

# Die Korrespondenzanalyse

**Vorwissen:** Das Ziel der statischen Stereoanalyse ist die Bestimmung von Tiefeninformationen aufgrund geometrischer Beziehungen.

## Ablauf der Stereoanalyse:

**Bildaufnahme:**



**Kameramodellierung:**



**Merkmalsextraktion**



**Korrespondenzanalyse:**



**Tiefenwertbestimmung:**



**Interpolation:**

## Grundidee der Korrespondenzanalyse:

Vergleichen von Pixeln eines Bildes mit Pixeln eines anderen Bildes, unter bestimmten Kriterien. Um so mehr gleiche Paare ( *Korrespondierende Pixel* ) gefunden werden, um so besser können Tiefenwerte ermittelt werden.

## Bekannte Einschränkungsverfahren:

1. Epipolare Geometrie
2. Eindeutigkeit der Zuordnung
3. Verträglichkeit von Intensitätswerten
4. Geometrische Ähnlichkeit der Merkmale (*Winkelkriterium, Längenkriterium*)
5. Kontinuität der Disparitäten
6. Die Verträglichkeit von Merkmalen
7. Das Disparitätslimit
8. Das Disparitätsgradientenlimit
9. Reihenfolge der Punkte in den Bildern.

# 1. Intensitätsbasierte Korrespondenzanalyse:

Hier wird die Annahme getroffen, daß korrespondierende Pixel einen ähnlichen **Intensitätswert** besitzen (*photometric compatibility constraint*).

**Voraussetzung:** Standardstereogeometrie

**Problem:** Es gibt in der Regel eine große Anzahl identischer Intensitätswerte in einem Bild.

**Lösung:** Unterteilung in Blöcke (z.B. 8x8). Die Zuordnung zwischen den Pixeln erfolgt anhand eines Ähnlichkeitsmaßes zwischen den Intensitätswerten der Blöcke (*area-based-stereo*).

Sobald die Blöcke zugeordnet wurden kann man das Verfahren auch auf die Pixel in diesen Blöcken anwenden. Eine Beschränkung auf bestimmte Elemente des Bildes ist natürlich auch möglich. Entscheidend für die Qualität eines solchen Algorithmus ist die Wahl der Fenstergröße (*Blöcke*), sowie das verwendete Ähnlichkeitsmaß.

**Algorithmen:** 1.1 Shirai-Algorithmus (kurz)

1.2. Block-Matching-Verfahren

1.3. Block-Matching-Verfahren + Pixelselektionsverfahren

1.4. Block-Matching-Verfahren für die Farbstereoanalyse

## 1.1 Shirai-Algorithmus

1. Alle Kanten in einem der beiden Bilder extrahieren. (z.B. über Laplace of Gaussian - Operator)
2. Die Pixel entlang der Kanten anhand eines Ähnlichkeitsmaßes zuordnen.
3. Ergebnis ist eine Disparitätenkarte, die Einträge für zugeordnete pixel entlang der Kanten enthält.

## 1.2 Block-Matching-Verfahren

Hier wird der **Ähnlichkeitsvergleich** von Grauwertverteilungen zwischen zwei gleich großen Pixelmatrizen ( $n \times m$ ) durchgeführt.

Wichtige Annahme ist, daß alle Pixel der Matrix gleichen Disparitätswert besitzen.

Somit muß für jeden Block nur ein Disparitätswert bestimmt werden.

1. Aufteilung eines Bildes (z.B. das Rechte) in eine konstante Anzahl von gleich großen Blöcken
2. Festlegung des Maßes für Ähnlichkeit zweier Blöcke (z.B. durch die mittlere quadratische Abweichung **MSE** (*mean square error*)) zwischen den Intensitätswerten der Pixel innerhalb der entsprechenden Blöcke.

$$MSE(x, y, \Delta) = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} |E_R(x+i, y+j) - E_L(x+i+\Delta, y+j)|^2$$

