

HANSER



Leseprobe

zu

Künstliche Intelligenz

von Uwe Lämmel und Jürgen Cleve

Print-ISBN: 978-3-446-47881-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47882-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446478817>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Künstliche Intelligenz, KI, KI, KI ... Kaum ein Tag vergeht, ohne dass wieder einmal die Rede von der KI ist. Oft wird dabei das Schreckgespenst der KI herbeigeredet, der wir Menschen uns nicht mehr erwehren können. Aber was ist eigentlich KI? Was steckt hinter der KI? Welche Techniken ermöglichen ein (teilweise) intelligentes Verhalten?

Unser Buch über künstliche Intelligenz richtet sich an Leserinnen und Leser mit natürlicher Intelligenz: Es ist ausdrücklich ein **Lehrbuch** und bietet einen Einstieg in die **Grundlagen** der künstlichen Intelligenz.

Wir wenden uns 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 die Expertinnen und Experten hoffen wir, die eine oder andere Anregung zur einfachen Darstellung des einen oder anderen Sachverhaltes geben zu können. **Studierenden** 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 und -Lehrerinnen** an den weiterführenden Schulen. Das Gebiet der künstlichen Intelligenz bietet zahlreiche Ansätze, die mit interessierten Schülern in Angriff genommen werden können.

■ Inhalt

Wir behandeln sowohl die *symbolverarbeitende künstliche Intelligenz*, die schon seit einigen Jahrzehnten in der Praxis eingesetzt wird, als auch **konnektionistische** Ansätze wie die **künstlichen neuronalen Netze**, die in den letzten Jahren für aufregende Fortschritte in vielen Bereichen gesorgt haben.

Mehr als 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:

- 1 Künstliche Intelligenz
- Symbolverarbeitende künstliche Intelligenz
- 2 Darstellung und Verarbeitung von Wissen
- 3 Problemlösung mittels Suche
- 4 Wissensverarbeitung mit PROLOG
- Künstliche neuronale Netze – Konnektionismus

- 5 Künstliche neuronale Netze
- 6 Vorwärtsgerichtete neuronale Netze
- 7 Wettbewerbslernen
- 8 Autoassoziative Netze
- 9 Entwicklung neuronaler Netze

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.

■ GOFAI – Good Old Fashioned Artificial Intelligence

Als **Good Old Fashioned Artificial Intelligence** (GOFAI) wird, etwas scherzhaft oder herablassend, die **symbolverarbeitende künstliche Intelligenz** genannt, der die Kapitel 2 und 3 gewidmet sind: eine explizite Darstellung des Wissens und seiner Verarbeitung steht hier im Mittelpunkt. Die Logik-basierte Programmiersprache PROLOG eignet sich nach wie vor sehr gut, Wissen explizit zu modellieren und zu verarbeiten und so KI schnell praktisch auszuprobieren und zu erleben. Die erste Hälfte des Buches schließt so mit einer Einführung in diese Sprache im Kapitel 4.

Die symbolverarbeitende künstliche Intelligenz wird auch als White-Box-KI bezeichnet, da sowohl die Wissensdarstellung als auch die Wissensverarbeitung transparent und durch das System erklärbar sind.

■ Die neue KI mit neuronalen Netzen

Die **künstlichen neuronalen Netze** sind zwar schon viele Jahrzehnte alt und werden auch bereits seit den 1990er Jahren praktisch eingesetzt, erst der Leistungssprung der letzten Jahre hat zu einer Gleichsetzung von KI mit künstlichen neuronalen Netzen geführt, die „neue“ KI.

In der zweiten Hälfte des Buches (Kapitel 5-9) stellen wir künstliche neuronale Netze vor. Mit dem System **JavaNNS** schauen wir ganz genau in die Struktur und in die Arbeitsweise künstlicher neuronaler Netze hinein. Auch der zweite Teil des Buches schließt mit der praktischen Anwendung: Wir programmieren künstliche neuronale Netze mittels Java oder Python und zeigen, wie neuronale Netze mittels Software-Systemen entwickelt werden können.

Die künstlichen neuronalen Netze fallen in die Kategorie *Black-Box-KI*:

Man weiß, wie sie funktionieren, eine Erklärung für die Entstehung eines Resultats gibt es (bisher) jedoch für den Nutzer nicht oder nur sehr eingeschränkt.

■ KI-Techniken in der Praxis

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.

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

■ Neu in dieser Auflage

ChatGPT ist in aller Munde und auch wir widmen uns im Kapitel 1 diesem interessanten (intelligenten ?) Diskussionspartner.

