

# HANSER



## Leseprobe

zu

## „Künstliche Intelligenz“

von Uwe Lämmel und Jürgen Cleve

Print-ISBN 978-3-446-45914-4

E-Book-ISBN 978-3-446-46363-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45914-4>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Künstliche Intelligenz .....</b>             | <b>7</b> |
| 1.1      | Eine intelligente Maschine .....                | 7        |
| 1.2      | Intelligenz und künstliche Intelligenz .....    | 9        |
| 1.3      | Knobelaufgaben und symbolverarbeitende KI ..... | 15       |
| 1.4      | Geschichte der KI .....                         | 17       |
| 1.5      | Wir und die KI .....                            | 19       |

## Symbolverarbeitende KI

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>2</b> | <b>Darstellung und Verarbeitung von Wissen .....</b> | <b>23</b> |
| 2.1      | Wissen und Wissensarten .....                        | 23        |
| 2.2      | KI und explizite Wissensdarstellung .....            | 25        |
| 2.3      | Darstellung von Wissen mit Hilfe von Logik .....     | 28        |
| 2.3.1    | Aussagenlogik .....                                  | 29        |
| 2.3.2    | Prädikatenlogik .....                                | 46        |
| 2.3.3    | Logik und PROLOG .....                               | 60        |
| 2.4      | Regelbasierte Wissensdarstellung .....               | 65        |
| 2.4.1    | Vorwärtsverkettung .....                             | 68        |
| 2.4.2    | Rückwärtsverkettung .....                            | 71        |
| 2.4.3    | Regelverarbeitung und PROLOG .....                   | 73        |
| 2.4.4    | Business Rules .....                                 | 75        |
| 2.5      | Semantische Netze und Frames .....                   | 81        |
| 2.5.1    | Semantische Netze .....                              | 81        |
| 2.5.2    | Frames .....   | 83        |
| 2.5.3    | Wissensnetze .....                                   | 85        |
| 2.6      | Vages Wissen .....                                   | 87        |
| 2.6.1    | Unsicheres Wissen .....                              | 88        |
| 2.6.2    | Fuzzy-Mengen .....                                   | 97        |
| 2.6.3    | Fuzzy-Logik .....                                    | 103       |
| 2.6.4    | Fuzzy-Regler .....                                   | 105       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>3</b> | <b>Problemlösung mittels Suche</b> .....            | <b>111</b> |
| 3.1      | Suche in Graphen.....                               | 111        |
| 3.2      | Uninformierte Suche.....                            | 116        |
| 3.3      | Heuristische Suche .....                            | 125        |
| 3.3.1    | Heuristik des nächsten Nachbarn .....               | 130        |
| 3.3.2    | Bergsteiger-Strategie .....                         | 131        |
| 3.3.3    | Bestensuche .....                                   | 132        |
| 3.3.4    | A*-Suche .....                                      | 133        |
| 3.4      | Das Rundreiseproblem .....                          | 137        |
| <b>4</b> | <b>PROLOG</b> .....                                 | <b>147</b> |
| 4.1      | Logisches Programmieren.....                        | 147        |
| 4.1.1    | Erste Schritte .....                                | 147        |
| 4.1.2    | Ein Beispiel .....                                  | 149        |
| 4.1.3    | Regeln .....  | 151        |
| 4.2      | PROLOG-Programme .....                              | 156        |
| 4.2.1    | Lösungsfindung mittels Backtracking .....           | 156        |
| 4.2.2    | Parameterübergabe mittels Unifikation.....          | 158        |
| 4.2.3    | Interpretation von Programmen .....                 | 161        |
| 4.3      | Datentypen und Arithmetik.....                      | 163        |
| 4.3.1    | Einfache und zusammengesetzte Datentypen .....      | 163        |
| 4.3.2    | Listen .....  | 165        |
| 4.3.3    | Arithmetik .....                                    | 169        |
| 4.4      | Steuerung der Abarbeitung .....                     | 170        |
| 4.4.1    | Reihenfolge der Klauseln .....                      | 171        |
| 4.4.2    | Reihenfolge der Literale im Körper einer Regel..... | 172        |
| 4.4.3    | Kontrolle des Backtracking .....                    | 173        |
| 4.4.4    | Die Negation .....                                  | 176        |
| 4.5      | Vordefinierte Prädikate .....                       | 177        |
| 4.6      | Beispielprogramme .....                             | 178        |
| 4.6.1    | Das Einfärben einer Landkarte .....                 | 178        |
| 4.6.2    | Die Türme von Hanoi .....                           | 179        |
| 4.6.3    | Das Acht-Damen-Problem .....                        | 181        |
| 4.6.4    | Das Problem der stabilen Paare .....                | 183        |
| 4.6.5    | Das Einstein-Problem.....                           | 184        |

## Neuronale Netze

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>Künstliche neuronale Netze</b> .....              | <b>189</b> |
| 5.1      | Das künstliche Neuron .....                          | 191        |
| 5.2      | Architekturen .....                                  | 196        |
| 5.3      | Arbeitsweise .....                                   | 198        |
| <b>6</b> | <b>Vorwärtsgerichtete Netze</b> .....                | <b>203</b> |
| 6.1      | Das Perzeptron .....                                 | 203        |
| 6.1.1    | Die Delta-Regel .....                                | 205        |
| 6.1.2    | Musterzuordnungen .....                              | 208        |
| 6.2      | Backpropagation-Netze .....                          | 211        |
| 6.2.1    | Das Backpropagation-Verfahren .....                  | 212        |
| 6.2.2    | Das XOR-Backpropagation-Netz .....                   | 216        |
| 6.2.3    | Modifikationen des Backpropagation-Algorithmus ..... | 219        |
| 6.3      | Typische Anwendungen .....                           | 222        |
| 6.3.1    | Zeichenerkennung .....                               | 222        |
| 6.3.2    | Das Encoder-Decoder-Netz .....                       | 228        |
| 6.3.3    | Ein Prognose-Netz .....                              | 229        |
| 6.4      | Datenvorverarbeitung .....                           | 233        |
| 6.4.1    | Verarbeitungsschritte .....                          | 233        |
| 6.4.2    | Daten des Kreditvergabe-Beispiels .....              | 236        |
| 6.5      | Netzgröße und Optimierungen .....                    | 240        |
| 6.5.1    | Die Größe der inneren Schicht .....                  | 241        |
| 6.5.2    | Das Entfernen von Verbindungen .....                 | 243        |
| 6.5.3    | Genetische Algorithmen .....                         | 244        |
| 6.6      | Partiell rückgekoppelte Netze .....                  | 247        |
| 6.6.1    | Jordan-Netze .....                                   | 248        |
| 6.6.2    | Elman-Netz .....                                     | 250        |
| 6.7      | Convolutional Neural Network .....                   | 252        |
| <b>7</b> | <b>Wettbewerbslernen</b> .....                       | <b>261</b> |
| 7.1      | Selbstorganisierende Karte .....                     | 262        |
| 7.1.1    | Architektur und Arbeitsweise .....                   | 262        |
| 7.1.2    | Das Training .....                                   | 265        |
| 7.1.3    | Visualisierung einer Karte und deren Verhalten ..... | 268        |
| 7.1.4    | Eine Lösung des Rundreiseproblems .....              | 269        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.2      | Neuronales Gas .....                       | 274        |
| 7.2.1    | Architektur und Arbeitsweise .....         | 275        |
| 7.2.2    | Wachsendes neuronales Gas .....            | 277        |
| 7.3      | Adaptive Resonanz-Theorie.....             | 280        |
| 7.3.1    | Das Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma ..... | 280        |
| 7.3.2    | Struktur eines ART-Netzes .....            | 281        |
| 7.3.3    | Das Beispiel Würfelmuster .....            | 283        |
| 7.3.4    | Arbeitsweise .....                         | 285        |
| <b>8</b> | <b>Autoassoziative Netze .....</b>         | <b>289</b> |
| 8.1      | Hopfield-Netze.....                        | 289        |
| 8.1.1    | Arbeitsweise .....                         | 290        |
| 8.1.2    | Wiedererkennung von Mustern .....          | 292        |
| 8.1.3    | Energie-Niveau eines Netzes .....          | 296        |
| 8.2      | Lösung von Optimierungsproblemen .....     | 297        |
| 8.3      | Die Boltzmann-Maschine .....               | 300        |
| <b>9</b> | <b>Entwicklung neuronaler Netze .....</b>  | <b>305</b> |
| 9.1      | Datenanalyse-Software .....                | 305        |
| 9.2      | JavaNNS.....                               | 307        |
| 9.3      | Implementation neuronaler Netze.....       | 309        |
| 9.3.1    | Einsatz von Array-Datenstrukturen .....    | 310        |
| 9.3.2    | Der objektorientierte Ansatz .....         | 311        |
| 9.4      | Implementieren mit TensorFlow .....        | 321        |
|          | <b>Literatur .....</b>                     | <b>329</b> |
|          | <b>Index .....</b>                         | <b>332</b> |