$E$  = Intensitätsfunktion  
 $(x,y)$  = linke obere Ecke  
eines Blockes

3. Suche nach **korrespondierenden Blöcken** im linken Bild. Der Suchbereich wird durch ein **Disparitätslimit** beschränkt ( $d_{\max}$ ). In diesem Zulässigen Bereich wird die Matrix Spaltenweise von links nach rechts durch Erhöhung des **Offsets**  $\Delta$  verschoben
4. Für die Korrespondenz wird das **Blockpaar** ermittelt, welches die **geringste Abweichung** besitzt
5. Man ermittelt die **Disparität D** als den Spaltenabstand der korrespondierenden Blöcke. Diese Disparität wird jedoch noch einmal mit den Disparitäten der Nachbarblöcke verglichen und bei entsprechender Abweichung korrigiert (*Kontinuitätskriterium von Disparitäten*)

### 1.3. Block-Matching-Verfahren + Pixelselektionsverfahren

Das Ergebnis der Anwendung des Block-Matching-Verfahren ist eine **Disparitätenmatrix**, in der jeweils Blöcke fester Größe ein identischen Wert besitzen.

Unter Verwendung eines Pixelselektionsverfahrens läßt sich diese Ergebnis weiter verfeinern, so daß für jedes Pixel ein Disparitätswert angegeben werden kann.

Das Verfahren von T.Reuter (1987) setzt sich aus drei Verarbeitungsschritten zusammen:

**1. Anwendung des Medianoperators** auf die Disparitätswerte der Blöcke.

\* Disparitätsausreißer werden bereinigt.

**2. Pixelselektion**

\* eines Blockes unter Verwendung der Disparitätswerte des Blockes und der benachbarten Blöcke.

\* Für die Bestimmung der Disparität eines einzelnen Pixels an der Position  $(x', y')$  werden die Differenzen **DIFF** $(x', y')$  und den Intensitätswerten des linken Bildes an den Positionen  $(x' + D(k), y')$  für alle Disparitäten  $D(k)$  ( $1 < k < n*m$ ) aus der  $n \times m$ -Blockumgebung gebildet.

$$\text{DIFF}(k) = | E_R(x',y') - E_L(x'+D(k),y') |$$

Der Disparitätswert des Pixels  $(x', y')$  ergibt sich durch das **Minimum** der errechneten  $n*m$  DIFF(k)'s.

**3. Anwendung des Medianoperators** auf die Disparitätswerte, die für jedes einzelne Pixel bestimmt wurde.



Dies sind die beiden Stereobilder BEETHOVEN (752x566 Pixel)



Grauwertkodierte dichte Disparitätenkarte



Gitterdarstellung der mittels dieser Disparitätenkarte rekonstruierte Szene.

## 1.4 Block-Matching-Verfahren für die Farbstereoanalyse

1. Wahl eines **geeigneten Farbraums**, bzw Koordinatensystems.

\* hier wird der RGB-Raum vorgestellt.

2. Differenzen zwischen zwei Farben im Raum beschreibbar machen.

\* RGB ist ein euklidischer Raum => **Abstandsmaße für die Farbdifferenz** :

$$D_1(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2) = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + (g_1 - g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$\mathbf{F}_1 = (r_1, g_1, b_1)$$

$$\mathbf{F}_2 = (r_2, g_2, b_2)$$

r,g,b sind durch Intensität normierte  
Farbwertanteile

3. weitere Ablauf wie bei Block-Matching-Verfahren, nur daß mit Farbabstand  $D_1$  die  $MSE_{\text{Farbe}}(x,y, \Delta)$  berechnet wird, also

Der Farbabstand  $D_1$  repräsentiert den Winkel zwischen Farbvektoren  $\mathbf{F}_1$  und  $\mathbf{F}_2$

statt  $|E_R(x+i,y+j) - E_L(x+i+\Delta,y+j)|^2$  wird

$$[(r_R(x+i,y+j) - r_L(x+i+\Delta,y+j))^2 + (g_R(x+i,y+j) - g_L(x+i+\Delta,y+j))^2 + (b_R(x+i,y+j) - b_L(x+i+\Delta,y+j))^2]^{1/2}$$

eingesetzt.

Wenn statt  $D_1$   $D_3$  benutzt wird, welches eine Approximation von  $D_1$  ist, mit:

$$D_3(\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2) = |r_1 - r_2|^2 + |g_1 - g_2|^2 + |b_1 - b_2|^2, \text{ dann wird}$$

statt  $|E_R(x+i,y+j) - E_L(x+i+\Delta,y+j)|^2$

$$[|(r_R(x+i,y+j) - r_L(x+i+\Delta,y+j))|^2 + |(g_R(x+i,y+j) - g_L(x+i+\Delta,y+j))|^2 + |(b_R(x+i,y+j) - b_L(x+i+\Delta,y+j))|^2]$$

eingesetzt.

