

# Kapitel 6: Algorithmen der Computer-Geometrie

Skript zur Vorlesung  
Geo-Informationssysteme

Wintersemester 2013/14

Ludwig-Maximilians-Universität München

(c) Peer Kröger 2011, basierend auf dem Skript von Christian Böhm aus dem  
SoSe 2009



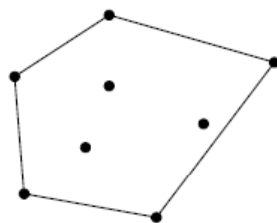
1. Einführung
2. Schnitt von zwei Strecken
3. Punkt-in-Polygon-Test
4. Schnitt orthogonaler Strecken
5. Punkteinschlussproblem

## Computer Geometrie

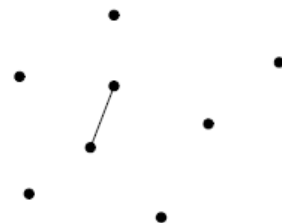
- Teilgebiet der Informatik, das sich mit der Lösung geometrischer Fragestellungen durch geeignete Algorithmen und Datenstrukturen beschäftigt
- Die algorithmische Lösung einer einfachen geometrischen Fragestellung kann sehr komplex sein (vom Algorithmus und/oder von der Laufzeit her)
- Die Algorithmische Geometrie legt ihren Schwerpunkt auf die Studie der algorithmischen Komplexität elementarer geometrischer Probleme
- Den Einsatz von geometrischen Algorithmen in einem GIS hat aber u.a. folgende Probleme:
  - Komplexität der Implementierung (viele Sonderfälle)
  - Anfälligkeit für Rundungsfehler
  - Hohe Konstanten bei der Laufzeitkomplexität

## Wichtige Probleme

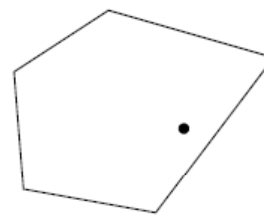
- Berechnung der konvexen Hülle
- Distanzprobleme:
  - Bestimme das Paar von Punkten mit minimalem Abstand
- Inklusionstest und -berechnungen:
  - Teste, ob ein Punkt im Inneren eines geschlossenen Polygons liegt
  - Bestimme alle Punkte, die in einem Rechteck liegen
- Zerlegungen von Objekten in Primitive:
  - Zerlege ein Polygon in eine minimale Anzahl von Dreiecken



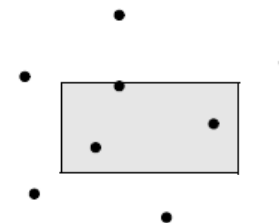
konvexe  
Hülle



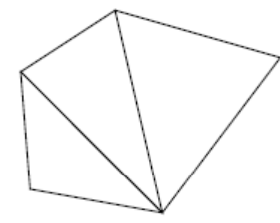
minimaler  
Abstand



Punkt in  
Polygon



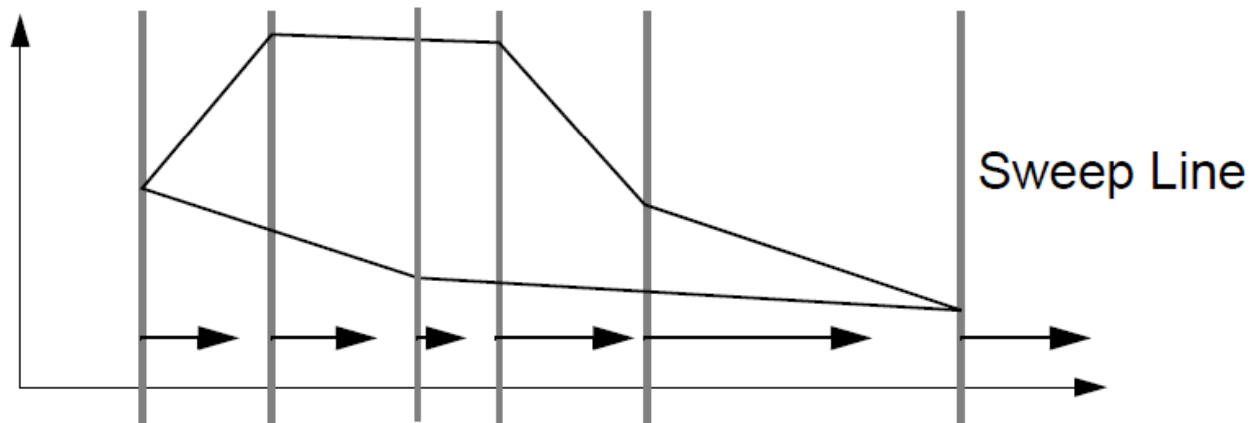
Punkte im  
Rechteck



Zerlegung in  
Dreiecke

## Wichtige Paradigmen

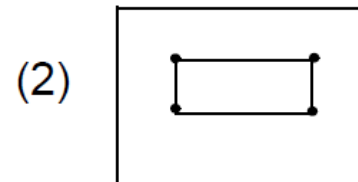
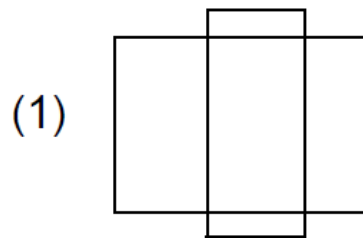
- *Plane-Sweep*
  - Verwendung einer vertikalen Lauflinie (*Sweep Line*)



- *Divide-and-Conquer (Teile und Herrsche)*
  - Aufteilen des Problems in Teilprobleme
  - Lösen der Teilprobleme
  - Kombinieren der Lösungsmengen der Teilprobleme

## CG-Probleme beim Spatial Join

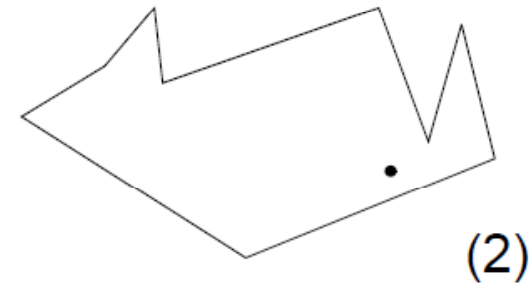
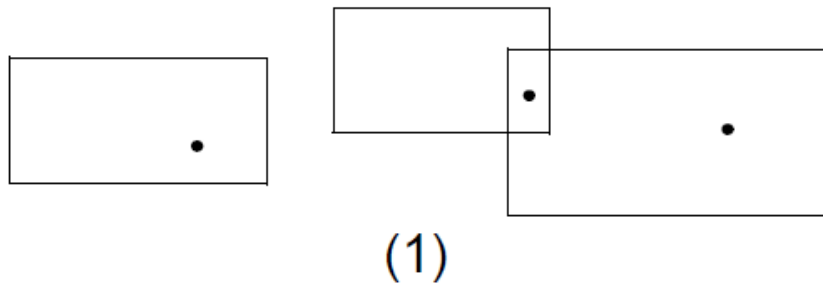
- “Welche Paare von MURs besitzen nichtleeren Schnitt?”
  - ⇒ Fall 1: ein Kantenpaar schneidet sich
    - ⇒ Schnitt einer Menge von orthogonalen Strecken (1)
  - ⇒ Fall 2: ein MUR liegt vollständig innerhalb des anderen
    - ⇒ Punkteinschlussproblem, d.h. Schnitt einer Menge von Punkten und einer Menge von Rechtecken (2)



- “Schneiden sich diese beiden Polygone?”
  - ⇒ Schnitt zweier Strecken

## CG-Probleme bei Punktanfragen

- “Welche Punkte liegen in welchen dieser MURs?” (Spatial Join zwischen Punkten und MUR's) mit dem Prädikat “*Inklusion*”  
⇒ Punkteinschlussproblem (1)
- “Liegt der Anfragepunkt in diesem Polygon?”  
⇒ Punkt-In-Polygon Test (2)



### CG-Probleme bei Fensteranfragen

- “Welche dieser MURs schneiden das Anfragefenster?”  
⇒ Schnitt einer Menge von orthogonalen Strecken
- “Schneidet das Anfragefenster dieses Polygon?”  
⇒ Schnitt zweier Strecken

