

uwe LÄMMEL  
jürgen CLEVE

# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ



3., neu bearbeitete Auflage

HANSER





# Inhalt

<b>1</b>	<b>Künstliche Intelligenz.....</b>	<b>11</b>
1.1	Was ist, was kann künstliche Intelligenz? .....	12
1.2	Struktur des Buches.....	18
1.3	Intelligente Agenten .....	21
1.3.1	Agenten und künstliche Intelligenz .....	23
1.3.2	Anwendungen.....	25
1.4	Künstliche Intelligenz und Wissensmanagement .....	27
1.5	Übungen .....	28
<b>2</b>	<b>Darstellung und Verarbeitung von Wissen .....</b>	<b>29</b>
2.1	Darstellung von Wissen mit Hilfe von Logik .....	34
2.1.1	Aussagenlogik .....	35
2.1.2	Prädikatenlogik.....	54
2.1.3	Logik und PROLOG.....	65
2.1.4	Übungen .....	67
2.2	Regelbasierte Wissensdarstellung .....	69
2.2.1	Vorwärtsverkettung .....	72
2.2.2	Rückwärtsverkettung .....	76
2.2.3	Regelverarbeitung und Prolog .....	78
2.2.4	Business Rules.....	80
2.2.5	Übungen .....	82
2.3	Semantische Netze und Frames .....	83
2.3.1	Semantische Netze.....	83
2.3.2	Frames .....	85
2.3.3	Wissensnetze .....	87
2.3.4	Übungen .....	88
2.4	Vages Wissen .....	89
2.4.1	Unsicheres Wissen.....	90
2.4.2	Fuzzy-Mengen.....	99
2.4.3	Fuzzy-Logik .....	105
2.4.4	Fuzzy-Regler .....	107
2.4.5	Übungen .....	111
<b>3</b>	<b>Problemlösung mittels Suche .....</b>	<b>113</b>
3.1	Uninformierte Suche .....	119

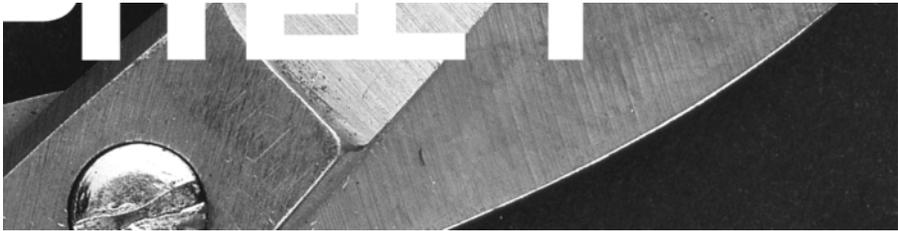
3.2	Heuristische Suche .....	129
3.2.1	Heuristik des nächsten Nachbarn .....	133
3.2.2	Bergsteiger-Strategie .....	135
3.2.3	Bestensuche .....	136
3.2.4	A*-Suche .....	137
3.3	Das Rundreiseproblem .....	141
3.4	Zusammenfassung .....	145
3.5	Übungen .....	148
<b>4</b>	<b>PROLOG .....</b>	<b>151</b>
4.1	Logisches Programmieren .....	152
4.1.1	Erste Schritte .....	152
4.1.2	Ein Beispiel .....	155
4.1.3	Regeln .....	157
4.1.4	Übungen .....	161
4.2	PROLOG-Programme .....	161
4.2.1	Lösungsfindung mittels Backtracking .....	161
4.2.2	Parameterübergabe mittels Unifikation .....	163
4.2.3	Interpretation von Programmen .....	167
4.2.4	Übungen .....	168
4.3	Datentypen und Arithmetik .....	169
4.3.1	Einfache und zusammengesetzte Datentypen .....	169
4.3.2	Listen .....	171
4.3.3	Arithmetik .....	175
4.3.4	Übungen .....	176
4.4	Steuerung der Abarbeitung .....	177
4.4.1	Reihenfolge der Klauseln .....	178
4.4.2	Reihenfolge der Literale im Körper einer Regel .....	179
4.4.3	Kontrolle des Backtracking .....	180
4.4.4	Die Negation .....	183
4.4.5	Übungen .....	184
4.5	Vordefinierte Prädikate .....	184
4.5.1	Übungen .....	185
4.6	Beispielprogramme .....	185
4.6.1	Das Einfärben einer Landkarte .....	186
4.6.2	Die Türme von Hanoi .....	187
4.6.3	Das Acht-Damen-Problem .....	188
4.6.4	Das Problem der stabilen Paare .....	190
4.6.5	Übungen .....	192
<b>5</b>	<b>Künstliche neuronale Netze .....</b>	<b>193</b>
5.1	Das künstliche Neuron .....	196
5.2	Architekturen .....	201
5.3	Arbeitsweise .....	203
5.4	Übungen .....	205

