



Bildverarbeitung 1 Vom Pixel zum Objekt

Dr. Andrea Miene

Verarbeitungsstufen der Bildanalyse

- ▶ **Bildgebung**
 - Bilderfassung durch verschiedene Sensoren
- ▶ **Vorverarbeitung**
 - Bildverbesserung, ...
- ▶ **Segmentierung**
 - Trennung: Objekt/Hintergrund
- ▶ **Merkmalsextraktion**
 - Farbe, Kontur, Textur...
- ▶ **Klassifikation**
 - Diskriminantenfkt., Abstand, Wahrscheinlichkeit, ...

**Mustererkennungs-
Paradigma**

Segmentierung

- ▶ Begriffsbestimmung
- ▶ Einfache Verfahren (punktorientiert)
 - Geeignete Merkmale auf Ebene einzelner Punkte (Pixel)
 - Globale Schwellwertsegmentierung
 - Lokale adaptive Schwellwertsegmentierung
- ▶ Komplexe Verfahren (nachbarschaftsorientiert)
 - Diskontinuitätskriterium (Kanten)
 - Homogenitätskriterium (Intensitätswert, Farbe)
 - Hybride Verfahren (Kombination aus beiden Kriterien)

Komplexe Segmentierungsverfahren

- ▶ Komplexe Verfahren beziehen durch Betrachtung von Punktnachbarschaften den Zusammenhang mit ein
- ▶ Verschiedene Kriterien zur Erkennung von Regionengrenzen
 - Diskontinuitätskriterium (Kanten)
 - Homogenitätskriterium (Intensitätswert, Farbe)
 - Hybride Verfahren (Kombination aus beiden Kriterien)

Segmentierung

- ▶ Begriffsbestimmung
- ▶ Einfache Verfahren (punktorientiert)
 - Geeignete Merkmale auf Ebene einzelner Punkte (Pixel)
 - Globale Schwellwertsegmentierung
 - Lokale adaptive Schwellwertsegmentierung
- ▶ Komplexe Verfahren (nachbarschaftsorientiert)
 - Diskontinuitätskriterium (Kanten)
 - Homogenitätskriterium (Intensitätswert, Farbe)
 - Hybride Verfahren (Kombination aus beiden Kriterien)

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

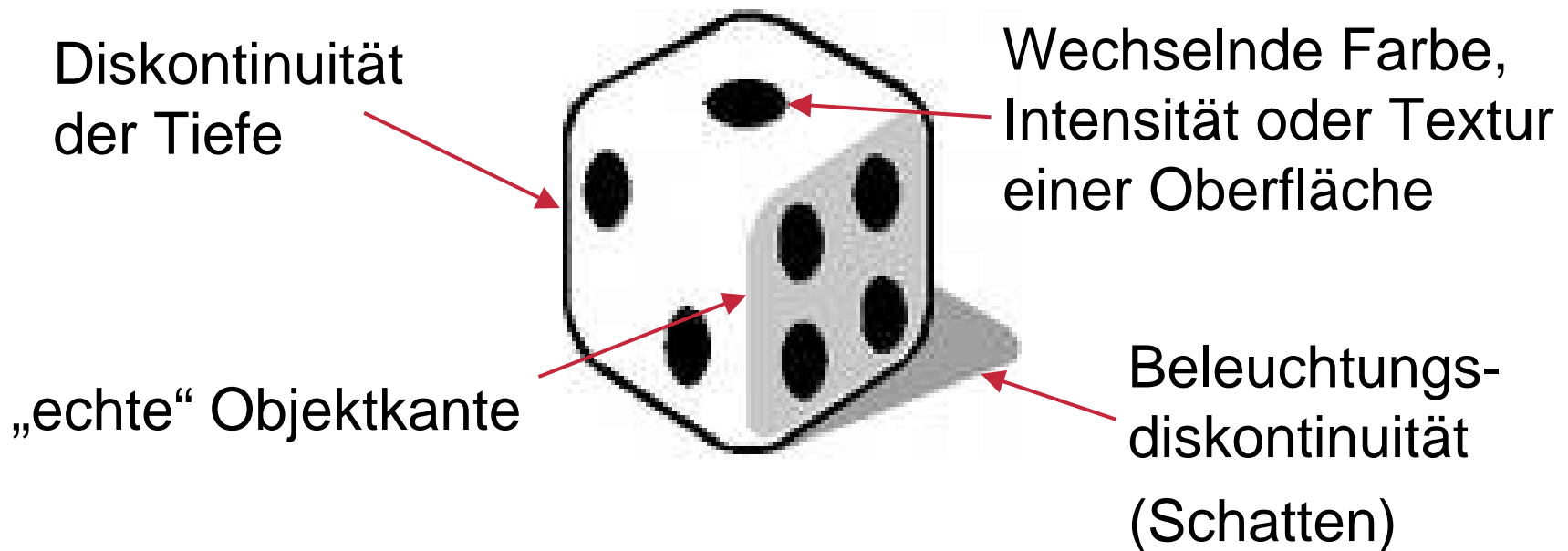
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Kanten sind Diskontinuitäten im Bildsignal
 - Intensität (Grauwert, Farbe)
 - Texturkanten (dazu kommen wir später!)
- ▶ Diskontinuität: benachbarte Bildregionen haben verschiedene Intensitäten
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten durch diskrete 1. oder 2. Ableitung
- ▶ Erstes Ziel: Kantenbild, das die Stärke der Intensitätsänderung (= Kantenstärke) als Grauwert dargestellt



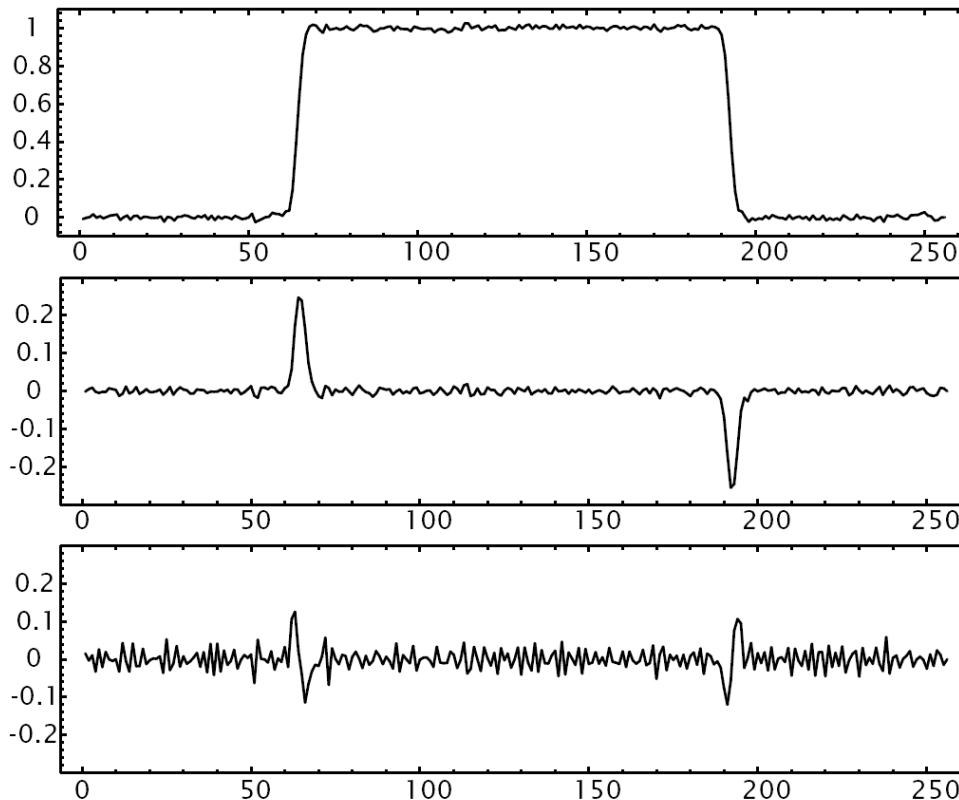
Kantenbasierte Segmentierung

Ursachen für Diskontinuitäten im Bildsignal (Kanten)



Kantenbasierte Segmentierung

[Jähne 2002], S. 316



- ▶ Diskontinuitäten im (leicht verrauschten) Bildsignal (eine Zeile bzw. Spalte)
- ▶ Diskrete erste Ableitung: Kanten an den Extrema
- ▶ Diskrete zweite Ableitung: Kanten an den Nulldurchgängen zwischen den Extrema

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace-Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Erste Ableitung des Bildsignals in x - und y -Richtung
- ▶ Stetige Funktionen mit 2 Variablen in x - und y -Richtung
- ▶ Beschreibung mit Differenzengleichungen:

$$E'_x(x, y) = \frac{\partial E(x, y)}{\partial x} \quad \text{und} \quad E'_y(x, y) = \frac{\partial E(x, y)}{\partial y}$$