4. Wenn auch hier Pixelbetrachtung durchführen werden soll, dann genauso wie beim Pixelselektionsverfahren (*siehe 1.3*), aber hier muß zusätzlich das **Farbabstandsmaß** berücksichtigt werden.

Die Verbesserung der Zuordnungsergebnisse hängen von der Anzahl von Farben ab.

Vorteil: \* durchschnittlich 25% weniger falsch berechnete Disparitätswerte  
\* erzielt meist viel bessere Qualität

Nachteil: \* verbraucht mehr Rechenzeit und mehr Speicherplatz (*heutzutage weniger relevant*)

## 2. Merkmalsbasierte Korrespondenzanalyse

Die Korrespondenzanalyse wird zwischen ausgewählten Bildmerkmalen durchgeführt. (*feature-based stereo*)  
Die Zuordnung geschieht anhand von Eigenschaften der Merkmale.

**Voraussetzung:** Standardstereogeometrie.

**Vorteile** gegenüber intensitätsbasierten Verfahren:

1. weniger Mehrdeutigkeiten, da Korrespondenzkandidaten seltener sind.
2. Stereozuordnung ist weniger sensitiv bezüglich der photometrischen Variation bei der Bildgenerierung, da die Merkmale Eigenschaften der Szene repräsentieren.
3. Bestimmung der Disparitäten kann wesentlich genauer erfolgen, da die Position mit Subpixelgenauigkeit berechnet werden kann.

**Algorithmen:** 2.1 histogrammbasierte Stereoanalyse  
2.2. Merkmalsbasierte Farbstereoanalyse

### 2.1 histogrammbasierte Stereoanalyse

Das Verfahren verwendet Histogramme der Disparitäten in mehreren Auflösungsstufen.

Die Zuordnung erfolgt über mehrere Auflösungsstufen, wobei für jede Zuordnung eine "Beste" Auflösungsstufe (*channel, Kanal*) ermittelt wird.

Als Ähnlichkeitsmaß dienen Histogramme, die die Häufigkeit der auftretenden Disparitätswerte in der Umgebung eines Korrespondenzkandidaten widerspiegeln.

1. Mit Hilfe des LoG-Operators werden die markanten Merkmale in beiden Bildern ausfindig gemacht.  
Auflösungsstufen : ( $\sigma = 1,41, \sigma = 3,18, \sigma = 6,01$ ).

Beim **LoG-Operator** kennzeichnen die Nulldurchgänge ein Merkmal an der Stelle  $P(i,j)$ .

Zwei Merkmale können miteinander korrespondieren, wenn die Winkel des Merkmals (meist Linien) beim Durchstoßen der Nulllinie um weniger als  $30^\circ$  differieren. (**Winkelkriterium**)

Mit diesen Informationen wird nun für jedes Bild eine Zuordnungsfunktion erstellt:

Seien die Einheitsvektoren  $e_L(i,j)$  und  $e_R(i+d,j)$  korrespondierende Nulldurchgänge,  $d = \text{Disparität}$ , dann gilt:

$$M_L(i,j;d) = 1 \text{ und } M_R(i+d,j;d) = 1$$

$$\text{Sonst: } M_L(i,j;d) = 0 \text{ und } M_R(i+d,j;d) = 0$$

2. Um die sehr aufwendige Suche nach lokalen Korrespondenzen einzuschränken, wird ein **globales Disparitätshistogramm** (GDH) erstellt.

Enthält alle in Schritt 1 ermittelten Disparitäten. (auch Falsche)

Annahme: Gesuchte Disparität befindet sich bei der größten Häufigkeit.

Sei A das gesamte Bild:

$$GDH_R(d) = \frac{\sum_{(i,j) \in A} M_R(i,j;d)}{\sum_{(i,j) \in A} |e_R(i,j)|}$$

$GDH_L$  genauso,

$GDH_L$  und  $GDH_R$  können differieren, aber unwesentlich.

