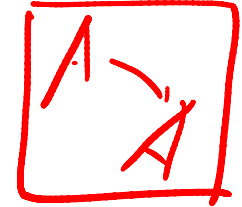
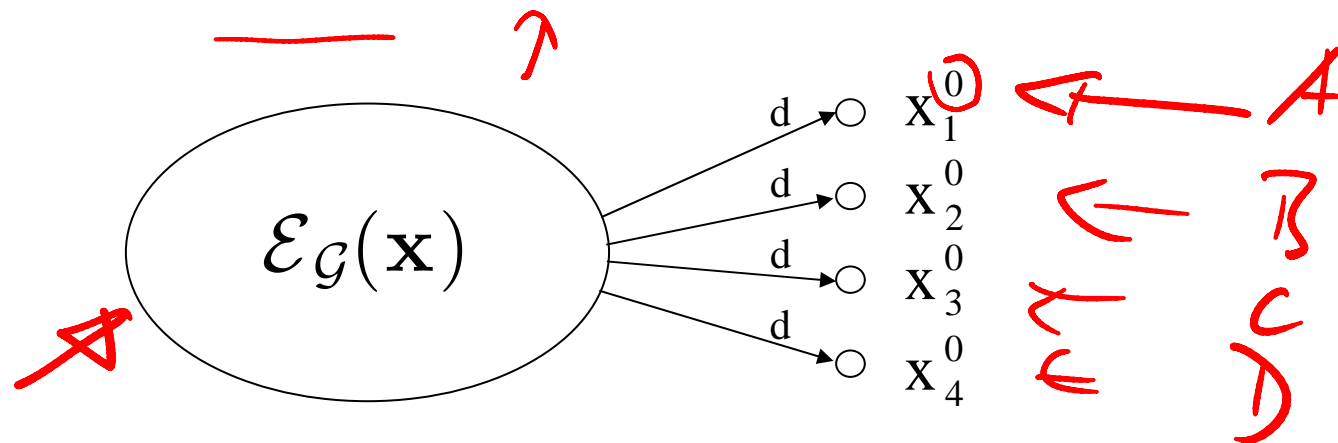


# Klassifikation durch direkten Vergleich (Matching)



Eine triviale Lösung für die Klassifikation ergibt sich durch direkten Vergleich des unbekanntes Musters in allen Erscheinungsformen der Äquivalenzklasse (Schablonenvergleich) gemäß einer Metrik  $d$  (Maß für die Klassenzugehörigkeit) mit den Prototypen einer Klasse (Bsp.: Holzpuzzle)

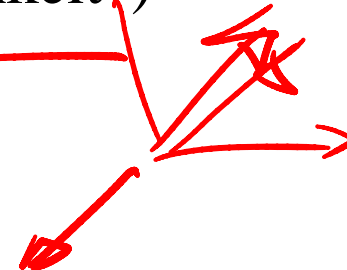
Äquivalenzklasse:  $\mathcal{E}_{\mathcal{G}}(\mathbf{x}) := \{g_i(\mathbf{x}) \mid \forall g_i \in \mathcal{G}\}$



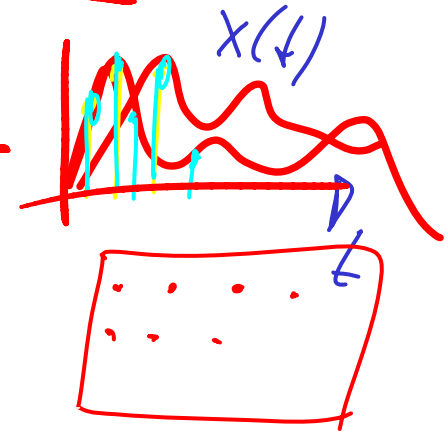
Einführung einer Metrik  $d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  für den Vergleich in unitären oder Innenprodukträumen (oder allgemeiner in Hilbert-Räumen):  
 eine Metrik wird über das Innen- oder Skalarprodukt induziert

$$\begin{aligned}
 d(\mathcal{E}_g(\mathbf{x}), \mathbf{x}_j^0) &= \|\mathcal{E}_g(\mathbf{x}) - \mathbf{x}_j^0\| = \langle \mathcal{E}_g(\mathbf{x}) - \mathbf{x}_j^0, \mathcal{E}_g(\mathbf{x}) - \mathbf{x}_j^0 \rangle^{1/2} \\
 &= \sqrt{\|\mathcal{E}_g(\mathbf{x})\|^2 + \|\mathbf{x}_j^0\|^2 - 2 \langle \mathcal{E}_g(\mathbf{x}), \mathbf{x}_j^0 \rangle} = d_j(\mathbf{x}(\mathbf{p}), \mathbf{x}_j^0) \quad \text{für } \forall \mathbf{p}
 \end{aligned}$$

