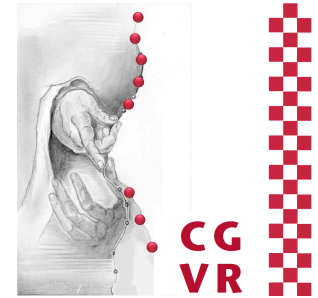


Bremen



Computergraphik I

Clipping



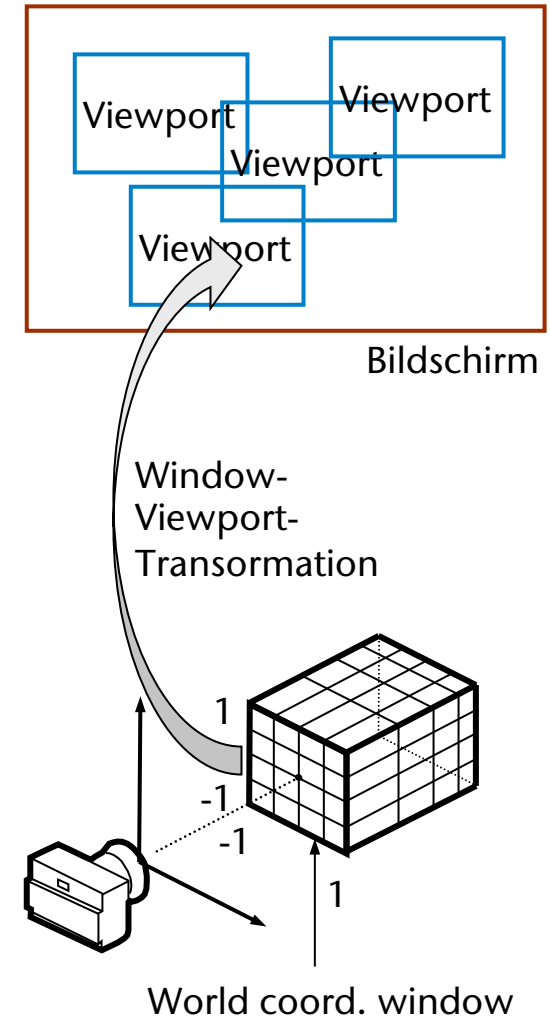
G. Zachmann

University of Bremen, Germany

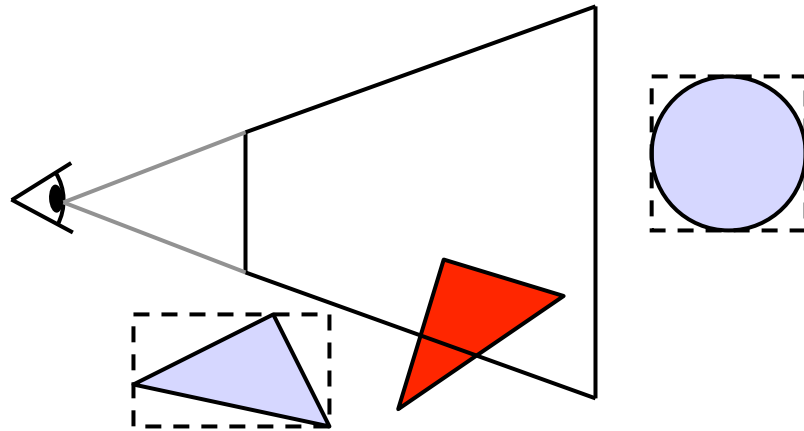
cgvr.informatik.uni-bremen.de

Ausschnittsbildung (Windowing und Clipping)

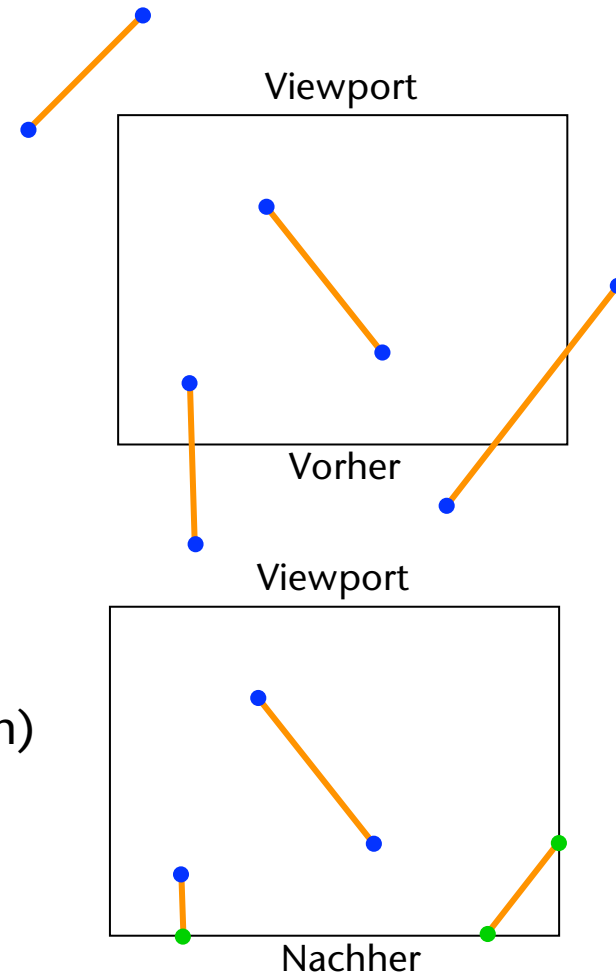
- **Viewport** = Ausgabefenster auf dem Bildschirm
 - Wird in Bildschirmkoordinaten spezifiziert
- **World coordinate window** = Fenster in die Szene (meist einfach "Window")
 - Wird in Weltkoordinaten spezifiziert
- Transformation zwischen Weltkoordinatensystem und Bildschirmkoordinatensystem → **Window-Viewport-Transformation**
- Ohne **Clipping** würden die einzelnen Viewports sich gegenseitig überschreiben



Unterschiede: Culling und Clipping

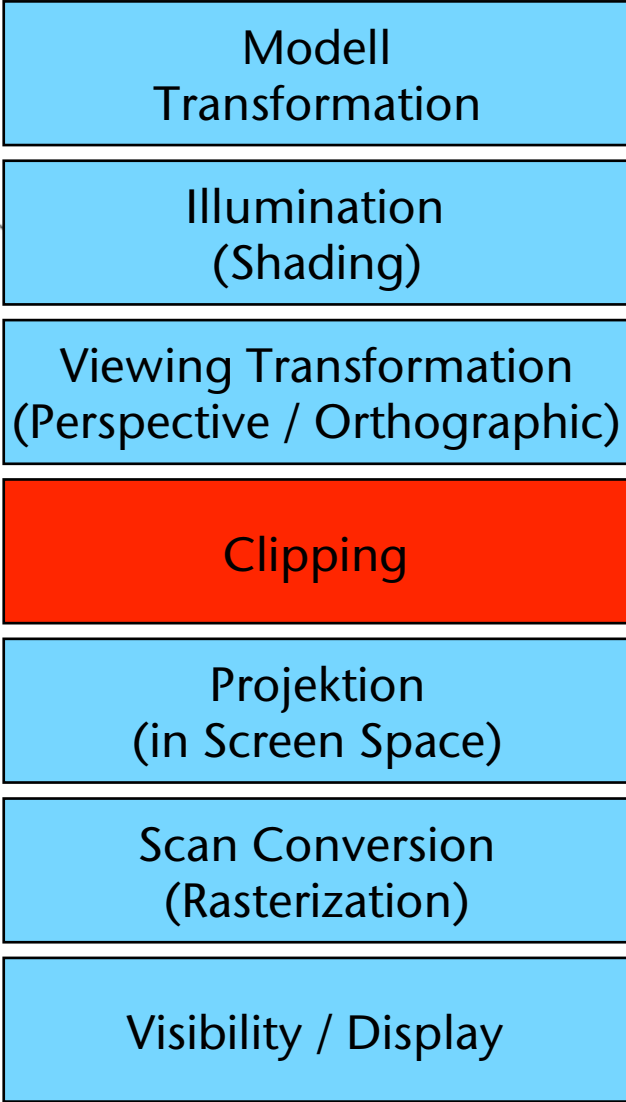
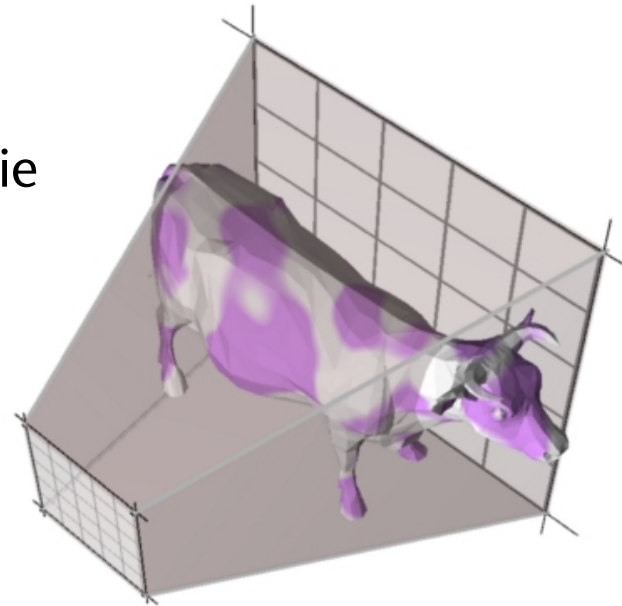


- **Culling** = **Ausschluss** ganzer Objekte (oft über *bounding volumes*)
 - Resultat = Ja / Nein (Entscheidungsproblem)
- **Clipping** = teilweise sichtbare Objekte (Linien / Polygone) müssen gegen Window / Viewport **geclippt** werden
 - Resultat = maximales Teil-Objekt, das vollständig im Window liegt (Konstruktionsproblem)



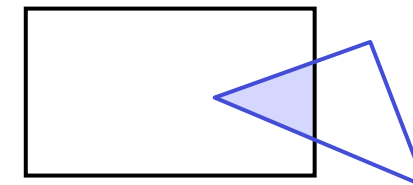
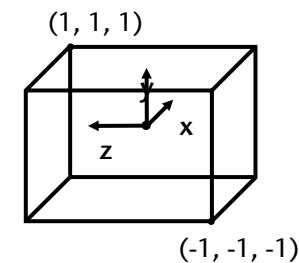
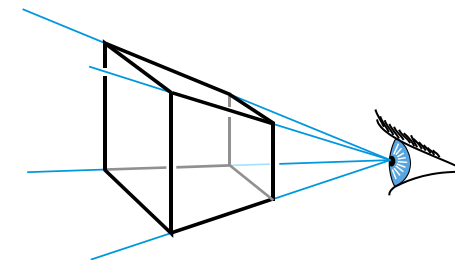
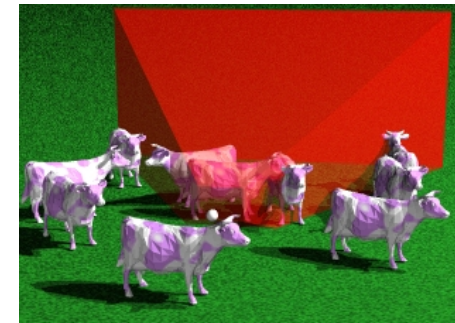
Station in der Graphik-Pipeline

- Abschneiden der Objekte, die außerhalb des sichtbaren Bereiches liegen (*view frustum*)
- Frühere Graphik-Hardware führte vollständiges Clipping durch — moderne Hardware "kürzt ab"
- Trotzdem sinnvoll, Clipping-Algos kennenzulernen, da oft wiederkehrendes Problem

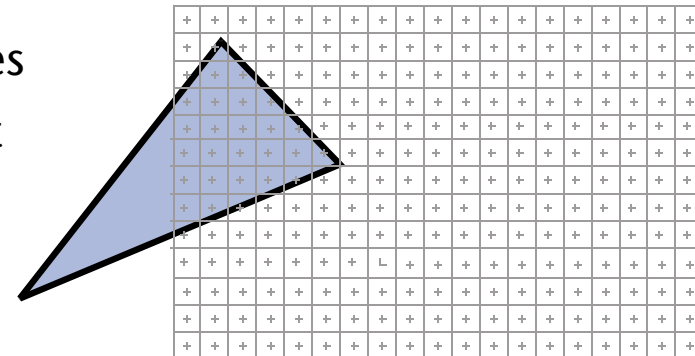


Wann sollte geclippt werden?

- Vor der Kamera-Transformation im 3D Raum
 - Benötigt 6 allgemeine Ebenengleichungen
- In homogenen Koordinaten nach der Kamera-Transformation im 4D, bevor durch die Perspektive geteilt wird (*Clip space*)
 - ergibt ungewöhnliche w-Werte
 - ist tatsächlich am einfachsten zu implementieren
- Im perspektivisch transformierten 3D-Screen-Space
 - Problem: Objekte in der Kameraebene
- Nach der Projektion am Viewport in 2D
- Während der Rasterisierung für jedes Pixel

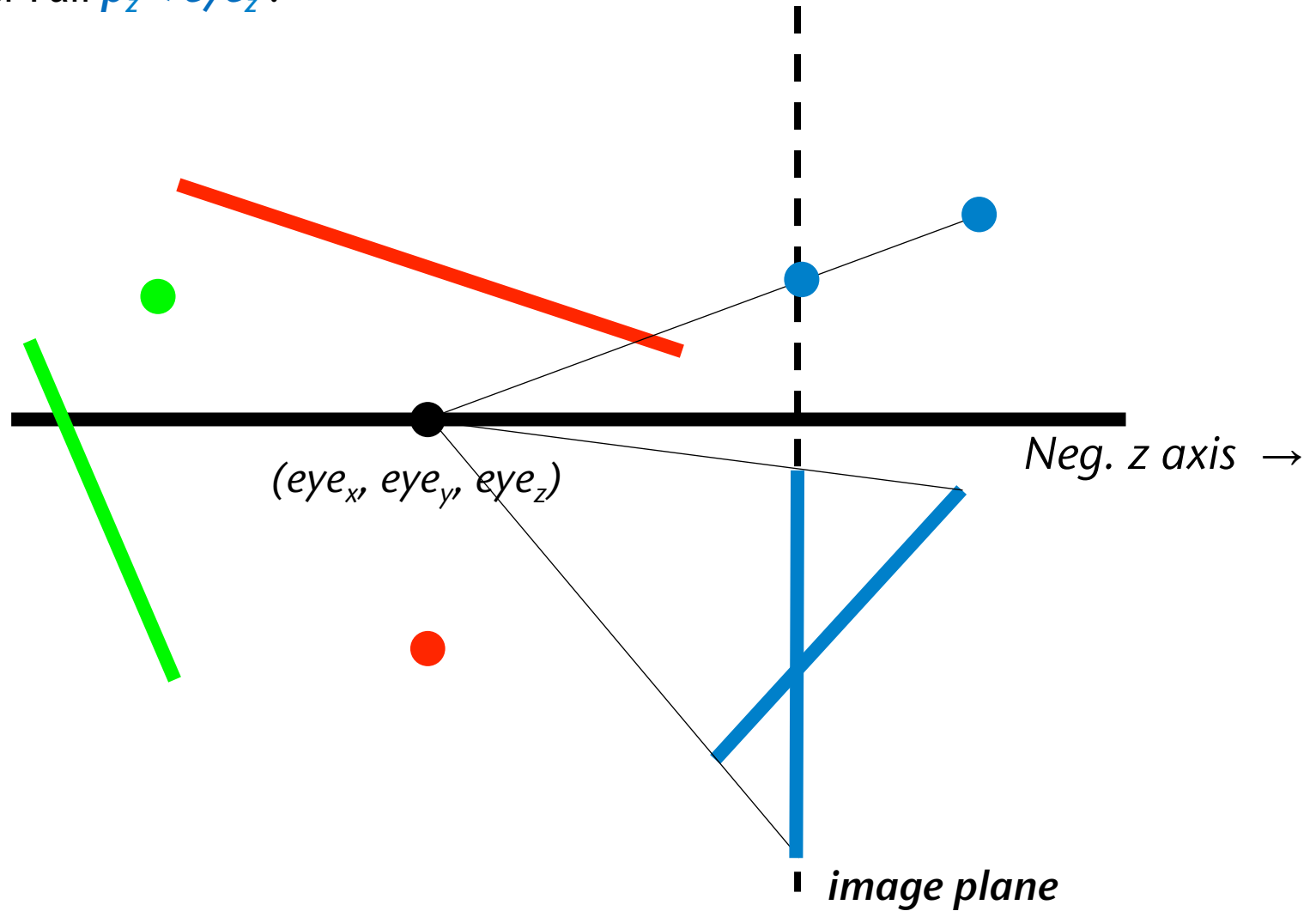


- Idee:
 - Führe Clipping während des Rasterisierens aus
 - Teste vor dem tatsächlichen Setzen eines Pixels, ob es innerhalb des Viewports ist
- Vorteil: funktioniert für beliebige Clipping-Windows (auch mit "Löchern")
- Nachteil: evtl. werden sehr viele Pixel ausgerechnet, die dann letztlich doch nicht gezeichnet werden (im worst-case alle)

