

# Moderne Methoden der KI: Maschinelles Lernen

Prof. Dr. sc. Hans-Dieter Burkhard  
Vorlesung Sommer-Semester 2007

## 1. Einführung:

Definitionen  
Grundbegriffe  
Lernsysteme

# Maschinelles Lernen

- Lernen: Grundbegriffe
- Lernsysteme
- Konzept-Lernen
- Entscheidungsbäume
- Fallbasiertes Schließen
- Reinforcement-Lernen

Mitchell: Machine Learning.  
Lenz et al:  
Case-Based Reasoning Technology,  
From Foundations to Applications.  
Quinlan:  
C4.5: Programs for Machine Learning.

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

2

# Definitionen: Was ist Lernen?

*Definition nach "Metzler Philosophie Lexikon":*

Jede Form von Leistungssteigerung, die durch gezielte Anstrengung erreicht wurde.

bzw. als "psycholog. Sicht":

Jede Verhaltensänderung, die sich auf Erfahrung, Übung oder Beobachtung zurückführen lässt

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

3

# Was wird verändert - 2 Varianten (nach Metzler)

## (1) Stimulus-Response-Verhalten (Assoziationen)

- klassische Konditionierung:  
Kopplung an bestehendes Verhalten: Pawlowscher Hund
- operante Konditionierung:  
spontane Reaktion bewerten: verstärken/abschwächen

## (2) Kognitive Repräsentation ändern

- Umweltmodell
- Problemlösungsstrategien
- Motive
- Gefühle
- . . .

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

4

# Definitionen: Was ist Lernen?

*Definition nach "Meyers Großes Taschenlexikon (1992)":*

Durch Erfahrung entstandene, relativ überdauernde Verhaltensänderung bzw. -möglichkeiten.

(Prozess), der bestimmte Organismen, jedoch auch technische Anlagen (z.B. Automaten) befähigt, auf Grund früherer Erfahrungen und durch organ. Eingliederung weiterer Erfahrungen situationsangemessen zu reagieren.

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

5

# Formen des Lernens (nach Meyer)

- Einsichtiges Lernen (Bewußtsein erforderlich)
- Dressur
- Versuch und Irrtum

Menschl. Lernen ist eine überwiegend einsichtige, aktive, sozial vermittelte Aneignung von Kenntnissen und Fertigkeiten, Überzeugungen und Verhaltensweisen.

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

6

## Formen des Lernens (nach Meyer)

4 Phasen menschl. Lernens:

- Vorbereitung (Wahrnehmung)
- Aneignung (Assoziation als Verknüpfungsprozeß)
- Speicherung (Kodierung, Gedächtnis)
- Erinnerung (Dekodierung, Reaktion)

## Arten/Strukturen des Lernens (nach Meyer)

- Wahrnehmungslernen (Gehörschulung)
  - motorisches Lernen (Schwimmen)
  - verbales Lernen (Vokabeln)
  - kognitives Lernen (Begriffe, Regeln)
  - soziales Lernen (soziales Verhalten)
- 
- Signal-Lernen, Verstärkungslernen
  - Imitationslernen
  - Begriffs-/Konzeptlernen
  - Strukturierung
  - Problemlösen

## Voraussetzungen für Lernbarkeit

- Gleiches Verhalten in gleicher Situation erfolgreich

Allgemeiner:

- Ähnliches Verhalten in ähnlicher Situation erfolgreich

Möglichkeit zur Verallgemeinerung:  
Allgemeine Gültigkeit des an Beispielen Gelernten  
(im entsprechenden Bereich)

## Aufgabe

Setzen Sie die Zahlenreihe fort:

1, 2, 4, . . .

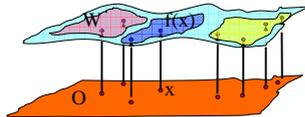
Fragen:

- Was wurde gelernt?
- Warum gerade das?