Mittels **Decision Model and Notation** (DMN) werden Entscheidungen modelliert und in die Prozessbeschreibungen (BPMN) eingebunden. Verwendet werden Entscheidungstabellen, die eine Form der regelbasierten Wissensdarstellung darstellen. Systeme wie Signavio oder Camunda erlauben dann die Ausführung, somit die Verarbeitung von Wissen. Wir freuen uns, dass GOFAI auf diesem Wege immer stärker eingesetzt wird und widmen der DMN einen Abschnitt.

Das Wesen künstlicher neuronaler Netze lässt sich mit der Software JavaNNS am besten verstehen, für die praktische Anwendung werden diese Netze aber mit **Python** programmiert, so dass wir diesen Teil im Buch ausgebaut haben.

■ Web-Seite und Lösungen



Zusatzinformationen zum Buch findet man unter: www.plus.hanser-fachbuch.de und www.wi.hs-wismar.de/ki-buch. Dort finden die Leserinnen und Leser Programmtexte und 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.

Wismar, August 2023

Uwe Lämmel, Jürgen Cleve

Inhalt

1	Künstliche Intelligenz	9
1.1	Eine intelligente Maschine	9
1.2	Intelligenz und künstliche Intelligenz	11
1.3	Knobelaufgaben und symbolverarbeitende KI	18
1.4	Geschichte der KI	20
1.5	Wir und die KI	22

Teil 1 – Symbolverarbeitende KI

2	Darstellung und Verarbeitung von Wissen	27
2.1	Wissen und Wissensarten	27
2.2	KI und explizite Wissensdarstellung	28
2.3	Darstellung von Wissen mit Hilfe von Logik	32
2.3.1	Aussagenlogik	33
2.3.2	Prädikatenlogik	50
2.3.3	Logik und PROLOG	65
2.4	Wissensverarbeitung mit Regeln	69
2.4.1	Regelbasierte Wissensdarstellung	69
2.4.2	Regelverarbeitung	72
2.4.2.1	Vorwärtsverkettung	73
2.4.2.2	Rückwärtsverkettung	76
2.4.2.3	Regelverarbeitung und PROLOG	77
2.4.3	Regelsysteme im Einsatz	79
2.4.3.1	Business Rules	80
2.4.3.2	Decision Model and Notation	83
2.5	Semantische Netze und Frames	87
2.5.1	Semantische Netze	87
2.5.2	Frames	89
2.5.3	Wissensnetze	91
2.6	Vages Wissen	94
2.6.1	Unsicheres Wissen	95

2.6.2	Fuzzy-Mengen	103
2.6.3	Fuzzy-Logik.....	109
2.6.4	Fuzzy-Regler.....	111
3	Problemlösung mittels Suche	117
3.1	Suche in Graphen.....	117
3.2	Uninformierte Suche.....	122
3.3	Heuristische Suche	131
3.3.1	Heuristik des nächsten Nachbarn	136
3.3.2	Bergsteiger-Strategie	138
3.3.3	Bestensuche	139
3.3.4	A*-Suche	140
3.4	Das Rundreiseproblem	144
4	Wissensverarbeitung mit PROLOG	153
4.1	Logisches Programmieren.....	154
4.1.1	Erste Schritte	154
4.1.2	Ein Beispiel	156
4.1.3	Regeln	158
4.2	PROLOG-Programme	162
4.2.1	Problemlösung mit PROLOG.....	162
4.2.2	Lösungsfindung mittels Backtracking	164
4.2.3	Parameterübergabe mittels Unifikation	166
4.2.4	Interpretation von Programmen	170
4.3	Datentypen und Arithmetik.....	171
4.3.1	Einfache und zusammengesetzte Datentypen	171
4.3.2	Listen	174
4.3.3	Arithmetik	177
4.4	Steuerung der Abarbeitung	179
4.4.1	Reihenfolge der Klauseln	179
4.4.2	Reihenfolge der Literale im Körper einer Regel.....	180
4.4.3	Kontrolle des Backtracking	181
4.4.4	Die Negation	184
4.5	Vordefinierte Prädikate	186
4.6	Beispielprogramme	187
4.6.1	Das Einfärben einer Landkarte	187
4.6.2	Die Türme von Hanoi	188
4.6.3	Das Acht-Damen-Problem	189
4.6.4	Das Problem der stabilen Paare	191
4.6.5	Das Einstein-Problem.....	193

