

# Grundlagen der Mustererkennung

Prof. Dr. H. Burkhardt

Lehrstuhl für Mustererkennung und  
Bildverarbeitung

Institut für Informatik

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

# Inhalt

## 0. Vorbemerkungen

## 1. Einleitung und Anwendungsgebiete

## 2. Grundlagen der Mustererkennung

(Äquivalenzklassen, lageinvariante Merkmalsextraktion)

## 3. Lageinvariante Graubildererkennung

(Die Klasse CT, parallele Implementierung, zweidimensionale Erweiterung, Reaktion auf systematische und stochastische Störungen, Clustereigenschaften)

## 4. Lageinvariante Konturbildererkennung

(Konturextraktion, Fourieranalyse, Fourierdeskriptoren für die Äquivalenzklasse ähnlicher und affiner Muster)

## 5. Allgemeine Ansätze zur Berechnung von Invarianten

(Integralinvarianten, Differentialinvarianten, Normalisierungsverfahren, Anwendungen der Gruppenmittel)

## 6. Optimale Merkmalsselektion

(Karhunen-Loeve Transformation)

## 7. Bayes- oder Optimal-Klassifikator

(MAP- und MLE-Kriterium, rekursive Schätzung der Parameter)

## 8. Neuronale Netze

(Regression mit neuronalen Netzen, Perceptron, Multilagen-Perzeptron, Backpropagation Algorithmus)

## 9. Polynomklassifikator

(polynomiale Regression, Lernregel für Polynomklassifikator)

## 10. Die Support-Vektor-Maschine (SVM)

(VC-Theorie, optimal trennende Hyperebene, Trick mit Kernen)

## 11. Vorstellung von Projekten

(Handschrifterkennung, Erkennung von Blütenpollen, Tangentendistanz und SVM)

# Literatur zur Mustererkennung:

- (1) H. Burkhardt. *Transformationen zur lageinvarianten Merkmalgewinnung*. VDI-Verlag, 1979 (Im Sekretariat zum Selbstkostenpreis von 5€ erhältlich).
- (2) H. Schulz-Mirbach. *Anwendung von Invarianzprinzipien zur Merkmalgewinnung in der Mustererkennung*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, Feb. 1995. Reihe 10, Nr. 372, VDI-Verlag
- (3) S. Theodoridis und K. Koutroumbas. *Pattern Recognition*. Academic Press, 4. Auflage 2009.
- (4) R.O. Duda, P.E. Hart und D.G. Stork. *Pattern Classification* (2. Auflage). J. Wiley, 2001.
- (5) J. Schürmann. *Pattern Classification*. J. Wiley, 1996.
- (6) W.I. Smirnov. *Lehrgang der höheren Mathematik, Bd. II*. Harri Deutsch, 1995.
- (7) R.C. Gonzalez und R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley, 1993.
- (8) C.M. Bishop. *Neural Networks for Pattern Classification*. Oxford University Press, Oxford, 1995.
- (9) M. T. Hagan, H. B. Demuth und M. Beale. *Neural Network Design*. PWS Publishing Company, 1996.
- (10) N. Cristianini und J. Shawe-Taylor. *An Introduction to Support Vector Machines*. Cambridge University Press, 2000.
- (11) H. Burkhardt und S. Siggelkow. *Invariant features in pattern recognition - fundamentals and applications*. In C. Kotropoulos and I. Pitas, editors, *Nonlinear Model-Based Image/Video Processing and Analysis*, pages 269-307. John Wiley & Sons, 2001
- (12) A.R. Webb. *Statistical Pattern Recognition* (2. Auflage). John Wiley & Sons, 2002.
- (13) C.M. Bishop. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer Verlag, 2006.

# Kapitel 1

## Einleitung und Anwendungsgebiete

# Erkennungsleistung des Menschen im Vergleich zum Rechner

Mensch enorm leistungsfähig beim Klassifizieren von Mustern (Text, Sprache, Musik, Bilder ), selbst für die sehr unterschiedlichen Erscheinungsformen der selben Objekte (Bedeutungsklassen).

- Unterschiedliche Erscheinungsformen eines 3D-Objektes: Perspektivische Projektion auf die Netzhaut; Okklusionen, d.h. Verdeckungen und damit nur Teilansichten verfügbar
- Unterschiedliche Präsentation eines Musikstücks: Variation des Instruments und damit des Spektrums, Tonlage, Tempi
- Wir lösen täglich *tausende* von komplexen Mustererkennungsproblemen

# Bedeutungsklasse “VW-Käfer”



# Bedeutungsklasse “VW-Käfer”

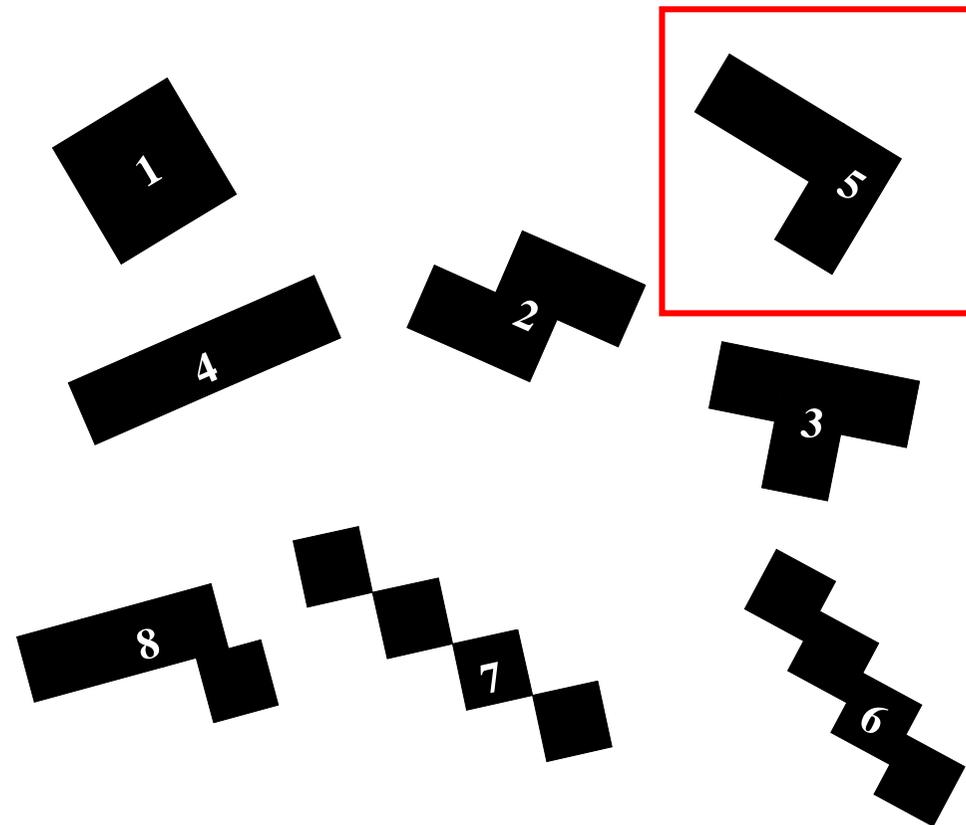


# Erkennungsleistung des Menschen im Vergleich zum Rechner

	Assoziative Fähigkeiten	Kombinatorische Fähigkeiten
Mensch	***	*
Maschine	*	***

- Ziel ist nicht, den Menschen nachzuahmen, sondern man sucht nach mathematisch/technisch realisierbaren Methoden (Flugzeug bildet nicht den Vogelflug mit Flügelschlag nach)
- Zumal die menschliche Vorgehensweise weitgehend unerklärt ist (außer einfachen Vorverarbeitungsschritten) so dient sie doch in wertvoller Weise mehr als Orientierung und Motivierung (*Existenzbeweis* für eine Lösung) denn als methodische Unterstützung.

