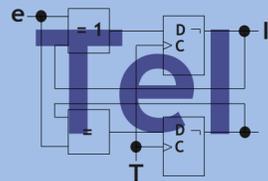


Topografiesimulation am Beispiel des zweidimensionalen Stringalgorithmus

Vortrag zum Proseminar

Peter Döhler

s5953323@mail.inf.tu-dresden.de



1. Topografiesimulation

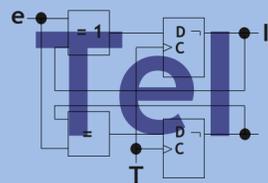
2. Aufgabe

3. Algorithmus

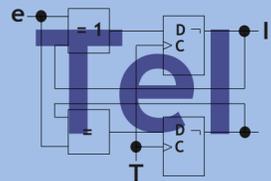
- Ansatz
- Segmentanpassung
- Realisierung

4. Ergebnisse

5. Aussichten



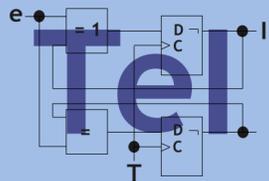
1. Topografiesimulation



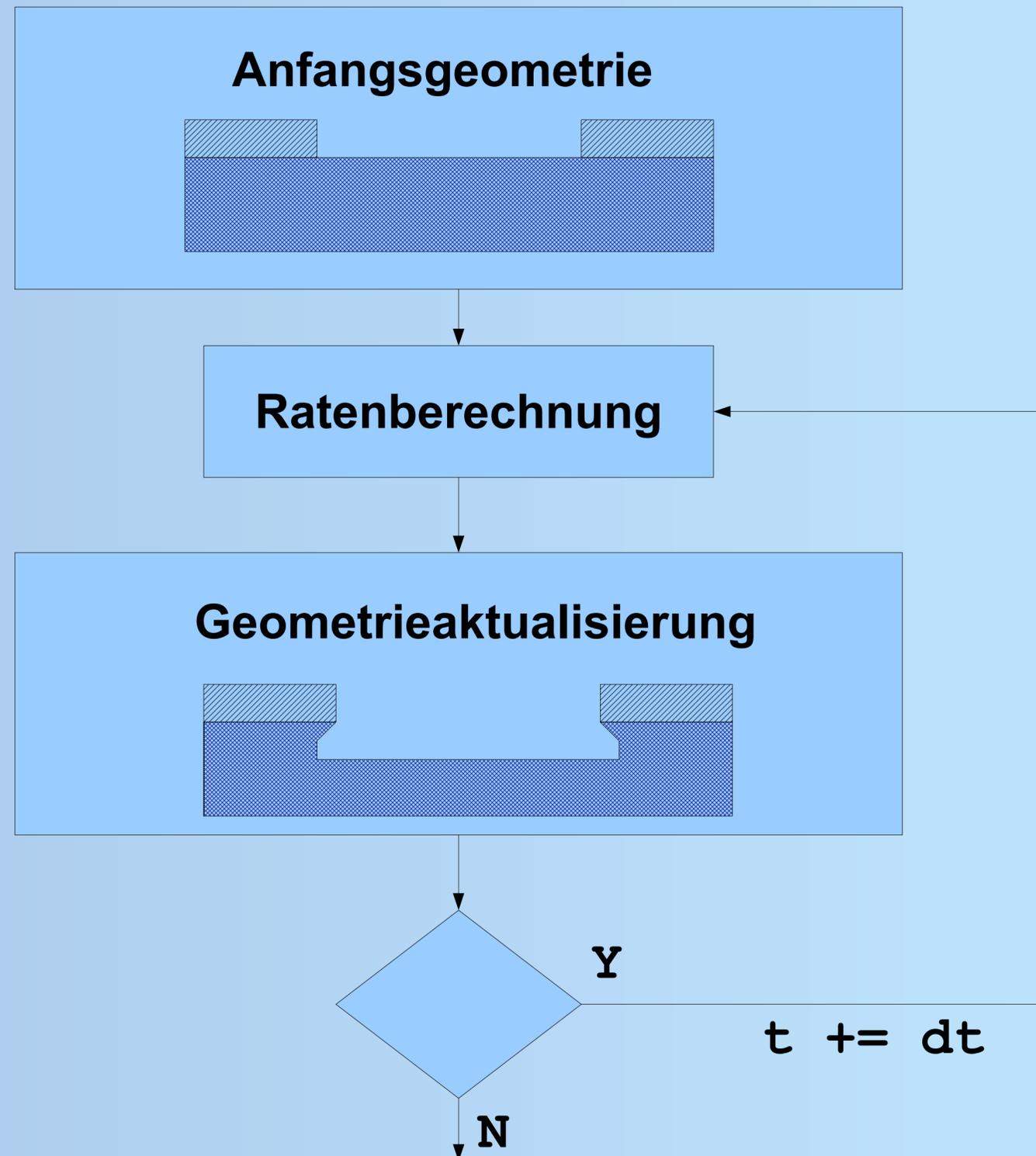
- Teil der Prozesssimulation
- Modifizierung einer Oberflächenkontur durch Ätz- oder Abscheideprozesse
- betrachtet wird dabei meistens eine funktionelle Struktureinheit (z.B. Transistor) → Berechnungsgebiet einige Mikrometer groß
- fast alle Topografiesimulations-Algorithmen arbeiten mit einer orts- und zeitdiskreten Darstellung
- **Ziel:** Bestimmung der aus einer Anfangskontur hervorgehende Kontur am Ende des Prozessschrittes in Abhängigkeit der Prozess-beeinflussenden Größen

Prozess-beeinflussende Faktoren

- Ätzrate des Schichtmaterials
 - unterschiedlich stark wirkende Belichtung
- Sichtbarkeit
 - Strahlätzverfahren
- Gerichtetheit des Ätzangriffs
 - isotrop
 - strahlrichtungsabhängig
 - oberflächenorientierungsabhängig
- Sekundäreffekte
 - chemisch passivierende Reaktionsprodukte