Teil 2 – KI mit neuronalen Netzen

5	Künstliche neuronale Netze	197
5.1	Das natürliche neuronale Netz	197
5.2	Geschichte	198
5.3	Die Kapitel über neuronale Netze	199
5.4	Das künstliche Neuron	200
5.5	Architekturen	205
5.6	Arbeitsweise	207
6	Vorwärtsgerichtete Netze	211
6.1	Das Perzeptron	211
6.1.1	Die Delta-Regel	213
6.1.2	Musterzuordnungen	216
6.2	Backpropagation-Netze	219
6.2.1	Das Backpropagation-Verfahren	220
6.2.2	Das XOR-Backpropagation-Netz	224
6.2.3	Modifikationen des Backpropagation-Algorithmus	227
6.3	Typische Anwendungen	230
6.3.1	Zeichenerkennung	230
6.3.2	Das Encoder-Decoder-Netz	236
6.3.3	Ein Prognose-Netz	237
6.4	Datenvorverarbeitung	241
6.4.1	Verarbeitungsschritte	241
6.4.2	Daten des Kreditvergabe-Beispiels	244
6.5	Netzgröße und Optimierungen	248
6.5.1	Die Größe der inneren Schicht	249
6.5.2	Das Entfernen von Verbindungen	251
6.5.3	Genetische Algorithmen	252
6.6	Partiell rückgekoppelte Netze	255
6.6.1	Jordan-Netze	256
6.6.2	Elman-Netz	257
6.7	Convolutional Neural Network	259
7	Wettbewerbslernen	269
7.1	Selbstorganisierende Karte	270
7.1.1	Architektur und Arbeitsweise	270
7.1.2	Das Training	273
7.1.3	Visualisierung einer Karte und deren Verhalten	276
7.1.4	Eine Lösung des Rundreiseproblems	278

7.2	Neuronales Gas	283
7.2.1	Architektur und Arbeitsweise	283
7.2.2	Wachsendes neuronales Gas	285
7.3	Adaptive Resonanz-Theorie.....	289
7.3.1	Das Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma	289
7.3.2	Struktur eines ART-Netzes	290
7.3.3	Das Beispiel Würfelmuster	292
7.3.4	Arbeitsweise	294
8	Autoassoziative Netze	299
8.1	Hopfield-Netze.....	299
8.1.1	Arbeitsweise	300
8.1.2	Wiedererkennung von Mustern	302
8.1.3	Energie-Niveau eines Netzes.....	306
8.2	Lösung von Optimierungsproblemen	307
8.3	Die Boltzmann-Maschine	310
9	Entwicklung neuronaler Netze	315
9.1	Datenanalyse-Software	315
9.2	JavaNNS.....	317
9.3	Programmentwurf und Datenstrukturen	319
9.3.1	Einsatz von Array-Datenstrukturen	320
9.3.2	Der objektorientierte Ansatz	321
9.4	Implementation eines Perzeptrons in Java	323
9.5	Ein Perzeptron in Python	330
9.6	Implementieren mit Python und Keras.....	335
9.7	Implementieren mit TensorFlow	342
	Literatur	351
	Index	355

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 Turing-Test, der die Intelligenz von Maschinen prüft, 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.

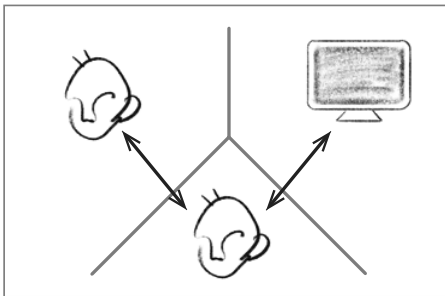


Bild 1.1 Der Turing-Test

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 fallen 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.

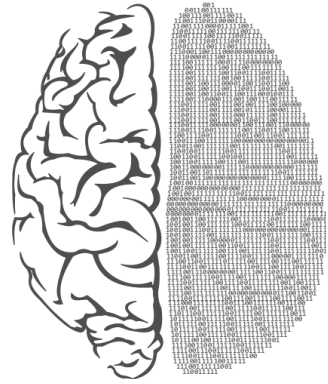
Diese Faktoren und die vorher genannten Eigenschaften des Lernens aus Erfahrung, des Verstehens abstrakter Konzepte und die Anwendung zur Manipulation der Umgebung werden wir als Kriterien oder Maßstäbe für die Charakterisierung einer künstlichen Intelligenz einsetzen.