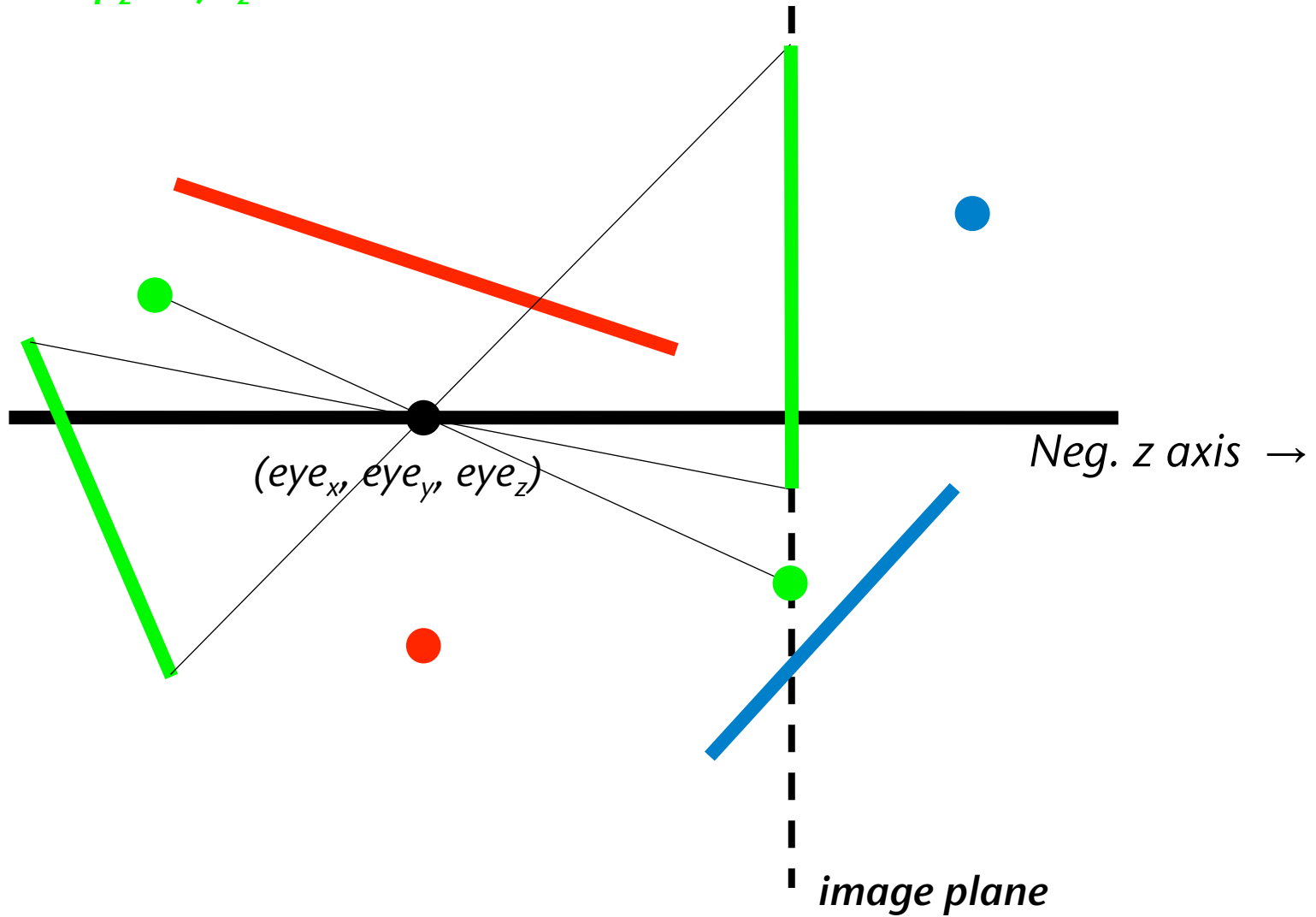


Motivation für Clipping **vor** der Projektion

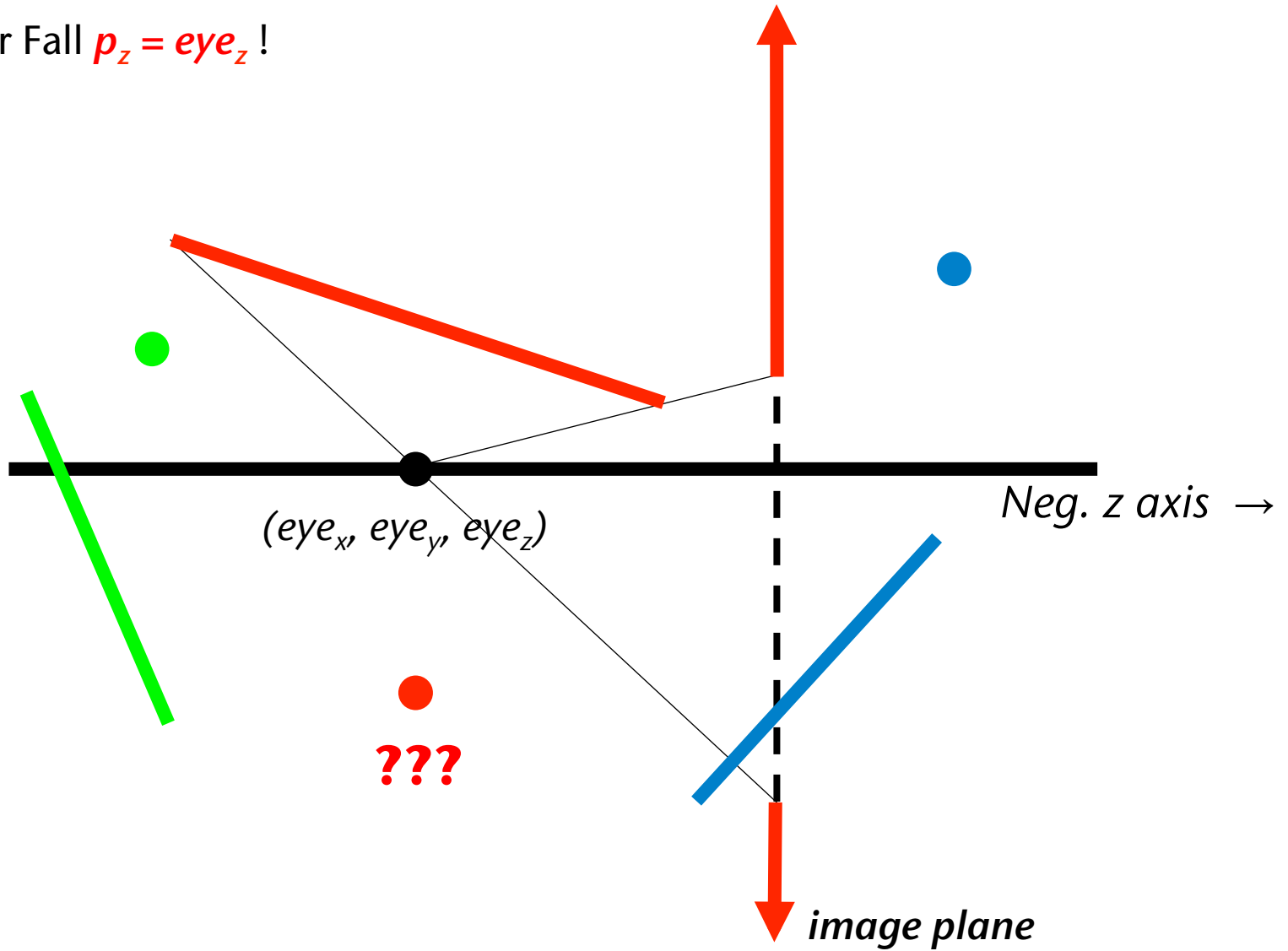
- Der Fall $p_z < eye_z$:

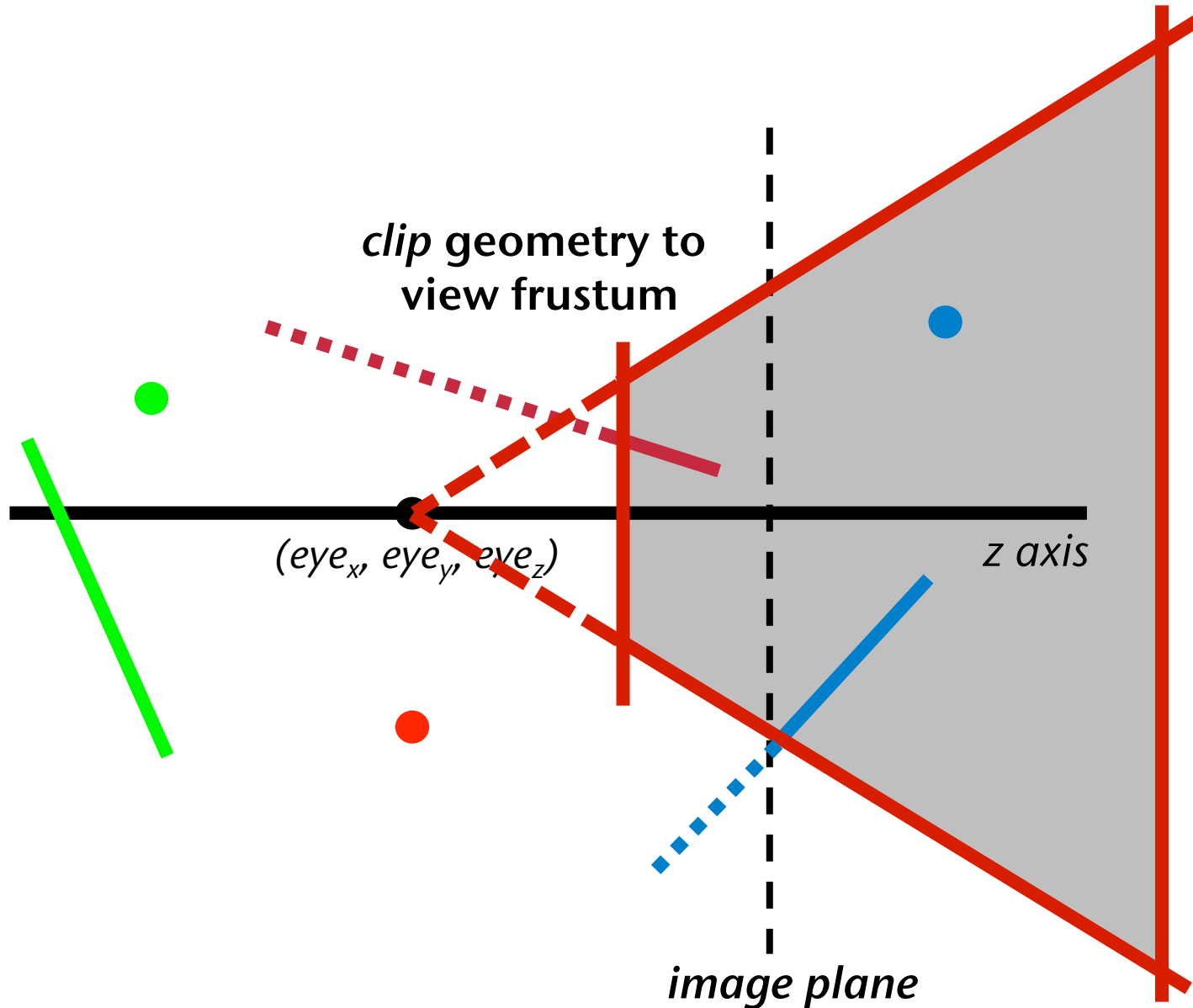


- Der Fall $p_z > eye_z$:



- Der Fall $p_z = eye_z$!





Clipping in Bezug auf das View Frustum

- Erinnerung: homogene Ebenengleichung

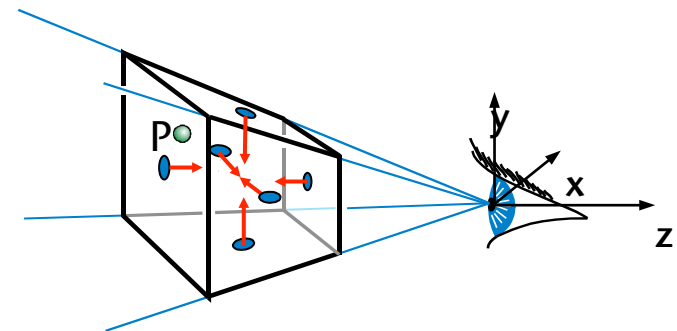
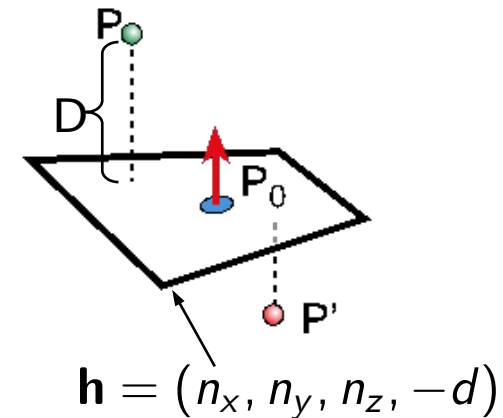
$$\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} = 0$$

- Clipping eines Punktes:

- Teste gegen alle 6 Ebenen
- Annahme: Normalenvektoren sind nach **innen** gerichtet
- Verwerfe Punkt P wenn für eine Ebene

$$\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} < 0$$

- Klappt für beliebige konvexe Polyeder



- 4 Fälle:

1. Wenn $\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} > 0 \wedge \mathbf{h} \cdot \mathbf{q} < 0$

- Ersetze q

2. Wenn $\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} < 0 \wedge \mathbf{h} \cdot \mathbf{q} > 0$

- Ersetze p

3. Wenn $\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} > 0 \wedge \mathbf{h} \cdot \mathbf{q} > 0$

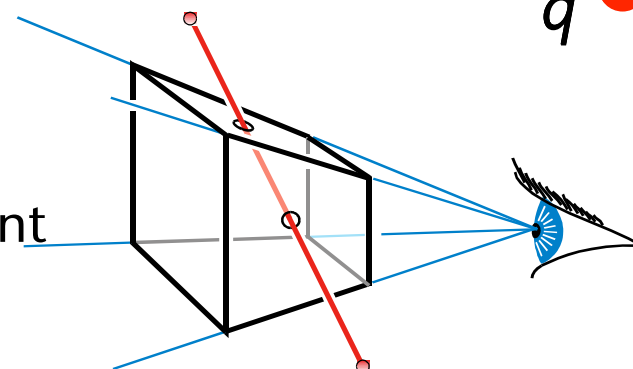
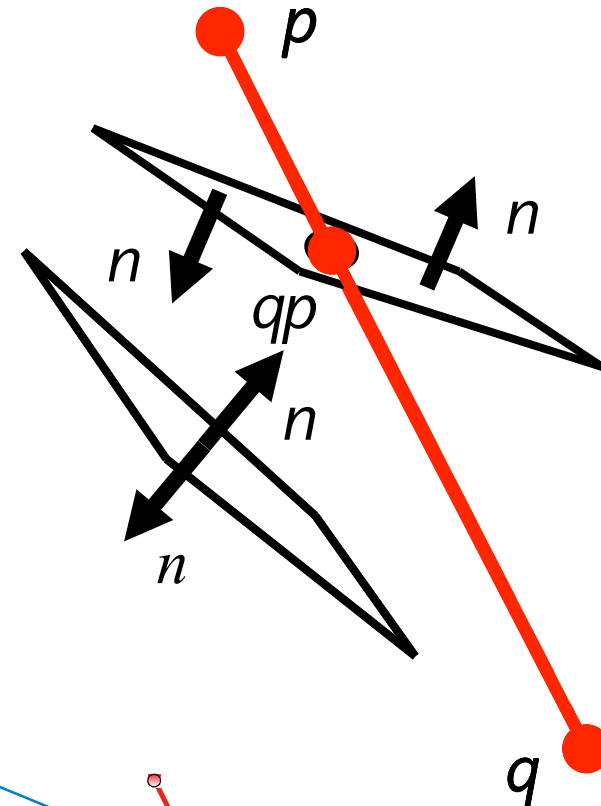
- "pass through"

4. Wenn $\mathbf{h} \cdot \mathbf{p} < 0 \wedge \mathbf{h} \cdot \mathbf{q} < 0$

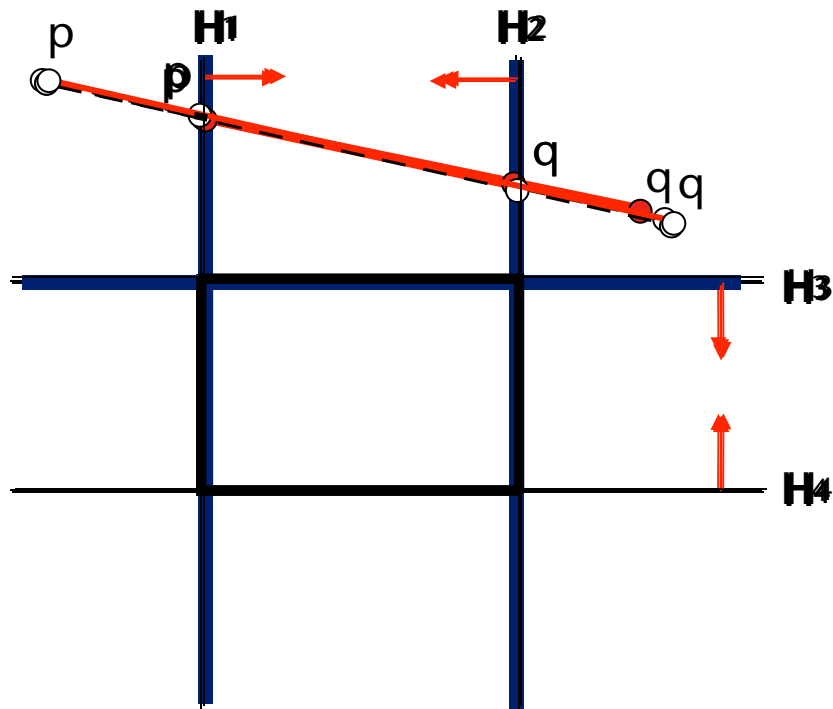
- Komplette verwerfen ("reject")

- Für das ganze Frustum: alle Ebenen auf diese Weise durchlaufen

- Das Ergebnis ist ein einzelnes Segment (warum?)



Ist dieses Clipping effizient?



- Was ist das Problem?
 - Die Berechnung der Schnittpunkte und aller dazugehörigen interpolierten Werte sind – in diesem Fall – unnötig!
- Kann man dies früher erkennen?

Erhöhung der Effizienz: Outcodes

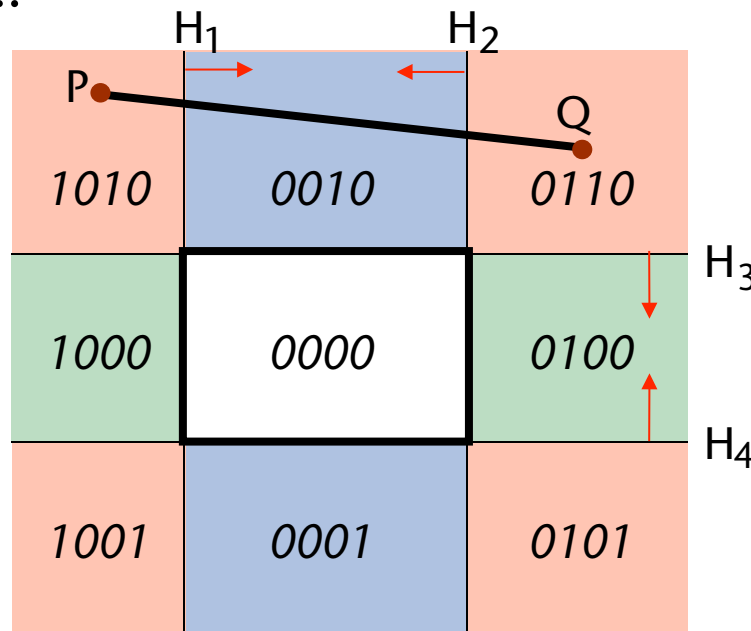
- Berechne die "Sidedness" jedes Vertex bzgl. jeder Ebene
 - 0 = "richtige" Seite (Vorderseite); 1 = "falsche" Seite (Rückseite)
 - Ergibt pro Vertex einen 6-Bit langen *Outcode* (4 Bit im 2D)

- Bedingung:

$$\text{out}(P) \& \text{out}(Q) \neq 0 \rightarrow \text{"trivial reject"}$$

Bitweises UND!!