- ▶ $E'_x(x, y)$ und $E'_y(x, y)$ berechnet die Steigung der Funktion E an der Stelle (x, y) in x bzw. y -Richtung

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Erste Ableitung in x-Richtung:

$$\frac{\partial E(x, y)}{\partial x} = \Delta_x E(x, y) = \frac{E(x, y) - E(x - \Delta x, y)}{\Delta x}$$

- ▶ Erste Ableitung in y-Richtung:

$$\frac{\partial E(x, y)}{\partial y} = \Delta_y E(x, y) = \frac{E(x, y) - E(x, y - \Delta y)}{\Delta y}$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Diskrete erste Ableitung (Gradient) in x - bzw. y -Richtung: $\Delta_x E(x, y)$ und $\Delta_y E(x, y)$
- ▶ Mit $\Delta_x=1$ und $\Delta_y=1$ ist die diskrete erste Ableitung x - bzw. y -Richtung:

$$\Delta_x E(x, y) = E(x, y) - E(x-1, y)$$

$$\Delta_y E(x, y) = E(x, y) - E(x, y-1)$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Diskrete erste Ableitung (Gradient) als Filtermasken C_x und C_y

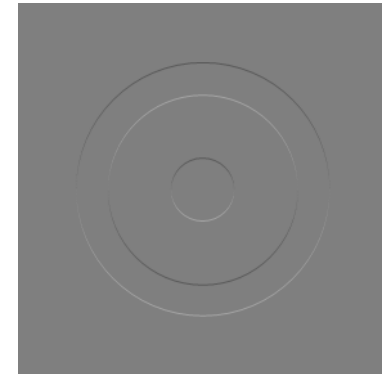
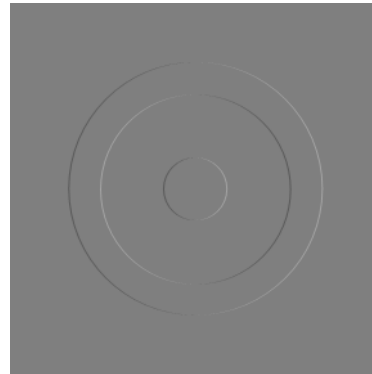
$$C_x = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } C_y = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- ▶ Ableitung in beliebiger Richtung Θ kann aus horizontaler (x -Richtung) und vertikaler (y -Richtung) berechnet werden:

$$\Delta_{\Theta} E(x, y) = \Delta_x E(x, y) \cos \Theta + \Delta_y E(x, y) \sin \Theta$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Diskrete erste Ableitung durch Anwendung der Filtermasken C_x und C_y liefert Gradientenbilder



- ▶ Pro Übergang genau ein Kantenpunkt
- ▶ Bezugspunkt nicht mittig, Kantenpunkt liegt in einer der Flächen
- ▶ 1 Pixel breite Linien liefern zwei Übergänge und werden deswegen im Kantenbild breiter (2 Pixel)

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Gradientenoperatoren C_x und C_y mit mittigem Bezugspunkt

$$C_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \text{ und } C_y = \begin{vmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

- ▶ Liefert jedoch zwei Kantenpunkte pro Übergang
- ▶ Begründung: Position einer Kante ist nicht an einem Punkt sondern zwischen den beiden Punkten, zwischen denen sich die Intensität ändert

Kantenbasierte Segmentierung

- Berechnung der Gradientenstärke (Magnitude)

$$\begin{aligned}\|\nabla\| &= \sqrt{(\Delta_x E(x, y))^2 + (\Delta_y E(x, y))^2} \\ &= \sqrt{(-10 + 5)^2 + (-10 + 5)^2} = 7,07\end{aligned}$$

$$C_x = \begin{vmatrix} -1 & 1 \end{vmatrix} \text{ und } C_y = \begin{vmatrix} -1 \\ 1 \end{vmatrix}$$

10	10	10	5
10	10	5	5
10	5	5	5
5	5	5	5

- Berechnung der Gradientenrichtung

$$\Theta(x, y) = \arctan \frac{\Delta_y E(x, y)}{\Delta_x E(x, y)} = \arctan \frac{-10 + 5}{-10 + 5} = 45^\circ$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Erzeugung von Gradientenbildern
 - Kodierung der Operatorantwort des Kantenoperators als Grauwerte
 - I.d.R. ist eine Skalierung nötig
 - Operatorantwort kann negativ sein (Differenzbildung)
 - Wertebereich kann für 8 Bit zu groß sein
 - Zwei typische Darstellungen
 - Pseudoplastisch: Wertebereich $[0 \dots 126]$ für negative Werte, 127 für 0 (keine Kante), $[128 \dots 255]$ für positive Werte
 - Absolute Darstellung der Kantenstärke, skaliert auf Wertebereich $[0 \dots 255]$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Erzeugung von Gradientenbildern als Kombination mehrerer Operatoren
 - Variante 1: Berechnung der exakten Kantenstärke (Magnitude)
 - Gebräuchlich bei der Verwendung von zwei Operatoren mit orthogonalen Richtungen, dann

$$\|\nabla\| = \sqrt{(\Delta_x E(x, y))^2 + (\Delta_y E(x, y))^2}$$

- Variante 2: Bestimmung des Maximums der Absolutwerte der Operatorantworten
 - Gebräuchlich wenn mehr als zwei Operatoren verwendet werden
 - Kompass-Gradienten, Kirsch-Operator

Kantenbasierte Segmentierung

► Sobel Operator

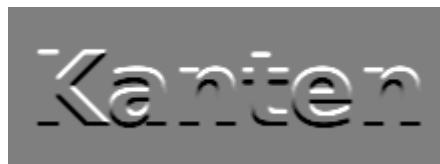
$$C_{Sx} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad C_{Sy} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$$

Kanten

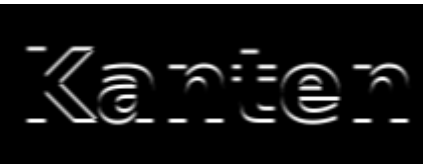
C_{Sx}



$abs(C_{Sx})$



C_{Sy}



$abs(C_{Sy})$

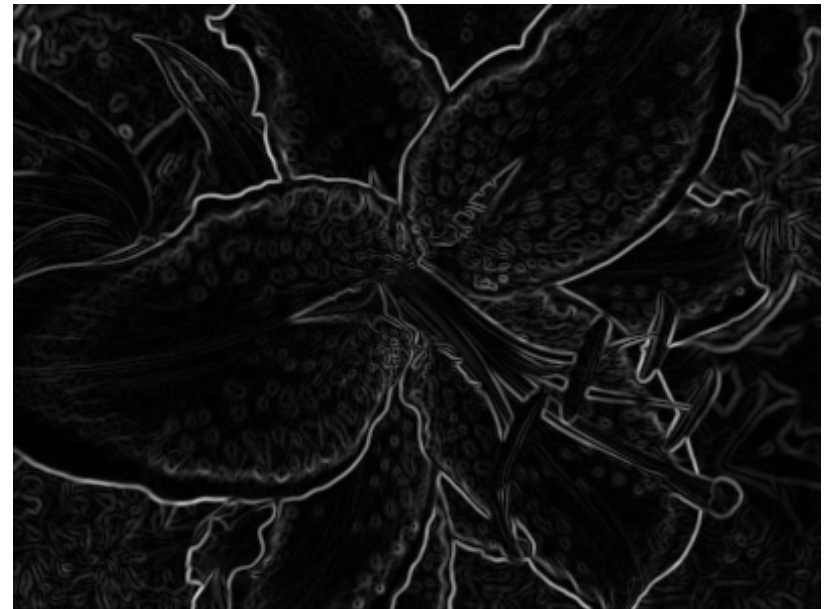


Magnitude

- Verwendung von 3x3 Masken glättet gleichzeitig

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Sobel Operator



Kantenbasierte Segmentierung

- Prewitt Operator

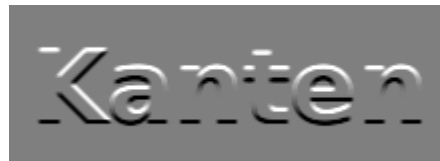
$$C_{Px} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad C_{Py} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

