

# Artificial Intelligence

Christoph Benz Müller and Raul Rojas

Freie Universität Berlin

Block Lecture, SS 2014

# Artificial Intelligence



#### SCIENCE NEWS

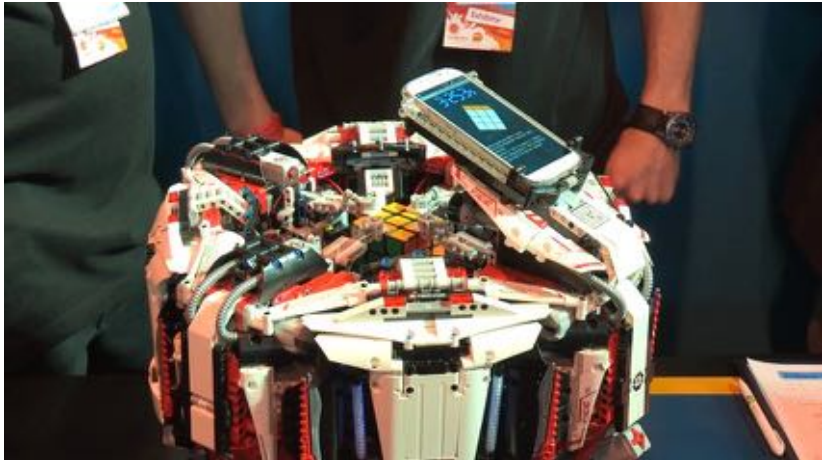
[HOME / SCIENCE NEWS / RESEARCHERS SAY THEY USED MACBOOK TO PROVE GOEDEL'S GOD THEOREM](#)

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.

- ▶ “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)

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`
- ▶ ... 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?

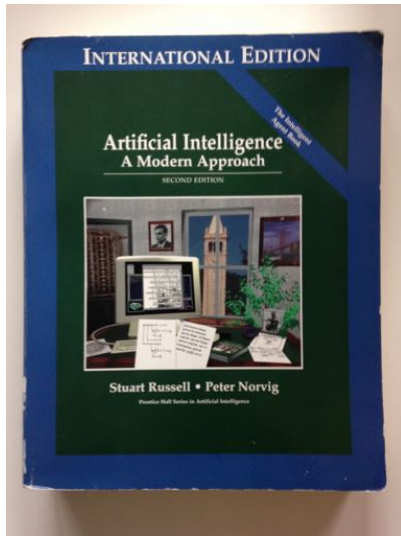
<http://joanna-bryson.blogspot.de/2013/08/ijcai-2013-panel-future-of-ai-what-if.html>

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

<b>I Artificial Intelligence</b>	<b>1</b>
1 Introduction	32
2 Intelligent Agents	84
<b>II Problem-solving</b>	<b>59</b>
3 Solving Problems by Searching	137
4 Informed Search and Exploration	161
5 Constraint Satisfaction Problems	194
6 Adversarial Search	240
<b>III Knowledge and reasoning</b>	<b>272</b>
7 Logical Agents	320
8 First-Order Logic	375
9 Inference in First-Order Logic	417
10 Knowledge Representation	462
<b>IV Planning</b>	<b>492</b>
11 Planning	537
12 Planning and Acting in the Real World	584
<b>V Uncertain knowledge and reasoning</b>	<b>613</b>
13 Uncertainty	649
14 Probabilistic Reasoning	678
15 Probabilistic Reasoning over Time	712
16 Making Simple Decisions	763
17 Making Complex Decisions	790
<b>VI Learning</b>	<b>834</b>
18 Learning from Observations	863
19 Knowledge in Learning	901
20 Statistical Learning Methods	947
21 Reinforcement Learning	968
<b>VII Communicating, perceiving, and acting</b>	<b>977</b>
22 Communication	984
23 Probabilistic Language Processing	987
24 Perception	1045
25 Robotics	
<b>VIII Conclusions</b>	
26 Philosophical Foundations	
27 AI: Present and Future	
A Mathematical background	
B Notes on Languages and Algorithms	
<b>Bibliography</b>	
<b>Index</b>	



