Vorlesung im Sommersemester

MUSTERERKENNUNG

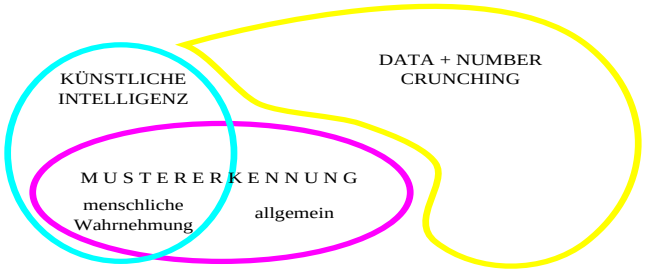
E.G. Schukat-Talamazzini

1. Einführung

Was ist Mustererkennung? • Definitionen • Vorgehensweise • Typen von Mustern • Anwendungsbeispiele

MUSTERERKENNUNG

Die automatische Transformation eines *Sensorsignals* in eine aufgabenspezifische *symbolische Beschreibung*



Elektronische Datenverarbeitung

Schwierig und aufwendig erscheinende Berechnungen werden in sehr kurzer Zeit von einem Computer erledigt.

Künstliche Intelligenz und Mustererkennung

Kinderleichte Denkprozesse und Wahrnehmungsaufgaben erfordern eine gewaltige Rechenleistung, wenn sie überhaupt maschinell nachvollziehbar sind.

Plädoyer von Brooks

KI = Menge der *offenen* | **ME** = Menge der *gelösten*

Fragestellungen im Bereich der maschinellen Simulation menschlicher und tierischer Intelligenzleistungen

Was ist eigentlich „Mustererkennung“ ?

Wissenschaftliche+kommerzielle Datenverarbeitung

- Matrixinvertierung, LGS, FEM, Operations Research
  Prozeßsimulation in Physik, Chemie, Ökologie
  Betriebliche und militärische Informationssysteme
  World Wide Web, Multimedia, Virtuelle Realität

Künstliche Intelligenz

- Maschinelle Beweiser
  Schachspielautomaten
  Medizinische Diagnoseprogramme
  Robotersteuerungen

➪ *Simulation intelligenter Verhaltensweisen*

Mustererkennung

- Zeichenerkennung und Dokumentenanalyse
  Rechnersehen für autonome Fahrzeuge
  Automatisches Verstehen gesprochener Sprache

➪ *Simulation menschlicher Wahrnehmungsleistungen*

Sensordatenanalyse (ind./med./natwiss.)

- Analyse von EKG/EEG-Signalen, Massenspektren
  Ultraschallbasierte Werkstückprüfung
  Auswertung von Mehrkanalluftbildern

Was ist eigentlich „Mustererkennung“ ?

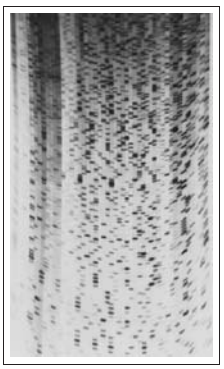
Was ist ein Muster ?

„One of the most interesting aspects of the world is that it can be considered to be made up of **patterns**.

A pattern is essentially an **arrangement**.

It is characterized by the **order** of the elements of which it is made rather than by the intrinsic nature of these elements.“

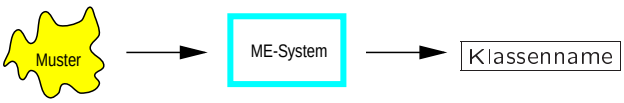
Norbert Wiener



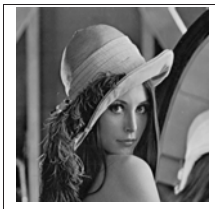
DNA (Sequenzierung)
Elektrophoretogramm

FUNGUS (Pilzkolonie)
Trichoderma viride

Spezialfall KLASSIFIKATION

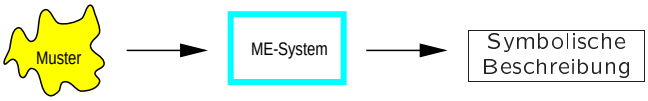


Beispiel: **Personenidentifikation**

 Lenna	?	Elaine
?	Belinda	?