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]

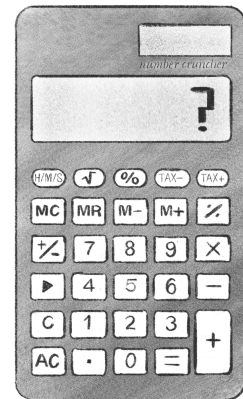


Es sind bereits viele Computerprogrammen bekannt, die Aufgaben, für deren Lösung im Allgemeinen Intelligenz notwendig ist, besser oder sogar schneller lösen können als ein Mensch: Das Navigationsgerät plant eine Route unter Berücksichtigung von Randbedingungen (keine Autobahn) und Zielkriterien (kürzeste 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 bereits vor zwanzig 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.

I mean 4 plus 3. OK I will try to calculate 4+3.

What is intelligence? Oh I get it.
Thanks for explaining that.
Use a calculator!

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 Mitsuku¹ 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.

Seit 2022 ist ChatGPT² der Firma OpenAI in der öffentlichen Diskussion. ChatGPT beantwortet nicht nur einfache Fragen, sondern kann ganze Berichte verfassen oder Klausur- oder Programmieraufgaben lösen. Fast hektisch wird seitdem darüber diskutiert, wie ChatGPT oder ähnliche Produkte das Lehren und Lernen an Schulen oder Hochschulen beeinflussen. Ja, ChatGPT stellt eine neue Qualität der Bereitstellung und Aufbereitung von Wissen dar. Die Kommunikation mit ChatGPT kann auf einem intelligenten Niveau geführt werden. Wir werden lernen, diese Fähigkeiten zu nutzen, und wir werden lernen, die Grenzen zu erkennen, denn nicht alles, was ChatGPT sagt, ist richtig. Den Loebner-Prize für die beste menschliche Kommunikation in einem Turing-Test wird ChatGPT nicht gewinnen: ChatGPT sagt offen, dass es ein Softwareprodukt ist (Bild 1.3 auf der nächsten Seite). Wie definiert nun ChatGPT die künstliche Intelligenz? Bild 1.4 auf Seite 15 gibt die Antwort³.

¹ www.pandorabots.com/mitsuku/

² openai.com/blog/chatgpt/

³ Abfrage am 16.2.2023

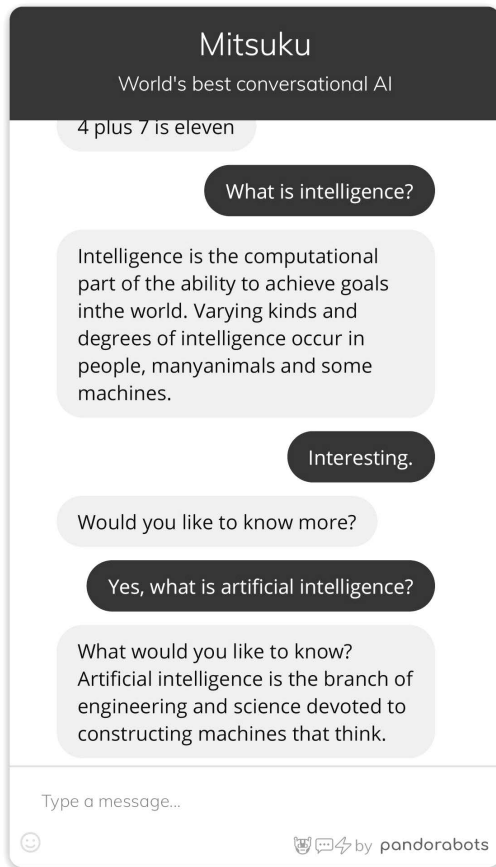


Bild 1.2 Mitsuku und die Intelligenz

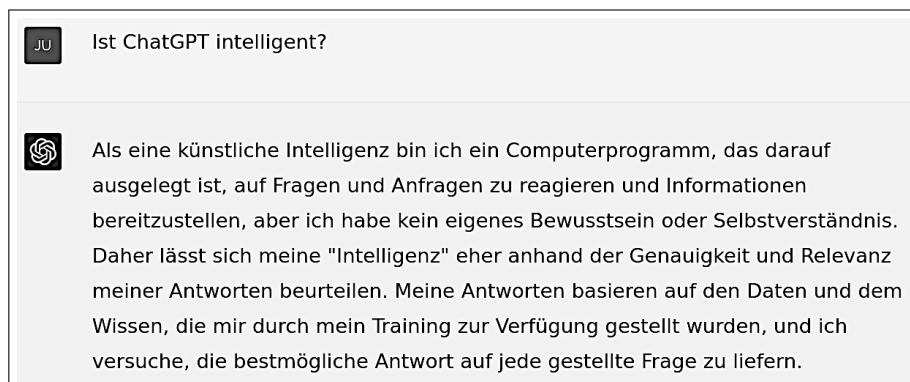


Bild 1.3 Ist ChatGPT intelligent?