<b>6</b>	<b>Vorwärtsgerichtete neuronale Netze .....</b>	<b>207</b>
6.1	Das Perzeptron .....	208
6.1.1	Die Delta-Regel .....	210
6.1.2	Musterzuordnungen .....	214
6.1.3	Übungen .....	215
6.2	Backpropagation-Netze .....	216
6.2.1	Das Backpropagation-Verfahren .....	218
6.2.2	Das XOR-Backpropagation-Netz .....	222
6.2.3	Modifikationen des Backpropagation-Algorithmus .....	225
6.2.4	Übungen .....	226
6.3	Typische Anwendungen .....	227
6.3.1	Zeichenerkennung .....	228
6.3.2	Das Encoder-Decoder-Netz .....	234
6.3.3	Ein Prognose-Netz .....	235
6.3.4	Übungen .....	237
6.4	Datenvorverarbeitung .....	239
6.4.1	Verarbeitungsschritte .....	239
6.4.2	Daten des Kreditvergabe-Beispiels .....	241
6.4.3	Übungen .....	246
6.5	Netzgröße und Optimierungen .....	247
6.5.1	Die Größe der inneren Schicht .....	247
6.5.2	Das Entfernen von Verbindungen .....	250
6.5.3	Genetische Algorithmen .....	251
6.5.4	Übungen .....	253
6.6	Partiell rückgekoppelte Netze .....	253
6.6.1	Jordan-Netze .....	255
6.6.2	Elman-Netz .....	257
6.6.3	Übungen .....	257
<b>7</b>	<b>Wettbewerbslernen .....</b>	<b>259</b>
7.1	Selbstorganisierende Karte .....	261
7.1.1	Architektur und Arbeitsweise .....	261
7.1.2	Das Training .....	264
7.1.3	Visualisierung einer Karte und deren Verhalten .....	268
7.1.4	Eine Lösung des Rundreiseproblems .....	269
7.1.5	Übungen .....	273
7.2	Neuronales Gas .....	274
7.2.1	Architektur und Arbeitsweise .....	274
7.2.2	Wachsendes neuronales Gas .....	276
7.2.3	Übungen .....	278
7.3	Adaptive Resonanz-Theorie .....	279
7.3.1	Das Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma .....	279
7.3.2	Struktur eines ART-Netzes .....	281
7.3.3	Das Beispiel Würfelmuster .....	282
7.3.4	Arbeitsweise .....	285
7.3.5	Übungen .....	287

<b>8</b>	<b>Autoassoziative Netze.....</b>	<b>289</b>
8.1	Hopfield-Netze.....	290
	8.1.1 Arbeitsweise.....	291
	8.1.2 Wiedererkennung von Mustern.....	293
	8.1.3 Energie-Niveau eines Netzes.....	297
8.2	Lösung von Optimierungsproblemen.....	298
8.3	Die Boltzmann-Maschine.....	301
8.4	Übungen.....	305
<b>9</b>	<b>Entwicklung neuronaler Netze.....</b>	<b>307</b>
9.1	Der Stuttgarter Neuronale Netze Simulator.....	308
	9.1.1 Ein erstes Beispiel.....	309
	9.1.2 Aufbau von Netzen – der Netzeditor.....	313
	9.1.3 Das Training von Netzen.....	316
	9.1.4 Die Visualisierung von Ergebnissen.....	319
	9.1.5 Übungen.....	322
9.2	JavaNNS.....	323
9.3	Implementation neuronaler Netze.....	325
	9.3.1 Einsatz von Array-Datenstrukturen.....	326
	9.3.2 Der objektorientierte Ansatz.....	327
	9.3.3 Ein einfaches Perzeptron.....	329
	9.3.4 Übungen.....	335
	<b>Literatur.....</b>	<b>337</b>
	<b>Index.....</b>	<b>343</b>

# 1

## Künstliche Intelligenz



# 1 Künstliche Intelligenz

## 1.1 Was ist, was kann künstliche Intelligenz?

Kein anderes Gebiet der Informatik hat so häufige, zum Teil emotionsgeladene Debatten ausgelöst wie das Gebiet mit dem Namen „künstliche Intelligenz“. Schuld daran ist die Wortwahl im Amerikanischen „Artificial Intelligence“ und insbesondere deren Übertragung ins Deutsche. Vielleicht hätte man mit der Übersetzung „gekünstelte Intelligenz“ oder „synthetische Intelligenz“ die Inhalte besser getroffen, dann wohl aber mit erheblich weniger Werbewirkung.