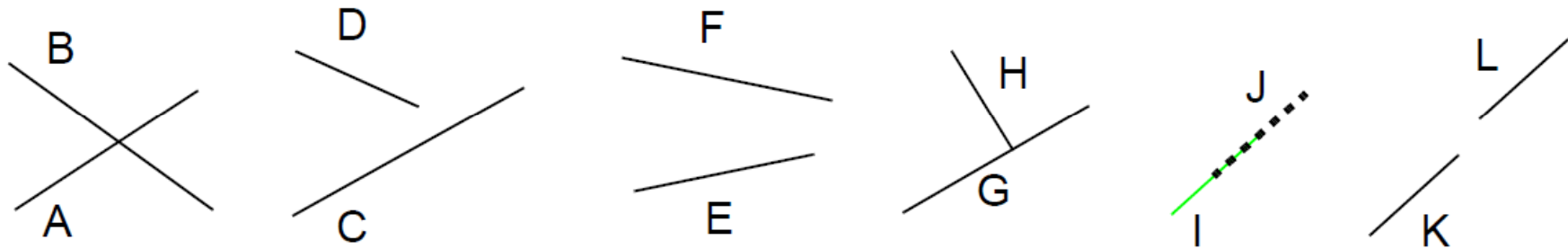


## 6.2 Schnitt von zwei Strecken (I)

**Gegeben:** zwei Strecken S1 und S2

**Gesucht:** Schneiden sich S1 und S2? Wenn ja: ihr Schnittpunkt.

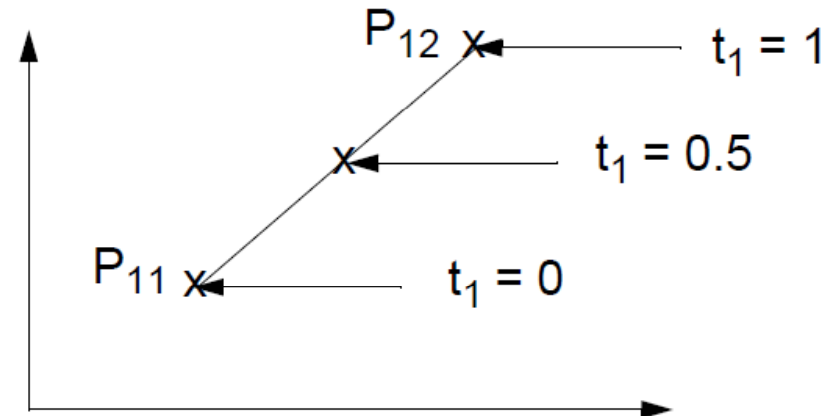
Fälle:



- Strecken A und B schneiden sich
- Strecken C und D und Strecken E und F schneiden sich nicht, jedoch schneiden sich ihre zugehörigen Geraden
- Strecken G und H berühren sich
- Strecken I und J liegen parallel und überlappen sich
- Strecken L und K liegen parallel und schneiden sich nicht

## 6.2 Schnitt von zwei Strecken (II)

- Gegeben seien die beiden Strecken  $s_1$  und  $s_2$  durch die Eckpunkte  $P_{i1}$  und  $P_{i2}$
- *Parameterdarstellung* mit  $t_1, t_2 \in [0,1]$ :
  - $s_1: (1-t_1) \cdot P_{11} + t_1 \cdot P_{12}$
  - $s_2: (1-t_2) \cdot P_{21} + t_2 \cdot P_{22}$



- 3 Fälle:
  1.  $s_1$  und  $s_2$  liegen auf der gleichen Geraden
  2.  $s_1$  und  $s_2$  liegen auf unterschiedlichen parallelen Geraden
  3. Die Geraden von  $s_1$  und  $s_2$  haben genau einen Schnittpunkt

## 6.2 Schnitt von zwei Strecken (III)

### Schnittpunktberechnung (Annahme: s1 und s2 weder horizontal noch vertikal)

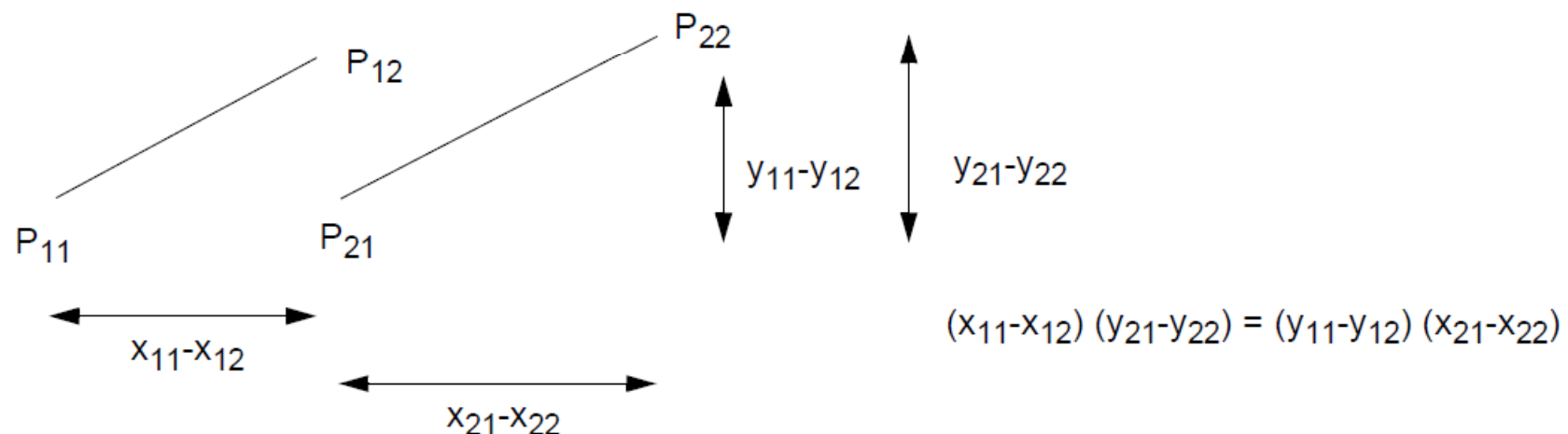
Notation:  $x_{ij} := P_{ij}.x$   $y_{ij} := P_{ij}.y$

$(1-t_1) \cdot x_{11} + t_1 \cdot x_{12} = (1-t_2) \cdot x_{21} + t_2 \cdot x_{22}$  // der Schnittpunkt erfüllt

$(1-t_1) \cdot y_{11} + t_1 \cdot y_{12} = (1-t_2) \cdot y_{21} + t_2 \cdot y_{22}$  // beide Streckengleichungen

$$\Rightarrow t_1 = \frac{(x_{11} - x_{21}) \cdot (y_{21} - y_{22}) - (y_{11} - y_{21}) \cdot (x_{21} - x_{22})}{(x_{11} - x_{12}) \cdot (y_{21} - y_{22}) - (y_{11} - y_{12}) \cdot (x_{21} - x_{22})}, t_2 \text{ analog}$$

Nenner gleich 0  $\Rightarrow$  Strecken parallel ( $s_1$  und  $s_2$  haben die selbe Steigung)



## 6.2 Schnitt von zwei Strecken (IV)

### Fallunterscheidung

- *Nenner gleich 0*

Teste, ob  $P_{11}$  oder  $P_{12}$  auf  $s_2$  liegen, d.h. die Streckengleichung erfüllen.

- a)  $P_{11}$  oder  $P_{12}$  liegen auf  $s_2$

Die Strecken  $s_1$  und  $s_2$  überlappen sich. Alle Punkte im Überlappungsbereich sind Schnittpunkte.

- b) weder  $P_{11}$  noch  $P_{12}$  liegen auf  $s_2$

Die Strecken  $s_1$  und  $s_2$  liegen nebeneinander, sie besitzen keinen Schnittpunkt.