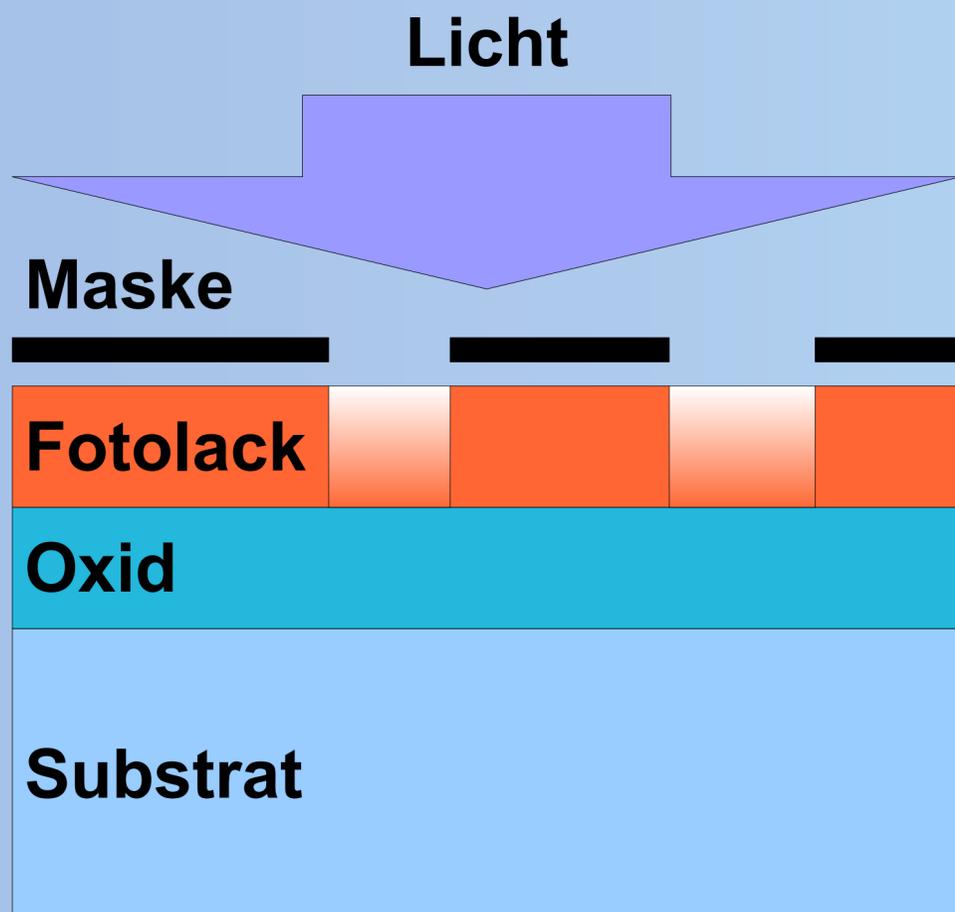


$t = 0$

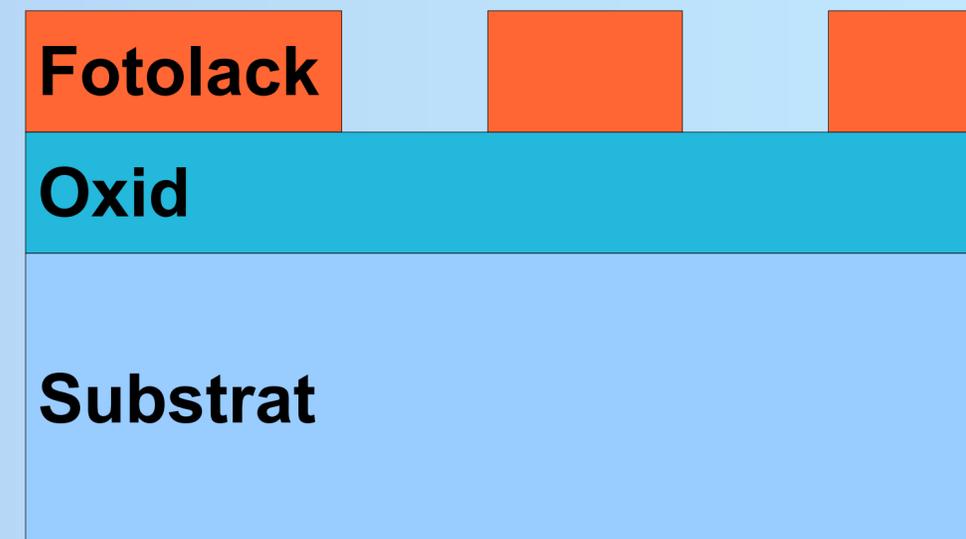


Beispiel – Selektives Ätzen

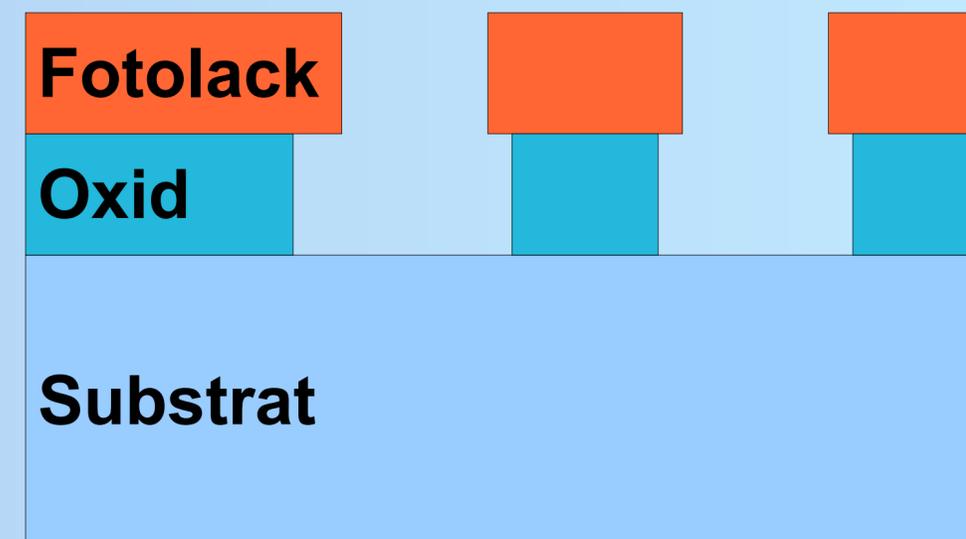
Belichten:



Selektiver Fotolackabtrag:

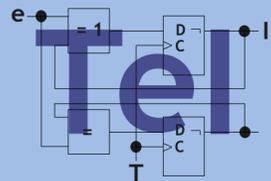


Selektives Ätzen:

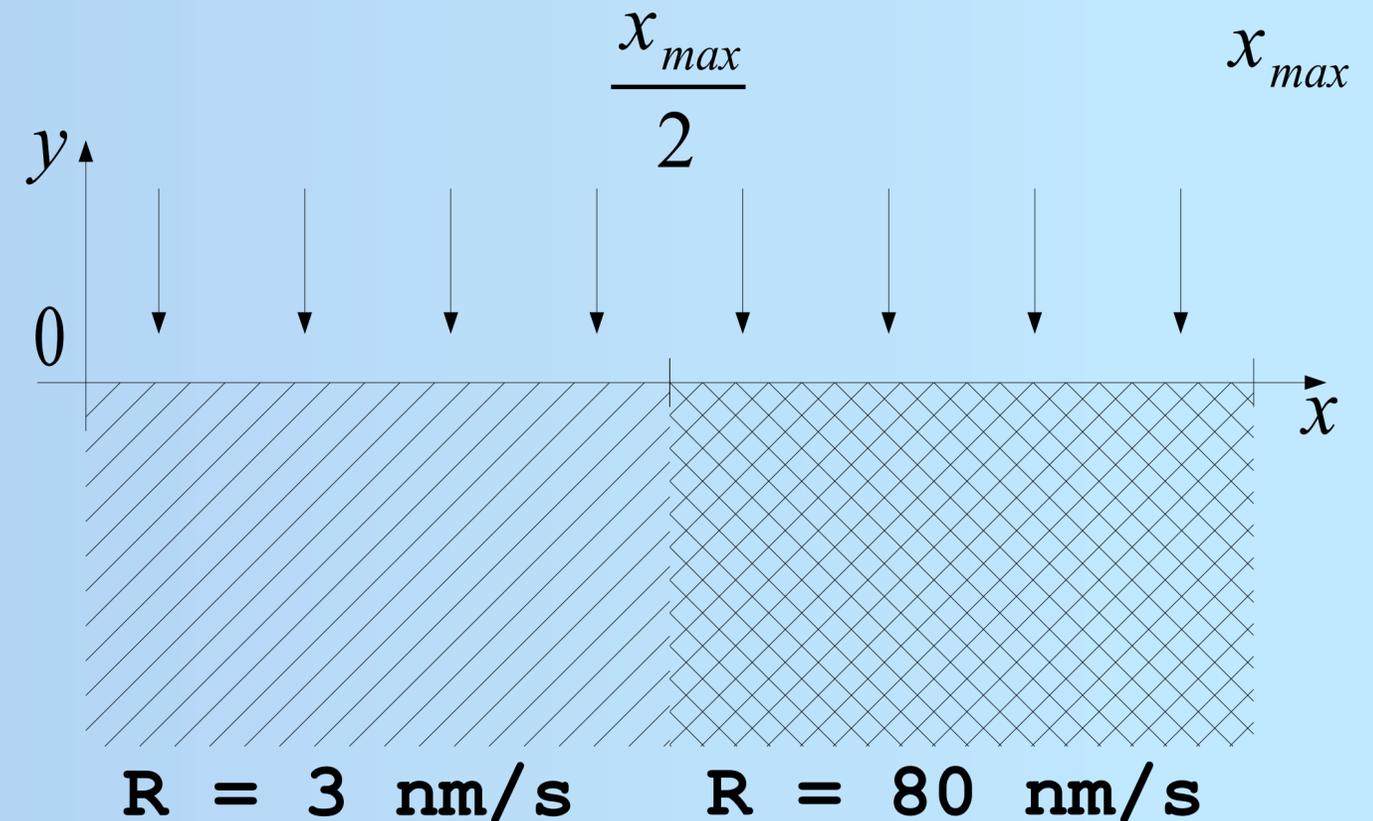


- Zellalgorithmus
- Geradenalgorithmus
- Stringalgorithmus

2. Aufgabe



- isotroper Ätzprozess auf vorgegebener Anfangsgeometrie
- Implementierung des zweidimensionalen Stringalgorithmus in C
- Variieren der Anfangssegmentlänge und des Zeitschrittes (*äquidistant*)
- Ausgabe der Profilkpunkte wahlweise auf Konsole oder in Textdatei (*Visualisierung mit GNU-Plot*)



$$x_{max} = 1 \mu\text{m}$$

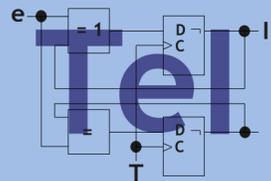
$$t = 1 \text{ min}$$

$$h = 0,1 \mu\text{m}$$

$$\Delta t = 1 \text{ s}$$

3. Algorithmus

Ansatz

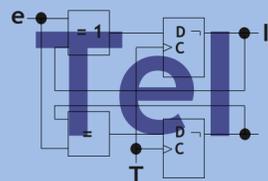


Beispiel - Selektiver Fotolackabtrag:

- isotroper Ätzprozess
- Punkt an Oberfläche bewegt sich mit einer der Ätzrate proportionalen Geschwindigkeit senkrecht in Oberfläche
- Ätzrate $R(x, y)$ kann aus relativen Inhibitorkonzentrationen $M(x, y)$, $M = \{0, 1\}$ berechnet werden
- $R(x, y) = f(M(x, y), \text{Lack}, \text{Entwickler})$
(Dill-, Kim-, Mack-Modell)
- $M(x, y)$ kann als Ergebnis der Fotolithografiesimulation vorliegen

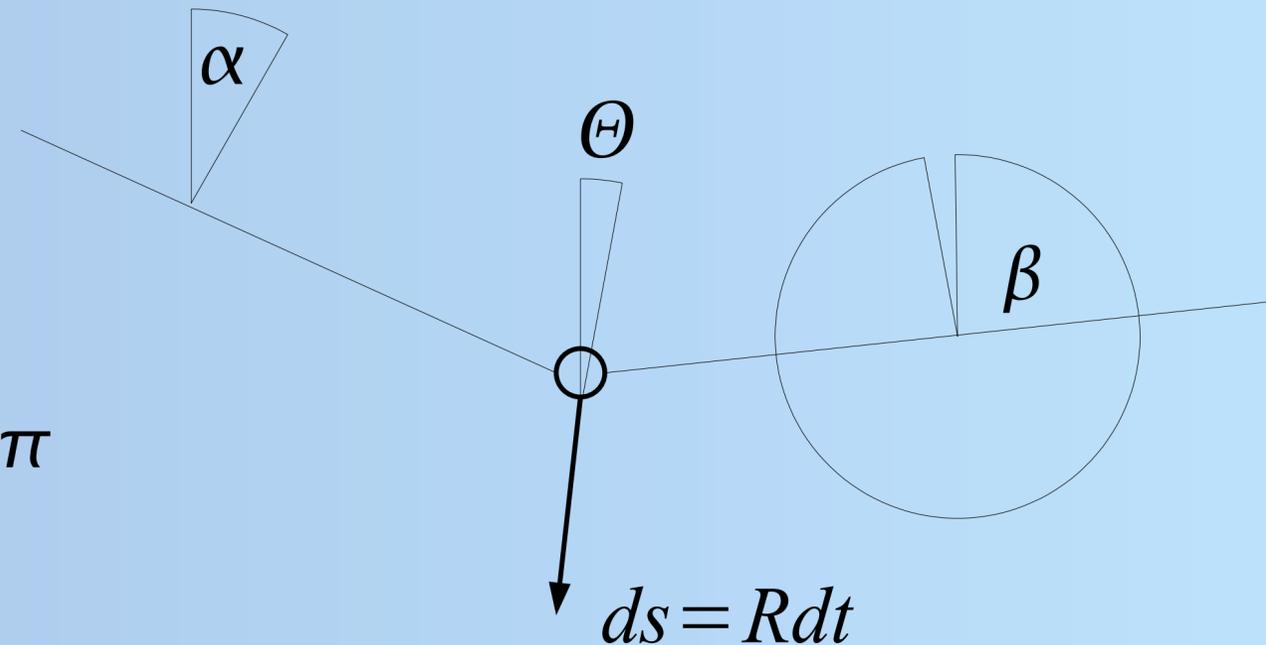
Zweidimensionaler Stringalgorithmus:

- Darstellung der Oberfläche durch Folge verketteter (String) Liniensegmente
- Beschreibung der Segmente durch Liste (LinkedList) der Verbindungspunkte zwischen den Segmenten
- Zeitschrittweise Berechnung der Bewegung jedes einzelnen Punktes $\mathbf{P}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ aus der zugeordneten Ätzrate $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ und der Orientierung der beiden angrenzenden Segmente