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Wissensrepräsentation und Logik</b>	<b>3</b>
1.1 Wissensrepräsentation 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 Berechenbarkeitseigenschaften	23
1.1.5 Systeme	39
1.2 Nichtmonotones 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 nichtmonotones 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 wissensbasierter Systeme	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 Erreichte 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		INHALTSVERZEICHNIS	
1.2 Zeit und Situationen	144	3.5 Lernen als Suche	204
1.3 Raum	170	3.6 Zwei induktive Lernverfahren	204
1.4 Gemeinsame Superset von Raum- und Zeitwissen	187	3.6.1 ID3	204
2 Automatisches Beweisen	206	3.6.2 Conceptual Clustering	204
2.1 Warum	205	3.5 Deduktives Lernen	214
2.2 Grundlagen	206	3.6 Logik-orientiertes induktives Lernen	217
2.2.1 Die Sprache <i>P</i> für Prädikatenlogik	206	3.6.1 Lernen in Prädikatenlogik	217
2.2.2 Semantik von <i>F</i>	206	3.6.2 Induktion als inverse Resolution	205
2.2.3 Beweisbarkeit	209	3.7 Lernen als nicht-umfassende Suche	204
2.2.4 Aufzählungsverfahren und Grenzen des formalen Schließens	211	3.8 Theorie des Lernens	204
2.2.5 Kalküle für automatisches Beweisen	212	3.8.1 Identifikation im Grenzwert	204
2.3 Der Resolutionalkalkül	214	3.8.2 Wahrscheinlich annähernd korrektes Lernen	205
2.3.1 Die Klassensprache <i>C</i>	214	4 Kognition	202
2.3.2 Substitutionen und Unifikation	215	4.1 Einleitung	202
2.3.3 Resolventen und Faktoren	217	4.1.1 Grundlegende Annahmen der Kognitionsforschung	204
2.3.4 Vorteile des Resolutionalkalküls	219	4.1.2 Philosophische Grundlagen	205
2.3.5 Präzise Normalform und Skolemisierung	220	4.1.3 Zur Methodologie der Kognitionswissenschaft	207
2.4 Implementierung eines Resolutionalewiesens	222	4.2 Kognition als Informationsverarbeitung	211
2.4.1 Der Unifikationsalgorithmus	223	4.2.1 Die Architektur menschlicher Kognition	211
2.4.2 Der Widerlegungsalgorithmus	225	4.2.2 Aufmerksamkeits- und Handlungssteuerung	213
2.4.3 Lösungs- und Ableitungsstrategien	228	4.2.3 Charakteristika menschlicher Informationsverarbeitung	218
2.4.4 Wirkung von Ableitungsstrategien	234	4.2.4 Exkurs: Theoretische Ansätze der Psychologie im Vergleich	217
2.4.5 Berechnung von Klausuren	238	4.3 Denken und Problemlösen	219
2.4.6 Der Beweisalgorithmus	239	4.3.1 Begriffe und Kategorien	219
2.4.7 Klausurgraphen	242	4.3.2 Schlüsse: Der Spezialfall der Deduktion	221
Literatur Automatisches Beweisen	245	4.3.3 Induktion, Generalisierung und Analogiebildung	223
3 Menschliches Lernen	247	4.3.4 Problemlösen als kognitive Suche	224
3.1 Was ist Lernen?	248	4.4 Wissen und Expertise	226
3.2 Drei Motivationen für das menschliche Lernen	249	4.4.1 Problemlösen als Anwendung spezifischen Wissens	226
3.2.1 Menschliches und künstliches Lernen	250	4.4.2 Expertise	227
3.2.2 Induktion und Abduktion	250	4.4.3 Wissenslogiken und Knowledge Engineering	228
3.2.3 Annahmen menschlichen Lernens	250	4.5 Wissensrepräsentation	228
		4.5.1 Begriffliche Repräsentation	228
		4.5.2 Repräsentation von Ereignissen und Szenen: Propositionen und Skizzen	229