# Vorwort

Dieses Buch über künstliche Intelligenz richtet sich an Leser mit natürlicher Intelligenz. Es ist ausdrücklich ein Lehrbuch und kein allumfassendes Fachbuch. Das Buch bietet einen Einstieg in die Grundlagen der künstlichen Intelligenz. Dabei werden sowohl die klassische *symbolverarbeitende künstliche Intelligenz* als auch *konnektionistische Ansätze* wie die künstlichen neuronalen Netze behandelt.

Das Buch wendet sich an Einsteiger, die sich in das Gebiet der künstlichen Intelligenz einarbeiten wollen, sei es nun im Rahmen einer Lehrveranstaltung oder als Autodidakt. Das Buch kann als Grundlage für eine einführende Lehrveranstaltung in das Gebiet der künstlichen Intelligenz verwendet werden. Der Schwerpunkt liegt hier auf „einführend“; für angehende Spezialisten hoffen wir, die eine oder andere Anregung zur einfachen Darstellung des einen oder anderen Sachverhaltes geben zu können. Studenten an Hochschulen, die sich der Informatik widmen – sei es im Hauptfach, im Nebenfach oder in der Magisterausbildung – möge dieses Buch als Lektüre zur Wissensaneignung dienen. Wir wenden uns auch an Informatik-Lehrer der Gymnasien. Das Gebiet der künstlichen Intelligenz bietet zahlreiche Ansätze, die durchaus mit interessierten Schülern in Angriff genommen werden können. Wir würden es sehr begrüßen, wenn bereits in der Schule eine Einführung in die (Aussagen-)Logik im Rahmen des Mathematik-, des Informatik- oder des Philosophie-Unterrichts erfolgen würde.

Fast zwei Jahrzehnte sind seit dem Erscheinen der ersten Auflage vergangen. Unser Konzept, die Techniken der klassischen künstlichen Intelligenz gemeinsam mit künstlichen neuronalen Netzen in einem Buch darzustellen, ist aufgegangen. Die Struktur des Buches hat etliche Nachahmer gefunden.

- 1 Künstliche Intelligenz
- Symbolverarbeitende künstliche Intelligenz
- 2 Darstellung und Verarbeitung von Wissen
- 3 Problemlösung mittels Suche
- 4 PROLOG
- Künstliche neuronale Netze – Konnektionismus
- 5 Künstliche neuronale Netze
- 6 Vorwärtsgerichtete neuronale Netze
- 7 Wettbewerbslernen
- 8 Autoassoziative Netze
- 9 Entwicklung neuronaler Netze

Nach einer Diskussion der Begriffe steht die *symbolverarbeitende künstliche Intelligenz* im Fokus der Kapitel 2-4. Die erste Hälfte des Buches schließt mit einer Einführung in die Sprache PROLOG, mit der nach wie vor Wissensverarbeitung am schnellsten praktisch ausprobiert werden kann. Dieser Teil der KI wird auch als *White-Box-KI* bezeichnet, denn hier ist die Verarbeitung transparent und durch das System erklärbar.

In der zweiten Hälfte des Buches (Kapitel 5-9) werden *künstliche neuronale Netze* vorgestellt. Der zweite Teil schließt ebenso mit der praktischen Anwendung: Künstliche neuronale Netze werden programmiert beziehungsweise mittels Software-Systemen entwickelt. Die künstlichen neuronalen Netze fallen in die Kategorie *Black-Box-KI*, da man zwar weiß, wie sie funktionieren, eine Erklärung für die Entstehung eines Resultats für den Nutzer nicht oder nur eingeschränkt möglich ist.

Einige klassische Techniken der KI sind in den vergangenen Jahren wieder in den Blickpunkt gerückt: Unter der Bezeichnung *Business Rules* (Geschäftsregeln) wird die regelbasierte Wissensdarstellung und -verarbeitung in betrieblichen Anwendungssystemen mit dem Ziel eingesetzt, die Geschäftslogik sowie die Kundenbeziehungen flexibler handhaben zu können. Für die Entwicklung und den Einsatz derartiger intelligenter Komponenten stehen Business-Rules-Management-Systeme zur Verfügung, die als moderne Expertensysteme angesehen werden können. Wissensmanagement ist bereits längere Zeit ein Thema und das nicht nur im betriebswirtschaftlichen Umfeld. *Wissensnetze* mit dem Ziel, durch eine inhaltliche semantische Suche Wissen schnell verfügbar zu machen, basieren auf den Techniken der Frames und der semantischen Netze. Leistungsfähige Produkte nutzen darüber hinaus das Konzept der Topic Maps, Wissen und Information anschaulich in ihren Beziehungen darzustellen.

Ebenso sind neuronale Netze durch spektakuläre Ergebnisse erneut in den Fokus vieler Anwendungen getreten. Das *Deep Learning* der neuronalen Netze führt die Möglichkeiten bei der Objekt-, Muster- oder Spracherkennung auf eine neue Stufe.

Bewusst konzentrieren wir uns auf die Basis-Techniken der KI. Wir stellen Grundlagen dar, mit denen KI-Anwendungen konzipiert und umgesetzt werden können. Im Vordergrund steht, mit welchen Mitteln, also *wie* KI-Anwendungen entwickelt werden, nicht *welche Leistungskraft* KI heute hat oder morgen haben wird. Nicht zuletzt deshalb nutzen wir weiterhin die Programmiersprache *PROLOG*, die sich als Logik-basierte Sprache sehr gut eignet, die Grundprinzipien der Modellierung und Lösung von Problemen mittels expliziter Wissensdarstellung zu erfahren. Mit dem *JavaNNS* können wir ganz genau in die Struktur und in die Arbeitsweise künstlicher neuronaler Netze hineinschauen. Wir zeigen aber auch, wie neuronale Netze mittels der Sprache Python aufgebaut werden können.



