03-05-H
-709.53

Echtzeitbildverarbeitung (8)

Prof. Dr. Udo Frese

Hough Transformation für Linien

Was bisher geschah

- **Hough-Transformation**
  - Suche parametrisierte Kurven, z.B. Geraden, Kreise
  - Hough Akkumulator im Parameterraum
  - Für jeden Pixel mit hinreichendem Kontrast erhöhe alle Akkumulatorpixel, deren Kurven diesen Pixel durchlaufen
- **Hough Transformation für Kreise**
  - Houghraum beschreibt Kreise in Mittelpunktsform (x_c, y_c, r)
  - Ausnutzen des Gradienten: (x_c,y_c) = (x, y) +/-r (sobelX, sobelY)/sobelLen
  - Projektion in (x_c, y_c), also weglassen von r weil 3D Houghraum sehr groß.
  - Für jeden (x_c, y_c) Mittelpunkt mit hinreichend großem Hough Wert eine 1D. Hough Transformation bzgl. r durchführen.
- **Derart technisch verwickelte Optimierung sind nur sinnvoll für Teilroutinen die sehr oft ausgeführt werden (z.B. jeden Pixel)**

Ziel der nächsten vier Übungszettel

Aufgabe 7:

Ball als Kreis mit Hough erkennen

Aufgabe 10:

Linien auf dem Boden mit Hough erkennen

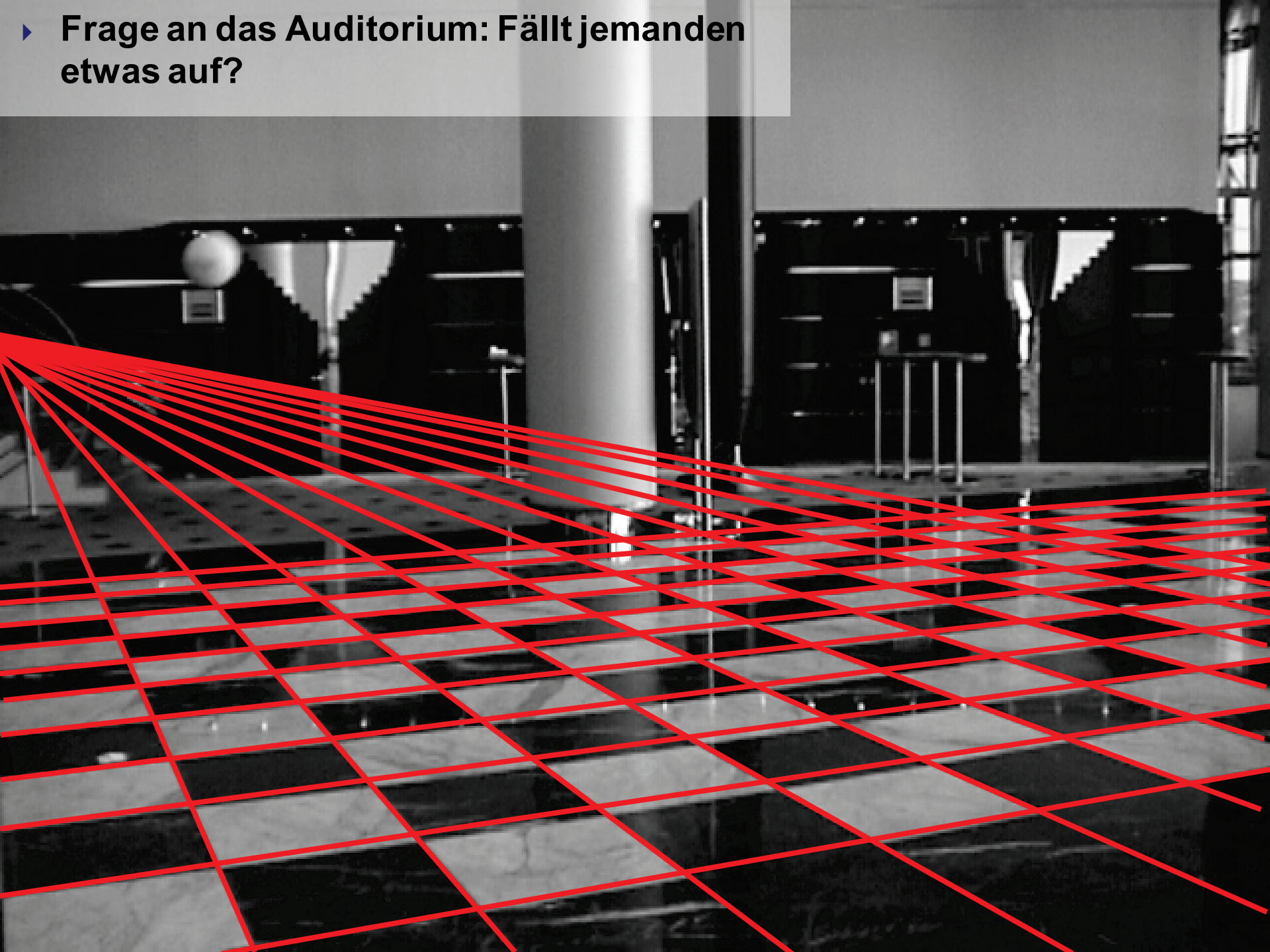
Aufgabe 13:

Kamerapose / Brennweite aus Linien berechnen

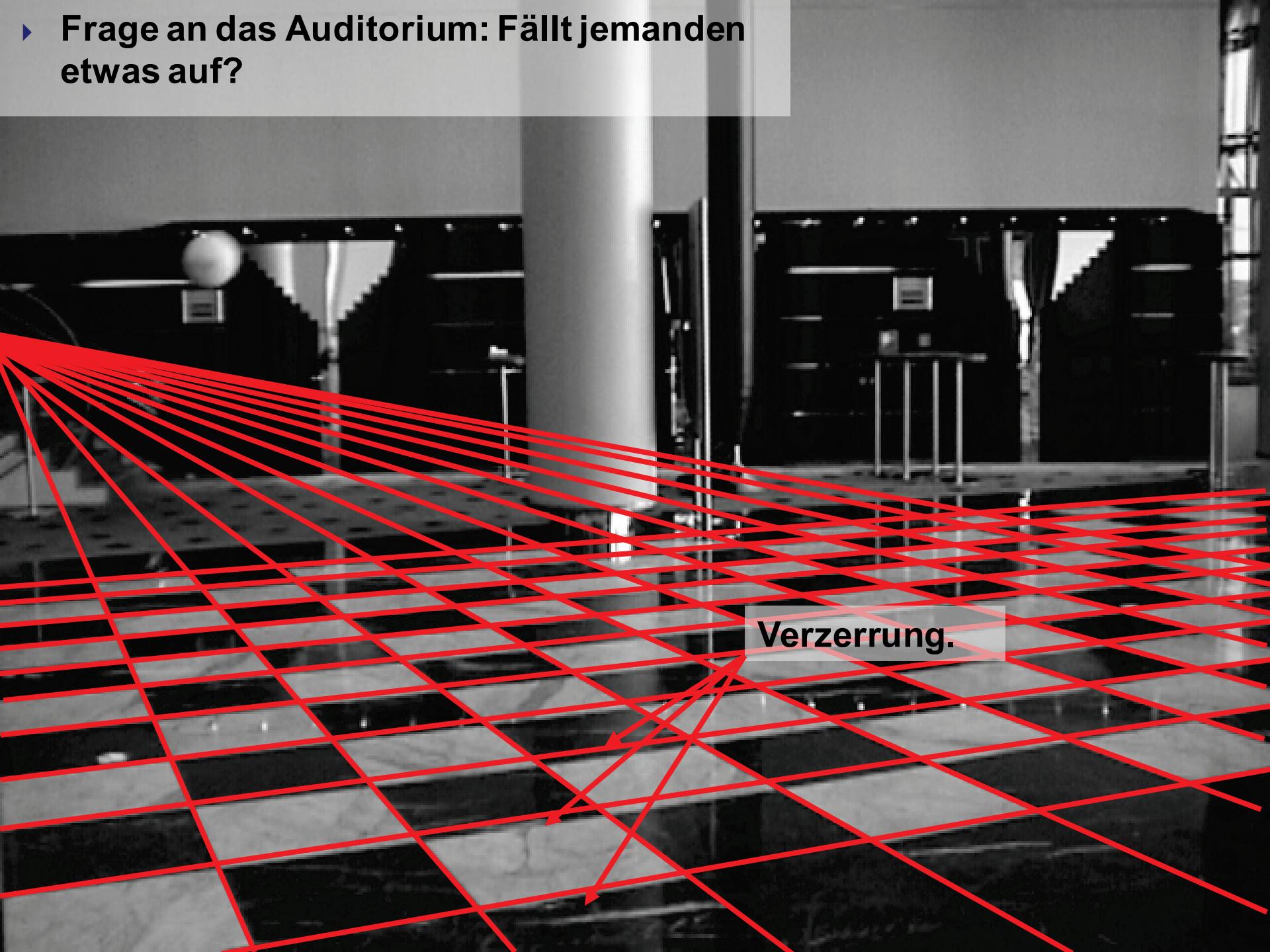
Aufgabe 14:

Ballflugbahn mit Partikel Filter vorhersagen.