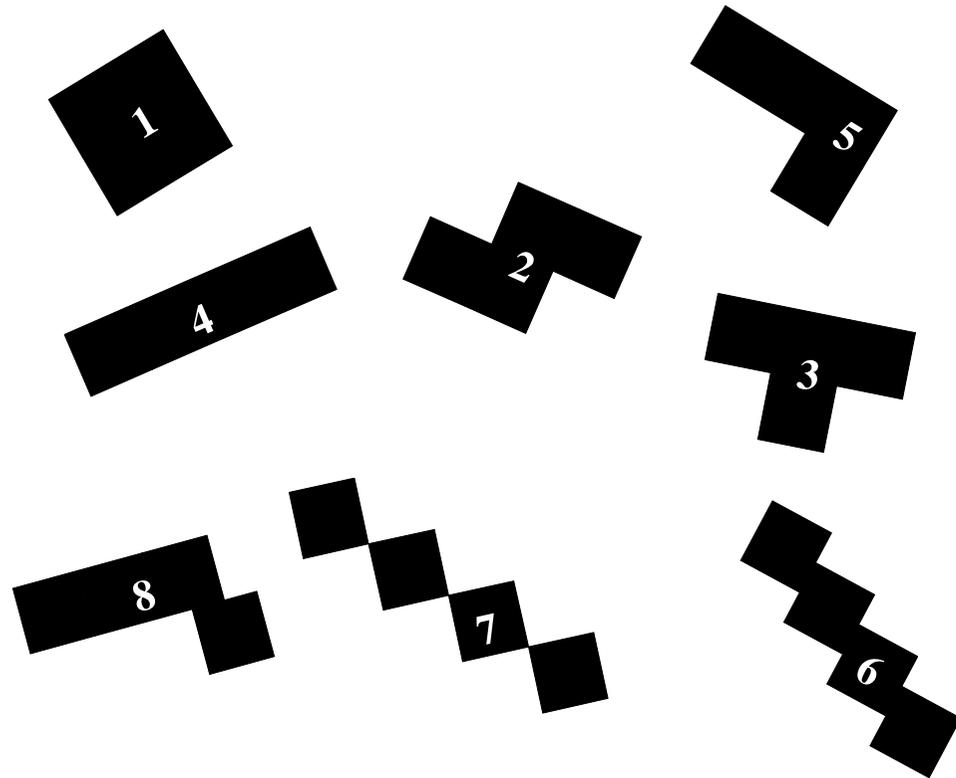
# Einfache Erkennungsaufgabe: Klassifikation von Objekten



# Klassifikation von Objekten

## Charakterisierung mit zwei Merkmalen

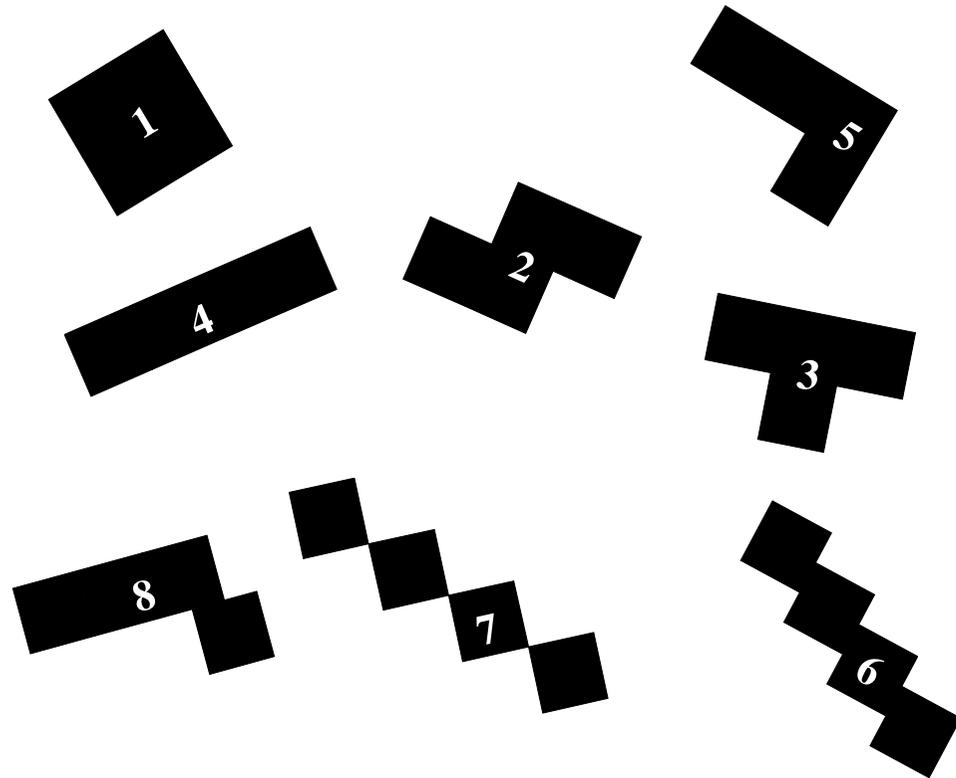
Objekt	Fläche
1	4
2	4
3	4
4	4
5	4
6	4
7	4
8	4