Kanten

C_{Px}

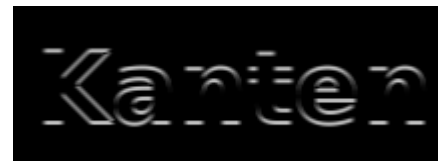


$abs(C_{Px})$



C_{Py}

$abs(C_{Py})$

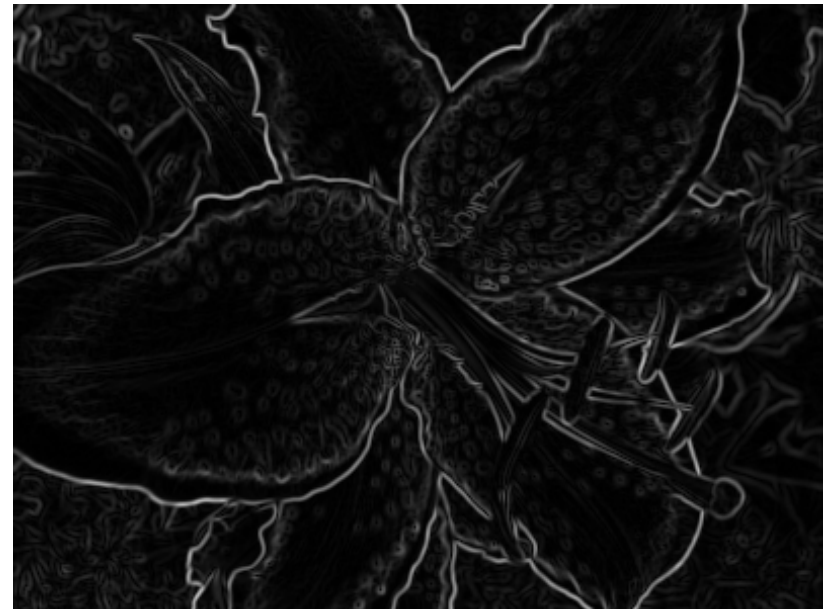


Magnitude

- Stärkere Glättung als beim Sobel Operator

Kantenbasierte Segmentierung

► Prewitt Operator



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Roberts-Cross

$$C_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad \text{bzw.} \quad C_2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$A(x, y) = \max(|E(x, y) - E(x+1, y+1)|, |E(x+1, y) - E(x, y+1)|)$$

C_1

$abs(C_1)$



$\max(abs(C_1), abs(C_2))$

C_2

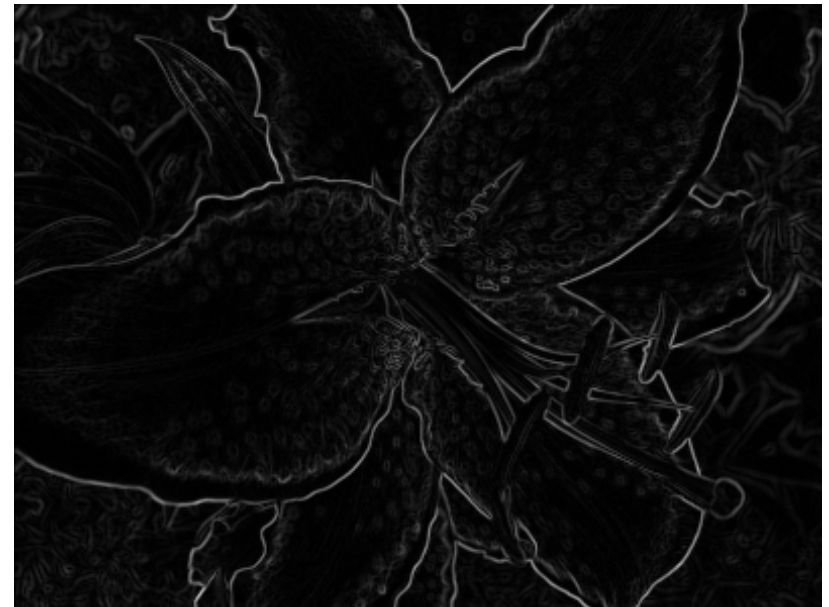
$abs(C_2)$

- ▶ Diagonale Richtungen, kein mittlerer Bezugspunkt

Kantenbasierte Segmentierung

► Roberts-Cross

$$A(x, y) = \max(|E(x, y) - E(x + 1, y + 1)|, |E(x + 1, y) - E(x, y + 1)|)$$



Kantenbasierte Segmentierung

► Kompass-Gradienten Operatoren

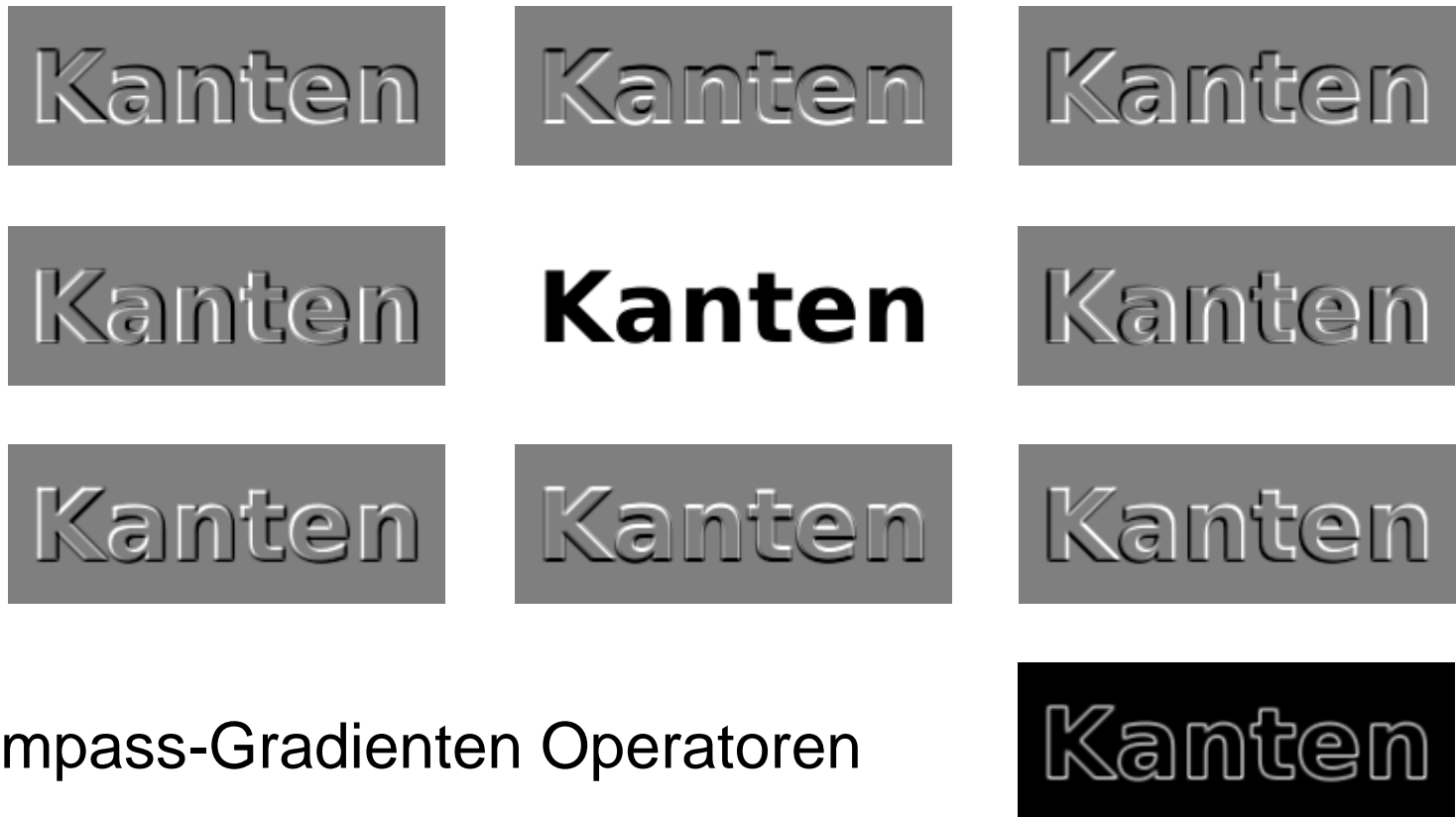
$$H_0 = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad H_1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \quad H_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad H_3 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$$

$$H_4 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} \quad H_5 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad H_6 = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad H_7 = \begin{vmatrix} -1 & -1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