Aus einem kleinsten Abstand resultiert ein größtes Innenprodukt bei normierten Vektoren (Maß für „Ähnlichkeit“)



# Skalarprodukte für kontinuierliche und digitalisierte Muster:



Kontinuierliche Muster:

✓ 1D:  $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \int x(t)y(t)dt$

2D:  $\langle \mathbf{X}, \mathbf{Y} \rangle = \iint X(t_1, t_2)Y(t_1, t_2)dt_1 dt_2$

Digitalisierte Muster:

→ 1D:  $\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \sum x_i y_i$

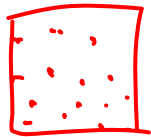
→ 2D:  $\langle \mathbf{X}, \mathbf{Y} \rangle = \sum \sum X_{i,j} Y_{i,j}$

Berechnung des Skalarproduktes über den gesamten Parameterraum  $\{\mathbf{p}\}$  der Bewegungsgruppe entspricht der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktion  $R_{x,y}$

$$\langle \mathcal{E}_g(\mathbf{x}), \mathbf{x}_j^0 \rangle = \langle \mathbf{x}(\mathbf{p}), \mathbf{x}_j^0 \rangle = R_{\mathbf{x}(\mathbf{p}), \mathbf{x}_j^0} \quad \text{für } \forall \mathbf{p}$$

$\begin{bmatrix} z_x \\ z_y \\ \varphi \end{bmatrix}$   
 $p$

z.Bsp. Translation bei Bildern der Dimension  $N \times N$  ergibt sich ein Aufwand, der proportional ist zu:



$$\underbrace{N^2}_{\text{Skalarprodukt}} \cdot \underbrace{N^2}_{\text{zykl. Permut.}} = \underbrace{N^4}$$

Die Korrelation lässt sich mit der schnellen Fouriertransformation effizienter berechnen, nämlich mit einem Aufwand von  $O(N^2 \ln N)$  gemäß (siehe DBV-I):

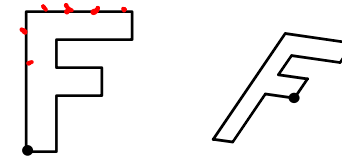
$$\rightarrow R_{x,y} = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathcal{F}^*(\mathbf{y}))$$

Berechnung des Skalarproduktes über den gesamten Parameterraum  $\{\mathbf{p}\}$   
der Bewegungsgruppe hat im allgemeinen für ein Signal oder Bild der  
Dimension  $N$  einen Aufwand von:

$$O(\underbrace{N}_{\substack{\uparrow \\ \text{Aufwand für} \\ \text{ein Skalarprodukt}}} \cdot \underbrace{N^{\dim(\mathbf{p})}}_{\substack{\uparrow \\ \text{Größe der} \\ \text{Äquivalenzklasse}}})$$

Hierbei geht man davon aus, dass man jede Achse des Parameterraumes mit der Bilddimension auflöst, also z.B.  $N$  Translationen.

# Affin-invariante Erkennung mit Korrelation in allen Parametern (matched Filter)



Gegeben: Kontur mit  $N$  Punkten

→  $O(N \times N^{\dim(\mathbf{p})}) = O(N^8)$  ops mit  $\dim(\mathbf{p})$ : Freiheitsgrade  
e.g.  $N = 10^3 \Rightarrow \underline{\square 10^{24}}$  ops