Punktbewegung:

$$\Theta = \frac{\alpha + \beta}{2} \bmod 2\pi$$



- Neue Punktkoordinaten ergeben sich aus Projektion der Punktverschiebung in die jeweilige Koordinatenrichtung

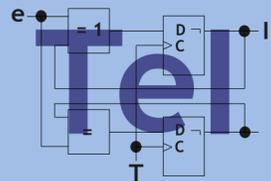
$$x' = x + \Delta s \sin \Theta$$

$$y' = y + \Delta s \cos \Theta$$

- um reguläres Verhalten der Berechnung zu sichern müssen die Eigenschaften des neuen Strings überprüft werden

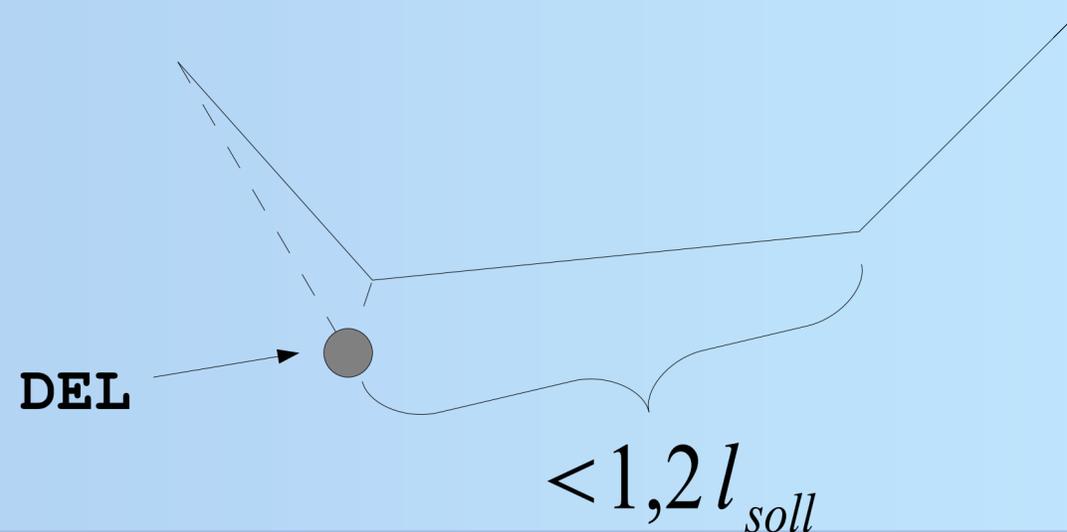
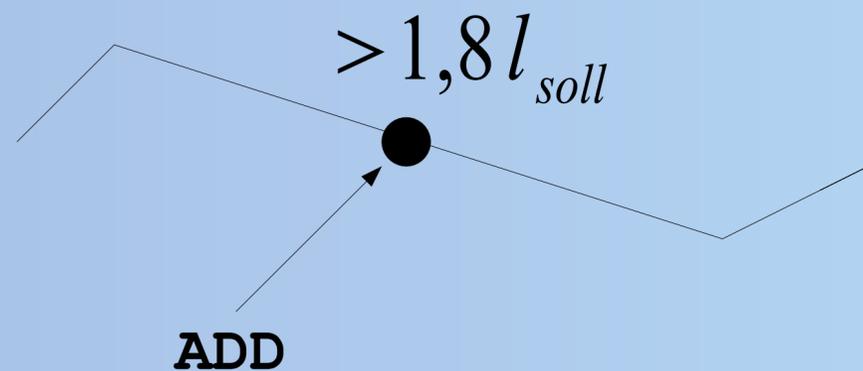
3. Algorithmus

Segmentanpassung



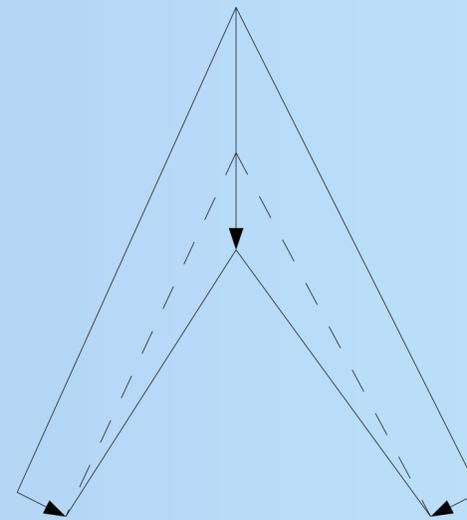
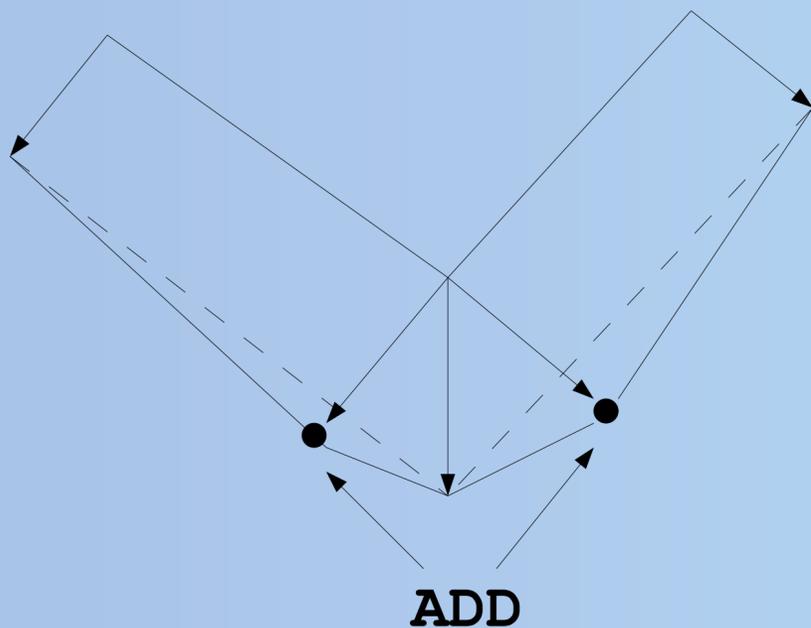
Segmentlängenkriterium:

- Segmentlänge ist Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit
- Segmentlänge soll innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben
 - halbiere Segment: $l_{seg} > 1,8 l_{soll}$
 - lösche Punkt: $l_{seg} + l_{next\ seg} < 1,2 l_{soll}$



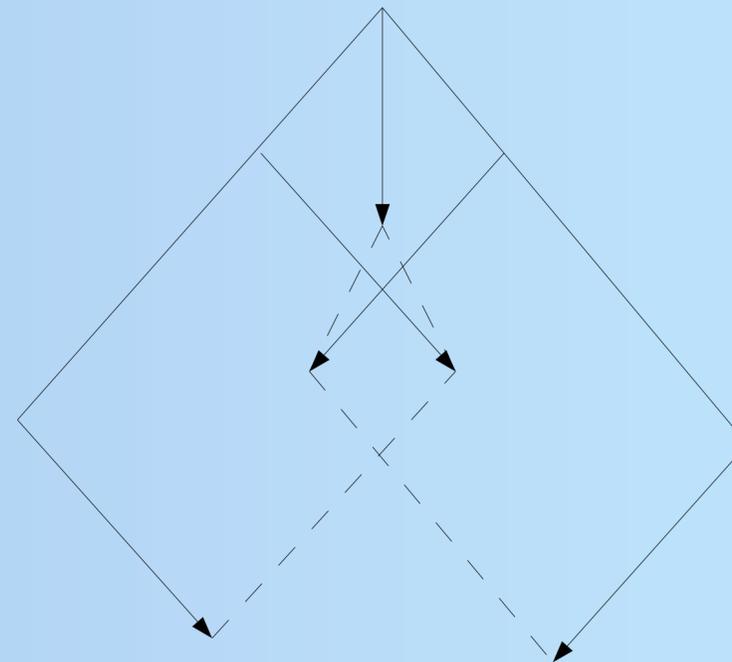
Winkelkriterium:

- notwendig für physikalisch korrektes Verhalten
- Unterscheidung von konkaven und konvexen Ecken
 - Konkav: Einfügen zusätzlicher Punkte
 - Konvex: Beschleunigung durch Faktor $k = \frac{1}{\sin \Theta}$



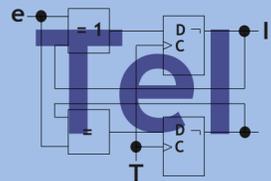
delooping:

- bewegen sich zwei Segmente in einem Zeitschritt zu weit aufeinander zu kann es zur Durchdringung kommen
- Prüfung ob der Schnittpunkt von je einem Segmenten-Paar innerhalb der Segmente selbst liegt
- Prüfung sollte nicht nach jedem Zeitschritt erfolgen da der Rechenaufwand sehr hoch ist

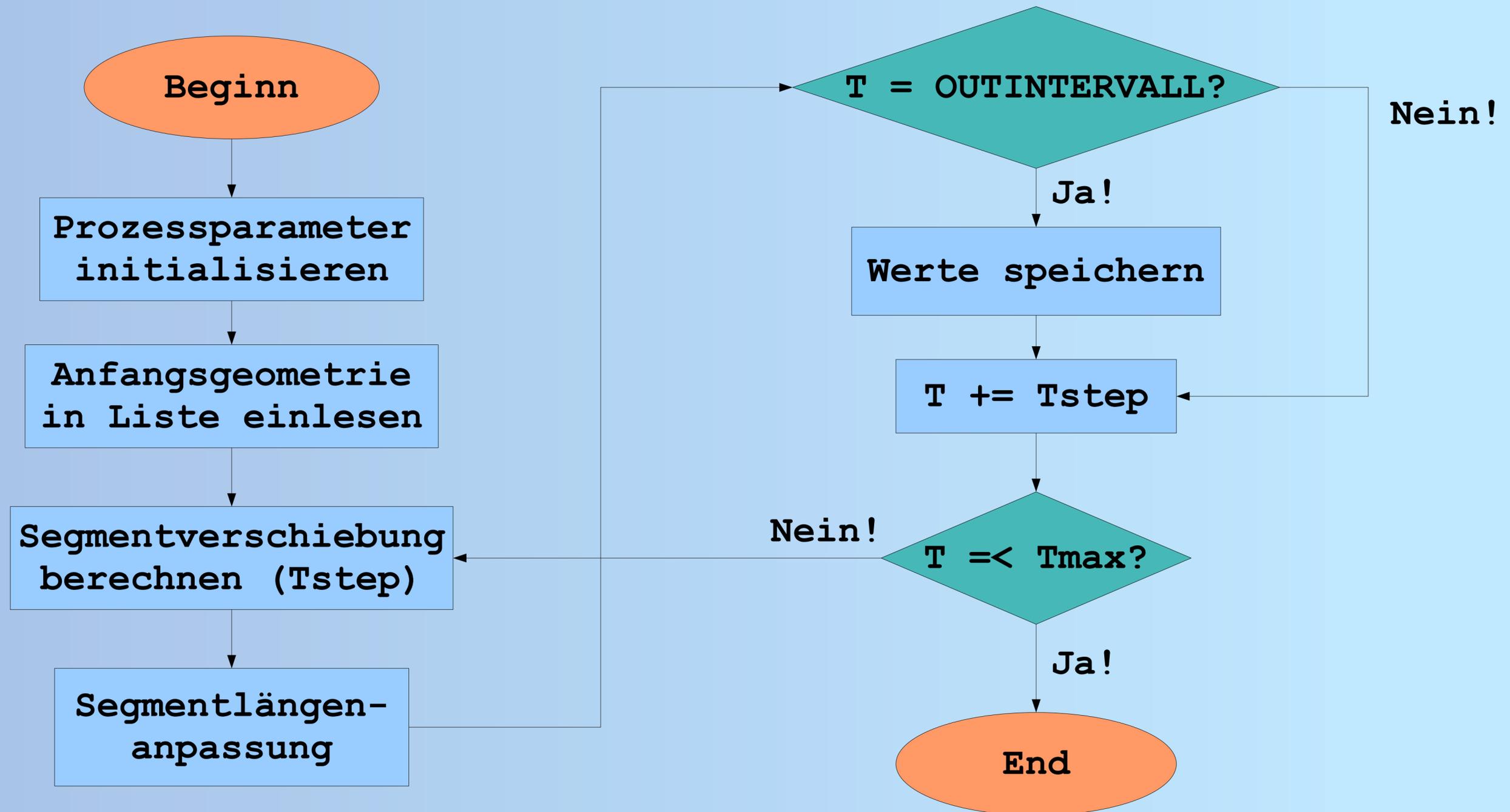


3. Algorithmus

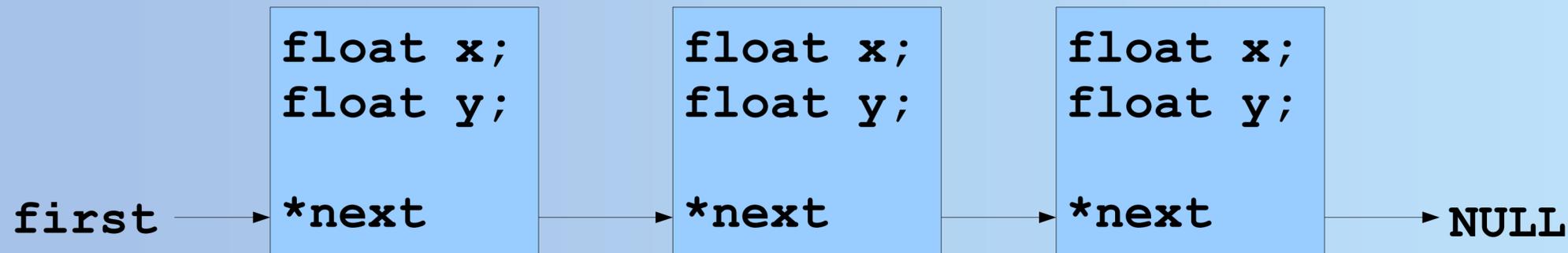
Realisierung



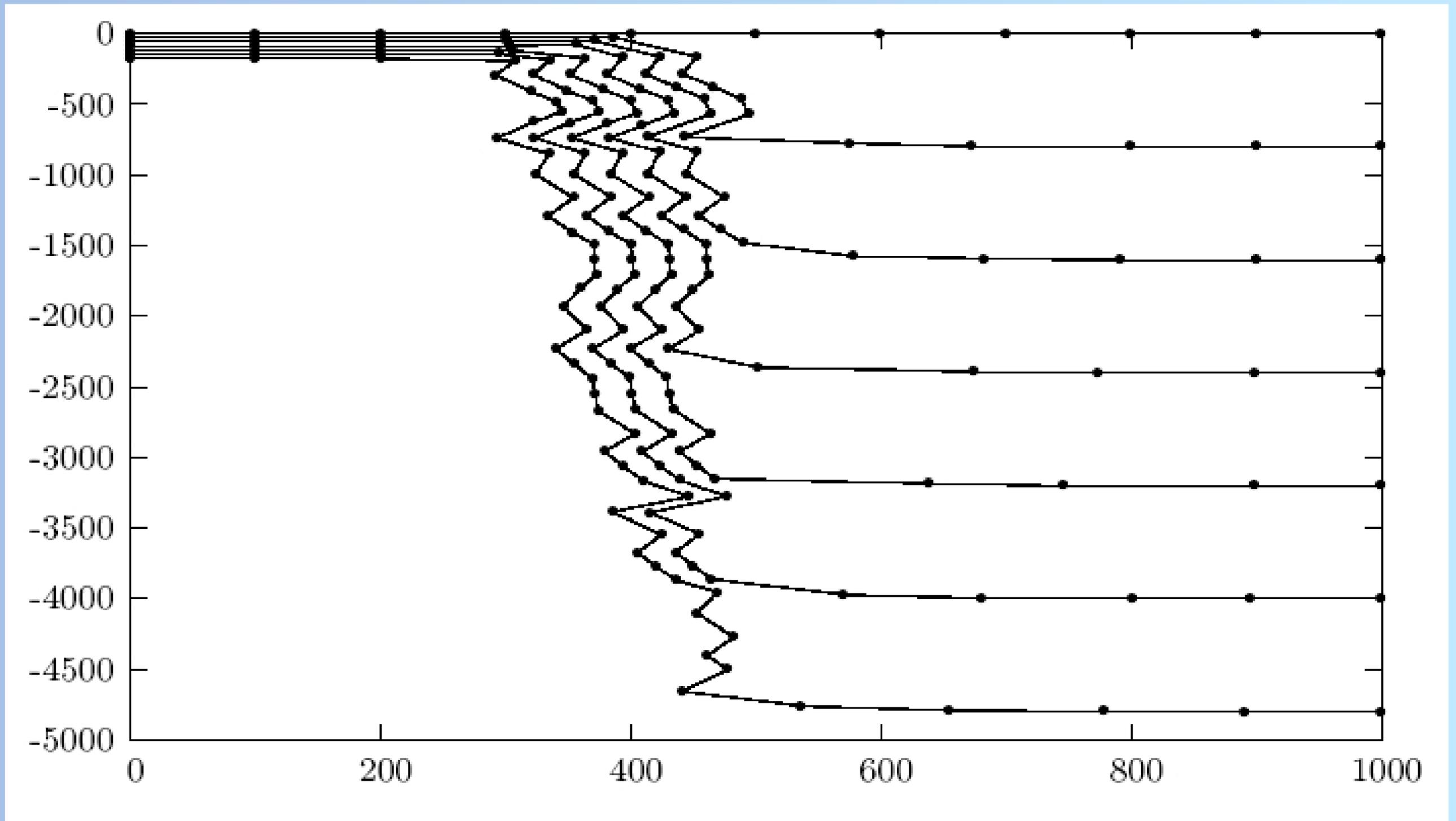
Programmablaufplan:



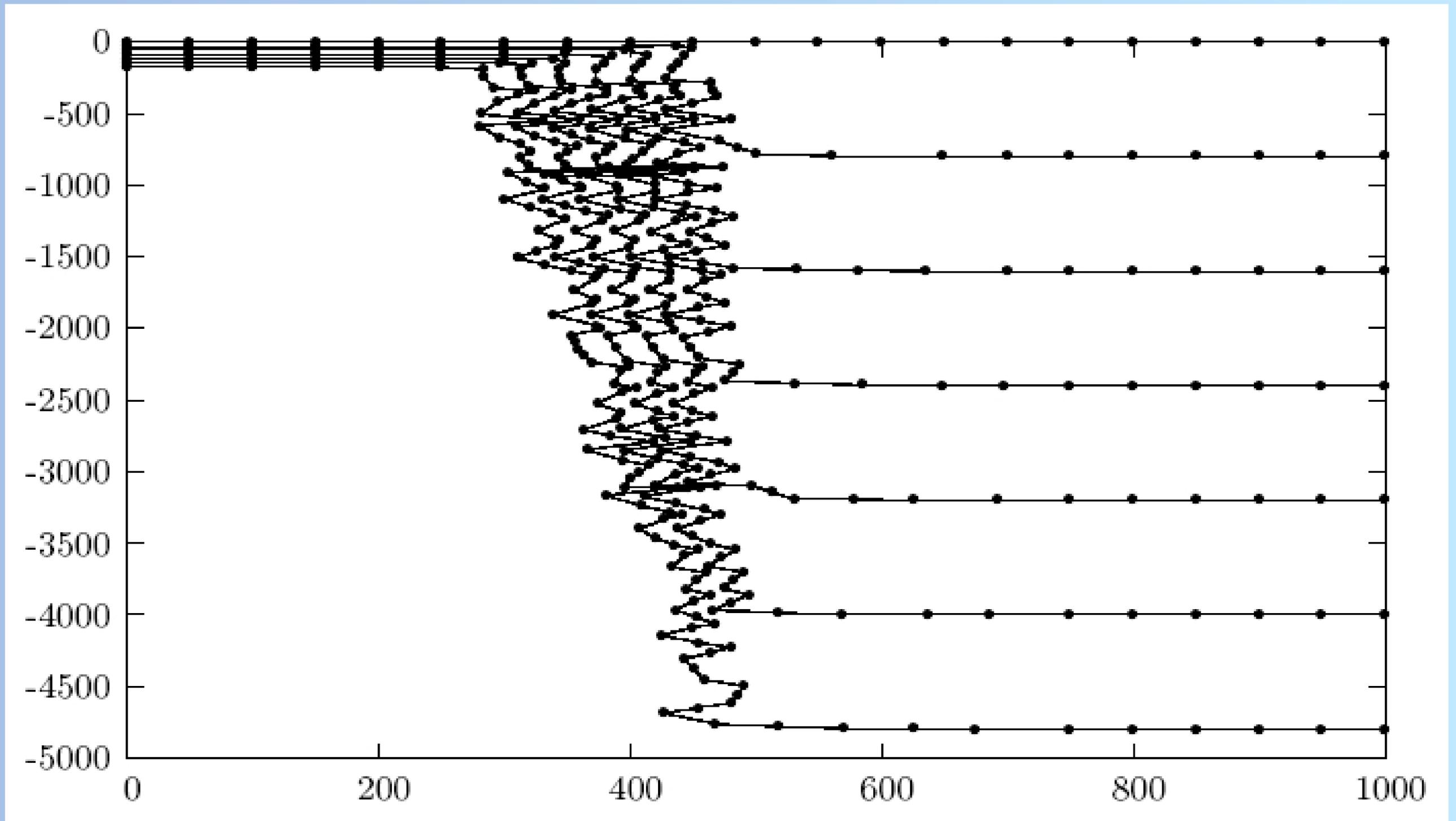
Datenstruktur und Funktionen:



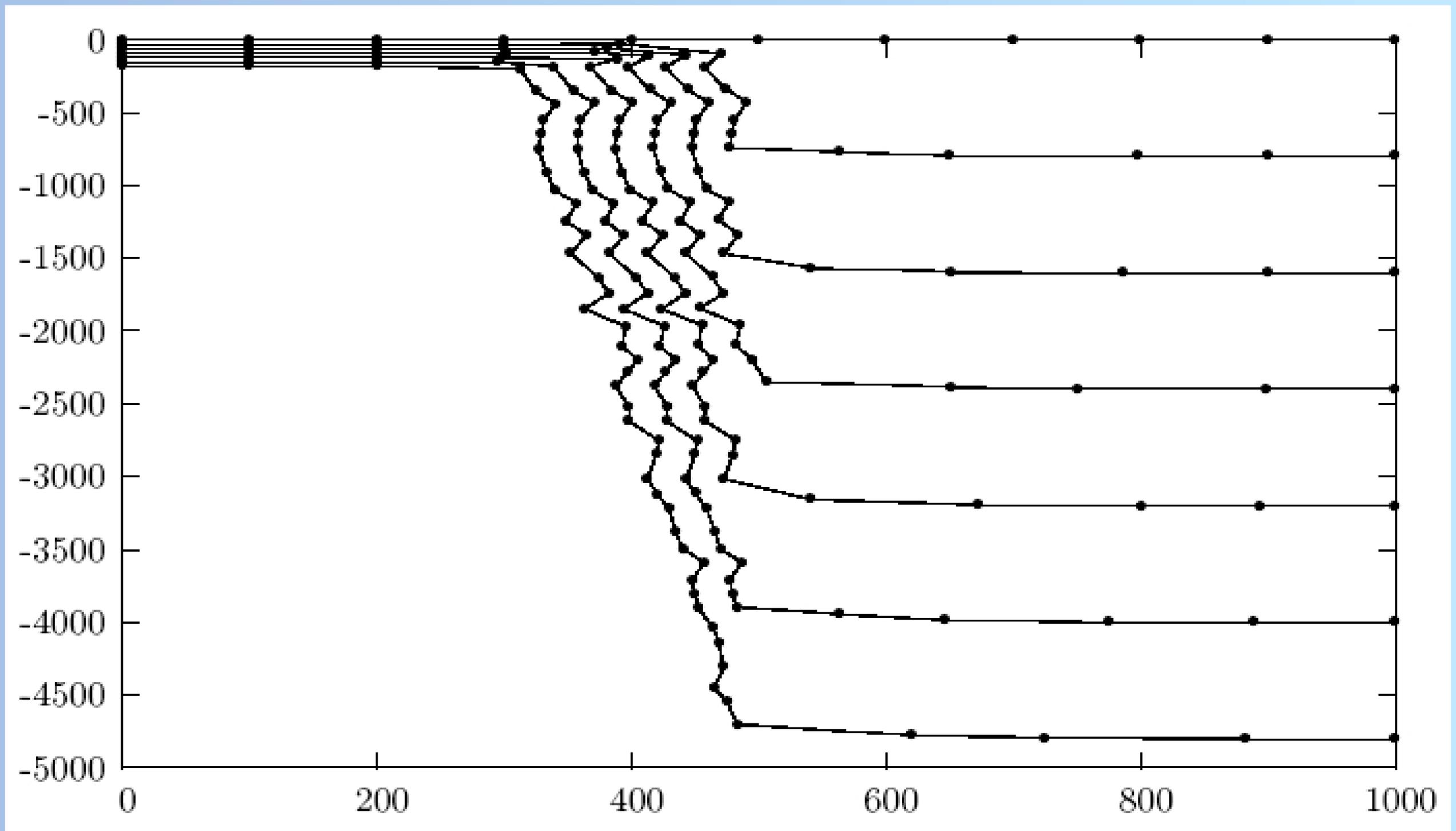
- LinkedList
- `void append_point(float x, float y);`
- `void insert_point(struct ProfPoint *succ, float x, float y);`
- `void delete_point(struct ProfPoint *to_del);`
- `struct ProfPoint* prev_item(struct ProfPoint *next_item);`
- Segmentlänge: $l_{seg} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$