► Möglichkeit zur Gradientenrichtungskodierung

- Acht verschiedene Richtungen als Grauwerte kodiert

Kantenbasierte Segmentierung

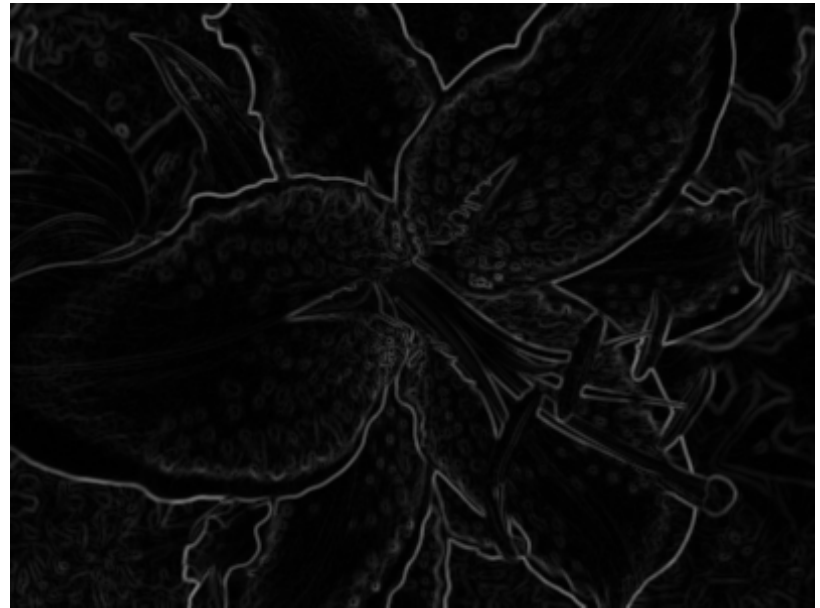


- Kompass-Gradienten Operatoren

Maximum der Absolutwerte

Kantenbasierte Segmentierung

► Kompass-Gradienten Operatoren



Kantenbasierte Segmentierung

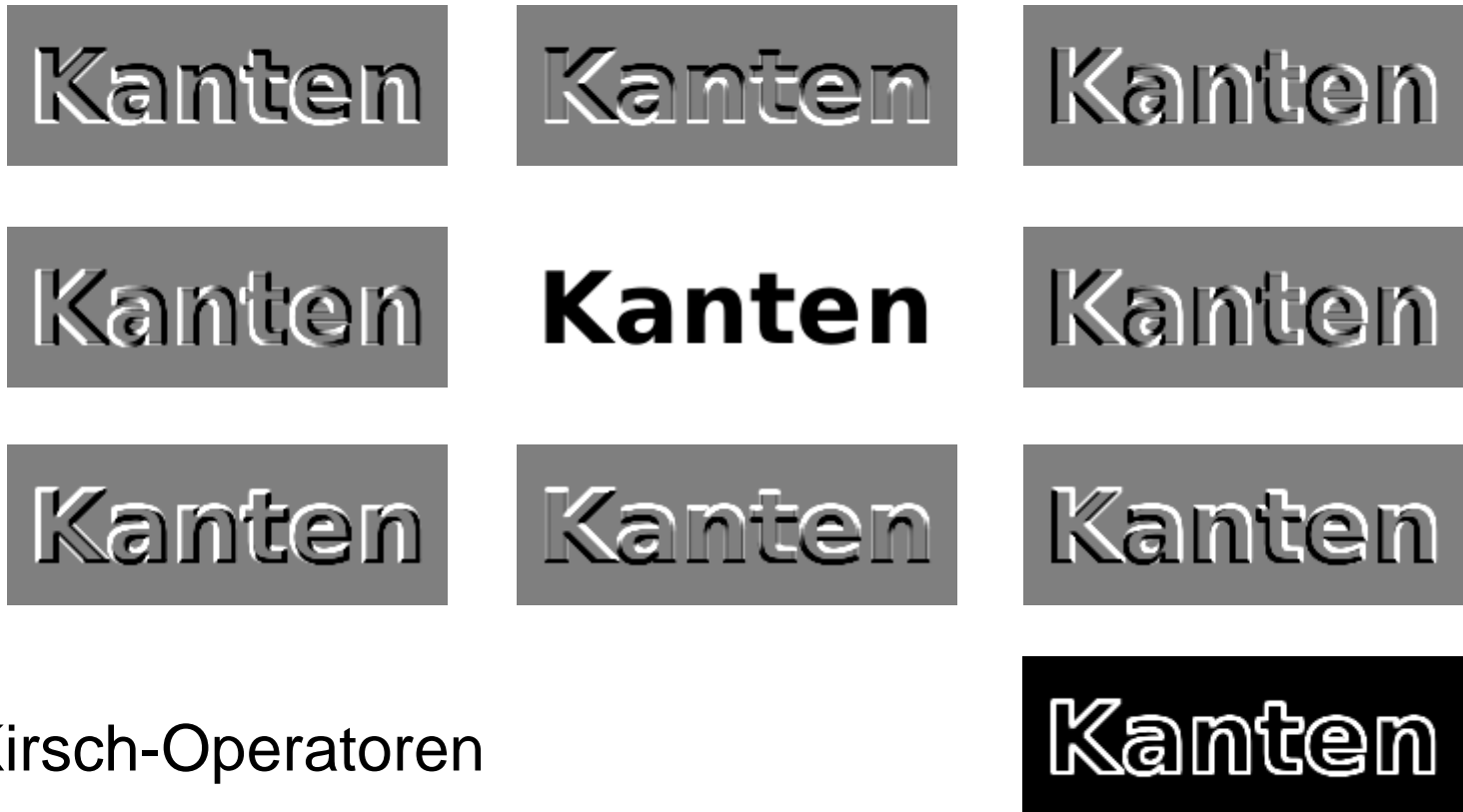
► Kirsch-Operatoren

$$K_0 = \begin{vmatrix} -3 & -3 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{vmatrix} \quad K_1 = \begin{vmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{vmatrix} \quad K_2 = \begin{vmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{vmatrix} \quad K_3 = \begin{vmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{vmatrix}$$

$$K_4 = \begin{vmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & -3 & -3 \end{vmatrix} \quad K_5 = \begin{vmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{vmatrix} \quad K_6 = \begin{vmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{vmatrix} \quad K_7 = \begin{vmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{vmatrix}$$

- Kirsch, R., *Computer determination of the constituent structure of biological images*. Comput. Biomed. Res. Vol. 4, No. 3, pp.315-328, 1971.

Kantenbasierte Segmentierung

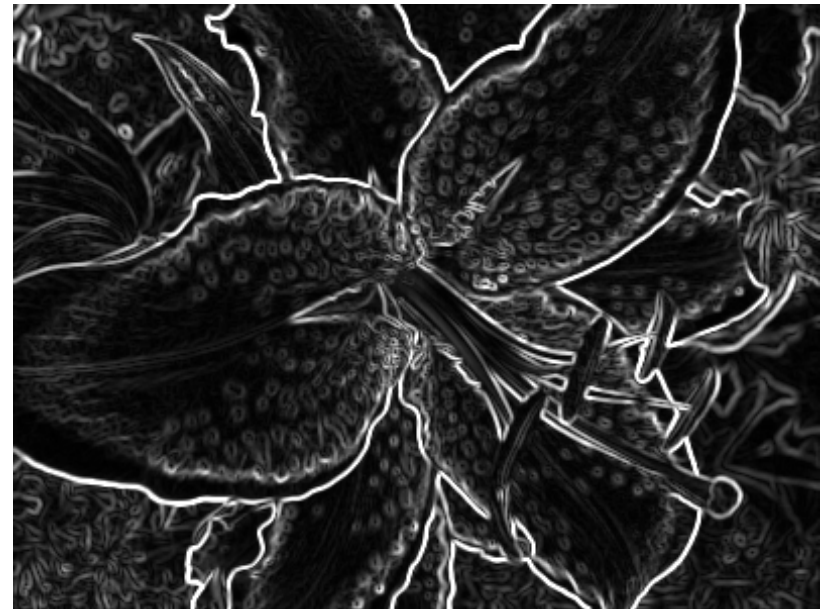


► Kirsch-Operatoren

Maximum der Absolutwerte

Kantenbasierte Segmentierung

► Kirsch-Operator



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace-Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

Kantenbasierte Segmentierung

► Diskrete Ableitung zweiter Ordnung

- x -Richtung:

$$\begin{aligned}\Delta_x^2 E(x, y) &= \Delta_x E(x+1, y) - \Delta_x E(x, y) \\ &= ((E(x+1, y) - E(x, y)) - (E(x, y) - E(x-1, y))) \\ &= E(x+1, y) + E(x-1, y) - 2E(x, y)\end{aligned}$$

- y -Richtung:

$$\Delta_y^2 E(x, y) = E(x, y+1) + E(x, y-1) - 2E(x, y)$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Filtermasken der diskrete Ableitung zweiter Ordnung

$$C_{L_H} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } C_{L_V} = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- ▶ Summe der partiellen zweiten Ableitungen wird als Laplace Operator bezeichnet:

$$\nabla^2 E(x, y) \approx \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2}$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Realisierung des Laplace Operator für den diskreten Fall:

$$\begin{aligned}\nabla^2 E(x, y) &= \Delta_x^2 E(x, y) + \Delta_y^2 E(x, y) \\ &= E(x+1, y) + E(x, y+1) \\ &\quad + E(x-1, y) + E(x, y-1) - 4E(x, y)\end{aligned}$$

- ▶ Rotationsinvarianter Kantenfilter

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Filtermasken des Laplace Operators bezüglich der 4er und der 8er Nachbarschaft:

$$C_{L_1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$C_{L_2} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Laplace Operator