# Klassifikation von Objekten

## Charakterisierung mit zwei Merkmalen

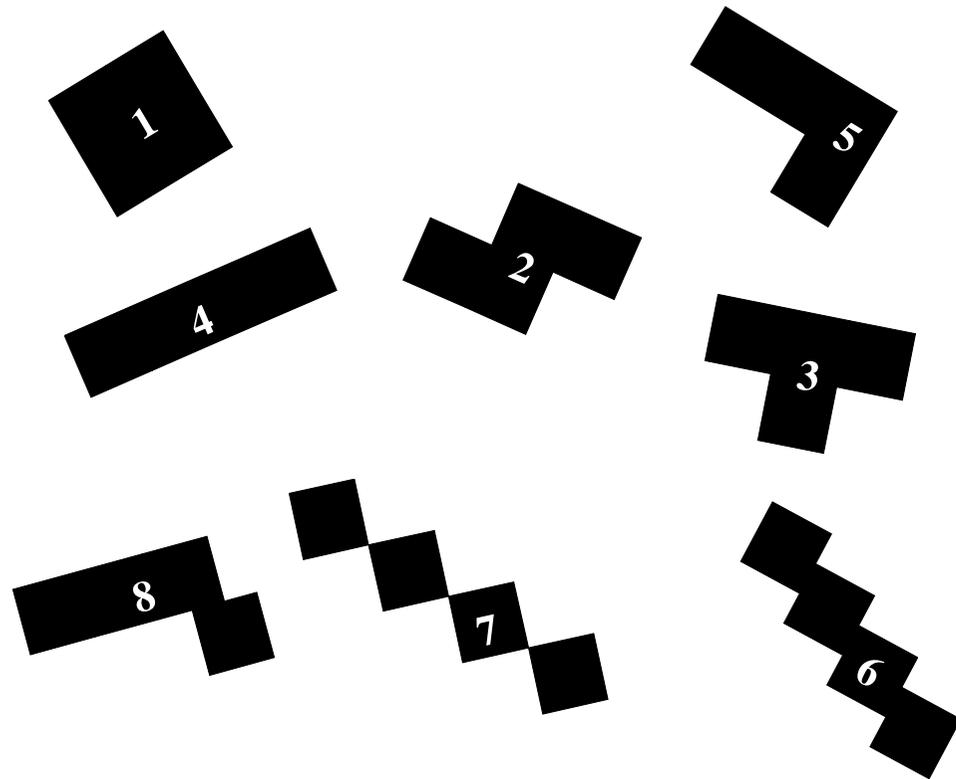
Objekt	Fläche	Umfang
1	4	8
2	4	10
3	4	10
4	4	10
5	4	10
6	4	13
7	4	16
8	4	11



# Klassifikation von Objekten

## Charakterisierung mit zwei Merkmalen

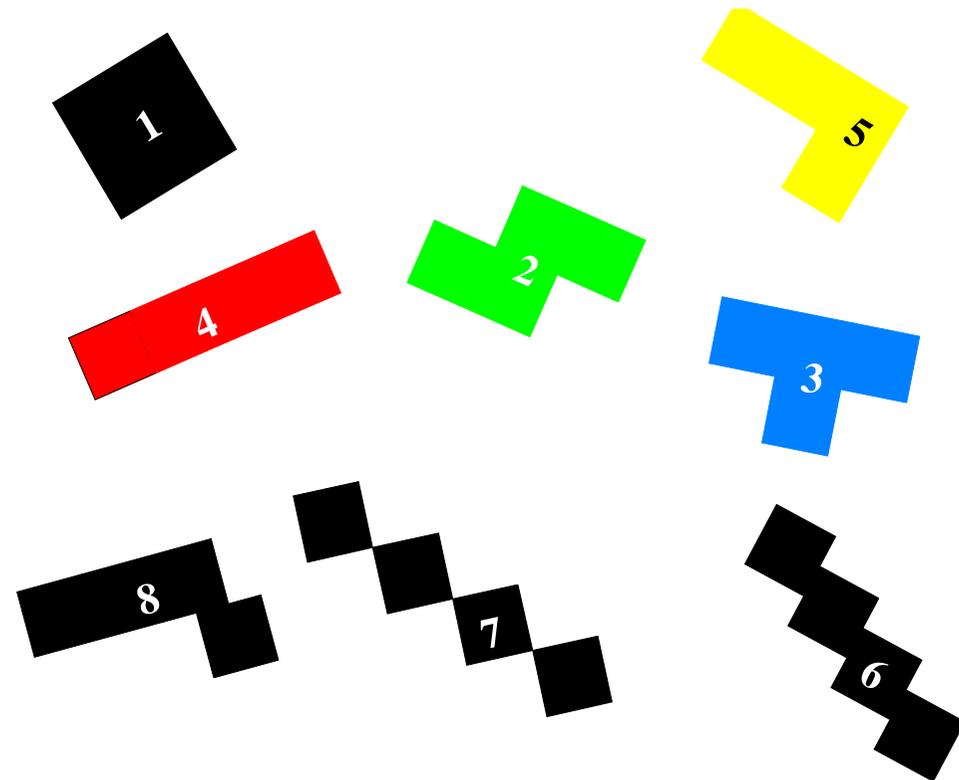
Objekt	Fläche	Umfang	Ecken
1	4	8	4
2	4	10	8
3	4	10	8
4	4	10	4
5	4	10	6
6	4	13	16
7	4	16	16
8	4	11	8