- Bsp.:



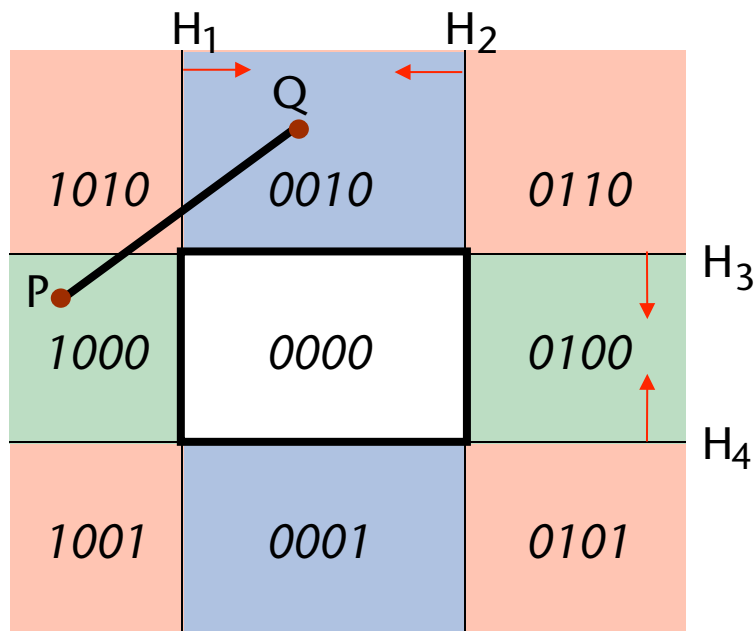
Outcode von P : 1010

Outcode von Q : 0110

AND : 0010

→ "trivial reject", da ≠ 0

- Weiteres Beispiel:



Outcode von P : 1000

Outcode von Q : 0010

AND : 0000

→ "potentially visible"

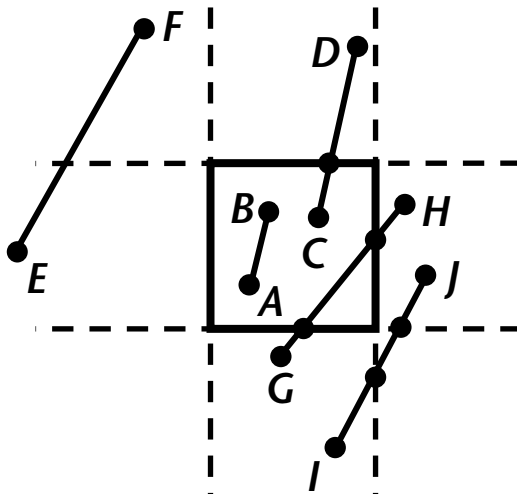
- In diesen Fällen macht der Test also keine Aussage!
- Dies ist der sog. [Cohen-Sutherland-Algorithmus](#)

- Weitere Aussage auf Basis der Outcodes:

$$\text{out}(P) \mid \text{out}(Q) \neq 0 \rightarrow \text{"trivial accept"}$$

Bitweises ODER!!

- Beispiele:



<i>Linie</i>	<i>out(A)</i>	<i>out(B)</i>	<i>AND</i>	<i>OR</i>
AB	0000	0000	0000	0000
CD	0000	1000	0000	1000
EF	0001	1001	0001	1001
GH	0100	0010	0000	0110
IJ	0100	0010	0000	0110

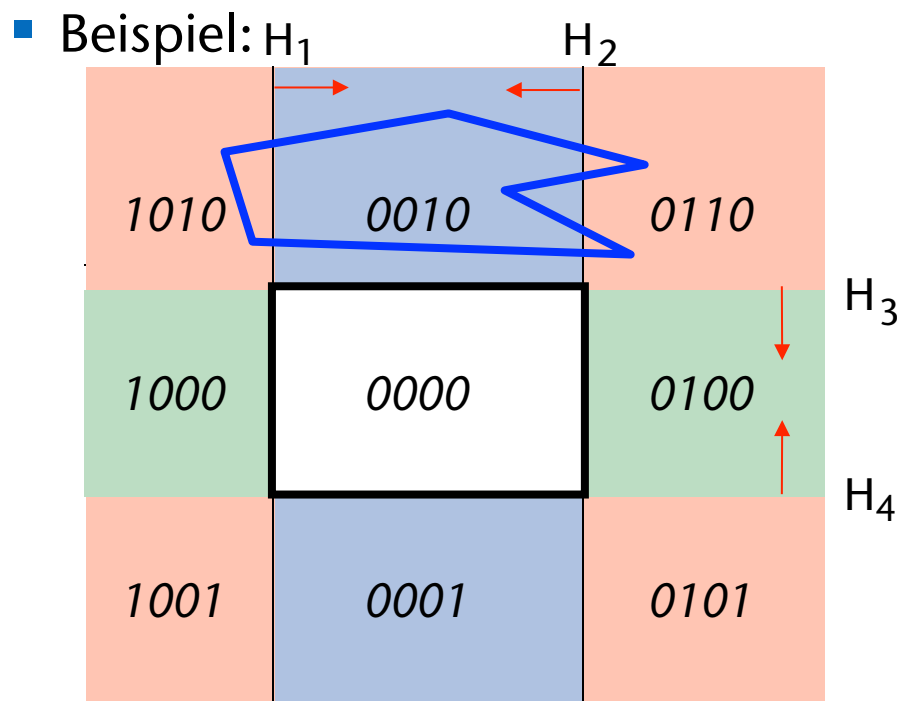
- Genereller Trick, der hier angewandt wird:
 - Erst einfache Tests durchführen, ob Clipping nötig ist
 - Die Tests liefern evtl. keine definitive Antwort, aber dafür sind sie sehr schnell
 - Dann erst im "nötigen" Fall die (teuren) mathematischen Operationen durchführen
- Der Code für die Outcodes (2D-Fall, rechteckiges Clip-Window):

```
unsigned int outcode( int x, int y )
{
    unsigned int c = 0;

    if ( y > ymax ) c = c | 8; // 1000
    if ( y < ymin ) c = c | 4; // 0100
    if ( x > xmax ) c = c | 2; // 0010
    if ( x < xmin ) c = c | 1; // 0001

    return c;
}
```

- Das Gute an dem Test: er funktioniert für beliebige Primitive in beliebigen Dimensionen mit beliebigen, konvexen Clip-Windows!



Outcode of p : 1010

Outcode of q : 1010

Outcode of r : 0110

Outcode of s : 0010

Outcode of t : 0110

Outcode of u : 0010

AND : 0010

→ Clipped

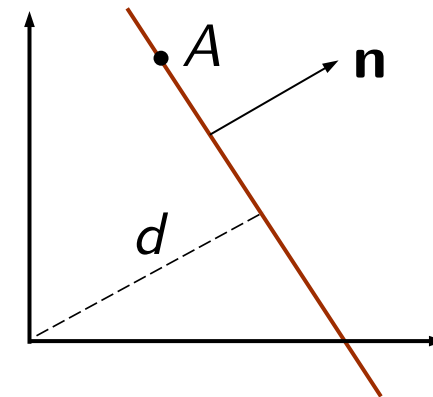
Clipping in homogenen Koordinaten

- Erinnerung:
 - Ein Punkt $P = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \equiv$ Vektor $\hat{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4$ in homogenen Koord.
 - Alle Vielfache des homogenen Vektors entsprechen demselben Punkt:

$$s \cdot \hat{\mathbf{p}} \equiv P$$

- Sei eine Ebene gegeben durch \mathbf{n}, A
- Dann liegt P in der Ebene \Leftrightarrow

$$(P - A) \cdot \mathbf{n} = P \cdot \mathbf{n} - \underbrace{A \cdot \mathbf{n}}_d \equiv \hat{\mathbf{p}} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{n}_x \\ \mathbf{n}_y \\ \mathbf{n}_z \\ -d \end{pmatrix} = 0$$



- Der Vektor $\hat{\mathbf{n}} = (\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z, -d)$ heißt auch **homogene Darstellung** der Ebene, oder **homogene Normale**

- Fazit: Punkt/Vektor im 3D \equiv Vektor im 4D
Ebene im 3D \equiv Vektor im 4D
- Bemerkung: alle Vektoren $t \cdot \hat{n}$ beschreiben die gleiche Ebene

$$\hat{p} \cdot \hat{n} = 0 = s\hat{p} \cdot t\hat{n}$$

Outcodes in homogenen Koordinaten

- Betrachte das Clip-Window $(0,0,0) - (1,1,1)$
 - Die homogene Darstellung der beiden Ebenen $x=0$ und $x=1$ ist

$$\mathbf{n}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad \mathbf{n}_2 = (-1 \ 0 \ 0 \ 1)$$

- Definiere die *boundary distance (BD)*

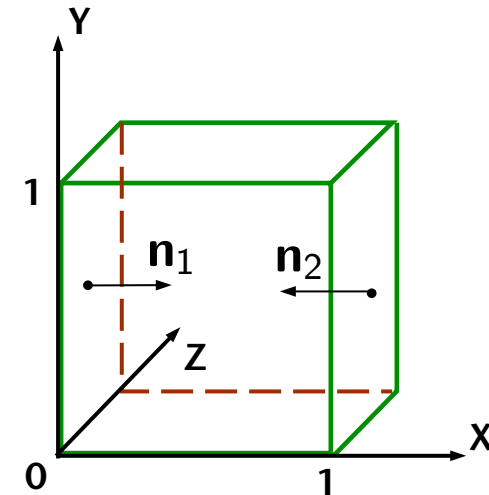
$$d_i = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n}_i, \quad \mathbf{p} = (x, y, z, w)$$

- Berechnung ist trivial; z.B. $d_1 = x$ $d_2 = w - x$
- Erstelle Tabelle aller BDs →

- Outcodes sind auch trivial

zu bestimmen:
 $i(\mathbf{p}) = (d_i)$

$$= \begin{cases} 1 & , P \text{ außerhalb Ebene } i \\ 0 & , P \text{ innerhalb Ebene } i \end{cases}$$



BD	homog. Wert	Ebene
d_1	x	$x=0$
d_2	$w - x$	$x=1$
d_3	y	$y=0$
d_4	$w - y$	$y=1$
d_5	z	$z=0$
d_6	$w - z$	$z=1$

Trivial accept / reject

- Sei Linie PQ gegeben; in homogenen Koordinaten: \mathbf{p} , \mathbf{q}
- Wie bisher auch:
 - $\text{out}(\mathbf{p}) \wedge \text{out}(\mathbf{q}) \neq 000000 \Rightarrow$ trivial reject
 - $\text{out}(\mathbf{p}) \vee \text{out}(\mathbf{q}) = 000000 \Rightarrow$ trivial accept
- Ansonsten: es muß mindestens eine Bitposition i geben, wo $\text{out}_i(\mathbf{p}) = 0$ und $\text{out}_i(\mathbf{q}) = 1$ oder umgekehrt.
- Schneide $X(t)$ mit dieser Clip-Window-Ebene:

$$X(t) = P_0 + t(Q - P) \leftrightarrow \hat{x}(t) = \mathbf{p} + t(\mathbf{q} - \mathbf{p})$$

$$\hat{x}(t) \cdot \mathbf{n}_i = [\mathbf{p} + t(\mathbf{q} - \mathbf{p})] \cdot \mathbf{n}_i = \mathbf{p}\mathbf{n}_i + t(\mathbf{q}\mathbf{n}_i - \mathbf{p}\mathbf{n}_i)$$

$$= d_i^p + t(d_i^q - d_i^p) \stackrel{!}{=} 0$$

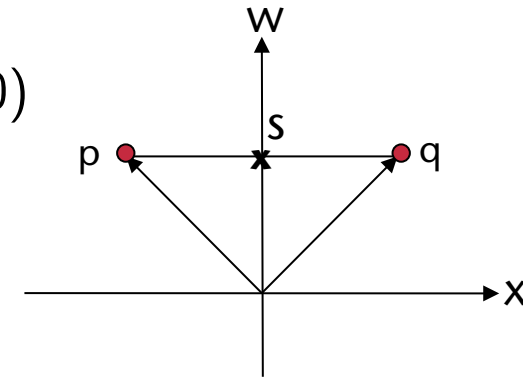
$$t = \frac{d_i^p}{d_i^p - d_i^q}$$

- Bemerkung: $t \in \{0, 1\} \Leftrightarrow \text{sign}(d_i^p) \neq \text{sign}(d_i^q)$

Beispiel

- $P = (-1 \ 0 \ 0)$ $Q = (1 \ 0 \ 0)$ Ebene 1: $x = 0$
- $\mathbf{p} = (-1 \ 0 \ 0 \ 1)$ $\mathbf{q} = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$ $\mathbf{n}_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$
- Parameter des Schnittpunktes \mathbf{s} :

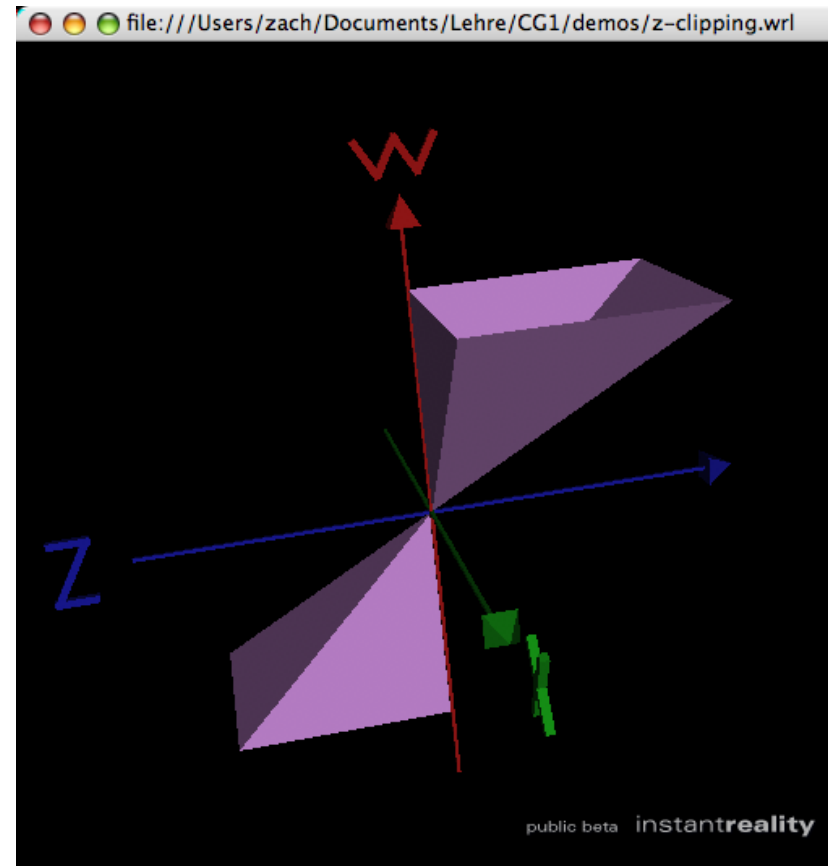
$$t = \frac{d_1^p}{d_1^p - d_1^q} = \frac{-1}{-1 - (+1)} = \frac{1}{2}$$



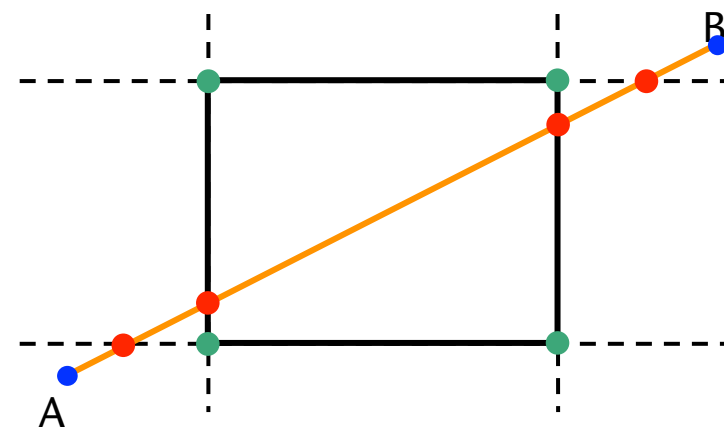
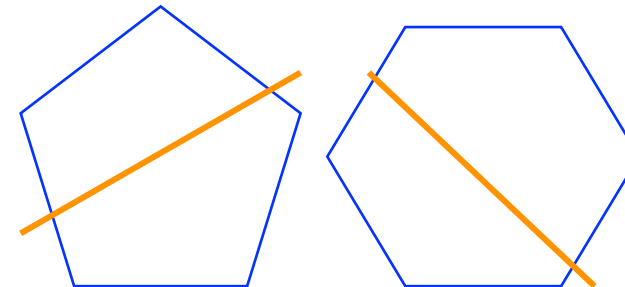
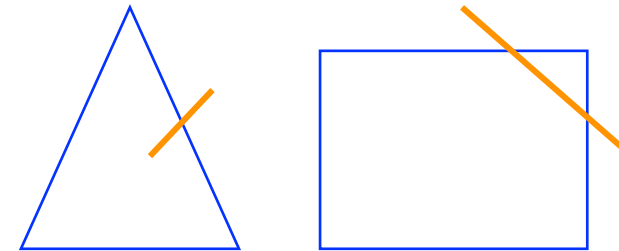
- Schnittpunkt: $\mathbf{s} = \mathbf{p} + \frac{1}{2} (\mathbf{q} - \mathbf{p}) = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$
- Frage: was ist mit $\mathbf{p}' = (-2 \ 0 \ 0 \ 2)$? (Ist derselbe Punkt P in 3D!)
 - Parameter $t' = \frac{2}{3}$
 - Ist das ein anderer Punkt?
 - Nein, denn Schnittpunkt

$$\mathbf{s}' = \mathbf{p}' + \frac{2}{3} (\mathbf{q} - \mathbf{p}') = \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} + \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1\frac{1}{3} \end{pmatrix} \equiv \mathbf{s}$$

- Visualisierung der Clipping-Region im 4D:

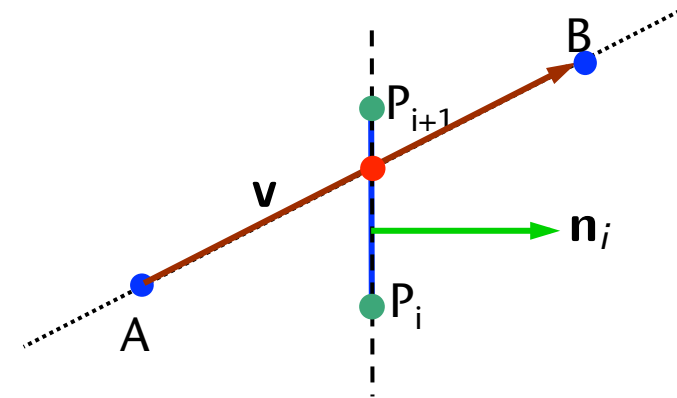


- Clippen von Linien an beliebigen, konvexen Clip-Windows
- Verwendet die Parameterdarstellung der Linien
- Im Folgenden wird wieder das Rechteck als Beispiel verwendet; der Algorithmus ist aber für beliebige (konvexe) Clip-Windows anwendbar
- Bei einem n-Eck kann es bis zu n Schnittpunkte geben
- Nur 2 davon sind echte Schnittpunkte mit dem Clip-Window



- Berechne für jeden Clipping-Rand i das zugehörige t :

$$t = - \frac{(A - P_i) \cdot \mathbf{n}_i}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_i}$$



- Die Werte $t < 0$ und $t > 1$ werden ignoriert
- Jeweils genau ein t markiert den Eintrittspunkt und den Austrittspunkt der Linie

