

Peipmann · Erkennung von Strukturen und Mustern

Erkennung von Strukturen und Mustern

Grundlagen und Verfahren

von

Rolf Peipmann



Walter de Gruyter · Berlin · New York 1976

ISBN 311 0066033

Lizenzausgabe des Verlages Walter de Gruyter & Co.,
vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner,
Veit & Comp., Berlin 30

© VEB Verlag Technik, Berlin 1975

Printed in the German Democratic Republic

Druckerei: Thomas Müntzer, Bad Langensalza

Bindearbeiten: Lüderitz & Bauer, Berlin

Vorwort

Der Mensch hat in Vergangenheit und Gegenwart Maschinen entworfen und gebaut, die zunehmend wirkungsvoller seine eigenen Fähigkeiten zu unterstützen, zu ergänzen oder zu ersetzen vermögen. Der Wunsch, auch geistige Prozesse zu automatisieren, spielt in jüngster Zeit eine besondere Rolle; wegen der beträchtlichen Schwierigkeiten waren die auf diesem Gebiet erzielten Fortschritte jedoch vergleichsweise gering. Erst mit dem Verfügbarwerden moderner Datenverarbeitungsanlagen änderte sich die Situation. Die Rechner erhielten Fähigkeiten – wie etwa das eigenständige Fällen von Entscheidungen in einem Programmablauf –, die mit menschlichen Eigenschaften verglichen wurden. Das zeigte, daß es möglich und für praktische Anwendungen aussichtsreich wurde, geistige Prozesse zu formalisieren, um sie dann Datenverarbeitungsanlagen zu übertragen. Der sich einstellende Engpaß bei der Datenerfassung und Dateneingabe zwang schließlich sogar dazu, nach Lösungen für die erkennende Eingabe zu suchen. Die Automatisierung geistiger Prozesse wurde damit nicht nur ein reizvolles Forschungsgebiet, sondern eine für bestimmte Anwendungen notwendig zu lösende Aufgabe.

Inzwischen haben bereits die ersten Ergebnisse auf diesem Gebiet volkswirtschaftlichen Nutzen erbracht: Dem Rechner können ohne Lochungsaufwand Daten in Klarschrift eingegeben werden; die automatische Bildverarbeitung dient zum Auswerten von Laboruntersuchungen und Luftbildern; der Arzt wird durch automatische Krankheitsklassifikation unterstützt; durch das Klassifizieren geeigneter Meßdaten ergeben sich die zweckmäßigsten Orte für sonst kostspielige Erdölbohrstellen usw. Es gilt jetzt, die bereits erfolgreichen Anwendungen zu festigen und neue Anwendungsgebiete zu erschließen.

Die technische Erkennung soll dabei dem Menschen Routinearbeiten abnehmen (z. B. durch die Beleglesung als Rechneingabe), Auswertepräzisionen erhöhen (z. B. in der Bildverarbeitung) oder Massenauswertungen verbilligen bzw. überhaupt erst ermöglichen (z. B. bei medizinischen Volksreihenuntersuchungen). Eine besonders wichtige Anwendung wird die technische Erkennung bei vollautomatischen Fertigungsprozessen finden. Die Automatisierung geistiger Prozesse entspricht damit besonders dem Charakter sozialistischer Produktionsverhältnisse, und ihre Ergebnisse können einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Effektivität der Volkswirtschaft leisten.

Der umfassenden volkswirtschaftlichen Nutzung des technischen Erkennens stehen zwei Schwierigkeiten entgegen: Erstens müssen in bestimmten Anwendungsfällen die volkswirtschaftlichen Bereiche erst vorbereitet werden, z. B. durch Einführen einer neuen Betriebsorganisation beim Umstellen von konventioneller Datenerfassung auf Klarschriftlesetechnik. Auf diesem Gebiet

ist noch beträchtliche Arbeit zu leisten; allerdings müssen die hiermit zusammenhängenden Probleme im vorliegenden Buch völlig außer Betracht bleiben. Zweitens bildet die technische Erkennung ein noch keinesfalls abgeschlossenes Forschungsgebiet. Zwar haben sich feste Vorgehensweisen herausgebildet, die in mathematischer Formulierung dargestellt werden können; jedoch sind die Lösungsansätze als Versuche zu betrachten, die weitergeführt werden müssen und noch vieler Verbesserungen bedürfen. Bisher erzielte Lösungen sind daher Anfängererfolge; sie sind in ihrer Leistungsfähigkeit noch begrenzt und mit erheblichem Forschungs- und Entwicklungsaufwand belastet. Ihr ökonomischer Nutzen ist daher nicht immer leicht nachzuweisen – eine Anfangsschwierigkeit, die sicherlich mit fortschreitender Entwicklung überwunden wird.

Die Primärliteratur zur Erkennung ist sehr umfangreich und uneinheitlich im Sprachgebrauch, so daß ihr Schwerpunkte und Wichtungen der Details nur mühsam zu entnehmen sind. Im vorliegenden Buch sollen daher die bestehenden algorithmischen Grundlagen der technischen Erkennung dargestellt werden mit dem Ziel, den vorhandenen Wissensstand möglichst zu ordnen und seine Grenzen sichtbar zu machen, demjenigen Leser, der sich dem Gebiet neu zuwendet, eine Einführung zu vermitteln und dem in der Forschung und Entwicklung Tätigen Anregungen und Hilfsmittel für das Anwenden vorhandener oder für das Suchen neuer Resultate zu geben. Dabei ist eine Verdeutlichung von Zusammenhängen und eine Darstellung der grundsätzlichen mathematischen Formulierung der Algorithmen angestrebt worden, damit für spezielle Anwendungen geeignete Algorithmen abgeleitet und eingeschätzt werden können. Das bedingt, daß auf bestimmte Einzelheiten verzichtet werden muß. So werden zwar für das Verständnis des Ergebnisses wesentliche Ableitungen in ihren Hauptetappen gebracht; in diesem Sinne entbehrliche detaillierte Beweise zu Sätzen müssen jedoch der zitierten Literatur entnommen werden. Auch bezüglich mancher ergänzender Aussagen muß mit Rücksicht auf den Buchumfang auf die Literatur verwiesen werden. Wegen der Vielfalt der Einzelprobleme konnte Prioritäten in der Literatur nicht nachgeforscht werden.

Die im Abschn. 1. dargestellten biokybernetischen Grundzüge der biologischen und technischen Erkennung dienen der Einführung in das Gebiet, einer Erläuterung der im Zusammenhang mit Erkennungsproblemen verwendeten Termini sowie als Grundlage für einen Vergleich zwischen biologischen und technischen Vorgehensweisen. Kerngedanke ist hierbei die Abbildtheorie und deren Übertragen auf technische Systeme: Das Hauptproblem der technischen Erkennung ist es, ein geeignetes automateninternes Abbild der externen Objekte zu entwickeln.

Abschn. 2. enthält die mathematischen Formulierungen von Erkennungsalgorithmen ohne ausdrücklichen Bezug auf eine bestimmte Art der zu erkennenden Objekte, so daß sie im Prinzip für sämtliche spezielle Anwendungsfälle dienen können. Drei Unterabschnitte behandeln Vektoren, Zeichenreihen und Listen als die drei grundsätzlichen, für automateninterne Abbilder verwendeten Datenstrukturen.

Im Abschn. 3. werden als spezielles Beispiel die digitalen Verfahren bei der Erkennung optischer Objekte betrachtet. Auf technische Realisierungen

der Algorithmen wird nicht eingegangen, da außer der Verwendung wellenoptischer Mittel zum Bilden von Korrelationsmaßen und der Verwendung von Schwellwertschaltungen zum Erzeugen linearer und stückweise linearer Funktionen gegenwärtig konventionelle elektronische Schaltungen oder die Programmierung auf einem Universalrechner vorherrschen.

Mathematisches Fach- oder Hochschulwissen ist zum Verständnis der Ableitungen völlig ausreichend. Das Buch soll Forscher und Entwickler, aber auch Studenten und allgemein Interessierte ansprechen, die sich mit technischer Erkennung (optischer und akustischer Zeichenerkennung, grafischer Rechneingabe, Bildverarbeitung, Signalentdeckung, technischer und medizinischer Diagnose, Prozeßsteuerung usw.) befassen.

Für viele fördernde Diskussionen sowie für kritische Hinweise zum Manuskript möchte ich meinen Kollegen und Mitarbeitern herzlich danken, mein besonderer Dank gilt dabei den Herren Dipl.-Ing. W. Görner und Dipl.-Ing. W. Hanisch. Ebenso danke ich Frau Hegewald für die sorgfältige Manuskripterstellung und nicht zuletzt dem VEB Verlag Technik, insbesondere Herrn Belter, für die bereitwillige Unterstützung des Vorhabens.