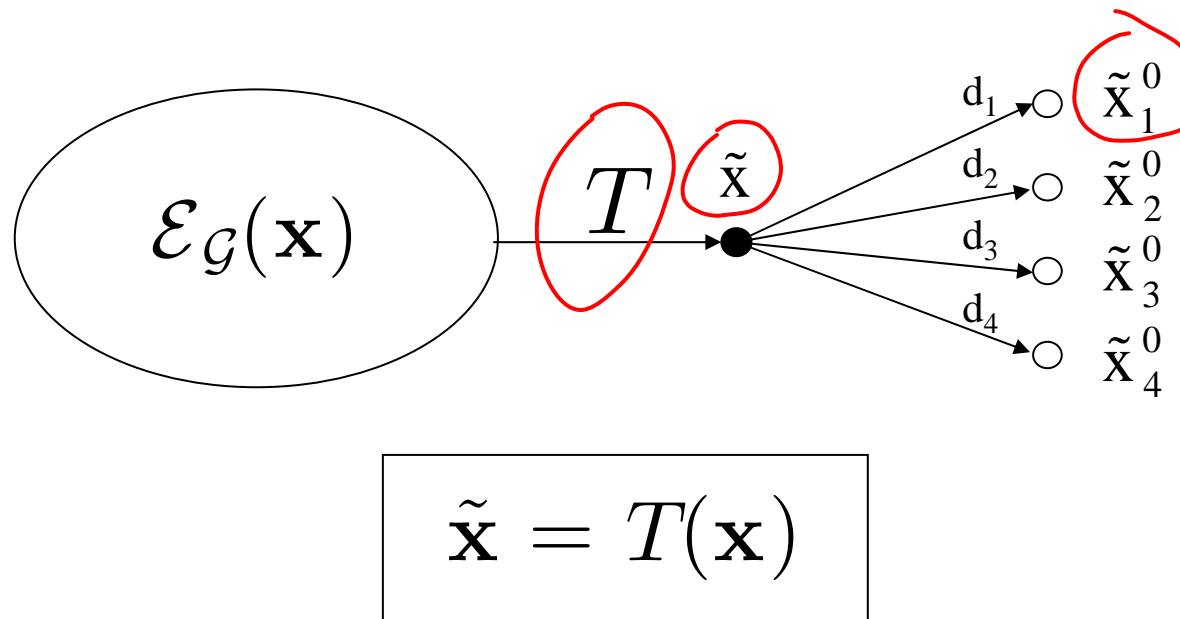
Annahme: 100 MIPS-Maschine (multiply-add)

$$\Rightarrow \square \left( \frac{10^{24} \text{ ops}}{10^8 \text{ ops/sec}} \right) = \underline{10^{16} \text{ sek}} = \underline{3.2 \times 10^8 \text{ Jahre}}$$

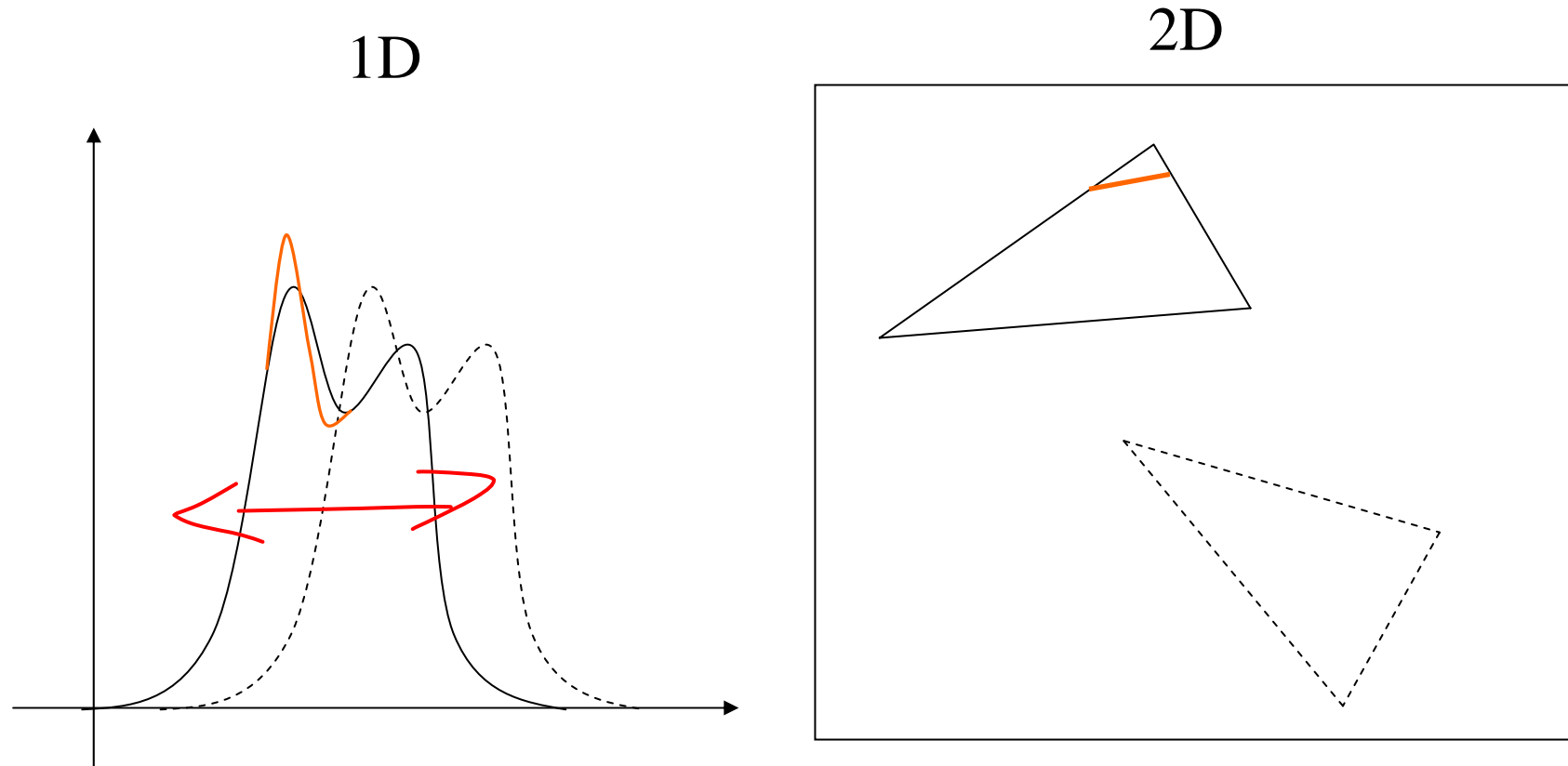
Alter des Kosmos:  $5 \times 10^9$  Jahre