INHALTSVERZEICHNIS	INHALTSVERZEICHNIS
<p>4.2.2. Mittelsche (ausgeglichene) Repräsentationen ..... 337</p> <p>4.6. Lernen und kognitive Entwicklung ..... 339</p> <p>4.6.1. Psychologische Lerntheorien ..... 340</p> <p>4.6.2. Wissenswerb ..... 340</p> <p>4.6.3. Theorien kognitiver Entwicklung ..... 341</p> <p>4.7. Sprachverstehen als Informationsverarbeitung ..... 342</p> <p>4.7.1. Der kognitionswissenschaftlich Zugang zur Sprache ..... 342</p> <p>4.7.2. Syntax, Semantik und Diskurs ..... 344</p> <p>4.7.3. Der Aufbau semantischer Repräsentationen beim Textverstehen ..... 350</p> <p>4.7.4. Schlussfolgerungen zur Sprachverarbeitung ..... 352</p>	<p>5.4.4. Generierung mit modernen Grammatikformalismen ..... 337</p>
<p><b>5. Sprachverarbeitung ..... 367</b></p>	<p><b>4. Bildverstehen ..... 359</b></p>
<p>5.1. Einleitung und Überblick ..... 367</p> <p>5.1.1. Literaturverweise ..... 367</p> <p>5.1.2. Sichtweisen des Forschungsgebiets ..... 368</p> <p>5.1.3. Die Einordnung der vorliegenden Beiträge ..... 370</p> <p>5.2. Beschreibungsalgorithmen für sprachliches Wissen ..... 372</p> <p>5.2.1. Einleitung ..... 372</p> <p>5.2.2. Methodologische Überlegungen ..... 373</p> <p>5.2.3. Grundbausteine eines Beschreibungsalgorithmus ..... 384</p> <p>5.2.4. Grammatikformalismen ..... 385</p> <p>5.2.5. Annotierte Grammatikformalismen ..... 389</p> <p>5.2.6. Merkmalsstrukturen ..... 392</p> <p>5.2.7. Semantik von Merkmalsstrukturen ..... 403</p> <p>5.2.8. Erweiterte Ausdrucksmittel ..... 409</p> <p>5.2.9. Schlussbemerkung ..... 418</p>	<p>4.1. Bildverstehen – ein Überblick ..... 359</p> <p>4.1.1. Einführung ..... 359</p> <p>4.1.2. Entwicklung des Fachgebietes ..... 360</p> <p>4.1.3. Ziele und konzeptionelle Rahmen ..... 363</p> <p>4.1.4. Von Rohbildern zu erklärten Objekten ..... 371</p> <p>4.1.5. Höhere Bildverarbeitung ..... 377</p> <p>4.2. Modelle der frühen visuellen Informationsverarbeitung ..... 385</p> <p>4.2.1. Einführung und Einordnung ..... 386</p> <p>4.2.2. Bekannte Wurzeln der Wahrnehmungsforschung ..... 389</p> <p>4.2.3. Kognitivismus à la Marr und die These der Tiefenrekonstruktion ..... 401</p> <p>4.2.4. Intrinsische Bilder, Parametermetrische und konnektionistische Modellbildung ..... 433</p> <p>4.2.5. Neo-Geometrie und die These der Raumdeformierung ..... 437</p> <p>4.2.6. Aktive Sehen: Das neue Paradigma ..... 452</p> <p>4.2.7. Emergenzismus und interdisziplinäre Modellbildung ..... 457</p> <p>4.2.8. Resumé ..... 467</p> <p>4.3. Geometrische Szenenrekonstruktion ..... 481</p> <p>4.3.1. Einleitung ..... 481</p> <p>4.3.2. Das Problem der Szenenrekonstruktion ..... 483</p> <p>4.3.3. Tiefenrekonstruktion mittels Korrespondenzanalyse ..... 485</p> <p>4.3.4. Geometrische Einschränkungen aus der Bildentstehung ..... 488</p> <p>4.3.5. Die Annotierung von Objekteigenschaften ..... 491</p> <p>4.3.6. Zusammenfassung ..... 497</p>
<p>5.3. Semantik ..... 425</p>	<p><b>7. Expertensysteme, Plänen und Problemlösen ..... 713</b></p>
<p>5.3.1. Einleitung ..... 425</p> <p>5.3.2. Der Semantikformalismus der Montague-Grammatik ..... 442</p> <p>5.3.3. Diskursrepräsentationstheorie ..... 462</p> <p>5.3.4. Alternative Theorien und weiterführende Fragen ..... 479</p> <p>5.4. Generierung natürlicher Sprache ..... 489</p> <p>5.4.1. Einleitung ..... 489</p> <p>5.4.2. Ein Modell menschlicher Sprachproduktion ..... 505</p> <p>5.4.3. Planungs- und Entscheidungsprozesse ..... 517</p>	<p>7.1. Expertensysteme und Wissensmodellierung ..... 714</p> <p>7.1.1. Expertensysteme und Expertisen ..... 714</p> <p>7.1.2. Wissensrepräsentationen und Ableitungsstrategien ..... 733</p> <p>7.1.3. Wissensmodellierung ..... 739</p> <p>7.1.4. Problemlösungsmethoden in Expertensystemen ..... 743</p> <p>7.1.5. Entwicklung von Expertensystemen ..... 753</p> <p>7.1.6. Resümee ..... 769</p>