Allgemeine Gültigkeit des an Beispielen Gelernten

## Maschinelles Lernen

- Funktion  $f: O \rightarrow W$

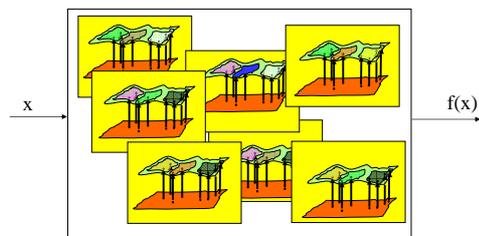


- Beispielwerte bekannt
- allgemeine Berechnung unbekannt/zu komplex



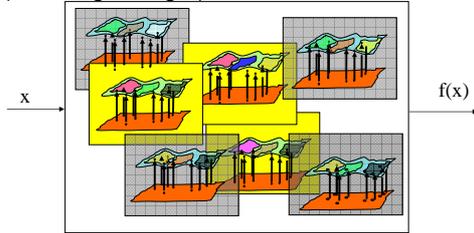
## Maschinelles Lernen

- Alternativen („Hypothesen“) für Berechnung



## Maschinelles Lernen

- Test der Hypothesen anhand der Beispiele („Trainingsmenge“)



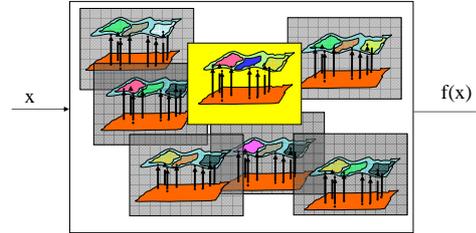
H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

13

## Maschinelles Lernen

- Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)



H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

14

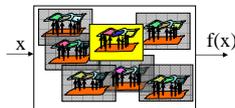
## Maschinelles Lernen

Ziel: Korrekte Hypothese finden (Suchproblem)

Methode:

Beispiele („Erfahrungen“) verallgemeinern

Verallgemeinerung = Annahmen über alle Werte



H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

15

## Maschinelles Lernen

**Bezug zu:** Statistik, Optimierung, KI, Kognition, Information, Komplexität, Regelung/Steuerung, Robotik, Philosophie, Psychologie, Biologie, ...

**Verfahren:** Konzeptlernen, Entscheidungsbäume, Regeln, Fallbasiertes Schließen, Neuronale Netze, Bayessches Lernen, Genetische/Evolutionäre Algorithmen, Verstärkungslernen (Reinforcement L.), ...

**Anwendungen:** Spracherkennung, Schrifterkennung, Kreditkartenmißbrauch, Data Mining, Profiling, Scheduling, Sensorik und Aktorik von Robotern, ...

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

16

## Grundbegriffe 1

- Individuelles Lernen
  - Programm, Roboter
  - (Ergebnis übertragbar: kopieren)
- Gruppe/Organisation
  - Individuelles Lernen innerhalb Gruppe
  - Struktur, Beziehungen der Gruppe verändern
  - Austausch von Individuen (Evolution)

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

17

## Grundbegriffe 2: Vorgaben

- Beispiele (Lernmenge)
- Bewertung
  - Mit Lehrer (supervised)
  - Ohne Lehrer (unsupervised)
- Credit Assignment Problem:
  - Was ist korrekt/besser (was wird „belohnt“)
- Verallgemeinerung
  - Verhalten auf nicht präsentierten Beispielen
- Grundstrukturen
  - vorgegebene Repräsentationen: Hypothesen

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

18

## Definition: Maschinelles Lernen

Definition von Tom M. Mitchell "Machine Learning":

A Computer Program

is said to **learn** from experience  $E$  with respect to some class of tasks  $T$  and performance measure  $P$ , if its performance at tasks in  $T$ , as measured by  $P$ , improves with experience  $E$ .

- $T$ : Menge von Aufgaben  $t$
- $E$ : Beispiele bzgl.  $T$
- $P$ : globale Leistungsfähigkeit (Gütemaß)

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

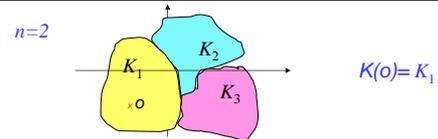
19

## Beispiel: Klassifikation

Menge  $O$  von Objekten  $o$   
mit jeweils  $n$  Merkmalen  $m(o) = [m_1, \dots, m_n] \in M$

Klasseneinteilung von  $O$ :  $K = K_1, \dots, K_k$

Klasse von  $o$ :  $K(o)$



H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

20

## Beispiel: Klassifikation

- $T$ : Menge von Aufgaben  $t$

Klassifikator gesucht:  $\kappa: M \rightarrow K$

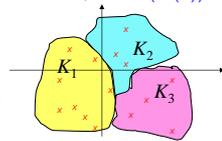
Aufgabe  $t$ : Klassifikation  $\kappa(m(o))$  für jeweils ein Objekt  $o$

Bewertung: Klassifikation **korrekt**, falls  $\kappa(m(o)) \in K(o)$

- $E$ : Beispiele bzgl.  $T$

Paare:

Aufgabe  $m(o)$  / Lösung  $K(o)$



- $P$ : globales **Korrektheitsmaß** des Klassifikators  $\kappa$

z.B. Anzahl korrekter Klassifikationen / Gesamtzahl

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

21

## Spezifikation eines Lernsystems

Auswahl aus zahlreichen Möglichkeiten bzgl.