# Klassifikation mit invarianten Merkmalen:

Extraktion lageinvarianter Merkmale, anschließend  
Klassifikation im Merkmalsraum:



# Relevante and irrelevante Änderungen in Signalen und Bildern



Idee: entferne alle irrelevante Änderungen mit Hilfe einer mathematischen Transformation T und verwende nur invariante Merkmale



# Notwendige Bedingung für die Invarianz einer Abbildung $T$ :

1) Notwendige Bedingung für die Invarianz bezüglich der Gruppenwirkung  $\mathcal{G}$ :

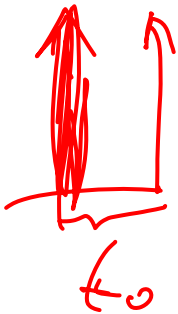
$$\mathbf{x}_1 \stackrel{\mathcal{G}}{\sim} \mathbf{x}_2 \Rightarrow T(\mathbf{x}_1) = \tilde{\mathbf{x}}_1 = \tilde{\mathbf{x}}_2 = T(\mathbf{x}_2)$$

Alle Elemente einer Äquivalenzklasse werden in einen Punkt des Merkmalsraumes abgebildet. Dies kann auch wie folgt formuliert werden:

$$T(g_i \mathbf{x}) = T(\mathbf{x}) \quad \text{für} \quad \forall g_i \in \mathcal{G}$$

# Invarianzbegriff bei zeitinvarianten Systemen

Der oben eingeführte Invarianzbegriff darf nicht verwechselt werden mit der Definition zeitinvarianter Systeme. Dort verlangt man, dass die Systemantwort auf eine verschobene Erregung bei unveränderter **Form** ebenfalls verschoben ist. Dies gilt sowohl für die Erregung mit einem  $\delta$ -Impuls, als auch für eine beliebige Erregung  $x$ . D.h.:

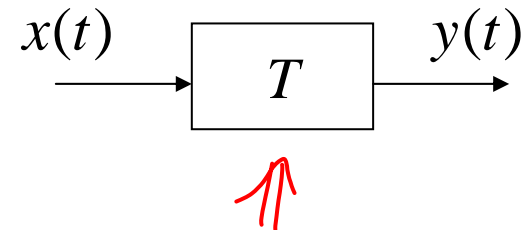


$$\delta(t) \xRightarrow{T} h(t) \quad \text{Impulsantwort}$$

$$\delta(t - t_0) \xRightarrow{T} h(t - t_0) \quad \text{verschobene Impulsantwort}$$

bzw.:

$$x(t) \xRightarrow{T} y(t)$$
$$x(t - t_0) \xRightarrow{T} y(t - t_0)$$



# Operatorhomomorphismus

Bei zeitinvarianten Systemen handelt es sich um einen Operatorhomomorphismus, d.h. es gilt:

$$T(g_i(x(t))) = g_i(T(x(t))) = g_i(y(t))$$

wobei.:  $g_i(x(t)) = x(t - t_i)$

Dies bedeutet, dass die Operationen  $g$  und  $T$  vertauscht werden dürfen!

# Vollständigkeit einer invarianten Abbildung $T$ :

2) Die Vollständigkeit ist eine hinreichende Bedingung dafür, dass aus der Gleichheit zweier Merkmalsvektoren darauf geschlossen werden darf, dass die beiden Objekte aus der gleichen Äquivalenzklasse stammen (Umkehrschluss der notwendigen Bedingung):

$$\tilde{\mathbf{x}}_1 = \tilde{\mathbf{x}}_2$$

$$T(\mathbf{x}_1) = T(\mathbf{x}_2) \Rightarrow \mathbf{x}_1 \stackrel{g}{\sim} \mathbf{x}_2$$

