

Zbigniew A. Styczynski
Krzysztof Rudion
André Naumann

Einführung in Expertensysteme

Grundlagen, Anwendungen
und Beispiele aus der elektrischen
Energieversorgung



Einführung in Expertensysteme

Zbigniew A. Styczynski · Krzysztof Rudion ·
André Naumann

Einführung in Expertensysteme

Grundlagen, Anwendungen und Beispiele
aus der elektrischen Energieversorgung

Zbigniew A. Styczynski
Otto-von-Guericke-Universität
Magdeburg
Deutschland

André Naumann
Fraunhofer IFF
Magdeburg
Deutschland

Krzysztof Rudion
Universität Stuttgart
Stuttgart
Deutschland

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

ISBN 978-3-662-53171-6 ISBN 978-3-662-53172-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-53172-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Intelligente Systeme sind seit Langem schon in vielen Bereichen unseres Lebens „Stand der Technik“. Intelligente Waschmaschinen steuern den Waschvorgang optimal, Autopiloten in Flugzeugen führen Landemanöver durch, autonome Autos fahren durch die Straßen, Sprach- und Schrifterkennungssysteme nutzen künstliche Intelligenz, um uns **die Welt einfacher zu machen**. Dabei bündelt ein **Expertensystem** unterschiedliche **intelligente Techniken** zu einer konkreten Lösung.

Gerade in den letzten Jahren ist eine wachsende Zahl von **Windenergieanlagen** besonders im Norden Deutschlands zu beobachten. Auch besitzen sehr viele Häuser heute eigene **Fotovoltaikanlagen**. Dies sind die sichtbaren Zeichen des Paradigmenwechsels, der sich im Bereich der elektrischen Energiesysteme vollzogen hat und weiterhin vollzieht. Der in Deutschland angestrebte Ausstieg aus Kernenergie und Kohlekraft hat in den letzten 15 Jahren zur Installation von zahlreichen regenerativen Erzeugern geführt. Damit auch weiterhin eine hohe Stabilität des Netzbetriebes gewährleistet werden kann, verlangt es nach dem Einsatz neuer, intelligenter Methoden, z. B. im **Umgang mit der wetterbedingten, volatilen Erzeugung**. Expertensysteme finden in elektrischen Versorgungssystemen bereits eine breite Anwendung, zusätzlich werden neue Herausforderungen – vor allem im Zusammenhang mit der deutschen Energiewende – ihre **Anwendung** weiter **beflügel**n.

Das vorliegende Buch steht im **Spannungsfeld** zwischen den Grundlagen der Entwicklung von Expertensystemen und denen zukünftiger elektrischer Energieversorgungssysteme. Die Autoren nutzen somit den **Anwendungsbereich Energieversorgung** für zahlreiche Beispiele und Illustrationen für den Einsatz von intelligenten Techniken.

Das Buch baut auf der **vieljährigen Erfahrung der Autoren** bei der Anwendung von unterschiedlichen intelligenten Techniken auf dem Gebiet der elektrischen Energiesysteme auf. In zahlreichen Forschungs- und Anwendungsprojekten haben sich die Autoren mit Techniken wie z. B. den künstlichen neuronalen Netzen, der Fuzzy-Logik oder den genetischen Algorithmen beschäftigt. Diese Techniken wurden auch im Rahmen von zahlreichen Diplom- sowie Master- und Promotionsarbeiten untersucht. Die dazu konzipierte **Vorlesung** wird **seit 1994** – mit einer Unterbrechung zwischen 2003–2014 – an der **Universität Stuttgart** und seit 1999 an der **Otto-von-Guericke Universität Magdeburg**

gelesen und kontinuierlich aktualisiert und findet stets einen sehr guten Zuspruch bei den Studierenden.

Im Buch finden die Leserinnen und Leser **Basisinformationen** zu den folgenden Themen:

- Was ist ein Expertensystem?
- Wie strukturiere und erwerbe ich das Wissen für ein Expertensystem?
- Wie behandle ich unsichere Informationen für Entscheidungen?
- Welche intelligenten Techniken stehen zur Verfügung für die Gestaltung von Expertensystemen?
- Worin unterscheiden sich verschiedene künstliche neuronale Netze und wie wird diese Technik angewendet?
- Was sind die Merkmale und Vorteile von unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik)?

Diese **Basisinformationen** werden durch zahlreiche **Beispiele** und **Lösungsansätze** aus dem Bereich der Energieversorgung **illustriert**. Somit **trägt das Buch** wesentlich zum **praktischen Verständnis** der Anwendung von **Expertensystemen** bei.

Das Buch ist an alle Leser **adressiert**, die sich für Expertensysteme, im Besonderen für die Anwendung in der elektrischen Energieversorgung, interessieren. **Netzplanungs- und Netzführungingenieure, Wissenschaftler**, die auf dem Gebiet forschen, aber auch und vor allem **Studierende** werden in diesem Buch viele brauchbare Informationen und Tipps finden.

Die Autoren bedanken sich bei dem Initiator dieser Vorlesung Herrn Prof. Dr. Kurt Feser für den notwendigen Anstoß und bei vielen Studierenden sowie Doktorandinnen und Doktoranden, die durch ihre Arbeiten und Ergebnisse zu der endgültigen Form dieses Buches beigetragen haben. Besonderer Dank gilt Frau Tatjana Strasser für die sorgfältige redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts und Frau B. Sc. Polina Sokolnikova für die grafische Gestaltung des Buches.

Dem Springer Verlag, und hier besonders Frau Redakteurin Eva Hestermann-Beyerle, gilt der Dank der Autoren für die Initiative, Diskussion und die Übernahme dieses Buches ins Portfolio des Verlags.

Bei der Leitung des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg und bei der Geschäftsführung der Firma 50Hertz Transmission GmbH aus Berlin bedanken sich die Autoren für ihr Interesse an der Arbeit und für die finanzielle Unterstützung der redaktionellen Bearbeitung des Buches.

Zbigniew A. Styczynski, Krzysztof Rudion, André Naumann

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundbegriffe der Expertensysteme	1
1.1	Historische Entwicklung der Künstlichen Intelligenz (KI)	2
1.2	Teilgebiete der Künstlichen Intelligenz	6
1.3	Grundbegriffe	7
1.4	Wissensbasierte Systeme	10
1.5	Expertensysteme in der Energieversorgung	14
	Literatur	19
2	Repetitorium der Prädikatenlogik	21
2.1	Wissen	21
2.2	Logische Grundbegriffe	23
2.3	Verknüpfung der Aussagen	25
2.4	Prädikatenlogik mit Variablen	35
2.5	Prädikatenformeln und ihre Beweise	36
2.6	Aufgaben zur Übung	42
2.7	LÖSUNGEN Aufgaben Abschn. 2.6	43
	Literatur	45
3	Wissensrepräsentation und Wissensakquisition	47
3.1	Wissensrepräsentation	47
3.1.1	Einführung	47
3.1.2	Produktionsregeln	48
3.1.3	Semantische Netze	52
3.1.4	Rahmen	54
3.1.5	Wandtafelkonzepte	57
3.2	Wissensakquisition	59
3.2.1	Einführung	59
3.2.2	Lernen durch externe Eingabe und die Akquisition von Wissen	60
3.2.3	Lernen als Erkenntnis von Gesetzen oder Regelmäßigkeiten	62
3.2.4	Lernen durch Analogie	63
	Literatur	65

