

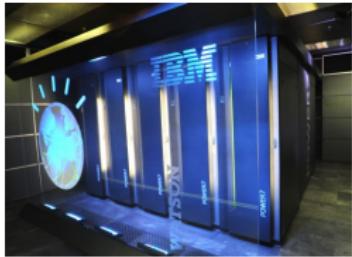
# Artificial Intelligence

Raul Rojas and Christoph Benzmüller

Freie Universität Berlin

Lecture Course, SS 2015

# Artificial Intelligence



#### SCIENCE NEWS

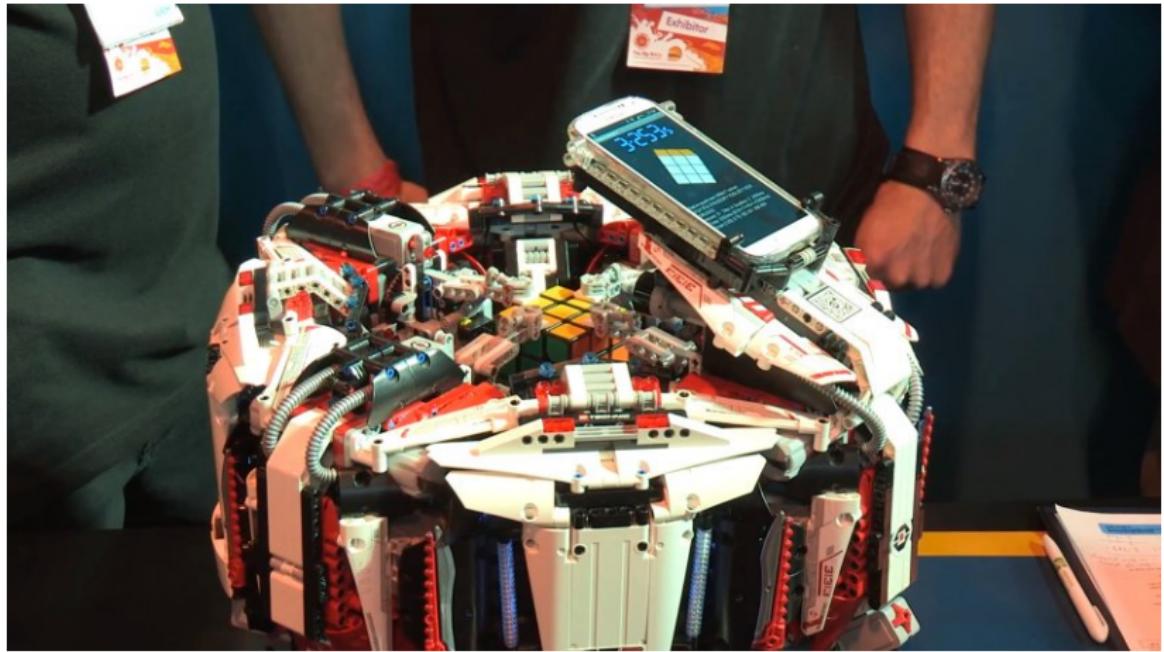
[HOME](#) / [SCIENCE NEWS](#) / [RESEARCHERS SAY THEY USED MACBOOK TO PROVE GOEDEL'S GOD THEOREM](#)

**Researchers say they used MacBook to prove Goedel's God theorem**

Oct. 23, 2013 | 8:14 PM | 1 comments



## Discussion: Example AI System?!



<https://www.youtube.com/watch?v=X0pFZG7j5cE>

- ▶ Strong AI

Strong AI aims to build machines whose overall intellectual ability is indistinguishable from that of a human being.

- ▶ Applied AI

Applied AI, also known as advanced information-processing, aims to produce commercially viable 'smart' systems. Applied AI has already enjoyed considerable success.

- ▶ Cognitive Simulation

In cognitive simulation, computers are used to test theories about how the human mind works—for example, theories about how we recognise faces and other objects, or about how we solve abstract problems.