Der Begriff „künstliche Intelligenz“ führt sehr schnell zu der Frage: „Können Maschinen denken?“ oder „Werden Maschinen eines Tages denken können?“. Will man sich mit dieser Thematik beschäftigen, wird man zuerst die Grundbegriffe klären müssen:

- Was ist eine Maschine?
- Was bedeutet Denken?

Bereits Anfang der 50er-Jahre stellte Alan Turing einen Test vor, mit dem das intelligente Verhalten eines Computers geprüft werden sollte. Zur Erläuterung wird das Experiment zunächst von drei Menschen durchgeführt, die räumlich voneinander getrennt sind, aber mittels Rechnernetz miteinander kommunizieren können.

„Wir betrachten drei Spieler, einen Mann (A), eine Frau (B) und einen männlichen oder weiblichen Fragesteller (C). Der Fragesteller sei allein in diesem Raum. Das Ziel des Fragestellers ist es zu entscheiden, welche der beiden anderen Personen der Mann bzw. die Frau ist. Er kennt sie zunächst als X bzw. Y, und das Spiel endet damit, dass er sagt »X ist A und Y ist B« oder »X ist B und Y ist A.«“ (Alan Turing in [ZiWo94], S. 39–40).

Zusätzlich erschwert wird die Situation dadurch, dass der Mann A verhindern will, dass C ihn erkennt. Die Spielerin B will dagegen dem Fragesteller C helfen, die richtige Antwort zu geben.

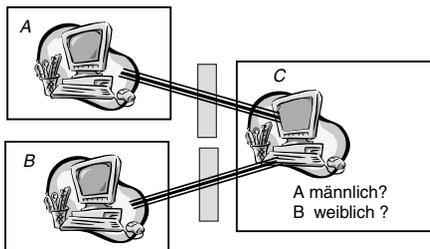


Abbildung 1.1 Der Turing Test

Wird nun die Person A durch ein Computerprogramm ersetzt, so wird dieses Experiment nach seinem Erfinder **Turing-Test** genannt. Kann sicher entschieden werden, ob X oder Y der Computer ist? Falls dies nicht möglich ist, muss man dem Computerprogramm wohl ein gewisses intelligentes Verhalten bescheinigen.

Bereits mit der nach ihm benannten **Turing-Maschine** war Alan Turing Mitte der 30er-Jahre der tatsächlichen Entwicklung weit voraus. Mit Hilfe seines theoretischen Maschinenmodells konnte der Begriff **Berechenbarkeit** definiert werden, bevor die ersten programmierbaren Rechenautomaten überhaupt begannen, tatsächlich etwas zu berechnen.

Ähnlich vorausseilend ist der Turing-Test geeignet, einen Zusammenhang zwischen Intelligenz und Maschine zu testen, lange bevor die ersten Computer in der Lage sein werden, diesen zu Test bestehen. Seit Anfang der 90er Jahre ist ein Preis ausgeschrieben, der im Rahmen eines Wettbewerbs das beste Programm eines Turing-Tests auszeichnet. [Loebner97]



**Abbildung 1.2** Die Medaille des Turing-Test-Wettbewerbs

Die an diesem Test teilnehmenden Programme sind auf das Sprachverstehen, konkreter auf das Verstehen geschriebener Worte, und ein allgemeines Weltwissen spezialisiert, wie man den veröffentlichten Dialogen entnehmen kann.

Eine Diskussion über Zusammenhang und Zusammenspiel zwischen Mensch, Intelligenz und Computer aus philosophischer Sicht wäre sehr anregend, geht jedoch über den Rahmen dieses Buches hinaus. Der interessierte Leser sei z. B. auf die Bücher verwiesen: „Künstliche Intelligenz – Philosophische Probleme“, [ZiWo94], „Weizenbaum contra Haefner: Sind Computer die besseren Menschen?“, [Haller90] sowie „Natürliche und künstliche Intelligenz“, [Lenzen02].