4	Deklaratives Programmieren und Inferenzmechanismen	67
4.1	Deklaratives Programmieren	67
4.2	Inferenzmechanismen	69
4.3	PROLOG	73
	Literatur	75
5	Behandlung von Ungenauigkeit	77
5.1	Einführung	77
5.2	Wahrscheinlichkeiten	80
5.3	Beispiel für die Anwendung des Satzes von Bayes	81
	Literatur	83
6	Fuzzy-Logik	85
6.1	Fuzzy-Sets – Einleitung	85
6.1.1	Geschichte der Fuzzy-Logik	85
6.1.2	Fuzzy-Sets – unscharfe Mengen. Grundbegriffe und Definition	90
6.1.3	Darstellung der unscharfen Mengen – Zugehörigkeitsfunktionen	96
6.2	Fuzzy-Algebra	98
6.2.1	Basisoperationen mit Fuzzy-Sets	98
6.2.2	Weitere Fuzzy-Set-Operatoren und Auswahlkriterien	101
6.2.3	Linguistische Modifikatoren	103
6.2.4	L-R-Fuzzy-Zahlen	103
6.3	Anwendung der Fuzzy-Logik zur Problemlösung	110
6.3.1	Prinzip der Fuzzy-Logik – Bearbeitung der Information	110
6.3.2	Fuzzyifizierung – Fuzzy-Klassifikation und linguistische Variablen	112
6.3.3	Entscheidungslogik – Fuzzy-Regeln	117
6.3.4	Defuzzyifizierung	119
6.4	Fuzzy-Techniken in Expertensystemen	120
6.5	Zusammenfassung	122
6.5.1	Fuzzy-Tools	122
6.5.2	Beispiel – Anordnung der Abnehmer und Stationen	123
	Literatur	129
7	Künstliche Neuronale Netzwerke	131
7.1	Einführung	132
7.2	Historischer Rückblick	133
7.3	Das Neuron und seine Funktionen	136
7.4	Neuronale Netzwerke und deren Trainingsmethoden	143
7.4.1	Überblick über die Netzarten	143
7.4.2	Grundlagen des KNN-Trainings	147
7.4.3	Training von Multi-Layer-Perzeptron-KNN	152
7.4.4	Training von KNN mit Rückkopplung: Das Hopfield-Modell	168
7.4.5	Lernverfahren für selbstorganisierte KNN	175
7.5	Einsatz neuronaler Netzwerke – Methodik	180

7.6	Anwendungsbeispiele	183
7.6.1	Lastflussprognose	183
7.6.2	Erkennung des Systemzustandes	190
	Literatur	201
8	Neuro-Fuzzy-Systeme	203
8.1	Einführung	203
8.2	Prinzip der Übersetzung mittels Neuro-Fuzzy-Systeme	206
8.2.1	Modellierung des Fuzzyifizierungsprozesses	206
8.2.2	Modellierung des Regelsatzes	208
8.2.3	Defuzzyfizierung	210
8.3	Weitere Hinweise	212
8.4	Übungsaufgabe	212
8.4.1	Weitere Übungen zum tieferen Verständnis	213
	Literatur	213
9	Daten- und Wissensbanken in Expertensystemen für die Energieversorgung	215
9.1	Einleitung – Datenbankkonzepte	215
9.2	Typische Strukturen in Daten der Energieversorgung	217
9.2.1	Einführung	217
9.2.2	Lastverläufe und Einspeisedaten	218
9.2.3	Netztopologie	218
9.2.4	Betriebsmitteldaten	221
9.3	Objektorientierte Datenrepräsentation	222
9.3.1	Struktur und Hierarchie von Objekten	222
9.3.2	Modellierung mittels Unified Modeling Language (UML)	224
9.3.3	Stammdaten von Netzelementen als hierarchische Struktur	225
9.3.4	Repräsentation von Netzstrukturen	226
9.3.5	Repräsentation von Zeitreihen	227
9.3.6	Objektorientierte Datenbanken	229
9.4	Common Information Model	230
	Literatur	233
10	Expertensysteme in der elektrischen Energieversorgung – Beispiel	235
10.1	Einleitung	235
10.2	Ziele für das Expertensystem SiExPro zur Schutzkoordination	237
10.3	Architektur des Expertensystems SiExPro zur Schutzkoordination	240
10.4	Grafische Oberfläche des Expertensystems SiExPro	240
10.5	Lösung einer Beispielaufgabe [6]	243
10.6	Zusammenfassung	246
	Literatur	247
	Stichwortverzeichnis	249

As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain, and as far as they are certain, they do not refer to reality.

(Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.)

(Albert Einstein (1921) Geometrie und Erfahrung, Springer)

Zusammenfassung

Als eine der wichtigsten und meist geschätzten Eigenschaften des Menschen gilt die Intelligenz, die im Zentrum von Kap. 1 steht. Nach einer kurzen Definition der Intelligenz wird die 2000-jährige Geschichte der Intelligenzforschung vorgestellt. Dabei stehen die letzten 60 Jahre, die zur rasanten Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) geführt haben, im Fokus. Die KI hat auch eine eigene „Sprache“ entwickelt, deren Grundbegriffe und Anwendungsgebiete ebenfalls vorgestellt werden. Dabei bilden gerade Expertensysteme ein zentrales Anwendungsgebiet der KI in unterschiedlichen Bereichen. Die elektrische Energieversorgung dient als Beispiel, um diese Nutzung der KI zu beschreiben.

Dieses Zitat stammt aus dem Festvortrag von Albert Einstein, gehalten an der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921. In diesem Vortrag erläutert Einstein die Relativität der Geometrie und der geometrischen Objekte, und in diesem Kontext stellt er auch die zitierte These vor. In diesem Buch ist die These mehr allgemein zu verstehen, was damit auch die Begründung für wissensbasierte Systeme liefert.

1.1 Historische Entwicklung der Künstlichen Intelligenz (KI)

Als eine der wichtigsten und am meisten geschätzten Eigenschaften des Menschen gilt die Intelligenz. Dabei gibt es unterschiedliche Definitionen und Beschreibungen dessen, was unter Intelligenz verstanden wird.¹ So erklärt der *Duden* diesen Begriff wie folgt:

Intelligenz

- „Fähigkeit [des Menschen], abstrakt und vernünftig zu denken und daraus zweckvolles Handeln abzuleiten
- Gesamtheit der Intellektuellen, Schicht der wissenschaftlich Gebildeten
- (veraltend) vernunftbegabtes Wesen; intelligentes Lebewesen“

Da die Intelligenz direkt mit dem Menschen verbunden ist, hat man für andere Formen von intelligenzähnlichem Verhalten (besonders bei Maschinen) den Begriff der Künstlichen Intelligenz geschaffen. Er wird im *Gabler Wirtschaftslexikon* folgendermaßen definiert:

Künstliche Intelligenz

„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.“

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass es nahezu unmöglich ist, ein genaues mathematisches Modell mit den Eigenschaften der menschlichen Intelligenz zu bilden – dieses Dilemma beschreibt auch die Deutung Einsteins am Anfang dieses Kapitels sehr treffend.