- Aufgabenmenge  $T$
- Gütemaß  $P$
- Erfahrung  $E$  (woraus soll **System** lernen):
  - Information
  - Navigation
  - Verteilung
- Verfahren (was soll **System** lernen)
  - inhaltlich
  - formale Repräsentation
- Algorithmus (wie soll **System** lernen)

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

22

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben  $T$

Gütemaß  $P$

Erfahrung  $E$

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Lernverfahren

Auswahl aus Möglichkeiten bzgl.

- Aufgabenmenge  $T$
- Gütemaß  $P$
- Erfahrung  $E$  (woraus lernt **System**):
  - Information
  - Navigation
  - Verteilung
- Verfahren (was soll **System** lernen)
  - inhaltlich
  - formale Repräsentation
- Algorithmus (wie soll **System** lernen)

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

23

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben  $T$  •  $t$ : individuelle Aufgabe aus Menge  $T$

$V(t)$ : Lösung von  $t$  gemäß Verfahren  $V$

Gütemaß  $P$   $B(V(t))$ : Bewertung von  $V(t)$

optimale Lösung wäre  $V^*(t)$

(Verfahren  $V^*$  ist unbekannt oder zu aufwendig)

Erfahrung  $E$

Information

Navigation

Verteilung

Verfahren

inhaltlich

formal

Lernverfahren

• Gütemaß  $P$ :  
wieviele Aufgaben  $t$  werden durch  $V$  wie gut gelöst

H.D.Burkhard Sommer-Semester 2007 MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

24

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

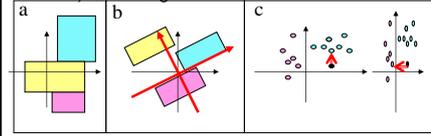
Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

- Beschränkung des Suchraumes:
  - Umfang der Aufgabenmenge T
  - Strukturierung der Aufgaben  $t \in T$  (Feintuning in grob entwickelter Struktur)
- Merkmale auswählen
  - a) Reduktion von Merkmalen (Redundanz)
  - b) Reduktion von Merkmalen (Transformation)
  - c) Skalierung



H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

25

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

- Information: Beispiele, Fälle  $[t, l, b]$   
t: Aufgabe, l: Lösung, b: Bewertung
  - nur *positive* Beispiele  $[t, l, +]$  ("gelöste Fälle")
  - *bewertete* Beispiele:  $[t, l, b]$
  - direct feedback für Bewertung b
    - als Bestandteil des Falles
    - als unmittelbare Antwort
  - durch Lehrer (supervised learning)
  - indirect feedback für Bewertung b
    - als Antwort auf mehrere Entscheidungen
- Credit Assignment Problem

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

26

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

- Navigation, Auswahl
  - vorgegebene Fälle
  - zufällige Präsentation
  - gezielte Auswahl des Lerners
- Verteilung:
  - Wie repräsentativ sind Fälle
    - insgesamt
    - bzgl. späterer Anwendung

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

27

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

- "Lösungen" (Wertebereich von V), z.B.:
    - konkreter Lösungsvorschlag
    - Nützlichkeiten alternativer Lösungen
      - Start mit "intuitiver" Anfangsnützlichkeit
      - Ziel: Verbesserung durch Lernen: Approximation des optimalen Verfahrens  $V^*$
  - formale (variierbare) Berechnung von V
    - Auswahl von Merkmalen  $m_i$  für Aufgaben t (Definitionsbereich von V)
    - parametrisierte Berechnungsvorschrift
- z.B. gewichtete Summe:  

$$V(t) = w_1 m_1 + w_2 m_2 + \dots + w_m m_m$$
 (Variation der Parameter  $w_i$  beim Lernen)