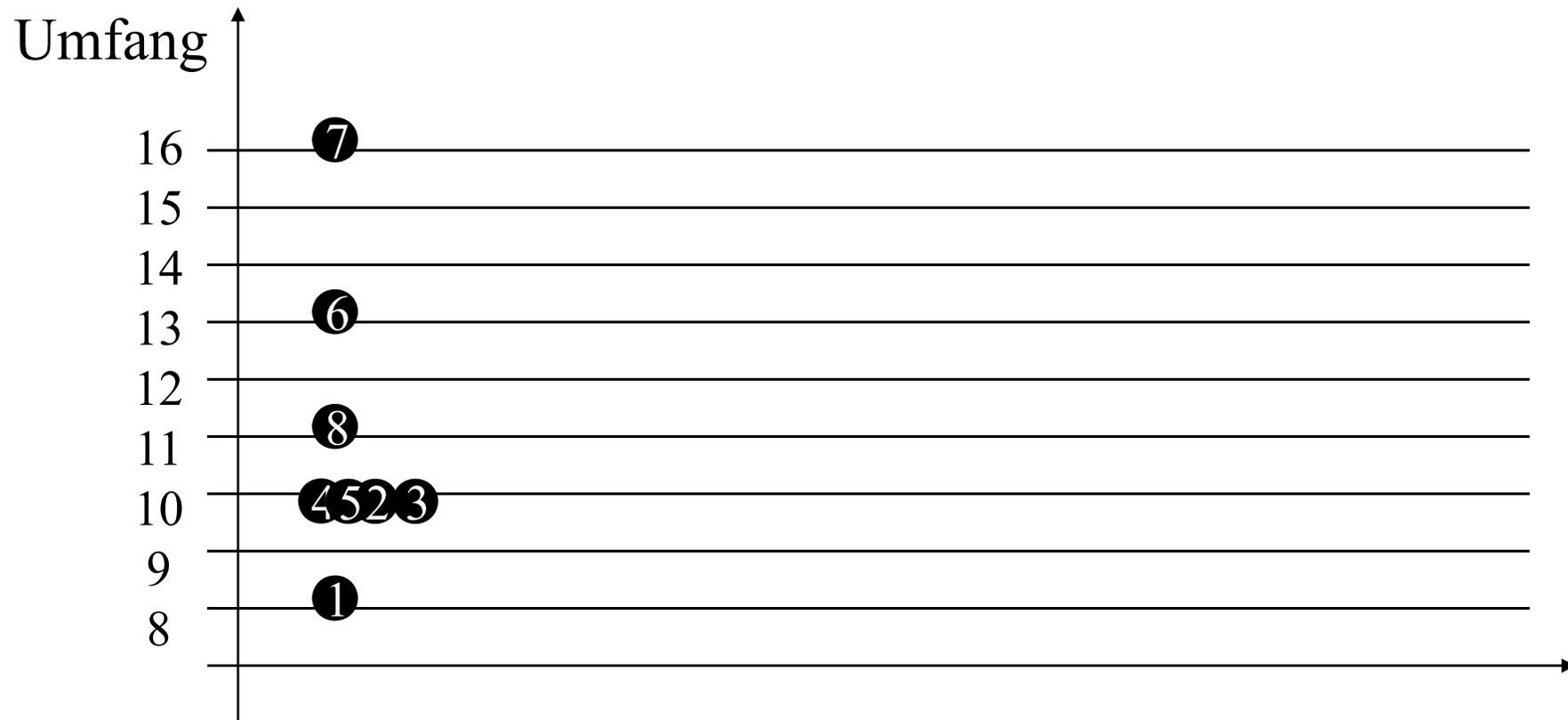
# Klassifikation von Objekten

## Charakterisierung mit drei Merkmalen

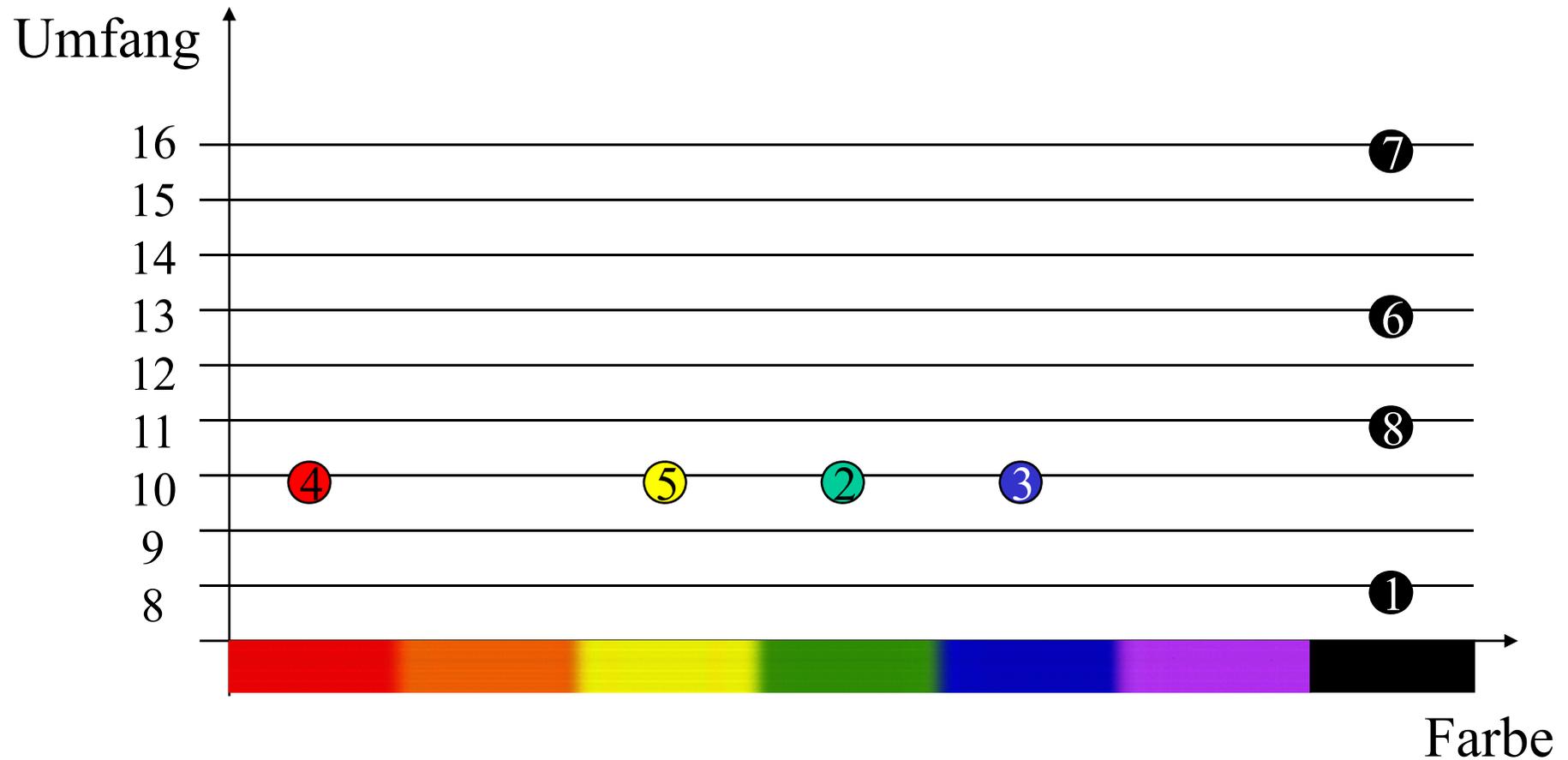
Objekt	Fläche	Umfang	Farbe
1	4	8	schwarz
2	4	10	grün
3	4	10	blau
4	4	10	rot
5	4	10	gelb
6	4	13	schwarz
7	4	16	schwarz
8	4	11	schwarz