Rolf Peipmann

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen und Symbole	11
1. Biologische und technische Erkennung	19
1.1. Biologische Erkennungssysteme	19
1.1.1. Das Problem der Erkennung	19
1.1.2. Abbildtheorie	21
1.1.2.1. Empfindungen und Wahrnehmung	22
1.1.2.2. Begriffe und Aussagen	23
1.1.3. Spezielle biologische Funktionsprinzipien	24
1.1.3.1. Bestandteile des optischen Systems	25
1.1.3.2. Vorgänge im Zentralnervensystem	29
1.1.3.3. Bionische Probleme	30
1.1.4. Sprache als Zeichensystem	32
1.2. Technische Erkennungssysteme	34
1.2.1. Praktische Erkennungsaufgaben	35
1.2.2. Struktur technischer Erkennungsprozesse	45
1.2.2.1. Zusammenhang von Erkennen und Problemlösen	45
1.2.2.2. Bestandteile und Abläufe von Erkennungsprozessen	45
1.2.2.3. Grundaufgaben der Erkennung	50
1.2.2.4. Lernen	54
1.2.3. Datenstrukturen als Träger des automateninternen Abbilds	57
2. Theoretische Grundlagen der technischen Erkennung	58
2.1. Vektorkonzept	59
2.1.1. Vektordarstellung von Objekten	59
2.1.2. Numerische Klassifikationsverfahren	64
2.1.2.1. Leistungskriterien für Unterscheidungsfunktionen	64
2.1.2.2. Realisierungsprobleme	71
2.1.2.3. Auswertung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen	76
2.1.2.4. Formale Ansätze für Unterscheidungsfunktionen	87
2.1.2.5. Verwendung von Abstandsmaßen	103
2.1.3. Merkmalstransformationen	111
2.1.3.1. Lineare Transformationen	111
2.1.3.2. Nichtlineare Transformationen	129
2.1.4. Merkmalsbewertungen	134
2.1.4.1. Wahrscheinlichkeitsmaße	135

2.1.4.2.	Informationsmaße	136
2.1.4.3.	Ballungsmaße	139
2.1.5.	Sequentielle Merkmalsverarbeitung	140
2.1.6.	Numerische Ballungsverfahren	142
2.1.6.1.	Zusammengehörigkeitskriterien	143
2.1.6.2.	Ballungsstrategien	148
2.1.6.3.	Gütemaße zur Bewertung von Ballungen	159
2.2.	Linguistisches Konzept	161
2.2.1.	Darstellung von Objekten als Zeichenreihen	161
2.2.2.	Konstituentenstruktur-Grammatiken	163
2.2.2.1.	Allgemeine Eigenschaften	163
2.2.2.2.	Typeneinteilung	168
2.2.3.	Endliche abstrakte Automaten	170
2.2.3.1.	Automatenfunktionen	170
2.2.3.2.	Reguläre Ereignisse	174
2.2.4.	Klassifikation von Zeichenreihen	177
2.2.4.1.	Konstruktion von klassifizierenden Akzeptoren	177
2.2.4.2.	Verwendung von Abstandsmaßen	184
2.3.	Strukturkonzept	187
2.3.1.	Strukturelle Objektdarstellung	187
2.3.2.	Aufbau der automateninternen Darstellung	189
2.3.2.1.	Struktur von Begriffen und Begriffsnetzen	189
2.3.2.2.	Realisierung durch Listenstrukturen	196
2.3.3.	Erkennungsaufgaben	204
2.3.3.1.	Klassifikation	204
2.3.3.2.	Objektbeschreibung	207
3.	Digitale Verfahren der optischen Erkennung	212
3.1.	Bildwandlung	213
3.1.1.	Wandlertechnik	213
3.1.2.	Grundbegriffe der digitalen Bildverarbeitung	218
3.1.2.1.	Bildfunktionen	218
3.1.2.2.	Bildverarbeitungsoperationen	230
3.2.	Vorverarbeitung	233
3.2.1.	Transformation in neue Bildtypen	233
3.2.1.1.	Gradientenbilder	233
3.2.1.2.	Konturrichtungsbilder	234
3.2.1.3.	Abstandsbilder	236
3.2.2.	Konturhervorhebung	237
3.2.3.	Störungsverminderung und Linienverdünnung	238
3.3.	Objekttrennung	241
3.3.1.	Auswertung von Flächen	243
3.3.1.1.	Zeilenvergleich	243
3.3.1.2.	Teilflächenvergleich	246

3.3.2.	Auswertung von Konturen	249
3.3.2.1.	Konturverfolgung	250
3.3.2.2.	Formfilter	256
3.3.3.	Skelettbildung	261
3.4.	Bildauswertung	262
3.4.1.	Klassifikation von Schriftzeichen	264
3.4.1.1.	Spezifische Probleme	264
3.4.1.2.	Angewendete Verfahren	267
3.4.2.,	Strukturanalyse von Bildern	290
3.4.2.1.	Bildgrammatiken nach dem Konstituentenprinzip	292
3.4.2.2.	Strukturelle Interdarstellungen	295
Anhang		303
Literaturverzeichnis		320
Sachwörterverzeichnis		340

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen und Symbole

A	Flächeninhalt; nichtterminales Symbol
a	Elementarsymbol; Grauwert eines Bildpunktes; Element allgemein
\underline{A}	Transformationsmatrix
\mathcal{A}	abstrakter Automat
\underline{a}	Spaltenvektor von \underline{A}
\ddot{a}, \ddot{A}	Ähnlichkeitsmaß
b	Gewichtsfaktor; Elementarsymbol; Element allgemein; Zeichenreihenelement in einer Kettenkodendarstellung
B	allgemeiner Verteilungsparameter; nichtterminales Symbol; Menge der Bildfeldpunkte; Menge von Graphen- knoten
b_{ij}	Gewichtsfaktor
\underline{b}	Parametervektor (\underline{b}^* wahrer Wert)
C_i	Klasse i ; Ballung i
c	Parameter beim Fehlerkorrekturverfahren
D	Abstand
$d(a, b)$	Metrik, Abstandsfunktion
D_{ij}, d_{ij}	Abstand zwischen den Elementen i, j vor bzw. nach einer nichtlinearen Transformation; kontextbezogenes Abstands- maß
E	reguläres Ereignis; Eulerzahl; Menge der z. B. bei der Skelettierung entfernten Objektpunkte
$E \{ \dots \}$	Erwartungswert
\underline{E}	Einheitsmatrix
\underline{e}	Einheitsnormalvektor einer Ebene
F	Gütemaß; reguläres Ereignis
$F(a)$	empirische Verteilungsfunktion für Grauwerte

$f(\underline{x})$	Dichtefunktion
f	Marke für eine Fläche
G	Grammatik; Menge der Grauwerte; Graph
G_O	Menge der Objektgrauwerte
G_H	Menge der Hintergrundgrauwerte
G_M	Menge der zu Markierungszwecken benutzten Grauwerte
$g_i(\underline{x})$	Unterscheidungsfunktion für Klasse C_i
$g_{ij}(\underline{x})$	Trennfläche zwischen C_i und C_j
\underline{g}	Hilfsfunktion bei der stochastischen Approximation
H	Entropie; Menge der Hintergrundbildpunkte
$h(\dots)$	Funktion als Nebenbedingung bei der Karhunen-Loeve-Entwicklung
I	Informationsgehalt
i	Zeilennummer im Bildraster
j	Spaltennummer im Bildraster
j_i	Anfangsabszisse einer Objektpunktgruppe in Zeile i
K	Kernfunktion bei der Parzenentwicklung; Gesamtmenge der Graphenknoten
k_i	Klassenkonstante bei der Regressionsanalyse
\underline{K}	allgemeine Kovarianzmatrix
$\tilde{\mathcal{R}}$	klassifizierender Akzeptor
L	mittlerer Verlust; Sprache; Anzahl der Löcher in einem Objekt
l	Länge einer Zeichenreihe; interner Listenname; Linienlänge bei Kettenkodendarstellung; Länge einer Objektpunktgruppe; Marke für eine Linie
l_i	Zeiger zum nächsten Datenelement einer Liste
l_{ij}	Verlustziffer bei vorliegender Klasse C_i und gefällter Entscheidung C_j
M	Menge allgemein; Zustandsmenge in abstrakten Automaten; Flächenmoment
m	Anzahl der Klassen
\underline{M}	Momentenmatrix

\underline{m}	Stichproben-Mittelwertsvektor über alle Klassen
\underline{m}_i	Mittelwertsvektor der Grundgesamtheit von C_i
N	Anzahl der Objekte; Menge interner Listennamen
n	Anzahl der Vektorkomponenten; Bildpunktnachbar
n_j	Identifizierungsgröße für das Datenelement x_j bei Listen
n_F, n_L, n_K	Anzahl der Flächen, Linien bzw. Kanten zur Bestimmung der Eulerzahl
n_g, n_u	Anzahl der Reihenelemente mit geradzahligem bzw. ungeradzahligem Index bei der Kettenkodendarstellung
$n[0 \ 1]$	Anzahl der im Bildfeld vorhandenen Paare horizontal aneinandergrenzender Bildpunkte mit den Werten 0 und 1
\underline{N}	Stichproben-Kovarianzmatrix der \underline{n}
\underline{n}	Vektordifferenz bei Ballungstransformationen
P	Wahrscheinlichkeit; Menge der grammatischen Regeln; allgemeine Bildpunktmenge
P_i	A-priori-Auftretenswahrscheinlichkeit von C_i
P_c, P_f, P_r	Richtigerkennungs-, Fehler-, Rückweisungsrate
$P(\alpha, \beta)$	Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten von α und β
$P(\alpha \beta)$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von α , wenn β vorliegt (bedingte Wahrscheinlichkeit)
p	Wort; Zeichenreihe; Bildpunkt
Q	Menge der Objektpunkte im Bildfeld
Q_0, Q_1, Q_2	spezielle Gütekriterien bei Zufallstransformationen
Q_i	Zugehörigkeitsfunktion zu C_i ; Objektpunktanordnung in einem 2×2 -Feld
q	Ebenenpaaranzahl; Wort; Bildpunkt
R	Restfehler; mittleres Abweichungsquadrat; Prüfgröße für Operatoraufpunkt-Zusammenfassung
$R(a, b)$	Relation zwischen den Argumenten a, b , gelesen „ a in Relation zu b “
R_i	Anzahl der Prototypen für Klasse C_i
r	Anzahl der diskreten Werte je Vektorkomponente; Radius einer Bildpunktnachbarschaft
\underline{r}_i	Prototypvektor von C_i
$\underline{r}(w)$	Hilfsfunktion bei der stochastischen Approximation

S	Anfangssymbol einer Grammatik
s	Terminalsymbol allgemein
s_{ij}	Operatorsumme bei Störungsunterdrückung
\underline{S}	spezielle Kovarianzmatrix bei linearen Transformationen
\underline{s}_i	spezieller Vektor zur Bestimmung linearer Regressionsgleichungen
T	Abstandsbild
t	Umfang des Symbolvorrats im Eingabealphabet abstrakter Automaten; Elementarvektor im Kettenkode
t_{ij}	Wert des Bildpunktes (i, j) in einem Abstandsbild
\underline{T}	spezielle Kovarianzmatrix bei linearen Transformationen
U, U_v	Objektumfang
V_N	Nichtterminalenvokabular
V_T	Terminalenvokabular
v	Streuung der Unterscheidungsfunktion
\underline{V}_i	Stichproben-Kovarianzmatrix der Klasse C_i
W	Wortmenge
w_{ij}	Komponente von \underline{w}_i (Parameter)
\underline{w}_i	Parametervektor
X	Integrationsgebiet von \underline{x} ; Eingabealphabet eines abstrakten Automaten
X_i	Integrationsgebiet von $\underline{x} \in C_i$
X_N	Stichprobe vom Umfang N
X_v	Folge von Objektvektoren \underline{x}
x	Komponente des Vektors \underline{x} ; Symbol aus dem Eingabealphabet; Datenelement einer Liste
\underline{X}	um eine konstante Komponente $x_0 \equiv 1$ erweiterter Vektor \underline{x}
\underline{x}	n-dimensionaler Vektor
\bar{x}_i	Stichprobenmittel der Klasse C_i
Y	Ausgabealphabet eines abstrakten Automaten
y	Hilfsgröße bei der Parzenentwicklung; Komponente des Vektors \underline{y} ; Symbol aus dem Ausgabealphabet
\underline{y}	transformierter Vektor