Ebenfalls philosophischen Zusammenhängen ist D. R. Hofstadter in seinem Buch „Gödel – Escher – Bach“ auf der Spur [Hofstadter99]. In unterhaltsamer Art und Weise stellt er Strukturen aus der Informatik und Mathematik (Gödel) in Beziehung zu denen aus der darstellenden Kunst (Escher) und der Musik (Bach). Da einige Grundlagen der Informatik wie Information, Rekursion, Logik anschaulich dargestellt werden, sollte das Buch zur Pflichtlektüre eines jeden Informatikers gehören.

In unserem Buch wird die Ingenieur-Seite der künstlichen Intelligenz betrachtet, die sich mit der Entwicklung von Softwarelösungen befasst.

Versuche, den Begriff **künstliche Intelligenz (KI)** zu definieren, lassen zwei unterschiedliche Herangehensweisen erkennen:

Zum einen zieht man den *Menschen* als Vergleich heran:

- „Die KI hat sich zum Ziel gesetzt, Aufgaben, die nach allgemeinem Verständnis Intelligenz erfordern, vom Computer erledigen zu lassen.“ [KaReWo91]

- „the theory and development of computer systems able to perform tasks normally requiring human intelligence, ...“ [OxfDic98]

Es sind bereits eine ganze Reihe von Computerprogrammen bekannt, die Aufgaben, für deren Lösung im Allgemeinen Intelligenz notwendig ist, besser und schneller lösen können als ein Mensch: Ein Beispiel ist die Routenplanung unter Berücksichtigung von Randbedingungen (wie keine Autobahn) und Zielkriterien (wie die kürzeste Verbindung). Derartige Programme enthalten Suchstrategien, die dem Gebiet der künstlichen Intelligenz entstammen.

So einleuchtend die Definition klingen mag, so leicht kann sie angegriffen werden. Die Multiplikation von Zahlen, insbesondere von mehrstelligen Zahlen im Kopf, ist nach allgemeiner Einschätzung an eine gehörige Portion Denkvermögen gebunden. Schaffen Sie es  $324 \times 175$  im Kopf zu lösen? Die Multiplikation zweier Zahlen gehört dennoch wahrlich nicht zu den KI-Problemen.

Um diesen Diskussionen aus dem Weg zu gehen, wird die künstliche Intelligenz alternativ durch das Aufzählen der Arbeitsgebiete charakterisiert:

- „Teildisziplin der Informatik, die so unterschiedliche Problembereiche wie Bildverarbeitung, Robotik, Fließtext- und Spracherkennung, mechanische Beweise und anderes umfasst und auch die Konstruktion von wissensbasierten Systemen einschließt.“ [HeRo92]

Hier steht die Assistenzfunktion der künstlichen Intelligenz für den Menschen im Mittelpunkt.

Einem Vergleich des Begriffs „Künstliche Intelligenz“ mit menschlichen Fähigkeiten kann man aber wohl nicht aus dem Wege gehen. Allgemein unterstützen Computerprogramme den Menschen bei der Bewältigung seiner Aufgaben, sie müssen folglich an seine Forderungen und Wünsche angepasst werden. In vielen Anwendungen wird mit der Untersuchung der menschlichen Tätigkeit begonnen, um diese dann durch den Einsatz von Hard- und Software effizienter oder angenehmer zu gestalten.

Das Messen am Menschen ist somit keine Besonderheit der künstlichen Intelligenz. Die Besonderheit liegt darin, dass man die Fähigkeiten des Menschen zum Denken, zum Lernen aus Beispielen oder allgemein die Fähigkeiten zum Problemlösen nachbilden will, um eine Leistungssteigerung des Computers zu erzielen.

---

**Definition 1.1** Künstliche Intelligenz

---

Teilgebiet der Informatik, welches versucht, menschliche Vorgehensweisen der Problemlösung auf Computern nachzubilden, um auf diesem Wege neue oder effizientere Aufgabenlösungen zu erreichen.

---

Im vorliegenden Buch werden für den KI-Einsteiger die grundlegenden Techniken vorgestellt und Anwendungen anhand einfacher und nachvollziehbarer Problemstellungen aufgezeigt. Behandelt werden dabei sowohl die klassische künstliche Intelligenz als auch konnektionistische Herangehensweisen wie die neuronalen Netze.