- *Nenner ungleich 0*

- a)  $0 \leq t_1 \leq 1$  und  $0 \leq t_2 \leq 1$

Die Strecken  $s_1$  und  $s_2$  schneiden sich. Berechnung des Schnittpunkts durch Einsetzen von  $t_i$  in Gleichung von  $s_i$

- b)  $t_1 < 0$  oder  $t_1 > 1$  oder  $t_2 < 0$  oder  $t_2 > 1$

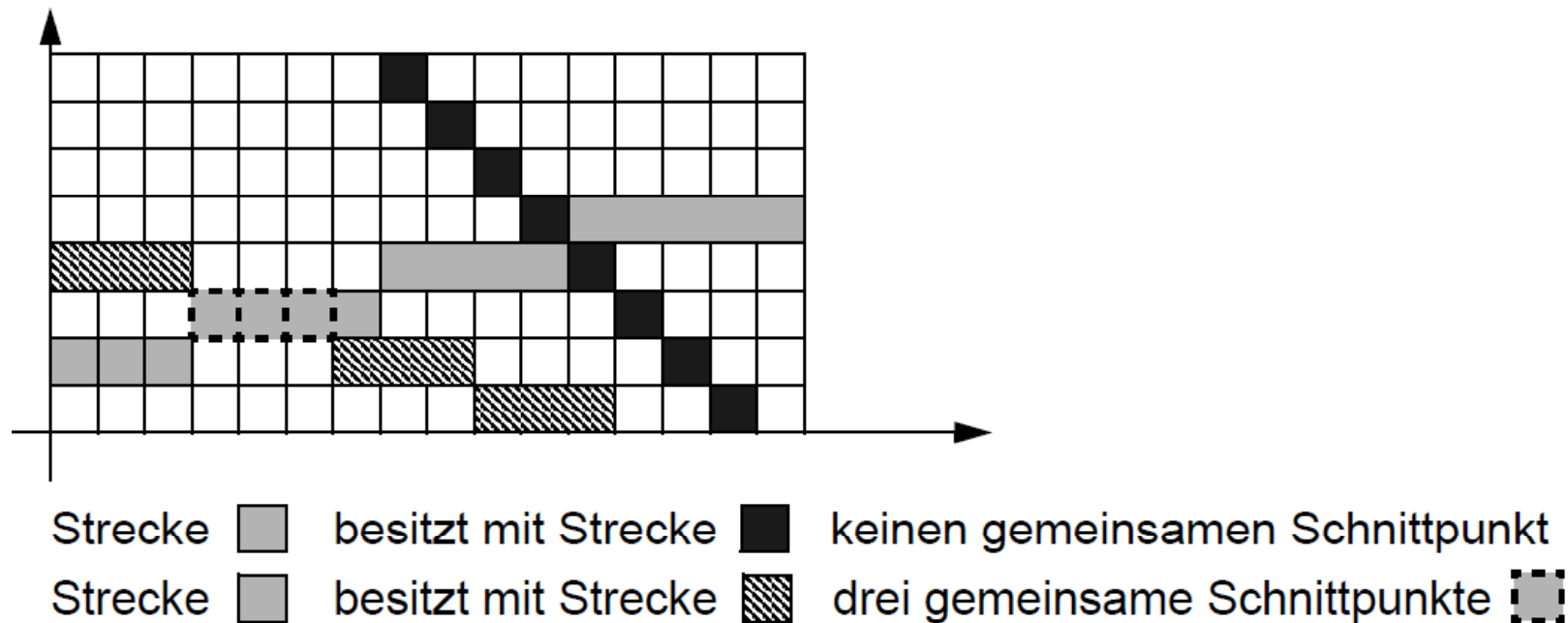
Die Strecken  $s_1$  und  $s_2$  schneiden sich nicht.

## 6.2 Schnitt von zwei Strecken (V)

### Ungenauigkeiten im Rastermodell

Wieviele Schnittpunkte hat ein Paar von Strecken?

- Euklidische Geometrie: (höchstens) 1 Schnittpunkt
- Rastermodell: ???



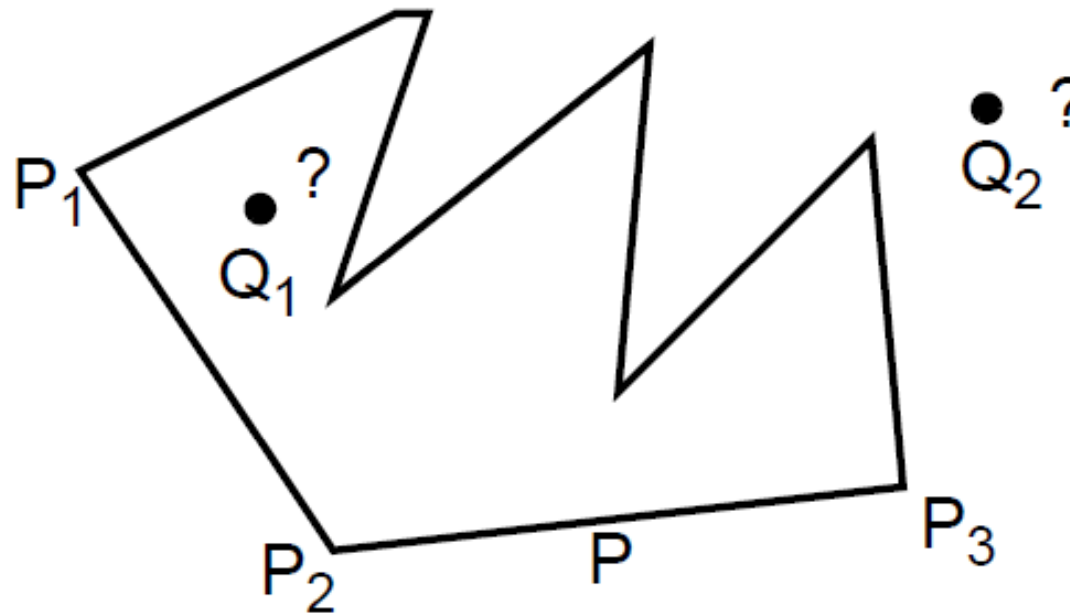
## 6.3 Punkt-in-Polygon-Test (I)

### Gegeben

Ein einfaches Polygon  $P = (P_1, \dots, P_n)$  und ein Anfragepunkt  $Q$

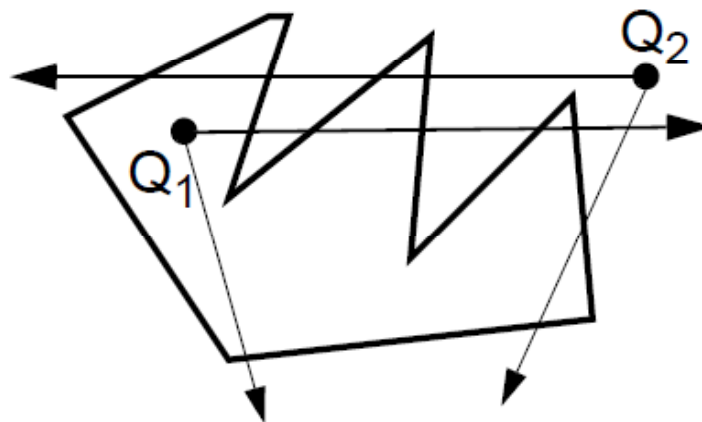
### Gesucht

Liegt Punkt  $Q$  im Inneren des Polygons  $P$ ?



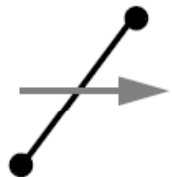
## Lösung 1

- Grundlage: *Jordansches Kurven-Theorem*  
Jedes Polygon zerteilt den Raum in ein Inneres und Äußeres.
- Idee:  
Schicke einen Strahl  $S$  (der Einfachheit halber parallel zur x-Achse) vom Punkt  $Q$  und zähle, wie oft er die Kanten des Polygons schneidet:
  - Anzahl ungerade:  $Q$  liegt im Inneren
  - Anzahl gerade:  $Q$  liegt im Äußeren
- Beispiel:

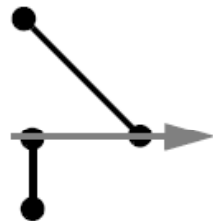


## Algorithmus

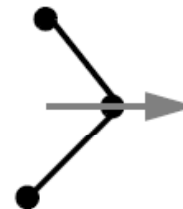
- Für jede der  $n$  Kanten des Polygons  $P$ :  
Berechne den Schnitt der Kante mit dem Strahl  $S$ . Falls Schnittpunkt vorhanden, inkrementiere Zähler.
- Laufzeitkomplexität:  
Schnitt zweier Strecken ist  $O(1)$ ,  $O(n)$  Aufrufe davon  $\rightarrow O(n)$
- Fallunterscheidung (siehe Übung)



1 Schnitt



1, 2 oder 3 Schnitte?



1 oder 2 Schnitte?