Schon immer haben sich Menschen mit der Erforschung und Anwendung ihrer eigenen Intelligenz beschäftigt, zunächst auf der Basis spezieller Aufgaben und Beispiele, die sich erst später mathematisch lösen ließen. So hat man sich, nicht erst seit der Entstehung der Sage um das Labyrinth des Minotaurus (ca. 1700 v. Chr.), mit dem Auffinden von kürzesten Wegen beschäftigt. Ein anderes treffendes Beispiel ist die Einführung der Regeln des Klassenkalküls von Aristoteles 350 v. Chr. als Basis für die Formalisierung des logischen Denkens. Auch die Einführung der Ziffer Null 815 v. Chr. durch den arabischen Mathematiker al-Chwarizmi (Null-Algorithmus) war für die Mathematik wegbereitend. Dabei wurde eine Zahl definiert, die die bisherigen Zahlensysteme ergänzt. Bis dahin hatte die Subtraktion von gleichen Zahlen kein Ergebnis geliefert.

¹ Grundlage in diesem Buch sind die Definitionen aus dem *Duden* [1] bzw. dem *Gabler Wirtschaftslexikon* [2].

An der weiteren Entwicklung der Logik war auch der Philosoph und Mathematiker Gottfried Wilhelm Leibniz (geb. 21. Juni 1646 in Leipzig) beteiligt. Er legte die Grundlagen für das Dualsystem² und formulierte das sogenannte Leibniz'sche Gesetz, das die Identität zweier Mengen definiert. Fast 200 Jahre vor George Boole, der den ersten algebraischen Logikkalkül auslegte, hatte Leibniz viele Grundlagen für die moderne Logik geschaffen. Dieser und zahlreiche weitere Philosophen und Universalgelehrten der Antike und Neuzeit haben sich intensiv in ihrer Forschung mit den mathematischen Grundlagen zur Formalisierung der menschlichen Intelligenz beschäftigt.

Der Beginn der neuesten KI-Forschungen ist mit der Herstellung der ersten Computer verbunden (1950). Hier hat besonders der Turing-Test – 1950 von dem Engländer Alan Turing entwickelt – zur Belebung des Interesses an der künstlichen Intelligenz beigetragen. In diesem Test wird durch Befragung festgestellt, ob sich hinter den Antworten ein Mensch oder ein Computer verbirgt. Seit den 1950er-Jahren haben die Ergebnisse der Arbeiten im Bereich der künstlichen Intelligenz dank der Fortschritte in Mathematik und Informatik zunehmend an Bedeutung gewonnen. Bestimmte Entwicklungsperioden der Untersuchungen zur künstlichen Intelligenz können in Phasen eingeteilt werden, wobei hier unterschiedliche Systematiken verwendet werden können [3–5].

Die Entwicklung der relativ jungen Disziplin war gekennzeichnet durch Höhen und Tiefen. Die zyklischen Phasen von Euphorie und Ernüchterung in der Entwicklung der KI sind in [Abb. 1.1](#) grafisch zusammengefasst.

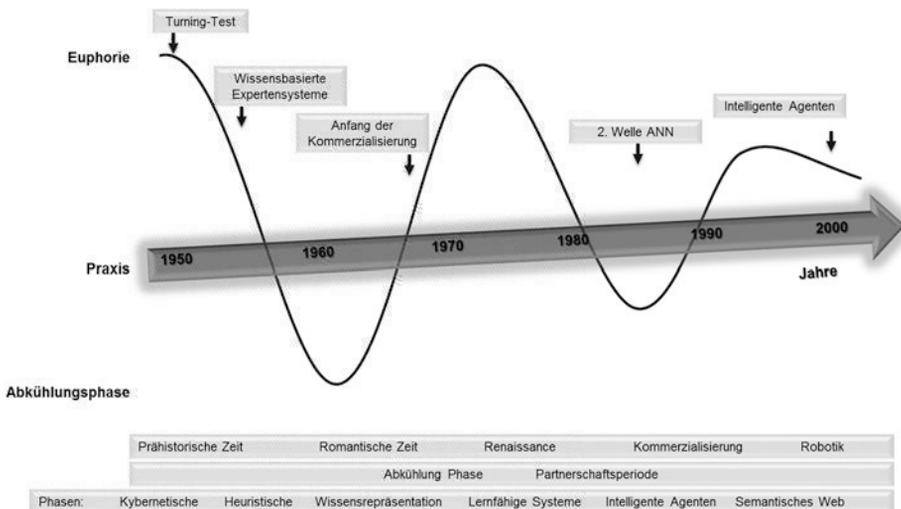


Abb. 1.1 Unterschiedliche Phasen in der Nutzung künstlicher Intelligenz

²Binärzahlen waren die Grundlage für die Entwicklung der ersten Rechenmaschinen.

Abbildung 1.1 macht anhand des abnehmenden Ausschlags von Höhen und Tiefen in der dargestellten Kurve deutlich, dass sich die künstliche Intelligenz in den letzten Jahren als eigenständige Disziplin etabliert und als solche Anwendung in den unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft gefunden hat. Man sieht auch, dass die Geschichte der KI-Forschung sich besonders gut in Zehnjahreszyklen beschreiben lässt. Nachfolgend werden die wichtigsten Phasen dieser Entwicklung betrachtet.

Der zehnjährige Zyklus [3] verdeutlicht, dass es immer zu neuen qualitativen Verbesserungen beim Verständnis und Anwendungsspektrum der KI kam. Meistens jedoch verhinderten die Schwächen der jeweils vorherrschenden Computertechnik die Realisierung der Erwartungen, was – in jeder Phase – auch erneut zu großen Enttäuschungen durch die praktische Unrealisierbarkeit der theoretischen Vorgaben führte.

Die kybernetische Phase in den 1950er-Jahren leitet sich von der Forschungsrichtung der Kybernetik ab, welche zu dieser Zeit sehr populär war.

Kybernetik wird im *Duden* wie folgt definiert:

Kybernetik

„[englisch cybernetics, 1948 geprägt von dem amerikanischen Mathematiker N. Wiener (1894–1964), zu Griechisch kybernētikḗ (téchnē) = Steuermannkunst, zu: kybernētēs = Steuermann, zu: kybernān = steuern] wissenschaftliche Forschungsrichtung, die Systeme verschiedenster Art (z. B. biologische, technische, soziologische Systeme) auf selbsttätige Regelungs- und Steuerungsmechanismen hin untersucht“

In dieser Zeit dominierten in der Kybernetik theoretische Arbeiten, die sich mit Verschaltungen der Eingangs- und Ausgangsinformationen in Regelungssystemen beschäftigten. Da die Regelungsmechanismen jedoch nicht immer mathematisch modellierbar waren, wurden Vereinfachungen bei der Suche nach optimaler Steuerung oder Problemlösung vorgenommen. So wurden neue Algorithmen entwickelt, die ohne Anspruch auf Definition des globalen Optimums schnell „quasioptimale“ Lösungen lieferten. Diese Vorgehensweise was sicher auch durch den damaligen Entwicklungsstand der Rechentechnik bedingt. Die Rechenzeiten der GPS (General Problem Solver) waren sehr hoch, und trotzdem lieferte die relativ unzuverlässige Computertechnik gelegentlich keine Lösung.

Die Entwicklungsphase der KI in den 1960er-Jahren kann als heuristische Phase bezeichnet werden. Das Wort Heuristik ist aus dem griechischen Wort Eureka abgeleitet und wie folgt im *Duden* definiert:

Heuristik

„Lehre, Wissenschaft von den Verfahren, Problem zu lösen; methodische Anleitung, Anweisung zur Gewinnung neuer Erkenntnisse“

Diese kurze Beschreibung kann im Hinblick auf die Entwicklung der künstlichen Intelligenz sinnvoll durch die Definition von Zimbardo [6] ergänzt werden.