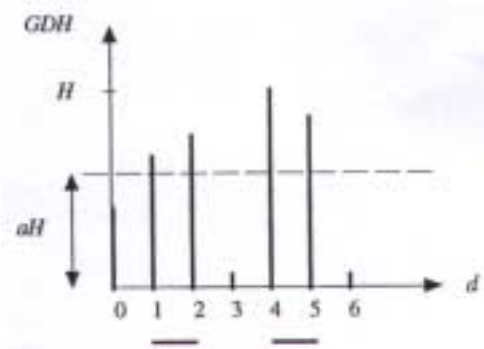
3. Disparitätskandidatenintervall wird bestimmt:

Es sei  $H$  an der Stelle  $GDH_R(d)$  der maximale Wert aller Häufungen, dann ist das Intervall

$$I_B = \{d \mid GDH_R(d) > a \cdot H\}$$

Schwellwert  $a$ :  $0 < a < 1$

$a$  so wählen, daß keine Teilintervalle auftreten.



Aufteilung des Disparitätskandidatenintervalls in Teilintervalle.

4. Jetzt werden lokale Disparitätshistogramme (LDH) erstellt, die nur noch Bildausschnitte betrachten. Für einen Punkt  $P(i,j)$  wird abhängig vom gewählten Kanal ein Fenster  $W$  der Größe

$$(N_\sigma \times N_\sigma, N_\sigma = 2^{0.5} \cdot \Pi \cdot \sigma)$$

$$LDH_X(i,j;d) = \frac{\sum_{(i,j) \in W} M_X(i,j;d)}{\sum_{(i,j) \in W} |e_X(i,j)|} \quad X = R \text{ und } X = L$$

Dieses LDH stellt wiederum eine Häufigkeitstabelle aller im Intervall  $I_B$  liegenden Disparitäten dar.

5. Nun wird für jedes Fenster ein bester Kanal bestimmt.

Dies geschieht, indem man die Differenz der beiden größten Werte im **LDH** berechnet ( $Q_X(i,j;d_X)$ ,  $X=L,R$ ) und schließlich den Kanal wählt, bei dem diese Differenz am größten ist.

In dem gewählten Kanal wird der am häufigsten aufgetretene Disparitätswert mit  $d_X$  ( $X=L,R$ ) bezeichnet.

6. Eine Zuordnung einer Korrespondenz wird genau dann festgelegt, wenn  $Q_L$  und  $Q_R$  größer sind als ein festgelegter Mindestwert und sich gleichzeitig  $d_L$  und  $d_R$  nur wenig unterscheiden.

In diesem Fall errechnet sich die wahrscheinlichste Disparität  $d^* = (d_R + d_L) / 2$ .  $\Rightarrow$ (Subpixelgenauigkeit)

7. Disparitäten aller Merkmale im Fenster  $W_\sigma$ , sowie in den Fenstern  $W_{\sigma'}$  ( $\sigma' < \sigma$ ) werden ermittelt:

Seien  $d_1, \dots, d_n$  alle möglichen Disparitäten für ein Merkmal in einem Fenster, so wird  $d_k$  folgendermaßen errechnet:

$$(1) |d_k - d^*| < |d_l - d^*| \text{ für alle } 1 \leq l \leq n, l \neq k$$

$$(2) |d_k - d^*| < d_C, \quad d_C = \text{definierter Schwellwert}$$

Zuordnung möglich:  $\Rightarrow$  der Wert wird aus Merkmalsmenge eliminiert.

Zuordnung nicht möglich:  $\Rightarrow$  Neuer Versuch erst in der nächsten Iteration.

Der Vorgang wird in diesem Fenster für alle Auflösungen durchgeführt.

Scheitert die Zuordnung, so startet der Algorithmus wieder bei Schritt 2, der Erstellung des GDH, jedoch mit einer verringerten Merkmalsliste.

- Verfahren ist beendet, wenn keine neuen Zuordnungen mehr gefunden wurden oder alle Merkmale zugeordnet wurden

## 2.2 Merkmalsbasierte Farbstereoanalyse

merkmalsbasierte Stereoanalyse + Auswertung von Farbinformation

90% aller Kanten sind im Grauwert- und Farbbildern identisch.