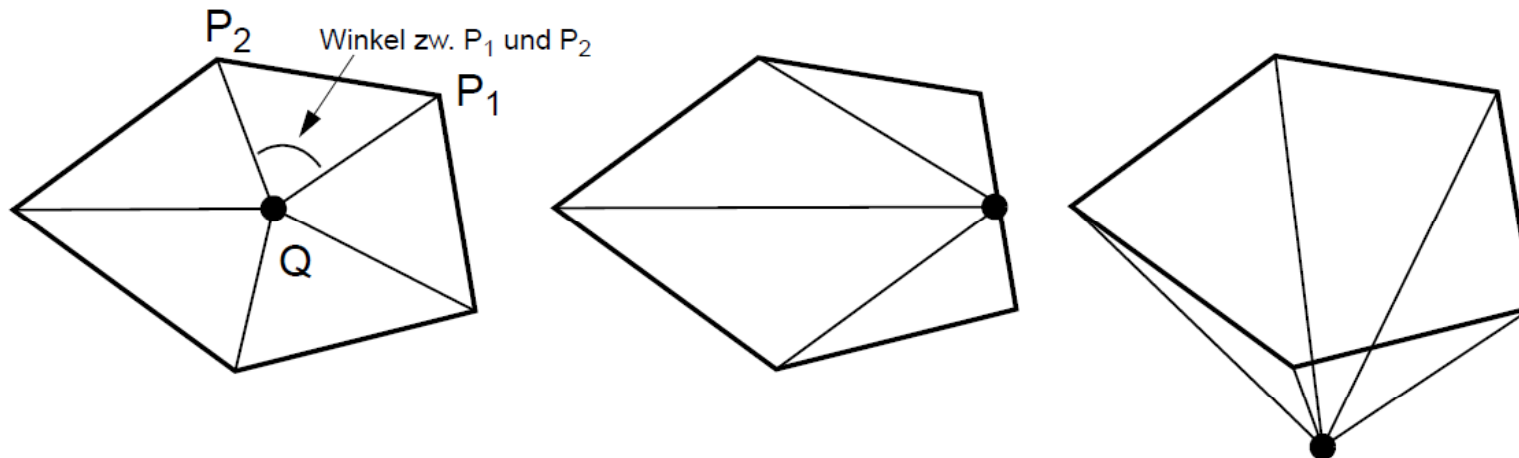
wieviel Schnitte?



## 6.3 Punkt-in-Polygon-Test (IV)

### Lösung 2

- Die zu einem Polygon R und Punkt Q gehörenden Sektorenstrahlen sind durch die Kanten von Q nach  $P_i$  gegeben.
- Berechne  $\Theta(R, Q)$ , die Summe aller Winkel zwischen benachbarten Sektorenstrahlen.
- Es gilt:
  - $\Theta(R, Q) = 2\pi$ , so liegt Q im Inneren von R
  - $\Theta(R, Q) = \pi$ , so liegt Q auf dem Rand von R
  - $\Theta(R, Q) = 0$ , so liegt Q im Äußeren von R

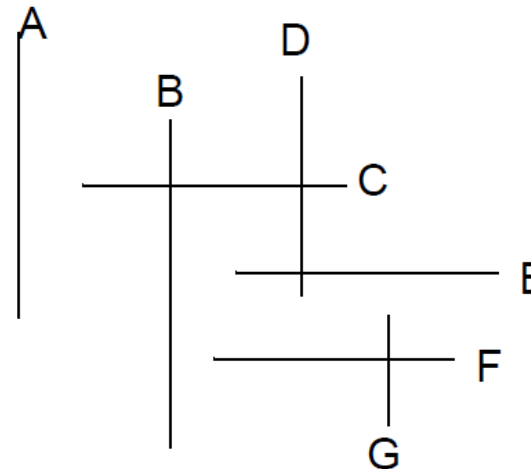


## Gegeben

Menge von horizontalen und vertikalen (*orthogonalen*) Strecken

## Gesucht

Alle Paare sich schneidender  
Strecken



Lösung:  
(B,C)  
(C,D)  
(D,E)  
(F,G)

## Annahme

- Die Endpunkte verschiedener Strecken besitzen jeweils unterschiedliche x- und y-Koordinaten
- damit sind Schnitte nur zwischen horizontalen und vertikalen Strecken möglich

### Naiver Algorithmus

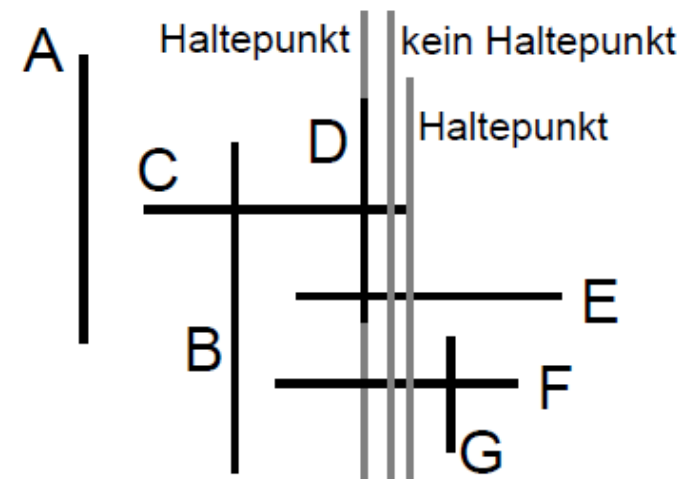
- benötigt  $O(n^2)$  Vergleiche
- da jede Strecke mit allen anderen Strecken verglichen wird

### Bessere Algorithmen

- Vorstellung von zwei Lösungen, die auf den Paradigmen
  - Plane-Sweep
  - Divide-and-Conquerbasieren
- Beide Algorithmen besitzen eine Laufzeit von  $O(n \log n + k)$
- $k$  ist die Zahl der Antworten

## Idee

- Schiebe eine vertikale Gerade (*Sweep Line*), von links nach rechts durch den 2-dim. Datenraum
- Halte dabei nur an "interessanten" Stellen (*Event Points*)
- Beobachte dann alle Objekte, die die Sweep Line schneiden

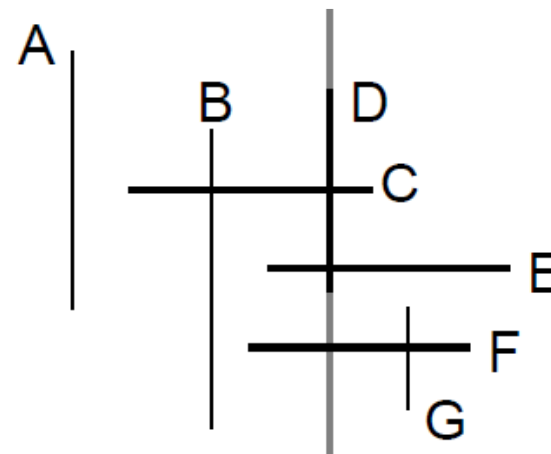


## Datenstrukturen

- In dem *Event Point Schedule* werden alle Haltepunkte der Sweep Line in x-Richtung sortiert organisiert.
- In dem *Sweep Line Status* werden die aktuell die Sweep Line schneidenden Objekte verwaltet; insbesondere muß hier das Löschen und Einfügen der Objekte effizient gelöst sein

## Beobachtungen für Schnitt orthogonaler Strecken

- Horizontale Strecken schneiden die Sweep Line in einer festen y-Koordinate
- Vertikale Strecken schneiden die Sweep Line in einem y-Intervall. Horizontale
- Strecken, die diese vertikale Strecke schneiden, erfüllen folgende Eigenschaften:
  - Sie schneiden auch die Sweepline
  - Ihre y-Koordinate liegt im y-Intervall



## 6.4 Plane-Sweep-Lösung (III)

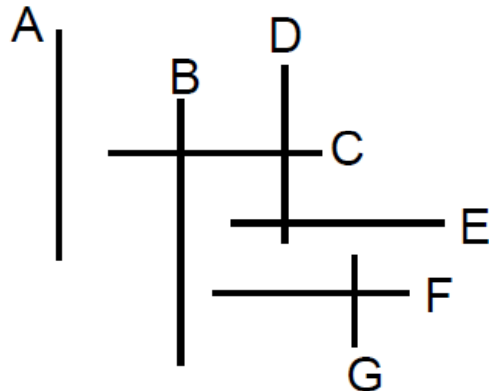
### Datenstrukturen

- *Event Point Schedule*: enthält die x-Koord. jeder vertikalen Strecke und die min. und max. x-Koord. jeder horizontalen Strecke (sortiert)
- *Sweep Line Status*: enthält alle horizontalen Strecken, die die Sweep Line momentan schneiden (sortiert)
- Algorithmus

```
FOR each s.x IN Event-Point-Schedule WITH ASCENDING ORDER OF x DO
  IF s is horizontal segment THEN
    IF x is minimum point of segment s THEN
      insert s into Sweep-Line-Status
    ELSIF x is maximum point of segment s THEN
      remove s from Sweep-Line-Status
  ELSIF s is vertical segment THEN
    intersections := Sweep-Line-Status.range-query (s.y1 ≤ t.y ≤ s.y2);
    FOR each t IN intersections DO
      report "s and t intersect";
    END FOR each t IN intersections;
END FOR each s.x IN Event-Point-Schedule;
```