Allgemeiner Fall — MUSTERANALYSE

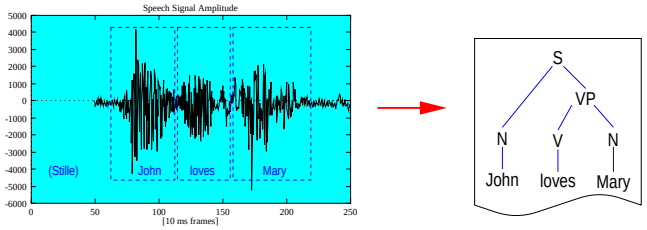
Die automatische Berechnung einer symbolischen **Beschreibung**, die optimal kompatibel ist mit dem gespeicherten **Wissen** UND optimal zum **Signal** paßt.



Cognitive Task

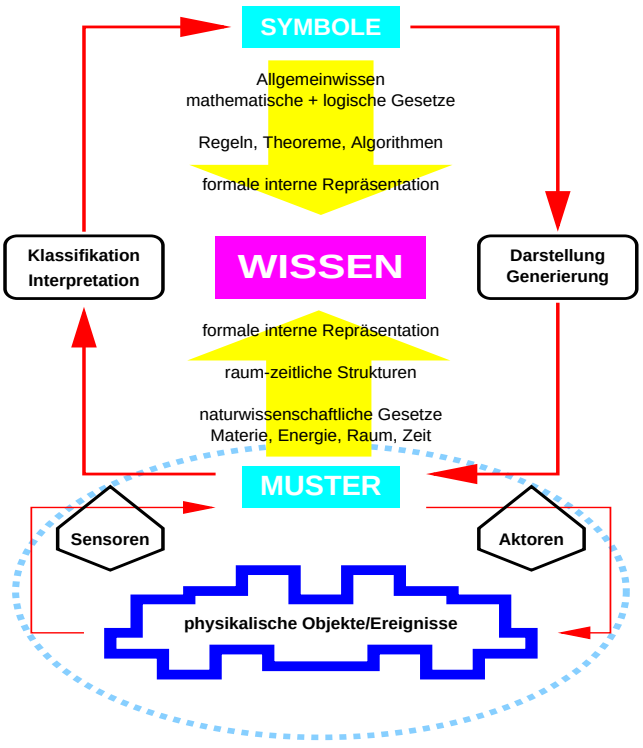
> „The assembly of schemata (activation of atoms) and inference (completing missing parts of the representation) are both achieved by finding maximally self-consistent states of the system that are also consistent with the input."
>
> *P. Smolensky in PDP vol. 1*

Beispiel: **Sprachverstehen**



Mustererkennungssystem und Umwelt

(nach H. Niemann)



Definition 1.1 *Die* **Umwelt** *ist die Gesamtheit der mit physikalischen Geräten meßbaren Größen. Sie wird repräsentiert durch die Menge*

$$\mathfrak{U} \;=\; \{{}^{\rho}\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x}) \mid \rho = 1, 2, \ldots\}$$

von Funktionen ${}^{\rho}\boldsymbol{b}(\boldsymbol{x})$.

Definition 1.2 *Ein* **Problemkreis** *wird mit* Ω *bezeichnet und enthält nur Objekte oder Funktionen, die zu einer strikt begrenzten Anwendung oder einem Ausschnitt der Umwelt gehören. Er ist definiert durch die Menge*

$$\Omega \;=\; \{{}^{\rho}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \mid \rho = 1, 2, \ldots\} \;\subset\; \mathfrak{U}$$

von Funktionen ${}^{\rho}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$ *und ist eine Teilmenge der Umwelt* $\mathfrak{U}$.

Definition 1.3 *Die Elemente aus der Menge* Ω, *dem Problemkreis, heißen* **Muster**. *Daher ist ein Muster eine Funktion*

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \;=\; \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n) \\ \ldots \\ f_m(x_1, x_2, \ldots, x_n) \end{pmatrix}.$$

Typische Muster sind

- Zeitsignale ($n = m = 1$),
- mehrkanalige Meßreihen ($n = 1, m \neq 1$),
- Bilder ($n = 2$) und
- Videosequenzen ($n = 3$).

Definition 1.4 **Mustererkennung** *beschäftigt sich mit den mathematischen und technischen Aspekten der automatischen Ermittlung formalsprachlicher Beschreibungen von Mustern.*

Beim gegenwärtigen Stand der Technik gehört dazu

- die **Klassifikation** einfacher Muster sowie
- die **Analyse** und das **Verstehen** komplexer Muster.

Bemerkung 1.1 *Eine erweiterte Definition von Umwelt und Problemkreis enthält die explizite Spezifikation der verwendeten* **Meßtechniken** *(Geräte, Bedingungen, Einschränkungen, Störquellen, ...).*

Beispiele für solcherart Einflußfaktoren sind die spektrale Empfindlichkeit einer Kamera oder eines Mikrofons, Brennweiten, Augpunktpositionen und Abtastfrequenzen.