- **Frage an das Auditorium: Fällt jemanden etwas auf?**



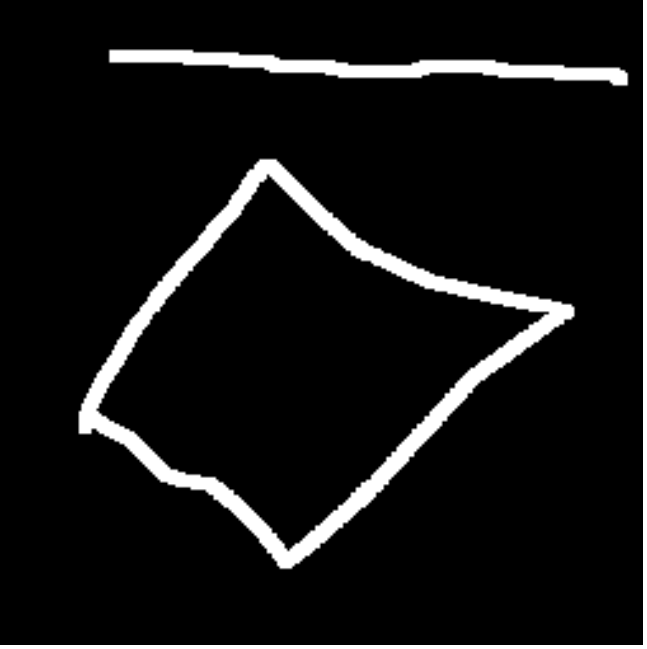
- **Frage an das Auditorium: Fällt jemanden etwas auf?**



Hough Transformation für Linien

Grundidee

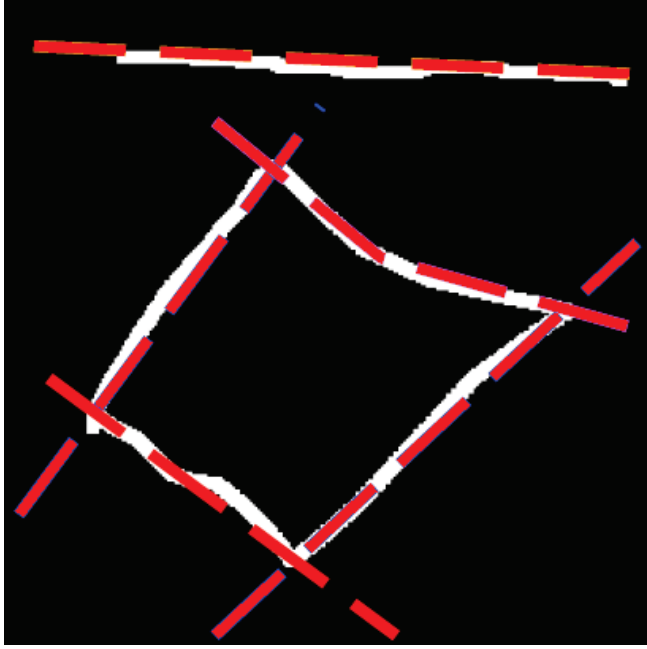
- **Hough Algorithmus sucht Kurven**
  - in bekannter parametrisierter Form
  - mit unbekannten Parametern
  - für Linien: Hessesche Normalform
- **akkumuliert Evidenz im Parameterraum (Houghraum)**
- ***jeder Kantenpixel ist Evidenz für alle Kurven auf denen er liegt***
  - Houghakkumulator: ein Eintrag pro Parameterkombination
  - Pixel binär (ja/nein) als Kantenpixel klassifizieren (Schwellwert auf Sobellänge)
  - für jeden Kantenpixel alle Akkumulatoreinträge (um 1) erhöhen, deren Kurve durch diesen Pixel geht.
- **Einträge wirklich vorhandener Kurven akkumulieren einem hohen Wert, weil sie von vielen Kantenpixeln erhöht werden**

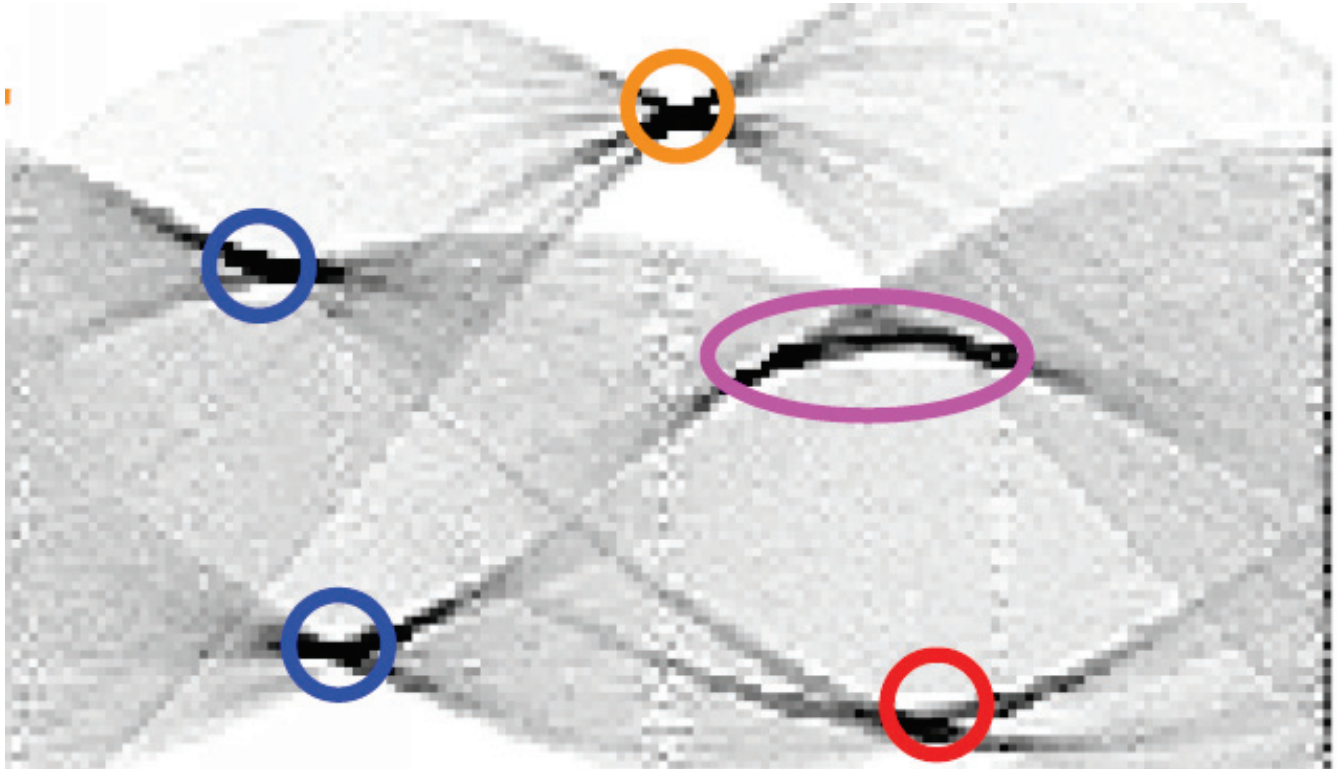


Eingabe (Bildraum)

Ausgabe (Bildraum)

Houghraum

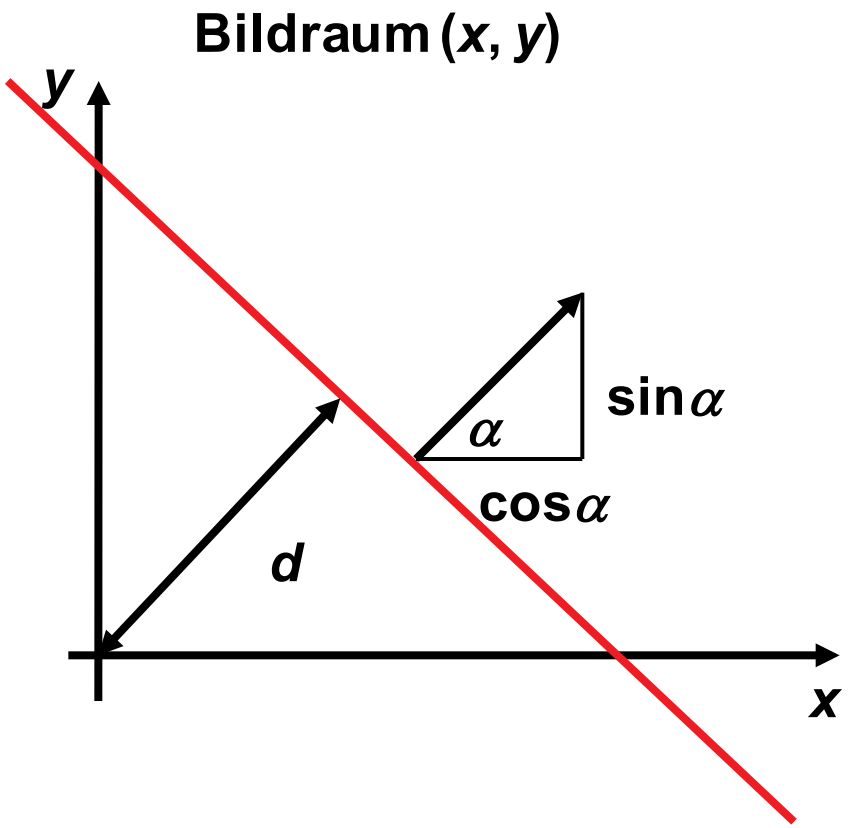




Quelle:
H. Neumann, Vorlesung Neuro-informatik (www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS03/CV1/)