Kanten

- ▶ 4er

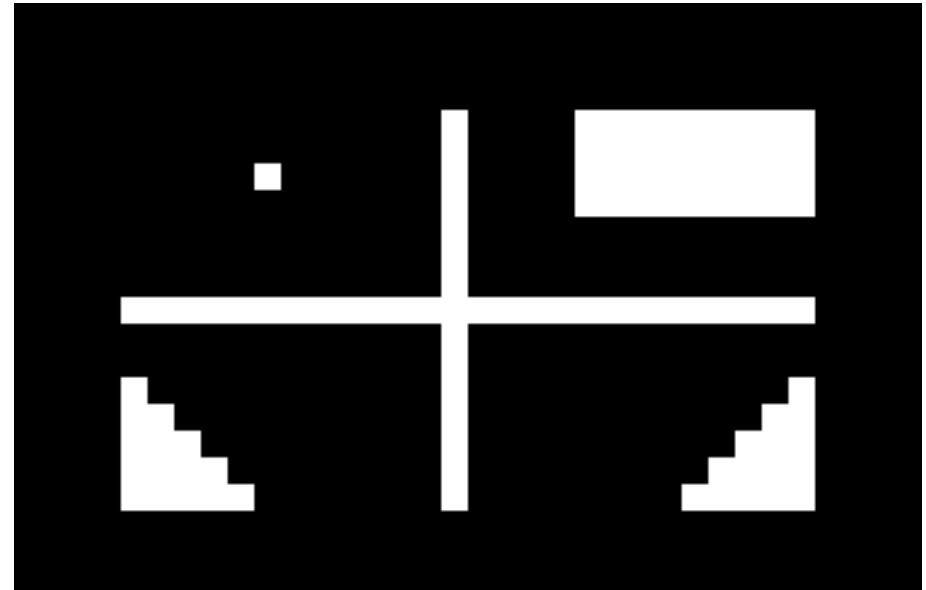


- ▶ 8er



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Vergleich der Wirkungsweise der Filter der ersten und zweiten Ableitung auf
 - Einzelne Punkte
 - Linien
 - Linienendpunkte
 - Kanten zwischen Flächen
- ▶ Testbild
 - Kleines Quadrat oben links ist einzelner Punkt!



Kantenbasierte Segmentierung

► Vergleich



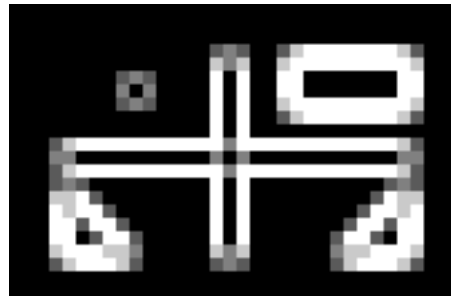
Testbild

- Punkt
- Linien (Kreuz)
- Flächen

1. Ableitung



Einfache Differenz (Maximum)



Sobel Magnitude

2. Ableitung



4er Laplace



8er Laplace

Kantenbasierte Segmentierung

► Vergleich Gradienten- und Laplace-Operatoren

	Gradienten-Operatoren	Laplace-Operatoren
Einzelne Punkte	verschmiert	verstärkt
Linien und Linienendpunkte	Verbreitern der Linie	Verstärken der Linie, besonders der Endpunkte
Kanten (von Flächen)	Ergebnis ist Linie	Ergebnis ist verbreiterte Linie

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace-Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

Kantenbasierte Segmentierung

[Klette & Zamperoni 95], S. 209

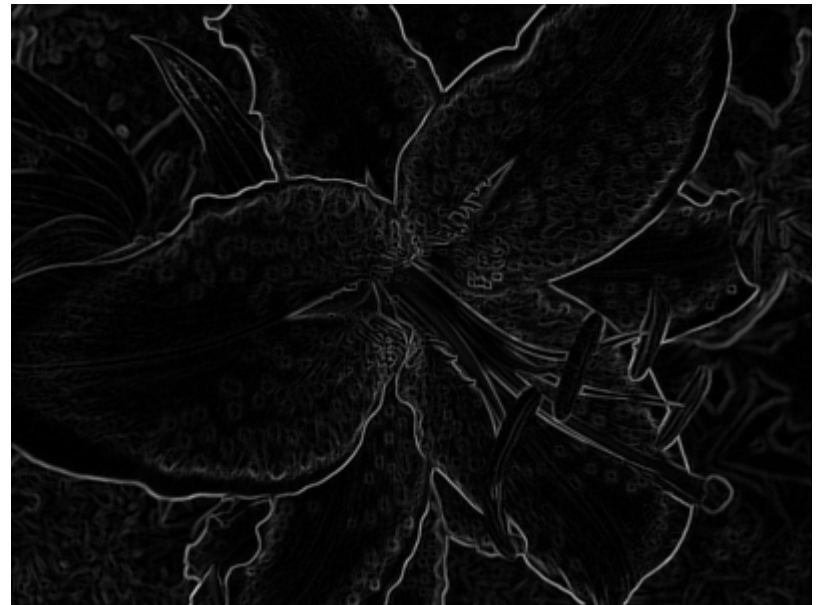
- ▶ Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Differenz zwischen dem aktuellen Grauwert und dem minimalem Grauwert in einer Achter-Nachbarschaft C

$$A(x, y) = E(x, y) - \min(\{(i, j) \mid (i, j) \in C\})$$

- ▶ Ergebnis:
 - Grauwertbild, das ggf. noch mit einer geeigneten Schwelle binarisiert werden kann, um Kantenpunkte ab einer bestimmten Stärke zu erhalten

Kantenbasierte Segmentierung

► Einseitiger Kantenfilter



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace-Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Kantenpunkt: einzelnes, punktgroßes Kantenstück
 - Noch kein Zusammenhang bekannt, daher auch noch keine Kontur
 - Bildet nur die Basis für die eigentliche Segmentierung
- ▶ Von Kantenpunkten zur Kontur
 - Zusammenhängende Kantenstücke (Kantenpunkte)
 - Lücken können auftreten, einzelne Kantenpunkte einzelner Kantenstücke gehören logisch zusammen
 - Geschlossene Kontur
 - Keine Lücken, keine einzelne Kantenstücke, Kontur umschließt einen zusammenhängenden Bildbereich (=Segmentierung)

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Kantenpunkte alleine liefern noch keine Segmentierung
- ▶ Gesucht sind geschlossene Konturen der Segmente
- ▶ Bisher berechnet:
 - Stärke der Intensitätsänderung
 - Gradientenrichtung (bei Gradientenfiltern)
- ▶ Welche Punkte gehören zu Regionengrenzen?
 - Einfachste Methode: Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke
 - Problem: Global passender Schwellwert schwer zu finden
 - Statt 1 Pixel breiter Konturen erhalten wir stellenweise *zu breite* und an anderen Stellen *unterbrochene* Strukturen

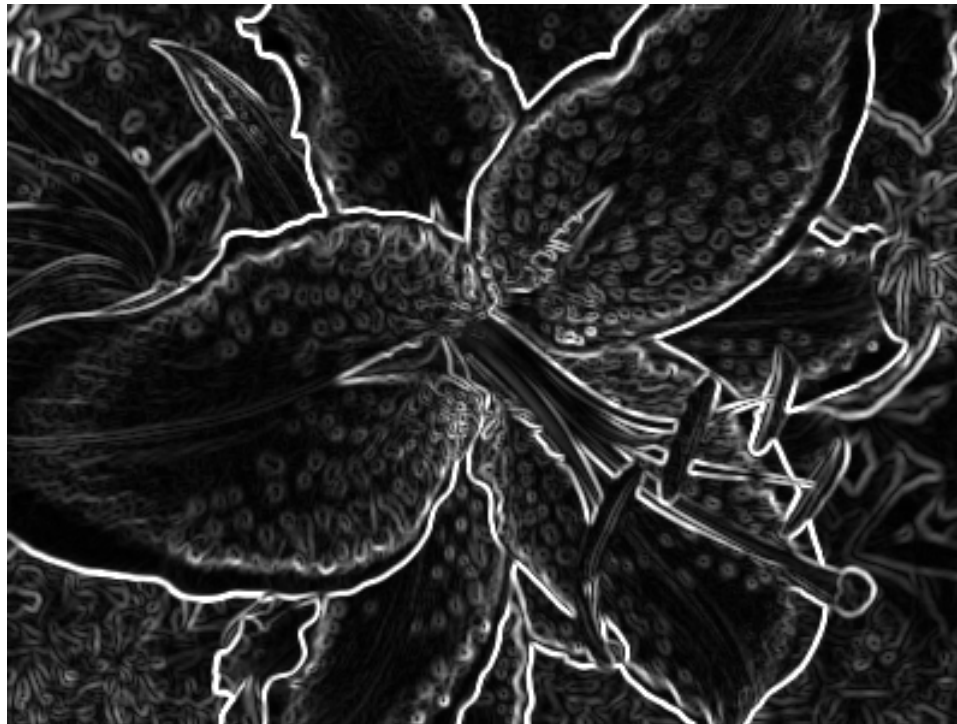
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke: Originalbild