„**Heuristiken** sind kognitive >>Eilverfahren<<, die bei der Reduzierung des Bereichs möglicher Antworten oder Problemlösungen nützlich sind, indem sie >>Faustregeln<< als Strategien anwenden.“ ([6, S. 371])

So wurden in den 1960er-Jahren unterschiedliche heuristische Algorithmen entwickelt und ausprobiert. Die meisten beschleunigten mit einer modifizierten Schrittweite die Suche nach Lösungen. Die Ergebnisse waren jedoch enttäuschend und erfüllten nicht die Erwartungen. Als Reaktion versuchte man, das Wissen formal genauer abzubilden, um durch diese Beschreibung die Wahrscheinlichkeit der optimalen Entscheidung zu maximieren. Diese Arbeiten wurden in den 1970er-Jahren intensiviert und beschäftigten sich sowohl mit Methoden der formellen Beweise der Wissenskonsistenz als auch mit dem Anwendungsbereich. Daraus entwickelten sich lernfähige Systeme (auch als Expertensysteme bezeichnet), die ihr Verhalten mit Erfahrung modifizierten und ihr Wissen dadurch erweitern konnten.

Der rasante Fortschritt in der Computertechnik in den 1980er-Jahren hat zur Entwicklung von vielen praktisch einsetzbaren Expertensystemen geführt. Um das Potenzial dieser Technologie zu erhöhen, wurde angestrebt, die unterschiedlichen Systeme zu vernetzen und dabei alle Möglichkeiten der vernetzten Strukturen zu nutzen. So hatte das Konzept der intelligenten Softwareagenten seine Blütezeit in den 1990er-Jahren.

Diese genannten Systeme können wir folgend definiert werden:

„Als **Software-Agent** (auch Agent oder Softbot) bezeichnet man ein Computerprogramm, das zu gewissem (wohl spezifiziertem) eigenständigem und eigendynamischem (autonomem) Verhalten fähig ist. Das bedeutet, dass abhängig von verschiedenen Zuständen (Status) ein bestimmter Verarbeitungsvorgang abläuft, ohne dass von außen ein weiteres Startsignal gegeben wird oder während des Vorgangs ein äußerer Steuerungseingriff erfolgt.“³

Mittlerweile ist man im 21. Jahrhundert angekommen, und das Internet (Web) macht eine neue Qualität der Datenverwaltung möglich. Das Ziel des „semantischen Webs“ ist es, die Bedeutung von Informationen für Computer verwertbar zu machen und damit

³Quelle: Wikipedia.

automatisch für interessierte Nutzer im Zuge einer Abfrage zu ordnen. Die Informationen im Web sollen von Maschinen interpretiert und automatisch weiterverarbeitet werden können.

Die Bezeichnungen der vorgestellten Phasen der KI-Entwicklung bilden eine logische Reihe, von ganz einfachen Darstellungen über Probleme der Modellierung (Repräsentation) bis zu den Untersuchungen von Selbstlernfähigkeiten. Natürlich sind die Lösungen, die in diesen Phasen erreicht worden sind, nie voll zufriedenstellend. Hierbei gehörten und gehören besonders die Aufgaben der allgemeinen Wissensmodellierung auch heute noch zu den schwierigsten und abstraktesten Problemen.

1.2 Teilgebiete der Künstlichen Intelligenz

Die Untersuchungen auf dem Gebiet der KI haben sich so entwickelt, dass heutzutage von Spezialverfahren für einzelne Teilgebiete gesprochen wird. Dabei wurden spezifische Methoden u. a. für folgende Teilgebiete erarbeitet:

- Robotik,
- Verstehen natürlicher Sprache (lesen und sprechen),
- automatisches Übersetzen von Texten in andere Sprachen,
- Erkennen von Bildern und Bildfolgen,
- automatisches Finden und Beweisen logischer und mathematischer Sätze,
- Entwicklung von Computersystemen (Expertensystemen) auf verschiedenen Wissensgebieten.

Bei der Bild- und Spracherkennung handelt es sich meistens um die geschickte Zuordnung der eingehenden Informationen zu gespeicherten Mustern, also um eine Mustererkennung. Solche Systeme arbeiten heute schon online und verlangen den Computern eine erhebliche Leistung ab. Typische Beispiele sind hier Mautsysteme (Online-Erkennung von Fahrzeugtypen und Kennzeichen) oder Sprach- und Musikerkennung (z. B. Identifikation von Interpreten oder Titeln mit den zugehörigen Interpreten). Die Bilder oder Sprachsätze sind manchmal unscharf bzw. schlecht verständlich, müssen aber trotzdem klassifiziert werden. Dies wird von heutigen Systemen geleistet. Eine typische Schwierigkeit, die beim Durchsuchen und dem Abgleich von vielen Mustern auftritt, ist die Zeitverzögerung.

Die automatische Beweisführung logischer Sätze ist ein sehr komplexes Gebiet, wobei die Bedeutung und Korrektheit der erreichbaren Lösungen die Gesamtheit der KI beeinflussen und zur Weiterentwicklung der Methoden führen können.

Ein praktisches und bekanntes Anwendungsfeld der KI ist heute die Robotik. Autonome Roboter (Stichwort: autonomes Fahren) können heute selbstständig ihre Umgebung beobachten und Vorgänge zuordnen. Im Falle einer Interaktion mit Menschen können die Roboter ihr Verhalten modifizieren, was auch als Lernen bezeichnet werden kann.

1.3 Grundbegriffe

Wie in jeder Disziplin haben sich auch in der KI verschiedene Begriffe etabliert, die vorwiegend aus dem Englischen stammen. [Tabelle 1.1](#) zeigt einen Überblick über häufig verwendete Grundbegriffe der KI.

Tab. 1.1 Grundbegriffe der KI (nach Informationen der Fa. Siemens AG, 1998)

Deutsch	English	Beschreibung
Künstliche Intelligenz (KI)	Artificial Intelligence (AI)	<p>Wissenschaftliche, technische Disziplin, die sich bemüht um</p> <ul style="list-style-type: none"> • das Verstehen und Modellieren menschlicher Intelligenzleistungen anhand informationstechnischer Modelle (Rechnerprogramme als Prozessmodelle), • die qualitative Leistungssteigerung und Erschließung neuer Anwendungsgebiete von Computern, Programmier- und Informationstechniken. <p>nach <i>Gabler</i>: Erforschung „intelligenter“ Problemlösungsverhaltens sowie 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.</p>
Deduktion, Folgerung	Deduction	<p>Schlussfolgerung, die auf einem logischen Kalkül basiert</p> <p>nach <i>Duden</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • (Philosophie) Ableitung des Besonderen und Einzelnen vom Allgemeinen; Erkenntnis des Einzelfalles durch ein allgemeines Gesetz • (Kybernetik) Ableitung von Aussagen aus anderen Aussagen mithilfe logischer Schlussregeln
Experte	Expert	<p>Fachmann auf einem Spezialgebiet</p> <p>nach <i>Duden</i>: Sachverständiger, Fachmann, Kenner</p>
Fakt	Fact	<p>Nachprüfbare, grundlegende Tatsache</p>
Rahmen	Frame	<p>Objektzentriertes Wissensrepräsentationskonstrukt, das statisch-deskriptive und dynamisch-prozedurale Darstellungsaspekte vereinigt</p> <p>nach <i>Duden</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Viereckige, runde oder ovale Einfassung für Bilder • Etwas, was einer Sache ein bestimmtes [äußeres] Gepräge gibt • Etwas, was einen bestimmten Bereich umfasst und ihn gegen andere abgrenzt; Umgrenzung, Umfang