# 6.4 Plane-Sweep-Lösung (IV)

## Vorgehen am Beispiel

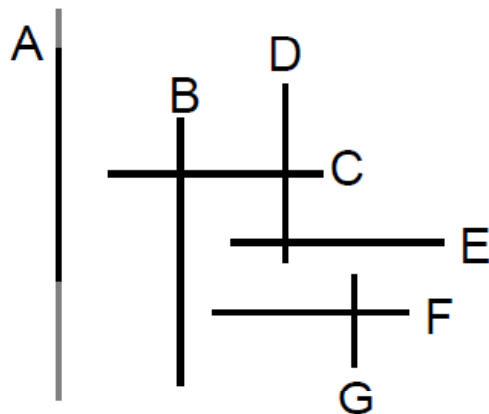


*Event Point Schedule* mit allen Haltepunkten:

A.x, C.x1, B.x, F.x1, E.x1,  
D.x, C.x2, G.x, F.x2, E.x2

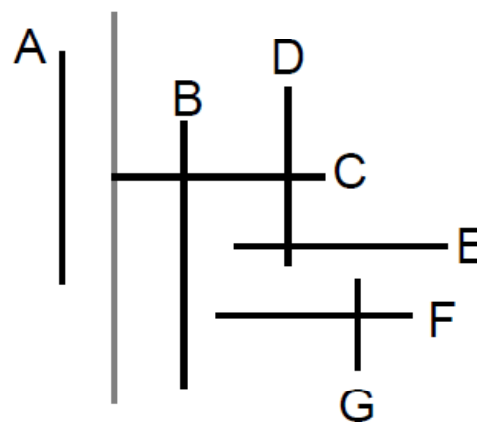
*Sweep Line Status:*

Stat = {}



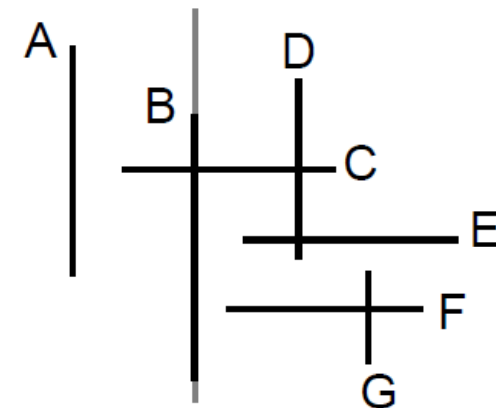
Haltepunkt: A.x

Stat = {}



Haltepunkt: C.x1

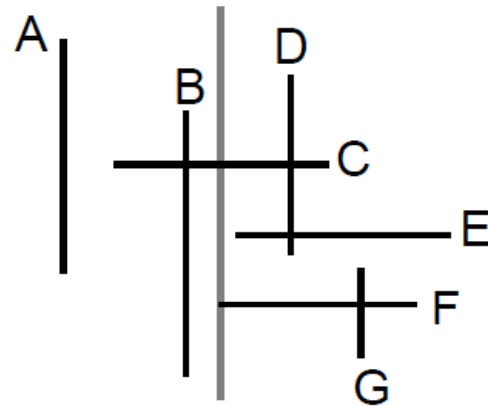
Aktion: Füge C in Stat ein  
Stat = {C}.



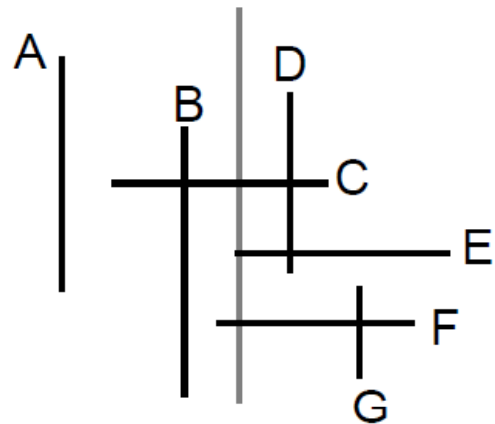
Haltepunkt: B.x

Aktion: Finde alle  $l \in \text{Stat}$   
mit  $B.y1 \leq l.y \leq B.y2$   
Stat = {C}  $\Rightarrow l = C$   
Antwort: (B,C)

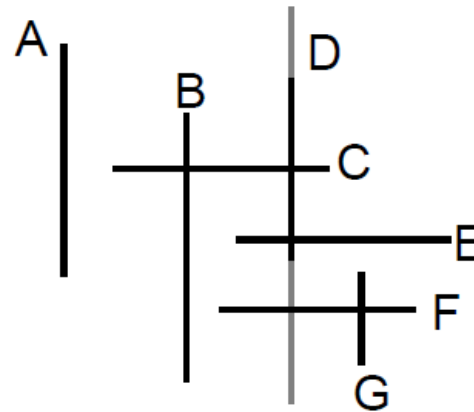
## Vorgehen am Beispiel (Forts.)



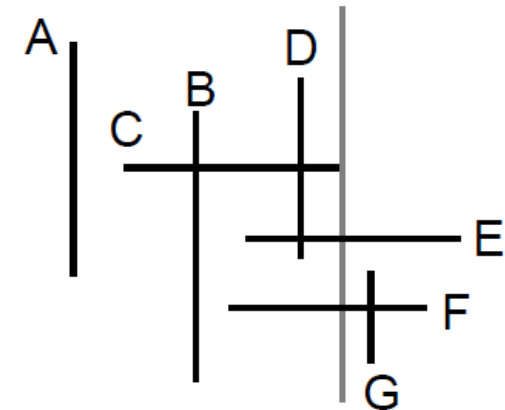
Haltepunkt: F.x1  
Aktion: Füge F in Stat ein  
Stat = {C, F}.



Haltepunkt: E.x1  
Aktion: Füge E in Stat ein  
Stat = {C, E, F} ("sortiert!")



Haltepunkt: D.x  
Aktion: Finde alle  $l \in \text{Stat}$  mit  $D.y1 \leq l.y \leq D.y2$   
Stat = {C, E, F}  $\Rightarrow l \in \{C, E\}$   
Antworten: (D, C), (D, E)



Haltepunkt: C.x2  
Aktion: Lösche C aus Stat  
Stat = {E, F}.



## 6.4 Plane-Sweep-Lösung (VI)

### Komplexitätsberechnung

- Zum Abspeichern des Sweep Line Status wird ein höhenbalancierter Baum (z.B. ein 2-3+-Baum) verwendet, wobei die Blätter bzgl. der Sortierung miteinander verkettet sind
- wichtige Eigenschaften (bei  $n$  gespeicherten Strecken):
  - Einfügen und Löschen benötigt  $O(\log n)$  Zeit
  - Bereichsanfrage (mit  $r$  Antworten) benötigt  $O(\log n + r)$  Zeit
- Laufzeitkomplexität des Plane-Sweep-Algorithmus  
Aufbau des Event Point Schedule:  $O(n \log n)$   
Durchlauf der Sweep Line:
  - Einfügen in Sweep Line Status:  $O(n \log n)$
  - Löschen aus Sweep Line Status:  $O(n \log n)$
  - Bereichsanfragen:  $O(n \log n + k)$ $\Rightarrow$  Gesamtkosten:  $O(n \log n + k)$

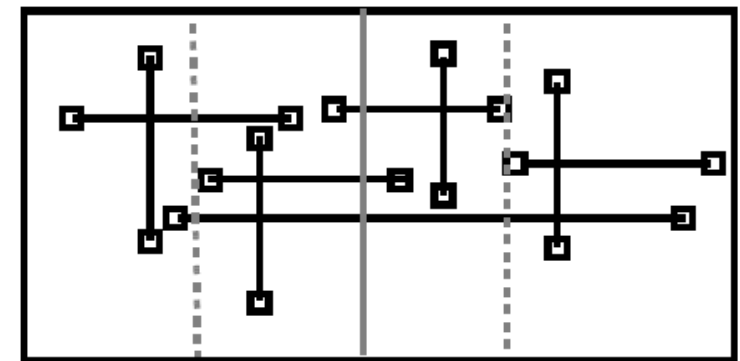
## Idee

- Teile die Menge der Objekte in zwei Teilmengen (*Divide*)
- Löse das Problem für die Teilmengen (*Conquer*)
- Verschmelze die Teil-Lösungen zu einer Gesamtlösung (*Merge*)

## Anwendung auf Schnittpunktproblem orthogonaler Strecken

- Divide:
  - Betrachte die Menge  $S$  aller  $x$ -Koordinaten von vertikalen Strecken und aller Endpunkte horizontaler Strecken
  - Teile  $S$  in zwei etwa gleichgroße Mengen  $S_1$  und  $S_2$  auf, so daß für alle  $x_1 \in S_1$  und  $x_2 \in S_2$  gilt:  $x_1 < x_2$
- Conquer:
 

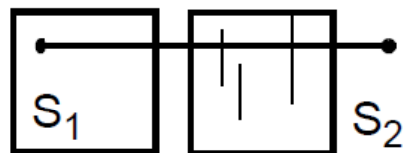
Löse das Problem für die Mengen  $S_1$  und  $S_2$



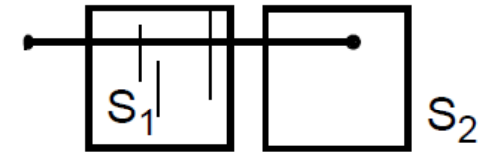
## Merge beim Schnittpunktproblem orthogonaler Strecken

Beim Merge werden Schnittpunkte nur für folgende Fälle berechnet:

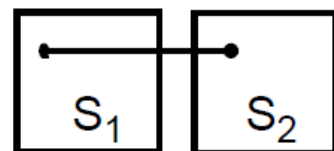
1. Der linke Endpunkt einer horizontalen Strecke liegt in  $S_1$ , und der rechte Endpunkt liegt rechts von  $S_2$ .
2. Der rechte Endpunkt einer horizontalen Strecke liegt in  $S_2$ , und der linke Endpunkt liegt links von  $S_1$ .