INHALTSVERZEICHNIS		INHALTSVERZEICHNIS	
2.2	Pläne und Konfigurationen	367	
2.2.1	Einführung	367	
2.2.2	Konfigurationen	775	
2.2.3	Pläne	788	
2.2.4	Schlußbemerkung	818	
	Literatur-Ergänzungsskizze, Pläne und Problem lösen	818	
8	Neuronale Netze	829	
8.1	Motivation	839	
8.2	Natürliche neuronale Netze	831	
8.2.1	Das Nervensystem besteht aus diskreten Zellen	832	
8.2.2	Neuronen sind zerlegbar	832	
8.2.3	Synaptische Übertragung	833	
8.2.4	Lernen und synaptische Plastizität	836	
8.2.5	Rezeptive 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	Energiedynamik	843	
8.3.3	Grundtypen von neuronalen Netzen	848	
8.3.4	Gewichtsdynamik	852	
8.3.5	Überwachtes Lernen als Fehlerminimierung	853	
8.3.6	Lernen als Hauptachsendarstellung	856	
8.4	Anwendungsbeispiele	859	
8.4.1	Mustererkennung	862	
8.4.2	Adaptive Regelung	864	
8.4.3	Assoziativspeicher	867	
8.4.4	Self-Organisation	870	
8.4.5	Kombinatorische Optimierung	872	
8.5	Visuelle Informationsverarbeitung	874	
8.5.1	Merkmale und Energiedynamik auf funktionellen Karten	875	
8.5.2	Observierte Bildverarbeitung	877	
8.6	Schlußbemerkung	878	
8.7	Weiterführende Literatur		
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	886	
9.1.4	Programmierung in Scheme	888	
9.1.5	Programmieren in Prolog	888	
9.1.6	Suche als Verarbeitungsmittel	894	
9.1.7	Ein konkretes Subproblem der „Eight-Queen“-	927	
9.1.8	Erge	928	
9.2	Fortgeschrittene KI-Programmierung	899	
9.2.1	Kontrollstrukturen in LISP	900	
9.2.2	Kontrolle in PROLOG	879	
9.2.3	Störere und Programmierung mit Störere in LISP	909	
9.2.4	Störere in PROLOG	1318	
9.2.5	Der Blick zurück	1321	
	Liste der Autoren	1008	
	Index	1021	