Definition 1.5 *Unter* **Klassifikation** *verstehen wir eine Zuordnungsvorschrift, die jedem Muster eines Problemkreises Ω genau eine von K möglichen Klassen $\Omega_1, \Omega_2, \ldots, \Omega_K$ zuweist.*

Manchmal wird auch die Möglichkeit vereinbart, ein Muster zurückzuweisen, d.h. einer ausgezeichneten $(K+1)$-ten **Rückweisungsklasse** *Ω_0 zuzuordnen.*

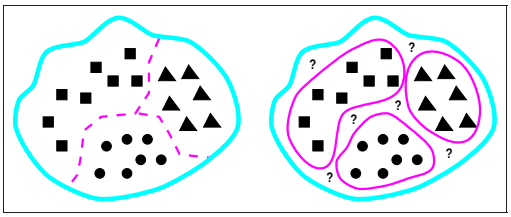
Beispiel 1.1 *(Optische Zeichenerkennung)*

Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_{24}	Ω_{25}	Ω_{26}
a	*b*	*c*	**d**	e	*x*	*y*	*z*
a	**b**	**c**	**d**	e	*x*	*y*	z
a	**b**	**c**	*d*	**e**	**x**	*y*	*z*
a	**b**	c	d	*e*	x	y	z
a	b	**c**	*d*	**e**	*x*	**y**	**z**
a	*b*	c	**d**	*e*	x	*y*	*z*
a	b	*c*	d	**e**	**x**	**y**	z
a	**b**	**c**	d	**e**	x	*y*	z

Definition 1.6 *Es sei Ω ein Problemkreis, $K \in \mathbb{N}$ und das Mengensystem $(\Omega_1, \ldots, \Omega_K)$ eine Partition über Ω, d.h. es gilt:*

$$\begin{aligned} \Omega_\kappa &\neq \emptyset, & \kappa &= 1, \ldots, K \\ \Omega_\kappa \cap \Omega_\lambda &= \emptyset, & \kappa &\neq \lambda \\ \bigcup_{\kappa=1}^{K} \Omega_\kappa &= \Omega \quad \textit{bzw.} \quad \bigcup_{\kappa=0}^{K} \Omega_\kappa = \Omega \end{aligned}$$

Dann heißen die Ω_κ, $\kappa = 1, \ldots, K$ **Klassen** *oder* **Klassengebiete** *von Ω.*



Alle Klassengebiete sind paarweise disjunkt.
Klassengebiete schöpfen den gesamten Problemkreis aus. *(„tertium non datur“)*
Klassenkonzepte unseres Denkens sind i.a. unschärfer!
Kognitive Kategorien orientieren sich *intensional* (gemeinsame Objekteigenschaften)

➪ *überlappend, zeit- und kontextabhängig, hierarchisch*

Definition 1.7 *Es sei Ω ein Problemkreis, $\mathcal{A}$ ein endlicher Zeichenvorrat und $\mathcal{L}_{SB} \subseteq \mathcal{A}^\star$ eine formale Sprache über dem Alphabet $\mathcal{A}$. Eine Abbildung*

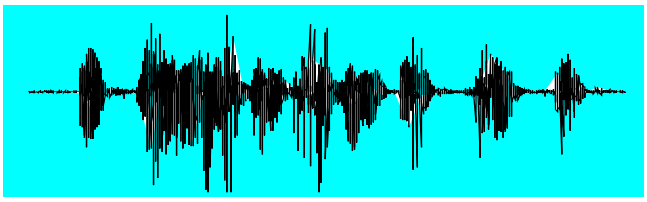
$$\mathfrak{I}: \begin{cases} \Omega & \to & \mathcal{L}_{SB} \\ f & \mapsto & \mathfrak{b} = \mathfrak{I}(f) \end{cases}$$

heißt **Interpretationsfunktion** *von Ω in $\mathcal{L}_{SB}$.*

Die Zeichenkette $\mathfrak{b} = \mathfrak{I}(f)$ heißt **symbolische Beschreibung** *des Musters $f \in \Omega$.*

Die symbolische Beschreibung eines Musters erfordert seine Dekomposition (Zerlegung, Segmentierung) in einfachere Bestandteile (Segmentierungsobjekte) und deren Beziehungen untereinander (Relationen), ferner die Identifikation von Objekten, Ereignissen und Situationen mit symbolischen Namen und ggf. Schlußfolgerungen über deren Konsequenzen im Problembereich.