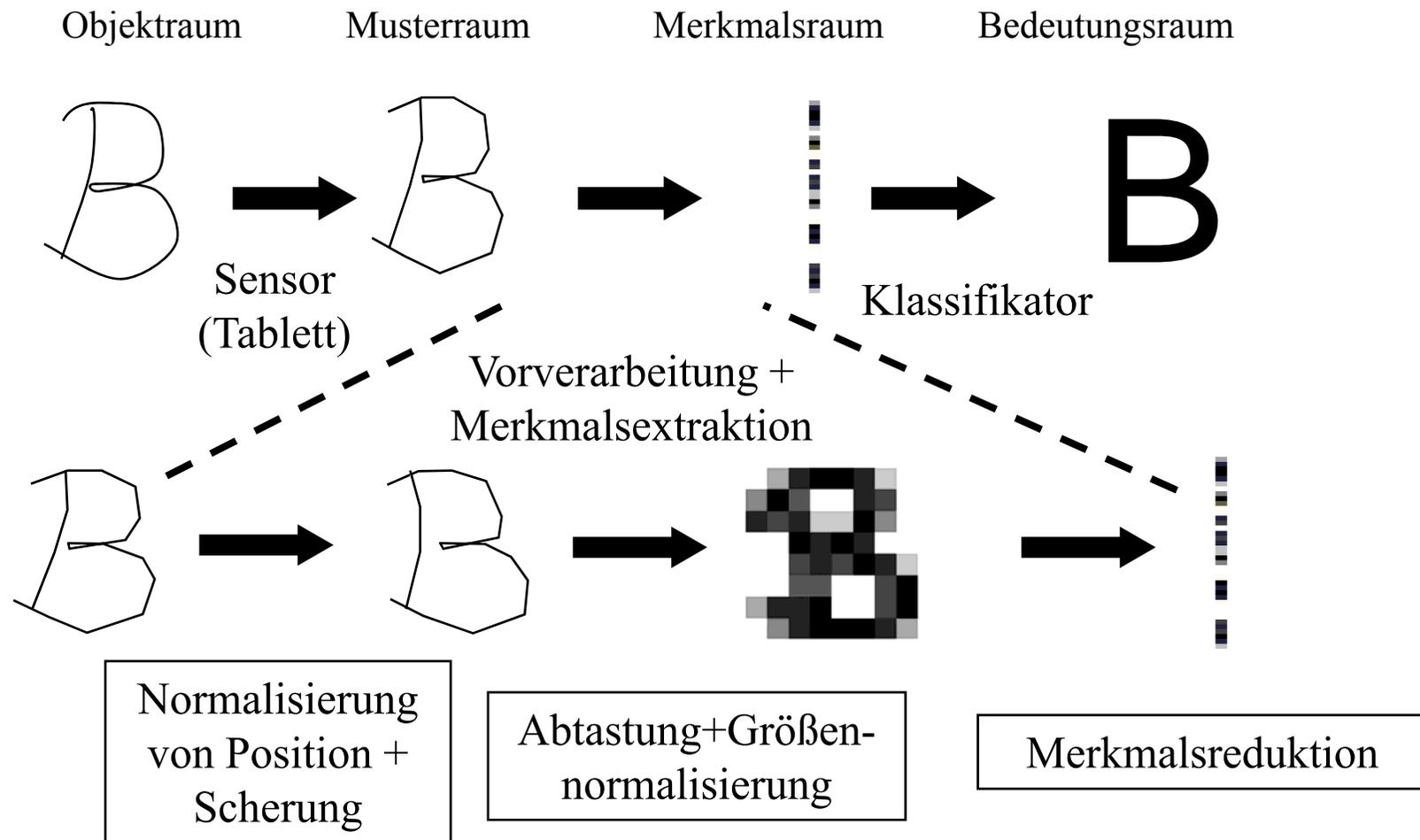
# Eindimensionaler Merkmalsraum



# Zweidimensionaler Merkmalsraum



# Einführungsdemo: Handschrifterkennung



Online-Handschrifterkennung:

*frog on hand* von Claus Bahlmann

<http://lmb.informatik.uni-freiburg.de/people/bahlmann/frog.en.html>

# Demo der Handschrifterkennung des Tablet-PCs

# ANWENDUNGSGEBIETE DER DIGITALEN BILDVERARBEITUNG UND MUSTERERKENNUNG

1. Visuelle Qualitätskontrolle und Produktionsüberwachung, Robotik
  - Materialprüfung, Oberflächen- und Schliffbildanalyse, Ultraschallbildauswertung, Schadenfrüherkennung (Turbinengeräusche, Bruch von Bohrern), Bestückungsprüfung, Infrarotbildauswertung, Werkstückerkennung, Navigation
2. Bilddatenübertragung mit Datenkompression (Bildcodierung)
  - Videokonferenz, Bildtelefon, Internet-Anwendungen

### 3. Zeichenerkennung und automatische Dokumentauswertung und -bearbeitung

- Anschrift- und Belegleser (OCR-A, OCR-B), Handschrifterkennung und Verifikation von Unterschriften  
Briefsortieranlagen: (Hand- und Maschinenschrift)  
30.000 Briefe pro Stunde => 500 /min => 8,3 /sek  
Menschl. Operateur: 1.800 /h  
Bilder und Texte analysieren (Fa:SER), symbolische Auswertung von Kartenmaterial und Zeichnungen, symbolische Speicherung der Objekte

### 4. Sprach- und Musikerkennung

- Spracherkennung, automatische Auskunftssysteme, Sprachverifikation (Zugangskontrollsysteme)
- Musikerkennung, Automatisches Erstellen von Noten aus Musikaufnahmen (Volksmusik/Musikaufzeichnungen von Eingeborenen)

### 5. Medizinische Signal- und Bildauswertung

- EKG (Elektrokardiogramm-Messung der Aktionsströme des Herzens => Hinweis auf Schädigung des Herzmuskels, sowie Leistungs- und Stoffwechselstörungen)
- EEG (Elektroenzephalogramm-Messung der Aktionsströme im Gehirn => Hinweis auf Gehirnstörungen)

- Tomographie (MR,CT), Ultraschall, Röntgenbilder, mikroskopische Analysen (Zellbildklassifikation, Chromosomen, Gewebsschnitte, Blutbild)

## Medizinische Studie von USA:

(Quelle: H. Niemann)

Die medizinisch auszuwertenden Datenmengen sind enorm groß. In USA werden jährlich ca. 650 Mio. Röntgenaufnahmen gemacht und man schätzt, daß 30% der Anomalien bei der Röntgendiagnose unentdeckt bleiben.

Gebiet Zelldiagnose: hier werden 20.000 - 40.000 Personen beschäftigt und man nimmt an, daß 40% nicht zufriedenstellend ausgewertet werden.

Für die Blutbildanalyse hingegen gibt es bereits sehr gute Geräte. Im Bereich der Röntgenbildanalyse gibt es noch erheblichen Forschungsbedarf!

## 6. Satelliten- und Flugbildauswertung (multispektrale Sensoren)

- Remote sensing (Auswertung von Flugzeug- und Satellitenbildern), Photogrammetrie, Umweltüberwachung, Meteorologie und Ozeanographie (Wolkenbilder, Wellenbildanalyse), Vegetationsüberwachung (Schädlingsbefall, Ernteerträge, Baumbestand), Exploration und Geologie, Geographie (Stadtplanung, autom. Kartenerstellung)