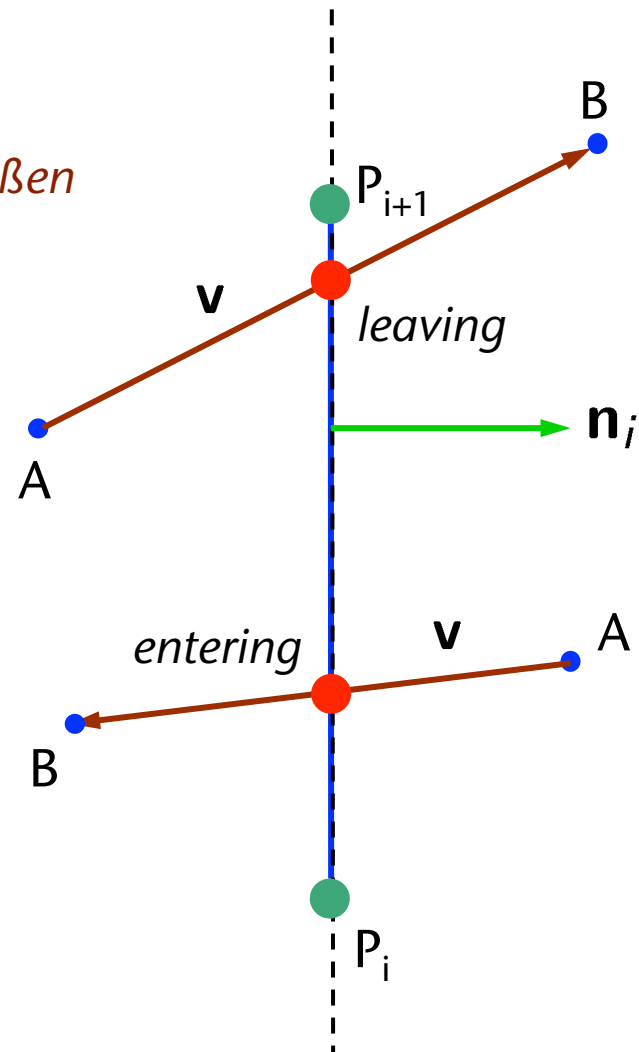
- Idee: klassifiziere alle t 's
 - Konvention: Normalen zeigen nach *außen*
 - "Leaving", falls:

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{v} > 0 \Rightarrow t_i^l$$

- "Entering", falls:

$$\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{v} < 0 \Rightarrow t_i^e$$

- Sonst: Sonderfall, der anderweitig abgefangen wird



- Berechne das Maximum und Minimum

$$t_e = \max\{t_i^e, 0\} \quad t_l = \min\{t_i^l, 1\}$$

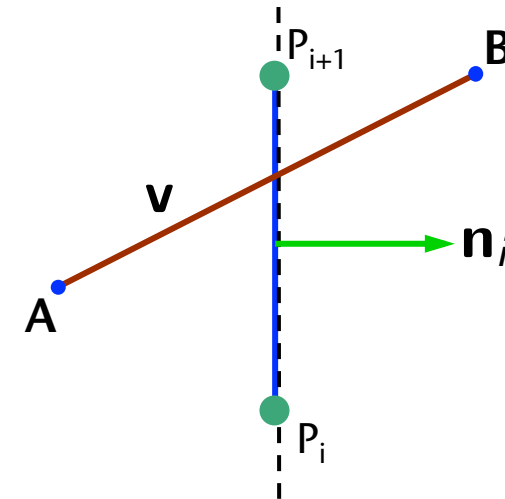
- Falls $t_e > t_l \rightarrow$ Linie ist komplett außerhalb des Clip-Windows
- Sonst: t_e und t_l definieren die Enden der geclippten Linie

- Alternative Betrachtungsweise:
 - Starte mit Intervall $[0,1]$
 - Schneide Linie der Reihe nach gegen jeden Clip-Rand
 - Falls "entering" \rightarrow schneide aktuelles Intervall unten ab (falls überhaupt)
 - Falls "leaving" \rightarrow schneide aktuelles Intervall oben ab
 - Stop, falls Intervall leer wird

- Wann kann der Nenner Null werden?

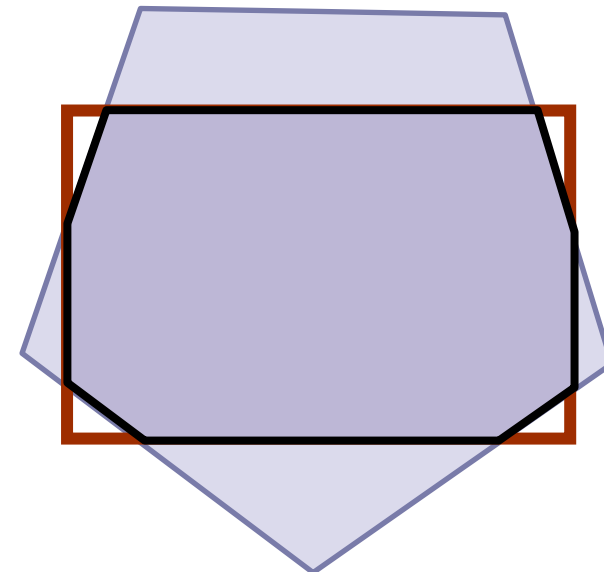
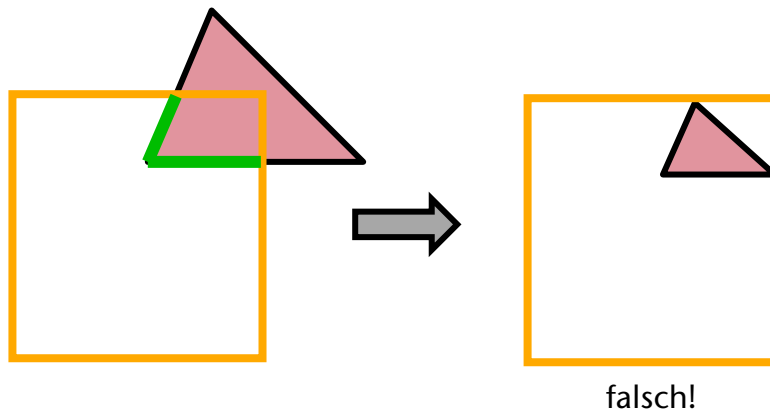
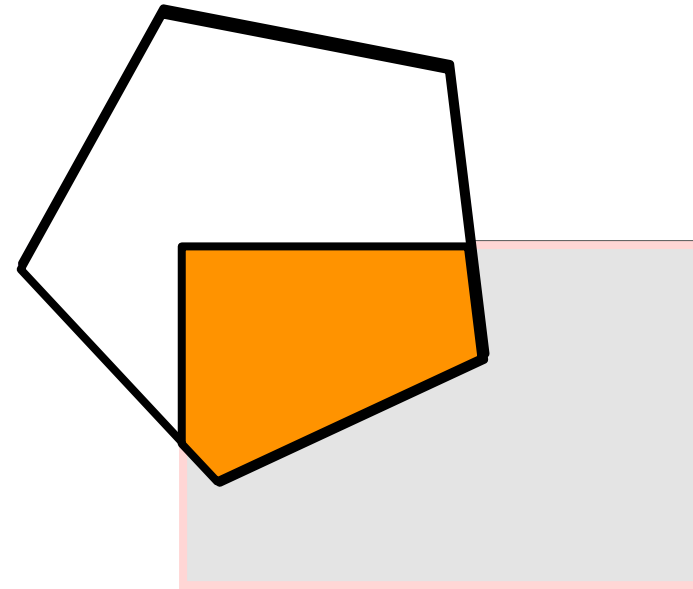
$$t = -\frac{(A - P_i) \cdot \mathbf{n}_i}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_i}$$

- $\mathbf{v} = 0$:
 - Start- und Endpunkt der Linie sind identisch (muß vorher abgefangen werden)
- $\mathbf{n}_i = 0$:
 - Nur, falls 2 Punkte des Clip-Windows identisch sind, vorher abfangen
- $\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{v} = 0$:
 - Zu zeichnende Linie ist parallel zu einer Kante des Clip-Objekts → kein t ausrechnen, nächsten Clip-Rand betrachten

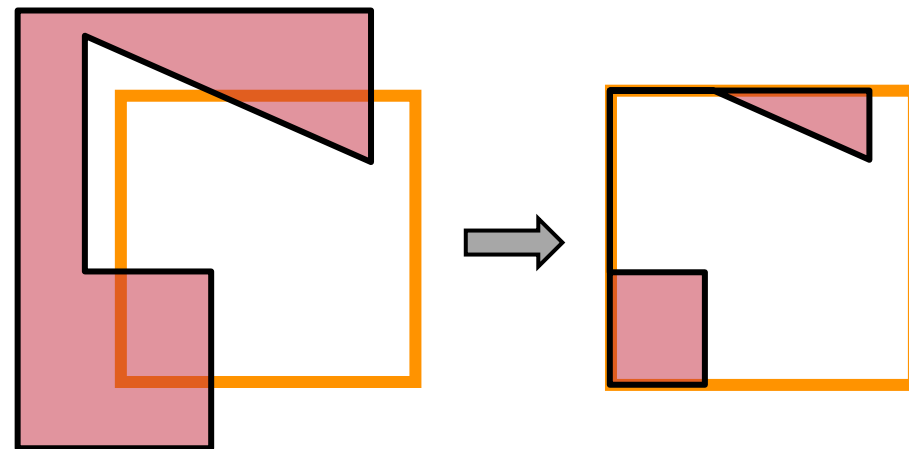
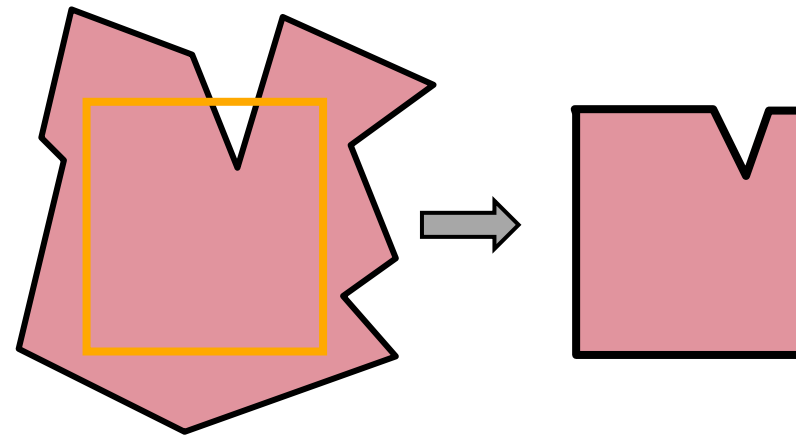


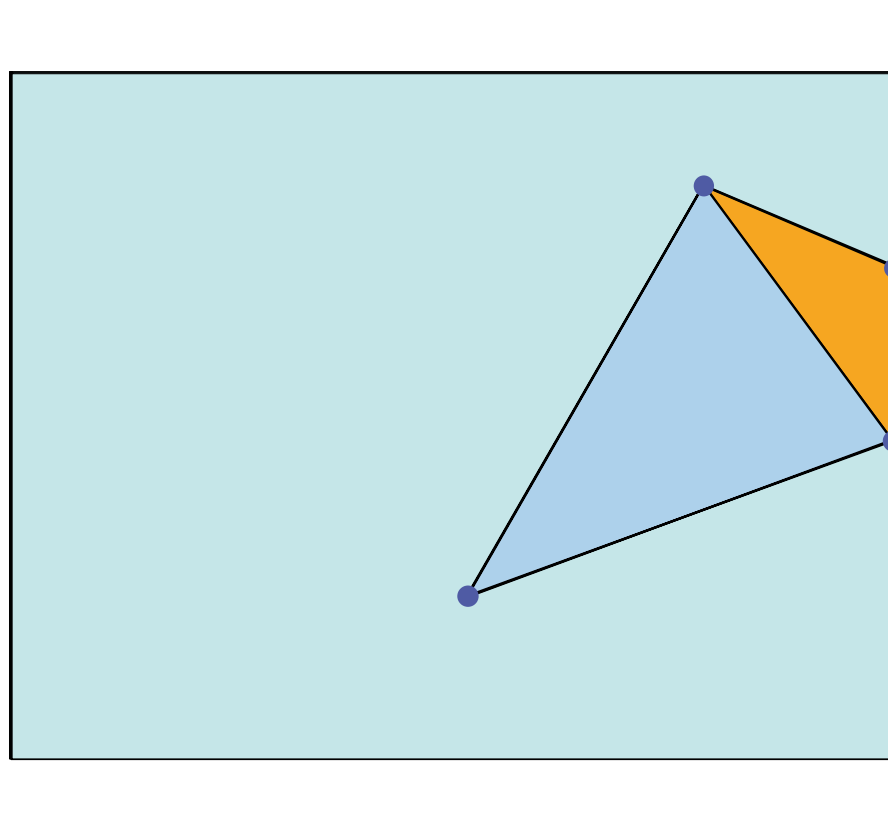
Polygon Clipping in 2D

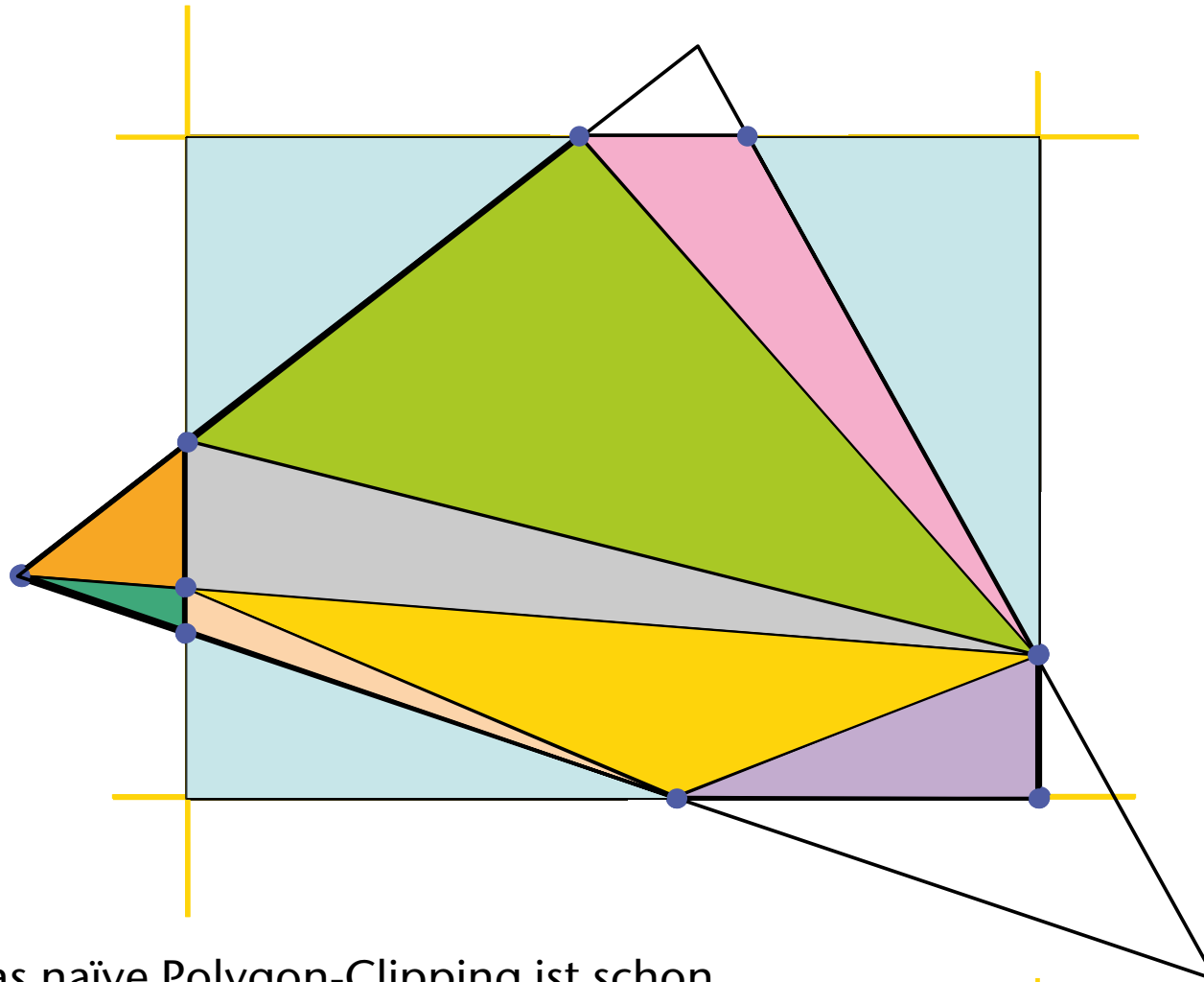
- Clipping ist symmetrisch
- Polygon Clipping ist komplex
 - Sogar bei konvex Polygonen
- Polygon Clipping \neq Clipping der Liniensegmente!



- Polygon-Clipping kann, insbesondere bei nicht-konvexen Polygonen, unangenehm werden
- Es können sogar mehrere Polygone entstehen