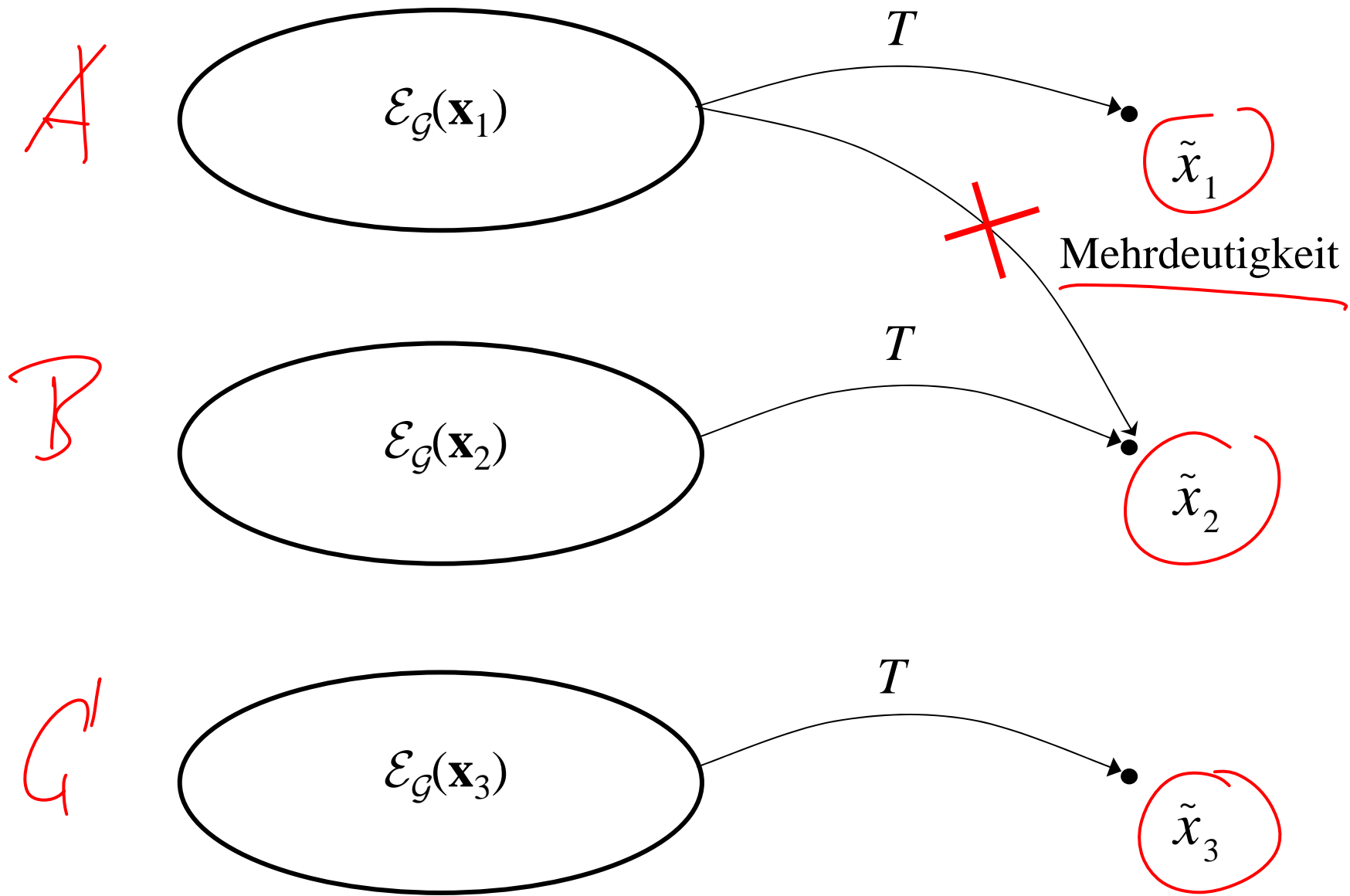
$$\mathcal{X}_0 \subset \mathcal{X}$$

↗

D.h. es gibt keine Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung von Merkmalsvektoren zu Äquivalenzklassen.