# What is Artificial Intelligence? Different Definitions

- ▶ “The exciting new effort to make computers think . . . machines with minds, in the full and literal sense” (Haugeland, 1985)
- ▶ “[The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision-making, problem solving, learning . . . ” (Bellman, 1978)
- ▶ “The study of mental faculties through the use of computational models” (Charniak and McDermott, 1985)
- ▶ “The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act” (Winston, 1992)
- ▶ “The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people” (Kurzweil, 1990)
- ▶ “The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better” (Rich and Knight, 1991)
- ▶ “A field of study that seeks to explain and emulate intelligent behavior in terms of computational processes” (Schalkoff, 1990)
- ▶ “The branch of computer science that is concerned with the automation of intelligent behavior” (Luger and Stubblefield, 1993)

# What is Artificial Intelligence?

AI is the science and engineering of making intelligent machines, especially intelligent computer programs. It is related to the similar task of using computers to understand human intelligence, but AI does not have to confine itself to methods that are biologically observable. (John McCarthy)

- ▶ Knowledge Representation and Reasoning
- ▶ Learning
- ▶ Problem-Solving
- ▶ Perception
- ▶ Natural Language Understanding
- ▶ Robotics

There are many useful websites on the web; here are some examples:

- ▶ ... one by John McCarthy at Stanford:

<http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>

- ▶ ... another one at alanturing.net:

[http://www.alanturing.net/turing\\_archive/pages/reference%20articles/what%20is%20ai.html](http://www.alanturing.net/turing_archive/pages/reference%20articles/what%20is%20ai.html)

- ▶ ... and here is one on Logic and Artificial Intelligence:

<http://plato.stanford.edu/entries/logic-ai/>

# Strong Need for Ethical Discussions!

Noel Sharkey's talk at IJCAI-2013

<http://ijcai13.org/files/summary/banning-autonomous-weapons.pdf>



See also: <http://icrac.net>

## IJCAI-2013 Panel by Stuart Russel: What if we succeed?

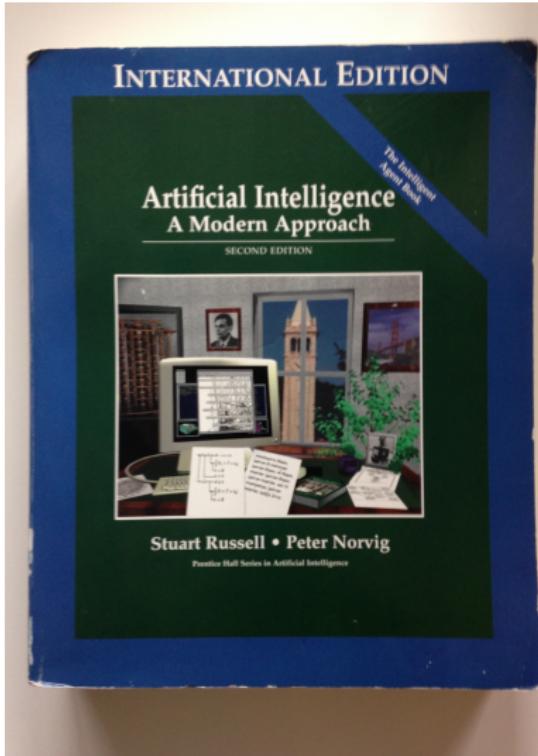
<http://joanna-bryson.blogspot.de/2013/08/ijcai-2013-panel-future-of-ai-what-if.html>

Position of Henry Kautz:

### One Path Enabled by AI

1. Robot companions for elderly
2. Robot caretakers for children
3. Poorly socialized adults prefer robots to other humans
4. Widespread preference for robot over human life partners
5. Human race heads towards voluntary extinction
6. Rest of biosphere recovers from destruction wrought by human species

cf. movie "Her": <http://www.imdb.com/title/tt1798709/>



## Summary of Contents

I	Artificial Intelligence	1
1	Introduction .....	32
2	Intelligent Agents .....	
II	Problem-solving	
3	Solving Problems by Searching .....	59
4	Informed Search and Exploration .....	94
5	Constraint Satisfaction Problems .....	137
6	Adversarial Search .....	161
III	Knowledge and reasoning	
7	Logical Agents .....	194
8	First-Order Logic .....	240
9	Inference in First-Order Logic .....	272
10	Knowledge Representation .....	320
IV	Planning	
11	Planning .....	375
12	Planning and Acting in the Real World .....	417
V	Uncertain knowledge and reasoning	
13	Uncertainty .....	462
14	Probabilistic Reasoning .....	492
15	Probabilistic Reasoning over Time .....	537
16	Making Simple Decisions .....	584
17	Making Complex Decisions .....	613
VI	Learning	
18	Learning from Observations .....	649
19	Knowledge in Learning .....	678
20	Statistical Learning Methods .....	712
21	Reinforcement Learning .....	763
VII	Communicating, perceiving, and acting	
22	Communication .....	790
23	Probabilistic Language Processing .....	834
24	Perception .....	863
25	Robotics .....	901
VIII	Conclusions	
26	Philosophical Foundations .....	947
27	AI: Present and Future .....	968
A	Mathematical background .....	977
B	Notes on Languages and Algorithms .....	984
	Bibliography .....	987
	Index .....	1045