JU

Was ist künstliche Intelligenz?



Künstliche Intelligenz (KI) bezieht sich auf die Fähigkeit von Maschinen oder Computern, menschenähnliche Intelligenz zu imitieren oder zu replizieren, um bestimmte Aufgaben auszuführen oder Probleme zu lösen. KI-Systeme verwenden Algorithmen, maschinelles Lernen, Deep Learning und andere Technologien, um Daten zu verarbeiten, zu analysieren und Muster zu erkennen, die es ihnen ermöglichen, Entscheidungen zu treffen und Probleme zu lösen.

Es gibt mehrere Arten von KI, darunter schwache KI, die sich auf KI-Systeme bezieht, die auf eine bestimmte Aufgabe spezialisiert sind, und starke KI, die darauf abzielt, allgemeine Intelligenz wie der Mensch zu erreichen. KI-Technologien finden in vielen Bereichen Anwendung, wie z.B. in der Gesundheitsversorgung, dem Finanzwesen, der Automatisierung von Fertigungsprozessen und dem autonomen Fahren.

Bild 1.4 Definition der Künstlichen Intelligenz durch ChatGPT

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.



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.

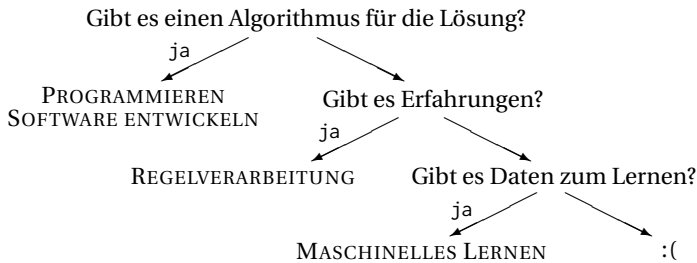


Bild 1.5 Einsatzgebiete der künstlichen Intelligenz

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 viel 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. Men-

schen 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 wichtige 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“.

Index

- 2/3-Regel, 295
- Ableitbarkeit, 42
- Acht-Damen-Problem, 189
- Adaline, 204
- Adaptive linear element, 204
- Adaptive Resonanz-Theorie, → ART-Netz, 290
- Ähnlichkeitsmaß, 289, 290, 292
- Aktionsregel, 70
- Aktivierung, 201, 203, 214, 222, 225, 245, 276, 277
- Aktivierungsfunktion, 201, 223, 224, 242, 301, 312
- Aktualität, 81
- Algorithmus, 197
 - Backpropagation-, 220, 223, 226
 - Boltzmann-Einschwingen-, 312
 - Delta-Regel-Lern-, 214
 - genetischer, 252, 253
 - neuronales Gas, 283
 - SOM-Lern-, 276
 - Wettbewerbslernen, 269
- Allgemeingültigkeit, 36, 37, 57
- Äquivalenz, 33
 - semantische, 46
- Artificial Intelligence, 9
- ART-Netz, 269, 289
 - Arbeitsweise, 294
- A*-Suche, 140
- Ausgabe, 213, 214, 216, 219, 220, 222, 256, 270, 301
- Ausgabefunktion, 201, 222
- Ausgabe-Neuron, 213, 244, 250, 256, 257, 261
- Ausgabeschicht, 221, 299, 318, 321
- Ausgangszustand, 118
- Aussage
 - atomare, 33
 - unscharfe, 66, 103
 - unsichere, 66, 95
 - zusammengesetzte, 33
- Aussagenlogik, 33
 - Modell, 37
- Aussagenlogische Formel, 34
- Autoassoziatives Netz, 299
- Backpropagation, 211, 219, 221, 230, 232, 257, 317
 - Backpercolation, 228
 - mit Momentum, 228
 - Modifikation, 227
 - QuickProp, 228, 232
 - resilient, 228, 232, 233, 250
- Backpropagation-Netz, 212, 219, 264, 316
- Backtracking, 78, 164, 181
- Bayessche Formel, 97
- Bergsteiger-Heuristik, 138
- Bestensuche, 139
- Beweisverfahren
 - Korrektheit, 42
 - Vollständigkeit, 42
- Bias, → Schwellwert
- Bildererkennung, 259
- Binäre Codierung, 232
- Boltzmann-Maschine, 208, 310, 320
 - Arbeitsweise, 312
- Breitensuche, 123, 124
- Business Rules, 21, 79
- Calculus ratiocinator, 20
- Charakteristische Funktion, 103
- Chatbot, 12, 22
- Clusterung, 289
- CNN, → Convolutional Neural Network
- Codierung, 216, 237, 241, 242, 244, 252, 262, 272
 - binäre, 240, 247, 248
- Constraints, 149, 195
- Convolution, 260
- Convolutional Neural Network, 259
- Cut, 182
- Cycle checking, 121, 148