Die klassische **künstliche Intelligenz**, auch **Symbol verarbeitende KI** genannt, geht immer von einer expliziten Darstellung des Wissens im Allgemeinen unter Nutzung logischer Konzepte aus. Dieser Teil der künstlichen Intelligenz wird als *Symbol verarbeitend* bezeichnet, da Objekte und Subjekte benannt werden. Sie werden auf dem Computer durch Symbole repräsentiert. Auch ihre Eigenschaften, Beziehungen zwischen ihnen oder Ereignisse werden durch Symbole dargestellt. Das Wissen über ein Spezialgebiet und die Strategien zur Lösungsfindung werden vom Menschen (Entwickler) in das KI-System eingearbeitet. Das Programm kann dann durch die Verarbeitung des beschriebenen Wissens, durch eine Symbolverarbeitung, zu neuen Aussagen gelangen.

Die klassische KI enthält eine Vielzahl von Teilgebieten. Im Zentrum dieses Buches stehen die allgemeinen Techniken aus den Bereichen der Wissensdarstellung und Wissensverarbeitung. Es werden das Problemlösen durch Suchen sowie eine Programmiersprache der KI behandelt.

Die im Buch behandelten Themen decken bei weitem nicht das gesamte Gebiet der künstlichen Intelligenz ab. Spezielle Teilgebiete wie beispielsweise das maschinelle Lernen oder die Verarbeitung natürlicher Sprache greifen über die hier dargestellten Methoden hinaus auf spezielle Formen der Wissensdarstellung wie beispielsweise verschiedene Grammatikarten zurück. Der interessierte Leser sei auf die Fachliteratur verwiesen, einen tiefer gehenden Überblick findet man in [Görz03].

Knobelaufgaben, wie sie in Büchern oder Zeitschriften gestellt werden, können sehr gut zur Veranschaulichung der Vorgehensweise der klassischen KI herangezogen werden. Das zu lösende Problem bezieht sich auf einen kleinen Ausschnitt der realen Welt, der allen geläufig ist und keine Einführung in ein Spezialgebiet erfordert. Die Aufgabenstellung enthält üblicherweise Informationen in Form von Aussagen, die auf den ersten Blick unzureichend erscheinen. Aufgrund logischer Überlegungen, Schlussfolgerungen aus den Aussagen, erkennt man dann mehr oder weniger schnell unter Nutzung von Allgemeinwissen des Rätsels Lösung. Probieren wir es:

---

**Beispiel 1.1** Eine Knobelaufgabe

---

In einer Firma arbeiten drei Freunde: ein C++-Programmierer, ein Java-Programmierer und ein Pascal-Programmierer. Ihre Namen sind Otto, Paul und Heinz. Der C++-Programmierer hat keine Geschwister (*A*); er ist der jüngste der Freunde (*B*). Heinz, der mit der Schwester von Otto verheiratet ist (*C*), ist älter als der Java-Programmierer (*D*).

Wer programmiert in welcher Sprache?

---

Derartige Knobelaufgaben sind sehr gute Trainingssituationen für die Anwendung von Mitteln und Methoden der KI. Darüber hinaus sind sie praxisnäher, als sie auf den ersten Blick erscheinen:

Auch eine praktische Aufgabenstellung bezieht sich stets auf einen kleinen Weltausschnitt. Das Wissen liegt häufig verbal formuliert vor und muss in eine formale Repräsentation übertragen werden, damit eine Wissensverknüpfung stattfinden kann. Zur Lösung ist neben dem vorhandenen Fachwissen auch Allgemeinwissen zu berücksichtigen und zu model-



# Index

## A

- A\*-Suche 137
- Abkühlen, simuliertes 302
- Ableitbarkeit 44
- Adaline 200
- Adaptive Resonanz Theorie 279
  - Arbeitsweise 285
- Agent 21
  - BDI- 22
  - Eigenschaften 22
  - Hardware- 26
  - Internet- 25
  - Software- 25
- Ähnlichkeitsmaß 280, 282
- Äquivalenz, semantische 46
- Aktionsregel 70
- Aktivierung 197, 198, 199, 200, 201, 212, 219, 222, 223, 229, 244, 260, 268
- Aktivierungsfunktion 197, 198, 216, 219, 221, 222, 223, 240, 292, 303
- Aktualität 76
- Algorithmus 194, 217
  - Backpropagation 196, 218, 220, 221, 223, 225, 228
  - Delta-Regel-Lern- 211
  - genetischer 251
  - Lern- 204
  - Lernalgorithmus neuronales Gas 275
  - SOM-Lern- 267
  - Wettbewerbslernen 260
- Allgemeingültigkeit 39
- Arithmetik 175
- Artificial Intelligence 12
- ART-Netz siehe Adaptive Resonanz Theorie 279
- Atom 169
- Ausgabe 214, 255, 261, 265, 281, 291
  - eines Neurons 197, 199, 204, 210, 218, 219
  - erwartete 211, 216
  - funktion 197, 219, 220, 223
  - Neuron 201, 202, 210, 214, 216, 220, 229, 237, 243, 249, 255, 257, 310, 326
  - schicht 202, 208, 218, 221, 290, 314, 324, 327
  - Standard- 319
  - tatsächliche 211
  - Trainings- 216
  - wert 210
- Ausgabe 211
- Ausgangszustand 115
- Aussage
  - atomare 36
  - zusammengesetzte 36
- Aussagenlogik 35
- aussagenlogische Formel 37
- autoassoziatives Netz 290, 317