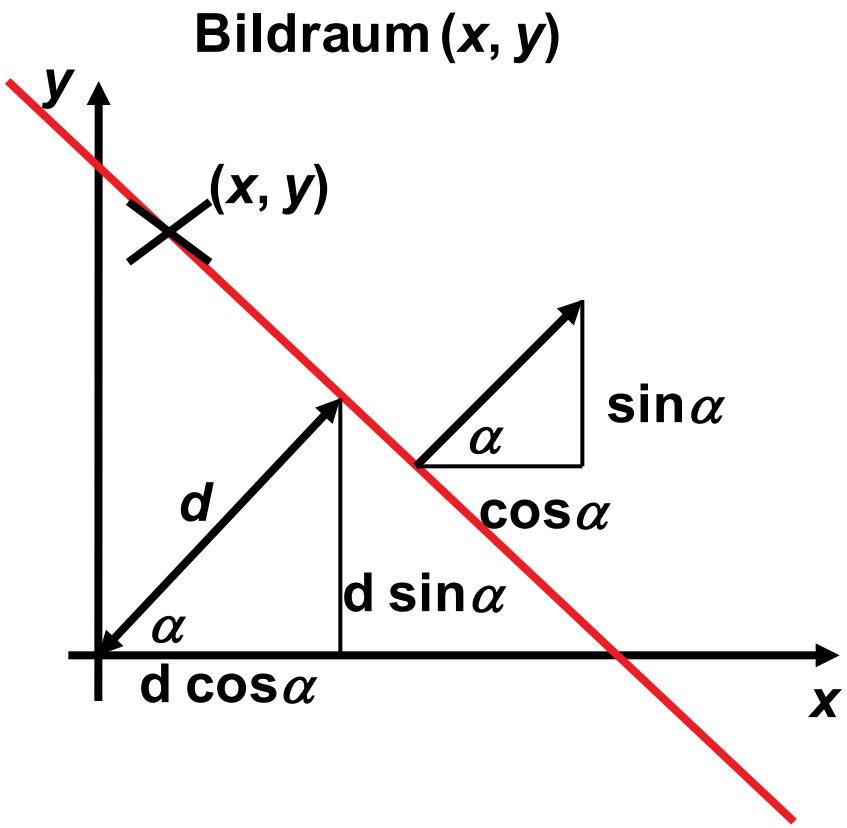
Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)



Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)



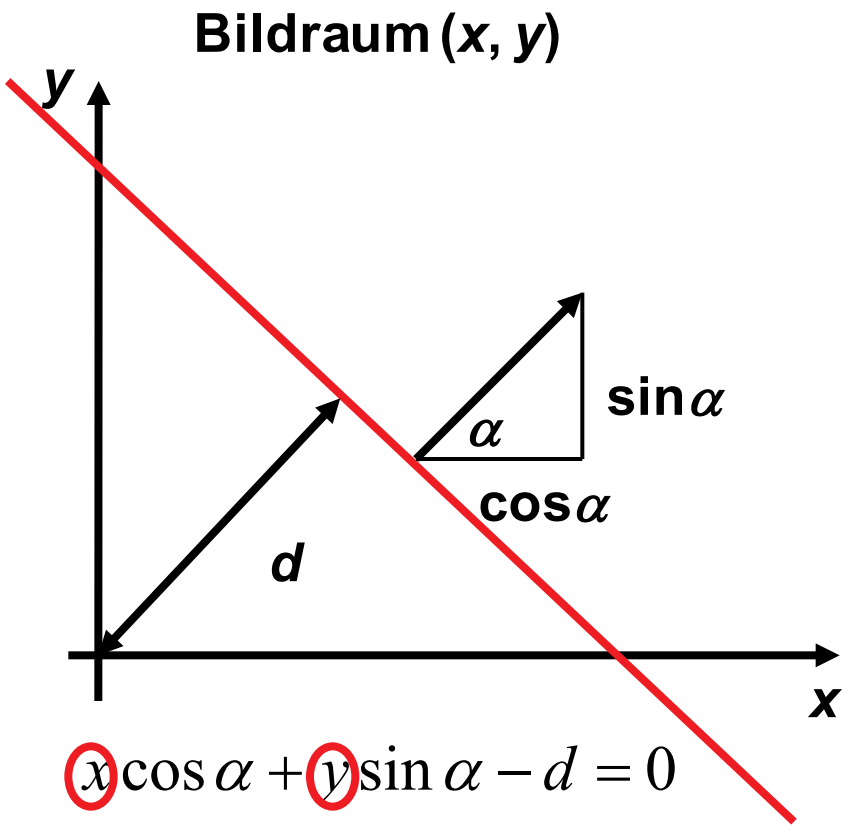
$$\left(\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - d\begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix}\right) \cdot \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} - d\begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix}^2 = 0$$

$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)

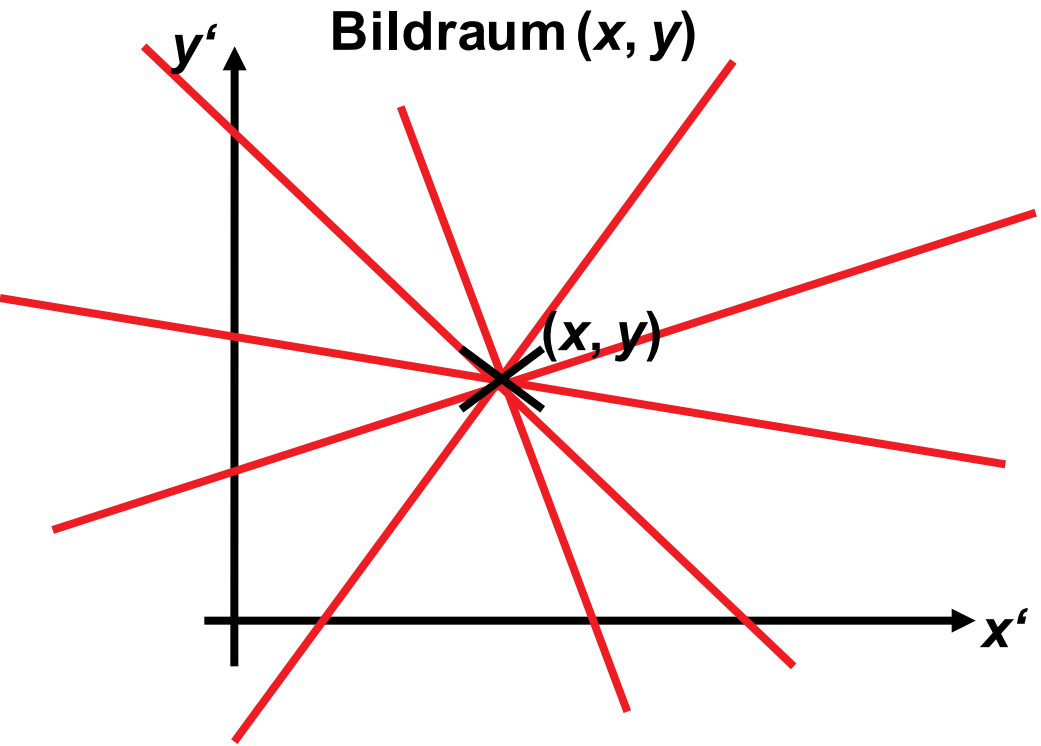


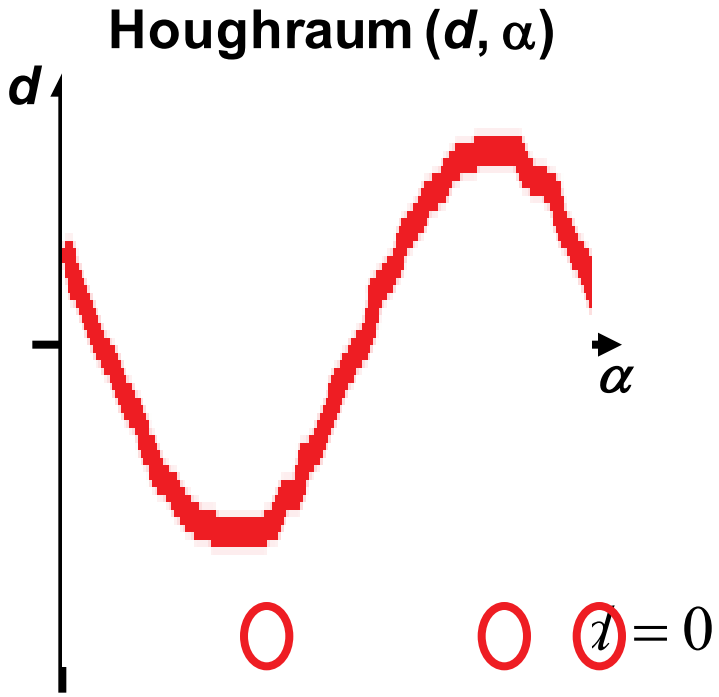
$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)

- **Alle Geraden, die durch einen Punkt (x, y) durchgehen.**
  - Im Bildraum ein „Stern“
  - Im Houghraum eine Sinusfunktion