Definition 1.8 *Die Berechnung symbolischer Beschreibungen für die Muster eines Problemkreises bezeichnen wir als* **Musteranalyse**. *Ein* **Musteranalysesystem** *ist ein algorithmisches (maschinelles) Verfahren zur Musteranalyse.*



Textuelle Segmentierung

⟨ich, will, morgen, abend, nach, Frankfurt⟩

Syntaxbaum

Semantische Repräsentation

Die Benutzerin *fragt* nach einer *Zugverbindung*, und zwar *ab Jena Saalbahnhof* am *Montag, dem 12. April 1999* im Zeitintervall *zwischen 17 und 19 Uhr* mit Ankunftsort *Frankfurt am Main*.

Datenbankabfrage

```
QUERY (SRC=Jena, DST=Ffm, DATE=12.04.99, TIM=range(17,19))
```

Reaktion/Antwort

„Sie können mit dem Mimara-Express um 18:49 Uhr ab Gleis 1 fahren oder zunächst mit dem Vorortzug nach Göschwitz über Apolda ...“

6 POSTULATE für die Mustererkennung

(nach H. Niemann, 1983)

1 Stichprobe
Es steht eine *repräsentative* Stichprobe von Mustern $f \in \Omega$ zur Verfügung.

2 Merkmale
Ein Muster besitzt *Merkmale*, die charakteristisch für seine Klassenzugehörigkeit sind.

3 Kompaktheit
Merkmaldarstellungen von Mustern *einer Klasse* nehmen im Merkmalraum einen kompakten Bereich ein.

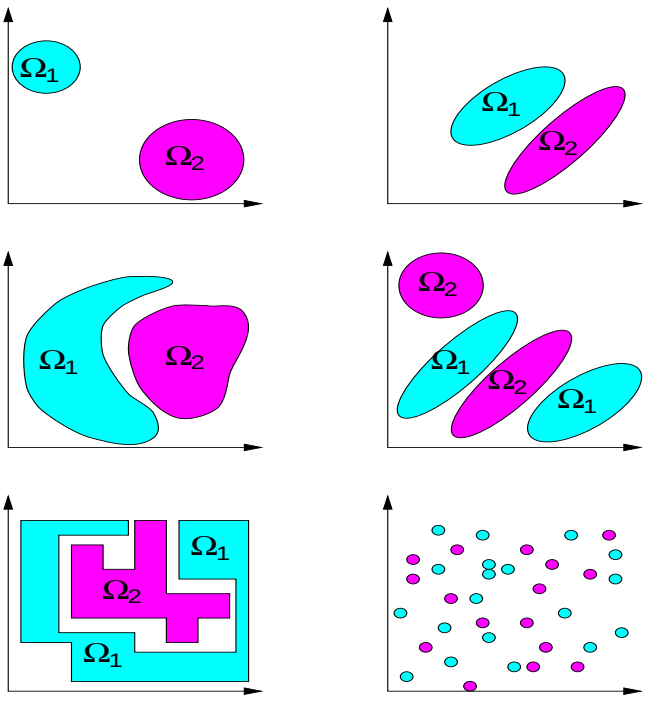
4 Komposition
Ein Muster läßt sich — u.U. über mehrere Hierarchiestufen hinweg — in einfachere Muster zerlegen, für welche die Postulate (2) und (3) gelten.

5 Struktur
Zusammengesetzte Muster eines Problemkreises besitzen eine charakteristische *Struktur*.

6 Ähnlichkeit
Zwei Muster besitzen ähnliche Bedeutung genau dann, wenn ein geeignet definiertes Abstandsmaß zwischen ihren Merkmalrepräsentationen einen kleinen Wert annimmt.

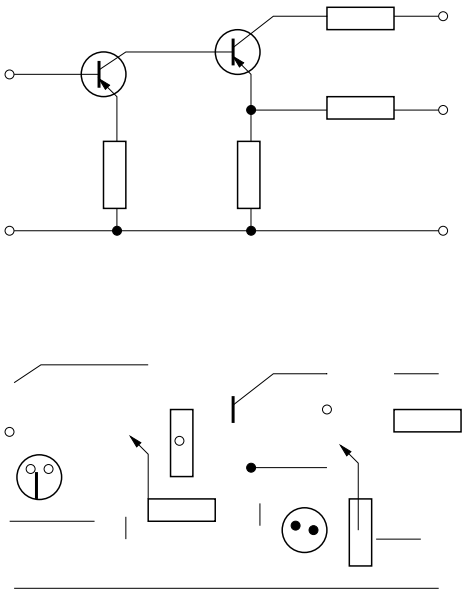
Kompaktheit

Zwei Musterklassen im $\mathbb{R}^2$



Komposition und Struktur

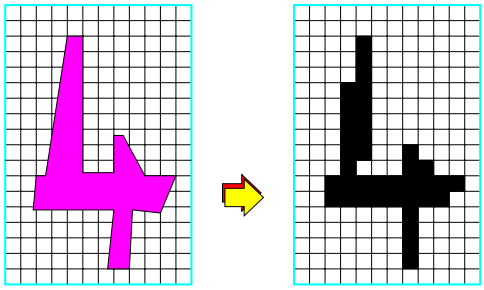
Linienzeichnungen elektrischer Schaltpläne