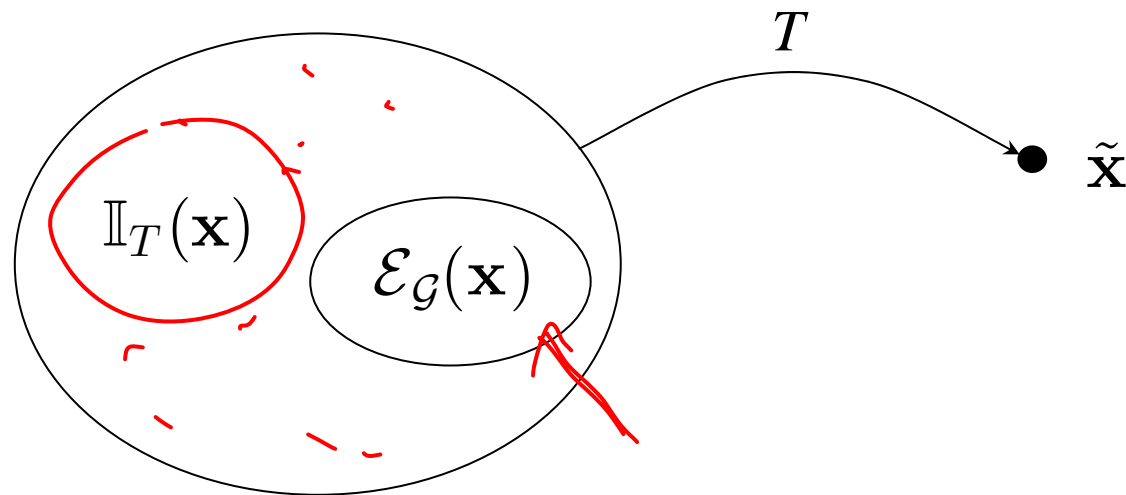
Schwächere Bedingung: Separierbarkeit (*Vollständigkeit für eine Teilmenge*)  
also z.Bsp. Für die Menge aller Buchstaben bei der Zeichenerkennung

# Abbildungseigenschaft der Transformation $T$ :



# Abbildungseigenschaften

## Maß für den Grad der Vollständigkeit




1. Definition der Invarianten einer beliebigen kontrahierenden Abbildung  $T$ :

$$\mathbb{I}_T(\mathbf{x}) := \{\mathbf{x}_i \mid T(\mathbf{x}_i) = T(\mathbf{x})\}$$



# Abbildungseigenschaften

2. Aus der notwendigen Bedingung der Invarianz folgt:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{G}}(\mathbf{x}) \subseteq \mathbb{I}_T(\mathbf{x}) \quad \text{muss Teilmenge sein!}$$


3. Aus der Vollständigkeit folgt:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{G}}(\mathbf{x}) = \mathbb{I}_T(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x} \in \mathbb{X}$$

Bei der schwächeren Forderung der Separierbarkeit gilt diese Aussage nur für eine Teilmenge  $\mathbb{X}_0$

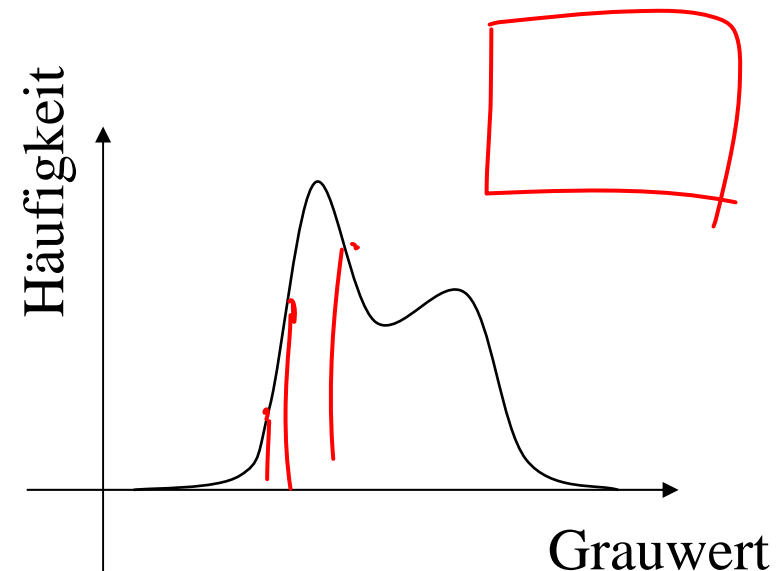
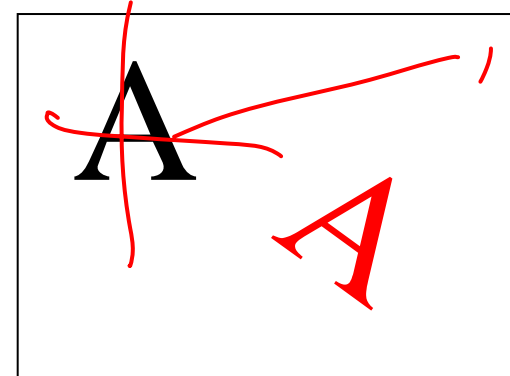
# Beispiele für lageinvariante Merkmale

1. Der Mittelwert von Bildern ist invariant bezüglich Euklidischer Bewegungen (Translation und Rotation). Jedoch: Merkmale nicht vollständig.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum \sum x_{i,j}$$

2. Das Histogramm oder die Häufigkeitsverteilung ebenso. Auch hier ist die notwendige Bedingung erfüllt, die Merkmale sind jedoch stark mehrdeutig. Man kann nämlich alle Bildpunkte beliebig permutieren, ohne das Histogramm zu verändern.