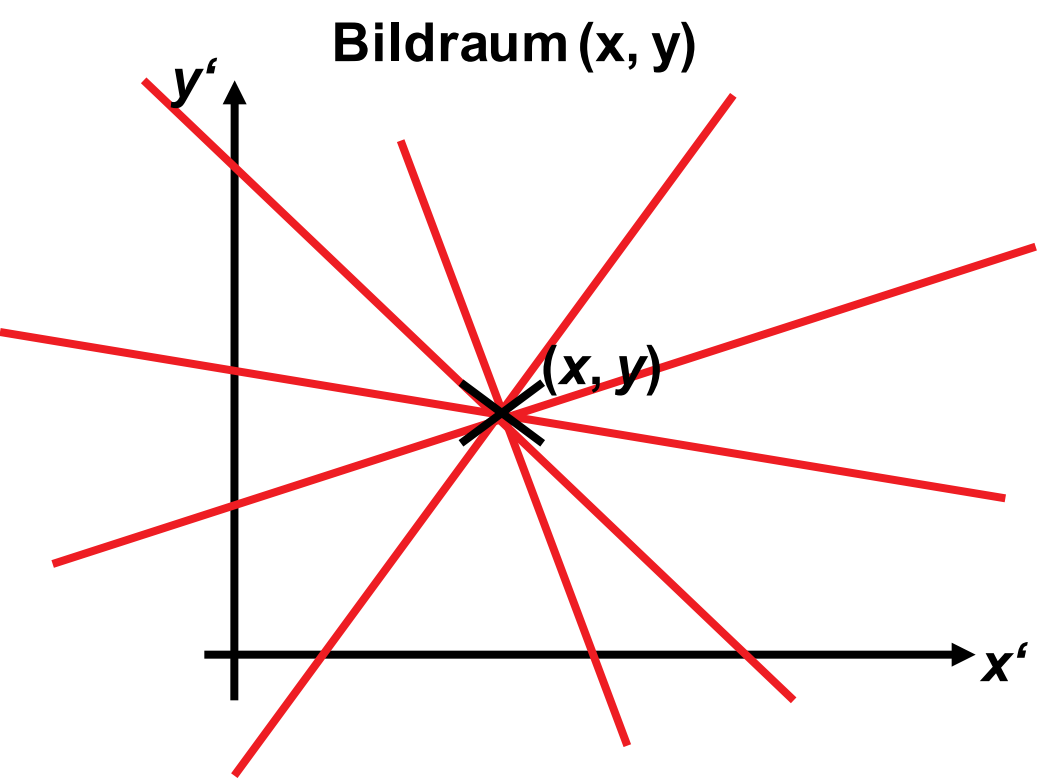


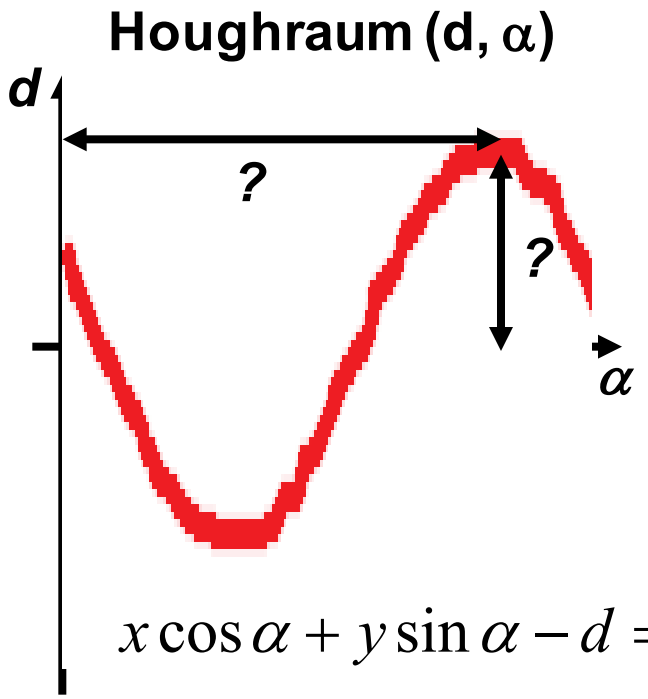


Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)

- **Frage an das Auditorium: Wie hängen die Parameter der Sinusfunktion im Houghraum von dem Punkt (x, y) ab?**



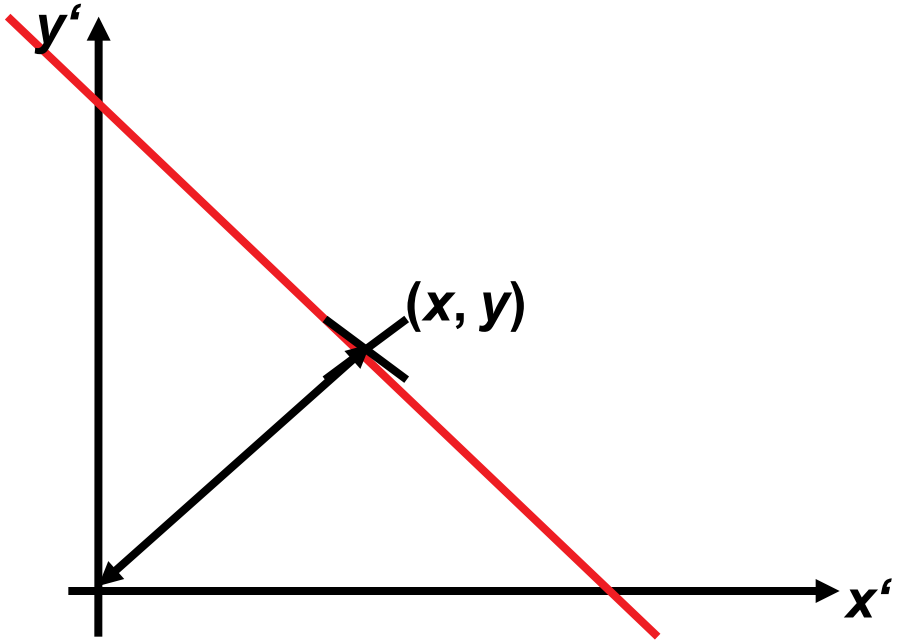


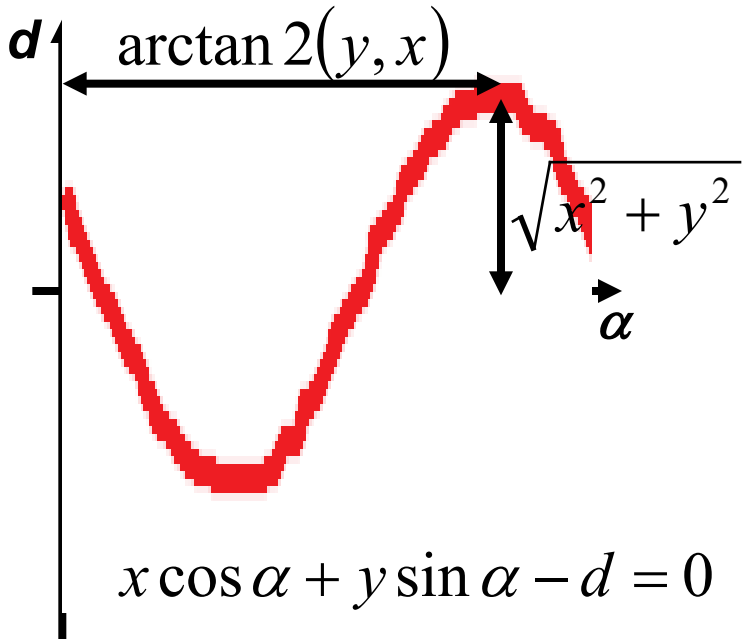
$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

Hough Transformation für Linien

Parametrisierung einer Geraden in Hessescher Normalform (d, α)

- **Der maximale Abstand d wird erreicht, wenn (x, y) das Lot von (0, 0) auf die Geraden ist. Dies ist dann der Fall, wenn die Gerade senkrecht auf (0, 0) – (x, y) steht.**





Hough Transformation für Linien

Hough Transformation für Linien (Rohfassung)

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   for (alpha=0;alpha<PI;alpha+=alphaStep) {
      d = x*cos(alpha) + y*sin(alpha);
      houghImg (alpha, d) += 1;
   }
}

lineHough (sobelImg, houghImg, sobelThreshold) {
   for (y=0;y<srcImg.height;y++)
      for (x=0;x<srcImg.width;x++) {
         sobelLen = sqrt(sobelImg(x, y).sobelX² + sobelImg(x, y).sobelY²);
         if (sobelLen>sobelThreshold)
            addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY);
      }
}
```

$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation für Linien (Rohfassung)

- **Sehr langsam und noch unpräzise formuliert**

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   for (alpha=0;alpha<PI;alpha+=alphaStep) {
      d = x*cos(alpha) + y*sin(alpha);
      houghImg (alpha, d) += 1;
   }
}

lineHough (sobelImg, houghImg, sobelThreshold) {
   for (y=0;y<srcImg.height;y++)
      for (x=0;x<srcImg.width;x++) {
         sobelLen = sqrt(sobelImg(x, y).sobelX² + sobelImg(x, y).sobelY²);
         if (sobelLen>sobelThreshold)
            addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY);
      }
}
```