Zum Buch halten wir eine Webseite bereit: <http://www.wi.hs-wismar.de/ki-buch>. Dort findet der Leser Programmtexte oder Lösungen zu einigen Beispielen, Verweise auf verwendete Software sowie Demo-Programme. Zudem sammeln wir dort weitere Quellen zum Thema künstliche Intelligenz. Den Wunsch nach Musterlösungen werden wir auch weiterhin nur zum Teil erfüllen. Nach wie vor stehen wir jedoch gern für Fragen und für die Bewertung von Lösungen oder Lösungsansätzen zur Verfügung. Scheuen Sie sich nicht, mit uns in Kontakt zu treten. Wir halten dieses Vorgehen für erfolgreicher als das schnelle Nachschlagen einer Musterlösung.

Wir möchten uns bei allen bedanken, die uns auf Fehler aufmerksam gemacht oder Hinweise gegeben haben. Uns ist bewusst, dass es wohl wieder oder immer noch den einen oder anderen Fehler zu entdecken gibt. Seien Sie also weiter so kritisch wie bisher.

Wir danken Frau Natalia Silakova-Herzberg für die gute Betreuung während der Erstellung des Buchs und Frau Annabelle Witton für die Erstellung einiger Grafiken.

# 1

## Künstliche Intelligenz

Kein anderes Gebiet der Informatik löst solch emotionsgeladene Diskussionen aus wie das Gebiet mit dem Namen „künstliche Intelligenz“. Vielleicht hätte eine andere Übersetzung des Begriffes „Artificial Intelligence“ die Inhalte des Fachgebietes besser getroffen: „gekünstelte Intelligenz“, „maschinelle Intelligenz“ oder „synthetische Intelligenz“ wecken möglicherweise weniger Assoziationen zu einem künstlichen Wesen, welches die Menschheit beherrscht.

In diesem Kapitel beginnen wir mit dem berühmten Turing-Test, diskutieren dann die Begriffe *Intelligenz* sowie *künstliche Intelligenz* und schauen auf die künstliche Intelligenz (KI) als ein Teilgebiet der Informatik. Anhand einer Knobelaufgabe stellen wir einen typischen Ansatz der symbolverarbeitenden KI vor. Ein Blick in die Geschichte der KI sowie deren gesellschaftliche Wirkung schließen diese Einführung ab.

### ■ 1.1 Eine intelligente Maschine

In den letzten Jahren hat die Debatte über die künstliche Intelligenz die Medien erreicht und die Diskussionen in der Öffentlichkeit angeheizt. So liest man Überschriften wie:

- „Die künstliche Intelligenz findet: Menschen verhalten sich seltsam“,
- „Ist das menschliche Gehirn ein Auslaufmodell? Künstliche Intelligenz könnte uns Menschen bald überflügeln“,
- „Ein autonom fahrendes Auto erkennt bei Nacht kein Wildschwein“,
- „Künstliche Intelligenz – Wann übernehmen die Maschinen?“ oder
- „2062: Das Jahr, in dem die künstliche Intelligenz uns ebenbürtig sein wird“.

Der Begriff *künstliche Intelligenz* (KI) weckt einige Fragen:

- Können Maschinen denken oder werden Maschinen eines Tages denken können?
- Wird es intelligente Maschinen geben?
- Wie agieren intelligente Maschinen in unserem Umfeld beziehungsweise in unserer Gesellschaft?
- Wie wird die künstliche Intelligenz unser Leben beeinflussen?

Wollen wir uns mit derartigen Fragen befassen, müssen wir zuerst die Begriffe klären:

- Was ist eine Maschine?
- Was ist Intelligenz?
- Was bedeutet Denken?
- Was ist künstliche Intelligenz?

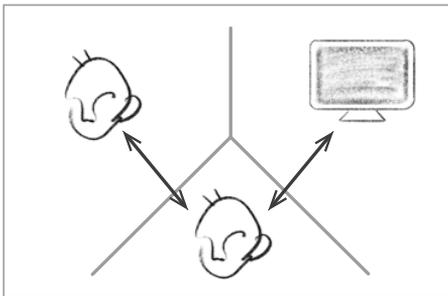
Noch bevor überhaupt das Gebiet der künstlichen Intelligenz entstand, schlug bereits Anfang der 50er-Jahre der Mathematiker *Alan Turing* einen Test vor, mit dem das intelligente Verhalten eines Computers geprüft werden kann. Alan Turing beschreibt das Experiment unter dem Namen „Imitation Game“ wie folgt:

„It is played with three people, a man (A), a woman (B), and an interrogator (C) who may be of either sex. The interrogator stays in a room apart front the other two. The object of the game for the interrogator is to determine which of the other two is the man and which is the woman. He knows them by labels X and Y, and at the end of the game he says either 'X is A and Y is B' or 'X is B and Y is A.'“ [Tur50]

Wir haben es also mit drei Personen zu tun: einer Frau B, einem Mann A und einem Fragesteller oder einer Fragestellerin C. C ist alleine in einem Raum und kommuniziert nur per Textnachrichten mit A und B. C kennt seine Mitspieler nur als X beziehungsweise Y. Am Ende des Spiels entscheidet C, ob X weiblich (B) oder männlich (A) ist. Das Erkennen der Personen wird zusätzlich dadurch erschwert, dass der Mann A verhindern will, dass C ihn erkennt. Die Spielerin B will dagegen dem Fragesteller C helfen, die richtige Antwort zu finden.

Dieses Spiel sieht Turing als Vorstufe für ein Experiment, in dem die Rolle von A (oder B) von einem Computerprogramm übernommen wird. Diese Form des *Imitation Games* wird nach seinem Erfinder *Turing-Test* genannt:

Eine Person C kommuniziert mittels Textnachrichten mit zwei Partnern X beziehungsweise Y. Beteiligt sind eine Software A und ein Mensch B. Kann C zweifelsfrei entscheiden, wer der menschliche Partner ist und wo die Software antwortet? Falls dies nicht möglich ist, muss dem Computerprogramm wohl ein intelligentes Verhalten in der Konversation zugesprochen werden.



**Bild 1.1** Der Turing-Test

Alan Turing war bereits mit der nach ihm benannten Turing-Maschine Mitte der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts der tatsächlichen Entwicklung weit voraus: Mit Hilfe seines theoretischen Maschinenmodells konnte der Begriff Berechenbarkeit definiert werden, bevor die ersten programmierbaren Rechenautomaten überhaupt tatsächlich etwas berechnen konnten. Mit dem Imitation Game war Alan Turing erneut der Zeit weit voraus: Lange bevor die ersten Programme einen Textdialog führen konnten, war das nun Turing-Test genannte Spiel in der Lage, das intelligente Gesprächsverhalten einer Maschine zu prüfen.