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

Deutsch	English	Beschreibung
Semantisches Netz	Semantic Net	Netz für die Repräsentation von Wissen in Form von Objekten und Relationen
Heuristik	Heuristics	Empirische Methode, um bei Fehlen eines Algorithmus oder einer Theorie in vernünftiger Weise zu einer Problemlösung zu gelangen
Inferenz	Inference	Überbegriff für Schlussfolgerungsprozesse verschiedenster Art, z. B. deduktiv, plausibel, analog, induktiv nach <i>Duden</i> : Aufbereitetes Wissen, das aufgrund von logischen Schlussfolgerungen gewonnen wurde
Regel	Rule	Beschreibungsformalismus für das Verhältnis zwischen Voraussetzung und daraus möglichen Folgerungen, meist in der Form IF -premise- THEN -conclusion oder IF -condition- THEN -action nach <i>Duden</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Aus bestimmten Gesetzmäßigkeiten abgeleitete, aus Erfahrungen und Erkenntnissen gewonnene, in Übereinkunft festgelegte, für einen jeweiligen Bereich als verbindlich geltende Richtlinie; [in bestimmter Form schriftlich fixierte] Norm, Vorschrift • Regelmäßig, fast ausnahmslos geübte Gewohnheit; das Übliche, üblicherweise Geltende
Produktionsregel	Production Rule	Regel, bestehend aus Bedingungen und Folgerungen. Falls die Bedingungen entsprechend der Wissensbasis erfüllt sind, werden die Folgerungen in die Wissensbasis eingetragen. nach <i>Gabler</i> : Begriff in der künstlichen Intelligenz für eine Regel der Form „wenn Bedingung(en), dann Schlussfolgerung oder Aktion(en)“, wobei sich die Bedingungen auf die Menge der in der Wissensbasis gespeicherten bzw. bereits hergeleiteten (Inferenz-)Fakten beziehen und die Schlussfolgerung neue Fakten erzeugen

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

Deutsch	English	Beschreibung
Objektorientierte Programmierung	Object-Oriented Programming	<p>Programmierstil, bei dem Beschreibungen der Struktur und des Verhaltens von Objekten zu Klassen zusammengefasst werden. Diese stehen in einer Vererbungshierarchie, d. h., Teile von Beschreibungen können von allgemeinen Klassen an speziellere übergeben werden.</p> <p>nach <i>Gabler</i>:</p> <p>Im Gegensatz zur prozeduralen Programmierung, bei der Daten, Prozeduren und Funktionen getrennt betrachtet werden, fasst man sie bei der objektorientierten Programmierung zu einem Objekt zusammen. Objekte sind nicht nur passive Strukturen, sondern aktive Elemente, die durch Nachrichten anderer Objekte aktiviert werden. Objektorientierte Programme werden als kooperierende Sammlungen von Objekten angesehen.</p>
Mustererkennung	Pattern Recognition	<p>Vergleich eines vorliegenden Musters mit einem Referenzmuster aufgrund von charakteristischen Merkmalen, die in einem Vorverarbeitungsprozess extrahiert wurden (z. B. Bildverarbeitung) mittels statischer oder synthetischer Verfahren</p>
Schlussfolgerung	Reasoning	<p>Herleitung von Schlussfolgerungen, ausgehend von einer Menge von Fakten (Prämissen) unter der Verwendung von Ableitungsregeln</p> <p>nach <i>Duden</i>:</p> <p>Logische Folgerung; Schluss, mit dem etwas aus etwas gefolgert wird, z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • eine logische, zwingende, überzeugende, falsche Schlussfolgerung, • aus etwas die richtige Schlussfolgerung ziehen
Expertensystem	Expert System	<p>Wissensbasiertes System mit Schlussfolgerungs- oder Problemlösefähigkeit und teilweise hochentwickelter Interaktionsfähigkeit zum Einsatz in einem sehr eng begrenzten Spezialgebiet. Expertensysteme können im Einzelnen sehr unterschiedlich gestaltet sein (autonom, interaktiv).</p> <p>nach <i>Gabler</i>:</p> <p>In der Künstlichen Intelligenz (KI) wird ein Programm oder ein Softwaresystem als Expertensystem bezeichnet, wenn es in der Lage ist, Lösungen für Probleme aus einem begrenzten Fachgebiet (Wissensdomäne) zu liefern, die von der Qualität her denen eines menschlichen Experten vergleichbar sind oder diese sogar übertreffen (Expertenwissen).</p>

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

Deutsch	English	Beschreibung
Erklärungs- komponente	Explanation Facility	Gibt Auskunft auf Fragen nach dem Wie und Warum. Insbesondere müssen die vom Expertensystem beim Problemlösungsprozess getroffenen Entscheidungen klar und präzise begründet werden.
Wissenserwerb	Knowledge Acquisition	Wissenserwerb umfasst verschiedene organisatorische, systematisierende und softwaretechnische Maßnahmen, die zum Aufbau einer Wissensbasis notwendig sind, darüber hinaus auch die Ausnutzung von Textanalyse und Lernverfahren.
Wissensbasis	Knowledge Base	Explizite, deskriptive (nicht prozedurale) Repräsentation von Wissen, die zur Lösung bestimmter Aufgaben in einem Gebiet benötigt wird nach <i>Duden</i> : Grundlage für künstliche Intelligenz (besonders in Expertensystemen) bildendes, in Rechnern gespeichertes Wissen, das Zusammenhänge, Fakten und Regeln enthält
Wissensver- arbeitung	Knowledge Processing	Programmierstil oder Software-Architektur. Es wird versucht, die statischen Systemteile (Objekte, Begriffe, Fakten, Regeln) aus den Programmen herauszulösen und in einer einheitlichen Wissensbasis zu verwalten.
Wissensenge- nieur	Knowledge Engineer	Fachmann für das Sammeln und Systematisieren von Expertenwissen und dessen Umsetzung in ein wissensbasiertes System
Vorwärtsver- kettung	Forward Chaining	Datenbetriebener Modus zum Auswerten von Inferenzregeln
Rückwärtsver- kettung	Backward Chaining	Modus zum Auswerten von Inferenzregeln, bei dem vom gewünschten Ergebnis ausgegangen wird

1.4 Wissensbasierte Systeme

Ein Expertensystem sollte man sich als ein Programmsystem vorstellen, bei dem die Fachkompetenz von Experten, die sich in einem eng begrenzten Bereich hervorragend auskennen, in einer Wissensbank gebündelt und informationstechnisch-gerecht zur Lösung von Problemen bereitgestellt wird. Da das Wissen in solchen Systemen eine zentrale Rolle spielt, werden Expertensysteme auch als wissensbasierte Systeme (*knowledge based systems*) und die Datenverarbeitung mit wissensbasierten Systemen als Wissensverarbeitung bezeichnet.

In diesem Buch wird nicht zwischen wissensbasierten Systemen und Expertensystemen unterschieden, obwohl man diese zwei KI-Techniken aufgrund von hier irrelevanten Unterschieden differenzieren könnte. Es gilt hier überall:

Wissensbasierte Systeme = Expertensysteme

Die Entwicklung von computergestützten Methoden hat in den letzten 30 Jahren eine sprunghafte Entwicklung von einzelnen, einfachen Programmen über komplexe Programmsysteme bis hin zu wissensbasierten Programmsystemen vollzogen. Die Etappen sind durch verschiedene, komplexe Aufgabenstellungen gekennzeichnet.