$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

double als array index

Hough Transformation für Linien

Struktur des Linienhoughraumes

- **Wie diskretisieren, d.h. auf 2D array (Bild) abgebilden?**
- **Bildgröße w×h**
- **Winkel α**
  - Periodisch [0..π) (Linien) bzw. [0..2π) Kanten
  - Sonderfälle am Rand oder % benutzen
  - Vorsicht: $\alpha \leftarrow \alpha + \pi$, führt zu d $\leftarrow$ - d
  - Konservative Diskretisierung $\Delta\alpha$:
    ein Pixel am Bildrand entspricht $\Delta\alpha$ Winkel
  - Pragmatische Diskretisierung (Übungen):
    Feste Zweierpotenz z.B.: 256

$$\Delta\alpha = 1 / \sqrt{w^2 + h^2}$$

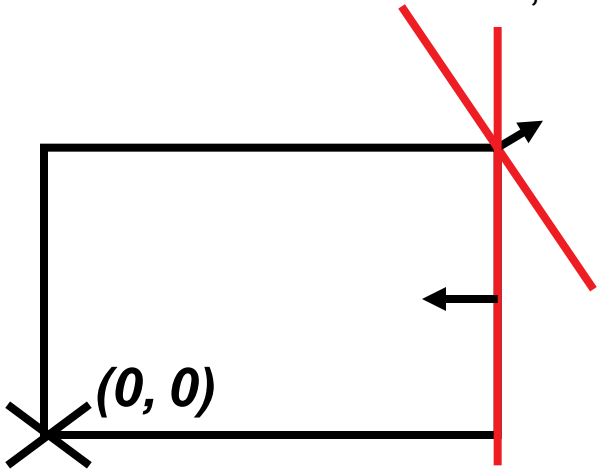
$$\Delta\alpha = \frac{\pi}{256}$$

Hough Transformation für Linien

Struktur des Linienhoughraumes

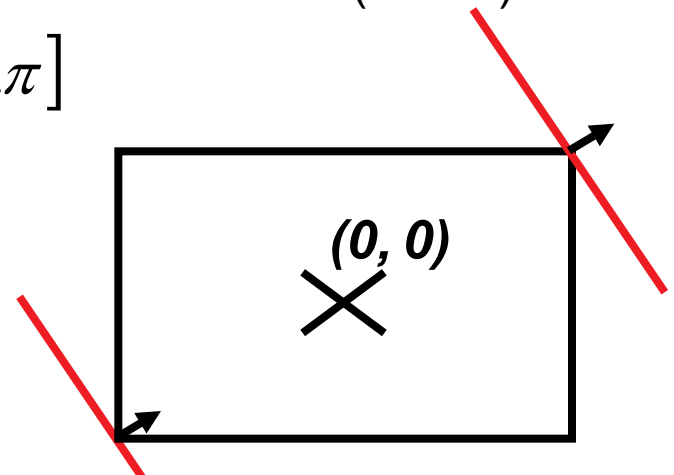
- **Distanz *d*:**
  - Einheit Pixel, natürliche Diskretisierung 1
  - Großer Wertebereich (links)
  - Kleinerer Wertebereich, wenn Referenzpunkt für d in Bildmitte (rechts)

$$\alpha \in [0..\pi]$$



$$d \in \left[-w..\sqrt{w^2+h^2}\right]$$

$$x\cos\alpha + y\sin\alpha - d = 0$$

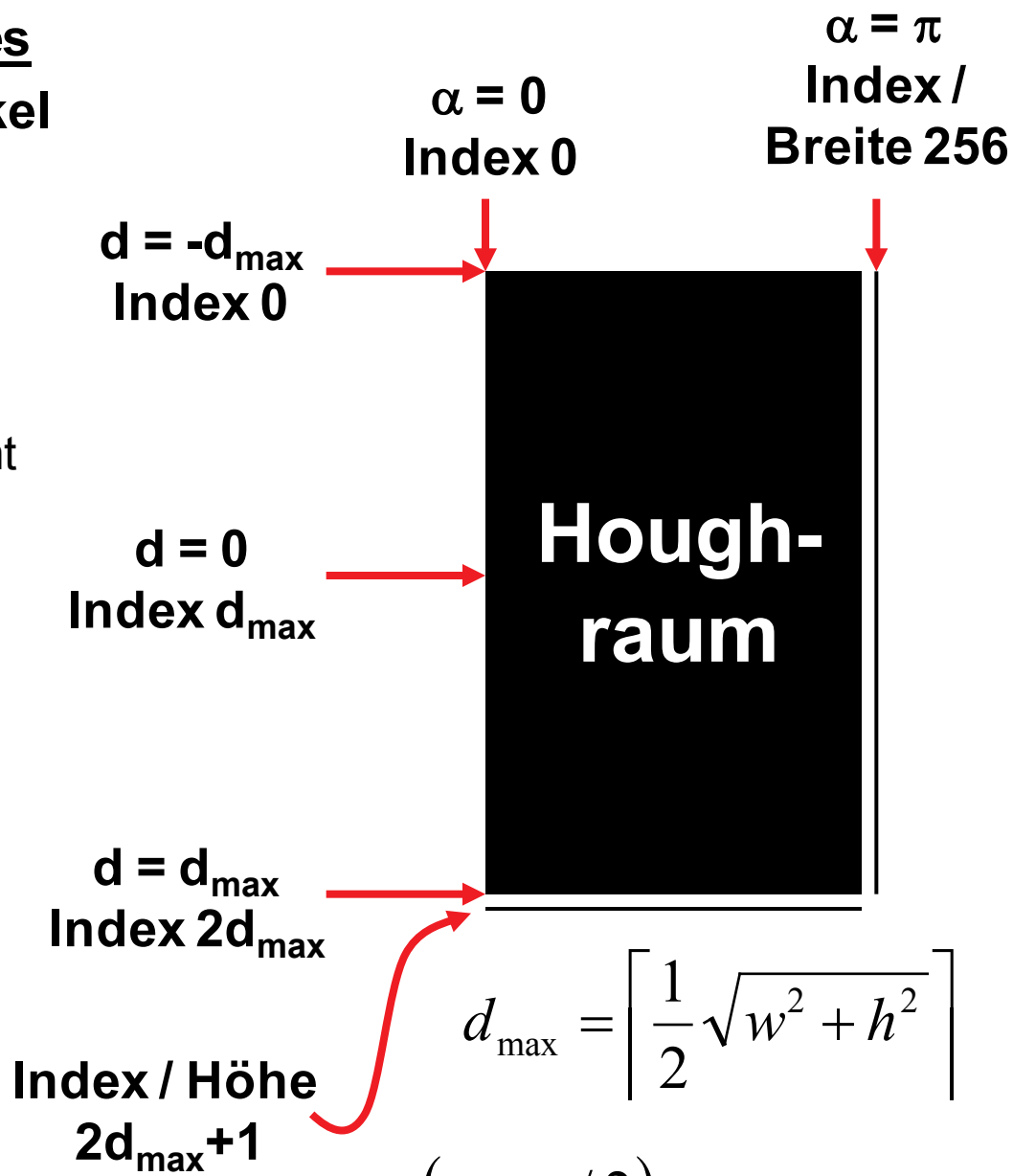


$$d \in \left[-\tfrac{1}{2}\sqrt{w^2+h^2}..\tfrac{1}{2}\sqrt{w^2+h^2}\right]$$

$$(x - w/2)\cos\alpha + (y - h/2)\sin\alpha - d = 0$$

Struktur des Linienhoughraumes

- **für Linienextraktion, 256 Winkel**
- **Winkel α**
  - α von 0 bis π (excl.)
  - Houghraum Breite 256
  - Indizes 0 bis 255 (incl.)
  - 256 entspricht π (excl.) äquivalent zu 0 (wrap around)
- **Distanz d**
  - d Bezug auf Bildmitte (w/2,h/2)
  - Diskretisiert 1 (1 Pixel d-Distanz Bildraum = 1 Pixel Houghraum)
  - d von $-d_{max}$ bis $+d_{max}$ (incl.)
  - Indices 0 bis $2d_{max}$ (incl.)
  - Houghraumhöhe $2d_{max}+1$