Seit Anfang der 90er Jahre wird jährlich ein Preis ausgeschrieben, der im Rahmen eines Wettbewerbs das beste Programm eines Turing-Tests auszeichnet, der sogenannte *Loebner Prize*. 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. Wir kommen auf die Gewinner dieses Wettbewerbs später noch einmal zurück.

## ■ 1.2 Intelligenz und künstliche Intelligenz

Es wird viel über die künstliche Intelligenz geschrieben und geredet, aber zu oft bleibt eine Erklärung der benutzten Begriffe aus. Was ist künstliche Intelligenz?

Eine Erklärung oder eine Definition fällt schwer, da bereits der Begriff der Intelligenz nicht klar definiert ist. Wir greifen hier auf einige kurze Erklärungen aus allgemeinen Lexika zurück. Im Gabler Wirtschaftslexikon wird Intelligenz als Eigenschaft eines Menschen beschrieben:

*„in der Psychologie ein hypothetisches Konstrukt (d.h. eine Erklärung für ein nicht direkt beobachtbares Phänomen), das die erworbenen kognitiven Fähigkeiten und Wissensbestände einer Person bezeichnet, die ihr zu einem gegebenen Zeitpunkt zur Verfügung stehen.“* [Mai18]

Im Duden wird der Mensch schon eingeklammert, um anzudeuten, dass es Intelligenz außerhalb des Menschen gibt oder geben kann: *„Fähigkeit [des Menschen], abstrakt und vernünftig zu denken und daraus zweckvolles Handeln abzuleiten.“* [Dud19]

Aus beiden Definitionen kann keine scharfe Trennung zwischen „besitzt Intelligenz“ oder „ist intelligent“ und „besitzt keine Intelligenz“ abgeleitet werden. Wir kennen den Intelligenzquotienten, der zumindest darauf hindeutet, dass es unterschiedliche Stufen von Intelligenz gibt. Legt man die Definition der Encyclopaedia Britannica zugrunde, so lassen sich schon eher als in den obigen Definitionen verschiedene Stufen des Wahrnehmens, Reagierens und Handelns erkennen: *“Intelligence, mental quality that consists of the abilities to learn from experience, adapt to new situations, understand and handle abstract concepts, and use knowledge to manipulate one’s environment.“* [Ste17]

Menschen oder andere Wesen können im unterschiedlichen Maße aus Erfahrungen lernen, sich an neue Situationen anpassen, abstrakte Konzepte verstehen und bearbeiten und ihr Wissen einsetzen, um die Umgebung zu verändern.

Etwas ausführlicher beschreiben einige Modelle den Begriff Intelligenz unter Nutzung von Faktoren. Zum Beispiel legt Thurston (1938) die folgenden sogenannten Primärfaktoren für die Einschätzung von Intelligenz zugrunde, vgl. [Paw16]:

- Sprachverständnis,
- Wortflüssigkeit,
- Rechenfertigkeit,
- Raumvorstellung,
- Gedächtnis,
- Wahrnehmungsgeschwindigkeit,
- schlussfolgernd-logisches Denken.

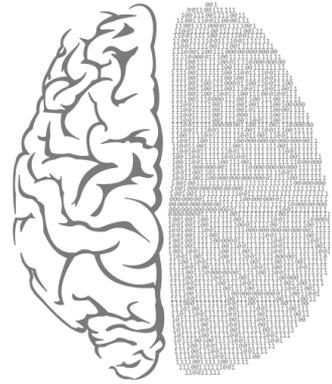
Diese Faktoren und die vorher genannten Eigenschaften des Lernens aus Erfahrung, des Verstehens abstrakter Konzepte und die Anwendung zur Manipulation der Umgebung werden wir als Kriterien oder Maßstäbe für die Charakterisierung einer künstlichen Intelligenz einsetzen.

In einigen Definitionen der künstlichen Intelligenz (KI) wird der Mensch als Maßstab herangezogen:

„In der KI wird untersucht, wie man intelligentes Verhalten von Computern erfassen und nachvollziehen lassen kann oder wie man allgemein mit Hilfe von Computern Probleme löst, die Intelligenzleistungen voraussetzen.“ [CS06]

„Künstliche Intelligenz soll Maschinen in die Lage versetzen, menschliche Tätigkeiten zu übernehmen. Dabei soll das menschliche Gedächtnis, sein Lernverhalten und seine Entwicklung nachgebildet werden.“ [Fel19]

„Erforschung ‚intelligenter‘ Problemlösungsverhaltens sowie die Erstellung ‚intelligenter‘ Computersysteme. Künstliche Intelligenz (KI) beschäftigt sich mit Methoden, die es einem Computer ermöglichen, solche Aufgaben zu lösen, die, wenn sie vom Menschen gelöst werden, Intelligenz erfordern.“ [Sie18]



Es sind bereits viele Computerprogrammen bekannt, die Aufgaben, für deren Lösung im Allgemeinen Intelligenz notwendig ist, besser oder sogar schneller lösen können als ein Mensch: Das Navigationsgerät plant eine Route unter Berücksichtigung von Randbedingungen (keine Autobahn) und Zielkriterien (kürzeste Verbindung). Derartige Programme enthalten Suchstrategien, die dem Gebiet der künstlichen Intelligenz entstammen. Übersetzungsprogramme liefern für die alltägliche Umgangssprache gute Lösungen. Diagnosesysteme sind teilweise treffsicherer in ihren Diagnosen als mancher Experte. So einleuchtend die Definition im Vergleich zu einer menschlichen Leistung auch klingen mag, so leicht kann sie angegriffen werden.

Ein Taschenrechner kann zwar große Zahlen multiplizieren aber KI ist dies sicherlich nicht.

Alternativ wurde die künstliche Intelligenz 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.“ [HR92]

Wir sehen hier eine Weiterentwicklung der Anwendungsbereiche eines Computers: Gestartet als Rechenmaschine – *number cruncher* – wurde der Computer weiterentwickelt, um Texte und Grafiken verarbeiten zu können. Dies jedoch stets als Werkzeug des Menschen, als sein „verlängerter Arm“.



Nun wird der Computer befähigt zu erkennen, zu denken und zu entscheiden, also Schlussfolgerungen zu ziehen. Versehen mit einer Körperlichkeit und den Fähigkeiten, nicht nur Bilder aufzunehmen, sondern Bilder zu erkennen und daraus Handlungen abzuleiten, entsteht ein künstliches Wesen. Ob dieses intelligent ist oder nicht, welcher „Intelligenzstufe“ es entspricht, der einer Krähe, eines Hundes oder der eines Menschen, muss anhand weiterer Kriterien entschieden werden.

Fragen wir doch einmal A.L.I.C.E., einen Chatbot, der vor einigen Jahren den Loebner-Preis im Turing-Test-Wettbewerb gewonnen hat:



### Beispiel 1.1 Chatbot A.L.I.C.E.

*Good morning!* Hello and how are you this morning?

*How old are you?* I'm Eighteen in computer years.

*Are you smart?* Yes. I am highly intelligent.

*How much is 4+3?* Is this a math question?

*yes.* I'm not too good in arithmetic.

*Please try to calculate 4+3.* Wow you are very polite.  
OK I will try to calculate 4+3.