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

28

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

- Anpassung der Berechnungsvorschrift für V, so daß V die Trainingsbeispiele möglichst gut annähert**
- **Anpassung:**
    - Parametervariation
    - Übergang zu einer neuen Hypothese
    - Konstruktion einer neuen Hypothese
  - **Maß für Annäherung:**
    - Übereinstimmung auf Trainingsdaten
    - Fehlerminimierung bzgl. Trainingsdaten
    - Übereinstimmung mit Vorwissen

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

29

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben T

Gütemaß P

Erfahrung E

Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

### Lernsystem als Suchsystem

- Zustände: Hypothesen für Zielfunktion, z.B.:
  - numerische Funktionen
  - Klassifikatoren
  - Neuronale Netze
  - Entscheidungsbäume
  - Regelsysteme
- Operatoren: Übergang zu neuer Hypothese anhand von Trainingsbeispielen
- Zielzustand: korrekte/optimale Hypothese (Approximation der Zielfunktion)

### Algorithmus als Suchverfahren (nach optimaler Lösung)

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

30

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

- iteriertes Vorgehen
- Testbeispiele zur Evaluierung
- Abbruchkriterien

Gütemaß **P**

Erfahrung **E**  
Information  
Navigation  
Verteilung

Ein Schema für ein iteriertes Vorgehen

Schritt **i**:

- 1) Aufgabe **t** erzeugen
- 2) Lösungsvorschlag  $V_{i+1}(t)$  mit Verfahren  $V_{i+1}$  berechnen,
- 3) Bewertung  $b(V_{i+1}(t))$  (z.B. durch Lehrer)
- 4) mit Beispiel  $[t, V_{i+1}(t), b(V_{i+1}(t))]$  neues Verfahren  $V_i$  erzeugen.  
Weiter bei Schritt **i+1**.

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

31

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

Generalisierung:

Gütemaß **P**

Das Verfahren **V** wird nur anhand der Trainingsbeispiele optimiert (und anhand von Testbeispielen evaluiert).

Erfahrung **E**  
Information  
Navigation  
Verteilung

Ziel ist ein optimales Verfahren für alle Aufgaben **t**.

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

32

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

Güte des Lernsystems

Gütemaß **P**

abhängig von allen **Design-Entscheidungen** sowie folgender **Hintergrundannahme**:

Erfahrung **E**  
Information  
Navigation  
Verteilung

Die nicht betrachteten Aufgaben **t** verhalten sich *irgendwie ähnlich* wie die bei der Konstruktion verwendeten Aufgaben.

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Problem: Beachten der zur Generalisierung getroffenen Annahmen (Ähnlichkeit,  $\Rightarrow$  inductive bias, ...).

Algorithmus

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

33

## Spezifikation eines Lernsystems

Aufgaben **T**

Beispiel:

Gütemaß **P**

Pass-Spiel lernen

Erfahrung **E**  
Information  
Navigation  
Verteilung

Verfahren  
inhaltlich  
formal

Algorithmus

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

34

## Probleme im Maschinellen Lernen

- Mit welchen Algorithmen kann die Zielfunktion am besten aus speziellen Beispielen (Trainingsmenge) gelernt werden?
- Wie kann die Qualität des gelernten Funktion evaluiert werden (Abbruchbedingung, Anforderungen an Trainingsmenge)?
- Wie kann Vorwissen benutzt werden?
- Wie sollen die Trainingsbeispiele präsentiert werden (Reihenfolge, Korrektheit)?
- Wie kann das Lernen vereinfacht werden (Reduktion von Komplexität, Veränderung der Darstellung)?

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

35

## ZUSAMMENFASSUNG

- Lernen ist eine wesentliche Eigenschaft von Organismen.
- Lernen spielt in vielen Disziplinen eine Rolle.
- Maschinelles Lernen ist vielseitig einsetzbar, speziell für unbekannte/schwer beschreibbare/schwer berechenbare Probleme.
- Lernen kann als Suche (nach der besten Hypothese) betrachtet werden.
- Das Training erfolgt mittels ausgewählter Beispieldaten.
- Durch Generalisierung sollen auch nicht trainierte Aufgaben gelöst werden können.
- Ein Lernproblem umfasst genau spezifizierte Aufgaben, ein Gütemaß und Trainingsbeispiele.
- Die Spezifikation eines Lernsystems umfasst viele Entwurfsentscheidungen.

H.D.Burkhard  
Sommer-Semester 2007

MMKI: Maschinelles Lernen, Einführung

36