Z	Zustandsmenge eines abstrakten Automaten
Z_e	Menge der Endzustände insgesamt
Z_i	Menge der Endzustände für Klasse C_i
z	Automatenzustand
z_0, z_f, z_e	Anfangszustand; Folgezustand zu z ; Endzustand eines abstrakten Automaten
z_i	Kennzeichen für Klasse C_i bei der Regressionsanalyse
\underline{z}	allgemeiner Vektor
α	Objektpunktkennzeichen
γ	Zählgröße
γ_v	Konstante bei stochastischer Approximation
Δ	Abstand Punkt–Ebene; Prüfgröße im Kolmogoroff-Smirnov-Test
Δ_{ik}	Maß für den Abstand zwischen C_i und C_k
δ	Diracfunktion; Übergangsfunktion eines abstrakten Automaten
δ_o	Entscheidung für die Rückweisung eines Objekts \underline{x}
δ_i	Entscheidung für Klasse C_i bei Vorliegen von \underline{x}
ϵ	Schwellwert; Nullreihe; leeres Wort
Θ	Schwellwert
Λ	Prüfgröße bei sequentieller Klassifikation; Wahrscheinlichkeitsverhältnis
λ	Rückweisungsparameter; Ausgabefunktion eines abstrakten Automaten
λ_j	Eigenwert
μ	Anzahl der beibehaltenen Vektorkomponenten nach Transformationen; Ausgabefunktion beim Mooreautomaten
ν	Exemplarindex bei serieller Objektverarbeitung, Zählindex allgemein; Schrittzahl bei Iterationen
ρ	Dimensionszahl eines Parametervektors; Streuungsmaß bei Entropiebetrachtungen zur Karhunen-Loeve-Transformation
Σ_i	Kovarianzmatrix der Grundgesamtheit
σ	Parameter bei der Parzenentwicklung; Standardabweichung

Φ	Funktion für eine spezielle stochastische Approximation; örtlicher Operator
$\underline{\Phi}$	Hilfsmatrix bei der Bayesschätzung
$\varphi(\underline{x})$	Funktion; Komponente des Funktionenvektors $\underline{\varphi}$
$\underline{\varphi}(\underline{x})$	Funktionenvektor
χ, ψ, ω	beliebige Zeichenreihen
Ω	Menge der Klassen
(i, j)	geordnetes Paar
$(x_1, x_2, \dots, x_n)'$	Spaltenvektor
(x_1, x_2, \dots, x_n)	Liste von Datenelementen (äußere Form)
$x_1 x_2 \dots x_n$	Zeichenreihe
$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$	Menge, definiert durch Aufzählung der Elemente,
$\{x \mid \dots\}$	Menge, definiert durch Zugehörigkeitsangaben
$(a_{ij}) = \underline{A}$	Matrix
$\det \underline{A}$	Determinante von \underline{A}
$ \underline{x} $	Vektorbetrag
$\underline{a}' \underline{x}$	Skalarprodukt, \underline{a}' transponierter Vektor
$\frac{\partial \varphi}{\partial \underline{x}} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \quad \dots \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x_n} \right)$	Differentiation eines Skalars nach einem Vektor, das Ergebnis wird als Zeilenvektor notiert [2.1.31]
$n(a)$	Anzahl der a
\in	Element von
\square	allgemeines Verknüpfungszeichen
$::=$	ergibt sich als
\rightarrow	Ersetzungsregelsymbol
\sim	Äquivalenz von Automatenzuständen
$\underline{x} \triangle 1$	Objekt \underline{x} ist vorhanden
$\underline{x} \triangle 0$	Objekt \underline{x} ist nicht vorhanden

Aussageoperationen
(Prädikatenkalkül)

\wedge \vee $\bar{}$
und oder Negation

Mengenoperationen

\cap \cup $\bar{}$
Durchschnitt Vereinigung Komplement

\setminus $M \times N = \{(m, n) \mid m \in M, n \in N\}$
Differenz kartesisches Produkt

\subseteq \emptyset
enthalten Leermenge

Folgenoperationen

\circ $*$ ε
Produkt Iteration leeres Wort

1. Biologische und technische Erkennung

1.1. Biologische Erkennungssysteme

1.1.1. Das Problem der Erkennung

Kein Gegenstand ist unabhängig von seiner Umgebung, und Lebewesen stehen in besonders enger Wechselwirkung mit ihrer Umwelt. Während Stoff- und Energieaustausch elementare Grundlagen für die Lebenserhaltung eines Individuums bilden, wird die Auseinandersetzung mit der Umwelt wesentlich durch den Austausch von Informationen bestimmt. So empfangen die Lebewesen vielfältigste Signale über ihre Sinnesorgane; sie müssen die dadurch übertragenen Nachrichten verarbeiten und auswerten, und sie wirken schließlich aktiv auf ihre Umwelt durch ausgesandte Signale oder vollzogene Handlungen ein.

Die höchste Stufe dieser Fähigkeit hat der Mensch erreicht. Er vermag seine Umwelt begrifflich zu ordnen, zu erkennen, zu verstehen; er kann, darauf fußend, durch Nachdenken komplizierte Probleme lösen und zielgerichtet in die Umwelt eingreifen. Diese in einem phylogenetischen Entwicklungsprozeß entstandenen Fähigkeiten begründen die herausragende Stellung, die der Mensch in der Natur einnimmt.

Was mit den geistigen Prozessen des Erkennens, des Verstehens, des Denkens gemeint ist, ist zwar intuitiv klar, da sie ja ständig in uns ablaufen, wir sie bewußt oder unbewußt im Leben als Mittel zur Selbstbehauptung einsetzen und ihre Erfolge oder Mißerfolge deutlich spüren. Was aber dabei im menschlichen Körper, insbesondere im Gehirn, tatsächlich geschieht, ist auch heute noch der Wissenschaft in den Einzelheiten weitgehend unbekannt. Da diese Phänomene aber so grundlegend mit unserem Leben verbunden sind und dem Menschen eine so außerordentliche Stellung in der Natur verleihen, nimmt es nicht wunder, daß durch Philosophen, Physiologen und Psychologen seit Beginn spekulativen und wissenschaftlichen Nachdenkens immer wieder geistige Prozesse erforscht worden sind.

Durch die von Wiener (1894–1964) begründete Kybernetik sind in diesem Bemühen neue, wichtige Forschungs- und Deutungsmethoden verfügbar geworden. Die Kybernetik untersucht Informationsverarbeitungs- und Regelungsvorgänge in Lebewesen und Maschinen. Dabei geht es vor allem um eine einheitliche (z. B. mathematische) Beschreibung der zugrunde liegenden Algorithmen, ungeachtet der Unterschiede in der speziellen biologischen oder technischen Realisierung.

Die kybernetische Forschung zielt in zwei Grundrichtungen. Die Bio-kybernetik versucht, insbesondere mathematisch orientierte Theorien (Informationstheorie, formale Logik, Kodierungstheorie, Regelungstheorie u. a.) in Biologie und Medizin anzuwenden. Für die Untersuchung geistiger Prozesse

besonders bedeutsam ist dabei die Neurokybernetik, die nach technisch-mathematischen Modellen für neuronale Vorgänge, also für die Vorgänge im Nervensystem, sucht. Die zweite Richtung ist gekennzeichnet durch das Bemühen, Erkenntnisse aus der Erforschung biologischer Prozesse und Mechanismen für die Verbesserung oder die Neukonstruktion technischer Systeme auszunutzen; sie bildet das Arbeitsgebiet der Bionik (das Wort entstand aus der Zusammenfassung von Biologie und Elektronik).

Die Vorgehensweise der Kybernetik, bestimmte Vorgänge in Lebewesen als Informationsverarbeitungs- und Regelungsprozesse aufzufassen und mit entsprechenden Theorien zu beschreiben, hat sich bisher als sehr fruchtbringend erwiesen, insbesondere auch für die Erforschung geistiger Prozesse. Dadurch ist es möglich geworden, diese in bestimmtem Umfang zu formalisieren und damit für biokybernetische Zwecke technisch zu simulieren oder im bionischen Sinne zu automatisieren. Zwar werden die späteren Abschnitte zeigen, daß sich die im Menschen und im Automaten ablaufenden Prozesse wesentlich voneinander unterscheiden, daß damit erzielbare Ergebnisse aber auf bestimmten Gebieten und in bestimmten Leistungsgrenzen gleich sind. Freilich sind diese Grenzen für Automaten im Vergleich zu Lebewesen noch sehr eng. Sie erweitern sich jedoch ständig, und prinzipielle Schranken sind bisher noch unbekannt. In diesem Sinne sind die geistigen Prozesse, ohnehin immer an materielle Vorgänge gebunden, nicht mehr als „typisch biologisch“ oder sogar „typisch menschlich“ zu bezeichnen, auch wenn der Terminus geistig bisher nur für den humanen Bereich reserviert gewesen ist.

Von den geistigen Prozessen interessieren im vorliegenden Zusammenhang vor allem die mit dem Erkennen verbundenen Probleme. Beim menschlichen Erkennen werden unterschieden [1.1.1] :

- die Erkenntnisgewinnung $\hat{=}$ Erkennung oder Erkennen
Sie geschieht bezüglich der Menschheit allgemein in einem historisch-gesellschaftlichen Erkenntnisprozeß und bezüglich eines bestimmten Individuums in einem speziellen Erkenntnisakt. Nur diesen gilt es im folgenden näher zu untersuchen und seine Automatisierbarkeit zu betrachten.
- das Resultat des Erkennens $\hat{=}$ Erkenntnis
Hierbei handelt es sich um einen Zuwachs an Wissen im erkennenden Subjekt.