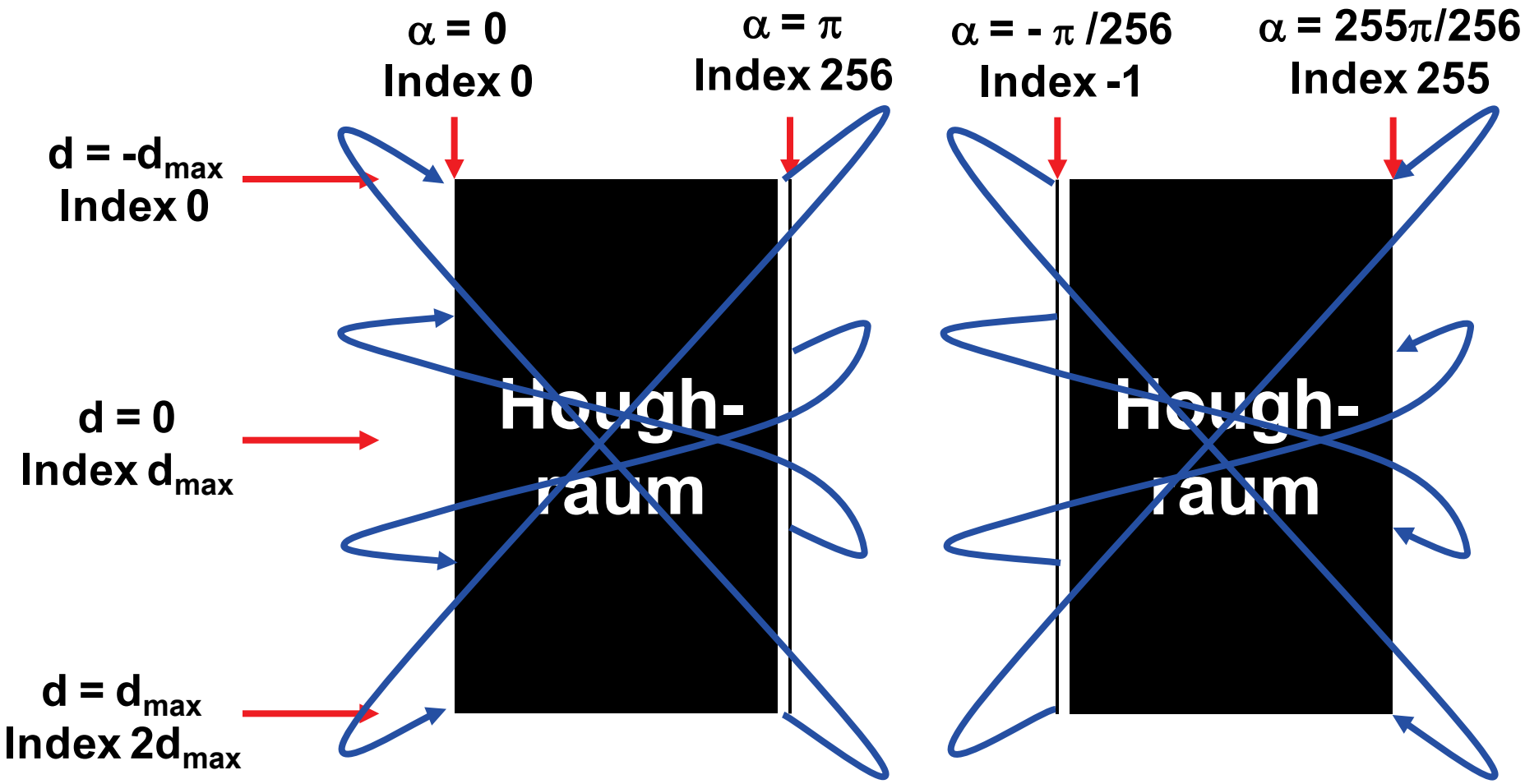


$$d_{\max} = \left\lceil \frac{1}{2}\sqrt{w^2 + h^2} \right\rceil$$

$$(x - w/2)\cos\alpha + (y - h/2)\sin\alpha - d = 0$$

Struktur des Linienhoughraumes

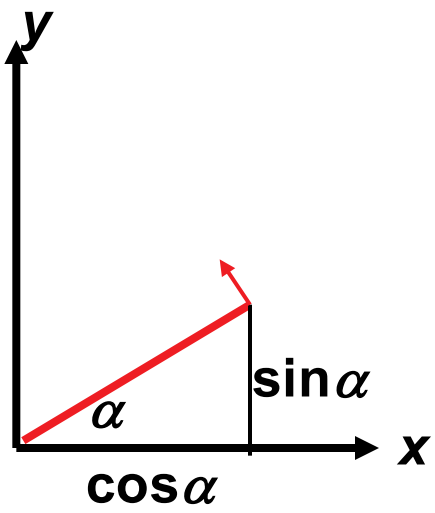
- α-wrap around mit Vorzeichenwechsel bei d
- (π, d) entspricht $(0, -d)$
- Index $(256, d_{idx})$ entspricht $(0, 2d_{max}-d_{idx})$
- Index $(-1, d_{idx})$ entspricht $(255, 2d_{max}-d_{idx})$

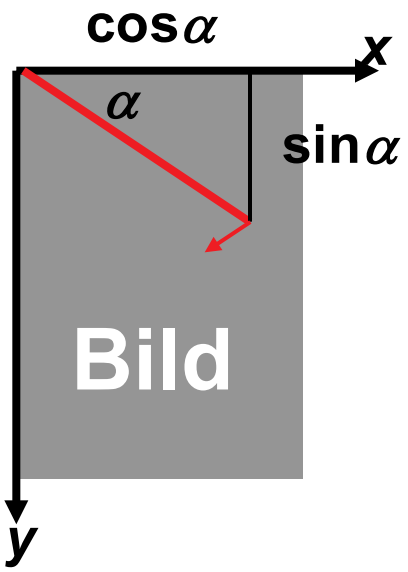


Hough Transformation für Linien

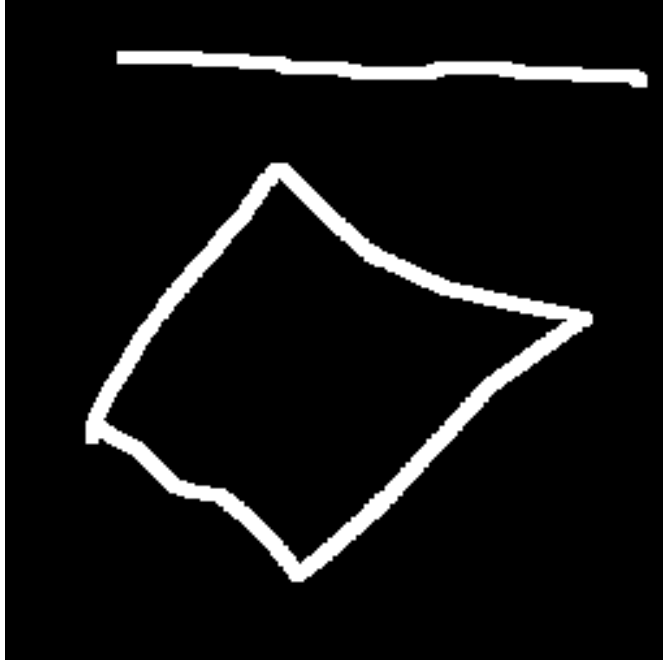
Struktur des Linienhoughraumes

- **Bildkoordinatensystem vs. geometrisches Koordinatensystem**
- **Bildkoordinaten: x zeigt nach rechts, y nach unten**
  - historisch Scanfolge des Elektronenstrahls im Fernseher
  - historisch vermutlich durch Schrift motiviert
- **Linkssystem (Daumen / Zeigerfinger) statt üblichen Rechtssystems**
  - gespiegelt
  - Winkel im Uhrzeigersinn
  - Flächenformeln wechseln Vorzeichen
- **Konsistent behandeln**
  - Herleitung im Rechtssystem
  - umrechnen bei Wechsel Bild / Weltkoordinaten (Pixel -> mm)





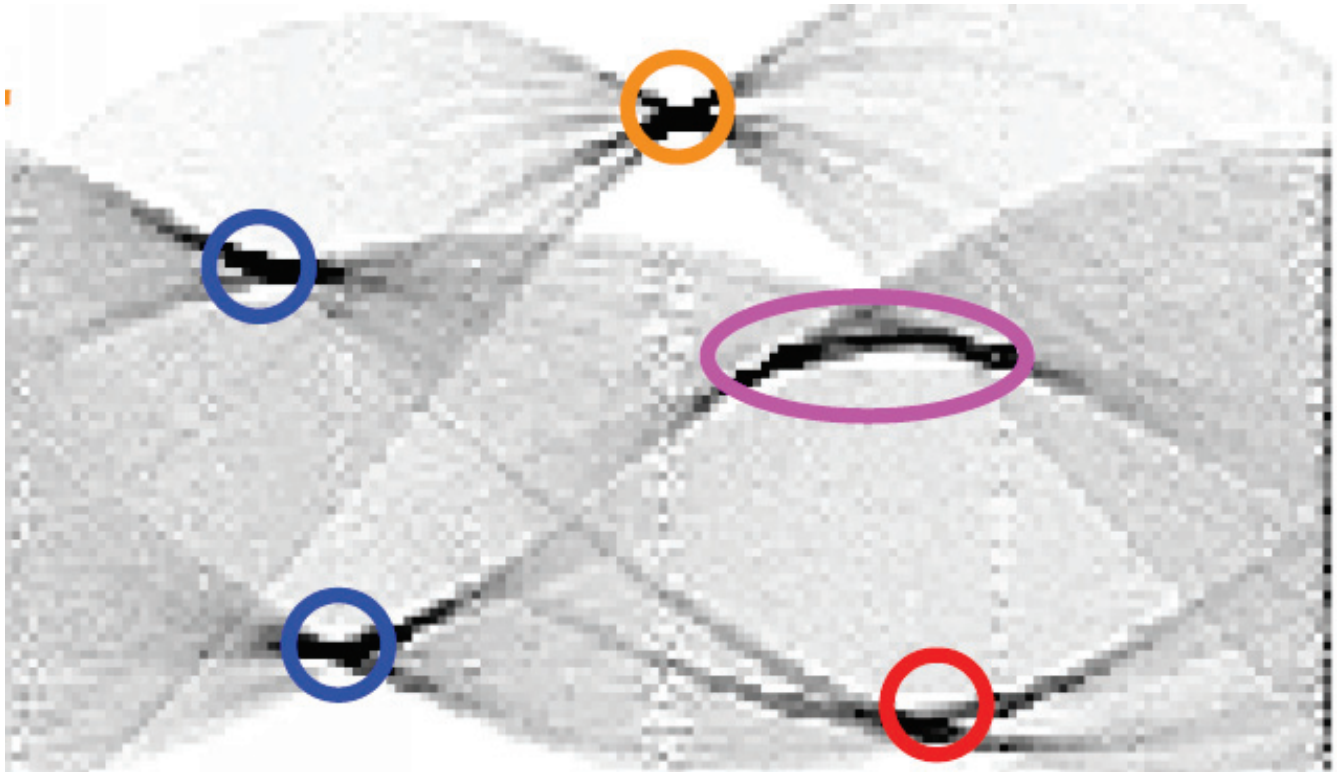
- **<u>Frage an das Auditorium</u>: Welches Maximum im Houghraum gehört zu welcher Linie?**