Strecke schneidet alle vertikalen Strecken in  $S_2$  bzw.  $S_1$ , deren y-Intervall die y-Koordinate überdeckt



Insbesondere sind damit alle Schnitte für den Fall, in dem der linke Eckpunkt einer Strecke in  $S_1$  und der rechte Endpunkt in  $S_2$  liegt, immer schon vorher berechnet worden.

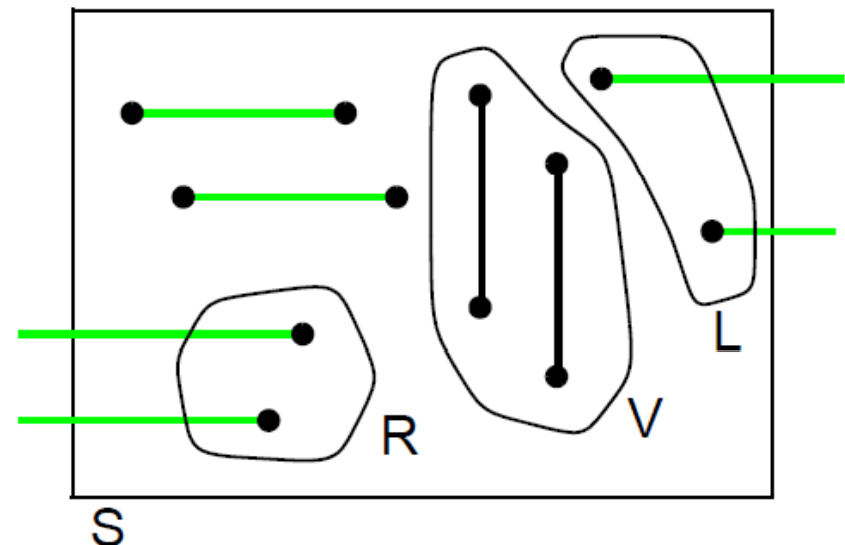


Alle Schnitte mit Strecken in  $S_1$  bzw.  $S_2$  sind schon berechnet.

*Definition:*  $Y \star V := \{ (v.x, y) \mid v \in V, y \in Y, v.y1 \leq y \leq v.y2 \}$

## Datenstrukturen

- S ist ein nach den x-Koordinaten sortiertes Array von horizontalen Eckpunkten bzw. vertikalen Strecken
- L ist eine nach y-Koordinaten sortierte Liste aller linken Endpunkte in S, deren rechter Endpunkt nicht in S liegt
- R ist eine nach y-Koordinaten sortierte Liste aller rechten Endpunkte in S, deren linker Endpunkt nicht in S liegt
- V ist eine nach y-Koordinaten des unteren Endpunkts sortierte Liste aller vertikalen Strecken in S



# 6.4 Divide-and-Conquer-Lösung (IV)

Algorithmus StreckenSchnitt ( $_{IN} S, _{OUT} L, _{OUT} R, _{OUT} V$ )

IF  $|S| = 1$  THEN

$L := \emptyset; R := \emptyset; V := \emptyset;$

IF  $S[1]$  linker Eckpunkt THEN  $L := \{s\};$  (\*  $s \in S$  \*)

IF  $S[1]$  rechter Eckpunkt THEN  $R := \{s\};$

IF  $S[1]$  vertikale Strecke THEN  $V := \{s\};$

ELSE

Teile  $S$  in zwei gleich große Mengen  $S_1$  und  $S_2$  auf, so daß

für alle  $x_1 \in S_1$  und  $x_2 \in S_2$  gilt:  $x_1 < x_2$ ;

StreckenSchnitt ( $S_1, L_1, R_1, V_1$ );

StreckenSchnitt ( $S_2, L_2, R_2, V_2$ );

$h := L_1 \cap R_2;$

Gebe  $(L_1 \setminus h) \star V_2$  aus; (\* Fall 1 \*)

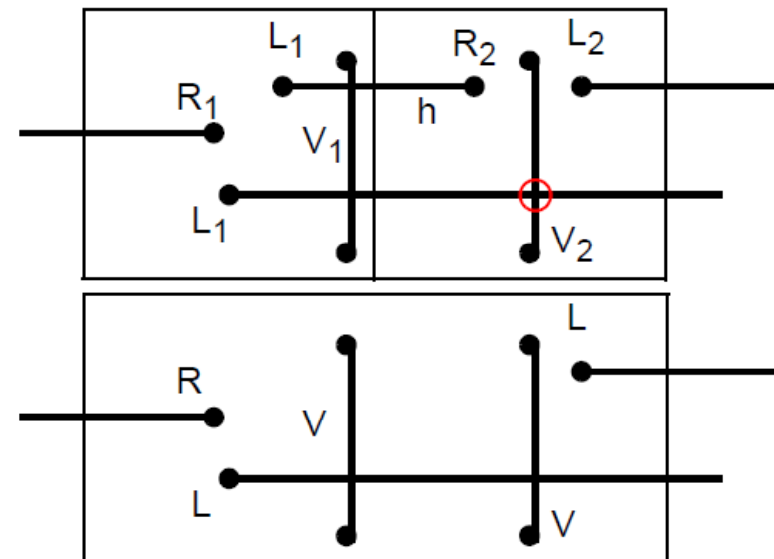
Gebe  $(R_2 \setminus h) \star V_1$  aus; (\* Fall 2 \*)

$L := (L_1 \setminus h) \cup L_2;$

$R := R_1 \cup (R_2 \setminus h);$

$V := V_1 \cup V_2;$

//  $Y \star V := \{ (v.x, y) \mid v \in V, y \in Y, v.y1 \leq y \leq v.y2 \}$



### Komplexitätsanalyse

- Sortierung von  $S$ :  $O(n \log n)$
- Divide (ein Schritt):  $O(1)$
- Merge:
  - Die Mengenoperationen ( $\cap$ ,  $\cup$ ) auf  $L$ ,  $R$  und  $V$  (ein Schritt) können in  $O(n)$  bearbeitet werden
  - Die Operation  $M \star V$  kann in  $O(|M| + |V| + |M \star V|)$  durchgeführt werden (d.h. lineare Laufzeit + Anzahl der gefundenen Paare)
  - Anzahl der Rekursionen:  $O(\log n)$
- Gesamtaufwand:  $O(n \log n + k)$

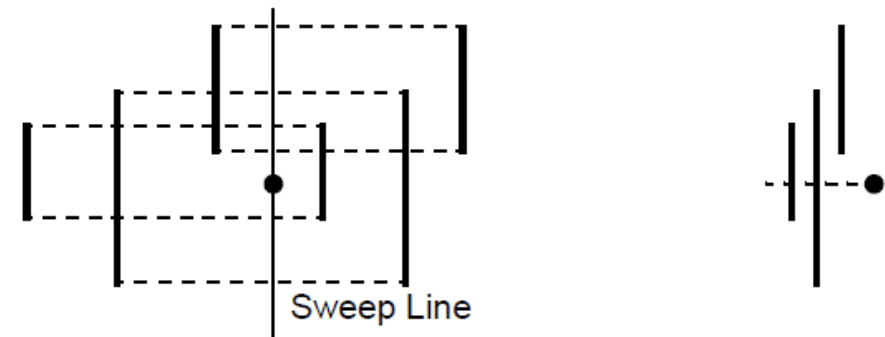
## 6.5 Punkteinschlußproblem (I)