## B

- Backpercolation 226
- Backpropagation 208, 209, 216, 218, 228, 255
  - Algorithmus 216, 217, 220, 221, 223
  - Backpercolation 226
  - mit Momentum 225
  - Modifikation 225

- Netz 216, 222
- QuickProp 225, 229
- Resilient 226, 230
- Standard- 229, 313
- Backtracking 161, 180
- Batch-Lernverfahren 219
- Bayessche Formel 93
- BDI-Agent 22
- beliefs 22
- Benutzungsoberfläche, soziale 25
- Bergsteiger-Strategie 135
- Bestensuche 136
- bias 199, 223, 284, 315, 331
- binäre
  - Aktivierung 200
  - Codierung 229, 245, 246
  - Gewichtsmatrix 286
  - Muster 247
  - Vektoren 238, 281
- Boltzmann-Maschine 301
  - Arbeitsweise 304
- Breitensuche 121
- Business Rule 27, 80

## C

- charakteristische Funktion 99
- Codierung 214, 229, 234, 239, 240, 241, 243, 245, 251, 264
  - binäre 246
  - Bitstring- 253
- Constraint-Probleme 147
- Cut 180

## D

- Data Mining 239, 261
- Datenreduktion 235
- Datenvorverarbeitung 234, 239
- Delaunay-Triangulation 276
- Delta-Regel 210
- Denken 12, 14, 194
- desires siehe BDI-Agent 22
- Desktop-Agent 25

## E

- Eingabe-Neuron 201, 211, 222, 235, 237, 245, 247, 262, 268, 274, 310, 326
- Eingabeschicht 201, 208, 216, 265, 317
- Eliza 25
- Elman-Netz 257
- Encoder-Decoder-Netz 234
- Energie-Funktion 300
- Energie-Niveau 290, 294, 297, 299, 302
- Erfüllbarkeit 39, 56
- Erinnerungsvermögen 254, 255, 256
- Erkennung
  - Muster- 212, 227, 291, 293, 320
  - Zeichen- 228, 248, 279
- Erregungszentrum 262, 264, 268
- Expert system shell 32
- Expertensystem 17, 23

## F

- Fairness 126
- Fakt 154
- Faktorisierung 62
- Fehler 210, 216, 219, 277
  - funktion 219, 225
  - Generalisierungs- 247
  - kurve 218, 225, 231
  - mittlerer quadratischer 230
  - Netz- 210, 217, 250, 251, 276, 313, 316, 318, 321
  - signal 220, 222, 223
  - Trainings- 248
- Feld, rezeptives 250
- Fitness-Funktion 251
- Formel
  - aussagenlogische 37
  - geschlossene 56
  - prädikatenlogische 56
- Frame 83
- Funktion 218, 319
  - Aktivierungs- 197
  - Ausgabe- 197
  - berechenbare 209
  - Energie- 300

erlernbare 209  
Fehler- 218  
logistische 198  
Mexican-Hat- 266  
Propagierungs- 197  
Schwellwert- 198, 210, 292  
sigmoide 198  
Sinus- 236  
tanh 222  
tanh- 198, 200  
UND- 200, 201, 205, 210, 213  
XOR- 212, 216, 222, 309

Fuzzy-Logik 105  
Fuzzy-Menge 99  
    Durchschnitt 103  
    Komplement 104  
    Teilmenge 102  
    Vereinigung 104  
Fuzzy-Regler 107

**G**

Gas, neuronales 274, 326, 327  
Generalisierungsfähigkeit 203, 231, 233, 247, 276  
genetischer Algorithmus 251  
Gewicht 197, 200, 201, 204, 208, 213, 216, 218, 223, 225, 260, 265, 270, 274, 281, 286, 291, 296, 300, 310, 317, 320, 326  
Gewichtsänderung 211, 218, 223, 225, 266, 321  
Gewichtsmatrix 222, 224, 281, 291, 297, 326  
Gewinner-Neuron 260, 264, 265, 268, 271, 275, 282, 322  
Glockenkurve 266  
Gradient 219, 225  
Gradientenabstiegsverfahren 218  
Graph 115