Inhaltsverzeichnis	
1 Wissenrepräsentation und Logik	3
1.1 Wissenrepräsentation und Logik – Eine Einführung . . . . .	3
1.1.1 Einleitung . . . . .	3
1.1.2 Modellierung . . . . .	4
1.1.3 Die Entwicklung eines Modells . . . . .	12
1.1.4 Repräsentationsformalismen, Inferenzalgorithmen, und Berechenbarkeiteigenschaften . . . . .	23
1.1.5 Systeme . . . . .	39
1.2 Nichtmonotonen Schließen . . . . .	55
1.2.1 Einführung . . . . .	55
1.2.2 Formalisierungen nichtmonotonen Schließens . . . . .	60
1.2.3 Default-Schließen als Behandlung von Inkonsistenz . . . . .	71
1.2.4 Wie läßt sich nichtmonotonen Schließen implementieren? . . . . .	78
1.3 Qualitatives und modellbasiertes Schließen . . . . .	86
1.3.1 Motivation . . . . .	86
1.3.2 Die Ursprünge . . . . .	90
1.3.3 Plädoyer für eine zweite Generation wissensbasierten Systems . . . . .	91
1.3.4 Die Quintessenz des qualitativen Schließens über physikalische Größen . . . . .	93
1.3.5 Von der Struktur zum Verhalten – ENVISION . . . . .	96
1.3.6 Kausalität – QPT . . . . .	100
1.3.7 „Qualitativer Kalkül“ – QSIM . . . . .	105
1.3.8 Schließen über Größenordnungen . . . . .	112
1.3.9 Anwendung in der modellbasierten Diagnose . . . . .	115
1.3.10 Erreichtes und Forschungsthemen . . . . .	122
1.4 Wissen über Raum und Zeit . . . . .	139
1.4.1 Raum, Zeit und Situationen in der KI und ihren Nachbardisziplinen . . . . .	139