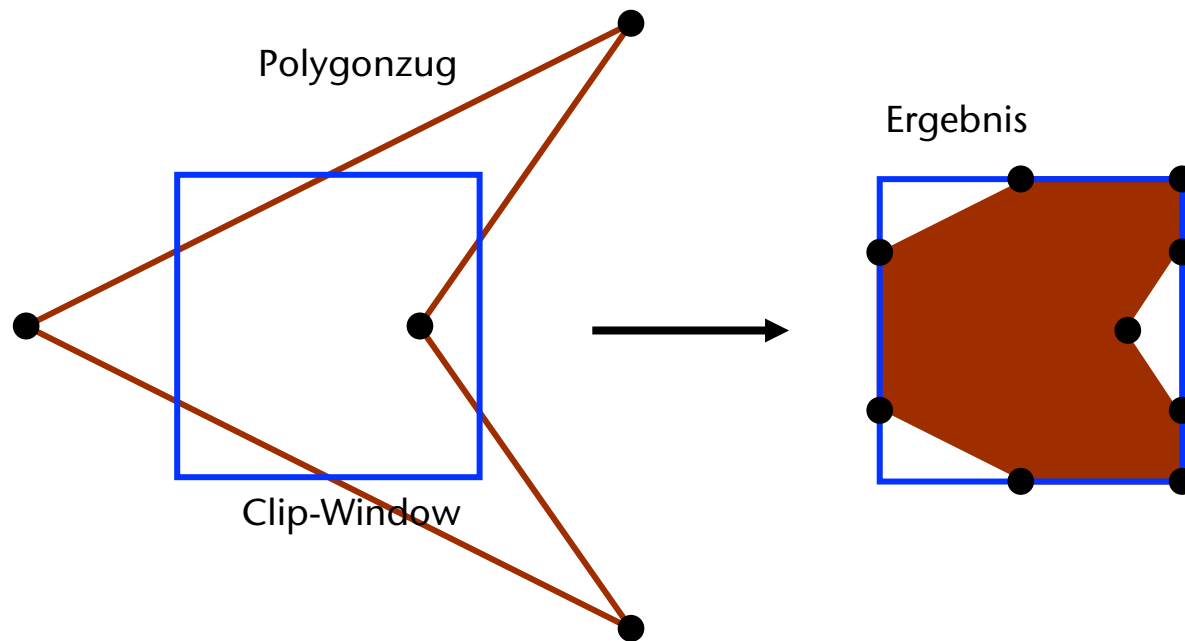




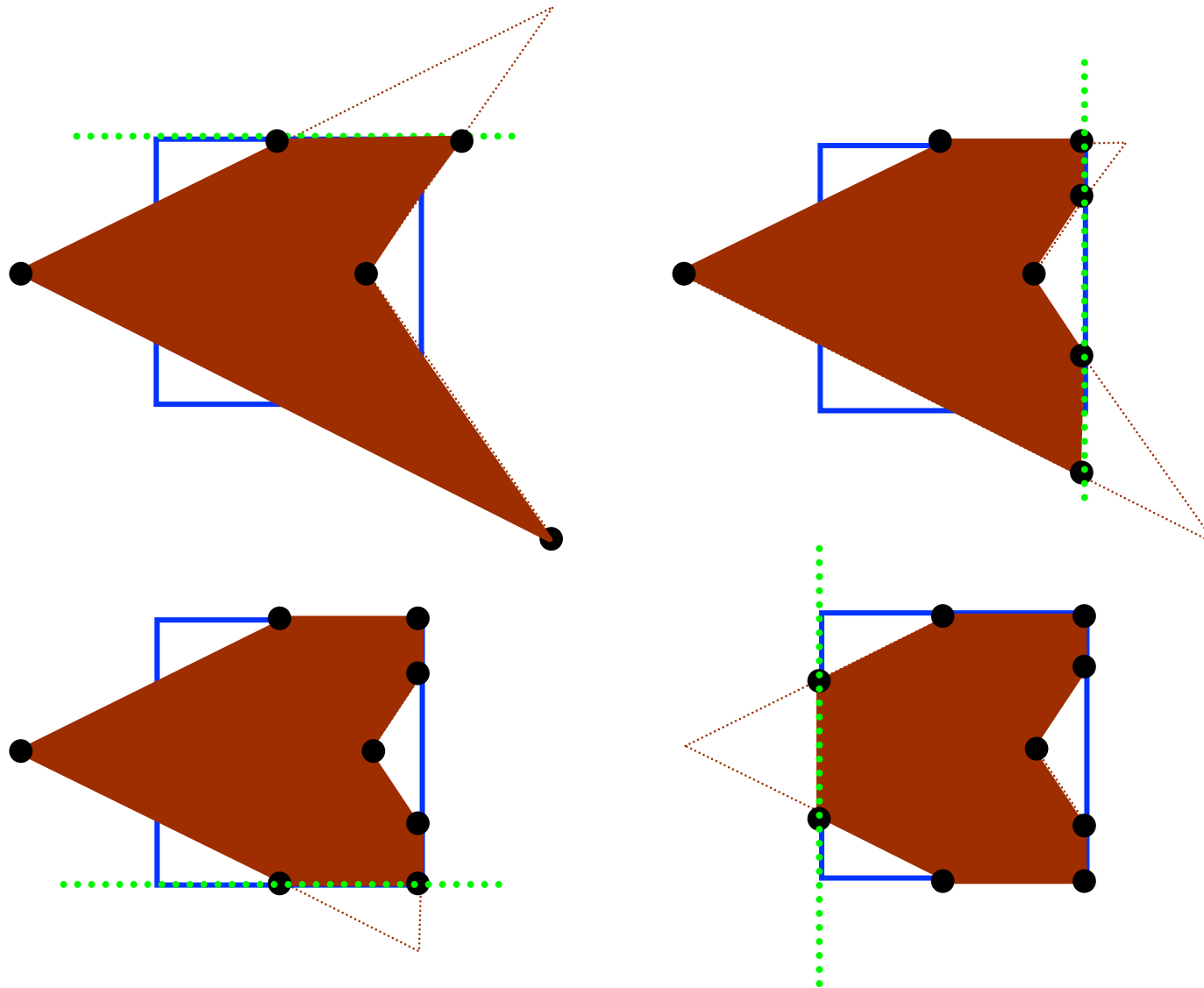


Fazit: das naive Polygon-Clipping ist schon für Dreiecke zu ineffizient (erzeugt viel zu viel Output)

- Clipping eines Polygonzugs gegen ein konvexes Clip-Polygon (z.B. Viewport); der Polygonzug darf konkav sein

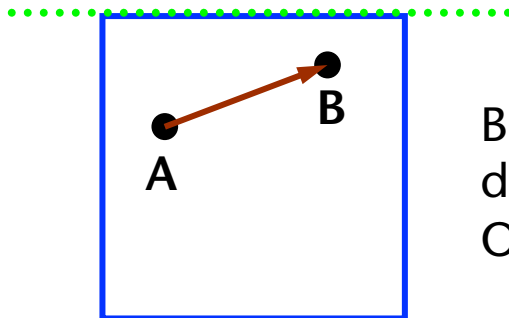


- Eingabe =
 - Liste der Eckpunkte in der richtigen Reihenfolge (gegen den Uhrzeigersinn)
 - Menge von Clip-Kanten, die ein konvexes Clip-Window definieren
- Betrachte eine (beliebige) Clip-Kante:
 - Nach dem Schnitt mit dieser Clip-Kante wird eine neue Liste von Eckpunkten erzeugt
 - Dieses Ergebnis ist wieder ein geschlossener Polygonzug
 - Alle Punkte des neuen Polygons befinden sich auf der "Innenseite" (der "richtigen" Seite) dieser Clip-Kante (Schleifeninvariante)
- Das wird mit allen Clip-Kanten wiederholt
 - (Im Prinzip ist die Reihenfolge der Clip-Kanten egal)

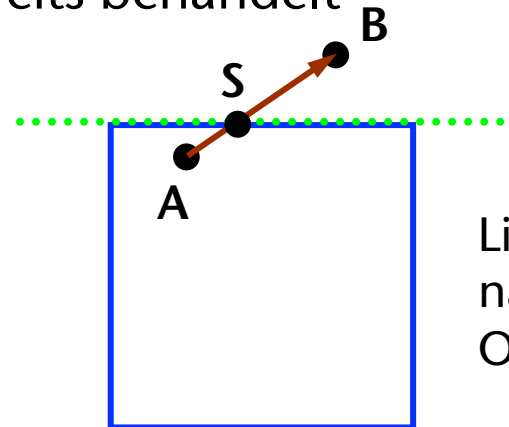


Der Polygonzug wird der Reihe nach an den Clip-Kanten geschnitten

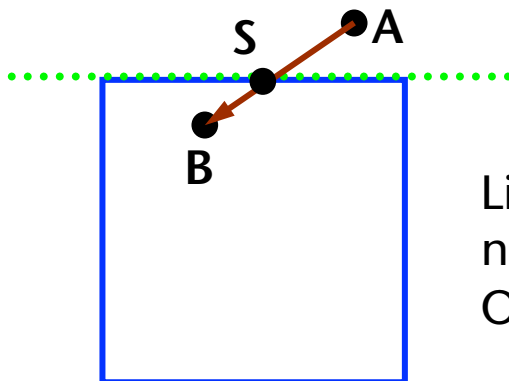
- Annahme: der Punkt A wurde bereits behandelt



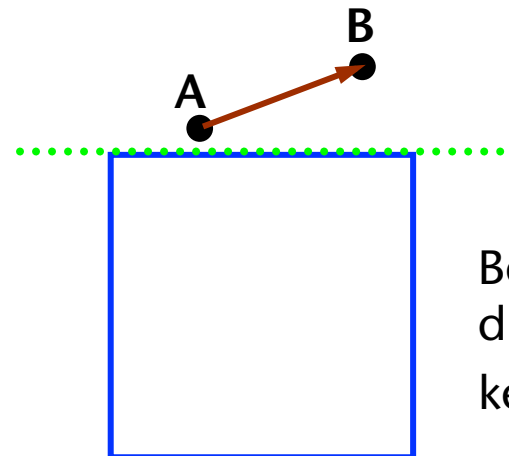
Beide Punkte drinnen: → Output B



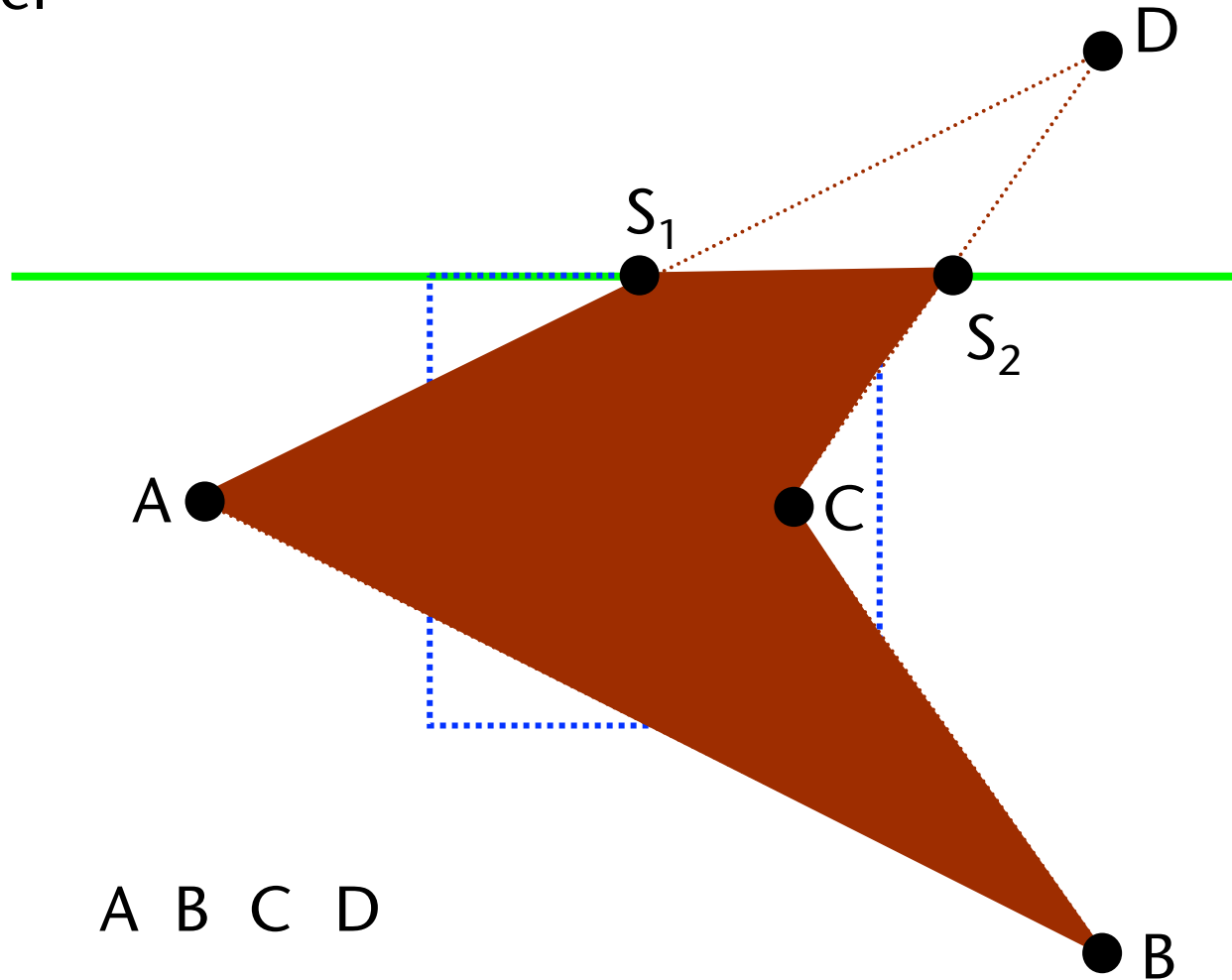
Linie „zeigt“ nach außen: → Output S



Linie „zeigt“ nach innen: → Output S, B



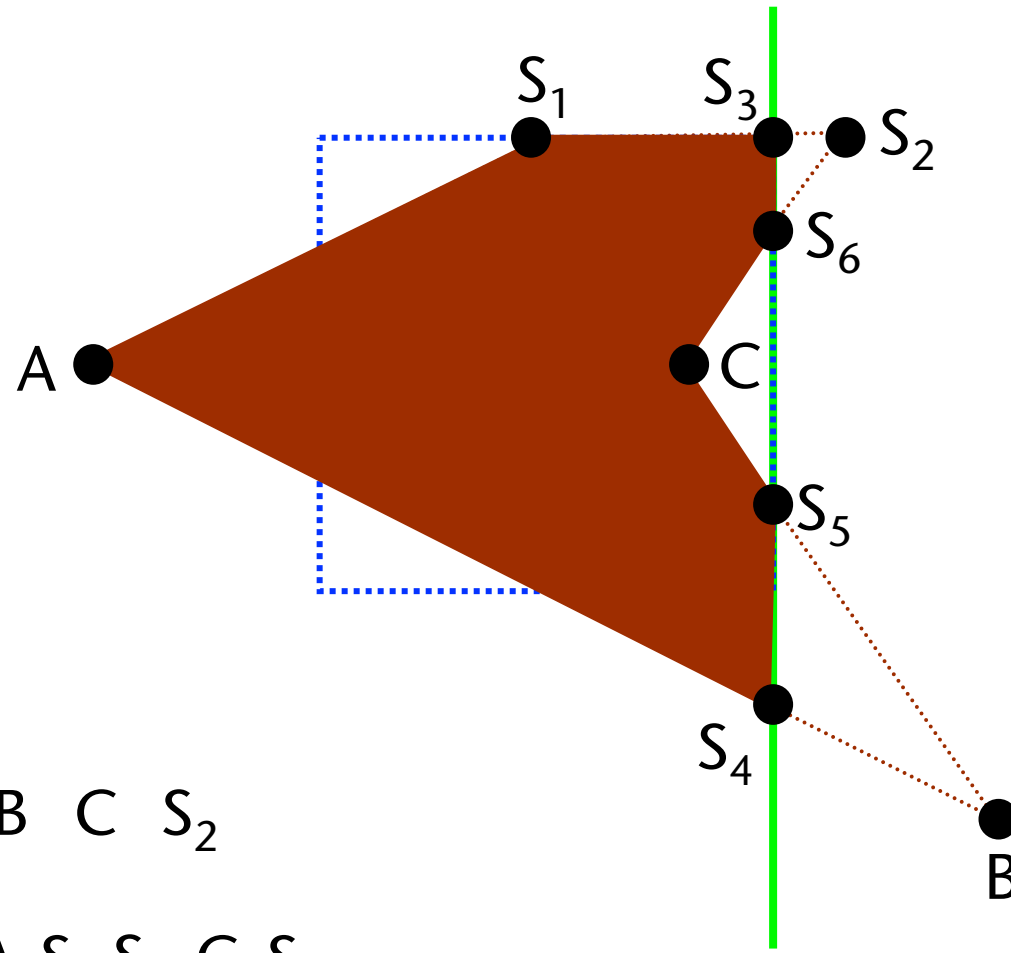
Beide Punkte draußen: → kein Output



Input: A B C D

Output: S_1 A B C S_2

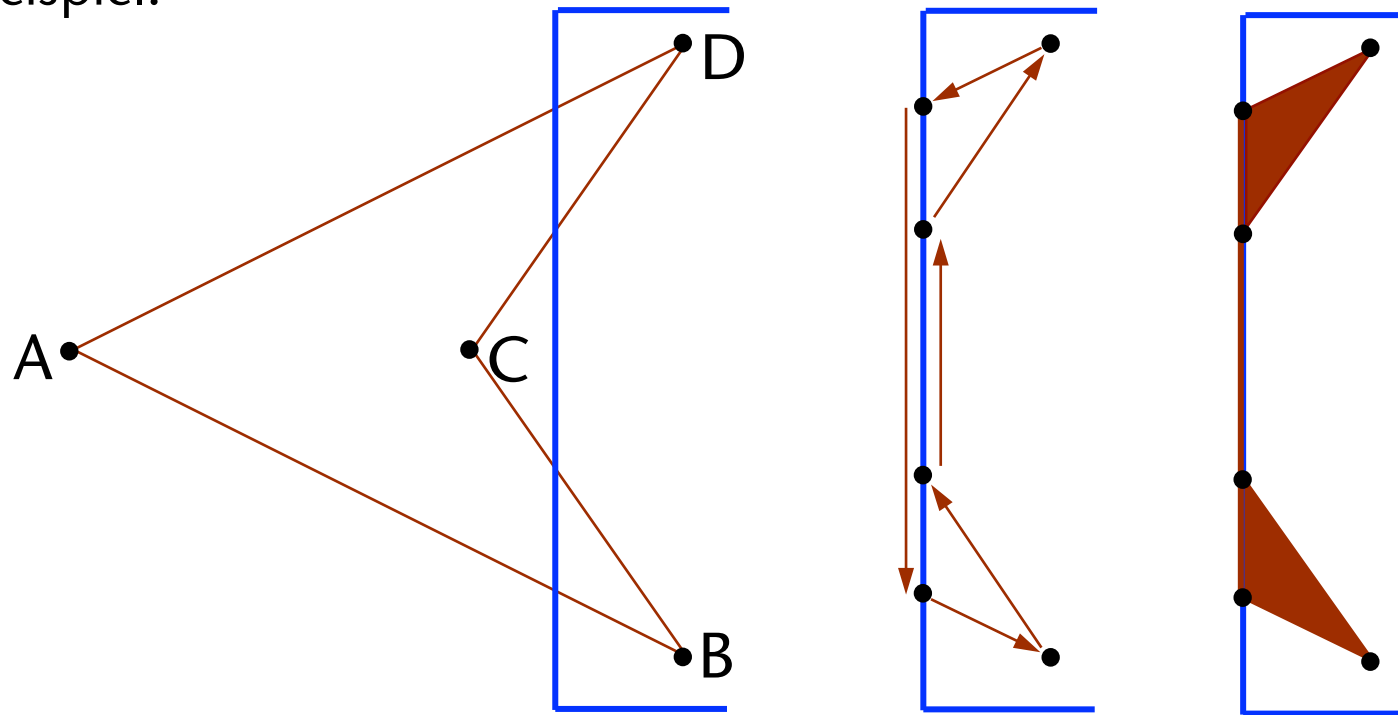
Man beginnt mit der Kante [letzter Punkt – erster Punkt], hier also D-A.
(D wird am Ende der Schleife betrachtet)