- Data Mining, 241
- Datenreduktion, 237
- Datenvorverarbeitung, 236, 241
- Delaunay-Triangulation, 285
- Delta-Regel, 213, 332
- Dendrit, 200
- Denken, 12, 19, 197

- Eingabe-Neuron, 238, 270, 277, 283
- Eingabeschicht, 211, 221, 273, 318, 321
- Elman-Netz, 257
- Energie-Funktion, 308
- Energie-Niveau, 299, 303, 306, 308, 310, 311
- Erfüllbarkeit, 36, 37, 57
- Erinnerungsvermögen, 257
- Erinnerung, 256
- Erkennung
 - Muster-, 300, 302
- Erregungszentrum, 271, 273, 276, 277
- Expert system shell, 31
- Expertensystem, 22, 30, 31, 69, 79

- Fairness, 129
- Fakt, 155, 160
- Faktorisierung, 62
- Falsifizierbarkeit, 36, 37, 57
- Faltung, → Convolution
- Faltungsschicht, 260, 261
- Fehler, 219, 222, 250, 286
 - mittlerer quadratischer, 232
 - Netz-, 213, 251, 253
- Fehlerfunktion, 221
- Fehlerkurve, 220, 227, 233
- Fehlersignal, 223, 224
- Formel
 - aussagenlogische, 34
 - geschlossene, 53
 - prädikatenlogische, 52
- Frame, 89
- Funktion
 - Ausgabe-, 201
 - berechenbare, 212
 - erlernbare, 213
 - Fitness-, 253
 - Identität, 217
 - logistische, 204
 - Mexican-Hat-, 274
 - Schwellwert-, 213
 - sigmoid, 202
 - Sinus-, 238
 - UND-, → UND-Funktion, 216
 - XOR-, 215, 219
- Fuzzy-Logik, 109
- Fuzzy-Menge, 103
 - Durchschnitt, 107
 - Komplement, 109
 - Teilmenge, 106
 - Vereinigung, 108
- Fuzzy-Regler, 111

- Gas
 - neuronales, 283
- Generalisierungsfähigkeit, 207, 233, 236, 237, 248, 285
- Geschlossene Formel, 53
- Gewicht, 200, 208, 211, 213, 219, 222, 269, 273, 277, 283, 296, 300–302, 305, 308, 309, 320
 - Verbindungs-, 205
- Gewichtsänderung, 214, 220, 225, 227, 274
- Gewichtsmatrix, 225, 226, 291, 300, 302, 304, 306, 320, 346
- Gewinner-Neuron, 269, 273, 274, 276, 279, 284, 291, 295
- Glockenkurve, 275
- GOFAI, 2
- Gradient, 227
- Gradientenabstiegsverfahren, 220
- Graph, 118

- Heuristik
 - Bergsteiger, 138
 - Bestensuche, 139
 - des nächsten Nachbarn, 136
- Heuristische Suche, 131
- Hopfield-Netz, 208, 299, 309, 320, 321
- Horn-Klausel, 65, 153

- Identität, 217, 222
- Imitation Game, 10
- Implikation, 33
- Inferenz, 20
- Inferenzregel, 41, 58, 111
 - Faktorisierung, 62

- Fuzzy-Logik, 111
- Modus ponens, 58
- Modus tollens, 41
- Resolution, 43, 58
- Informierte Suche, 131
- Inneres Neuron, 219
- Intelligenter Agent, 12
- Intelligenz, 9, 11, 17
- Interpretation, 36, 56
- Iterative Broadening, 149
- Iterative Deepening, 131, 149