**Gegeben** Menge  $P$  von Punkten; Menge  $R$  von Rechtecken.

**Gesucht** Alle Paare  $(p,r)$  mit  $p \in P$ ,  $r \in R$ , wobei  $p$  in  $r$  liegt

### Plane-Sweep-Lösung

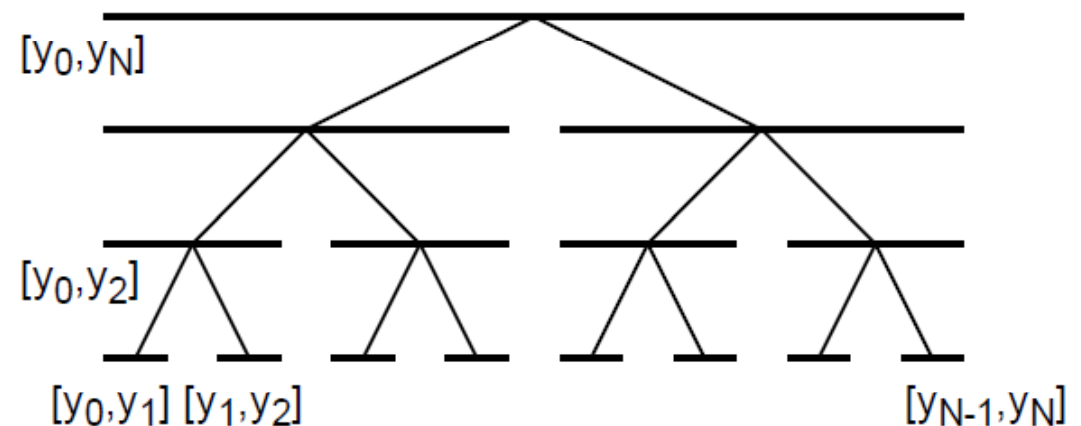
- Betrachte nur die vertikalen Kanten der Rechtecke
- Menge der Haltepunkte (Event Point Schedule) setzt sich zusammen aus allen Punkten  $p$  und den  $x$ -Koordinaten der vertikalen Kanten (nach  $x$  sortiert)
- “Linke” Kanten werden in den Sweep Line Status eingefügt
- “Rechte” Kanten werden aus dem Sweep Line Status entfernt
- Für einen Punkt  $p$  des Event Point Schedule müssen alle Kanten im Sweep Line Status bestimmt werden, deren  $y$ -Intervall die  $y$ -Koordinate von  $p$  enthält



## Definition

- Datenstruktur zur effizienten Implementierung des Sweep Line Status beim Punkteinschlußproblem
- Sei  $y_0, \dots, y_N$  eine Menge von Punkten im 1-dimensionalen Datenraum mit  $y_{i-1} < y_i$  für  $1 \leq i \leq N$ . Der *Segmentbaum* für diese Menge ist ein binärer Baum mit minimaler Höhe, dessen Knoten folgende Segmente zugeordnet sind:

- jedem Blattknoten ist ein Segment  $[y_{i-1}, y_i]$  zugeordnet
- jedem inneren Knoten ist die Vereinigung der Segmente seines Teilbaums zugeordnet



- Jeder Knoten besitzt zusätzlich eine Liste für abzuspeichernde Intervalle

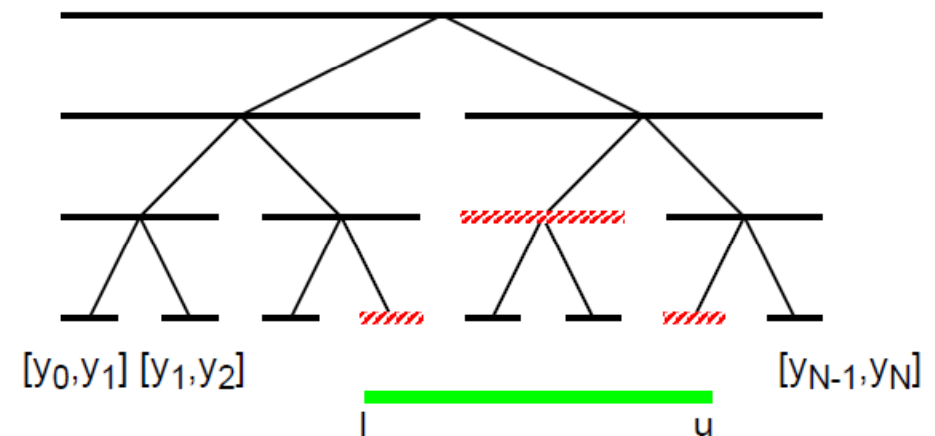


## Einfügen eines Intervalls

- Ein Intervall  $i = [l, u]$  wird in der Liste eines Knotens abgelegt, falls  $i$  das zugehörige Segment des Knotens überdeckt, jedoch das Segment des Vaterknotens **nicht** überdeckt

## Punktanfrage

- Finde zu einem gegebenen Punkt  $p \in [y_0, y_N]$  alle Intervalle  $i$ , die  $p$  überdecken.
- Bestimme den Pfad von der Wurzel zu dem Blatt, so daß das zugeordnete Segment des Knotens stets  $p$  enthält. Die Antwortmenge der Anfrage ist die Vereinigung der Intervallisten aller Knoten dieses Pfades.



### Komplexitätsanalyse

- Aufbau des Segmentbaums mit leeren Intervall-Listen:
  - $O(N)$  Zeit und  $O(N)$  Speicherplatz
- Einfügen eines Intervalls in den Baum:
  - Maximal zwei Knoten auf jeder Stufe des Baums sind durch das Einfügen betroffen
  - Einfügen in eine (unsortierte) Intervallliste benötigt  $O(1)$  Zeit  
⇒  $O(\log N)$  Zeit
- Löschen aus dem Baum:
  - analog zu Einfügen, d.h.  $O(\log N)$  Zeit
- Punktanfrage:
  - $O(\log N + r)$  Zeit, wenn  $r$  die Größe der Antwortmenge ist

## 6.5 Punkteinschlußproblem (II)

### Komplexitätsanalyse

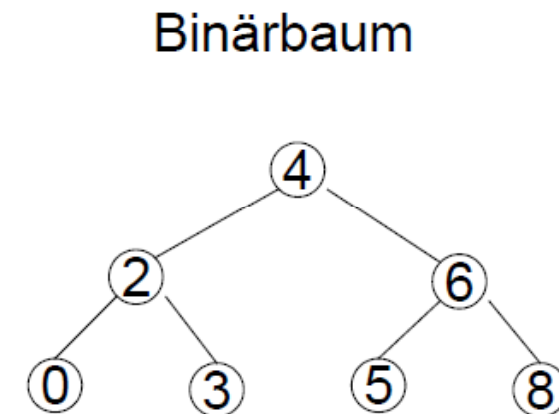
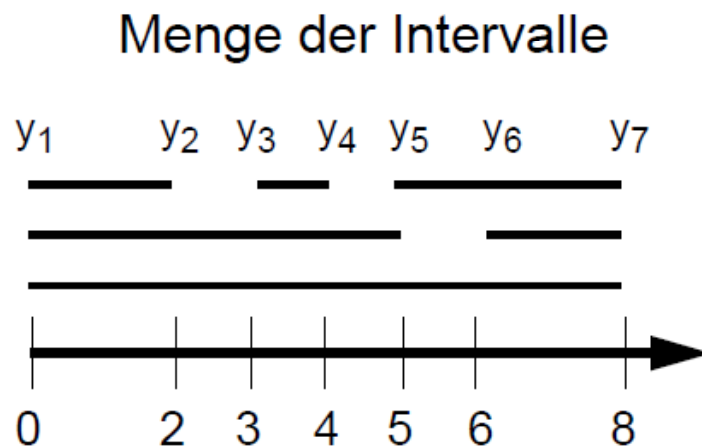
- Bezeichner
  - $n_r$  = Anzahl der Rechtecke,  $n_p$  = Anzahl der Punkte,  $n = n_r + n_p$
  - $k$  = Anzahl der gefundenen Paare (Punkt, Rechteck)
- Sortierung der Haltepunkte (pro Rechteck 2, pro Punkt 1):
  - $O(n \log n)$  Zeit
- Aufbau des leeren Segmentbaums: Berechne die Segmentstruktur aus den y-Koordinaten der Rechtecke, sortiere diese Koordinaten und erzeuge den leeren Segmentbaum:
  - $O(n_r \log n_r) = O(n \log n)$  Zeit
- Einfügen und Löschen im Segmentbaum:  $O(n_r \log n_r)$  Zeit
- Punktanfragen:  $O(n_p \log n_r + k)$  Zeit
- Gesamtkosten:  $O(n \log n + k)$  Zeit und  $O(n + n_r \log n_r)$  Speicherplatz  
⇒ *Nachteil*: hoher Speicherplatzaufwand