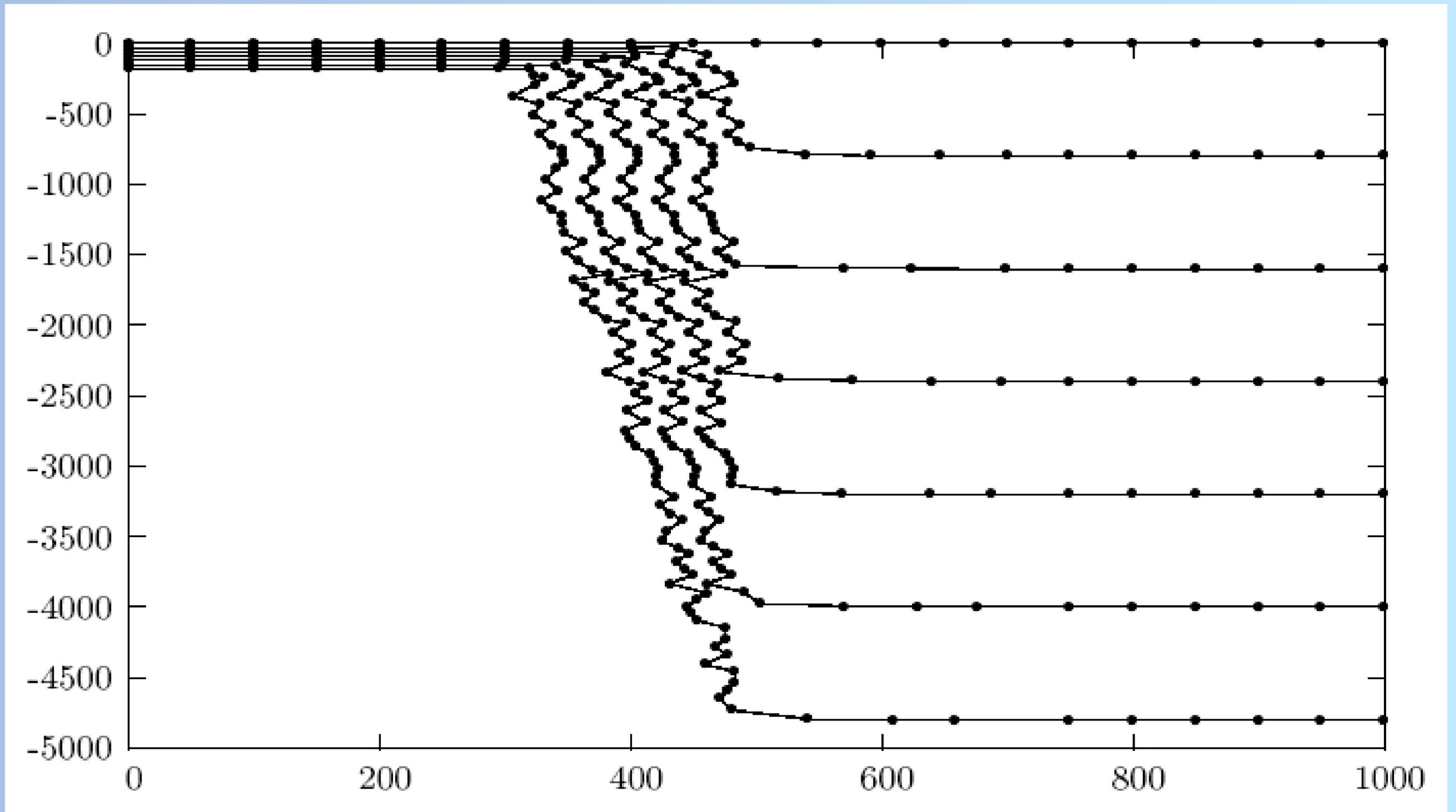
$$\Delta t = 1s, h = 0,1 \mu m$$



$$\Delta t = 1s, h = 0,05 \mu m$$

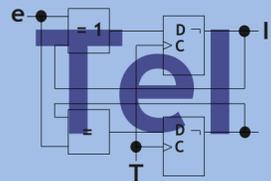


$$\Delta t = 0,5s, h = 0,1 \mu m$$



$$\Delta t = 0,5s, h = 0,05 \mu m$$

5. Aussichten

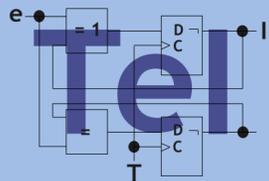


- **Nachteile:**

- delooping
- anisotrope Strukturen
- Simulation von Kristallwachstum
- Simulation von dreidimensionalen Strukturen sehr komplex

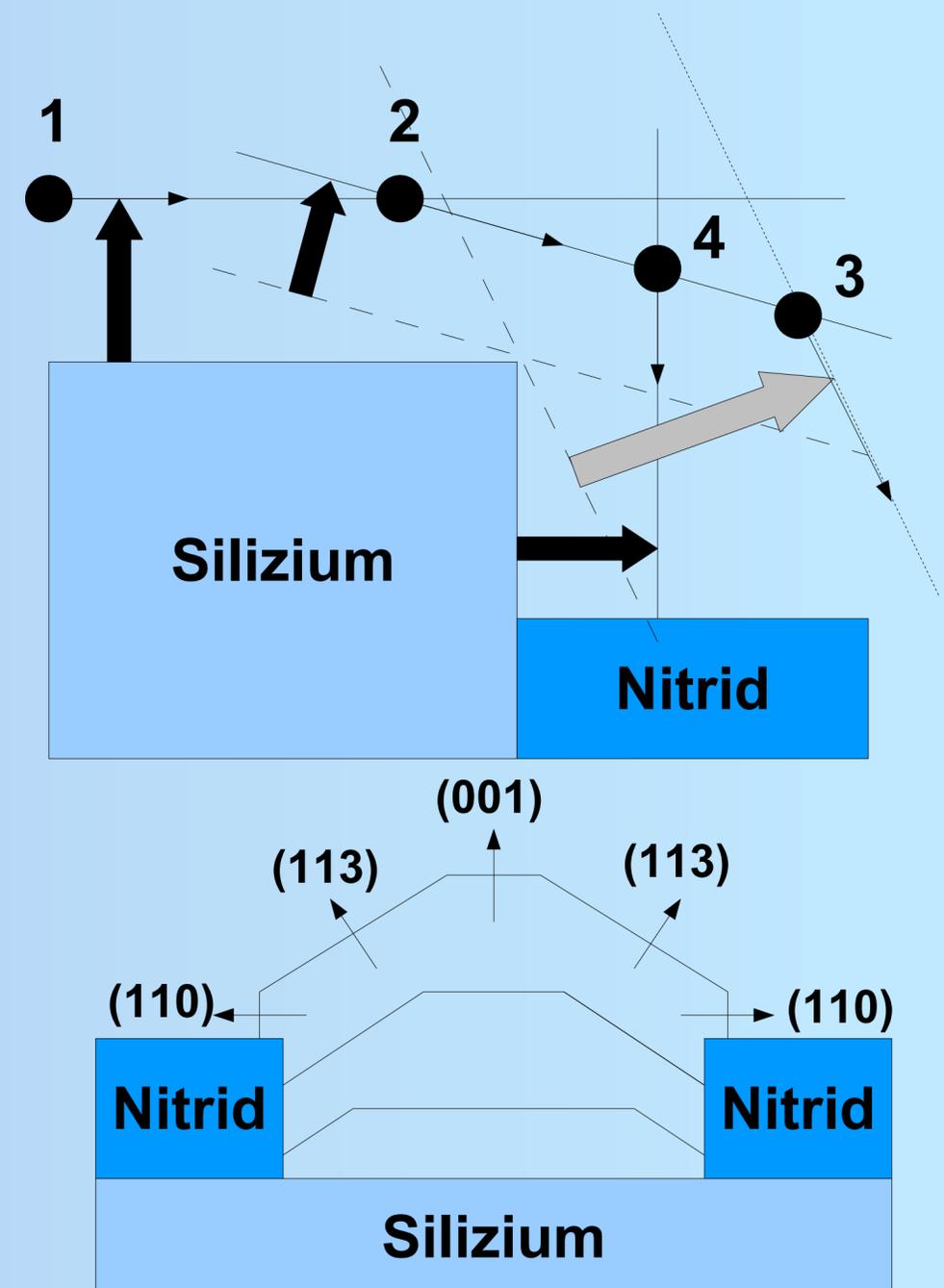
- **Vorteile:**

- einfach zu implementieren
- geringer Rechenaufwand



Beispiel – Selektive Siliziumepitaxie:

- Wichtig Technologie um Integrationsdichte auf Wafer zu erhöhen
- Teilprozess bei Herstellung von Transistoren (ESD) und Kondensatoren (EBS)
- Kristallwachstum mit anderen Topografiealgorithmen liefert keine zufriedenstellenden Ergebnisse
- kann auch sehr gut für Ätzprozesse eingesetzt werden



- R. G. Spallek - http://web.inf.tu-dresden.de/Tel/EDA/images/stories/Lehrmaterial/GTI/gti1_07.pdf
- R. G. Spallek, D. Temmler, T. Preußner, T. Rönsch, S. Ulbrich – „Modelling and Simulating the Selective Growth of Silicon under Consideration of Anisotropic Growth Rates“
- IHM TU Dresden - „Versuchsanleitung – Topografiesimulation“
- H. Lindner, H. Brauer, C Lehmann - „Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik“
- P. Helbing, P. Döhler, T. Wehnert - „Versuchsprotokoll - Topografiesimulation“