**H**

Hardware-Agent 22, 26  
Heuristik des nächsten Nachbarn 133  
hidden Neuron 202  
Hopfield-Netz 204, 290, 327

Horn-Klausel 66

## I

Identität 198, 199, 215, 220  
Inferenzregel 43, 58  
Intelligenz, künstliche 12, 13, 14  
intentions 22  
Interpretation 38, 56  
    logische 167  
    prozedurale 168  
Iterative Broadening 147  
Iterative Deepening 129, 147

## J

Java 27, 308, 325  
JavaNNS 20, 308, 323  
Jordan-Netz 255, 321  
Julia 25

## K

Karte, selbstorganisierende 260, 261, 322, 327  
KI siehe künstliche Intelligenz 13  
KI, Symbol verarbeitende 15, 17  
Klasse 328  
Klassifizierung 204, 227, 228, 241, 261, 263, 279, 281, 322  
klassische KI 14, 17  
Klausel 47, 154  
    leere 51  
Klausel-Normalform 47  
Kohonen-Karte 261, 267, 270, 271, 315, 327  
konjunktive Normalform 47, 61  
Kontext-Neuron 255, 257  
Korrektheit 45, 63, 127  
    Resolution 51  
Kreuzung 252  
künstliche Intelligenz 12, 13, 14, 195  
    klassische 15  
    Symbol verarbeitende 15  
Kurvenverlauf 237  
    Prognose 254

**L**

LEGO-Roboter 27  
Lernen 14, 21, 204, 210, 211, 217, 223, 242,  
311, 312  
Backpropagation 218  
Batch-Verfahren 219  
bestärkendes 204  
Delta-Regel 210  
nicht überwachtes 204, 261, 262  
Online-Verfahren 219  
SOM- 267  
überwachtes 204, 318  
Wettbewerbs- 20, 196, 204, 260, 274,  
279  
Lernfaktor 211, 221, 223, 229, 230, 246, 266,  
318, 332  
Linear Threshold Unit 200  
Liste 171  
Literal 47, 158  
Logik-Wissen 34  
logische Verknüpfung  
  ODER 205  
  UND 200, 201, 205, 213  
  XOR 212, 216, 222, 309  
logistische Funktion 198, 216, 220, 244, 303  
LTU 200

**M**

Mean Squared Error 230, 321  
Measure of belief 98  
Measure of disbelief 98  
Merkmalsreduktion 234  
Mexican-Hat-Funktion 266  
MinMax-Strategie 147  
Modell 40  
Modus ponens 43, 58  
Modus tollens 44  
most general unifier 165  
MSE siehe Mean Squared Error 230  
Musterassoziator 296  
Mustererkennung 227, 234, 296, 300, 320  
Mustervergleich 157  
Mutation 252

**N**

Negation 183  
Netz  
  ART- 260, 279  
  autoassoziatives 202, 290, 317  
  Backpropagation- 216  
  Elman- 257  
  -fehler 210, 217, 276, 313, 318, 321  
  Hopfield- 290  
  Implementation 325  
  Jordan- 255, 321  
  mit Rückkopplung 202  
  neuronales 14, 17, 20, 23, 201, 308  
  Optimierung 247  
  partiell rückgekoppeltes 253  
  Speicherkapazität 249  
  trainierbar 204  
  Training 316  
  vorwärtsgerichtetes 201, 208, 279, 317  
  Wissens- 27  
Neuron  
  biologisches 196  
  Gewinner- 260, 264, 268, 271, 275, 282,  
  322  
  hidden 202  
  Kontext- 255, 257  
  künstliches 197  
  On-Neuron 223  
  verdecktes 202  
neuronales Gas 274  
  wachsendes 276  
neuronales Netz 14, 17, 20, 23, 201, 308  
  Anwendung 227, 261, 291  
  Architektur 201, 204  
  autoassoziatives 290  
  Entwicklung 203, 308  
  Größe 247  
  Implementation 325  
  Optimierung 247  
  rückgekoppelt 202, 253  
  Speicherkapazität 247  
  vollvernetzt 202, 290  
  vorwärtsgerichtetes 201, 208

Normalform 45  
konjunktive 47, 59, 61

## O

Occur-Check 167  
On-Neuron 223  
Optimierung  
genetische 251  
Netzgröße 247  
Rundreiseproblem 269, 290, 298  
Overfitting 248, 276