## 7. Biologie

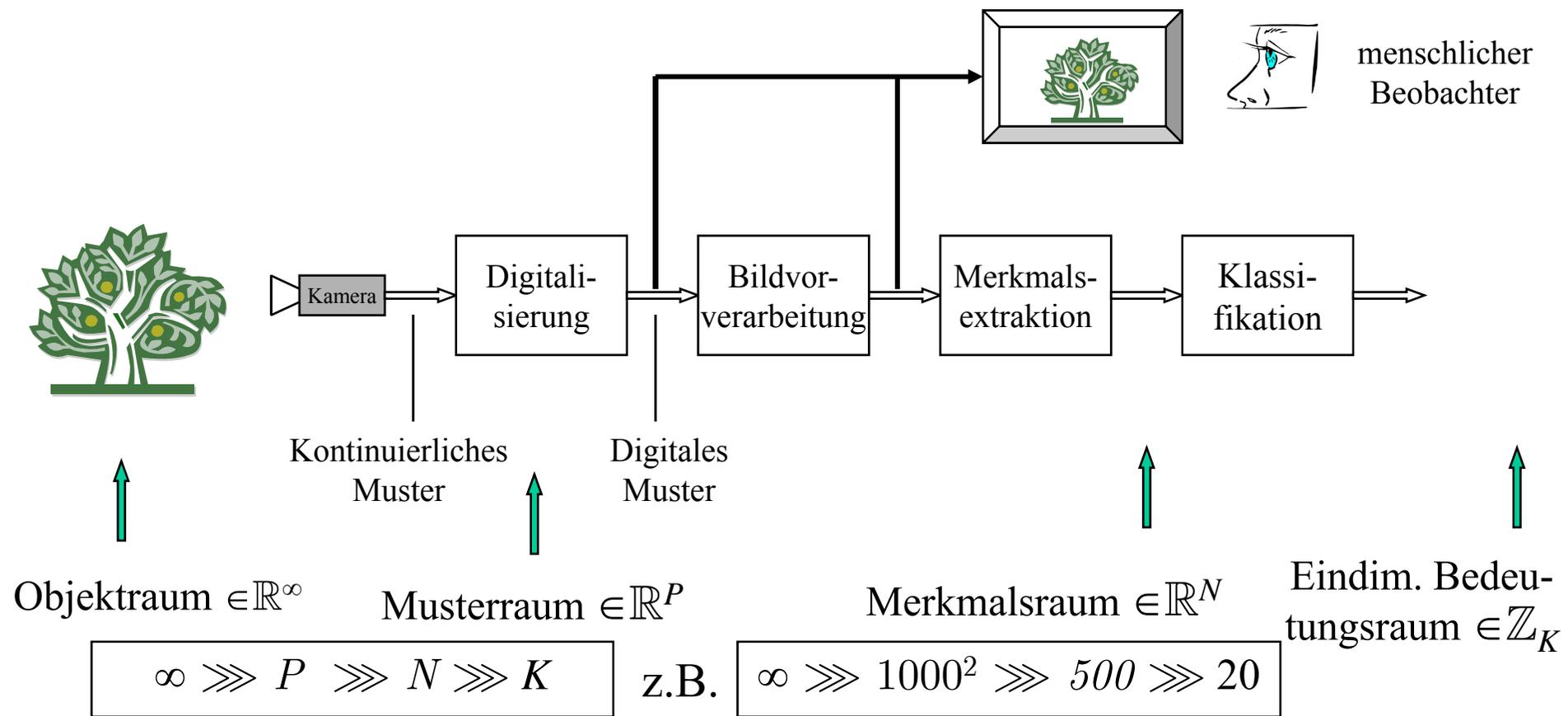
- Überwachung von Zellwachstumsvorgängen (mit und ohne Tracer, Beads), Analyse von Mikroorganismen z.B. in Klärschlamm (biologischer Sensor)

## 8. Kriminalistik

- Fingerabdrücke, Erkennung von Gesichtern, Geschosspuren

## 9. Verbesserung der Auflösung von Licht- und Elektronenmikroskopen

# Allgemeines Schema zur Bildverarbeitung und Mustererkennung



Im allgemeinen gibt es keinen geschlossenen Lösungsweg für ein Mustererkennungsproblem. Wegen der Komplexität der Aufgabenstellung wählt man eine gestufte, modulare Vorgehensweise

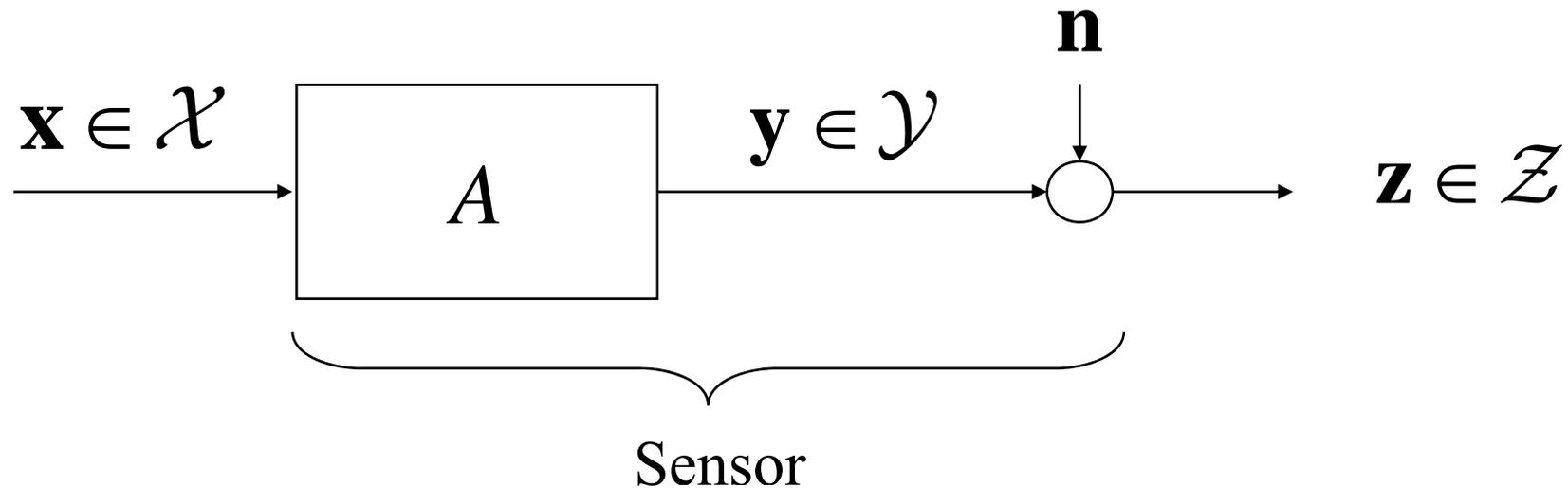
## Objektraum:

$f(\mathbf{x})$  Vektorfunktion in Abhängigkeit einer vektoriellen unabhängigen Variablen  $\mathbf{x}$   
z.B. Farbe und Intensität als Funktion von  
2-3 Ortskoordinaten, oder: Betrag und Orientierung eines  
elektromagnetischen Feldes als Funktion von Ort und Zeit

## Musterraum:

$f(\mathbf{x})$  häufig skalare Funktion  
z.B. Graubild als Funktion von Ort und Zeit  
beim Einsatz von Kameras i.a. Projektion einer 3D-Szene  
in die Kameraebene (Zentral- oder vereinfacht:  
Parallelprojektion)  
oder: Tonaufzeichnung von Sprache oder Musik über der  
Zeit

# Wie beschreibt man mathematisch die Wirkung des Sensors?



$\mathcal{X}$ : Objektraum  
 $\mathcal{Z}$ : Musterraum

Die mathematische Abbildung  $A$  beschreibt die Eigenschaften des Sensors:

$$\mathbf{z} = A(\mathbf{x}) + \mathbf{n} \quad (\text{I})$$

Häufig ist zusätzliches Wissen vorhanden, welche in Form von Nebenbedingungen vorliegen, wie z.B. nur positive Intensitäten möglich, Zeit- oder Ortsbegrenztheit oder ein diskreter Wertevorrat. Diese Nebenbedingungen lassen sich häufig in Form von einer Fixpunktbedingung angeben:

$$\mathbf{x} = C(\mathbf{x}) \quad (\text{II})$$

# Welche Fälle bei der Bildaufnahme (Sensor) kann man unterscheiden:

- A ist bijektiv  
d.h. die Äquivalenz- oder Bedeutungsklassen bilden abgeschlossene und damit vollständige Mengen, z.Bsp. Geometrische Transformationen mit den Eigenschaften einer mathematischen Gruppe wirken auf die Objekte
- Unvollständige und gestörte Daten
  - Unvollständige Beobachtungen durch eine Abbildung A auf Unterräume (tomographische Projektionen, Okklusionen und partielle Ansichten), daraus folgt: mathematisch schlecht gestellte inverse Probleme
  - gestörte Beobachtungen ( $\mathbf{n} \neq \mathbf{0}$ )

