
  // Zeichen in delim.
2   vector<string> result; char *token;
3   token = strtok((char*)s.c_str(), (char*)delim.c_str());
4   while (token != NULL) {
5     result.push_back(string(token));
6     token = strtok(NULL, (char*)delim.c_str());
7   }
8   return result;
9 }

```

7.3 Bit Operations

```

1 // Bit an Position j auslesen.
2 (a & (1 << j)) != 0
3 // Bit an Position j setzen.
4 a |= (1 << j)
5 // Bit an Position j löschen.
6 a &= ~(1 << j)
7 // Bit an Position j umkehren.
8 a ^= (1 << j)
9 // Wert des niedrigsten gesetzten Bits.
10 (a & -a)
11 // Setzt alle Bits auf 1.
12 a = -1
13 // Setzt die ersten n Bits auf 1. Achtung: Overflows.
14 a = (1 << n) - 1

```

7.4 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)

```

1 int rotateLeft(int n) { // Gibt Index des letzten Überlebenden zurück
  // ck, 1-basiert.
2   for (int i = 31; i >= 0; i--)
3     if (n & (1 << i)) {
4       n &= ~(1 << i);
5       break;
6     }
7   n <<= 1; n++; return n;
8 }

```

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: $F(1, k) = 0$.

```

1 int josephus(int n, int k) { // Gibt Index des letzten Überlebenden
    zurück, 0-basiert.
2     if (n == 1) return 0;
3     return (josephus(n - 1, k) + k) % n;
4 }

```

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

7.5 Gemischtes

- *JOHNSONS Reweighting Algorithmus*: Füge neue Quelle s hinzu, mit Kanten mit Gewicht 0 zu allen Knoten. Nutze BELLMANN-FORD zum Bestimmen 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 Gewicht 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 $s \rightarrow A$ mit Gewicht $w(A)$ und Kanten $B \rightarrow t$ 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 erreichbar sind und die Knoten in B , die von t erreichbar 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 8)
- **Tobi, cool down!**

7.6 Sonstiges

```

1 // Alles-Header.
2 #include <bits/stdc++.h>
3
4 // Setzt das deutsche Tastaturlayout.
5 setxkbmap de
6
7 // Schnelle Ein-/Ausgabe mit cin/cout.
8 ios::sync_with_stdio(false);
9
10 // Set mit eigener Sortierfunktion. Typ muss nicht explizit angegeben
    werden.
11 set<point2, decltype(comp)> set1(comp);
12
13 // PI
14 #define PI (2*acos(0))
15
16 // STL-Debugging, Compiler flags.
17 #define _GLIBCXX_DEBUG
18 #define _GLIBCXX_DEBUG
19
20 // 128-Bit Integer. Muss zum Einlesen/Ausgeben in einen int oder long
    long gecastet werden.
21 __int128

```