Beim primären Erkennen erwirbt der Mensch neues Wissen über einen ihm bisher unbekanntes Gegenstand oder Sachverhalt, das im Gedächtnis abgespeichert wird. Insbesondere erlernt er Begriffe, d.h. die Zuordnung eines Wortes einer bestimmten Sprache zu einer bestimmten Menge von Objekten.

Sekundäres Erkennen oder Wiedererkennen bedeutet die Fähigkeit, ein unbekanntes Objekt mit Erkenntnissen zu vergleichen, die durch frühere Erkenntnisakte erworben worden sind, und den Namen des unbekanntes Objekts angeben zu können. Dabei wird keine Identität zwischen Objekt und gespeichertem Wissen, sondern nur Ähnlichkeit festgestellt. Das ermöglicht

erstaunliche menschliche Abstraktionsleistungen: Erkennen vorher nicht gesehener Objekte; Wiedererkennen von Objekten in neuen räumlichen Ansichten; Erkennung unabhängig von Größe, Entfernung, Bewegung oder Ruhezustand der Objekte usw.

Ablauf und Resultat jedes Erkenntnisakts werden durch die spezifischen Funktionsweisen des biologischen Erkennungsapparats bestimmt. Insbesondere sind hierbei die Wirkungsprinzipien und die Verbindungsstrukturen der Nervenzellen in den Sinnesorganen und im Gehirn maßgebend. Die hierzu phylogenetisch erzeugten Bedingungen bilden für das Erkennen, wie überhaupt für jede geistige Fähigkeit, die Grundlagen und die Beschränkungen (Keidel [1.1.2]).

1.1.2. Abbildtheorie

Da Erkennungsvorgänge, wie sämtliche geistige Prozesse, vor allem im Gehirn des Menschen ablaufen, muß Information über das zu erkennende Objekt in das erkennende Subjekt gelangen und dort in einer geeigneten Weise dargestellt werden, um weiterverarbeitet und evtl. abgespeichert werden zu können.

Kernpunkt für die Erklärung menschlicher Erkennungsvorgänge ist die Auffassung, daß im erkennenden Subjekt ein ideelles Abbild des Objekts erzeugt wird. Ideell heißt, daß das Abbild zwar von materiellen Vorgängen im Gehirn getragen wird, selbst aber den materiellen Trägern aufgeprägte Information ist. Dieses Abbilden des Objekts im Subjekt geschieht durch zwei Trägerprozesse, nämlich einerseits durch

- Aufnahme von Information über die Sinnesorgane und Weiterleitung zum Gehirn, wobei das Verknüpfen und Speichern der Information durch biochemische und biophysikalische Vorgänge in den Nervenzellen erfolgt, andererseits durch
- Ausdrücken und Verknüpfen von Denkinhalten mit Hilfe sprachlich fixierter Begriffe und Aussagen.

Diese eng miteinander verbundenen Prozesse erzeugen zwei wechselseitig sich durchdringende Erscheinungsformen des Abbilds (Klaus [1.1.3]):

- die anschaulich-sinnliche Form (Empfindungen und Wahrnehmung) und
- die abstrakte-logische Form (Begriffe und Aussagen),

die im folgenden näher betrachtet werden.

Dabei ist die Unterteilung in Empfindungen und Wahrnehmung sowie in eine abstrakt-logische Seite beim Aufbau eines ideellen Abbilds nur ein Hilfsmittel, um einen vielfältigen Prozeß mit einer gewissen Übersichtlichkeit zu beschreiben; keinesfalls ist sie Ausdruck etwa für räumlich oder zeitlich trennbare Bestandteile des Prozesses. Auch muß darauf hingewiesen werden, daß die Verwendung der Termini Empfindung und Wahrnehmung in der Literatur nicht einheitlich ist.

1.1.2.1. Empfindungen und Wahrnehmung

Von den Objekten ausgehende informationstragende Signale, z. B. Licht- oder Schallwellen, erzeugen an den Rezeptoren der Empfangsorgane (Sinnesorgane, Sensoren) Reizzustände in Form von Energieverteilungen. Rezeptoren, z. B. in den optischen und akustischen Sinnesorganen, in Geruchs- und Geschmacksorganen oder Mechano- und Thermorezeptoren in der Haut bilden die Kontaktstellen zwischen Subjekt und Umwelt und wandeln die energetischen Reize durch biochemische und biophysikalische Vorgänge in Erregungszustände des Nervensystems um.

Diese Erregungszustände bilden den internen Informationsträger. Durch eine Kette von Fortpflanzungen und Verknüpfungen dieser Zustände werden Informationen über die externen Objekte auf Nervenbahnen bis in das Zentralnervensystem geleitet. Dort entsteht ein Komplex psychischer Reize – die Empfindungen. Bereits bei den Prozessen der Wandlung sowie der Weiterleitung und Verknüpfung von Erregungszuständen findet eine Reduktion der den Sinnesorganen angebotenen Informationsmenge statt (Klix [1.1.4]).

Wahrnehmung heißt Aufbau eines relativ umfassenden internen Abbilds der Objekte auf der Grundlage von deren Bestandteilen und Eigenschaften sowie deren Beziehungen zu anderen Objekten. Dabei wird die Denktätigkeit einbezogen und bereits gespeichertes Wissen ausgenutzt.

Der steuernde Eingriff des internen Wissens erstreckt sich intern auf die Auswahl, d. h. das Hervorheben wesentlicher und das Unterdrücken unwesentlicher Empfindungen, und extern auf eine Aufmerksamkeitssteuerung, z. B. über die Augenbewegung. Dadurch können störende bzw. unerwünschte Objekte oder Objektmerkmale unterdrückt werden, oder die Aufmerksamkeit wird auf bestimmte Einzelheiten gelenkt, die zur Präzisierung des Abbilds genauer analysiert werden müssen. Komplexe Objekte werden dabei nach bestimmten Gliederungsgesetzen in Bestandteile zerlegt: Bilder z. B. nach Kriterien der Nähe, der Geschlossenheit des Konturverlaufs oder der kurvengerechten Fortführung von Linien. Als eine Modellvorstellung wäre denkbar, daß bestimmte Bestandteile in ein Kurzzeitgedächtnis übergeführt und mit dem in einem Langzeitgedächtnis gespeicherten Wissen verglichen werden. Das Ergebnis des Vergleichs steuert dann die Aufnahme weiterer Informationen, z. B. durch gezieltes Verschieben der Aufmerksamkeitspunkte am zu erkennenden Objekt zu Orten weiterer, zur Abbildpräzisierung erforderlicher Bestandteile (Noton [1.1.5], Klix [1.1.4]).

Ein wesentliches Kennzeichen biologischer Erkennung ist die außerordentlich hohe Invarianz- und Abstraktionsleistung. Obwohl z. B. auf der Netzhaut des Auges völlig verschiedene Reizeinwirkungen entstehen – je nachdem, ob das gleiche Objekt weit entfernt oder nahe, bewegt oder ruhend, als natürlicher Gegenstand oder dessen fotografische Abbildung gezeigt wird –, vermag es der Mensch in allen Fällen als das gleiche Objekt zu erkennen. Das wird z. T. ermöglicht durch Korrekturmechanismen im Zentralnervensystem, indem z. B. örtliche Reizverteilungen im Gehirn bei bewegten Objekten mit denjenigen Steuersignalen korrigiert werden, die auch die Augenbewegung steuern. Vor allem ist aber ein rasches Fortschreiten von den Einzelheiten

der Reizmuster an den Rezeptoren zu Verallgemeinerungen erforderlich. Das findet bereits auf der Grundlage der neuronalen Erregungszustände und der Empfindungen durch deren Zusammenfassen zu Abstraktionsklassen statt. Besonders wichtig für den Aufbau des internen Abbilds aber ist der Übergang von räumlich-zeitlichen Erregungsmustern in den Nervenbahnen zu Fixierungen der Abstraktionsklassen von nach bestimmten Gesichtspunkten ähnlichen Objekten, Eigenschaften und Relationen in Begriffen. Dadurch werden in entscheidendem Maß Invarianzen der Klassenmitglieder erfaßt, und durch sprachliche Abstraktion wird ein Einbeziehen der Denktätigkeit in die Wahrnehmung möglich. Die Formung des internen Abbilds ist dadurch nicht nur passives Aufnehmen und Auswählen, sondern gleichzeitig aktives Verknüpfen der Abbildelemente entsprechend den logischen Regeln, die den Denkprozessen zugrunde liegen.

1.1.2.2. Begriffe und Aussagen

Eine für höhere geistige Fähigkeiten wesentliche Seite der internen Abbilder ist also deren abstrakt-logische Erscheinungsform. Die vielen konkreten Einzelheiten eines Objekts sind zu einem Begriff verdichtet. Will der Mensch geistig mit diesem Begriff operieren oder ihn einem anderen Menschen mitteilen, kleidet er ihn in ein bestimmtes Wort einer Sprache.

Die Struktur eines Begriffs besteht aus einer logischen Verknüpfung derjenigen Merkmale, die die Abstraktionsklasse der unter dem Begriff zusammengefaßten Objekte charakterisieren. Der Terminus Merkmal umfaßt Objektbestandteile, Objekteigenschaften und Relationen zu anderen Objekten. Die Struktur eines erlernten Begriffs muß im Gedächtnis abgespeichert sein. Nach einer einfachen Modellvorstellung könnte der Eigenschaftsteil des Begriffs „Ball“ folgende Struktur haben:

Ball – EIGENSCHAFTEN: rund \wedge springfähig \wedge (rot \vee blau)

Der Komplex der charakteristischen Merkmale und deren (z. B. prädikatenlogische) Verknüpfung wird als Begriffsinhalt oder Begriffintension bezeichnet, die Menge der Mitglieder der Abstraktionsklasse als Begriffsumfang oder Begriffsextension.