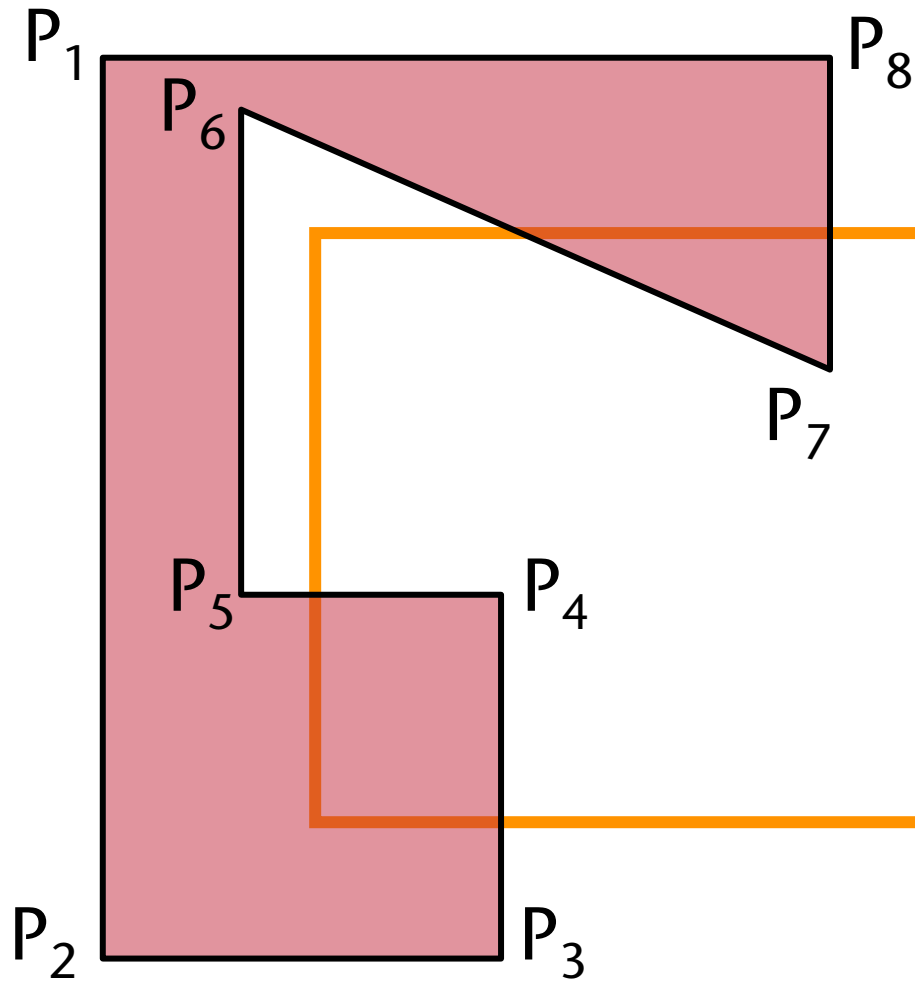


Input: S_1 A B C S_2

Output: S_3 S_1 A S_4 S_5 C S_6

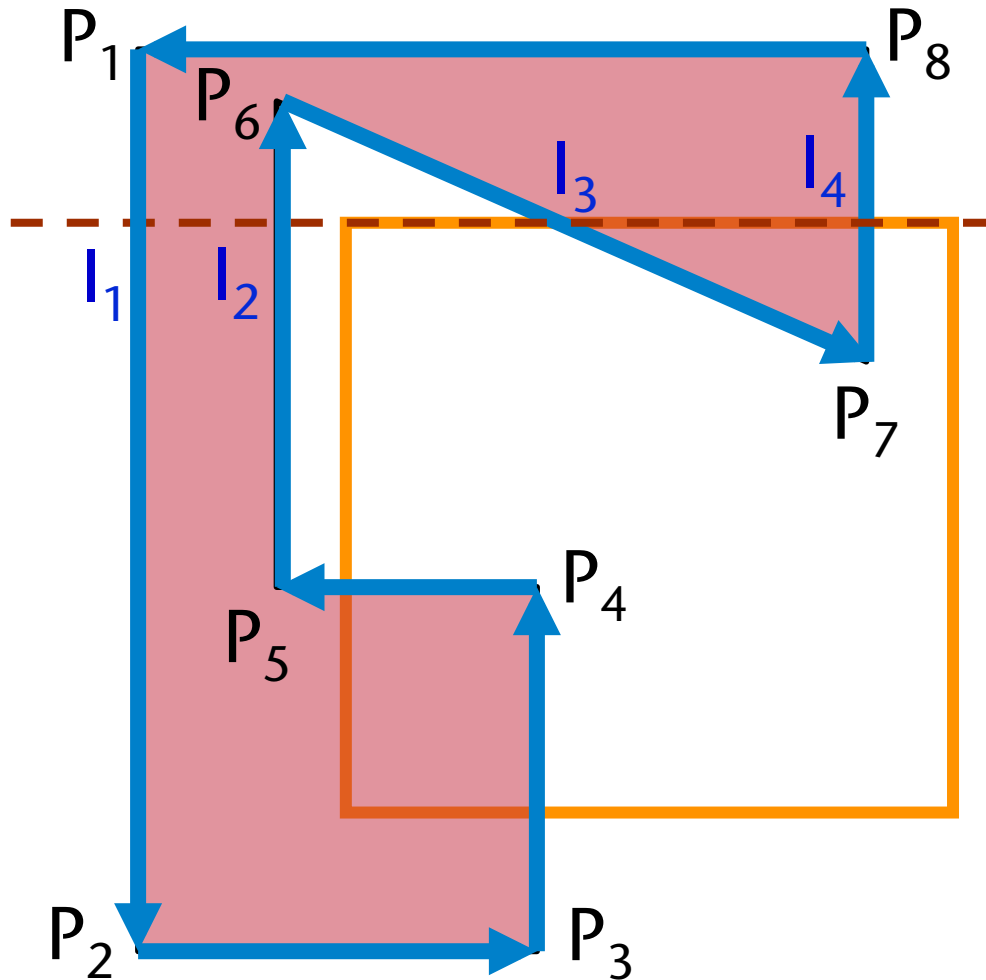
- Kleines Problem des Sutherland-Hodgeman-Algos: falls das ursprüngliche Polygon in mehrere Teile zerfällt beim Clipping, dann entsteht eine unschöne Polygonkante am Rand des Windows
- Beispiel:





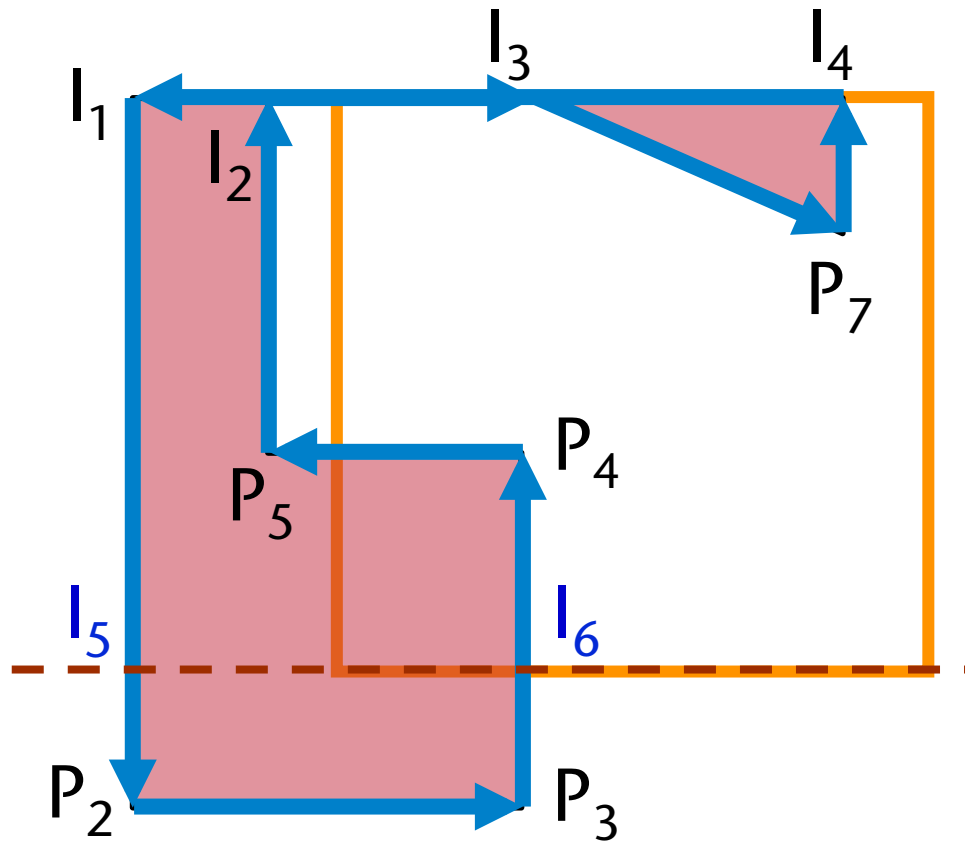
Eingabe:

$P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8$



Eingabe:
 $P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 P_6 P_7 P_8$

Ausgabe:
 $I_1 P_2 P_3 P_4 P_5 I_2 I_3 P_7 I_4$

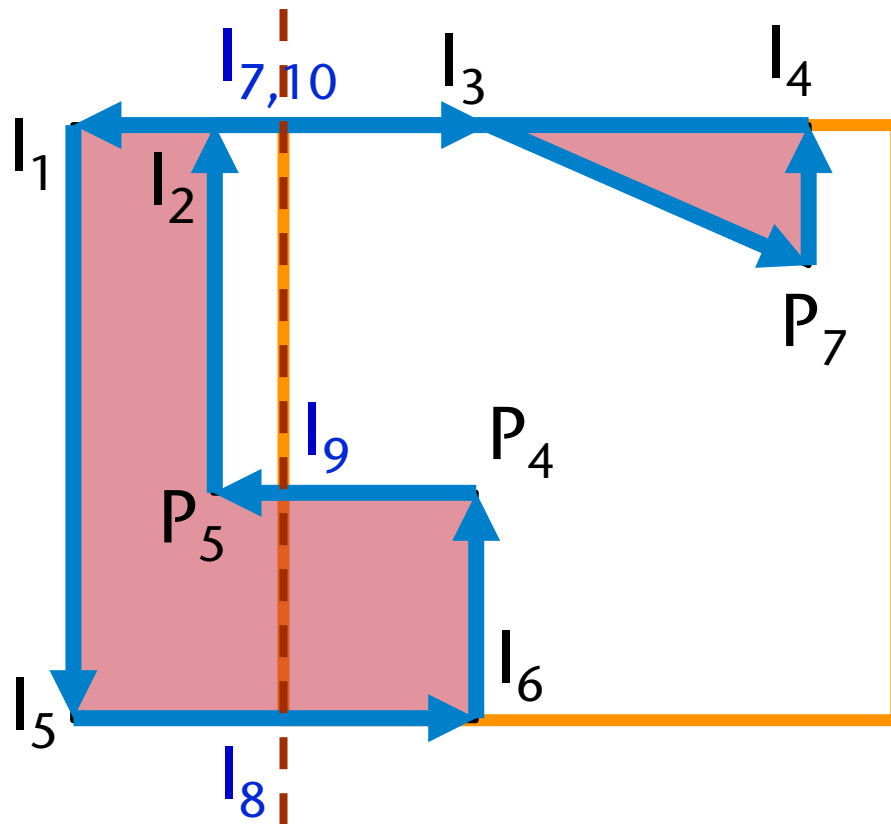


Eingabe:

$I_1 P_2 P_3 P_4 P_5 I_2 I_3 P_7 I_4$

Ausgabe:

$I_1 I_5 I_6 P_4 P_5 I_2 I_3 P_7 I_4$

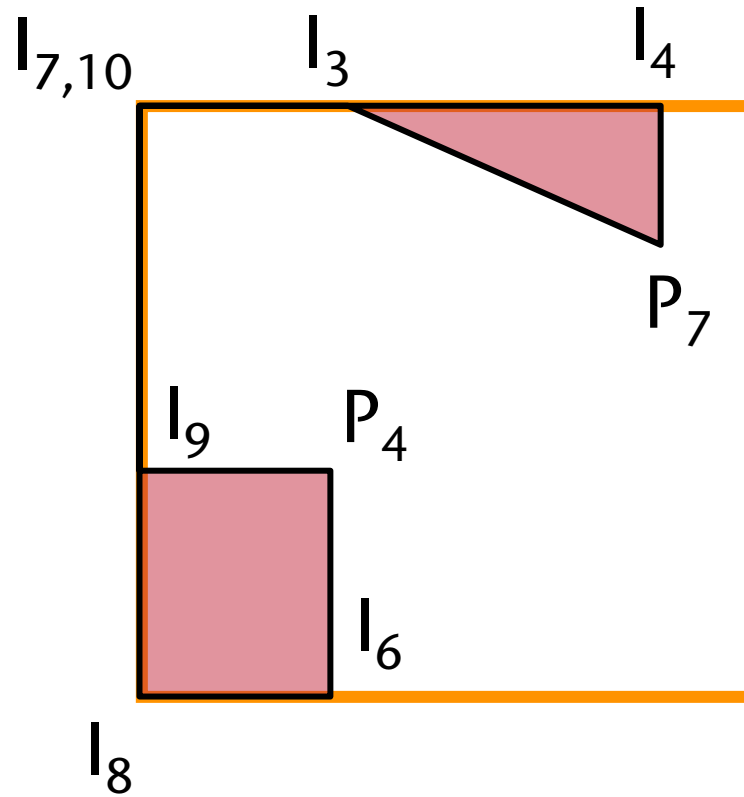


Eingabe:

$I_1 I_5 I_6 P_4 P_5 I_2 I_3 P_7 I_4$

Ausgabe:

$I_7 I_8 I_6 P_4 I_9 I_{10} I_3 P_7 I_4$

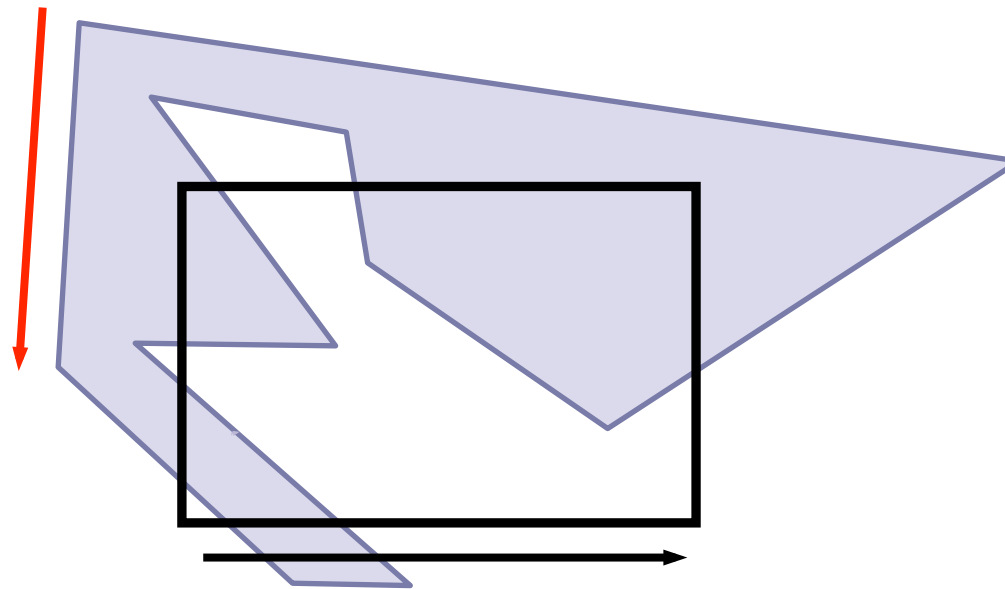


Ausgabe:

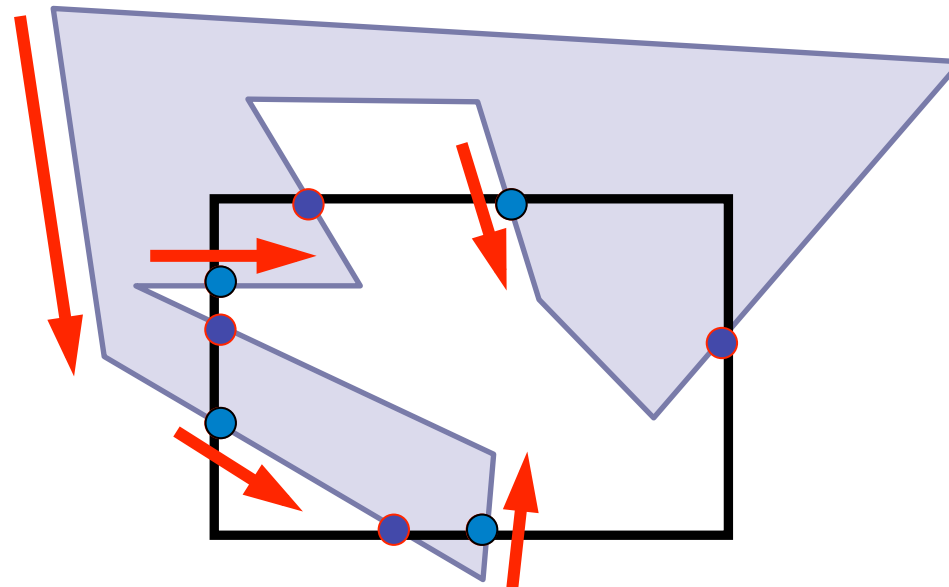
$I_7 I_8 I_6 P_4 I_9 I_{10} I_3 P_7 I_4$

Der Algorithmus von Weiler-Atherton

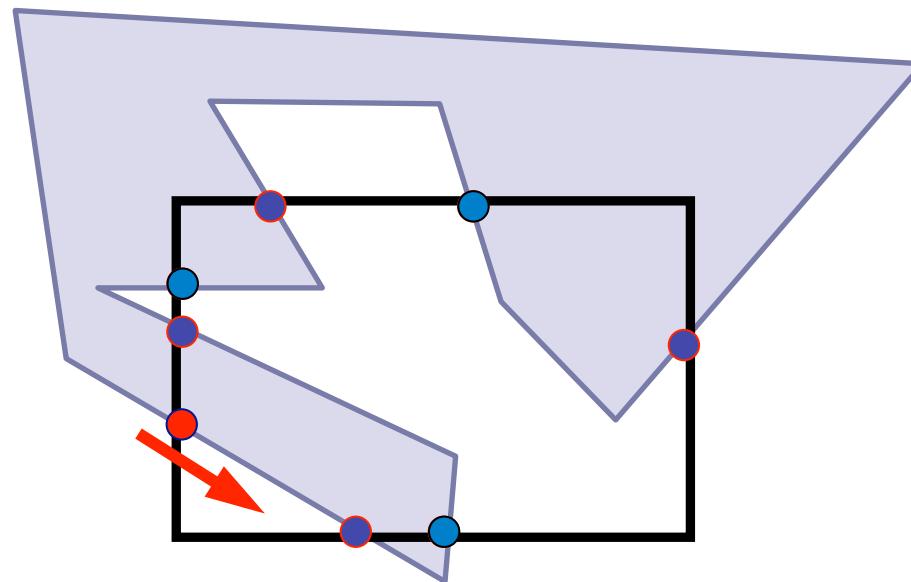
- Strategie: "Wandere" auf dem Polygonzug oder dem Window-Rand
- Konvention (wie immer): Polygone sind CCW orientiert



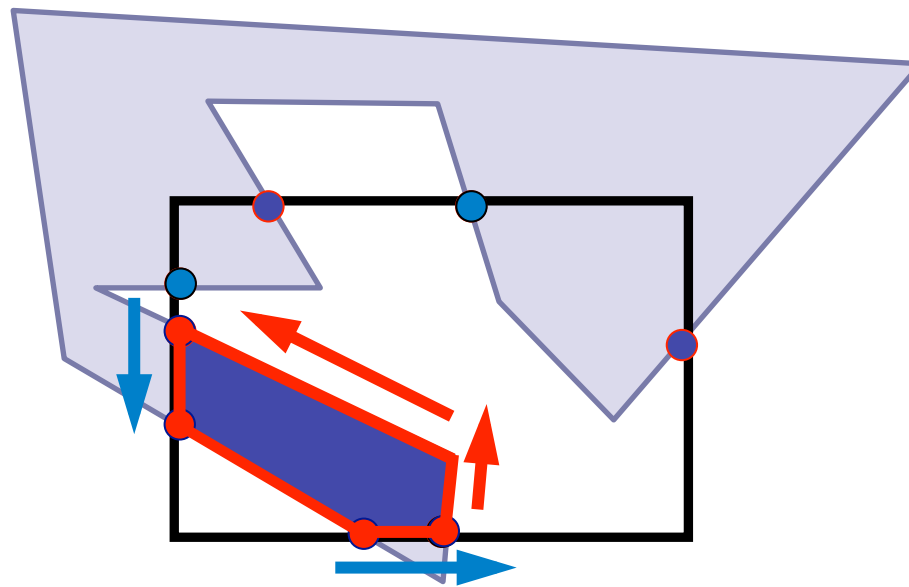
- Berechne alle Schnittpunkte
- Markiere die Punkte, an denen das Polygon in das Clipping-Window eintritt (hier grün)