## P

Parameterübergabe 163  
partiell rückgekoppeltes Netz 253  
Perzeptron 17, 208, 329  
Implementation 326  
Konvergenz-Theorem 209  
Philosophie 13  
Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma 279  
Prädikat 156, 158  
Prädikatenlogik 54  
Problem, Handlungsreisender 298  
Prognose 228, 235, 254, 261, 321  
Prolog 152  
Regel 157  
Steuerung 177  
Propagierungsfunktion 197  
prozedurales Wissen 34

## Q

Quantifizierung 55  
QuickProp 225, 229

## R

Regel 69, 154  
2/3- 285  
Delta- 210  
relationales Wissen 33  
resilient Backpropagation 226, 230, 249  
Resolution 45, 50, 59, 62  
Korrektheit 51, 63  
Strategien 64

Widerlegungsvollständigkeit 51, 63  
Resolvente 50, 62  
Restlistenoperator 172  
rezeptives Feld 250  
RPROP 226, 230, 231  
Rückkopplung 202, 235, 255, 262, 290  
Rückwärtsverkettung 76  
Rundreiseproblem 141, 269, 298

## S

Schlussregel 43  
Schwellwert 204, 210, 220, 283, 292, 296,  
314, 331  
selbstorganisierende Karte 260, 261, 322, 327  
Selektion 239, 252  
Self-Organizing Map 261  
semantische Äquivalenz 46  
semantische Folgerung 41, 57  
semantisches Netz 83  
Set-Of-Support-Strategie 65  
shortcut connection 202  
Sicherheitsfaktor 94  
sigmoide Funktion 198  
Simulated Annealing 147, 302, 304  
simuliertes Abkühlen 302, 304  
Skolemisierung 60  
SLD-Resolution 66  
SNNS 20, 196, 201, 216, 225, 228, 237, 248,  
255, 283, 308  
SOM 261  
Speicherkapazität 247  
Spezifität 76  
SSE 321  
Struktur 170  
Stuttgarter Neuronale Netze Simulator  
siehe SNNS 20  
Subsumption 65  
Suche 115  
Fairness 126  
heuristische 118, 129  
informierte 118  
Komplexität 127  
Korrektheit 127

uninformierte 118  
vollständige 118  
Vollständigkeit 126  
Suchproblem 115  
Suchverfahren 114  
Summed Squared Error 321  
Symbol verarbeitende KI 15

## T

Tabellenkalkulation 20, 222  
Tabu-Suche 147  
Tautologie 39, 41, 56, 65  
t-CoNorm 104  
teaching output 210  
Term 56  
Threshold Accepting 147  
Tiefensuche 120  
t-Norm 103  
Topic Map 87  
Training 200, 204, 211, 212, 216, 224, 225,  
230, 243, 247, 248, 309, 311, 312, 316,  
323, 328  
Trainingsmenge 247, 316  
Trainingsmuster 311  
Turing, Alan 12  
Turing-Test 12, 25

## U

UML 18, 325  
UND-Funktion 200, 205, 210, 213  
Unified Modelling Language siehe UML 325  
Unifikation 62, 164  
unscharfes Wissen 89, 99  
unsicheres Wissen 90

## V

vages Wissen 89  
Variable 169  
Variablensubstitution 164  
Verbindungsgewicht 201, 204, 210, 216, 220,  
223, 229, 265, 291

verdecktes Neuron 202  
Vererbung 33  
verrauschen 234, 247  
Vollständigkeit 45, 126  
Voronoi-Tessellation 275  
vorwärtsgerichtetes Netz 201, 208, 317, 329  
Vorwärtsverkettung 72

## W

wachsendes neuronales Gas 276  
Wahrheitstabelle 36, 40  
Wahrscheinlichkeit 91  
bedingte 92  
Wenn-Dann-Regel 69  
Wettbewerbslernen 204, 260, 279  
Widerlegungsvollständigkeit, Resolution 51  
Widerspruch 51, 61  
Widerspruchsbeweis 45, 49, 59  
Wiedererkennung 195, 296  
winner takes all 260  
Wissen  
logisches 34  
prozedurales 34  
relationales 33  
Wissensnetz 87  
Wissensrepräsentation 30, 40  
Wissensverarbeitung 30, 40

## X

XOR-Funktion 212, 222, 309

## Z

Zahl 169  
Zeichenerkennung 228  
Zeichenkette 169  
Zielzustand 115  
Zulässigkeit 141  
Zustandsraum 118