Sieht der Mensch ein Objekt, das zur Abstraktionsklasse eines bestimmten Begriffs gehört, so entsteht ein internes Abbild des vorliegenden Objekts, und durch Vergleichsprozesse mit dem gespeicherten Begriff bzw. dessen Struktur beim Abbildaufbau kann das Objekt wiedererkannt werden. Liest oder hört der Mensch das Wort, das zu dem betreffenden Begriff gehört, so wird der gespeicherte Begriff im Gedächtnis aufgerufen, der Mensch vermag sich das zugehörige Objekt über die Merkmalsangaben der abgespeicherten Begriffsstruktur vorzustellen, auch wenn er es nicht sieht, und er vermag gedanklich mit dem Begriff zu operieren.

Die im Gedächtnis gespeicherten Begriffe sind untereinander verbunden. Wird ein Begriff aufgerufen, so werden durch Assoziationen weitere Begriffe aktiviert, etwa naheliegende, wie eine zugehörige Überklasse (z. B. Ball – Spielzeug), aber auch fernerliegende (z. B. Ball – Ferien), die zum ursprünglich aufgerufenen Begriff Beziehungen haben. Zwar ist im einzelnen völlig

unbekannt, wie Begriffe im Gehirn konkret gespeichert sind; als Modellvorstellung wird aber angenommen, daß in Beziehung zueinander stehende Begriffe evtl. auch räumlich benachbart bzw. allgemeine Begriffe mehrfach in „geeigneter Begriffumgebung“ abgespeichert sind. Diese Modellvorstellung der „Begriffsnetze“ oder „semantischen Netze“ ist als Graph, mit Begriffen als Graphenknoten und Relationen zwischen Begriffen als Graphenkanten, für die Zwecke automatischer Verarbeitung natürlicher Sprachen verschiedentlich auf Datenverarbeitungsanlagen simuliert worden (z. B. Minsky [1.1.6]; Lehmann/Zänker [1.1.7]).

Die interne Abbildung eines realen Sachverhalts geschieht durch Verbinden von Begriffen zu einer Aussage. Um mit Aussagen gedanklich zu operieren oder sie mittelbar zu machen, werden sie in einen bestimmten Satz einer Sprache gekleidet. Das Bilden von Aussagen ist damit in der zitierten Modellvorstellung als eine Operation über einem Begriffsnetz denkbar, fußend auf den Regeln der formalen Logik.

Die Erfahrung lehrt durch die erzielten Erfolge, daß die internen Abbilder den sie erzeugenden realen Objekten zumindest homomorph sind. Durch die sprachliche Abstraktion werden die Abbilder außerdem relativ selbständig, d. h., daß durch Denkopoperationen auch bereits gespeichertes Wissen zu neuen Begriffen und Aussagen verarbeitet und diese dem Gedächtnis zugeführt werden können. Dadurch erfolgt ein Wissenszuwachs, der nicht unmittelbar über Rezeptorkanäle aus der Umwelt entnommen worden ist (Klaus [1.1.3]).

1.1.3. Spezielle biologische Funktionsprinzipien

In informationstheoretischer Betrachtungsweise wird bei einem Erkennungsvorgang das Objekt als Nachrichtenquelle aufgefaßt. Es sendet (z. B. physikalische) Signale aus, die von Rezeptoren in biochemische oder elektrische Signale umgewandelt werden. Letztere laufen über Nervenfasern zum Zentralnervensystem; dort werden die „Nachrichten“ des Objekts in einem Wahrnehmungsprozeß ausgewertet. Nach verschiedenen Abschätzungen (z. B. Küpfmüller [1.1.8], Keidel [1.1.2]) treten bei dieser Nachrichtenübertragung im Menschen folgende Informationsflüsse auf:

Aufgenommene Information in bit/s

Im optischen Kanal	$10^6 \dots 10^7$
Im akustischen Kanal	10^4
Über Schmerz- und Thermorezeptoren	10^6
Über taktile Rezeptoren	10^5
Davon gehen in das interne Abbild ein	$25 \cdot \cdot 100$
Im Gedächtnis werden abgespeichert	1

Von den Einzelheiten der Rezeptorreizmuster bis zum abgespeicherten Begriff erfolgt also eine drastische Informationsreduktion. Wenn auch der Mensch über die verschiedenartigsten Sinnesorgane einen recht umfassenden Kontakt mit der Umwelt hat, ist der optische Kanal, schon vom bewältigten

Informationsfluß her, i.allg. der wichtigste. Die optische Erkennung ist auch in der Technik zuerst in größerem Umfang realisiert worden und soll daher im biologischen System etwas näher betrachtet werden.

1.1.3.1. Bestandteile des optischen Systems

Ein stark vereinfachtes Schema des optischen oder visuellen Systems der Säugetiere zeigt Bild 1.1.1. (Niemann [1.1.9], Eckmiller [1.1.10]). Es enthält nur den grundsätzlichen Weg des Informationsflusses. Seine für die Erkennung wichtigsten Etappen werden nachfolgend kurz beschrieben. In Wirklichkeit zweigen zusätzlich z. B. vom optischen Nerv Fasern zu weiteren neuronalen Verarbeitungszentren ab, sind linker und rechter Teil des Corpus geniculatum laterale miteinander verbunden, führen Signalverbindungen vom visuellen Cortex zur Retina zurück und bestehen von Area 17 aus weitere stochastische Verbindungen zu Area 18 und Area 19 der Hirnrinde.

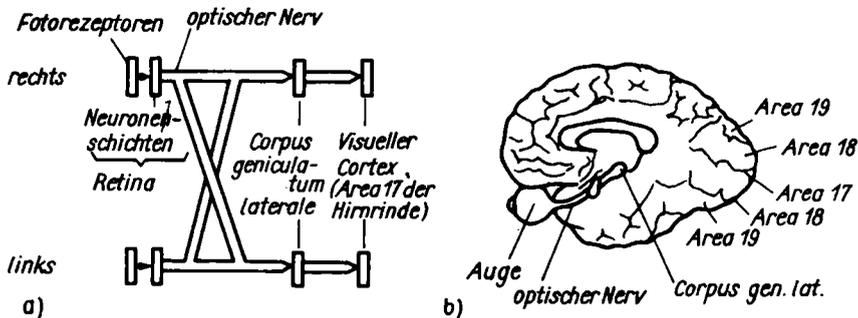


Bild 1.1.1. Optisches System der Säugetiere

a) vereinfachtes Schema nach [1.1.9]

b) Schnitt durch das menschliche Gehirn, Ansicht von innen auf den rechten Teil, nach [1.1.36]

Die Grundbausteine des Nervensystems sind die Neuronen (Nervenzellen, Ganglienzellen). Nach Brajnes/Svečinskij [1.1.11] enthält das Gehirn eines Neugeborenen 10^{10} Neuronen, von denen im Verlauf des Lebens 1000 je Stunde nichtregenerierbar absterben. Sie existieren in verschiedenen Größen und Formen. Bild 1.1.2 zeigt eine allen Neuronen gemeinsame Grundstruktur.

Danach besteht das Neuron aus dem Zellkörper ($10^{-4} \dots 10^{-2}$ cm Durchmesser), dem Axon (10^{-4} cm Durchmesser, bis 1 m und mehr Länge) und dessen Fortsetzungen, den Dendriten. Letztere stellen über die Synapse, genauer den synaptischen Spalt – Breite $(1 \dots 2) \cdot 10^{-6}$ cm –, Verbindungen zu weiteren Neuronen her, wobei jedes Neuron mit $10^2 \dots 10^3$ anderen synaptisch verbunden ist. Das Neuron ist vollständig von einer Membran

umgeben. Der synaptische Spalt liegt zwischen ankommendem Dendritenende und Membran der betrachteten Zelle.

Über die Dendriten einlaufende elektrische Impulse setzen im synaptischen Spalt je nach Synapsenart erregende oder hemmende Überträgerstoffe frei. Diese diffundieren zur Membran des Neurons und steuern deren Ionendurchlässigkeit. Dadurch wird eine zwischen Zellinnerem und Zelläußerem herrschende elektrische Potentialdifferenz geändert.

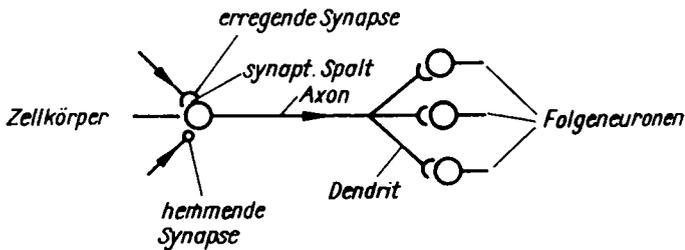


Bild 1.1.2. Grundstruktur von Neuronen

Überwiegt die Erregung und ist der dadurch hervorgerufene Potentialanstieg im Zelleninneren genügend groß (Größenordnung 0,1 V), so entsteht durch nichtlineare Vorgänge ein kurzzeitiger elektrischer Entladungsimpuls. Dieser pflanzt sich durch das Axon und dessen dendritische Fortsetzungen mit Übertragungsgeschwindigkeit von $1 \cdot \cdot \cdot 160$ m/s (je nach Axonart) an nachfolgende Neuronen fort. Die Impulsdauer beträgt etwa 1 ms. Nach der Entladung ist eine Ruhezeit (Erholzeit, Refraktärzeit) von etwa 1 ms für das Neuron erforderlich. In dieser Zeit ist das Neuron gar nicht oder nur durch stärkere Reize zündbar. Überwiegen die hemmenden Synapsen, so zündet das Neuron bei dem einlaufenden Impulsmuster nicht.

Die Axone sind zu Nerven gebündelt (oft zu 2000 bis 3000 Stück). In den Bündeln befinden sich sowohl afferente Fasern, die z. B. von Rezeptoren empfangene Signale zum Gehirn übertragen, als auch efferente Fasern, die Steuersignale vom Gehirn zu verschiedenen Organen weiterleiten. Beide Signalarten werden durch die gleichen geschilderten Übertragungsvorgänge in den Neuronen getragen.

Die synaptische Verbindung gilt als Sitz des Langzeitgedächtnisses mit einer Speicherfähigkeit von etwa 10 bit/Synapse. Bei einer Dichte von 10^7 Neuronen/cm³ schätzt man daraus eine Speicherdichte im Gehirn des Menschen von 10^{10} bit/cm³ ab.