$\alpha = 0$

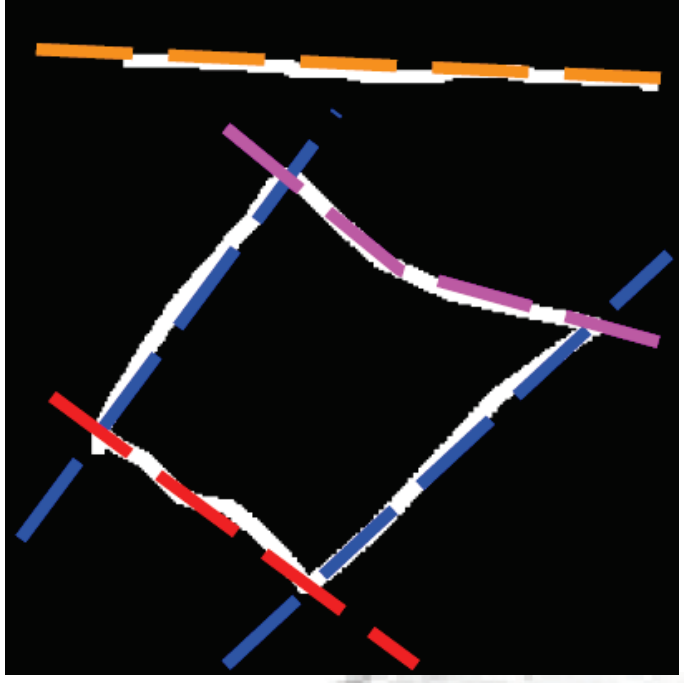
$\alpha = \pi$

$d = -d_{max}$



$d = d_{max}$

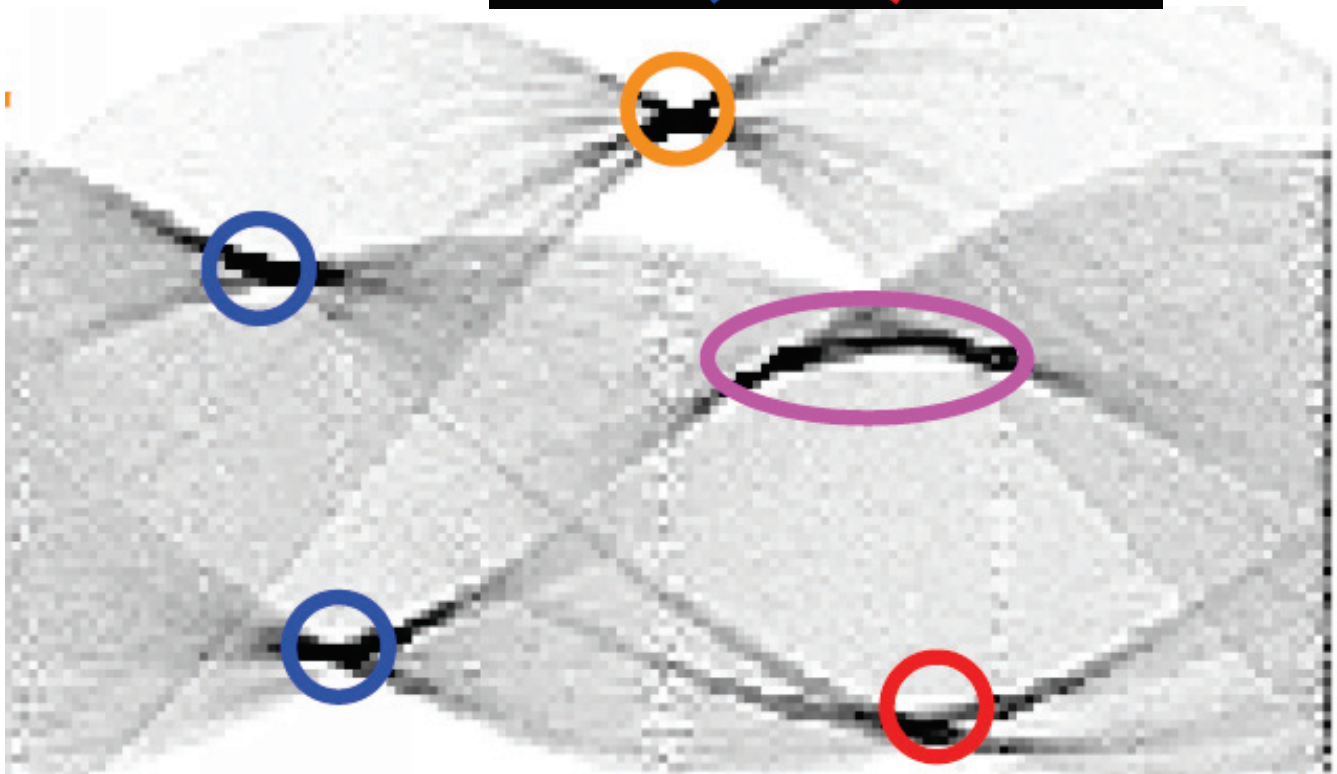
- **<u>Frage an das Auditorium</u>: Welches Maximum im Houghraum gehört zu welcher Linie?**



$\alpha = 0$

$\alpha = \pi$

$d = -d_{max}$



$d = d_{max}$

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation Linien (1. optimierte Fassung)

- **langsam weil alle `alphaIdx` durchlaufen werden**

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   for (alphaIdx=0;alphaIdx<NR_OF_ORIENTATIONS;alphaIdx++) {
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
   }
}
```

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation Linien (1. optimierte Fassung)

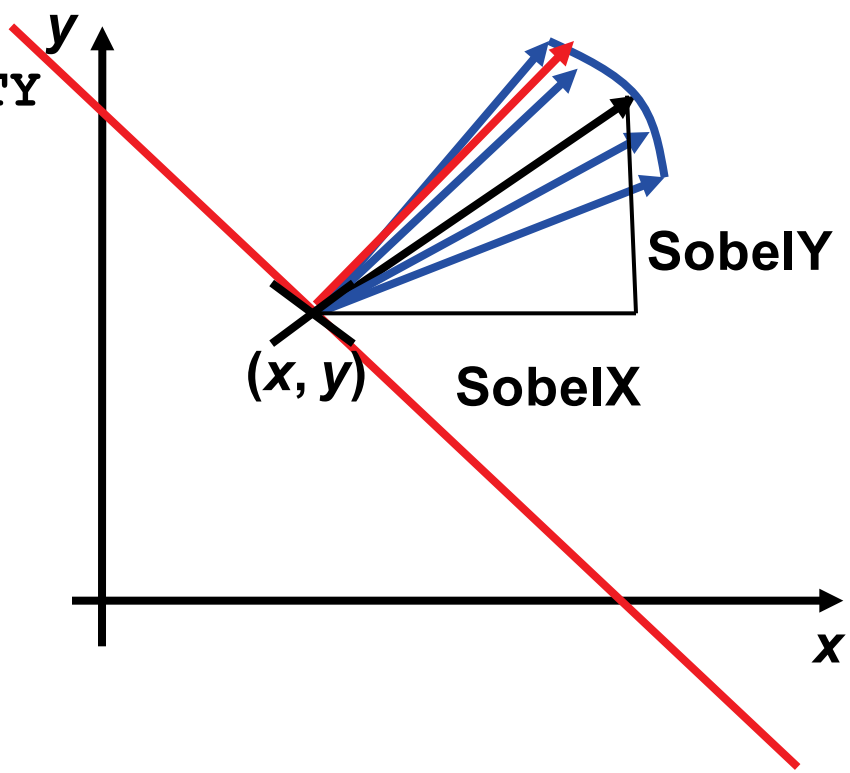
- **langsam weil alle `alphaIdx` durchlaufen werden**
- **Frage an das Auditorium:**
  Wie könnte man die Routine beschleunigen?

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   for (alphaIdx=0;alphaIdx<NR_OF_ORIENTATIONS;alphaIdx++) {
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
   }
}
```

Hough Transformation für Linien

Ausnutzen der Sobelrichtung

- Idee: Sobelvektors ist grob die Richtung der Geraden
- akkumuliere nur in Winkelbereich um Richtung des Sobelvektors.
- um die Richtung des Sobelvektors (schwarz) +/- `ANGLE_UNCERTAINTY` diskrete Winkel in den Houghraum eintragen (blau)
- echter Normalenwinkel (rot) sollte darunter sein
- Viel schneller, da nur `2*ANGLE_UNCERTAINTY+1` Einträge (z.B. 5 statt 256)
- weniger Überlagerung verschiedener Geraden



Hough Transformation für Linien

Intervalle in periodischen Räumen ablaufen

- **umgangssprachlich „wrap-around“**
- **Intervalle in nichtperiodischen Räumen bekannt:**

```
for(int i=lo; i<=hi; i++) {
      // do something with i
}
```

- **für Periodizität N (`NR_OF_ORIENTATIONS`) gilt:**
  - i und i+N oder i-N sind äquivalent
  - nur normalisierte Indices [0..N-1] im array vorhanden
- **Normalisieren (int) mit % (Vorsicht bei negativen Zahlen):**

```
iNorm = i % N;
if (iNorm<0) iNorm+=N;
```