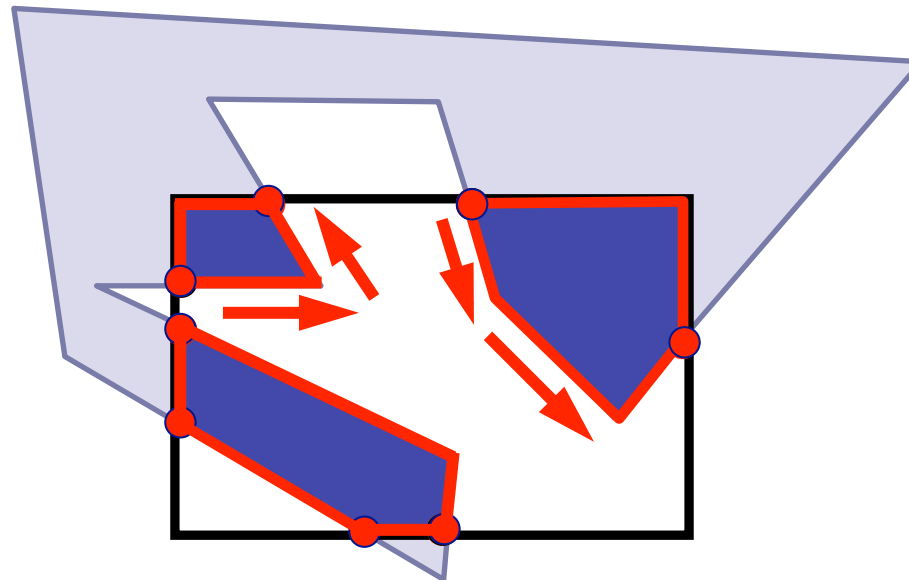
- Solange noch ein unbearbeiteter Eintrittsschnittpunkt vorhanden ist wird das Polygon weiter umlaufen
- Die Ausgabe ist ein **oder mehrere** Listen von Punkten (Eckpunkte des Polygons, Schnittpunkte, und/oder Eckpunkte des Windows)
 - Unterschied zu Sutherland-Hodgeman: die Eingabe wird **nur einmal** abgearbeitet



- Trifft man beim Umlauf auf einen Schnittpunkt, dann:
 - Füge Schnittpunkt zur Ausgabe hinzu
 - Falls Schnittpunkt = "Out-to-in": folge dem Polygonzug (ccw)
 - Falls Schnittpunkt = "In-to-out": folge dem Window-Rand (ccw)

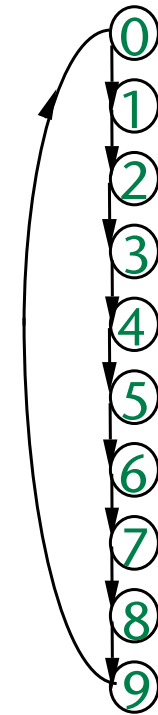
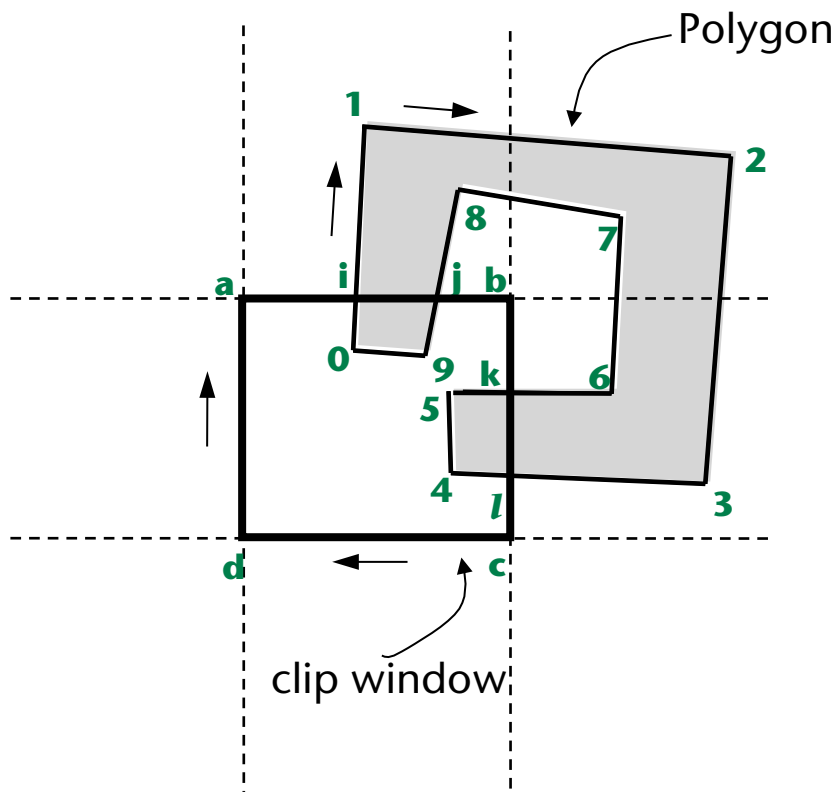


- Solange noch ein unbearbeiteter Eintrittsschnittpunkt vorhanden ist wird das Polygon weiter umlaufen

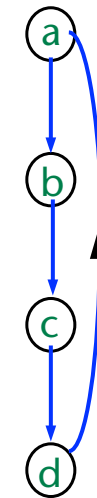


- Der Weiler-Atherton-Algorithmus erzeugt echt separate Polygonzüge für jedes sichtbare Fragment

- Eingabe (hier ist die Konvention *clockwise ordering*):

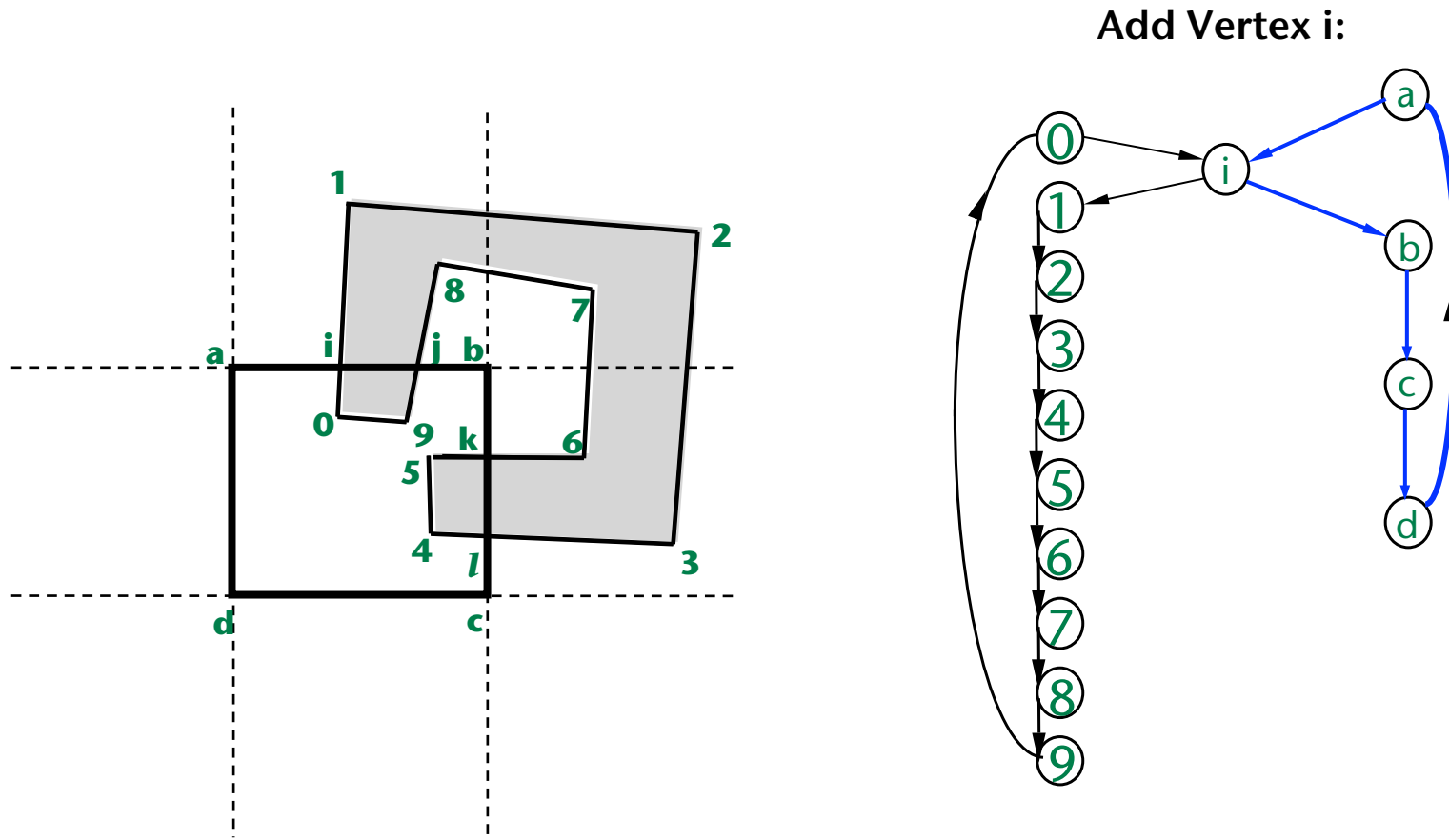


Zyklische Liste der Vertices des Polygons

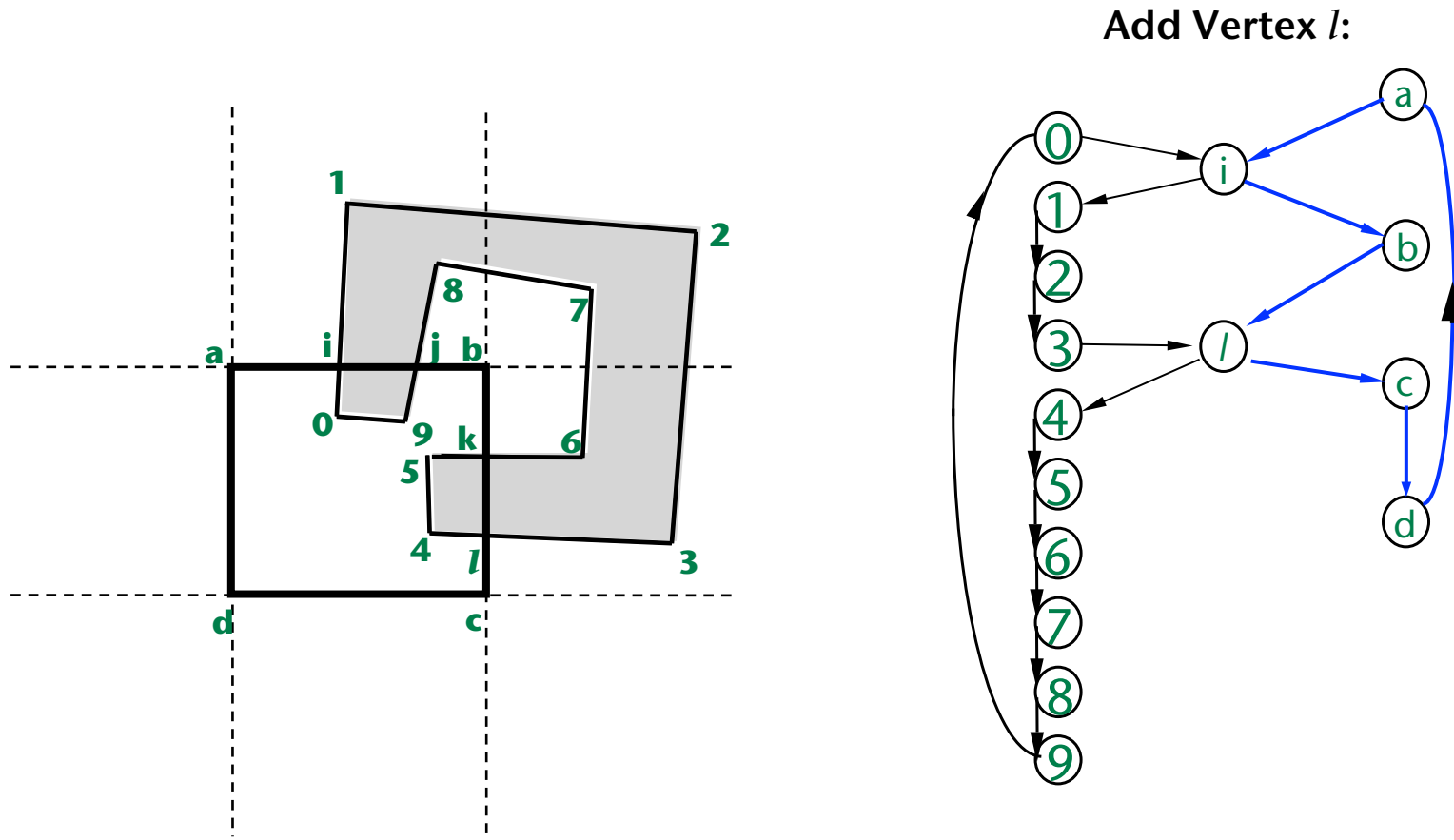


Zyklische Liste der Vertices des Clip-Windows

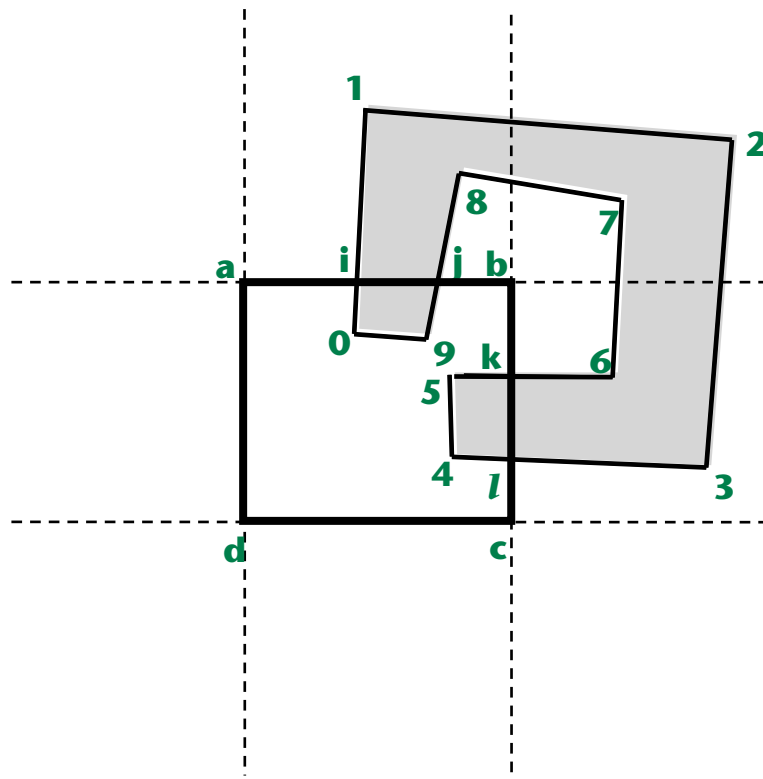
- Finde die Schnittpunkte und füge sie in **beide** Listen ein



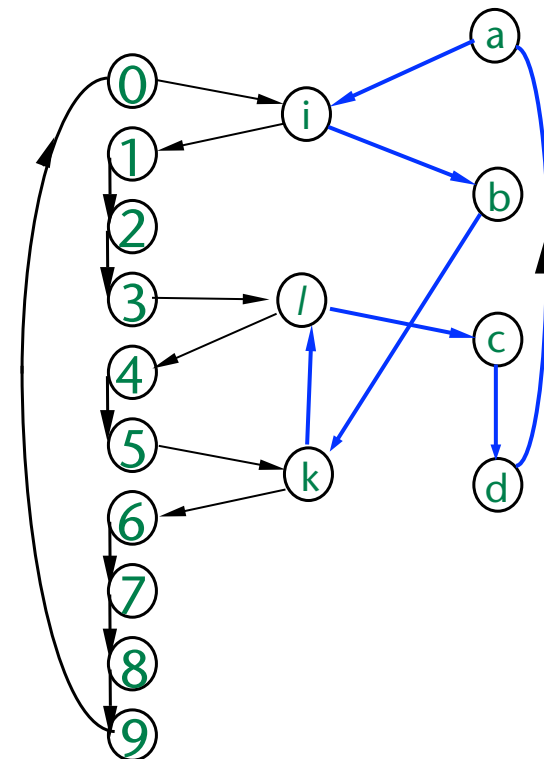
- Finde die Schnittpunkte und füge sie in **beide** Listen ein



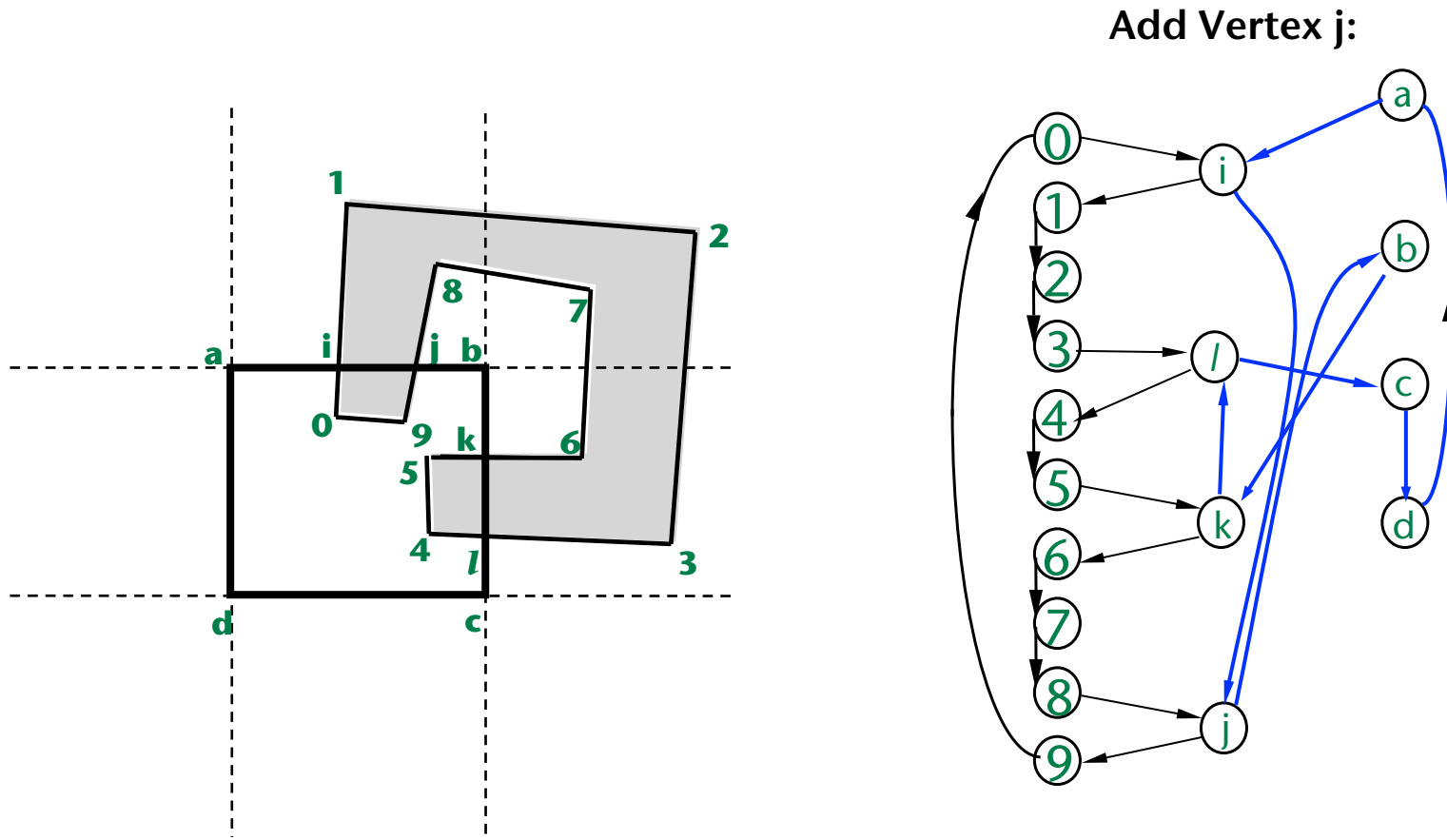
- Finde die Schnittpunkte und füge sie in **beide** Listen ein