Die Expertensysteme selbst sind durch die große Komplexität der Aufgaben charakterisiert, die mit ihrer Hilfe gelöst werden können, und auch durch die große Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Diese ist hier so zu verstehen, dass man den Lösungsweg verfolgen und nachprüfen kann. In [Abb. 1.2](#) werden die Fähigkeiten der Expertensysteme (XPS) im Vergleich zu anderen Methoden dargestellt.

Die Liste der Anwendungsbereiche der Expertensysteme ist lang. Diese Technik ist heute in der Spracherkennung, im Management von Datenbanken und in Entwurfsmethoden der Projektierung von verschiedenen dedizierten Systemen einsetzbar. Einen Überblick über Anwendungsbereiche der Expertensysteme stellt [Tab. 1.2](#) dar.

Ein Expertensystem besteht aus mehreren Komponenten, die unterschiedliche Aufgaben bewältigen sollen und miteinander logisch verbunden sind. Die allgemeine Darstellung der Komponenten eines Expertensystems zeigt [Abb. 1.3](#).

Der Benutzer, meistens ein Planer bzw. Gast, kommuniziert mit dem Expertensystem über die sogenannte Benutzeroberfläche – eine Schnittstelle, die auch als Dialogkomponente

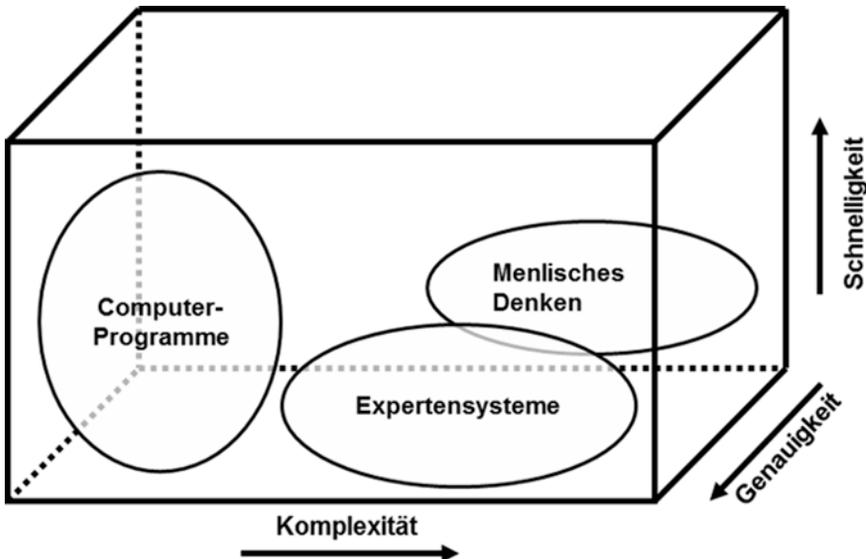


Abb. 1.2 Fähigkeiten der Expertensystemen gegenüber anderen Methoden [7]

Tab. 1.2 Anwendungsbereiche der Expertensysteme

Bereich	Anwendungen
Informationstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Computergestützte Sprachübersetzung • Fragebeantwortungssysteme • Verstehen natürlicher Sprachen • Bild- und Mustererkennung • Problemlösungssysteme
Basissoftware	<ul style="list-style-type: none"> • Managementsysteme für Wissensbanken • Schlussfolgerungsmechanismen • Intelligente Schnittstellen
Neue Hardwarearchitekturen	<ul style="list-style-type: none"> • Logische Prozessoren • Funktionsprozessoren • Prozessoren für Algebra • Prozessoren für Datenbanksysteme • Verbesserte von-Neumann-Architekturen
Schaltungsarchitektur	<ul style="list-style-type: none"> • VLSI-Entwurfskonzepte • VLSI-Entwurfskonzepte für intelligentes CAD
Dedizierte Systeme	<ul style="list-style-type: none"> • Medizintechnik • Energietechnik • Robotik und autonome Systeme • Logistik • Architektur
Hilfstechniken	<ul style="list-style-type: none"> • Software-Entwicklungshilfen • Konfigurierungshilfen

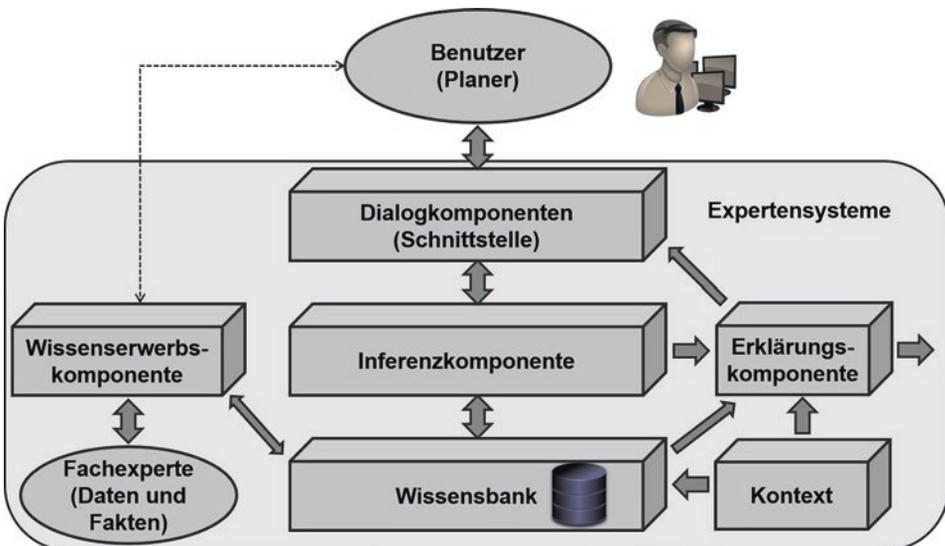


Abb. 1.3 Verknüpfungen zwischen den Komponenten eines Expertensystems

bezeichnet wird. Diese Schnittstelle, heute häufig auch als grafisches, interaktives Modul ausgeführt, ermöglicht den Zugriff auf die Inferenzmechanismen, die mithilfe der Wissensbank – abhängig vom Kontext – Ergebnisse zu der Benutzeranfrage liefern.

Der Weg, auf dem die Ergebnisse erreicht wurden, kann auf Wunsch des Benutzers durch die Erklärungskomponente erläutert werden. Die Erstellung und Ergänzung der Wissensbank kann sowohl durch Fachexperten als auch, wenn es nicht im System verborgen ist, durch einen geschulten Benutzer erfolgen.

Bei der Betrachtung eines in dieser Weise dargestellten Expertensystems stellt sich die Frage: Welcher Unterschied besteht überhaupt zwischen dem traditionellen und dem wissensbasierten Programmieren?

Dieser Unterschied liegt grundsätzlich in der Darstellung der Algorithmen, die in der traditionellen Programmierung die Programmablauf-*Steuerung* und *Logik* verbinden. Bei den Expertensystemen ist die Logik zusammen mit den Daten in der Wissensbasis gespeichert und wird als solche einheitlich durch Inferenzmechanismen bearbeitet (s. Schema in [Abb. 1.4](#)).

So bildet der Algorithmus zusammen mit der Steuerung die Inferenzkomponente. Daten werden durch logische Verknüpfungen in der Wissensbank ergänzt und gespeichert.

Expertensysteme haben daher folgende Fähigkeiten [3, 8]:

- Probleme verstehen,
- Probleme lösen,
- Lösungen erklären und bewerten,
- Wissen erwerben und strukturieren.