- JavaNNS, 199, 219, 228, 231, 244, 257, 292, 315, 317
- Jordan-Netz, 256

- Karo-Effekt, 140
- Karte
 - selbstorganisierende, 269
- Keras, 266, 315, 335, 342
- Klassifizierung, 230, 270, 272, 289
- Klausel, 45, 47, 155, 160
- Klauselnormalform, 45, 58
 - konjunktive, 44
- KNF, 44, 58
- KNIME, 315
- Knobelaufgabe, 18
- Kohonen Feature Map, →
 - Selbstorganisierende Karte
- Konjunktive Normalform, 44, 58
- Kontext-Neuron, 256, 258
- Konvergenz-Theorem, 213
- Korrektheit, 42, 48, 62
- Künstliche Intelligenz, 9, 12, 15
 - Black-Box-, 24
 - Geschichte, 20
 - symbolverarbeitende, 17
 - White-Box-, 22
- Kurvenverlauf
 - Prognose, 255

- Leibnizsches Programm, 20
- Lernalgorithmus, 347
- Lernen, 208, 213, 214, 220, 225, 244
 - Delta-Regel, 213
 - nicht überwachtes, 208, 270, 271
 - Overfitting, 249
 - SOM-, 276
 - überwachtes, 208
 - Wettbewerbs-, 208, 269
- Lernfaktor, 224, 232, 247, 275
- Lernverfahren
 - Batch-, 221
 - Online-, 222
- Linear Threshold Unit, 204
- Lingua characteristica, 20
- Listen in PROLOG, 171, 174
- Literal, 44, 159
- Loebner Prize, 10
- Logik, 32
- Logische Interpretation, 170
- Logische Verknüpfung
 - Äquivalenz, 33
 - Implikation, 33
 - Negation, 33
 - ODER, → ODER-Funktion
 - UND, → UND-Funktion
 - XOR, → XOR-Funktion
- Logistische Funktion, 222, 312, 346
- LTU, → Linear Threshold Unit

- Measure of belief, 102
- Measure of disbelief, 102
- Merkmalsreduktion, 236
- Mexican-Hat-Funktion, 274
- MinMax-Strategie, 149
- Mitsuku, 13
- Modell, 37, 57
- Modus ponens, 41, 58
- Modus tollens, 41
- Most general unifier, 61, 168
- MSE, → Fehler, mittlerer quadratischer
- Multiple path pruning, 140, 147
- Musterassoziator, 305
- Mustererkennung, 215, 230, 250, 262, 300, 302, 305, 308

- Nächster-Nachbar-Heuristik, 136
- Negation, 33
- Negation as failure, 185
- Netz
 - ART-, 269, 289
 - Backpropagation-, 316
 - neuronales, 315

- Netzeingabe, 203
- Netzfehler, 213, 220, 285
- Neuron, 201
 - Ausgabe-, 205
 - biologisches, 200
 - Eingabe-, 205
 - hidden, 205
 - künstliches, 200
 - On-, 225
 - verdecktes, 205
- Neuronales Gas, 283, 319, 321
 - wachsendes, 285
- Neuronales Netz, 197, 205, 315
 - Anwendungen, 230, 270
 - Arbeitsweise, 207
 - Architektur, 205, 208
 - autoassoziatives, 299
 - Convolutional, 259
 - Elman-, 257
 - Entwicklung, 207, 315
 - Größe, 248
 - Hopfield-Netz, 299
 - Jordan-, 256
 - Optimierung, 248
 - partiell rückgekoppelt, 255
 - vollvernetzt, 299
 - vorwärtsgerichtetes, 205, 211
- Normalform
 - konjunktive, 44
- Occur-Check, 169
- ODER-Funktion, 33
- On-Neuron, 225
- Optimierung, 248
 - genetische, 253
 - Rundreiseproblem, 278, 307
- Overfitting, 249

- Parameterübergabe in PROLOG, 166
- Perzeptron, 205, 211, 219, 320, 323
- Plastizitäts-Stabilitäts-Dilemma, 289
- Pooling Layer, 261, 264
- Prädikat, 157, 160
- Prädikatenlogik, 50
 - Modell, 57
- Prädikatenlogische Formel, 52
- Prognose, 230, 237, 255, 270

- PROLOG, 153
 - Abarbeitung, 179
 - arithmetische Ausdrücke, 168
 - Backtracking, 164, 181
 - Datentypen, 171, 174
 - Fakten und Regeln, 155, 158, 160
 - logische Interpretation, 170
 - Negation, 184
 - prozedurale Interpretation, 170
 - Unifikation, 166
 - vordefinierte Prädikate, 186
- Propagierungsfunktion, 200
- Prozedurale Interpretation, 170
- Python, 266, 315, 330, 342