*I mean 4 plus 3.* Oh I get it.  
Thanks for explaining that.  
Use a calculator!

*What is intelligence?* Intelligence is the computational part of the  
ability to achieve goals in the world.  
Varying kinds and degrees of intelligence occur in  
people, many animals and some machines.

*What is artificial intelligence?* Artificial Intelligence is the branch of engineering  
and science devoted to constructing machines that think.  
Searching... Searching...  
Please stand by.

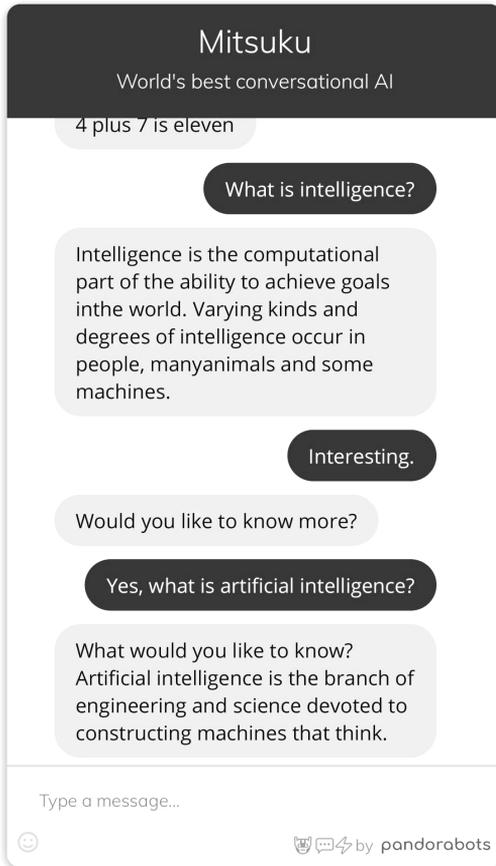
*Thank you.* You are quite welcome.

Eine Weiterentwicklung stellt die Software Mitsuku<sup>1</sup> dar, die den Loebner-Preis in den Jahren 2016 bis 2019 gewonnen hat, siehe Bild 1.2 auf der nächsten Seite. Auch hier wird die KI als Teilgebiet der Informatik an erster Stelle gesehen.

Es sind somit zwei Perspektiven, aus denen sich der Begriff der künstlichen Intelligenz betrachten lässt:

1. KI als Wissenschaftsdisziplin, im Wesentlichen ein Teilgebiet der Informatik und
2. KI als Ergebnis der Forschungen dieser Wissenschaftsdisziplin. Hierbei sind mehrere Interpretationen möglich:
  - (a) KI als Sammelbegriff für verschiedene Techniken wie regelbasierte Wissensdarstellung und -verarbeitung, Wissensnetze oder künstliche neuronale Netze,
  - (b) KI als eine intelligent agierende Software beziehungsweise Maschine,
  - (c) KI als das künstliche intelligente Wesen.

<sup>1</sup> <https://www.pandorabots.com/mitsuku/>



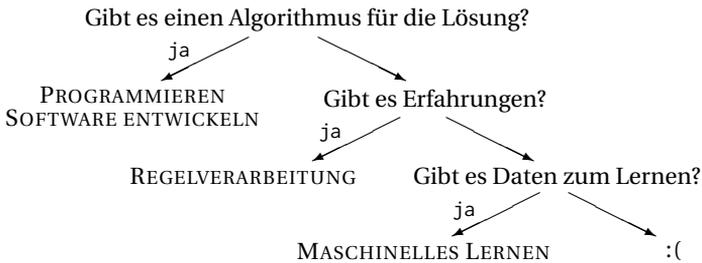
**Bild 1.2** Mitsuku und die Intelligenz



### Definition 1.1 Künstliche Intelligenz

Der Begriff *künstliche Intelligenz* wird gemäß den Perspektiven unterschiedlich definiert:

1. KI ist eine Wissenschaftsdisziplin der Informatik, die sich mit der Entwicklung von Hard- und Software-Systemen befasst, die Probleme lösen können, für deren Lösung gemeinhin Intelligenz erforderlich ist.
2. Als KI werden KI-Techniken bezeichnet, die in Hard- oder Softwaresystemen für die Leistungssteigerung eingesetzt werden.
3. KI ist ein Hard- und Softwaresystem, welches ein intelligentes Problemlösungsverhalten zeigt.
4. Als KI wird ein künstliches Wesen bezeichnet, welches Intelligenz besitzt.



**Bild 1.3** Einsatzgebiete der künstlichen Intelligenz

Nun können wir die vorher angeführten Intelligenzfaktoren ([Paw16]) heranziehen und ein erstes Bild der KI im Sinne der Definitionen 3 und 4 zeichnen:

### **Sprachverständnis**

Die bereits diskutierten Dialogprogramme oder Chatbots verfügen über ein bestimmtes Sprachverständnis, da diese sehr oft semantisch korrekt auf Aussagen eines menschlichen Dialogpartners reagieren können. Sprach-Assistenten wie Cortana, Siri oder Alexa „verstehen“ Befehle und veranlassen deren Ausführung. Sprachverständnis ist zwar noch nicht allumfassend, aber bereits in Ansätzen vorhanden.

### **Wortflüssigkeit**

Diese Eigenschaft geht mit dem Sprachverständnis einher. Chatbots reagieren unterschiedlich auf ein und dieselbe Aussage oder Frage eines Dialogpartners, der Wortschatz ist breit und wird abwechslungsreich eingesetzt.

### **Rechenfertigkeit**

Hier haben wir es mit der Basiskompetenz eines Software-Systems zu tun: Rechnen, Zahlen-, „Verarbeitung“ ist der allererste Einsatzzweck von Computern. Die Rechenleistung übersteigt die des Menschen bei Weitem.

### **Raumvorstellung**

Die selbstständige Orientierung im Raum ist für Hardware-Systeme, also Roboter, eine schwierige Aufgabe, die entsprechende Leistung in der Bilderkennung voraussetzt. Service-Roboter können sich in Räumen orientieren, Fahrassistenzsysteme steuern autonom das Fahrzeug durch die Straßen, Fußballroboter erkennen nicht nur Ball und Spielfläche, sondern können als Mannschaft kollektiv agieren. Raumvorstellungen können den Systemen vermittelt werden.

### **Gedächtnis**

Das Wiedergeben von Fakten ist genau genommen keine Intelligenzleistung, sondern nur eine Gedächtnisleistung. Das Gedächtnis, der Speicher, heutiger Datenbanken ist um ein Vielfaches größer als ein menschliches Gedächtnis. Der Zugriff auf zum Beispiel Wikipedia und eine entsprechende Textanalyse erschließt das kollektive Gedächtnis der Menschheit. Speichern und Wiedergeben ist eine Grundeigenschaft der Software-Systeme. Diese Leistung ist deutlich größer als beim Menschen.

### **Wahrnehmungsgeschwindigkeit**

Diese Eigenschaft ist schwer zu beurteilen. Die Erkennung von Objekten, insbesondere von mehreren Objekten, in Echtzeit ist zwar einerseits als gelöst zu betrachten, wenn wir beispielsweise die Systeme des autonomen Fahrens betrachten.