Ausnahme: gleiche Helligkeit, aber unterschiedliche Bunttöne.

=> Verbesserung der Kantendetektierung.

=> Reduzierung der Mehrdeutigkeiten.

**Voraussetzung:** Standardstereogeometrie.

### Merkmalerkennung durch:

Nulldurchgänge der LoG-gefilterte Stereobilder mit  $\sigma = 1,41$

max Disparitätswert ( $d_{\max}$ ) von 20% der Bildbreite (*Disparitätslimit*)

**Kriterien** für die Auswahl von Zuordnungskandidaten im rechten Bild, ausgehend von einem Nulldurchgang in linken Bild:

- Der Nulldurchgang des rechten Bildes liegt innerhalb des Suchbereichs
- Er hat das gleiche Kontrastvorzeichen (*Verträglichkeitsannahme für Intensitätswerte*)
- Hat ungefähre Orientierung ( $\pm 30^\circ$ ), wie der Nulldurchgang im linken Bild (*Winkelkriterium*)
- Vorzeichen der Differenzgradienten sind für jedes normierte Differenzspektrum für beide Kandidaten gleich

Nach Zuordnung von allen widerspruchsfreien Zuordnungskandidaten, werden die restlichen verworfen.

weitere Verfeinerung durch Ausnutzung der Farbinformation

z.B. Die Farbinformation wird zur Charakterisierung der Nulldurchgänge im Grauwertbild verwendet

- \* Farbart (Bunton und Sättigung) eines Bildpunktes
- \* Bildwertkanten besitzen keine Farbart, => Hinweis auf Änderung der Farbart
- \* => Verwendung von Farbgradienten
- \* Verwendung von normierten Farbwertanteilen (r,g,b)
- \* mit Einbindung in drei normierten Differenzspektren ( $D_{rg}$ ,  $D_{gb}$ ,  $D_{br}$ )

$$D_{rg}(x, y) = r(x, y) - g(x, y) = \frac{R(x, y) - G(x, y)}{R(x, y) + G(x, y) + B(x, y)}$$

- \* Der Gradient des Diffenzspektrums beschreibt die Art und Richtung an jedem Nulldurchgang, in der dieses Spektrum am stärksten variiert.
- \* Vorzeichen und Orientierung können als Attribute des Gradienten benutzt werden.
- \* Das Vorzeichen des Diffenzfarbgradienten wird definiert durch das Vorzeichen der Richtungsvariation entlang der horizontalen Linien.

$$\frac{\partial}{\partial x}(GAUSS * D_{rg}) = \left( \frac{\partial}{\partial x} GAUSS \right) * D_{rg}$$

- \* wobei GAUSS(x,y, $\sigma$ ) die Gauß-Funktion und \* die Faltungsoperation bezeichnet
- \* pos. Vorz. => rel. Intensitätsanstieg von Rot nach Grün
- \* Orientierung des Differenzfarbgradienten:

$$\tan^{-1} \left( \frac{\frac{\partial}{\partial y}(GAUSS * D_{rg})}{\frac{\partial}{\partial x}(GAUSS * D_{rg})} \right)$$

## **Ergebnisauswertung:**

Sobald die Korrespondenzanalyse erfolgreich durchgeführt und die daraus resultierende Disparitätenkarte erstellt wurde, kann unter Zuhilfenahme bekannter Parameter der Stereogeometrie durch Triangulation die Position der Pixel einer entsprechende Tiefe zugeordnet werden. Dadurch entsteht eine dazupassende Struktur der Szene.

## Quellen:

- [1] [Klette et al. 96] Klette, Reinhard; Koschan, Andreas; Schlüns, Karsten (1996): Computer Vision – Räumliche Information aus digitalen Bildern; 1.Auflage; Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag
- [2] Multi-View-Geometrie in 3D Vision; Dr.-Ing. Oliver Schreer: Das Korrespondenzproblem in der Stereoanalyse