Maschinelle Mustererkennung arbeitet *digital*, d.h. es gibt grundsätzlich nur *endlich viele* verschiedene Muster eines Problemkreises Ω.

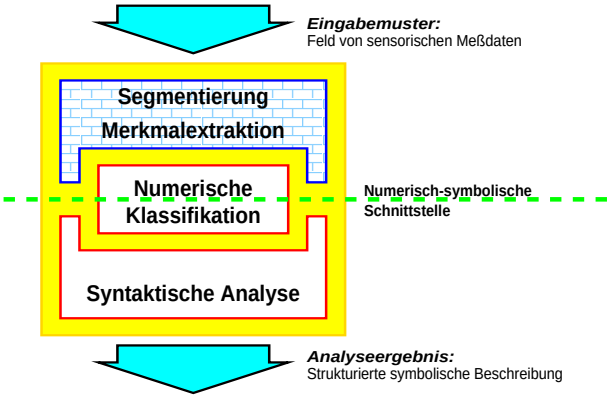
SCHABLONENVERGLEICH

Speichere alle Muster.
Klassifikation durch Vergleich eines Eingabemusters mit allen bislang gespeicherten Mustern.



Es gibt $2^{18 \cdot 12} \approx 10^{65}$ viele binäre Rasterbilder des Formats 18×12 — Mustererkennung durch Schablonenvergleich erfordert **astronomischen** Aufwand !

Architektur eines Musteranalysesystems



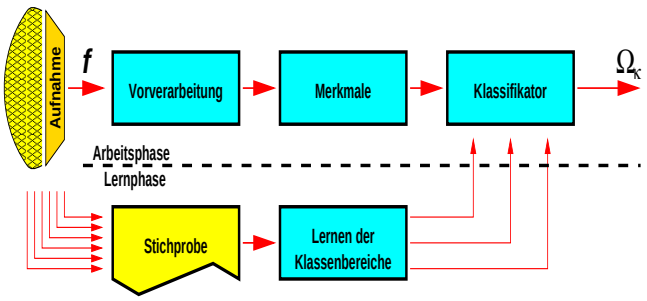
Merkmalgewinnung
Aus den rohen Sensordaten werden aussagekräftige Merkmale berechnet

Segmentierung
Zusammengesetzte Muster werden in einfachere Bestandteile zerlegt

Klassifikation
Merkmalbündel (Zahlen) werden auf Klassennamen (Symbole) abgebildet

Syntaktische Analyse
Der symbolischen Musterannotation werden kontextuelle Beschränkungen auferlegt

Architektur eines Klassifikationssystems



- die Sequenz der Verarbeitungsschritte ist **fest** und nicht **datenabhängig**

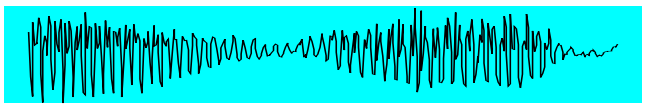
⇧ einfache und übersichtliche Systenarchitektur

⇧ jedes Modul kann für sich optimiert werden

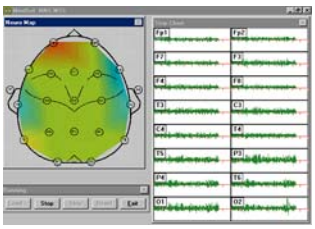
⇩ die Fehler pflanzen sich ungehindert nach oben fort

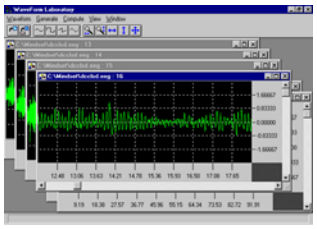
Einkanalige Zeitreihen $f(t)$

SCHALL (Geräusch, Musik, Sprache)



BIOSIGNALE
Elektrokardiogramm (EKG)
Elektroenzephalogramm (EEG)
Elektromyogramm (EMG)