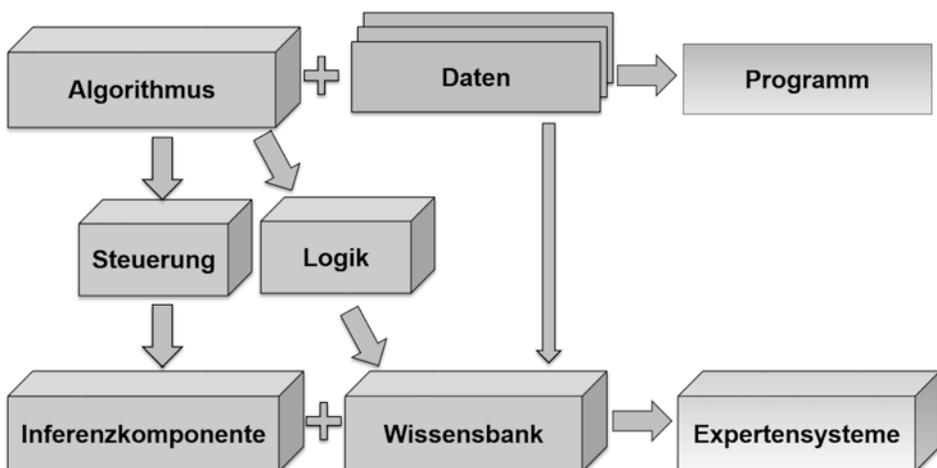


Abb. 1.4 Vergleich Programm – Expertensystem

Das Wissen kann in Expertensystemen auf unterschiedliche Arten gespeichert werden, in der Regel wird es aber gespeichert als

- Fakten,
- Regeln,
- Objektbeschreibungen,
- Heuristiken,
- Bedingungen.

1.5 Expertensysteme in der Energieversorgung

Das elektrische Netz bildet ein sehr großes und komplexes System, das sich über Tausende von Kilometern erstreckt. Es besteht aus sehr vielen unterschiedlichen Elementen – Betriebsmittel genannt – wie z. B. Generatoren, Transformatoren, Schaltern oder Übertragungsleitungen. Das europäische elektrische Übertragungsnetz wird auf dem Spannungsniveau von 380 kV mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Die Spitzenlast in Europa beträgt ca. 530.000 MW (2015).

Die ersten Anwendungen der Computertechniken in der elektrischen Energietechnik erfolgten 1950, als die ersten Lastflussberechnungsprogramme entstanden.

In den Jahren 1970–1980 konzentrierten sich die Arbeiten auf große Datenbanken und *real-time* Berechnungsprogramme (*State Estimation*: Zustandsbestimmung des elektrischen Netzes mit vorhandenen Messwerten), weil die damals vorhandene Technik eine solch umfangreiche Modellierung und Berechnung bereits erlaubte.

Die ersten Arbeiten in Richtung der Expertensysteme begannen 1986, als im Rahmen der Organisation CIGRE (International Conference on Large High Voltage Electric Systems) die „Working Group 38.06 Expert Systems in Power System“ die Anwendung dieser Technologie diskutierte [9].

Zurzeit werden die Expertensysteme auf fast allen Gebieten der elektrischen Energietechnik eingesetzt, wobei die meisten Anwendungen die folgenden Bereiche betreffen:

- statische und dynamische Sicherheit des elektrischen Systems,
- Last- und Erzeugungsprognose,
- Alarmbehandlung und Systemdiagnose,
- Netzwiederaufbau nach Störungen,
- optimaler Netzbetrieb und Netzplanung,
- Überwachung von Netzstationen und Netzschutz.

In den frühen 1990er-Jahren berichtete das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, internationaler Verband der Ingenieure der Elektrotechnik und Informationstechnik) von 40 realisierten ersten Projekten (s. [Abb. 1.5](#)). Hierbei wurden Expertensysteme im Bereich der Diagnose der elektrischen Energiesysteme am häufigsten angewendet.

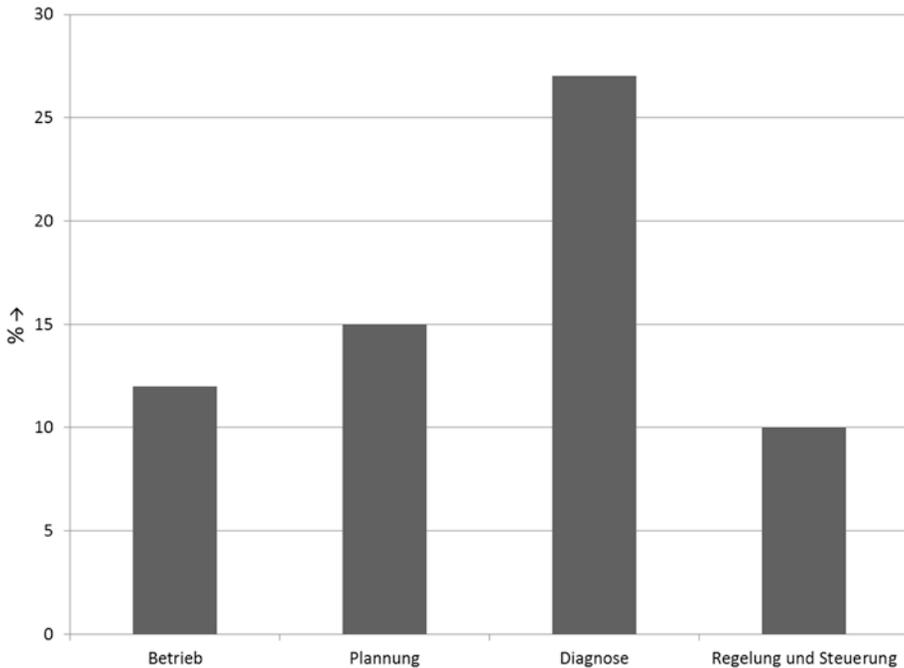


Abb. 1.5 Anwendung von Expertensystemen in der Elektrotechnik (prozentualer Anteil von 40 Systemen) [10]

Heutzutage prägt der Anstieg der erneuerbaren Erzeugung die elektrischen Energiesysteme. Bereiche wie Last- und Erzeugungsprognosen (hier Erzeugung aus Windkraft und Fotovoltaik) sowie die Bestimmung der statischen und dynamischen Sicherheit werden praktisch ausschließlich durch unterschiedliche kommerzielle Tools unterstützt, die als wissensbasierte Systeme zu bezeichnen sind.

Aber nicht nur in den Energiesystemen werden immer öfter die Expertensysteme eingesetzt. Die Industrieprognose bis 2024 (s. [Abb. 1.6](#)) zeigt, dass Expertensysteme auch insgesamt bald durch autonome Roboter überholt werden. Der etwa 300-prozentige Anstieg für diese Anwendungen ist für die nächsten zehn Jahre prognostiziert. Auch digitale Assistenten (vorwiegend im Anwendungsbereich Medizin) und künstliche neuronale Netze (im Anwendungsbereich lernfähige Systeme, z. B. Erzeugungsprognosen oder intelligente Bilderkennung) werden in den nächsten Jahren einen 200- bis 300-prozentigen Zuwachs verzeichnen.