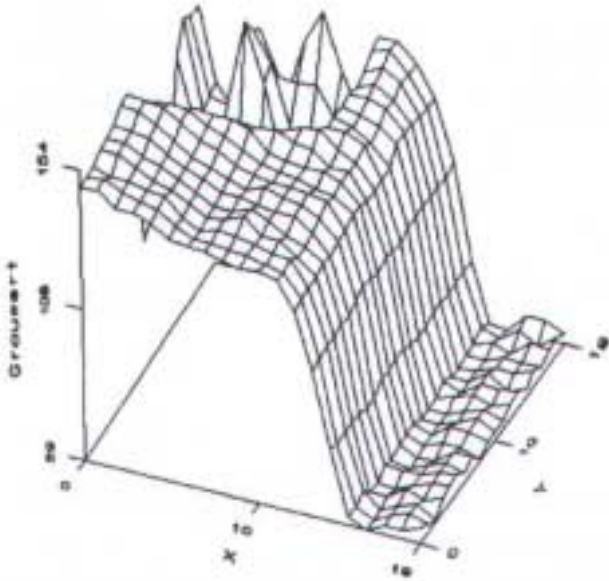
## Anhang:

Kurze Erläuterung zum LoG-Operator

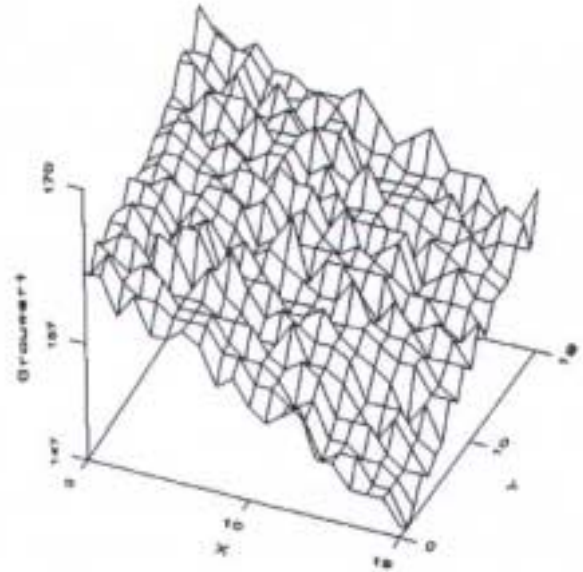


# Rückblick zum LoG-Operator zur Kantenfindung

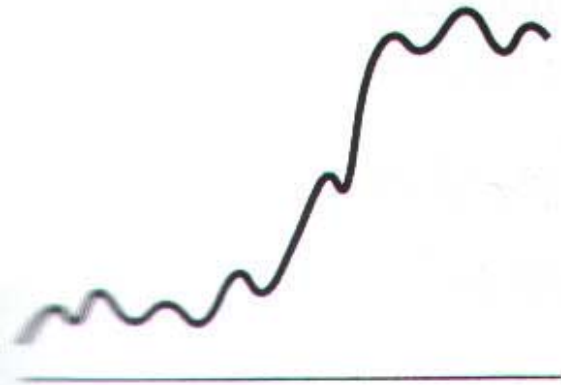
Grauwertverteilung an einer Kante



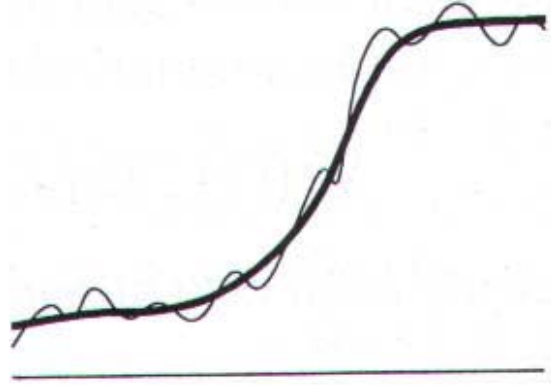
Grauwertverteilung auf planaren Objekt



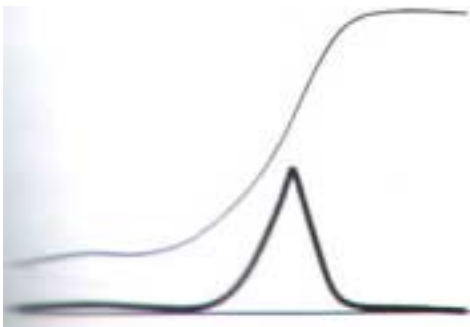
Eingabe mit Störung



Eingabe ohne Störung (Gauß-geglättet)



erste Ableitung



zweite Ableitung