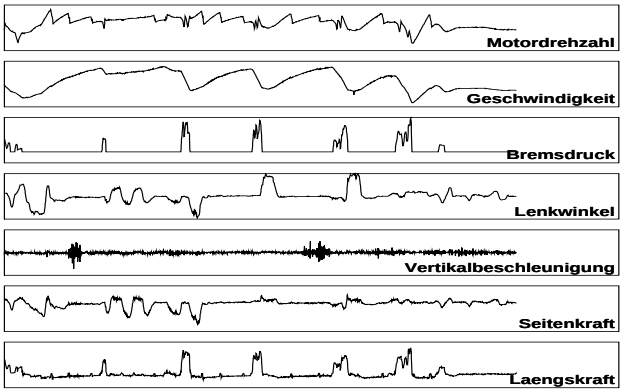




HANDSCHRIFT (nach *on-line* Erfassung)

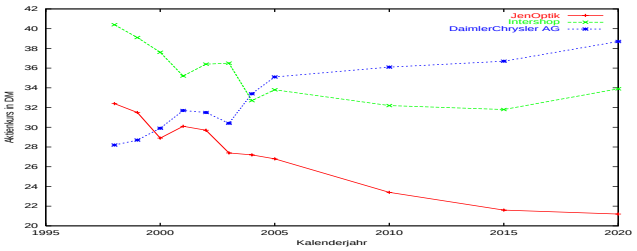
Mehrkanalige Zeitreihen $f(t) = (f_1(t), \ldots, f_M(t))$

MESSWERTREIHEN (Kraftfahrzeugtest)



METEOROLOGISCHE MESSDATEN, ÖKOSYSTEM

BÖRSENKURSE



BILDER (2D, statisch) $f(x, y)$

Reflektionsbilder

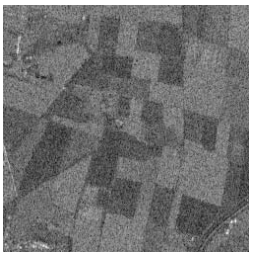
Darstellung von **Objektoberflächen**

FERNSEHKAMERA (schwarzweiß, grau, farbig)

Szene mit Lüfterrad

Lockheed F–16 Jäger

RADARAUFNAHMEN



SAR — Synthetic Aperture Radar
Thatford Forrest, England, August 1989
$12m$ Auflösung
Mikrowellenreflektionsbild
nacht- und wolkenunempfindlich

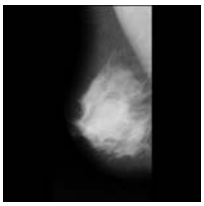
MULTISPEKTRALAUFNAHMEN

Landsat Thematic Mapper (Auflösung $30m$)
Kanäle: blau, grün, rot und 3× Infrarot

Projektionsbilder

Projektion von **Objektvolumina**

RÖNTGENAUFNAHMEN

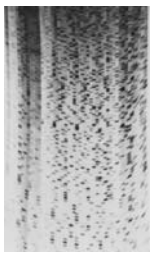


Röntgenmammographie
hell = wenig Strahlung
(Knochen, Fettgewebe)

ULTRASCHALL

Schnitt durch einen Schafrücken
(Hautpartie oben, Rippen unten)
starke Reflektion an Gewebegrenzen

ELEKTROPHORETOGRAMME

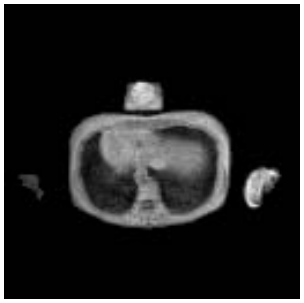


Autoradiograph zur DNA-Sequenzierung
radioaktiv markierte Proteine
Migration der Proteine durch ein Gel von unten nach oben mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten
Bildgebung mit photographischer Platte

Tomogramme

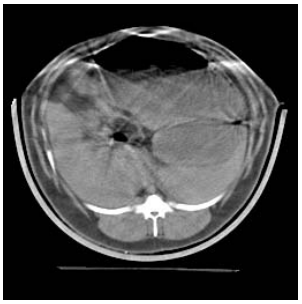
Erfassung von **Objektquerschnitten**

MAGNETRESONANZBILDER



Magnetresonanz/Kernspin-Tomographie
MR-Protonendichtebild
weibliche Brust (von oben)
kubisches Kalibrationsobjekt zwischen den Brüsten
Untersuchung der Brustvolumenänderung im menstrualen Zyklus