- Quantifizierung, 51, 53, 56, 57
- QuickProp, → Backpropagation, QuickProp

- Rapid Prototyping, 156
- RapidMiner, 315
- Regel, 69, 70, 79, 155
- ReLU-Funktion, 346
- Resolution, 43, 58
 - Korrektheit, 48, 62
 - Strategien, 64
 - Widerlegungsvollständigkeit, 48, 63
- Resolvente, 47, 61
- Restlistenoperator, 174
- RETE, 82
- Rezeptives Feld, 251
- RPROP, → Backpropagation, resilient, 316
- Rückkopplung, 206, 237, 256, 270, 299
- Rückwärtsverkettung, 72, 76, 78
- Rundreiseproblem, 132, 144, 278, 299, 308

- Schlussfolgerung, 12
- Schlussregel, → Inferenzregel
- Schwellwert, 203, 213, 222, 293, 301, 305
- Schwellwertfunktion, 202, 301
- Selbstorganisierende Karte, 269, 270, 275, 279, 320, 321
- Self-Organizing Map, 270
- Semantische Äquivalenz, 43
- Semantische Folgerung, 39, 41, 57
- Semantisches Netz, 87
- Set-Of-Support-Strategie, 64
- Shortcut connection, 206

- Sicherheitsfaktor, 99
 Simulated Annealing, 149, 310, 313
 Simuliertes Abkühlen, → Simulated Annealing
 Simuliertes Ausglühen, → Simulated Annealing
 Skolemisierung, 59
 SLD-Resolution, 65
 Sobel-Filter, 261
 Softmax-Prinzip, 346
 SOM, → Self-Organizing Map
 Speicherkapazität, 249, 251
 Spezifität, 81
 Stelligkeit, 172
 Subsumption, 64
 Suche, 117
 – A*, 140
 – Bergsteiger, 138
 – Bestensuche, 139
 – Breitensuche, 123
 – Fairness, 129
 – heuristische, 131
 – NNH, 136
 – Tiefensuche, 123
 – uninformierte, 122
 – Zulässigkeit einer Schätzfunktion, 143
 Super-Intelligenz, 23
 Symbolverarbeitende KI, 17, 18
 Synapse, 200

 Tabu-Suche, 150
 Tautologie, 36, 37, 57, 64
 t-CoNorm, 108
 Teaching output, 213, 214, 219
 TensorFlow, 266, 315, 342
 Threshold Accepting, 149
 Tiefensuche, 123, 125
 t-Norm, 107
 Topic map, 91
 Training, 208, 214, 215, 226, 227, 232, 245, 249, 250, 261, 265, 318, 347
 Travelling Salesman Problem, 132
 Turing, Alan, 10
 Turing-Test, 10
 Türme von Hanoi, 188

 UND-Funktion, 33, 204, 213, 216
 Unerfüllbarkeit, 36, 37
 Unifikation, 61, 166, 167
 – most general unifier, 61, 168
 Uninformierte Suche, 122
 Unscharfes Wissen, 94, 103
 Unsicheres Wissen, 94, 95

 Vages Wissen, 94
 Verbindungsgewicht, 274, 291
 Vererbung, 28, 90
 Verrauschen, 236, 248
 Vollständigkeit, 42, 129
 Vollvernetzte Schicht, 206
 Voronoi-Tessellation, 284
 Vorwärtsgerichtetes Netz, 211, 259, 289, 322
 Vorwärtsverkettung, 73

 Wachsendes neuronales Gas, 285
 Wahrheitswerttabelle, 34, 36, 38, 40
 Wahrscheinlichkeit, 95, 96
 – bedingte, 96
 Wahrscheinlichkeitsfunktion, 96
 WEKA, 315
 Weltwissen, 18
 Wenn-Dann-Regel, 80
 Wettbewerbslernen, 208, 269, 283, 289
 Widerlegungsvollständigkeit, 48, 63
 Widerspruchsbeweis, 43, 46, 58
 Wiedererkennung, 302, 305
 Winner takes all, 269, 291
 Wissen
 – logisches, 28
 – prozedurales, 28
 – relationales, 27
 – Repräsentation, 18
 – Verarbeitung, 18
 Wissensnetz, 91
 Wissensrepräsentation, 27, 29, 31, 37
 Wissensverarbeitung, 27, 29, 31, 37

 XOR-Funktion, 34, 215, 216, 224, 317

 Zeichenerkennung, 230, 289
 Zulässigkeit, 143
 Zustandsraum, 121, 122, 146