INHALTSVERZEICHNIS	
1.4.2 Zeit und Situationen . . . . .	144
1.4.3 Raum . . . . .	170
1.4.4 Gemeinsame Aspekte von Raum- und Zeitwissen . . . . .	197
<b>2 Automatisches Beweisen</b> . . . . .	<b>205</b>
2.1 Vorwort . . . . .	205
2.2 Grundlagen . . . . .	206
2.2.1 Die Sprache Föder Prädikatenlogik . . . . .	206
2.2.2 Semantik von F . . . . .	208
2.2.3 Beweiskalküle . . . . .	209
2.2.4 Aufzählungsverfahren und Grenzen des formalen Schließens . . . . .	211
2.2.5 Kalküle für automatisches Beweisen . . . . .	212
2.3 Der Resolutionskalkül . . . . .	214
2.3.1 Die Klauselsprache L . . . . .	214
2.3.2 Substitutionen und Unifikation . . . . .	215
2.3.3 Resolventen und Faktoren . . . . .	217
2.3.4 Vorteile des Resolutionskalküls . . . . .	219
2.3.5 Pränexe Normalform und Skolemisierung . . . . .	220
2.4 Implementierung eines Resolutionsbeweisers . . . . .	222
2.4.1 Der Unifikationsalgorithmus . . . . .	223
2.4.2 Der Widerlegungsalgorithmus . . . . .	225
2.4.3 Löschregeln und Ableitungsstrategien . . . . .	228
2.4.4 Wirkung von Ableitungsstrategien . . . . .	234
2.4.5 Berechnung von Klauselmengen . . . . .	238
2.4.6 Der Beweisalgorithmus . . . . .	239
2.4.7 Klauselgraphen . . . . .	242
Literatur Automatisches Beweisen . . . . .	245
<b>3 Maschinelles Lernen</b> . . . . .	<b>247</b>
3.1 Was ist Lernen? . . . . .	248
3.2 Drei Motivationen für das maschinelle Lernen . . . . .	249
3.2.1 Menschliches und maschinelles Lernen . . . . .	250
3.2.2 Induktion und Abstruktion . . . . .	255
3.2.3 Anwendungen maschinelles Lernens . . . . .	256
INHALTSVERZEICHNIS	
3.3 Lernen als Suche . . . . .	258
3.4 Zwei induktive Lernverfahren . . . . .	263
3.4.1 ID3 . . . . .	263
3.4.2 Conceptual Clustering . . . . .	266
3.5 Deduktives Lernen . . . . .	274
3.6 Logik-orientiertes induktives Lernen . . . . .	277
3.6.1 Lernen in Prädikatenlogik . . . . .	277
3.6.2 Induktion als inverse Resolution . . . . .	285
3.7 Lernen als nicht-monotoner Schluß . . . . .	286
3.8 Theorie des Lernbaums . . . . .	288
3.8.1 Identifikation im Grenzwert . . . . .	289
3.8.2 Wahrscheinlich annähernd korrektes Lernen . . . . .	295
<b>4 Kognition</b> . . . . .	<b>303</b>
4.1 Einleitung . . . . .	303
4.1.1 Grundlegende Annahmen der Kognitionsforschung . . . . .	304
4.1.2 Philosophische Grundlagen . . . . .	305
4.1.3 Zur Methodologie der Kognitionswissenschaft . . . . .	307
4.2 Kognition als Informationsverarbeitung . . . . .	311
4.2.1 Die Architektur menschlicher Kognition . . . . .	311
4.2.2 Aufmerksamkeit und Handlungskontrolle . . . . .	313
4.2.3 Charakteristika menschlicher Informationsverarbeitung . . . . .	316
4.2.4 Exkurs: Theoretische Ansätze der Psychologie im Vergleich . . . . .	317
4.3 Denken und Problemlösen . . . . .	318
4.3.1 Begriffe und Kategorien . . . . .	319
4.3.2 Schlüsse: Der Spezialfall der Deduktion . . . . .	321
4.3.3 Induktion, Generalisierung und Analogiebildung . . . . .	323
4.3.4 Problemlösen als heuristische Suche . . . . .	324
4.4 Wissen und Expertise . . . . .	326
4.4.1 Problemlösen als Anwendung spezifischen Wissens . . . . .	326
4.4.2 Expertise . . . . .	327
4.4.3 Wissendiagnose und Knowledge Engineering . . . . .	328
4.5 Wissensrepräsentation . . . . .	329
4.5.1 Begriffliche Repräsentation . . . . .	330
4.5.2 Repräsentation von Ereignissen und Texten: Propositionen und Szenarien . . . . .	334

4.5.3 Bildhafe (analoge) Repräsentationen . . . . .	337
4.6 Lernen und kognitive Entwicklung . . . . .	339
4.6.1 Psychologische Lerntheorien . . . . .	340
4.6.2 Wissenserwerb . . . . .	340
4.6.3 Theorien kognitiver Entwicklung . . . . .	341
4.7 Sprachverarbeitungen als Informationsverarbeitung . . . . .	342
4.7.1 Der kognitionswissenschaftliche Zugang zur Sprache . . . . .	342
4.7.2 Syntax, Weltwissen und Diskurs . . . . .	344
4.7.3 Der Aufbau semantischer Repräsentationen beim Textverständnis . . . . .	350
4.7.4 Schlussbemerkungen zur Sprachverarbeitung . . . . .	352
<b>5 Sprachverarbeitung</b> . . . . .	<b>367</b>
5.1 Einleitung und Überblick . . . . .	367
5.1.1 Literaturverweise . . . . .	367
5.1.2 Sichtweisen des Forschungsgebietes . . . . .	368
5.1.3 Die Einordnung der vorliegenden Beiträge . . . . .	370
5.2 Beschreibungsformalismen für sprachliches Wissen . . . . .	372
5.2.1 Einleitung . . . . .	372
5.2.2 Methodologische Überlegungen . . . . .	373
5.2.3 Grundbausteine eines Beschreibungsformalismus . . . . .	384
5.2.4 Grammatikformalismen . . . . .	385
5.2.5 Annotierte Grammatikformalismen . . . . .	389
5.2.6 Merkmalsstrukturen . . . . .	392
5.2.7 Semantik von Merkmalsstrukturen . . . . .	402
5.2.8 Erweiterte Ausdrucksmittel . . . . .	409
5.2.9 Schlussbemerkung . . . . .	418
5.3 Semantik . . . . .	425
5.3.1 Einleitung . . . . .	425
5.3.2 Der Semantikformalismus der Montague-Grammatik . . . . .	442
5.3.3 Diskursrepräsentationstheorie . . . . .	462
5.3.4 Alternative Theorien und weiterführende Fragen . . . . .	479
5.4 Generierung natürlicher Sprache . . . . .	499
5.4.1 Einleitung . . . . .	499
5.4.2 Ein Modell menschlicher Sprachproduktion . . . . .	505
5.4.3 Planungs- und Entscheidungsprozesse . . . . .	517