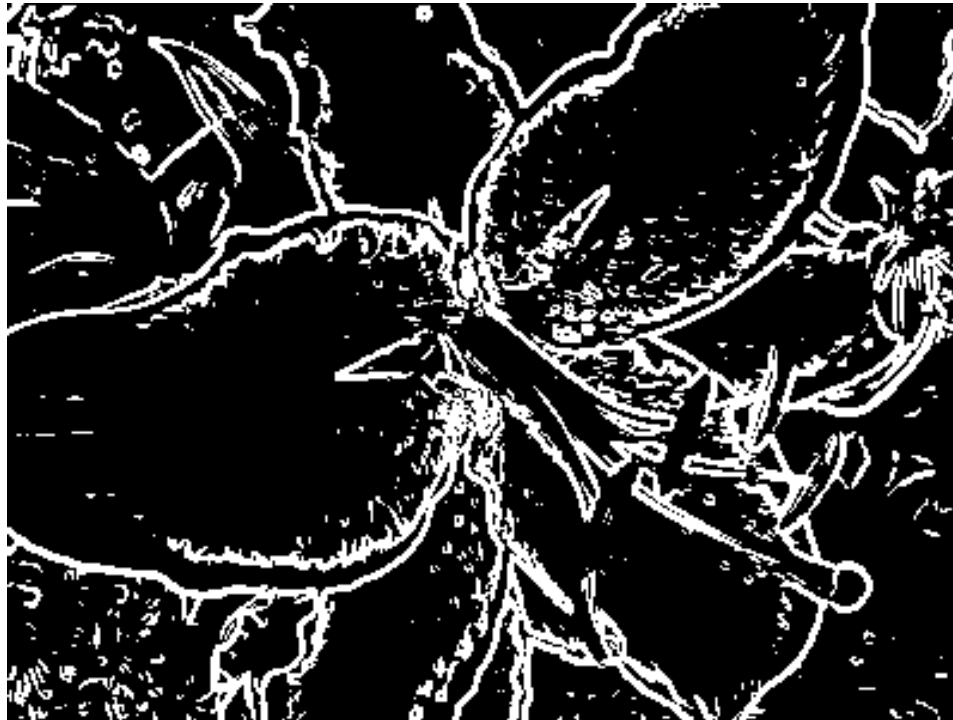
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke: Kirsch Operator



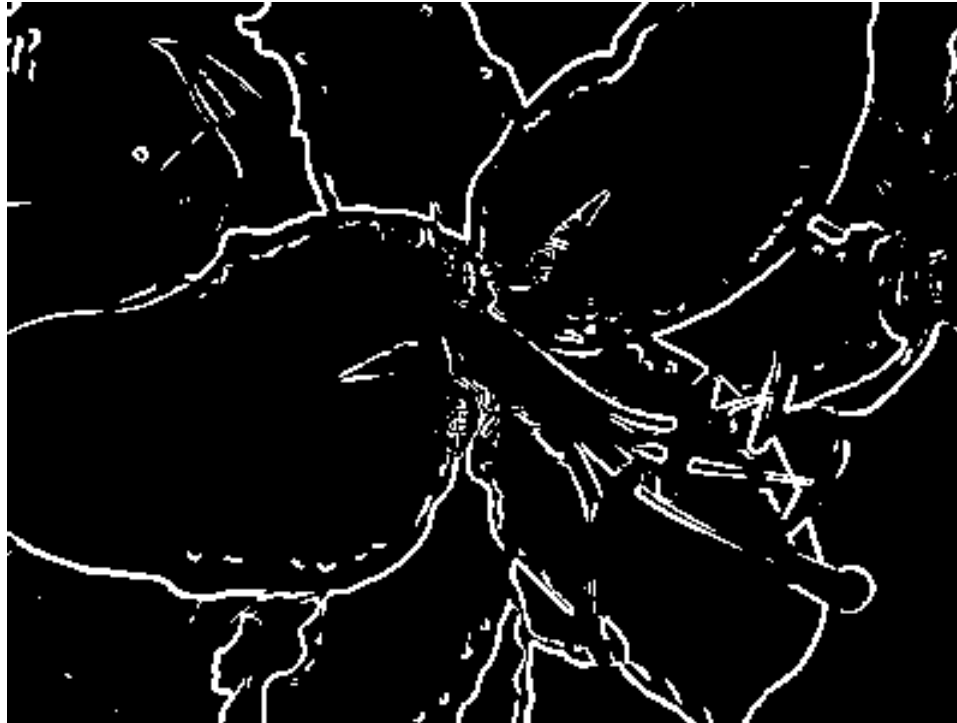
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke: $t=64$



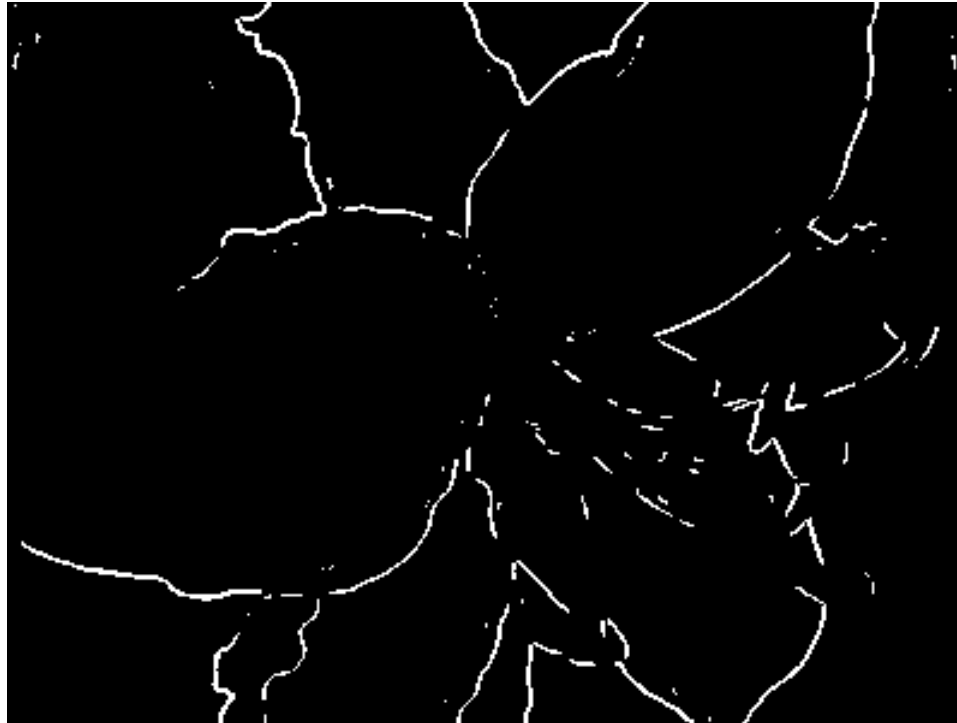
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke: $t = 128$



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Schwellwertbinarisierung über die Kantenstärke: $t = 224$



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Grundlagen und Begriffe
- ▶ Auffinden von Kantenpunkten
 - 1. Ableitung des Bildsignals: Gradientenoperatoren
 - 2. Ableitung des Bildsignals: Laplace-Operator
 - Einseitiger Kantenfilter
- ▶ Verkettung von Kantenpunkten zu Konturen
 - Konturverfolgungs- und Konturverkettungsalgorithmen
 - Canny-Algorithmus
 - Hough-Transformation

Kantenbasierte Segmentierung

► Canny-Kanten

- Algorithmus benannt nach John Canny [Canny, 1986]
 - Good Detection: Erkennung von Kanten bei gleichzeitiger Unterdrückung von Rauschen
 - Good Localisation: Genaue Bestimmung der Position Kanten
 - „Single Response“: Pro Intensitätssprung eine einzelne Operatorantwort:
- Verfahren:
 - Verdünnung auf einen Pixel breite Konturstücke durch **Non-Maximum-Suppression**
 - Reduzieren von Lücken durch **Hysterese**