- **Normalisieren (int) mit & (bei N=2^p)**

```
iNorm = i & (N-1);
```

- **Normalisieren (double) mit floor**

```
fNorm = f - N*floor(f/N);
```

Hough Transformation für Linien

Intervalle in periodischen Räumen ablaufen

- **Lösung: i nichtperiodisch durchlaufen und normalisieren**

```
for(int i=lo; i<=hi; i++) {
      iN = i % N;
      if (iN<0) iN+=N;
      // do something with iN
}
```

- **schneller: vorher normalisieren und „wrap-around“ in Schleife**

```
lo = lo     % N; if (lo<0) lo+=N;
hi = (hi+1) % N;   if (hi<=0) hi+=N;
for(int i=lo; i!=hi; i++) {
      if (i==N) i=0;
      // do something with i
}
```

- **Vorsicht: hier ist `hi` exclusiv!**

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation Linien (2. optimierte Fassung)

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   sobelAngle = atan2(sobelY, sobelX);
   alphaLo = (int) (sobelAngle/PI*NR_OF_ORIENTATIONS);
   alphaLo-= ANGLE_UNCERTAINTY;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   alphaHi = alphaLo + 2*ANGLE_UNCERTAINTY +1;
   if (alphaHi>NR_OF_ORIENTATIONS) alphaHi-=NR_OF_ORIENTATIONS;
   for (alphaIdx=alphaLo;alphaIdx!=alphaHi;alphaIdx++) {
      if (alphaIdx==NR_OF_ORIENTATIONS) alphaIdx = 0;
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
}  }
```

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation Linien (2. optimierte Fassung)

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   sobelAngle = atan2(sobelY, sobelX);
   alphaLo = (int) (sobelAngle/PI*NR_OF_ORIENTATIONS);
   alphaLo-= ANGLE_UNCERTAINTY;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   alphaHi = alphaLo + 2*ANGLE_UNCERTAINTY +1;
   if (alphaHi>NR_OF_ORIENTATIONS) alphaHi-=NR_OF_ORIENTATIONS;
   for (alphaIdx=alphaLo;alphaIdx!=alphaHi;alphaIdx++) {
      if (alphaIdx==NR_OF_ORIENTATIONS) alphaIdx = 0;
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
}  }
```

Hough Transformation für Linien

Hough Transformation Linien (2. optimierte Fassung)

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   sobelAngle = atan2(sobelY, sobelX);
   alphaLo = (int) (sobelAngle/PI*NR_OF_ORIENTATIONS);
   alphaLo-= ANGLE_UNCERTAINTY;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   alphaHi = alphaLo + 2*ANGLE_UNCERTAINTY +1;
   if (alphaHi>NR_OF_ORIENTATIONS) alphaHi-=NR_OF_ORIENTATIONS;
   for (alphaIdx=alphaLo;alphaIdx!=alphaHi;alphaIdx++) {
      if (alphaIdx==NR_OF_ORIENTATIONS) alphaIdx = 0;
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
}  }
```

Aufwändige Fliess-komma-rech-nungen z.B. (sin, cos, atan2)

Effiziente Hough-Transformation

Effizienz durch Tabellen (LUT)

- **für: komplizierte Rechnungen mit wenigen Variablen**
- **Beispiel: Farbklassifikation aus R, G, B**
- **Idee: Tabelle mit Ergebnis für jede Kombination der Variablen**
- **mehrere Ergebnisse zur selben Variablenkombination möglich**
- **gut, wenn Variablen schon diskret / diskretisiert sind**
- **Zusatzrechnungen in Tabelle integrieren**
  - Diskretisierung
  - Normalisierung
  - Beschränkung des Ergebnisses
  - t.w. Adressberechnungen für z.B. Bildzugriff

Hough Transformation für Linien

Frage an das Auditorium: Wo könnten hier Tabellen (LUTs) nützen?

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   sobelAngle = atan2(sobelY, sobelX);
   alphaLo = (int) (sobelAngle/PI*NR_OF_ORIENTATIONS);
   alphaLo-= ANGLE_UNCERTAINTY;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   alphaHi = alphaLo + 2*ANGLE_UNCERTAINTY + 1;
   if (alphaHi>NR_OF_ORIENTATIONS) alphaHi-=NR_OF_ORIENTATIONS;
   for (alphaIdx=alphaLo;alphaIdx!=alphaHi;alphaIdx++) {
      if (alphaIdx==NR_OF_ORIENTATIONS) alphaIdx = 0;
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
   }
}
```

LUT 1: `(sobelX, sobelY) → (sobelLen, alphaLo, alphaHi)`

```
addPointToHoughAccumulator (houghImg, x, y, sobelX, sobelY) {
   sobelAngle = atan2(sobelY, sobelX);
   alphaLo = (int) (sobelAngle/PI*NR_OF_ORIENTATIONS);
   alphaLo-= ANGLE_UNCERTAINTY;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   if (alphaLo<0) alphaLo += NR_OF_ORIENTATIONS;
   alphaHi = alphaLo + 2*ANGLE_UNCERTAINTY + 1;
   if (alphaHi>NR_OF_ORIENTATIONS) alphaHi-=NR_OF_ORIENTATIONS;
   for (alphaIdx=alphaLo;alphaIdx!=alphaHi;alphaIdx++) {
      if (alphaIdx==NR_OF_ORIENTATIONS) alphaIdx = 0;
      alpha = alphaIdx*PI/NR_OF_ORIENTATIONS;
      d = (x-width/2)*cos(alpha) + (y-height/2)*sin(alpha);
      dIdx = houghImg->height/2 + (int) d;
      houghImg (alphaIdx, dIdx) += 1;
   }
}
```

LUT 2: `(alphaIdx) → (cos(alpha), sin(alpha))`

Hough Transformation für Linien

Implementierung der LUTs

- **LUT 1: `(sobelX, sobelY)→ (sobelLen, alphaLo, alphaHi)`**
  - Tabelle (vector) von Objekten, nicht mehrere Tabellen
  - Wertebereich für `sobelX`, `sobelY`: [-1020..1020]
  - Eine Zeile: 2^{11}, dadurch Multiplikation `<<11`, Offset `1024`
  - Zugriff: `sobelTab[((sobelY+1024)<<11) + (sobelX+1024)]`
  - `+1024` herausziehen `sobelCenterTab[(sobelY<<11)+sobelX]`
- **LUT 2: `(alphaIdx)→ (cos(alpha), sin(alpha))`**
  - Wertebereich für alpha: [0..255], Zugriff direkt
  - Ergebnis mit 256 skaliert, dadurch `int` Arithmetik
  - ```
    CosSinTabEntry& cse = cosSinTab[alpha];
    d = ((x-width/2)*cse.cos + (y-height/2)*cse.sin) >> 8;
    ```
- **`-width/2, -height/2` aus Schleife ziehen**
- **`houghImg->height/2` herausziehen durch Pointer `houghCenter`**
    ```

Hough Transformation für Linien

Heraussuchen der Linien aus dem Houghraum

- **Houghraum nach Pixeln über einem Schwellwert durchsuchen**
- **nur akzeptieren, wenn in einer Umgebung maximal**
- **in zurück gelieferten Linien *d* wieder auf (0,0) nicht Bildmitte beziehen. Einfacheres Interface.**
- **Maximalitätstest wird selten aufgerufen, daher nicht effizienzkritisch**
- **Vorsicht: Wraparound in α führt zu Negierung von *d***
  - vgl. Struktur des Houghraumes oben.
  - (π,*d*) entspricht (0,-*d*)
  - Index (256, d_{idx}) entspricht (0, $2d_{max}$-d_{idx})
  - Index (-1,d_{idx}) entspricht (255, $2d_{max}$-d_{idx})

Hough Transformation für Linien

Zusammenfassung effiziente Implementierung

- nur Winkel, die ungefähr der Richtung des Sobel Vektors entsprechen im Houghraum erhöhen.
- α in 256 Schritte [0..π) diskretisieren, Periodizität beachten.
- *d* in Bezug auf Bildmitte um Houghraum klein zu halten.
- Sobel Betrag und diskretisiertes & normalisiertes Winkel-intervall für jede SobelX, SobelY Kombination vortabellieren (LUT1).
- cos(α), sin(α) für jeden diskretisierten Winkel tabellieren (*256 für Festkommaarithmetik) (LUT2).
- konstante Offsets aus Berechnungen herausziehen.
- Tabellen- / Houghraumdimension als Zweierpotenz, dadurch Multiplikation per <<.
- mehrstufige Pointerketten: Zwischenpointer speichern.

Zusammenfassung

- **Linien Hough Transformation:**
  - Nur Winkel ungefähr in Sobelrichtung im Houghraum erhöhen.
  - α in 256 Schritte $[0..\pi)$ diskretisieren, Periodizität beachten.
  - *d* in Bezug auf Bildmitte um Houghraum klein zu halten.
  - Look-up-table (LUT 1) für Länge / Richtung aus SobelX, SobelY
  - Look-up-table (LUT 2) für sin/cos in Festpunktarithmetik
  - Konstanten herausziehen, >>, <<, & nutzen
- **Derart technisch verwickelte Optimierung sind nur sinnvoll für Teilroutinen die sehr oft ausgeführt werden (z.B. jeden Pixel)**