5.4.4 Generierung mit modernen Grammatikformalismen . . . . .	537
<b>6 Bildverstehen</b> . . . . .	<b>539</b>
6.1 Bildverstehen - ein Überblick . . . . .	539
6.1.1 Einführung . . . . .	539
6.1.2 Entwicklung des Fachgebietes . . . . .	560
6.1.3 Ziele und konzeptueller Rahmen . . . . .	565
6.1.4 Vor-Rohbildern zu erkannten Objekten . . . . .	571
6.1.5 Höhere Bilddeutung . . . . .	577
6.2 Modelle der frühen visuellen Informationsverarbeitung . . . . .	588
6.2.1 Einführung und Einordnung . . . . .	589
6.2.2 Relevante Wurzeln der Wahrnehmungsforschung . . . . .	594
6.2.3 Kognitivismus à la Marr und die These der Tiefenrekonstruktion . . . . .	601
6.2.4 Intrinsische Bilder, Parameternetze und konnektionistische Modellbildung . . . . .	633
6.2.5 Neo-Gestaltsimismus und die These der Raumintenzenz . . . . .	642
6.2.6 Aktives Sehen: Das neue Paradigma . . . . .	652
6.2.7 Emergentismus und interdisziplinäre Modellbildung . . . . .	657
6.2.8 Resümee . . . . .	667
6.3 Geometrische Szenerienrekonstruktion . . . . .	681
6.3.1 Einleitung . . . . .	681
6.3.2 Das Problem der Szenerienrekonstruktion . . . . .	683
6.3.3 Tiefenrekonstruktion mittels Korrespondenzanalyse . . . . .	685
6.3.4 Geometrische Einschränkungen aus der Bildentstehung . . . . .	688
6.3.5 Die Ausnutzung von Objekteigenschaften . . . . .	701
6.3.6 Zusammenfassung . . . . .	707
<b>7 Expertensysteme, Planen und Problemlösen</b> . . . . .	<b>713</b>
7.1 Expertensysteme und Wissensmodellierung . . . . .	714
7.1.1 Expertensysteme und Expertenwissen . . . . .	714
7.1.2 Wissensrepräsentationen und Ableitungsstrategien . . . . .	723
7.1.3 Wissensmodellierung . . . . .	730
7.1.4 Problemlösungsmethoden in Expertensystemen . . . . .	743
7.1.5 Entwicklung von Expertensystemen . . . . .	753
7.1.6 Resümee . . . . .	763

	INHALTSVERZEICHNIS	
wi		
7.2 Planen und Konfigurieren . . . . .	767	
7.2.1 Einführung . . . . .	767	
7.2.2 Konfigurieren . . . . .	772	
7.2.3 Planen . . . . .	788	
7.2.4 Schlussbetrachtung . . . . .	813	
Literatur: Expertensysteme, Planen und Problemlösen . . . . .	814	
8 Neuronale Netze . . . . .	829	
8.1 Motivation . . . . .	829	
8.2 Natürliche neuronale Netze . . . . .	831	
8.2.1 Das Nervensystem besteht aus diskreten Zellen . . . . .	832	
8.2.2 Nervenzellen sind erregbar . . . . .	833	
8.2.3 Synaptische Übertragung . . . . .	833	
8.2.4 Lernen und synaptische Plastizität . . . . .	836	
8.2.5 Rezipitive Felder . . . . .	838	
8.2.6 Neuroanatomie des visuellen Systems . . . . .	840	
8.3 Künstliche neuronale Netze . . . . .	841	
8.3.1 Elemente neuronaler Netze . . . . .	842	
8.3.2 Erregungsdynamik . . . . .	843	
8.3.3 Grundtypen von neuronalen Netzen . . . . .	846	
8.3.4 Gewichtsdynamik . . . . .	852	
8.3.5 Überwachtes Lernen als Fehlerminimierung . . . . .	853	
8.3.6 Lernen als Hauptachsentransformation . . . . .	856	
8.4 Anwendungsbeispiele . . . . .	859	
8.4.1 Mustererkennung . . . . .	860	
8.4.2 Adaptive Regelung . . . . .	862	
8.4.3 Assoziativspeicher . . . . .	864	
8.4.4 Selbstorganisation . . . . .	867	
8.4.5 Kombinatorische Optimierung . . . . .	870	
8.5 Visuelle Informationsverarbeitung . . . . .	873	
8.5.1 Stereopsis und Erregungsdynamik auf funktionellen Karten . . . . .	874	
8.5.2 Ortsvariante Bildverarbeitung . . . . .	875	
8.6 Schlussbemerkung . . . . .	877	
8.7 Weiterführende Literatur . . . . .	878	
	INHALTSVERZEICHNIS	
		vii
9 KI-Programmierung . . . . .	883	
9.1 Grundlagen der KI-Programmierung . . . . .	883	
9.1.1 Was ist KI-Programmierung? . . . . .	883	
9.1.2 Grundelemente der Programmiersprache LISP . . . . .	886	
9.1.3 Grundelemente der Programmiersprache Prolog . . . . .	896	
9.1.4 Programmierung in Scheme . . . . .	908	
9.1.5 Programmieren in Prolog . . . . .	928	
9.1.6 Suche als Verarbeitungsmodell . . . . .	944	
9.1.7 Ein konkretes Suchproblem: das „Eight-Puzzle“ . . . . .	952	
9.1.8 Ergo . . . . .	958	
9.2 Fortgeschritten KI-Programmierung . . . . .	959	
9.2.1 Kontrollabstraktion in LISP . . . . .	960	
9.2.2 Kontrolle in PROLOG . . . . .	978	
9.2.3 Ströme und Programmierung mit Strömen in LISP . . . . .	988	
9.2.4 Ströme in PROLOG . . . . .	1013	
9.2.5 Der Blick zurück . . . . .	1031	
Liste der Autoren . . . . .	1036	
Index . . . . .	1037	