Andererseits ist die Objekterkennung in Echtzeit nach wie vor eine Herausforderung. Menschen können sehr viele unterschiedliche Objekte, auch in eher ungewöhnlichen Umgebungen, sehr schnell wahrnehmen und erkennen. Systeme benötigen derzeit noch ein objektbezogenes Training.

### **Schlussfolgernd-logisches Denken**

Ein Theoretiker wird zuerst die Frage stellen: Welche Logik wird hier zugrunde gelegt? Handelt es sich um eine formale Logik, wie die Aussagenlogik, der Prädikatenkalkül, die Fuzzy-Logik oder andere mathematisch fundierte Logiken, so kann ein Software-System damit arbeiten. Diagnosesysteme nutzen Prädikaten- oder Fuzzy-Logik oder setzen Sicherheitsfaktoren ein, um unscharfe und unsichere Situation besser abbilden zu können. Maschinen können logisch denken!

Psychologen sind wir nicht, deshalb ziehen wir die Strukturdefinition der Intelligenz mittels Intelligenzfaktoren nicht in Zweifel.

Für die Einschätzung von künstlicher Intelligenz sehen wir jedoch zudem Eigenschaften wie Lernfähigkeit, Abstraktionsvermögen oder Kreativität als entscheidende Kriterien.

Nach dem Gabler Wirtschaftslexikon „*bezeichnet [Kreativität] i.d.R. die Fähigkeit eines Individuums oder einer Gruppe, in phantasievoller und gestaltender Weise zu denken und zu handeln.*“ [Möh18]

Können alle obigen Intelligenzfaktoren durchaus auch in heutigen KI-Systemen gefunden werden, so ist trotz einiger Ansätze Kreativität in derzeitigen Systemen nur sehr beschränkt auszumachen.

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. 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 – die symbolverarbeitende KI – als auch konnektionistische KI wie die neuronalen Netze.

Die symbolverarbeitende KI geht von einer expliziten Darstellung des Wissens im Allgemeinen unter Nutzung logischer Konzepte aus. Dieser Teil der künstlichen Intelligenz wird als *symbolverarbeitend* bezeichnet, da Objekte und Subjekte benannt und im 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.

Diese klassische KI enthält eine Vielzahl von Teilgebieten. Im Zentrum unseres Buches stehen die Techniken aus den Bereichen der Wissensdarstellung und Wissensverarbeitung. Aufbauend auf der Wissensrepräsentation werden das Problemlösen durch Suchen sowie eine Programmiersprache der KI behandelt. Die logische Programmiersprache PROLOG erlaubt es, die

wesentlichen Ideen der symbolverarbeitenden KI einmal praktisch umzusetzen und ist zudem in einer freien Version verfügbar.

Die im Buch behandelten Themen decken bei weitem nicht das gesamte Gebiet der künstlichen Intelligenz ab. Spezielle Teilgebiete wie beispielsweise Teile des maschinellen Lernens oder der Verarbeitung natürlicher Sprache greifen (über die hier dargestellten Methoden hinaus) auf spezielle Formen der Wissensdarstellung wie beispielsweise verschiedene Grammatikarten zurück.

## ■ 1.3 Knobelaufgaben und symbolverarbeitende KI

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 1.2 Wer programmiert in welcher Sprache?

In einer Firma arbeiten drei Freunde: ein C++-Programmierer, ein Java-Programmierer und ein Python-Programmierer. Ihre Namen sind Emil, Paul und Felix.

Der C++-Programmierer hat keine Geschwister (A); er ist der Jüngste der Freunde (B). Felix, der mit der Schwester von Emil verheiratet ist (C), ist älter als der Java-Programmierer (D).



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 modellieren. Das Fachwissen ergibt sich aus der Aufgabenstellung. Bei Knobelaufgaben sind es die Aussagen des Aufgabentextes. Das Allgemeinwissen wird nicht formuliert, sondern beim Leser vorausgesetzt. In unserem Beispiel gehört das Wissen über die Altersrelation dazu: „älter“, „der Jüngste“.

Logisches Denken kann das Problem lösen. Im Kapitel 2 werden wir darlegen, wie eine Lösung durch ein Computer-Programm ermittelt werden kann.



### Beispiel 1.3 Wissensverknüpfung in einer Knobelaufgabe

Als Kurznotation wollen wir das Gleichheitszeichen = als „programmiert in der Sprache“ interpretieren. Somit besagt die Relation  $X = Y$ , dass die Person X in der Sprache Y programmiert. Analog versteht sich das Zeichen  $\neq$ .

|                    |                   |     |
|--------------------|-------------------|-----|
| Aus D folgt:       | Felix $\neq$ Java | (E) |
| Aus B und D folgt: | Felix $\neq$ C++  | (F) |
| Aus E und F folgt: | Felix = Python    | (G) |
| Aus C und A folgt: | Emil $\neq$ C++   | (H) |
| Aus G und H folgt: | Emil = Java       | (I) |

Aus den Schlussfolgerungen wissen wir nun, dass Felix der Python-Experte (G) ist und Emil in Java (I) programmiert. Damit bleibt für Paul die Programmiersprache C++ übrig.

Nach der Lektüre dieses Buches sollte der Leser in Zukunft Knobelaufgaben als Herausforderung betrachten, diese mittels der dargestellten KI-Techniken zu lösen. Das Wissen muss dabei so formalisiert und dargestellt werden, dass ein geeignetes Programm zur Wissensverarbeitung die Lösung bestimmen kann.

Es fällt vielen Menschen nicht leicht, derartige Aufgaben zu lösen. Umso mehr wird ein entsprechendes Programm einen Eindruck hinterlassen. Dagegen können alle Menschen eine Reihe von Aufgaben sehr schnell und gut lösen, die nur sehr schwer oder noch gar nicht mit einem Computer bearbeitet werden können. Dazu gehören die selbstverständlichen Dinge des täglichen Lebens wie die Gesichtserkennung, das Halten des Gleichgewichtes beim Gehen oder Radfahren, oder auch das Sprechen und Verstehen von gesprochenen oder gelesenen Worten.

Die vorher angedeutete Vorgehensweise der Wissensrepräsentation, wie sie die klassische KI verfolgt, hilft hier meist nicht weiter. Ein Versuch, Wissen zur Wiedererkennung einer bekannten Person zusammenzutragen, wird sehr schnell scheitern:

*rotes Haar, kurzes Haar, Bartstoppeln, rundes Gesicht*

sind Eigenschaften, die auf Tausende Menschen zutreffen, so dass daraus allein die Erkennung einer bestimmten Person kaum nachvollziehbar sein dürfte. Außerdem setzt man dabei voraus, dass die Eigenschaften wie rundes Gesicht von einem Computer bereits erfolgreich erkannt wurden. Wie erkennt ein Programm dieses aber aus einem Bild? Mittels neuronaler Netze wird versucht, derartige Tätigkeiten, die uns Menschen leichtfallen, im Computer nachzubilden, um diese zur Problemlösung einsetzen zu können. Neuronale Netze erzielen ein gewünschtes Verhalten durch das Zeigen und Verarbeiten von Beispielen. Das Wissen über das Reagieren auf Eingangsinformationen wird aus Beispielen, somit implizit und induktiv, erlernt. Ist ein Muster erst einmal gelernt und gespeichert, kann sich ein neuronales Netz sehr schnell daran „erinnern“. Innerhalb kurzer Zeit kann es eine Ähnlichkeit zwischen einem Bild und dem gespeicherten Muster erkennen.