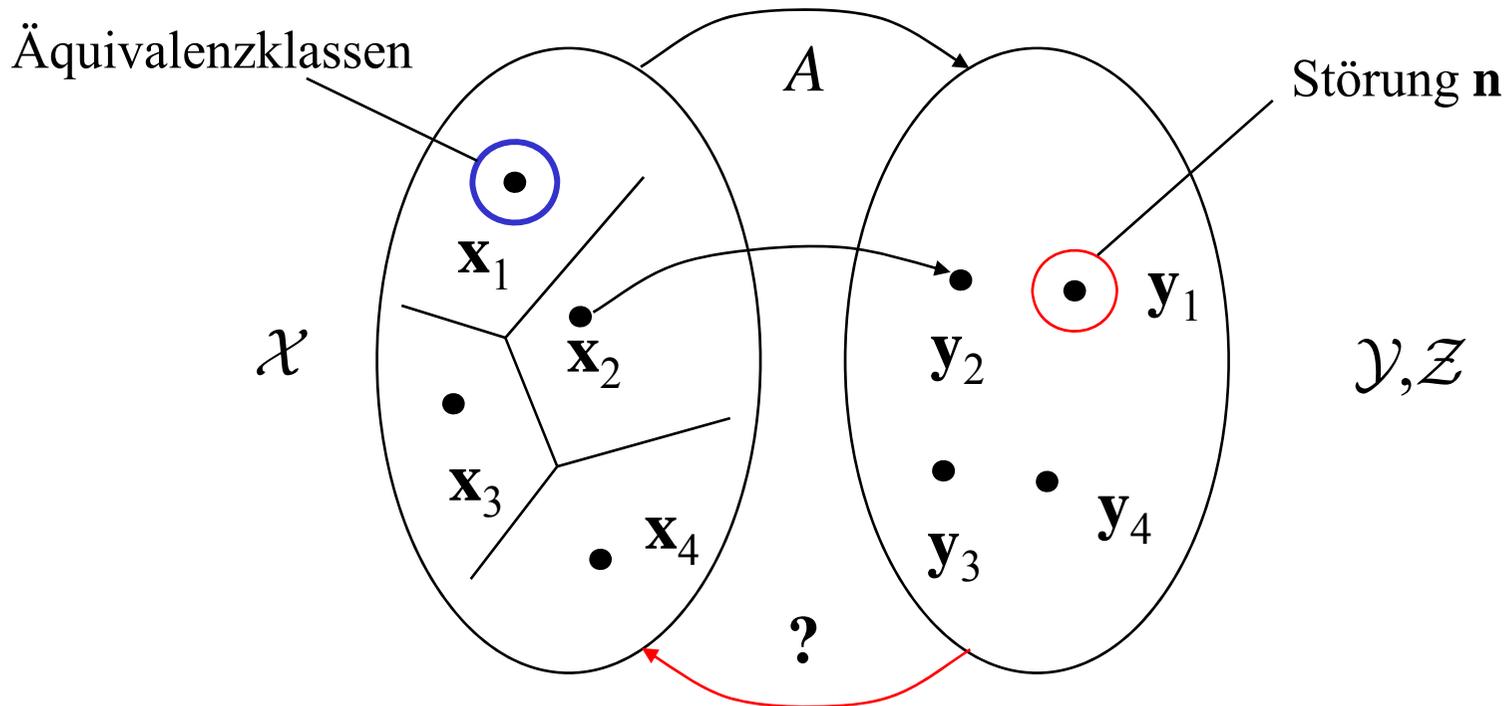
Wie fügt sich die Mustererkennung in die allgemeine Schätztheorie für Bilder oder allgemeiner Signale ein?

In der Schätztheorie unterscheidet man zwischen:

- Schätzaufgabe (Estimation)
- Detektion
- Mustererkennung

**Alle drei: Inverse Probleme!**

# Charakterisierung der drei Aufgabenstellungen in Signalvektorräumen:



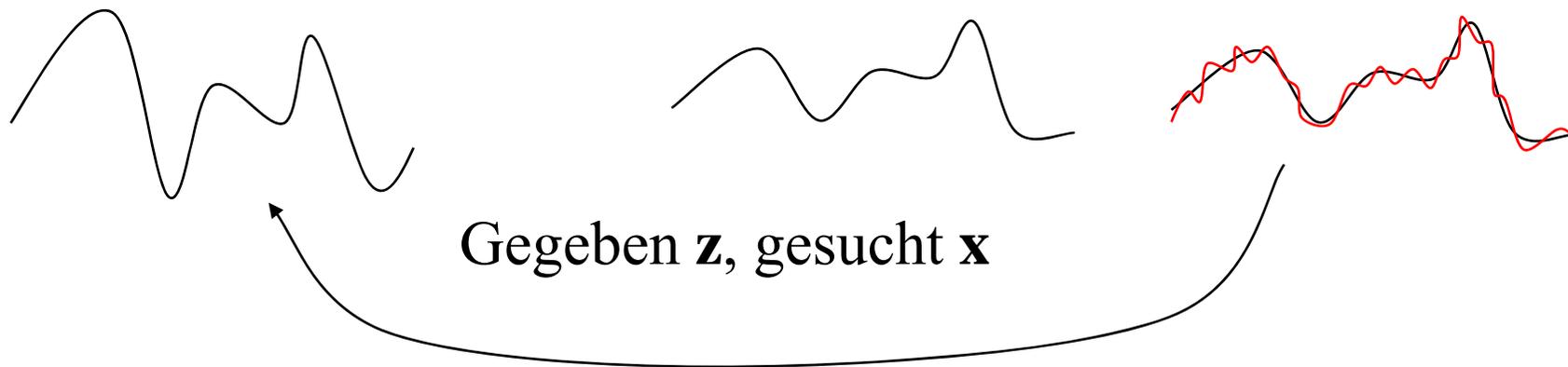
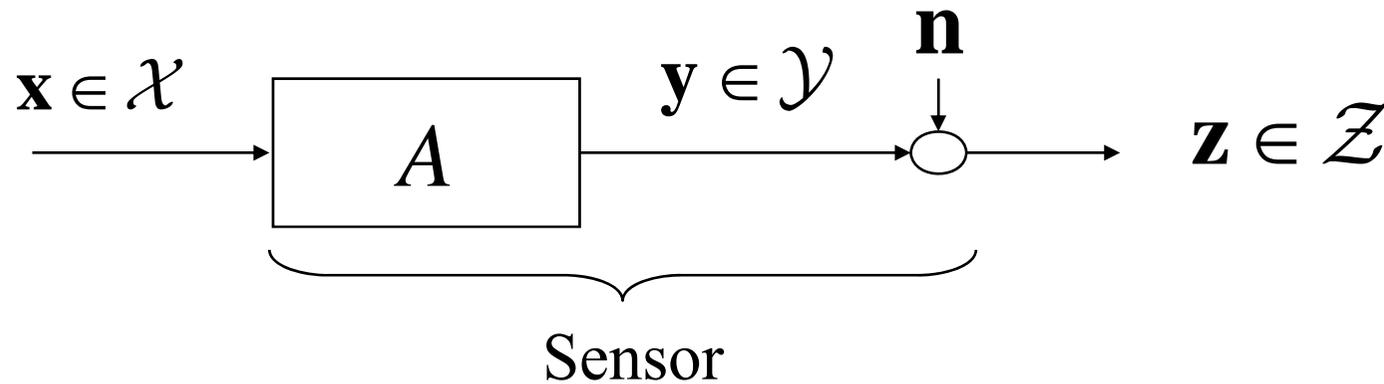
1. Vollbesetzter Objektsignalraum: **Signalschätzung**
2. Es existiert nur eine Untermenge aller möglichen Signale: **Detektion**
3. Es existieren endlich viele Signalklassen (Äquivalenz- oder Bedeutungsklassen): **Mustererkennung**