Als Beispiel für die Anwendung von Expertensystemen in der Energieversorgung kann hier das Wind Power Management System (WPMS) dienen, das vom Fraunhofer-Institut IWES in Kassel entwickelt wurde. Dort wird ein auf numerische Wettermodelle trainiertes neuronales Netz für die *Day-ahead*-Vorhersage der Energieerzeugung aus Wind verwendet [11]. Dieses Tool besitzt eine umfangreiche Bedieneroberfläche (s. [Abb. 1.7](#)) und wird bei zahlreichen Netzübertragungsbetreibern in Deutschland täglich eingesetzt.

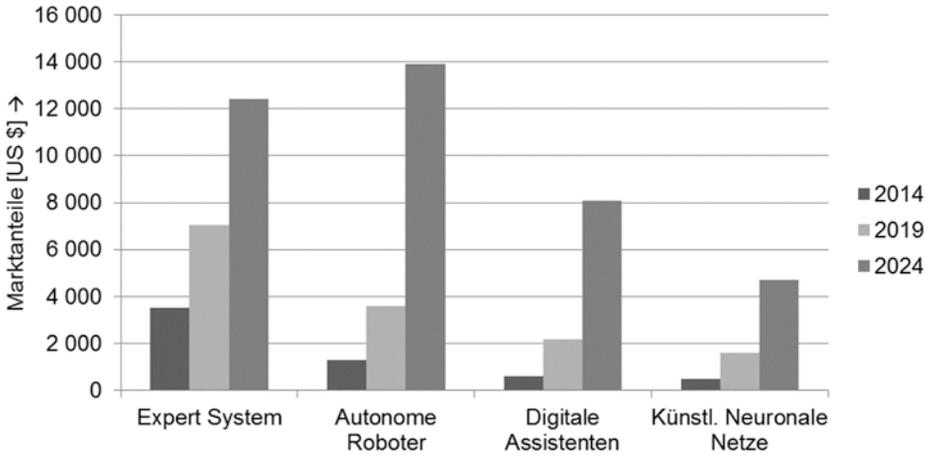


Abb. 1.6 Prognostizierte Marktanteile smarter Maschinen in Millionen US-Dollar [11]

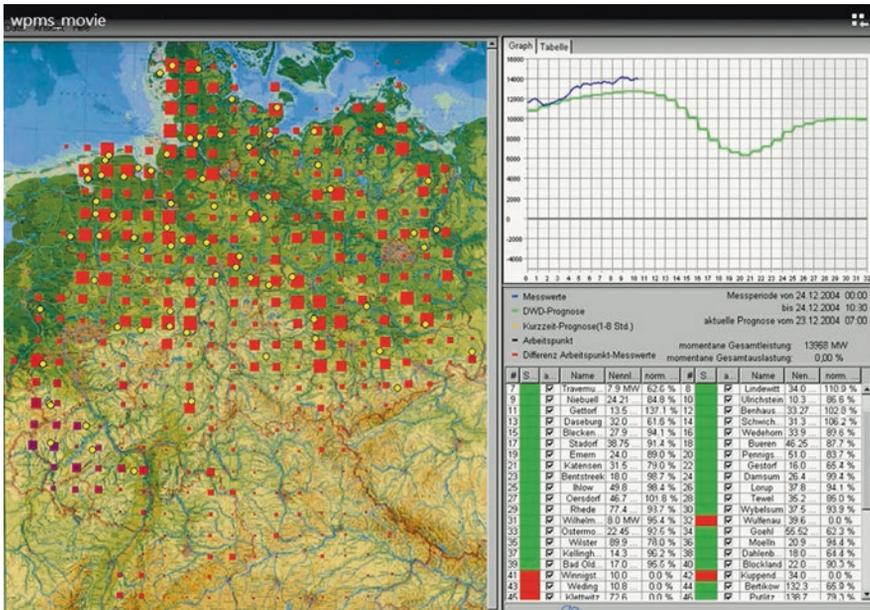


Abb. 1.7 Grafische Oberfläche des Wind Power Management Systems [12]

In China – wo heutzutage die meiste Windenergie weltweit erzeugt wird (s. Abb. 1.8) – werden ebenfalls unterschiedliche Methoden verwendet, um eine möglichst genaue Windenergieprognose zu erstellen. Dabei spielen lernfähige Methoden (*Machine Learning Methods*) wie künstliche neuronale Netze oder die Support Vector Machine neben

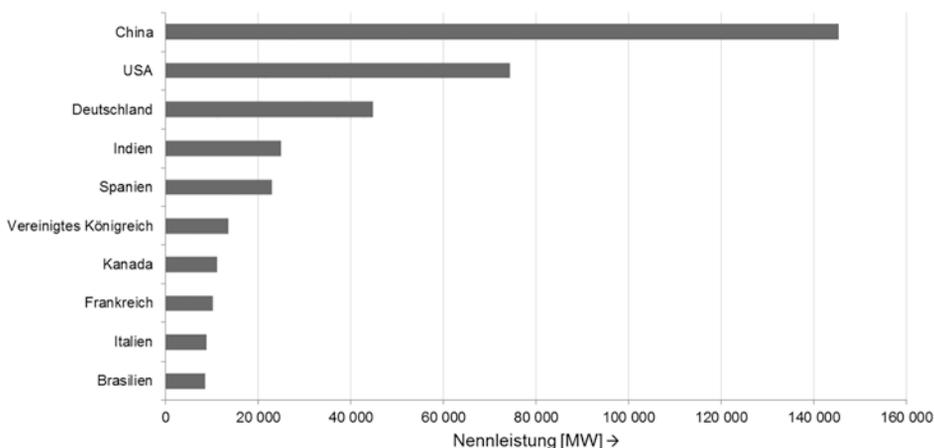


Abb. 1.8 Weltweit installierte Windenergieleistung in MW (2015)

statistischen Verfahren eine dominierende Rolle [13]. Die Anwendung von Expertensystemen macht eine sehr hohe Genauigkeit der Windenergieerzeugungsprognose möglich. Der mittlere Fehler der Prognose liegt (statistisch betrachtet) beim WPMS-Tool bei etwa 6 %.

Die Expertensysteme werden immer leistungsfähiger und spezialisierter. Sie können mittlerweile auch für sehr spezielle Aufgaben im Bereich der elektrischen Energiesysteme eingesetzt werden. Beispielsweise werden gegenwärtig neue Systeme entwickelt, die es erlauben, das Spezialwissen, das für die Parametrierung von Netzschutzgeräten notwendig ist, zu sammeln [14].

Großkraftwerke als besonders wichtige Anlagen im Netz besitzen heute mehrere Überwachungssysteme, die teilweise wissensbasierte Software einsetzen. Folgende Aufgaben werden durch solche Expertensysteme gelöst [15]:

- Fehlerdiagnose (*fault diagnostic*),
- Netzbetriebsunterstützung (*operator support*),
- Behandlung von Alarmen (*alarm processing*),
- Training von Operatoren (*operator training*).

Hierfür nutzen die angewandten Expertensysteme intelligente Techniken wie Regeln, Fuzzy- Logik [16], neuronale Netze oder eine Kombination daraus in Form von hybriden Systemen. [Abbildung 1.9](#) zeigt die Verteilung der Lösungen in 42 analysierten Expertensystemen für 2015. Dabei ist zu erkennen, dass regelbasierte Systeme die meistverwendete Gruppe bilden.

Expertensysteme in der elektrischen Energieversorgung sind durch verschiedene Hard- und Softwarekonfigurationen gekennzeichnet. Für die ausgewählten Systeme sind die charakteristischen Merkmale in [Tab. 1.3](#) zusammengestellt.