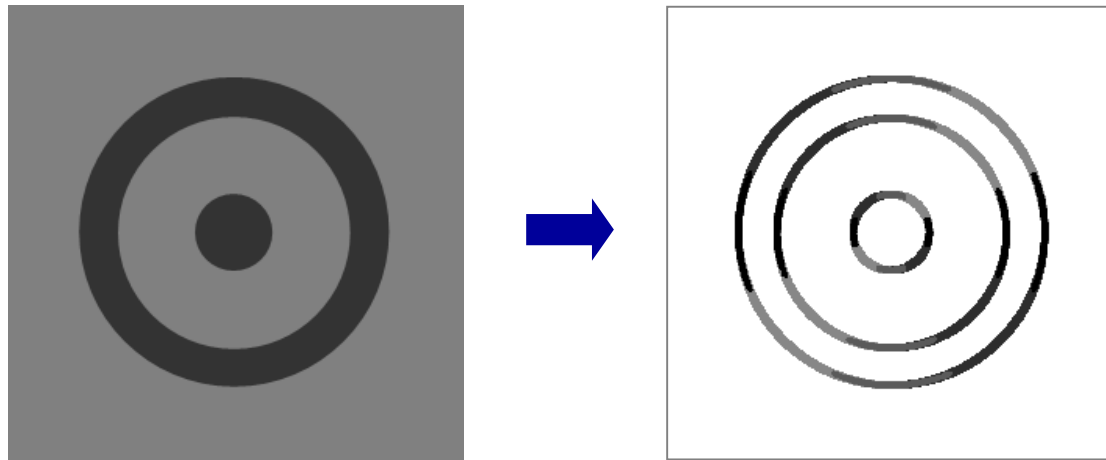
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Algorithmus Schritt 1: Glättung
 - Entfernen von Rauschen mittels Gauß-Filter
 - Je größer die Maske, desto robuster ist der Algorithmus gegen Bildrauschen
 - Beispiel 3x3 Gauß-Filter:

$$G = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix}$$

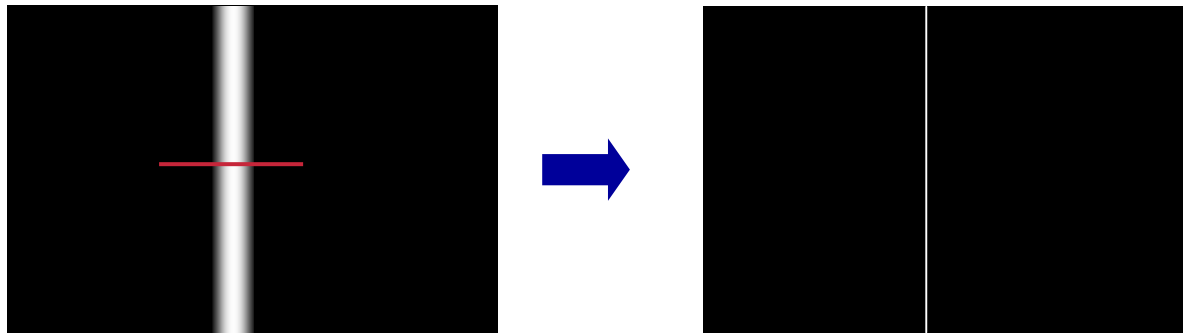
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Algorithmus Schritt 2: Kantendetektion
 - Sobel Operator zur Kantendetektion in x- und y-Richtung
 - Berechnung der Kantenstärke und des Gradienten
 - Rundung der berechneten Gradientenrichtungen auf die vier für eine Achter-Nachbarschaft relevanten Richtungen 0° , 45° , 90° und 135°



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Algorithmus Schritt 3: Non-Maximum-Suppression
 - Bestimmung lokaler Maxima erzeugt 1 Pixel breite Kanten
 - Prüfe für jeden Kantenpunkt, ob einer der beiden Nachbarn in seiner Gradientenrichtung eine größere Kantenstärke hat
 - Falls ja, wird der geprüfte Kantenpunkt verworfen
 - Beispiel: Senkrechte Kante mit Gradient (rot): Erhalten bleiben nur die stärksten Kantenpunkte entlang des Gradienten



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Algorithmus Schritt 4: Hysterese
 - Binarisierung mit zwei Schwellwerten $th1$ und $th2$ mit $th1 < th2$
 - $Stärke > th2$: sicherer Kantenpunkt
 - $Stärke < th1$: Kantenpunkt verwerfen
 - $th1 \leq Stärke \leq th2$: fragwürdiger Kantenpunkt
 - Je größer der Wert für $th1$, desto mehr schwache Kanten werden unterdrückt, da sie zu Beginn bereits verworfen werden
 - Je größer der Wert für $th2$, desto weniger sichere Kantenpunkte gibt es und desto häufiger kann es trotz Hysterese zu Unterbrechungen im Kantenverlauf kommen

Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Kanten Schritt 4: Hysterese (2)
 - Prüfen der fragwürdigen Kantenpunkte
 - Beginne bei einem sicheren Kantenpunkt
 - Finde die beiden benachbarten Punkte in Kantenrichtung
 - Stärke Nachbarpunkt $> th1$: neuer sicherer Kantenpunkt
 - Fahre fort, bis keine neuen Punkte mehr hinzukommen
 - Fazit: Fragwürdige Punkte, die nicht auf den so entstehenden Pfaden liegen, werden verworfen
 - Erhöhung der Toleranz durch Verwendung zweier Schwellen
- ▶ OpenCV Canny Operator: `cvCanny` mit den Parametern Schwellwerte *th1* und *th2* und Operatorgröße des Sobel Operators

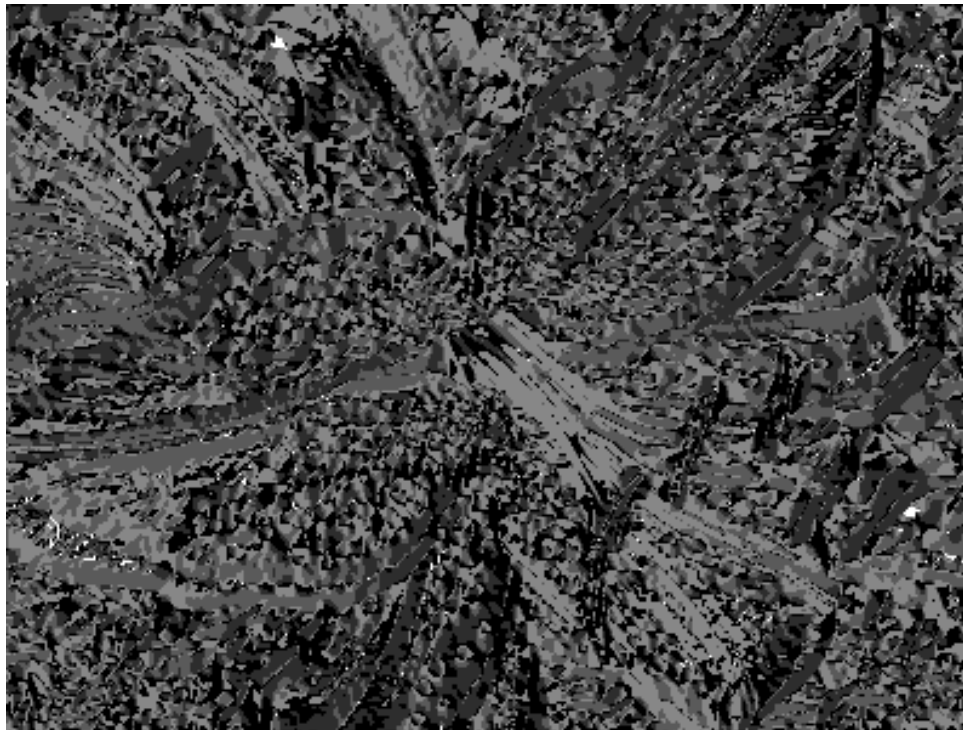
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Originalbild



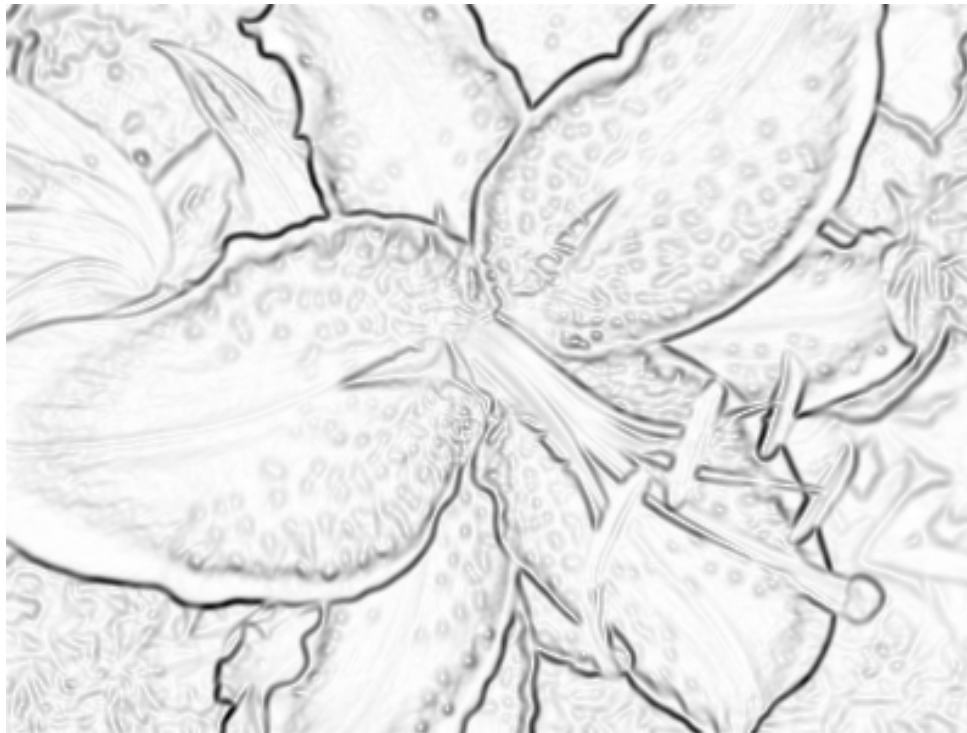
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Kodierung der Gradientenrichtung