### Motivation

- Verwendung anstelle des Segmentbaums beim Punkteinschlußproblem
- Unterschied zum Segmentbaum: Knoten des Baums repräsentieren nicht ein Segment, sondern einen Punkt
- Vorteil: Speicherplatzbedarf  $O(n)$

## Aufbau eines Binärbaums

- Sei  $I_1, I_2, \dots, I_n$  eine Menge von Intervallen mit  $I_i = [u_i, o_i]$ ,  $1 \leq i \leq n$ .
- Sei  $P = \{ y_1, \dots, y_s \}$  die Menge der Punkte, die Eckpunkt von zumindest einem Intervall sind,  $s \leq 2n$ . Sortiere  $P$ , so daß  $y_i < y_{i+1}$  gilt.
- Erzeuge einen binären Suchbaum mit minimaler Höhe für die Punkte  $y_1, \dots, y_s$



### Einfügen eines Intervalls

- Jeder Knoten *Node* besitzt einen *Punkt* *Node.y*; jedem Knoten wird eine *Menge von Intervallen*  $I_1, \dots, I_m$  zugeordnet, die den Punkt *Node.y* enthalten.
- Es werden zwei sortierte Listen über der Menge  $I_1, \dots, I_m$  geführt:
  - u-Liste: alle Intervalle sind nach den u-Werten aufsteigend sortiert
  - o-Liste: alle Intervalle sind nach den o-Werten absteigend sortiert
- Ein Intervall *I* wird in die beiden Listen des ersten Knotens *K* eingetragen, dessen Punkt *K.y* in *I* enthalten ist (Durchlauf von der Wurzel beginnend):

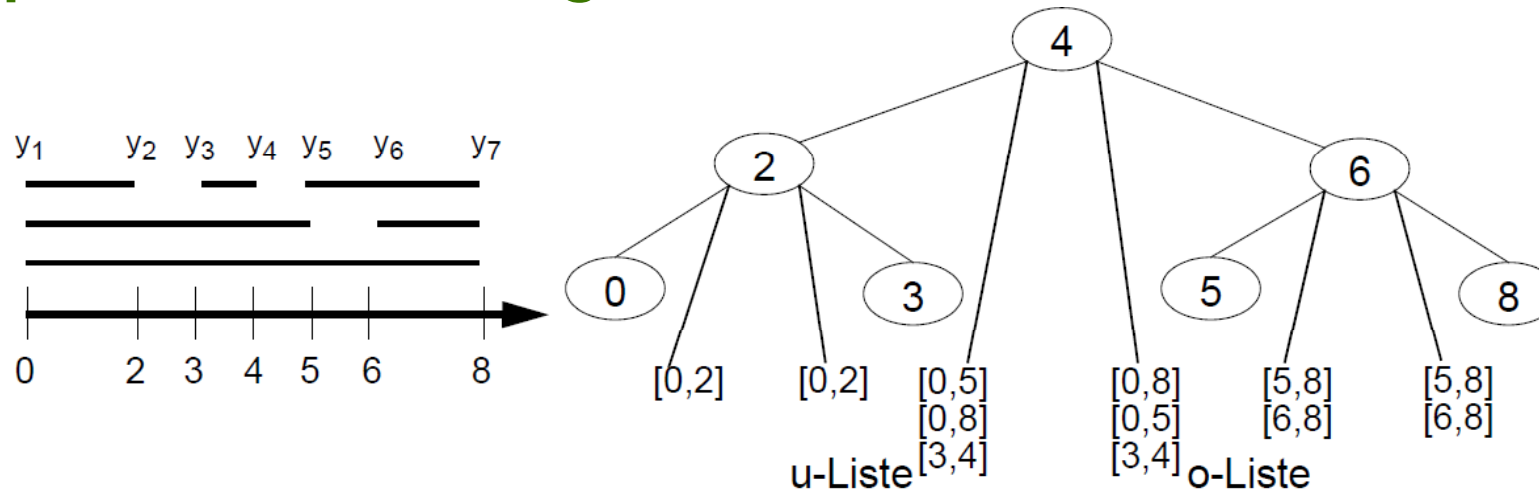
### Einfügen eines Intervalls (cont.)

*Algorithmus Insert (I, Node)*

(erster Aufruf mit Node = Wurzel)

```
IF  $I.u \leq \text{Node}.y \leq I.o$  THEN
    InsertIntoList (u_list, I.u);
    InsertIntoList (o_list, I.o);
ELSIF  $I.o < \text{Node}.y$  THEN
    Insert (I, Node.left)
ELSE
    Insert (I, Node.right)
```

## Beispiel für das Einfügen



## Komplexitätsanalyse

- Verwende zur Organisation der Listen balancierter Bäume (z.B. 2-3+-Baum)  $\Rightarrow$  Einfügen in die o- und u-Liste benötigt  $O(\log n)$  Zeit
  - Erreichen des Knotens im Intervallbaum:  $O(\log n)$  Zeit
  - Gesamtaufwand für eine Einfügung:  $O(\log n)$  Zeit  
(bei  $O(1)$  Speicherplatz)
- $\Rightarrow$  Speicherplatzaufwand für  $n$  Intervalle:  $O(n)$



### Punktanfrage

- Gegeben: Anfragepunkt  $y$
- Gesucht: alle Intervalle  $I$ , die  $y$  enthalten

*Algorithmus PointQuery (Node,  $y$ )*

IF  $y = \text{Node.y}$  THEN

    Gebe alle Intervalle der  $u$ -Liste aus;

ELSIF  $y < \text{Node.y}$  THEN

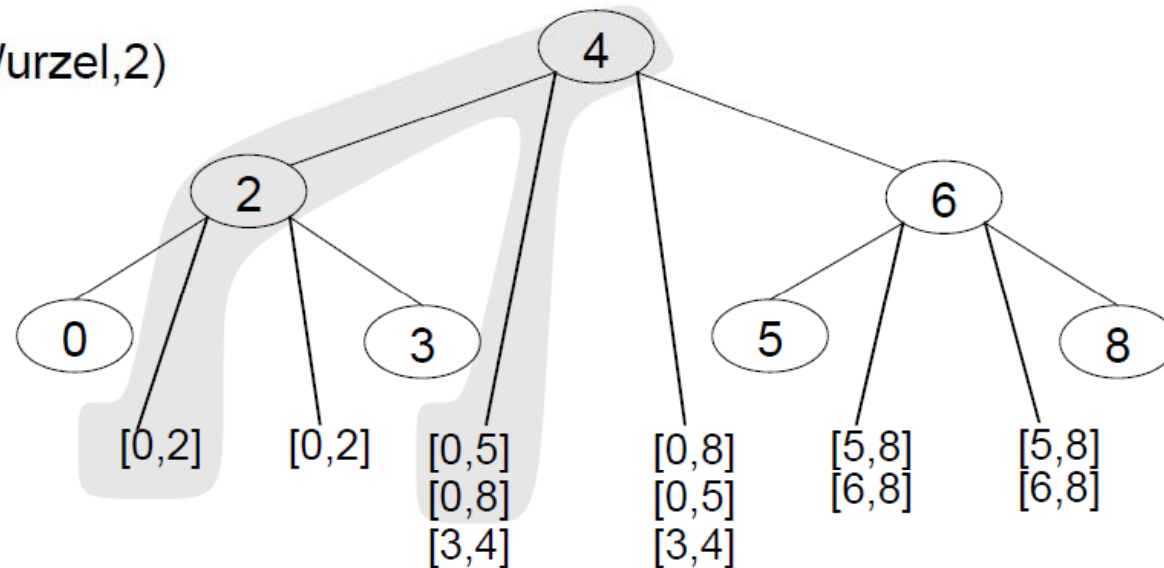
    Gebe sequentiell den Anfang der  $u$ -Liste aus, bis ein  $u$ -Wert rechts von  $y$  liegt;  
    PointQuery (Node.left,  $y$ );

ELSE

    Gebe sequentiell den Anfang der  $o$ -Liste aus, bis ein  $o$ -Wert links von  $y$  liegt;  
    PointQuery (Node.right,  $y$ );

## Beispiel für die Punktanfrage

PointQuery (Wurzel, 2)



## Komplexitätsanalyse der Punktanfrage

- Für jeden Knoten des Intervallbaums wird maximal auf ein Intervall zugegriffen, das nicht Antwort ist
- Die Anfrage ist auf einen Pfad des Baums beschränkt  
 $\Rightarrow$  Gesamtaufwand:  $O(\log n + k)$  ( $k$  = Größe der Antwortmenge)