Obwohl die Einzelheiten der biochemischen und elektrischen Signalwandlung und -übertragung im Neuron sehr kompliziert und teilweise noch unbekannt sind, ist dessen Gesamtverhalten relativ übersichtlich und hat zu zahlreichen Simulationen und elektronischen Nachbildungen in Modellen angeregt (Brajnes/Svečinskij [1.1.11], Drischel [1.1.12]).

Das Auge als Empfangsorgan des optischen Systems (Bild 1.1.3) enthält beim Menschen in der ersten Schicht der Retina etwa 10^8 Fotorezeptoren. Das sind mosaikartig angeordnete, lichtempfindliche, spezielle Nervenzellen. Sie wandeln die örtliche Helligkeitsverteilung der einfallenden Lichtreize in eine entsprechende örtliche Verteilung elektrischer Impulse um, die nachfolgenden Neuronenschichten der Retina zugeführt wird. Dabei können mehrere Fotorezeptoren zu einem etwa kreisförmigen rezeptiven Feld zusammengefaßt sein, das entweder ein Zentrum mit zündenden Neuronen und eine Umgebung gehemmter Neuronen oder die umgekehrte Verteilung besitzt.

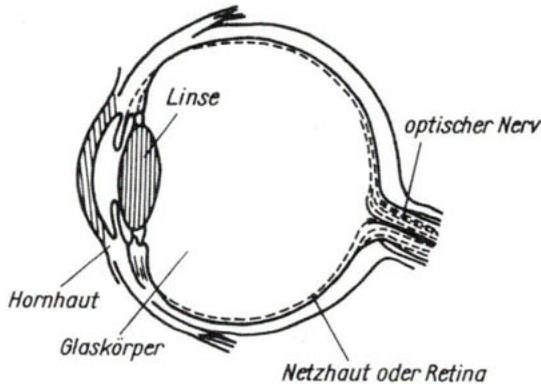


Bild 1.1.3. Schnitt durch das menschliche Auge

Ene die Lichtsignale auf das Mosaik der Fotorezeptoren treffen, passieren sie im Auge noch Linse und Glaskörper. Das übertragene Bild wird dabei verschlechtert, indem Hell-Dunkel-Unterschiede verkleinert und Konturen verwischt werden; die Objekte werden also unscharf auf die Retina abgebildet. Diese Verwaschung wird noch verstärkt durch eine Sehfeldüberlappung benachbarter rezeptiver Felder der Retina. Dieser Störung wirkt in den Neuronenschichten der Retina ein Effekt entgegen, der mit lateraler Inhibition bezeichnet wird (v. Seelen [1.1.13]). Die Neuronen einer Schicht sind untereinander so verkoppelt, daß die einzelnen Neuronenausgänge außer auf die nachfolgende Schicht zusätzlich als hemmende Eingänge auf benachbart liegende Neuronen innerhalb einer bestimmten Reichweite geführt sind. Solche Neuronennetze wirken als Filter für die Ortsfrequenzen der auf dem Rezeptormosaik herrschenden örtlichen Helligkeitsverteilung, und zwar werden hohe Ortsfrequenzen hervorgehoben. Das bedeutet eine Kontrasterhöhung, d.h. ein Verschärfen von Konturen.

Die laterale Inhibition ist auch in anderen Organen, z.B. im akustischen Kanal, vorhanden. Sie ist im optischen Kanal experimentell vor allem am Pfeilschwanzkreb *Limulus* untersucht (Hartline/Ratliff [1.1.14]) und in Form von Neuronenschichtmodellen für verschiedene Arten der Verkopplung umfassend mathematisch beschrieben worden (Reichardt/MacGinitie [1.1.15], Stoschek [1.1.16]).

Die Axone der Neuronen in der letzten Retinaschicht bilden den optischen Nerv, dessen etwa 10^6 Fasern elektrische Impulse zum Gehirn weiterleiten. Die von den Rezeptoren übernommenen Informationen über Reizart (hier also optisch), Reizintensität und weitere, das Erkennungsobjekt kennzeichnende Reizeigenschaften sind in der Pulsfrequenzmodulation der elektrischen Impulse im optischen Nerv und in der räumlichen Verteilung von erregten und gehemmten Neuronen kodiert. Die Impulsfrequenz liegt meist unter 1 kHz (Küpfmüller [1.1.8]). Sie stellt sich bei der Intensitätskodierung bei einer externen Reizänderung nach einem anfänglichen Überschießen erst allmählich auf einen Wert ein, der proportional zur Größe eines Dauerreizes ist.

Ein großer Teil der Fasern des Sehnervs führt zum Corpus geniculatum laterale, und zwar 50...70% davon zur jeweils anderen Seite im Gehirn (s. Bild 1.1.1). Hier werden in mehreren Neuronenschichten weitere Bandpaßfilterungen zur Konturhervorhebung durchgeführt (Niemann [1.1.9]). Außerdem steht die Neuronenaktivität im Zusammenhang mit der Augenbewegung, mit der Signaldifferenz beim binokularen Sehen und mit dem Wachheits- oder Aufmerksamkeitszustand des Individuums.

Auf der Großhirnrinde befinden sich Projektionsfelder der Sinnesorgane. Die Signale mit optischer Information laufen zum visuellen Cortex (Area 17 der Großhirnrinde, s. Bild 1.1.1). Die Neuronenverbindungen des visuellen Cortex kann man in (gedachte) Säulen senkrecht zur Gehirnoberfläche einteilen. Der Querschnitt dieser Säulen entspricht einem rezeptiven Feld von Rechteckform mit entweder einem Mittelstreifen von gezündeten und beiderseitigen Streifen von gehemmten Neuronen oder der umgekehrten Verteilung. Innerhalb einer Säule sind die Richtung des rezeptiven Feldes und dessen Lage, bezogen auf die Rezeptorfläche der Augenretina, konstant. Diese Rezeptorfläche ist unter Bewahrung der Topologie auf den visuellen Cortex abgebildet, und zwar entspricht ein kleines Retinaareal mehreren Säulen im Cortex, die sich durch die Richtung ihrer rezeptiven Felder unterscheiden (Gose [1.1.17], v. Seelen [1.1.13]).

Nach Untersuchungen von Hubel/Wiesel ([1.1.18] bis [1.1.20]) reagieren die Neuronengruppen der Säulen mit hohen Impulsfrequenzen auf bestimmte räumliche Vorzugsrichtungen oder bestimmte Bewegungsrichtungen von Konturen in der Reizverteilung auf der Retina. Aus der Reizverteilung werden damit entsprechend den Richtungen der rezeptiven Felder im Cortex Linienelemente herausgefiltert. Nach Creutzfeldt et. al: [1.1.21] ist allerdings der Reaktionsbereich der Neuronen relativ groß, die Filterwirkung also nicht sehr scharf. Für eine eindeutige Interpretation des empfangenen Reizes in einem internen Abbild müssen daher sicherlich weitere Informationen über den Reiz mitverarbeitet werden. Die rezeptiven Felder sind vermutlich nicht durch einen Lernprozeß erworben, sondern sind angeboren.

Das Prinzip des Ausfilterns von Linienelementen wird von der technischen Erkennung in vielen Realisierungsversuchen aufgegriffen (s. Abschnitte 3.2.1.2., 3.3.2.2. und 3.4.1.2., ferner z. B. Fukushima [1.1.22]).

1.1.3.2. Vorgänge im Zentralnervensystem

Von der Area 17 führen weitere Verbindungen zu Area 18 und Area 19 der Großhirnrinde. Die Vorgänge im Zentralnervensystem spielen sich damit in einer riesigen Anzahl miteinander verkoppelter Neuronen ab. Von großer Bedeutung für die geistigen Vorgänge ist die Struktur dieses Neuronennetzes. Diese ist nicht fest, vielmehr können über die synaptischen Verbindungen neue Bahnen im Neuronennetz hergestellt oder vorhandene getrennt bzw. geändert werden. Diese Änderungen stellen sich als das Ergebnis von Lern-, Vergessens- oder Umlernprozessen ein. Neuentstandene Kopplungsstrukturen sind also die Träger neuerworbenen Wissens. Von Umweltobjekten eintreffende Reize können über neugebahnte Nervenverbindungen schnell höhere Neuronenschichten des Gehirns erreichen. Sie werden dadurch mit Hilfe erlernten Wissens schneller zu abstrakten Reizkomplexen zusammengefaßt, ohne daß viele Einzelheiten berücksichtigt werden müssen (Drischel/Tiedt [1.1.23]).

Eine Grundform des Lernens, die zur Ausbildung neuer Neuronenverbindungen führt, beruht auf dem Erwerb bedingter Reflexe nach Pawlow (1849–1936). Auf bestimmte, biologisch wichtige Reize R antwortet ein Organismus mit bestimmten, angeborenen, beständigen Reaktionen, den unbedingten Reflexen U. Werden eine Zeitlang kurz vor den Reizen R andere, indifferente, d. h. nicht U auslösende Reize angeboten, so können nach einer gewissen Lernphase die ursprünglichen Reize R weggelassen werden; der Organismus reagiert jetzt allein auf die vorher indifferenten Reize mit der Antwort U als einem bedingten Reflex. Grund dafür ist die Ausbildung neuer Neuronenverbindungen im Gehirn während der Lernphase.

Auf der Grundlage des bedingten Reflexes ist durch v. Holst, Mittelstaedt und Anochin das Reafferenzprinzip entwickelt worden (vgl. [1.1.23], [1.1.12]). Danach werden die Umweltreize in einem internen Abbild ausgewertet und mit gespeichertem Wissen verglichen. Der Organismus reagiert daraufhin mit einer dem bisherigen Wissen entsprechenden optimalen Handlung. Der in Wechselwirkung mit der Umwelt erzielte Erfolg wird im Gehirn ausgewertet und mit dem Erfolg verglichen, der nach dem bisherigen Wissen zu erwarten gewesen ist. Bei Übereinstimmung festigt sich das interne Umweltmodell; Abweichungen bewirken entsprechende Korrekturen am gespeicherten Wissen.

Lernverhalten wird auch in technischen Systemen erzielt bzw. ausgenutzt (s. Abschnitte 1.2.2.4. und 2.). Insbesondere ist der bedingte Reflex in der Lernmatrix von Steinbuch [1.1.24] nachgebildet worden.