<b>Inhaltsverzeichnis</b>	
<b>Vorwort</b>	<b>13</b>
Einleitung	13
Neuerungen dieser Auflage	15
Inhalt	16
Verwendung dieses Buches	18
Über das Internet verfügbare ergänzende Materialien	19
Danksagung	20
<b>Teil I Künstliche Intelligenz: Ursprünge und Anwendungsgebiete</b>	<b>21</b>
<b>1 KI: Geschichte und Anwendungen</b>	<b>25</b>
1.1 Von Eden bis ENIAC: Haltungen gegenüber Intelligenz, Wissen und menschlicher Kunstfertigkeit	25
1.2 Überblick über KI-Anwendungsbereiche	39
1.3 Künstliche Intelligenz – eine Zusammenfassung	50
1.4 Epilog und Literaturhinweise	51
Übungen	53
<b>Teil II Repräsentations- und Suchverfahren der Künstlichen Intelligenz</b>	<b>55</b>
<b>2 Die Prädikatenlogik</b>	<b>71</b>
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
<b>3 Strukturen und Strategien der Zustandsraumsuche</b>	<b>105</b>
3.0 Einführung	105
3.1 Graphentheorie	105
3.2 Strategien der Zustandsraumsuche	108
3.3 Repräsentation des prädikatenlogischen Schließens mit Hilfe von Zustandsräumen	117
	130

Inhaltsverzeichnis		Inhaltsverzeichnis	
3.4	Epilog und Literaturhinweise Übungen	144 145	
<b>4</b>	<b>Neurolische Suche</b>	<b>147</b>	
4.0	Einführung	147	
4.1	Ein Algorithmus zur neurolischen Suche	151	
4.2	Zulässigkeit, Monotonie und Informiertheit	153	
4.3	Einsatz von Heuristiken in Spielen	168	
4.4	Fragen der Komplexität	177	
4.5	Epilog und Literaturhinweise Übungen	180 181	
<b>5</b>	<b>Steuerung und Implementierung der Zustandsraumsuche</b>	<b>185</b>	
5.0	Einführung	185	
5.1	Auf Rekursion basierende Suchverfahren	189	
5.2	Multikriterielle Suche	190	
5.3	Produktionssysteme	197	
5.4	Die Backboard-Architektur für Problemlösungsverfahren	213	
5.5	Epilog und Literaturhinweise Übungen	215 216	
<b>Teil III</b>	<b>Repräsentation und Intelligenz – die KI-Herausforderung</b>	<b>219</b>	
<b>6</b>	<b>Wissensrepräsentation</b>	<b>225</b>	
6.0	Probleme der Wissensrepräsentation	225	
6.1	Kurzer Überblick über Repräsentationsansätze der KI	226	
6.2	Konzeptgraphen: eine Netzwerklogik	247	
6.3	Alternativen zur expliziten Repräsentation	258	
6.4	Agentenbasierte und verteilte Problemlösung	265	
6.5	Epilog und Literaturhinweise Übungen	271 274	
<b>7</b>	<b>„Starke“ Problemlösungsmethoden</b>	<b>279</b>	
7.0	Einführung	279	
7.1	Überblick über die Expertensystemtechnologie	281	
7.2	Regelbasierte Expertensysteme	289	
7.3	Modellbasierte, teilbasierte und hybride Systeme	301	
7.4	Planung	329	
7.5	Epilog und Literaturhinweise Übungen	334 336	
<b>8</b>	<b>Schließen in unsicheren Situationen</b>	<b>339</b>	
8.0	Einführung	339	
8.1	Logikbasiertes abduktives Schließen	341	
8.2	Reduktion: Alternativen zur Logik	356	
8.3	Der stochastische Ansatz zur Unsicherheit	370	
8.4	Epilog und Literaturhinweise Übungen	382 384	
<b>Teil IV</b>	<b>Maschinelles Lernen</b>	<b>393</b>	
<b>9</b>	<b>Maschinelles Lernen: symbolbasiert</b>	<b>393</b>	
9.0	Einführung	393	
9.1	Ein Rahmen für symbolbasiertes Lernen	395	
9.2	Version-Space-Suche	400	
9.3	Der ID3-Algorithmus zur Decision Tree Induktion	413	
9.4	Induktives Maschinelles Lernen und Erklärbarkeit	423	
9.5	Wissen und Lernen	427	
9.6	Unüberwachtes Lernen	437	
9.7	Reinforcement Learning	447	
9.8	Epilog und Literaturhinweise Übungen	454 455	
<b>10</b>	<b>Maschinelles Lernen: konnektionalistisch</b>	<b>459</b>	
10.0	Einführung	459	
10.1	Grundlagen konnektionalistischer Netze	461	
10.2	Perceptron-Lernverfahren	464	
10.3	Backpropagation-Lernverfahren	474	
10.4	Wettbewerbslernen	480	
10.5	Neuronales Faltungsnetzwerk	488	
10.6	Assoziationsnetze	498	
10.7	Epilog und Literaturhinweise Übungen	508 509	
<b>11</b>	<b>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	548 547	
<b>Teil V</b>	<b>Fortsgeschrittene KI-Problemlösungen</b>	<b>549</b>	
<b>12</b>	<b>Automatisches Schließen</b>	<b>553</b>	
12.0	Einführung zu den schwachen Theorembeweismethoden	553	
12.1	General Problem Solver und Differenzentabellen	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</b>	<b>Natürlichsprachliche Systeme</b>	<b>595</b>	
13.0	Das Problem der Interpretation natürlicher Sprache	595	
13.1	Semantische Komposition: eine symbolische Analyse	598	
13.2	Syntax	601	