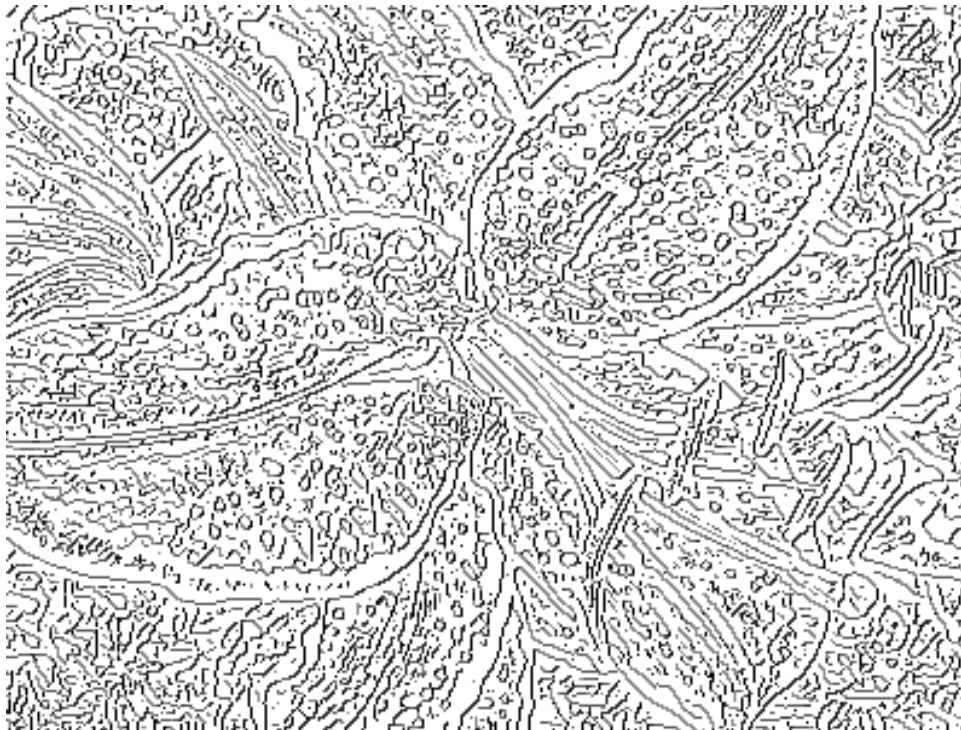
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Magnitudenbild Sobel 3x3, invertiert



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Ergebnis der Non-Maximum-Suppression



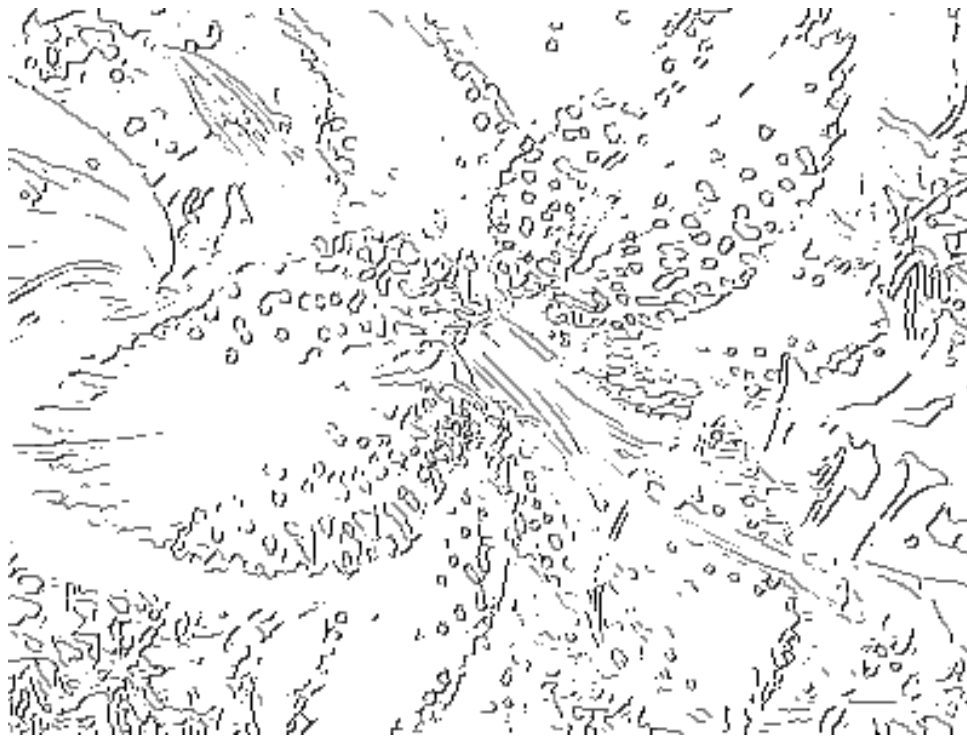
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Sichere Kantenpunkte, $th1=10$, $th2=200$



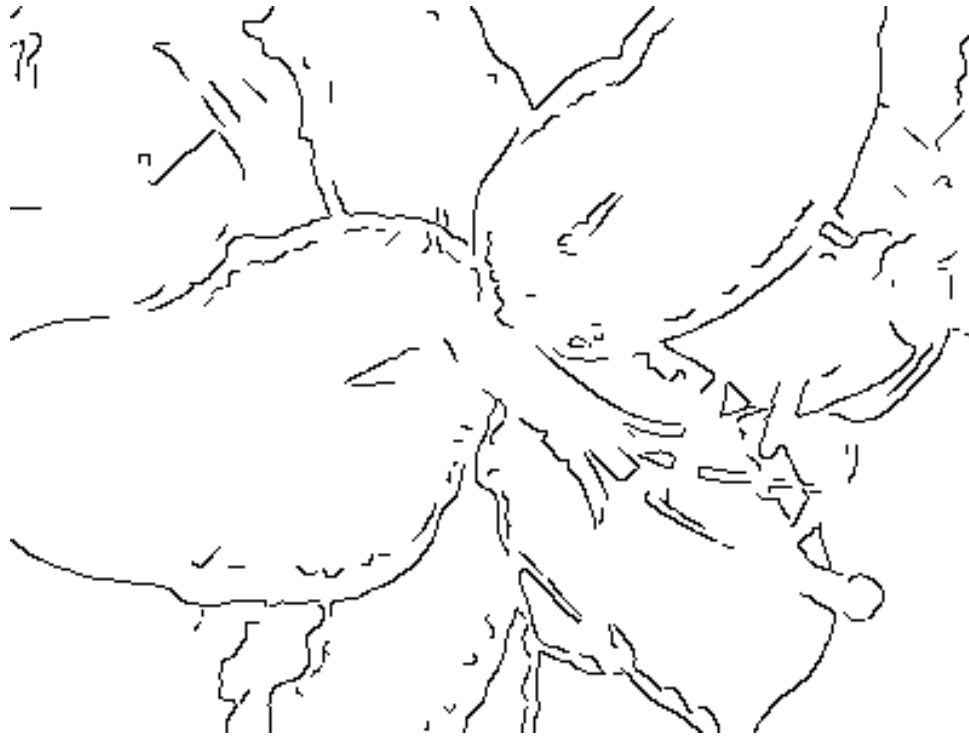
Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Fragwürdige Kantenpunkte, $th1=10$, $th2=200$



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Beispiel Canny-Kanten: Ergebnis der Hysterese, $th1=10$, $th2=200$



Kantenbasierte Segmentierung

- ▶ Canny-Algorithmus: Ergebnis
 - Kanten von einem Pixel Breite
 - Zumindest teilweise zu Kontursegmenten zusammengefügt
- ▶ Bewertung
 - Sinnvolle Wahl der Schwellen auch hier entscheidend
 - Gewonnene Kantenpunkte und Konturstücke können als Basis für Konturvervollständigung genutzt werden
 - Z. B. Hough-Transformation
- ▶ Literatur:
 - J. Canny, A Computational Approach to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986.