RÖNTGENTOMOGRAPHIE



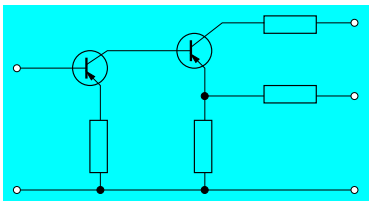
Röntgencomputertomogramm
Querschnitt durch die Thorax eines (lebenden) Schafes
Rekonstruktion aus mehreren Richtungsbildern
automatische Messung der Fett/Muskelgewebeproportion

Schematisierte Bilder

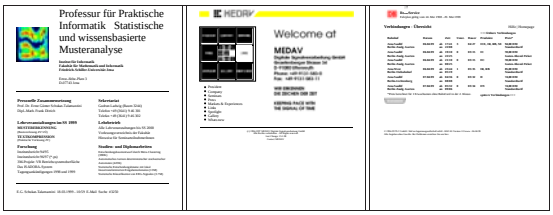
Konventionen zur Darstellung bestimmter Sachverhalte

KARTEN (Landkarten, Wetterkarten, Straßenkarten)

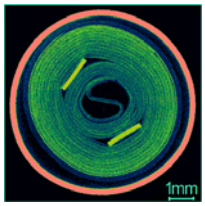
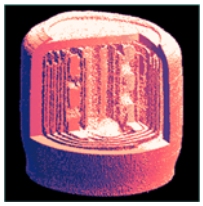
PLÄNE (Schaltpläne, Konstruktionszeichnungen)



DOKUMENTE



Volumenbilder $f(x, y, z)$

Röntgenbild	Schnittbild	3D-Rekonstruktion
		

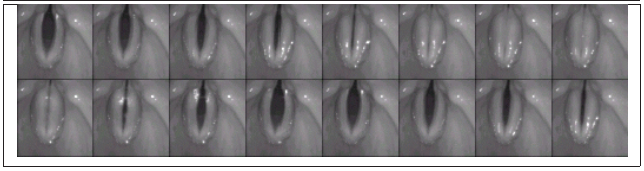
μ-Tomogramm eines Kondensators

http://www.microphotonics.com/skymto.html

Bildfolgen $f(x, y, t)$

Videosequenz von Glottisbewegungen (Hochgeschwind.-Kamera)

http://www.rrze.uni-erlangen.de/med/phoni/pp_glott.htm



Volumenbildfolgen $f(x, y, z, t)$

Medizinische Bildverarbeitung

CT-Sequenzen der Herz- oder Gehirntätigkeit

INDUSTRIE
Qualitätskontrolle (visuell, Ultra/Schall)
Fertigungsautomatisierung, Mikro- und Nanotechnik

MEDIZIN
Bildverarbeitung (Röntgen, MR, szintigraphisch, mikroskopisch)
Biosignale (EKG, EEG, EMG)
Minimalinvasive Chirurgie, Epidemiologie, Virologie

ERDFERNERKUNDUNG
Kamera, Multispektralabtaster, SAR
Kartographie, Ozeanographie, Ökologie, Geologie, Agrikultur

DOKUMENTE
Zeichenerkennung (OCR), Dokumentenanalyse
Digitalisierung von Karten, Plänen
Handschriftleser (Palmtop)

MOBILE ROBOTER
Autonome Fahrzeuge (Land/Wasser/Luft) in gefährlicher Umgebung
Unbemannte Fabrik
Serviceroboter (Haushalt, Lager, Verkauf, Reinigung, Klinik)

NATURWISSENSCHAFTEN
Mikrobiologie, Genetik (DNA-Sequenzierung)
Massenspektrogrammanalyse zur chemische Strukturaufklärung
Astrophysik, Astronomie
Materialwissenschaften, Kunststoffchemie

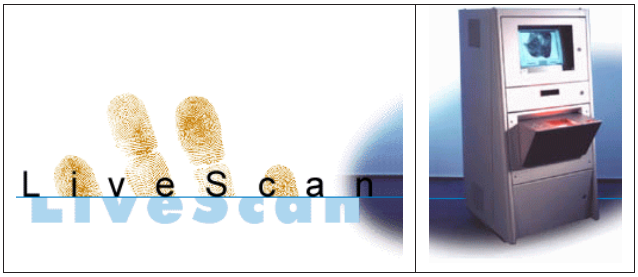
SPRACHVERARBEITUNG
Diktiersysteme, Kommandosysteme
(telefonische) Auskunftssysteme

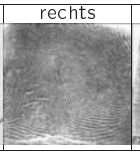
ZUGANGSKONTROLLE, KRIMINALISTIK
Sprecheridentifikation, Sprecherverifikation
Unterschriftenverifikation
Gesichter, Augenhintergrund, Fingerabdruck