$$\mathbf{x} \in \mathcal{X}$$

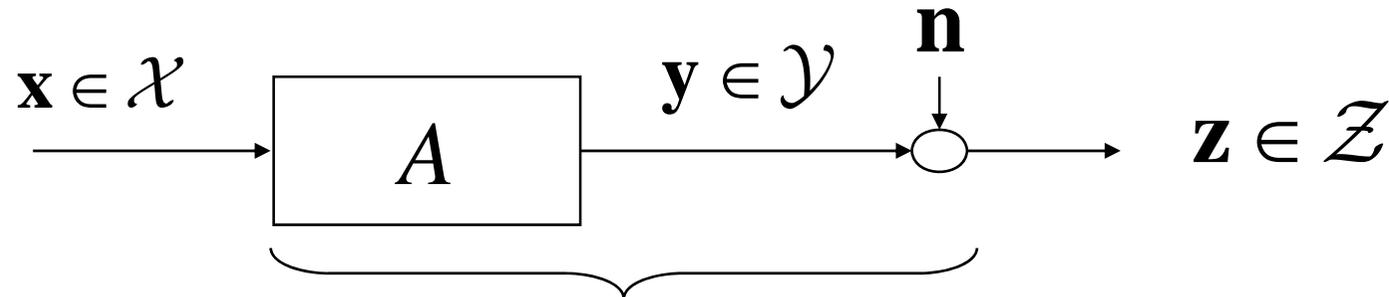
$$\mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_i\} \subset \mathcal{X}$$

$$\mathbf{x} \in \mathcal{E}_i\{\mathbf{x}_i\} \subset \mathcal{X}$$

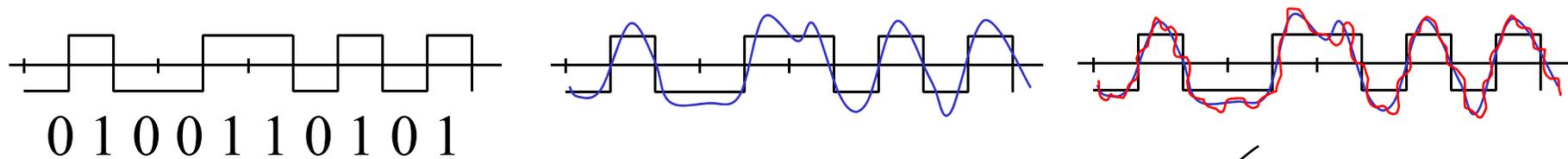
# Beispiel für die Signalschätzung: Aufgaben der Meßtechnik



# Beispiel für die Signaldetektion: Digitale Signalübertragung



Übertragungsleitung



Gegeben  $\mathbf{z}$ , gesucht  $\mathbf{x}$

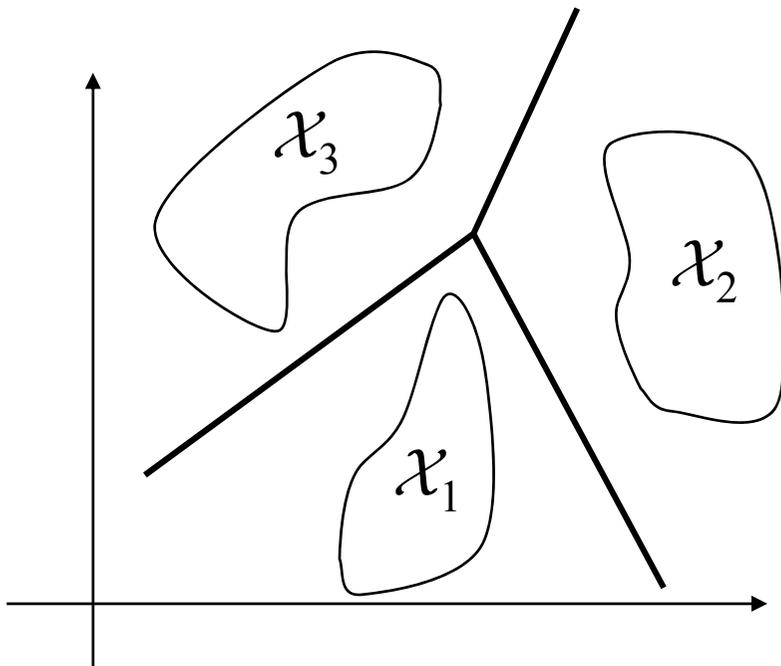
$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{A} \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0,9 \\ 0,1 \\ -0,1 \\ 1,1 \\ 1,2 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{x}$  liegt auf einem Hyperkubus!

# Bedeutung der Merkmalsextraktion

1. Extraktion von Merkmalen, welche hohe Relevanz für die Äquivalenzklassenzugehörigkeit oder auch hohe Diskriminierfähigkeit besitzen und möglichst generalisierbar sind
2. Reduktion der Dimension des Musterraumes u.a. aus Aufwandsgründen und für die Existenz von Lösungen für den nachfolgenden Klassifikatorentwurf, unter Beibehaltung von guten Separationseigenschaften (hinreichende Distanz zwischen den Klassen im Merkmalsraum)

## Letzter Schritt: Klassifikation, d.h. Separation des Merkmalsraumes in Bedeutungsklassen



- Die Menge „Unbekannt“ kann eine Klasse bilden (Klassifikation mit Zurückweisung). Der Raum wird nicht vollständig aufgeteilt.
- Die Bedeutungsklasse wird häufig repräsentiert durch eine Stichprobe (Lernstichprobe)
- Sie sollte eine gewisse Kompaktheit im Sinne einer Metrik besitzen (Cluster)