Inhaltsverzeichnis	
Vorwort	13
Einleitung	13
Neuerungen dieser Auflage	15
Inhalt	16
Verwendung dieses Buches	18
Über das Internet verfügbare ergänzende Materialien	19
Danksagung	20
Teil I Künstliche Intelligenz: Ursprünge und Anwendungsbereiche 21	
1 KI: Geschichte und Anwendungen	25
1.1 Von Eden bis ENIAC: Haltungen gegenüber Intelligenz, Wissen und menschlicher Kreativität	25
1.2 Überblick über KI-Anwendungsbereiche	39
1.3 Künstliche Intelligenz – eine Zusammenfassung	50
1.4 Epilog und Literaturhinweise	51
Übungen	53
Teil II Repräsentations- und Suchverfahren der Künstlichen Intelligenz 55	
2 Die Prädikatenlogik	71
2.0 Einführung	71
2.1 Die Aussagenlogik	71
2.2 Die Prädikatenlogik	75
2.3 Mit Hilfe von Schlussregeln prädikatenlogische Ausdrücke bilden	87
2.4 Anwendung: ein auf Logik basierender Finanzberater	97
2.5 Epilog und Literaturhinweise	101
Übungen	102
3 Strukturen und Strategien der Zustandsraumsuche	105
3.0 Einführung	105
3.1 Graphentheorie	108
3.2 Strategien der Zustandsraumsuche	117
3.3 Repräsentation des prädikatenlogischen Schließen mit Hilfe von Zustandsräumen	130