BILDVERARBEITUNG
http://www.dai.ed.ac.uk/CVonline/applic.htm

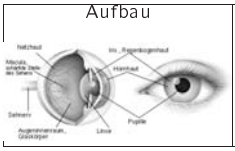
Zugangskontrolle und Authentifizierung

FINGERABDRÜCKE



Bogen	links	rechts	Dach	Schlinge
				

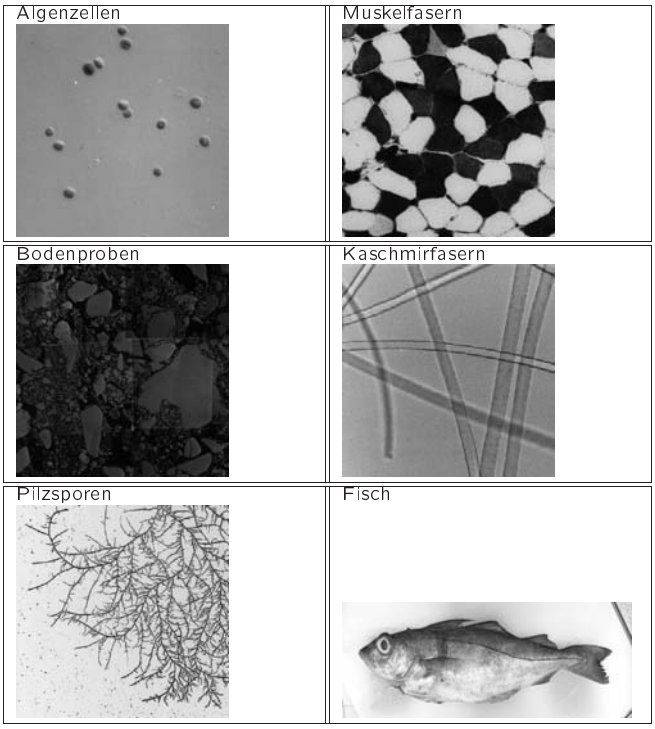
AUGENHINTERGRUND

Aufbau	links	Retina
		

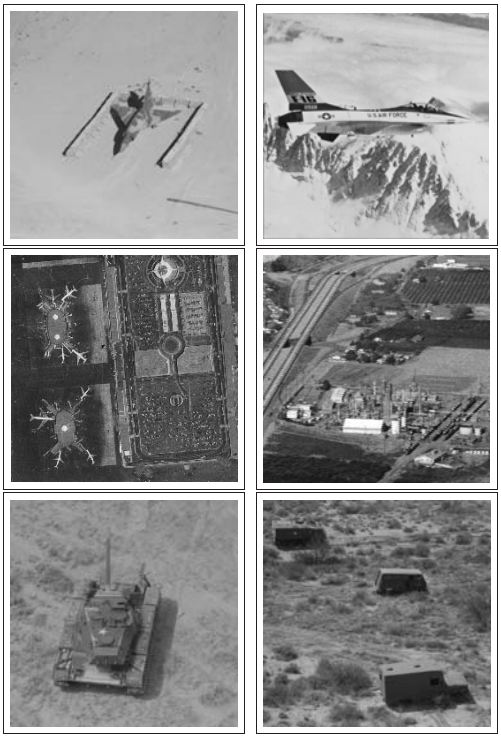
STIMME

GESICHT

Biologische Bildverarbeitung



Internationale Friedensmissionen



Zusammenfassung

Mustererkennung ist die maschinelle Interpretation von Mustern.

Muster sind Datenfelder sensorischer Meßwerte.

Muster besitzen unterschiedliche **Größe**, **Dimension** und physikalische **Substanz**.

Komplexe Muster sind aus **einfachen** Muster zusammengesetzt.

Die (richtige) Interpretation eines Musters ist **aufgabenabhängig**.

Die Interpretation erfolgt in einer **formalen** (symbolischen Beschreibungs-) **Sprache**.

Maschinelle Simulationen menschlicher **Wahrnehmungsaufgaben** — z.B. Bild- und Sprachverstehen — sind Beispiele für Mustererkennung.

Heutige Mustererkennungssysteme **lernen automatisch** aus Beispieldaten.

Modelle sind endliche Erzeugungssysteme von Musterklassen oder ihren Grenzen.

Komplexere Mustererkennungsaufgaben müssen ggf. in **Teilaufgaben zerlegt** werden:

- Vorverarbeitung
  Merkmalgewinnung,
  Segmentierung
  Klassifikation,
  syntaktische Analyse