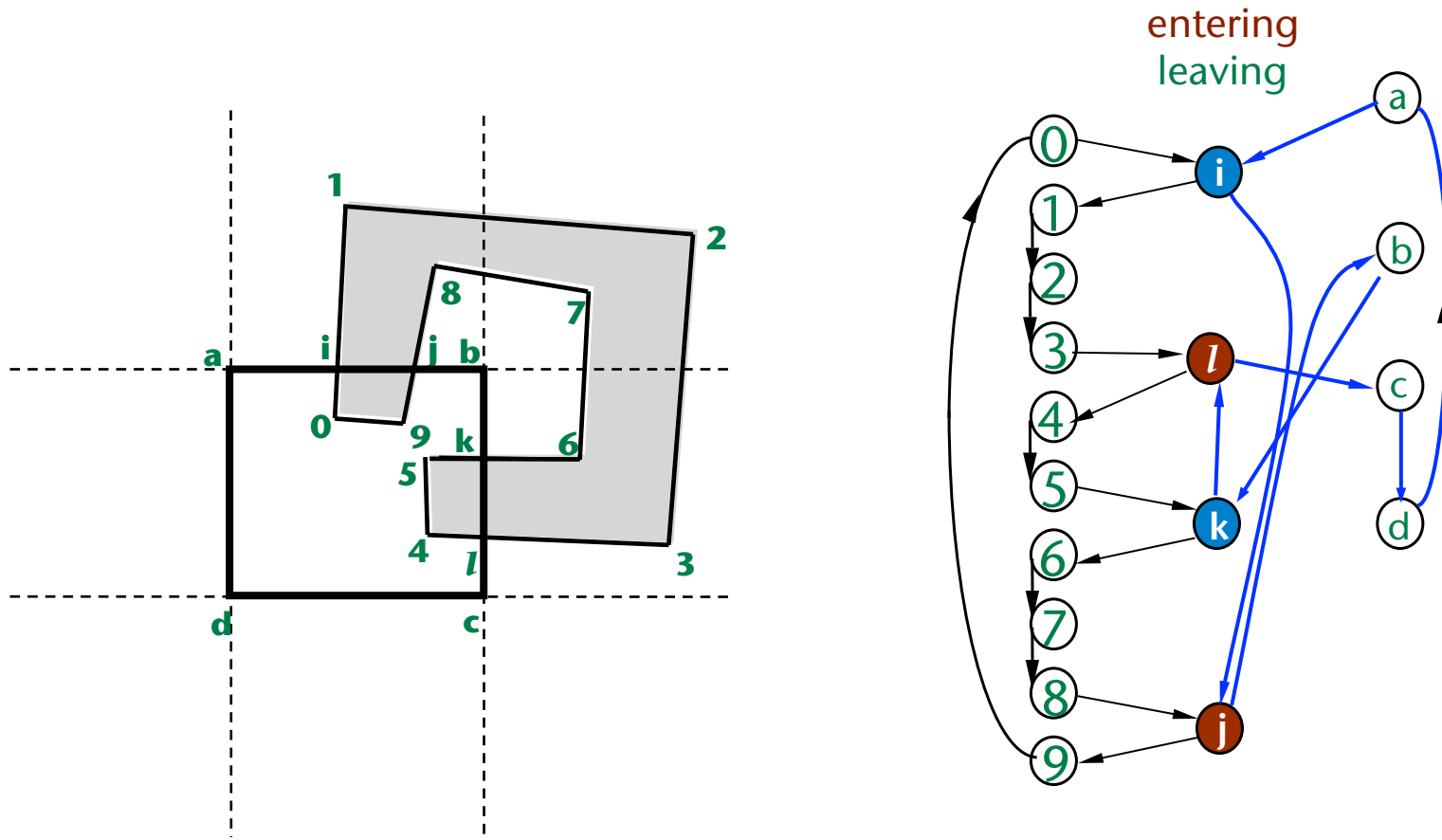
Add Vertex k:



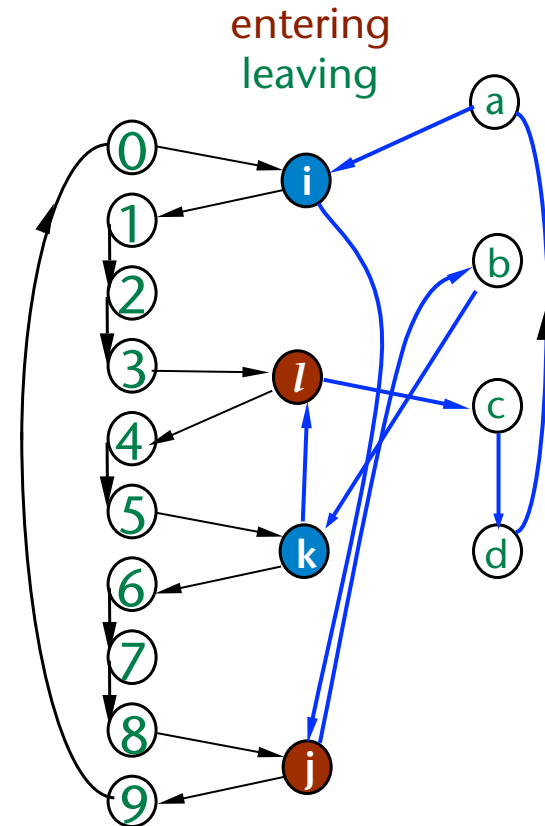
- Finde die Schnittpunkte und füge sie in **beide** Listen ein



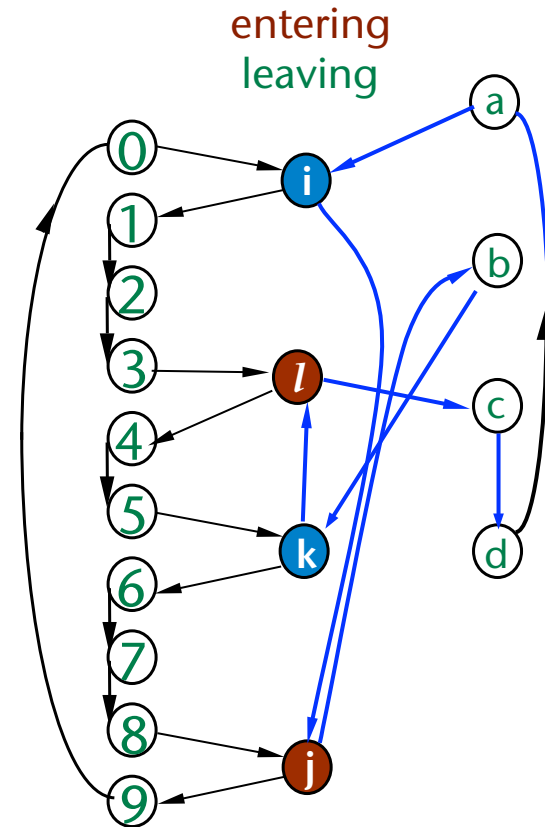
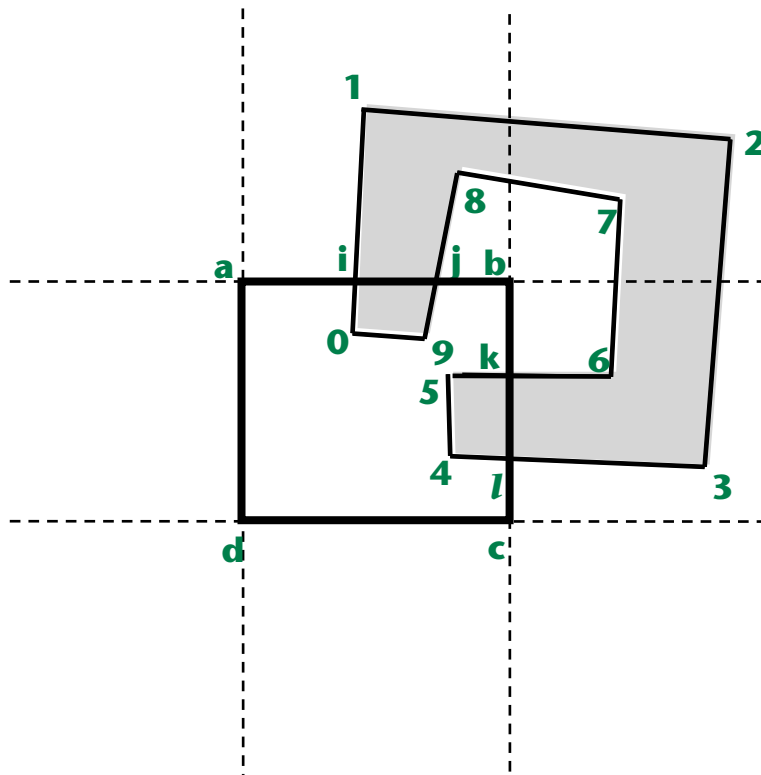
- Klassifiziere jeden Schnittpunkt als „*entering*“ oder „*leaving*“



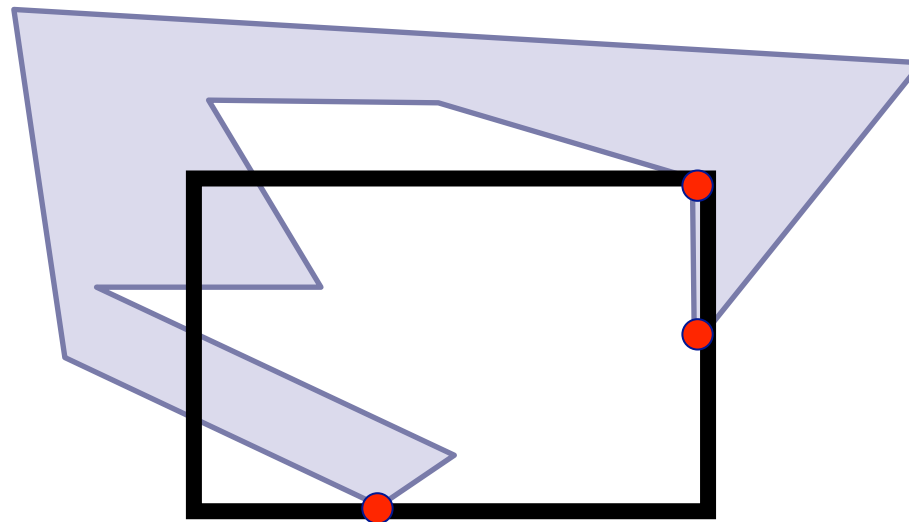
- Erzeuge das geclippte Polygon:
 - Starte bei einem "entering"-Vertex
 - Falls man auf einen "leaving"-Vertex trifft, dann wechsele auf die Liste des Clip-Polygons (blaue Zeiger)
 - Falls man auf einen "entering"-Vertex trifft, dann wechsele auf die Liste des Polygons (schwarze Zeiger)
 - Eine Polygonzug ist beendet, wenn der Startpunkt wieder erreicht ist
 - Wiederhole, solange noch unbesuchte "entering"-Vertices vorhanden sind



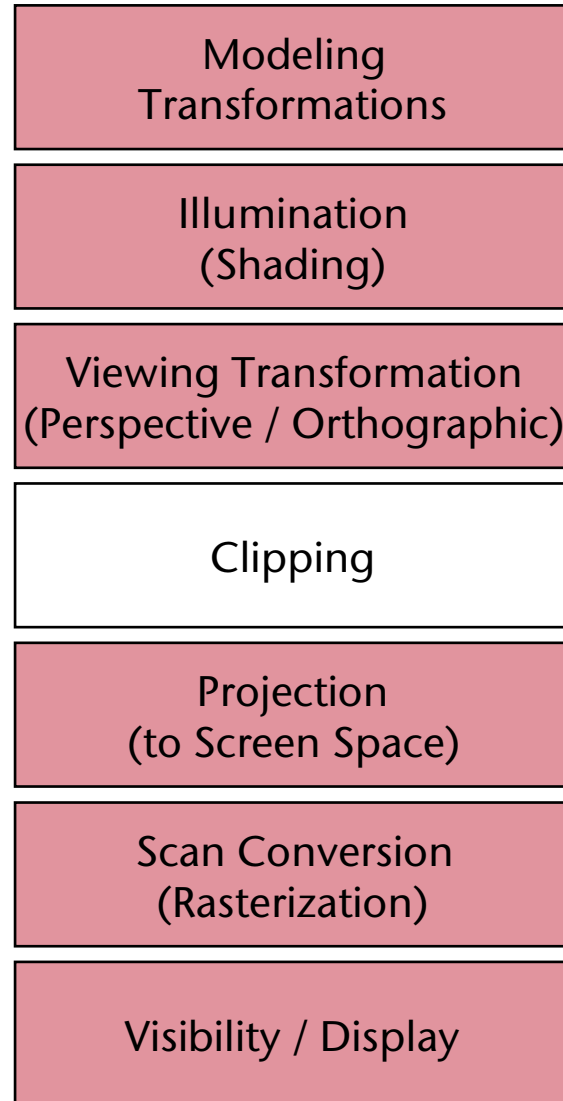
- Polygonzug 1 = $l, 4, 5, k$
- Polygonzug 2 = $j, 9, 0, l$

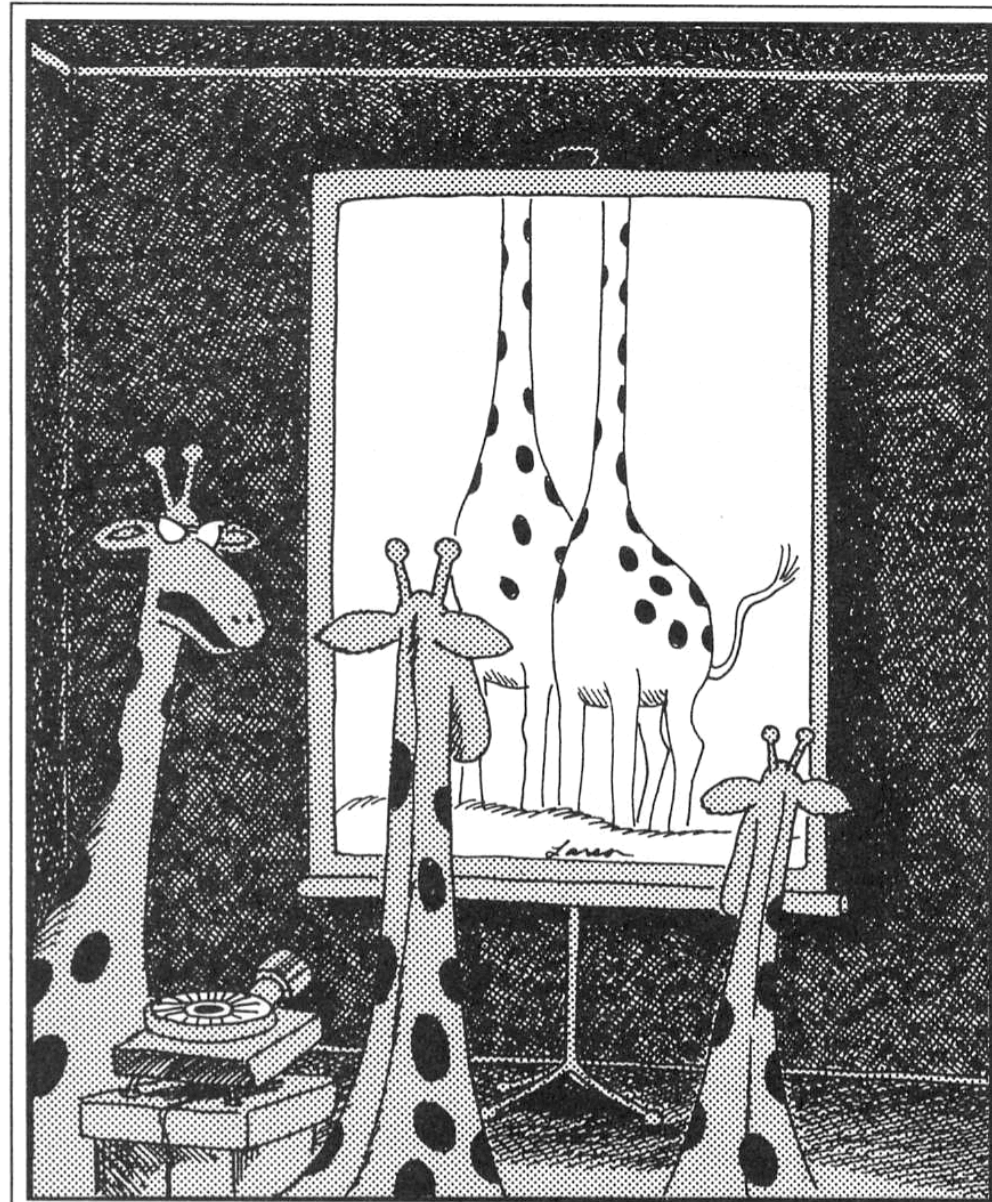


- Die üblichen (leidigen) Fragen:
 - Was passiert wenn ein Vertex (beinahe) auf dem Rand des anderen Polygonzuges liegt?



- Ältere Hardware machte volles Clipping
- Moderne Hardware vermeidet Clipping weitgehend:
 - Nur bzgl. der Ebene $z=z_0$
- Im Allgemeinen ist es nützlich, Clipping zu kennen, da es viele ähnliche geometrische Probleme und Algorithmen gibt, z.B.:
 - Zur Bestimmung, welche Objekte innerhalb eines "Picking-Frustums" liegen
 - Schnittpunkte zwischen Objekten
 - Berechnung analytischer Schatten





“Oh, lovely — just the hundredth time you’ve managed to cut everyone’s head off.”