Die Impulsvorgänge in den Neuronennetzen des Gehirns bilden die neurophysiologische Grundlage sowohl für unbewußte als auch für bewußte Vorgänge der Wahrnehmung und des menschlichen Verhaltens allgemein. Unbewußt bzw. unterbewußt verlaufen z. B. Korrekturmechanismen zur Größenkonstanz der Wahrnehmung eines Gegenstands in verschiedener Entfernung oder auch bestimmte Mechanismen der Verhaltensmotivation und -regulation. Die höchste Ebene geistiger Prozesse bildet jedoch eine im phylogenetischen Entwicklungsprozeß entstandene besondere Eigenschaft oder Fähigkeit des Gehirns – das Bewußtsein. Es umfaßt die gesamte psychische Tätigkeit des

Menschen: Empfindungen, Wahrnehmung, Denken, aber auch Willensverhalten, Stimmungen oder Gefühle. Im Bewußtsein werden die über äußere und innere Rezeptoren empfangenen Informationen über die Umwelt und den eigenen Organismus zu einem umfassenden Abbild und zu einheitlichen Erkenntnissen zusammengefaßt (Kroebel [1.1.25], Klaus [1.1.26], Helm [1.1.27]).

In der bisherigen Darstellung der Erkennungsvorgänge von den Sinnesorganen bis zum Bewußtsein sind Energietransformationen, Informationsverarbeitungsprozesse und Bewußtseinsvorgänge unterschieden worden. Versuche haben bisher gezeigt, daß letztere an die beiden ersteren meß- und reproduzierbar gebunden sind.

So korrelierten Meßergebnisse, die einerseits in einem psychologischen Wahrnehmungsexperiment die Abhängigkeit externe Reizgröße – subjektive Empfindungsintensität und andererseits bei Elektroenzephalogrammmessungen die Abhängigkeit externe Reizgröße – objektive Erregungsintensität in Gehirnneuronen darstellen (Keidel [1.1.2]). Damit wurde ein quantitativer Zusammenhang zwischen Bewußtseinsinhalten und Neuronenaktivitäten nachgewiesen. In anderen Experimenten wurden Neuronen in bestimmten Gehirnbereichen elektrisch gereizt und je nach Elektrodenort bei Ratten Vermeidens- oder Erlangensreaktionen „bis zur Süchtigkeit“ (Helm [1.1.27]) erzeugt (Olds/Milner [1.1.28]) bzw. bei menschlichen Patienten nichtunterdrückbares Lachen ausgelöst (Hassler/Riechert [1.1.29]). Damit konnten gewisse örtliche Bindungen der „Transformation“ von Neuronenaktivitäten in psychologische Äußerungen aufgezeigt werden.

Wenn sich auch die experimentellen Nachweise gegenwärtig noch auf einer relativ einfachen Ebene befinden – verglichen mit den komplizierten Bewußtseinsvorgängen, deren der Mensch fähig ist –, so zeigen sie doch an, daß letztere streng an neurophysiologische Vorgänge im Gehirn gebunden und vermutlich quantifizierbar sind. Einzelheiten der Umsetzung räumlich-zeitlicher Erregungsmuster in den Netzen gezündeter und gehemmter Neuronen in bewußte Empfindungen und Wahrnehmung und insbesondere auch in Begriffe und Aussagen sind gegenwärtig völlig unbekannt (Flechtner [1.1.30]).

Wegen des komplizierten Gegenstands beschränken sich bisher vorge-schlagene „Gehirnmodelle“ (vgl. Doran [1.1.31]) nur auf die Realisierung von Teilfunktionen. Als elektronische Nachbildung lernfähiger mehrschichtiger Neuronennetze ist vor allem das Perzeptron nach Rosenblatt (z. B. [1.1.32]) bekannt geworden.

1.1.3.3. Bionische Probleme

Es liegt nahe, zu prüfen, ob die Forschungsergebnisse zur menschlichen Erkennung für technische Entwicklungen verwertet werden können. Die Frage, ob biologische Systeme Vorbilder für die Entwicklung entsprechender technischer Systeme sein können, wird teils nachdrücklich bejaht (da z. B. für Erkennungsprobleme gar keine anderen als biologische Vorbilder existieren, von denen man lernen könnte), teils mit Skepsis beantwortet (da z. B. die für die Technik so erfolgreiche Erfindung des Rades auch keinerlei Vorbild in der Natur habe). Praktisch ist in den Fällen, in denen analoge biologische

und technische Systeme vorliegen, teils die Natur nachgeahmt, teils ist die technische Lösung selbständig entwickelt und entsprechende Prinzipien sind erst später in biologischen Systemen angetroffen worden. Beispiele sind die Entwicklung einer Haut zur Grenzschnittstabilisierung für Unterwasserfahrzeuge nach dem Vorbild der Delphinhaut, die Ortungssysteme der Fledermäuse und technische Radarsysteme oder biologische und technische Regelsysteme.

Es gibt jedoch einige teils grundsätzliche, teils durch den gegenwärtigen Entwicklungsstand der Technik bedingte Unterschiede zwischen Natur und Technik, die Grenzen für bionische Bestrebungen setzen. Die wichtigsten sind folgende [1.1.2] [1.1.33]:

- **Unterschiedliches Konstruktions- oder Optimierungsprinzip**
Die Entwicklung der Lebewesen wird durch Mutation und Selektion bestimmt. Die Zweckmäßigkeit der Konstruktion bezieht sich also auf die Erhaltung der Existenz. Die Entwicklung von Automaten oder Maschinen ist dagegen zweckbestimmt; ihre Optimierung erfolgt nach zu erbringender Leistung.
- **Unterschiedliche Bauelemente**
Im Nervensystem sind die Neuronen einheitlich vorkommende Grundbausteine. Ihre Funktion beruht auf komplizierten, nichtlinearen Stofftransport- und Impulsvorgängen. Der technische Nachbau stößt auf beträchtliche Schwierigkeiten. Praktisch verwendet man in Automaten gegenwärtig zum Speichern und Verknüpfen von Information eine Vielfalt von Grundbausteinen mit wesentlich anderen Funktionsweisen, als sie bei Neuronen vorliegen.
- **Unterschiedliche Komplexität**
Die kleinen Neuronenabmessungen und der geringe Leistungsumsatz in den Zellen gestatten die hohe Packungsdichte von 10^7 Neuronen/cm³ bzw. eine Gesamtzahl von 10^{10} Neuronen im Gehirn. Dieser technisch gegenwärtig nicht erreichbare hohe Bauelementeeinsatz führt auch zu wesentlichen Funktionsunterschieden. So geschieht die Informationsweiterleitung und Informationsverknüpfung von den Rezeptoren bis zu den entsprechenden Hirnrindengebieten in vielen parallelen Kanälen und daher mit großer Sicherheit gegen Ausfälle von Neuronen, während technische Informationssysteme aus Aufwandsgründen vorwiegend seriell arbeiten und sehr geringe Ausfallraten der Bauelemente erfordern.
Selbst bei gleichen Grundfunktionsprinzipien führt das verfügbare Bauelementereservoir zu erheblichen Leistungsunterschieden, z.B. in biologischen und technischen Regelsystemen. In ersteren ist das gleichzeitige Einstellen vieler unterschiedlicher Regelparameter erforderlich, müssen bestimmte Stellglieder gleichzeitig in mehreren Regelkreisen wirken und bilden viele Regelsysteme eine hierarchische Ordnung. Solche Komplexitätsgrade sind mit technischen Systemen in absehbarer Zeit kaum erreichbar.

Die geschilderten Schwierigkeiten wirken sich auch auf die Übernahme biologischer Forschungsergebnisse in technische Erkennungssysteme aus.

So wird der Nachbau der Augenretina als eine Rasteranordnung von Fotozellen zwar praktisch eingesetzt, bereitet für größere Auflösungen aber technologische Schwierigkeiten. Neuronennachbildungen haben bisher keine Verbreitung als Bauelement gefunden. Die laterale Inhibition kann in technischen Schaltungen von Schwellwertelementen zur Bildverbesserung (siehe Abschn. 3.2.2.) angewandt werden; die Realisierung scheiterte bisher aber am erforderlichen Aufwand. Die Nachbildung des bedingten Reflexes in der Lernmatrix stieß für den praktischen Einsatz bisher auf technische Schwierigkeiten bei der Realisierung geeigneter Verknüpfungselemente.

Unterschiede zwischen biologischer und technischer Erkennung müssen sich auch aus den für beide unterschiedlichen Anforderungen und Bedingungen ergeben. So sind die Auswertung unterschiedlicher Sinnesorgane und der Einbezug von Denkvorgängen beim Abbildaufbau für viele praktische Aufgaben nicht erforderlich, so daß man also hierfür nicht die umfassende menschliche Erkennungsfähigkeit nachbilden muß.

Das Studium der biologischen Erkennung wird also nicht unmittelbar zu einem technischen Nachbau führen, sondern zunächst zu einer Analyse des Erkennungsprozesses, zu dessen Formalisierung und Mathematisierung (z. B. einer logischen Beschreibung). Für diesen aus der biologischen Erkennung gewonnenen, aber von der biologischen Realisierung abstrahierten Prozeß oder für Teilprozesse davon sind dann geeignete technische Realisierungen zu finden.

1.1.4. Sprache als Zeichensystem

Die Sprache hat zwei wesentliche Grundfunktionen:

- Sie bildet einen Träger für Begriffe und Aussagen des internen Abbilds, d. h. für Gedanken, und ist damit ein wichtiges Abstraktionsmittel.
- Sie ermöglicht den Austausch von Gedanken und ist damit ein Kommunikationsmittel.

Liegen Wörter einer Sprache als gesprochene Laute oder als Schrift für eine Kommunikation zwischen Menschen vor, werden sie verallgemeinernd Zeichen genannt. Sie bezeichnen dabei bestimmte Objekte (Dinge, Eigenschaften, Relationen) einer „nichtsprachlichen Welt“ und bilden den Wortschatz einer sog. Objektsprache (Sprache erster Stufe).

Zeichen (z. B. Wörter), die Zeichen einer Objektsprache bezeichnen, sind Bestandteile einer sog. Metasprache (Sprache zweiter Stufe). Sie ermöglichen z. B. Aussagen über Aussagen im Unterschied zu Aussagen über nichtsprachliche Sachverhalte in der Sprache erster Stufe.