Inhaltsverzeichnis		Inhaltsverzeichnis	
13.3	Verarbeitung von Syntax und Wissen mit ATN-Partern	511	
13.4	Stochastische Verfahren bei der Sprachanalyse	520	
13.5	Anwendungen zur Verarbeitung natürlicher Sprache	528	
13.6	Epilog und Literaturhinweise	535	
	Übungen	537	
<b>Teil VI: Programmiersprachen und -techniken der Künstlichen Intelligenz</b>		<b>641</b>	
14	<b>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 Produktionssystem 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	Lernalgorithmen in PROLOG	701	
14.9	Die Verarbeitung natürlicher Sprache in PROLOG	710	
14.10	Epilog und Literaturhinweise	717	
	Übungen	720	
15	<b>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 Beweises des Würfels, der Ziege und des Kohls	747	
15.3	Funktionen höherer Ordnung und prädikatenlogische Abstraktion	752	
15.4	Suchstrategien in LISP	755	
15.5	Multienegleichen in LISP	759	
15.6	Eine rekursive Unifikationsfunktion	761	
15.7	Interpreter und eingebettete Sprachen	765	
15.8	Logische Programmierung in LISP	767	
15.9	Logische Programmierung in LISP	776	
15.10	Wissens- und veränderte Auswertung	780	
15.11	Ein Expertensystem Ghesl in LISP	785	
15.12	Semantische Netze und Vererbung in LISP	790	
15.13	Objektorientierte Programmierung mit ELLOS	801	
15.14	Lernen in LISP: der IDS-Algorithmus	812	
	Epilog und Literaturhinweise	813	
	Übungen		
		<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: Neudefinition	823
		16.2 Die Wissenschaft der intelligenten Systeme	824
		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>

- ▶ Automated Theorem Proving
- ▶ Propositional Logic
- ▶ First-order Logic
- ▶ Working with Automated Theorem Provers
- ▶ Prolog
- ▶ Non-classical Logics: Modal Logics
- ▶ Ontologies
- ▶ Example of an AI Research Project (own involvement):  
Natural Language Tutorial Dialog on Mathematical Proofs
- ▶ Example of an Expert System: IBM Watson

- ▶ Building an Expert System in Prolog
- ▶ Uncertainty
- ▶ Search
- ▶ . . .

- ▶ 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>