# Index

2/3-Regel 286

Ableitbarkeit 37

Acht-Damen-Problem 181

Adaline 195

Adaptive linear element 195

Adaptive Resonanz-Theorie 280, →  
ART-Netz

Ähnlichkeitsmaß 280, 281, 283

Aktionsregel 66

Aktivierung 192, 195, 206, 214, 217, 237, 268,  
269

Aktivierungsfunktion 192, 215, 216, 234, 291,  
302

Aktualität 77

Algorithmus 189

– Backpropagation- 212, 215, 218

– Boltzmann-Einschwingen- 303

– Delta-Regel-Lern- 206

– genetischer 244, 245

– neuronales Gas 275

– SOM-Lern- 268

– Wettbewerbslernen 261

Allgemeingültigkeit 32, 33, 53

Äquivalenz 29

– semantische 41

Artificial Intelligence 7

ART-Netz 261, 280

– Arbeitsweise 285

A\*-Suche 133

Ausgabe 205, 206, 208, 211, 212, 214, 248,  
262, 291

Ausgabefunktion 192, 214

Ausgabe-Neuron 205, 236, 242, 248, 250, 254

Ausgabeschicht 213, 289, 308, 311

Ausgangszustand 112

Aussage

– atomare 29

– unscharfe 62, 97

– unsichere 62, 88

– zusammengesetzte 29

Aussagenlogik 29

– Modell 33

Aussagenlogische Formel 30

Autoassoziatives Netz 289

Backpropagation 203, 211, 213, 222, 224, 249,  
306

– Backpercolation 220

– mit Momentum 220

– Modifikation 219

– QuickProp 220, 224

– resilient 220, 224, 225, 242

Backpropagation-Netz 204, 211, 257, 306

Backtracking 73, 156, 173

Bayessche Formel 91

Bergsteiger-Heuristik 131

Bestensuche 132

Beweisverfahren

– Korrektheit 38

– Vollständigkeit 38

Bias → Schwellwert

Bilderkennung 252

Binäre Codierung 224

Boltzmann-Maschine 199, 300, 310

– Arbeitsweise 303

Breitensuche 118

Business Rules 18, 75

Calculus ratiocinator 17

Charakteristische Funktion 97

Chatbot 10, 19

Clustering 280

CNN → Convolutional Neural Network

Codierung 208, 229, 233, 234, 236, 245, 255,  
264

– binäre 232, 239, 240

Constraints 142, 187

Convolution 252

- Convolutional Neural Network 252
- Cut 174
- Data Mining 233
- Datenreduktion 229
- Datenvorverarbeitung 228, 233
- Delaunay-Triangulation 276
- Delta-Regel 205
- Dendrit 192
- Denken 10, 16, 189
- Eingabe-Neuron 230, 262, 269, 275
- Eingabeschicht 203, 213, 265, 308, 311
- Elman-Netz 250
- Energie-Funktion 299
- Energie-Niveau 289, 293, 296, 298–301
- Erfüllbarkeit 32, 33, 53
- Erinnerungsvermögen 250
- Erinnerung 248
- Erkennung
  - Muster- 290, 292
- Erregungszentrum 263, 265, 268, 269
- Expert system shell 27
- Expertensystem 19, 26, 27, 65, 75
- Fairness 123
- Fakt 148, 153
- Faktorisierung 57, 58
- Falsifizierbarkeit 32, 33, 53
- Faltung → Convolution
- Faltungsschicht 253, 254
- Fehler 211, 214, 242, 278
  - mittlerer quadratischer 224
  - Netz- 205, 244, 245
- Fehlerfunktion 213
- Fehlerkurve 212, 219, 225
- Fehlersignal 215, 216
- Formel
  - aussagenlogische 30
  - geschlossene 49
  - prädikatenlogische 48
- Frame 83
- Funktion
  - Ausgabe- 192
  - berechenbare 204
  - erlernbare 205
  - Fitness- 245
  - Identität 209
  - logistische 196
  - Mexican-Hat- 266
  - Schwellwert- 205
  - sigmoid 193
  - Sinus- 230
  - UND- 208, → UND-Funktion
  - XOR- 207, 211
- Fuzzy-Logik 103
- Fuzzy-Menge 97
  - Durchschnitt 100
  - Komplement 102
  - Teilmenge 100
  - Vereinigung 102
- Fuzzy-Regler 105
- Gas
  - neuronales 274
- Generalisierungsfähigkeit 198, 225, 227–229, 240, 277
- Geschlossene Formel 49
- Gewicht 192, 199, 203, 205, 211, 214, 261, 265, 269, 275, 287, 290–292, 295, 298, 299, 310
  - Verbindungs- 196
- Gewichtsänderung 206, 212, 217, 219, 266
- Gewichtsmatrix 217, 218, 282, 290, 292, 294, 296, 310, 325
- Gewinner-Neuron 261, 265, 266, 268, 271, 276, 283, 286
- Glockenkurve 267
- Gradient 219
- Gradientenabstiegsverfahren 212
- Graph 112
- Heuristik
  - Bergsteiger 131
  - Bestensuche 132
  - des nächsten Nachbarn 130
- Heuristische Suche 125
- Hopfield-Netz 199, 289, 299, 310, 311
- Horn-Klausel 60, 61, 147
- Identität 209, 214
- Imitation Game 8
- Implikation 29
- Inferenz 17

- Inferenzregel 37, 53, 104
  - Faktorisierung 58
  - Fuzzy-Logik 104
  - Modus ponens 53
  - Modus tollens 37
  - Resolution 38, 54
- Informierte Suche 125
- Inneres Neuron 211
- Intelligenter Agent 10
- Intelligenz 7, 9, 14
- Interpretation 32, 52
- Iterative Broadening 142
- Iterative Deepening 125, 142
  
- JavaNNS 191, 211, 220, 223, 236, 249, 283, 305, 307
- Jordan-Netz 248
  
- Karte
  - selbstorganisierende 261
- Keras 259
- Keras-Bibliothek 321
- Klassifizierung 222, 262, 264, 280
- Klausel 40, 43, 148, 153
- Klauselnormalform 40, 54
  - konjunktive 40
- KNF 40, 54
- KNIME 305
- Knobelaufgabe 15
- Kohonen Feature Map →
  - Selbstorganisierende Karte
- Konjunktive Normalform 40, 54
- Kontext-Neuron 248, 250
- Konvergenz-Theorem 205
- Korrektheit 38, 43, 58
- Künstliche Intelligenz 7, 10, 11
  - Black-Box- 21
  - Geschichte 17
  - symbolverarbeitende 14
  - White-Box- 19
- Kurvenverlauf
  - Prognose 247
  