Inhaltsverzeichnis	
3.4 Epilog und Literaturhinweise Übungen	144 145
<b>4 Heuristische Suche</b>	<b>147</b>
4.0 Einführung	147
4.1 Ein Algorithmus zur heuristischen Suche	151
4.2 Häufigkeit, Monotonie und Informiertheit	163
4.3 Einsatz von Heuristiken in Spielen	168
4.4 Fragen der Komplexität	177
4.5 Epilog und Literaturhinweise Übungen	180 181
<b>5 Steuerung und Implementierung der Zustandsraumsuche</b>	<b>185</b>
5.0 Einführung	185
5.1 Auf Rekursion basierende Suchverfahren	186
5.2 Musterorientierte Suche	190
5.3 Produktionsysteme	197
5.4 Die Blackboard-Architektur für Problemlösungsverfahren	213
5.5 Epilog und Literaturhinweise Übungen	215 216
<b>Teil III Repräsentation und Intelligenz – die KI-Herausforderung</b>	<b>219</b>
<b>6 Wissensrepräsentation</b>	<b>225</b>
6.0 Probleme der Wissensrepräsentation	225
6.1 Kurzer Überblick über Repräsentationsmodelle der KI	226
6.2 Konzeptgraphen: eine Netzwerksprache	247
6.3 Alternativen zur expliziten Repräsentation	258
6.4 Agentenbasiertes und verteiltes Problemlösen	265
6.5 Epilog und Literaturhinweise Übungen	271 274
<b>7 „Starke“ Problemlösungsmethoden</b>	<b>279</b>
7.0 Einführung	279
7.1 Überblick über die Expertensystemtechnologie	281
7.2 Regelsortierte Expertensysteme	289
7.3 Modellbasierte, fallbasierte und hybride Systeme	301
7.4 Planung	319
7.5 Epilog und Literaturhinweise Übungen	334 336
<b>8 Schließen in unsicheren Situationen</b>	<b>339</b>
8.0 Einführung	339
8.1 Logikbasiertes abduktives Schließen	341
8.2 Abduktion: Alternativen zur Logik	356
8.3 Der stochastische Ansatz zur Unsicherheit	370
8.4 Epilog und Literaturhinweise Übungen	382 384
Inhaltsverzeichnis	
<b>Teil IV Maschinelles Lernen</b>	<b>387</b>
<b>9 Maschinelles Lernen: symbolbasiert</b>	<b>391</b>
9.0 Einführung	391
9.1 Ein Rahmen für symbolbasiertes Lernen	394
9.2 Version-Space-Suche	400
9.3 Der ID3-Algorithmus zur Decision Tree Induction	413
9.4 Induktive Kalibrierung und Erfierbarkeit	422
9.5 Wissen und Lernen	427
9.6 Unüberwachtes Lernen	437
9.7 Reinforcement-Lernen	447
9.8 Epilog und Literaturhinweise Übungen	454 455
<b>10 Maschinelles Lernen: konnektionistisch</b>	<b>459</b>
10.0 Einführung	459
10.1 Grundlagen konnektionistischer Netze	461
10.2 Perceptron-Lernverfahren	464
10.3 Backpropagation-Lernverfahren	474
10.4 Wettbewerbslernen	480
10.5 Hebbisches Koinzidenzlernen	488
10.6 Attraktormetze	498
10.7 Epilog und Literaturhinweise Übungen	508 509
<b>11 Maschinelles Lernen: sozial und emergent</b>	<b>511</b>
11.0 Soziale und emergente Lernmodelle	511
11.1 Der genetische Algorithmus	513
11.2 Klassifikationssysteme und genetische Programmierung	523
11.3 Künstliche Lebensformen und soziales Lernen	535
11.4 Epilog und Literaturhinweise Übungen	546 547
<b>Teil V Fortgeschritten KI-Problemlösungen</b>	<b>549</b>
<b>12 Automatisches Schließen</b>	<b>553</b>
12.0 Einführung zu den schwachen Theorembeweismethoden	553
12.1 General Problem Solver und Differenztabellen	554
12.2 Resolution	560
12.3 PROLOG und automatisches Schließen	578
12.4 Weitere Themen des automatischen Schließens	584
12.5 Epilog und Literaturhinweise Übungen	591 592
<b>13 Natürlichsprachliche Systeme</b>	<b>595</b>
13.0 Das Problem der Interpretation natürlicher Sprache	595
13.1 Sprachdekomposition: eine symbolische Analyse	598
13.2 Syntax	601