Die Zuordnung, daß ein bestimmter „Gegenstand“ G_1 (z. B. ein geschriebenes Wort oder eine Abbildung) als Zeichen für einen anderen Gegenstand G_2 (z. B. ein bestimmtes Umweltobjekt) fungiert, ist entweder historisch entstanden oder entspringt einer definitiven Vereinbarung zwischen den Zeichenbenutzern. Solche Übereinkünfte zwischen den Zeichenbenutzern, G_1 als stellvertretend für G_2 anzusehen, machen G_1 zum Zeichen.

Besonders wichtige Zeichensysteme sind natürliche und künstliche Sprachen. Zeichensysteme allgemein und insbesondere die Beziehungen zwischen Zeichen, Bezeichnetem, internem Abbild und Zeichenbenutzer werden vom Wissenschaftszweig der Semiotik und deren Teilgebieten Syntaktik, Semantik und Pragmatik untersucht (Klaus [1.1.3]).

Die Beziehungen zwischen Zeichen und Bezeichnetem führen zu drei Zeichenkategorien:

Icon	Das Zeichen hat Ähnlichkeit mit dem Bezeichneten, z. B. Bilder.
Index	Das Zeichen steht in ursächlichem Zusammenhang mit dem Bezeichneten (Anzeichen), z. B. Erröten und Erblassen beim Menschen, Signale aus technischen Prozessen.
Symbol	Das Zeichen ist dem Bezeichneten nach konventionellen Regeln zugeordnet worden, oder die Zuordnung hat sich in der gesellschaftlichen Praxis herausgebildet, z. B. Wörter einer Sprache.

Die Zusammenhänge zwischen Zeichen untereinander, ihre Verknüpfung und Umformbarkeit, werden von der Syntaktik betrachtet. Das System der Verknüpfungs- und Umformungsregeln einer bestimmten Sprache wird als deren Syntax bezeichnet. Die verwendeten Regeln nehmen dabei i. allg. keine Rücksicht darauf, ob die bei der Verknüpfung entstehenden neuen Zeichen einen Sinn haben, d. h. wieder reale Sachverhalte bezeichnen oder Zeichen sind, die in einem vorliegenden abstrakten Begriffssystem nach irgendeinem Sinnkriterium auftreten dürfen (s. Abschn. 2.2.2.).

Die Semantik behandelt die Beziehungen zwischen Zeichen und internem Abbild. Im Mittelpunkt steht dabei die Klärung des Begriffs Zeichenbedeutung. Die Definitionen der Bedeutung sind in der Literatur uneinheitlich, die wichtigsten sind folgende:

1. Verhaltenskonzept – Bedeutung eines Zeichens ist dasjenige Verhalten, das zu dem Zeichen führt oder von diesem Zeichen bei dessen Wahrnehmung ausgelöst wird. Dabei geht es sowohl um nichtsprachliches praktisches Verhalten als auch um sprachliche Assoziationen in einem Begriffsnetz. Allerdings sind Verhaltensweisen von biologischen Individuen auf Grund eines Zeichens nicht eindeutig, sondern situationsbedingt (Hörmann [1.1.34]).
2. kognitives Konzept – Bedeutung eines Zeichens ist dasjenige Wissen um einen Zusammenhang, das durch das Wahrnehmen des Zeichens hervorgerufen wird. Wissen ist dabei mehr oder weniger bewußte kognitive Verfügbarkeit [1.1.34].
3. nach Klaus [1.1.3] – Bedeutung eines Zeichens ist die abstrakt-logische Form des mit ihm verbundenen internen Abbilds. Ein Begriff ist die Bedeutung eines Wortes, eine Aussage ist die Bedeutung eines Satzes.
4. nach Wotjak [1.1.35] – Bedeutung eines Zeichens ist das mit ihm verbundene überindividuelle gesellschaftliche Abbild. Es ist der invariante Kern entsprechender individueller Abbilder. Die Bedeutung ist strukturiert. Sie besteht aus Bedeutungseinheiten, die ihrerseits strukturierte Mengen von Bedeutungselementen sind.

Die Definition 1 wird neuerdings in den Fällen interessant, wo das wahrnehmende Individuum ein technischer Automat ist. Dessen Verhalten kann geradezu als Meßmöglichkeit für die Bedeutung vorgelegter Zeichen angesehen werden. Solche Betrachtungsweisen treten bei der Formalisierung der Semantik von Programmiersprachen auf. Definition 4 wird vor allem eingesetzt zur linguistischen Analyse natürlicher Sprachen.

In der Pragmatik wird allgemein die Zeichenverwendung durch den Menschen untersucht. Hierzu gehören die Verhaltensbeeinflussung durch die Sprache, die Bewertung der durch Zeichen aufgenommenen Information, Nutzungsaspekte u. a.

Die enge Verbindung zwischen Sprache und menschinternem Abbild läßt fragen, ob ein dem letzteren möglichst nahekommendes maschineninternes Abbild auf der Grundlage von Wörtern und Sätzen einer Sprache erzielbar ist.

Zwar sind Sprache und Wirklichkeit nicht isomorph. Natürliche Sprachen sind nicht streng definiert und enthalten verschiedene Wörter für den gleichen Begriff (Synonymie) oder nur ein Wort für verschiedene Begriffe (Homonymie). In künstlichen Sprachen dagegen sind Zeichen und bezeichnete Gegenstände zwar umkehrbar eindeutig zugeordnet, der vorhandenen Präzision steht aber ein großer Mangel an Allgemeinheit gegenüber [1. 1. 3].

Das sind allerdings keine unübersteigbaren Hindernisse; durch Verbesserung der Sprachdefinition und Begrenzung der Anwendungsfälle sind sie praktisch zu überwinden.

Entscheidender ist, daß die Zeichenreihen (Sätze) einer Sprache eine sehr unökonomische Kodierung für die Darstellung externer Sachverhalte sind und ihre automatische Verarbeitung nach linguistischen Regeln umständlich ist (s. Abschnitte 2. 2. 1. und 2. 2. 2.). Sie sind dadurch keine zweckmäßige Form maschineninterner Abbildung. Besser geeignet ist die Entwicklung von Begriffsnetzen als günstige Speicherform internen Wissens und die Realisierung logischer Operationen als Denkalgorithmen über diesen Netzen. Für die sprachliche Kommunikation zwischen Mensch und Automat sind dann zusätzlich Transformationen in beiden Richtungen zwischen dem Begriffsnetz einschließlich der logischen Verknüpfungen einerseits und sprachlich wohlgeformten Sätzen andererseits erforderlich. Das bedeutet aber in technischen Systemen je nach der Ausweitung einen gewissen Luxus. Auch in dieser zweiten Möglichkeit liegen beträchtliche Schwierigkeiten (s. Abschn. 2. 3.).

1.2. Technische Erkennungssysteme

Mit der Entwicklung elektronischer Datenverarbeitungsanlagen ist ein technisches „Subjekt“ verfügbar geworden, dem Erkennungsaufgaben übertragen werden können, die vorher nur in biologischen Systemen realisierbar gewesen sind. Es konnte nun versucht werden, zahlreichen Anwenderbedürfnissen bezüglich der Automatisierung geistiger Fähigkeiten entgegenzukommen. Diese Möglichkeit wurde sogar zum Zwang, als die hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten der Rechner schnellere Datenerfassungsmittel als Lochstreifen oder Lochkarten erforderten.

Im Zusammenwirken von Mensch, Datenverarbeitungsanlage (DVA) und Umwelt treten in diesem Zusammenhang folgende miteinander verkoppelte Problemschwerpunkte auf (s. Bild 1.2.1):

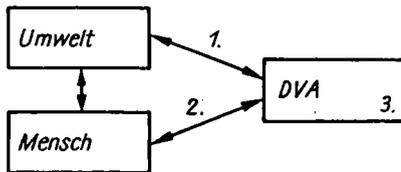


Bild 1.2.1. Zusammenwirken Mensch–DVA–Umwelt

1. Verbindung DVA–Umwelt

Automatisierung der Datenerfassung durch Ausschließen menschlicher Kodierleistungen:

- Erfassen großer Datenmengen, z. B. Beleglesung
- Verarbeiten komplizierter Strukturen, z. B. Bildauswertung.

2. Verkehr Mensch–DVA

Gegenseitige Ergänzung von menschlicher Intelligenzleistung und DVA-Eigenschaften (insbesondere Verknüpfungs- und Speicherfähigkeit) in enger Wechselwirkung (Dialogverkehr) ohne Informationszwischenträger:

- Rechnerunterstützung geistiger Fähigkeiten, die DVA arbeitet dabei vorwiegend unselbständig, z. B. rechnergestütztes Konstruieren
- Frage-Antwort-Systeme, die DVA arbeitet vorwiegend selbständig, z. B. Informationsbanken.

3. Fähigkeiten der DVA

Automatisches Lösen komplizierter Aufgaben durch weitgehendes Ausschließen der menschlichen Problemaufbereitung.

Nichtnumerische Informationsverarbeitung mit Erkennungs- und Problemlösefähigkeiten der DVA.

Die Automatisierung von Erkennungsleistungen umfaßt dabei zwei grundsätzliche Zielrichtungen, die sich durch die resultierenden Gerätelösungen unterscheiden. Das ist erstens die Entwicklung neuer Eingabemöglichkeiten (Eingabegeräte) für universelle DVA, d. h. Schaffung einer neuen DVA-Peripherie, und zweitens die Erarbeitung von Prinziplösungen für bestimmte Anwendungsfälle, z. B. zur Abarbeitung auf einer universellen DVA bei konventionellen Eingabemitteln. Im folgenden Abschnitt werden Beispiele für beide Richtungen angeführt.

1.2.1. Praktische Erkennungsaufgaben

Die Schriftzeichenerkennung (s. Abschn. 3.4.1.) hat besonders dringend technische Lösungen erfordert, da die Eingabe alphanumerischer Daten in moderne, schnelle Rechner einen Engpaß in der Datenverarbeitung bildet. Die Umsetzung der in verschiedensten Prozessen anfallenden optisch lesbaren Zeichen auf maschinell lesbare Datenträger (Eingabe über Tastatur