- Leibnizches Programm 17
- Lernalgorithmus 326
- Lernen 198, 205, 206, 212, 217, 236
  - Delta-Regel 205
  - nicht überwachtes 198, 262, 263
  - Overfitting 241
  - SOM- 268
  - überwachtes 198
  - Wettbewerbs- 200, 261
- Lernfaktor 216, 225, 239, 267
- Lernverfahren
  - Batch- 213
  - Online- 214
- Linear Treshold Unit 195
- Lingua characteristic 17
- Listen in PROLOG 163, 165
- Literal 40, 153
- Loebner Prize 8
- Logik 28
- Logische Interpretation 162
- Logische Verknüpfung
  - Äquivalenz 29
  - Implikation 29
  - Negation 29
  - ODER → ODER-Funktion
  - UND → UND-Funktion
  - XOR → XOR-Funktion
- Logistische Funktion 214, 302, 325
- LTU → Linear Threshold Unit
  
- Measure of belief 96
- Measure of disbelief 96
- Merkmalsreduktion 228
- Mexican-Hat-Funktion 266
- MinMax-Strategie 142
- Mitsuku 11
- Modell 33, 53
- Modus ponens 36, 53
- Modus tollens 37
- Most general unifier 57, 160
- MSE → Fehler, mittlerer quadratischer
- Musterassoziator 295
- Mustererkennung 207, 222, 242, 255, 290, 292, 294, 298
  
- Nächster-Nachbar-Heuristik 130
- Negation 29
- Negation as failure 177
- Netz
  - ART- 261, 280

- Backpropagation- 306
- neuronales 305
- Netzeingabe 194
- Netzfehler 205, 212, 277
- Neuron 192
  - Ausgabe- 197
  - biologisches 191
  - Eingabe- 197
  - hidden 197
  - künstliches 191
  - On- 217
  - verdecktes 197
- Neuronales Gas 274, 309, 311
  - wachsendes 277
- Neuronales Netz 189, 196, 305
  - Anwendungen 222, 262
  - Arbeitsweise 198
  - Architektur 196, 200
  - autoassoziatives 289
  - Convolutional 252
  - Elman- 250
  - Entwicklung 198, 305
  - Größe 240
  - Hopfield-Netz 289
  - Jordan- 248
  - Optimierung 240
  - partiell rückgekoppelt 247
  - vollvernetzt 289
  - vorwärts gerichtetes 196, 203
- Normalform
  - konjunktive 40
- Occur-Check 161
- ODER-Funktion 29
- On-Neuron 217
- Optimierung 240
  - genetische 245
  - Rundreiseproblem 269, 297
- Overfitting 241
- Parameterübergabe in PROLOG 158
- Perzeptron 196, 203, 211, 310, 314
- Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma 280
- Pooling Layer 253, 256
- Prädikat 150, 153
- Prädikatenlogik 46
  - Modell 53
  - Prädikatenlogische Formel 48
- Prognose 222, 229, 247, 262
- PROLOG 147
  - Abarbeitung 170
  - arithmetische Ausdrücke 159
  - Backtracking 156, 173
  - Datentypen 163, 165
  - Fakten und Regeln 148, 151, 153
  - logische Interpretation 162
  - Negation 176
  - prozedurale Interpretation 162
  - Unifikation 158
  - vordefinierte Prädikate 177
- Propagierungsfunktion 192
- Prozedurale Interpretation 162
- Python 259, 305, 321
- Quantifizierung 47, 49, 52
- QuickProp → Backpropagation, QuickProp
- Rapid Prototyping 149
- RapidMiner 305
- Regel 65, 75, 148
- ReLU-Funktion 325
- Resolution 38, 54
  - Korrektheit 43, 58
  - Strategien 59
  - Widerlegungsvollständigkeit 44, 58
- Resolvente 43, 57
- Restlistenoperator 165
- Rezeptives Feld 244
- RPROP 306, → Backpropagation, resilient
- Rückwärtsverkettung 67, 71–73
- Rückkopplung 197, 229, 248, 262, 289
- Rundreiseproblem 126, 137, 269, 289, 298
- Schlussfolgerung 10
- Schlussregel → Inferenzregel
- Schwellwert 194, 205, 214, 284, 291, 295
- Schwellwertfunktion 193, 291
- Selbstorganisierende Karte 261, 262, 267, 271, 310, 311
- Self-Organizing Map 262
- Semantische Äquivalenz 39
- Semantische Folgerung 35, 37, 53
- Semantisches Netz 81
- Set-Of-Support-Strategie 59

- Shortcut connection 197
- Sicherheitsfaktor 92
- Simulated Annealing 142, 301, 303
- Simuliertes Abkühlen → Simulated Annealing
- Simuliertes Ausglühen → Simulated Annealing
- Skolemisierung 54
- SLD-Resolution 61
- Sobel-Filter 254
- Softmax-Prinzip 325
- SOM → Self-Organizing Map
- Speicherkapazität 241, 243
- Spezifität 77
- Stelligkeit 164
- Subsumption 60
- Suche 111
  - $A^*$  133
  - Bergsteiger 131
  - Bestensuche 132
  - Breitensuche 118
  - Fairness 123
  - heuristische 125
  - NNH 130
  - Tiefensuche 117
  - uninformierte 116
  - Zulässigkeit einer Schätzfunktion 137
- Super-Intelligenz 20
- Symbolverarbeitende KI 14, 15
- Synapse 192
  
- Tabu-Suche 143
- Tautologie 32, 33, 53, 60
- t-CoNorm 102
- Teaching output 205, 206, 211
- TensorFlow 259, 305, 321
- Threshold Accepting 142
- Tiefensuche 117, 119
- t-Norm 101
- Topic map 85
- Training 198, 206, 207, 218, 219, 224, 236, 241, 242, 254, 258, 307, 326
- Travelling Salesman Problem 126
- Turing, Alan 8
- Turing-Test 8
- Türme von Hanoi 179
  
- UND-Funktion 29, 195, 205, 208
- Unerfüllbarkeit 32, 33
- Unifikation 56, 57, 158
  - most general unifier 57, 160
- Uninformierte Suche 116
- Unscharfes Wissen 87, 97
- Unsicheres Wissen 88
  
- Vages Wissen 87
- Verbindungsgewicht 266, 282
- Vererbung 24, 83
- Verrauschen 227, 240
- Vollständigkeit 38, 123
- Vollvernetzte Schicht 198
- Voronoi-Tesselation 275
- Vorwärts gerichtetes Netz 203, 252, 280, 313
- Vorwärtsverkettung 68
  
- Wachsendes neuronales Gas 277
- Wahrheitstabelle 30, 32, 34, 36
- Wahrscheinlichkeit 88, 89
  - bedingte 90
- Wahrscheinlichkeitsfunktion 89
- WEKA 305
- Weltwissen 15
- Wenn-Dann-Regel 76
- Wettbewerbslernen 200, 261, 275, 280
- Widerlegungsvollständigkeit 44, 58
- Widerspruchsbeweis 38, 41, 54
- Wiedererkennung 292, 294
- Winner takes all 261, 283
- Wissen
  - logisches 24
  - prozedurales 24
  - relationales 24
  - Repräsentation 15
  - Verarbeitung 15
- Wissensnetz 85
- Wissensrepräsentation 23, 25, 27, 33
- Wissensverarbeitung 23, 25, 27, 33
  
- XOR-Funktion 30, 207, 208, 216, 307
  
- Zeichenerkennung 222, 280
- Zulässigkeit 137
- Zustandsraum 115, 116, 141