Das Histogramm ist vollständig für die symmetrische Gruppe (alle  $N!$  Permutationen).





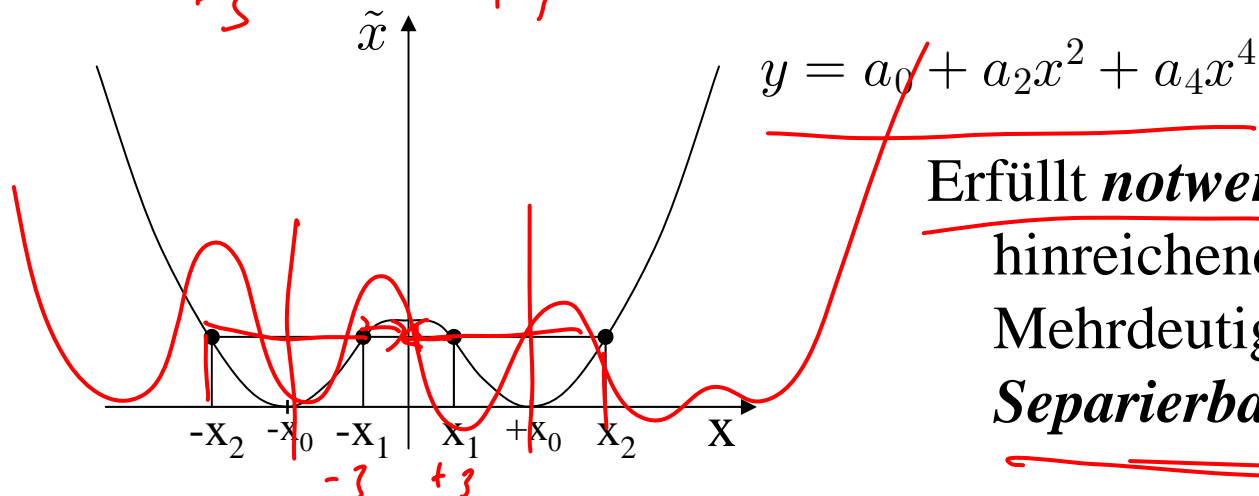
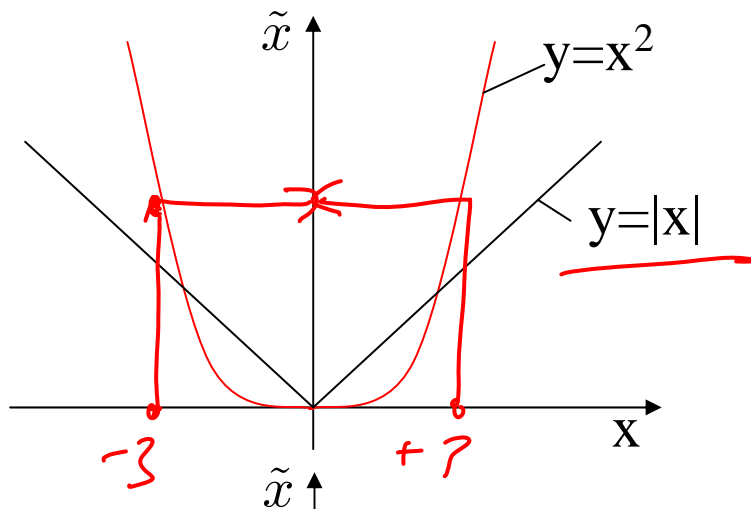
***Satz:*** Nur nichtlineare Abbildungen sind in der  
Lage von kompakten Äquivalenzklassen  
Invarianten zu bilden.

# Einfache Beispiele für invariante Abbildungen mit nichtlinearen Funktionen

Die Äquivalenzklasse wird gebildet  
auf der Basis betrags-gleicher  
Zahlen, also z.Bsp.:

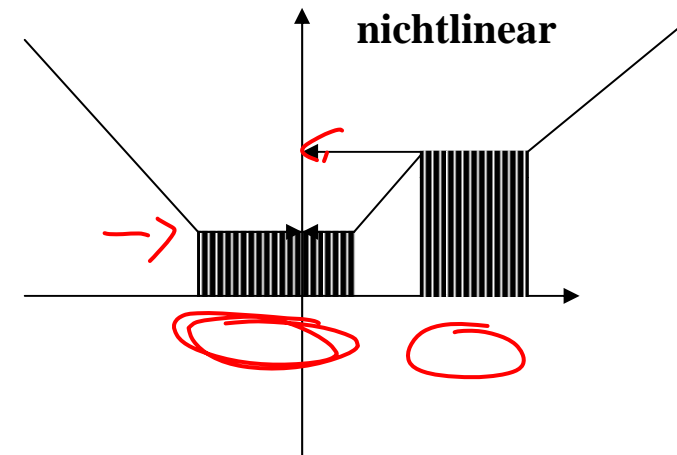
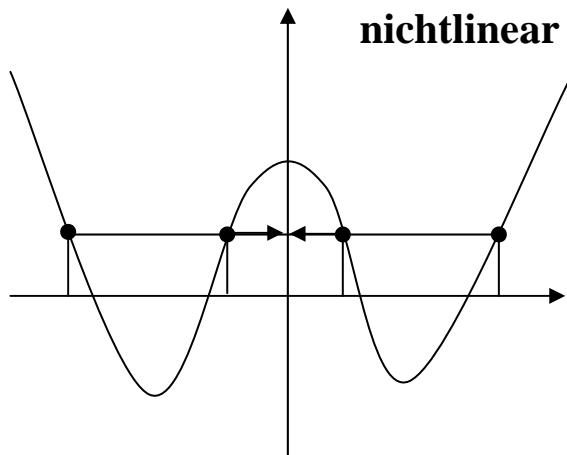
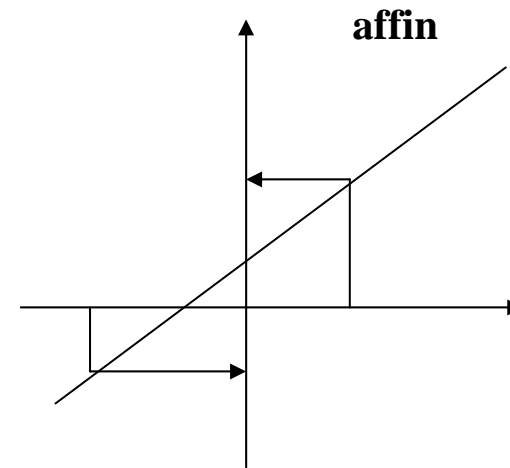
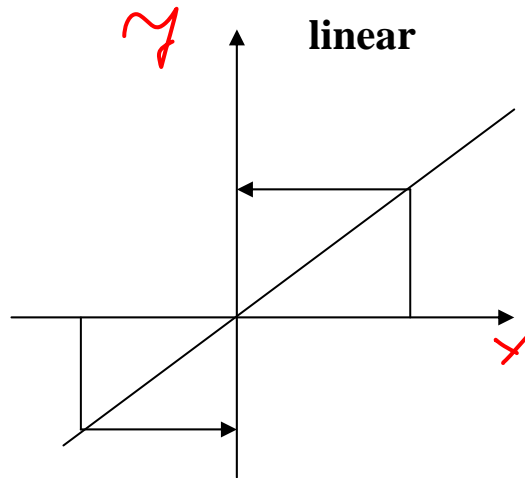
$$(-3) \stackrel{|\cdot|}{\sim} (+3)$$

Vollständige Invarianten!



Erfüllt notwendige, aber nicht  
hinreichende Bedingung;  
Mehrdeutigkeiten. Aber z.Bsp.  
Separierbarkeit für  $|x| < x_0$

# Nichtlineare Abbildungen zur Erzeugung von Invarianten



# Weitere Anforderungen an die invarianten Abbildungen

- Stetigkeit der Abbildung
- Erhaltung von Clustern
- Was passiert bei systematischen Störungen?  
(Helligkeit- und Kontrastschwankungen)

$$\mathbf{x} = k \mathbf{x}^0 + a \mathbf{u}$$

Red arrows point to  $\mathbf{x}$ ,  $k$ ,  $\mathbf{x}^0$ ,  $a$ , and  $\mathbf{u}$ .

mit :  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$

***Lineare* Systeme können diskriminieren zwischen  
"Frequenzen" oder spektralen Komponenten,**

***nichtlineare* Systeme sind in der Lage zwischen  
"Äquivalenzklassen" zu unterscheiden.**

- **Lemma:**

Gegeben sei eine lineare Abbildung  $S$ . Zwei Signale  $x_1, x_2$  können nur zueinander äquivalent sein, wenn und nur wenn die Differenz  $x_1 - x_2$  ein Element des Nullraums  $N(S)$  ist (dieser ist jedoch nicht kompakt).

- ....
- Es ist unmöglich, mit linearen Abbildungen nichttriviale kompakte Äquivalenzklassen zu realisieren!