Inhaltsverzeichnis	
13.3 Verarbeitung von Syntax und Wissen mit ATN-Parsern	611
13.4 Stochastische Verfahren bei der Sprachanalyse	620
13.5 Anwendungen zur Verarbeitung natürlicher Sprache	628
13.6 Epilog und Literaturhinweise	635
Übungen	637
<b>Teil VI Programmiersprachen und -techniken der Künstlichen Intelligenz</b>	<b>641</b>
<b>14 Einführung in Prolog</b>	<b>649</b>
14.0 Einführung	649
14.1 Syntax der prädikatenlogischen Programmierung	650
14.2 Abstrakte Datentypen (ADTs) in PROLOG	661
14.3 Ein Beispiel für ein Produktionsystem in PROLOG	665
14.4 Alternative Suchstrategien entwerfen	670
14.5 Ein PROLOG-Planer	675
14.6 Meta-Prädikate, Typen und Unifikation	678
14.7 Meta-Interpreter in PROLOG	685
14.8 Lemmalgorithmen in PROLOG	701
14.9 Die Verarbeitung natürlicher Sprache in PROLOG	710
14.10 Epilog und Literaturhinweise	717
Übungen	720
<b>15 Eine Einführung in LISP</b>	<b>725</b>
15.0 Einführung	725
15.1 LISP – ein Überblick	726
15.2 Die Suche in LISP; ein funktionaler Ansatz für das Problem des Bauern, des Wolfs, der Ziege und des Kohls	747
15.3 Funktionen höherer Ordnung und prozedurale Abstraktion	752
15.4 Suchstrategien in LISP	755
15.5 Mustervergleich in LISP	759
15.6 Eine rekursive Unifikationsfunktion	761
15.7 Interpreter und eingesetzte Sprachen	765
15.8 Logische Programmierung in LISP	767
15.9 Streams und verzögerte Auswertung	776
15.10 Eine Expertensystem-Shell in LISP	780
15.11 Semantische Netze und Vererbung in LISP	786
15.12 Objektorientierte Programmierung mit CLOS	790
15.13 Lernen in LISP; der ID3-Algorithmus	801
15.14 Epilog und Literaturhinweise	812
Übungen	813
Inhaltsverzeichnis	
<b>Teil VII Epilog</b>	<b>817</b>
<b>16 Künstliche Intelligenz als empirische Forschung</b>	<b>821</b>
16.0 Einführung	821
16.1 Künstliche Intelligenz: Neudeinition	823
16.2 Die Wissenschaft der intelligenten Systeme	834
16.3 KI: Aktuelle Probleme und Entwicklungen in der Zukunft	845
16.4 Epilog und Literaturhinweise	850
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>851</b>
<b>Autorenregister</b>	<b>877</b>
<b>Sachregister</b>	<b>881</b>
<b>Bild- und Textnachweise</b>	<b>891</b>



1. Automated Theorem Proving
2. Propositional Logic
3. First-order Logic
4. Working with Automated Theorem Provers
5. Prolog
6. Non-classical Logics (Modal Logics, Description Logics, etc.)
7. Ontologies
8. Example of an AI Research Project (own involvement):  
Natural Language Tutorial Dialog on Mathematical Proofs
9. Example of an Expert System: IBM Watson

## The plan (later when Raul Rojas takes over):

1. Building an Expert System in Prolog
2. Uncertainty
3. Search
4. ....

- ▶ Logic and Theorem Proving: Motivation and History
- ▶ What is ATP?
- ▶ Overview of ATP
- ▶ Logical Consequence

Thanks to Geoff Sutcliffe!

- ▶ The Language
- ▶ Logical Consequence by Truth Tables
- ▶ Clause Normal Form (see also here)
- ▶ Propositional Hornlogic and SLD-Resolution
- ▶ The DPLL Algorithm (Sutcliffe)
- ▶ The DPLL Algorithm (alternative introduction by Otten)

Thanks to Geoff Sutcliffe and Jens Otten!

- ▶ The Language and Logical Consequence
- ▶ Clause Normal Form
- ▶ Herbrand Interpretations
- ▶ Resolution
- ▶ Unification
- ▶ The Saturation Procedure
- ▶ The ANL loop

Thanks to Geoff Sutcliffe

- ▶ The ATP Process
- ▶ TPTP Quick Guide
- ▶ TPTP World Online

Thanks to Geoff Sutcliffe!

- ▶ Linear Input Resolution
- ▶ Introduction
- ▶ Data
- ▶ Control
- ▶ Meta-programming

Thanks to Geoff Sutcliffe!

Online Tutorial: <http://learnprolognow.org>

- ▶ Modal Logic: Motivation and History
- ▶ Modal Logic: Syntax and Semantics
- ▶ Modal Logic: Wise Men Puzzle
- ▶ Propositional Logic ATP: Resolution Method and Tableau Method
- ▶ Propositional Modal Logic ATP: Tableau Method

## CYC ontology

<https://www.youtube.com/watch?v=KNWsGq9p9fU>

## SUMO ontology and Sigma tool

<http://christoph-benzmueller.de/papers/2010-ECAI-IKBET.pdf>

<http://christoph-benzmueller.de/papers/2010-ECAI-ARCOE-16-8.pdf>

<http://christoph-benzmueller.de/papers/2010-ECAI-ARCOE-17-8.pdf>

Natural Language Tutorial Dialog on Mathematical Proofs

<http://christoph-benzmueller.de/papers/2005-AAAI.pdf>

<http://christoph-benzmueller.de/papers/2006-ringvorlesung.pdf>

Movie: ... DVD ...

Slides: <http://christoph-benzmueller.de/papers/2013-Watson.pdf>