

# Künstliche Intelligenz und Wissenschaftspraxis (Teil III)

## Ein Orientierungsversuch

Martin Schneider

### Teil I:

- I. Künstliche Intelligenz: Programmatik — Terminus — Definition — Gegenstandsbereich
- II. Formen der Wissenschaftspraxis
- III. Formen der Wissenschaftspraxis und Techniken der Künstlichen Intelligenz
  1. Nicht-sprachlicher, wahrnehmungsorientierter Wissenswerb

### Teil II:

2. Wissensfixierung und Wissensdistribution
3. Wissensverarbeitung
  - a. Textverarbeitung und Information Retrieval
  - b. Konzeptuelle Graphen und semantische Netze

### Teil III:

4. Wissensbegründung
  - a. Automatische Theorem-Beweiser
  - b. Expertensysteme

### Teil IV:

- IV. Ausblick: Wissenschaftsverständnis und Künstliche Intelligenz

## 4. Wissensbegründung

Bereiten schon die konzeptuellen Graphen oder semantischen Netze das Wissen in einer Weise auf, daß es weiterverarbeitbar wird und nicht bloß eine unverbundene Menge isolierter Wissensfakten darstellt, so führt erst die Verknüpfung solcher Bearbeitungstechniken mit den genannten „höheren“ induktiv-verallgemeinernden und deduktiv-ableitenden Verfahren zu Methoden der KI, die begründenden Charakter haben, weil sie — ausgehend von einer in bestimmter Form strukturierten Wissensbasis oder Datenmenge — auf weiteres Wissen begründend schließen; „begründend“ in dem doppelten Sinn der Geltungsbegründung für bereits bestehendes oder vermutetes Wissen und dem Geltung verschaffenden Erschließen von neuem, bisher unbekanntem Wissen.

Die logischen Deduktionstechniken, die in diesen Methoden verwendet werden und die in manchen Fällen auch ausreichen, sind Logik-Systeme meist von der Stärke der sog. 1. Stufe, also Systeme, die aussagenlogische und bestimmte prädikatenlogische Operationen umfassen. (Die auch heute noch gelegentlich verwendete Aristotelische Syllogistik ist ein schwächeres Subsystem der Logik 1. Stufe.) Die Bedeutung der Logik für Wissenschaften wie die Jurisprudenz dürfte auf der

Hand liegen und ist in neueren wissenschaftstheoretischen juristischen Werken wieder besonders hervorgehoben worden.<sup>1</sup> Aber auch der Mediziner verwendet stillschweigend logische Deduktionsformen bei der Kontrolle seiner Ergebnisse oder bei der Ableitung gewisser Folgerungen aus dem medizinischen Wissen. Ja jedes Wissenschaftssystem muß bestimmten logischen Minimalforderungen genügen. Daher soll die Behandlung der logisch-deduktiven Verfahren am Anfang stehen. Sie werden hier zunächst als Verfahren der „reinen“, noch nicht auf spezielle Wissenschaften angewandten Logik behandelt. KI-Techniken, die eine Automatisierung solcher rein-logischen Verfahren darstellen, heißen automatische Theorem-Beweiser.

### a. Automatische Theorem-Beweiser

Ein „reines“ Logik-System der 1. Stufe benutzt eine künstliche, von den Ambiguitäten der natürlichen Sprachen freie Sprache, die lediglich folgende Sprach-elemente umfaßt:

(1) deskriptive Zeichen für Individuen, n-stellige Prädikate und Sätze (auch 0-stellige Prädikate genannt);

(2) nicht-deskriptive Zeichen für logische Konstanten (die Operatoren), d.h. aussagenlogische Junktoren (normalerweise fünf: „nicht“, „und“, „oder“, „wenn ... dann“, „genau dann wenn“), die wahrheitsdefinit sind und auf der Menge der Aussagen oder Sätze operieren, und prädikatenlogische Quantoren („für alle Individuen gilt“, „für mindestens ein Individuum gilt“), die auf der Menge der Individuen operieren.

Operationen auf der Menge der Prädikate sind ausgeschlossen: das macht die Restriktion der Logik 1. Stufe gegenüber höheren Stufen aus. Dazu kommen nur noch gewisse Hilfszeichen wie Kommata, Klammern oder metasprachliche Zeichen. Aufgrund genauer syntaktischer Formationsregeln für die Kombinierbarkeit der Zeichen der Logik-Sprache ist jederzeit strikt geregelt, was als wohlgeformte Formel (*well-formed formula*) innerhalb des Logik-Systems zugelassen ist. Die einfachsten operatorenfreien Formeln heißen Atomformeln.

Damit ist das syntaktische „Inventar“ eines Logik-Systems der 1. Stufe (ohne Identität) vollständig beschrieben. Außerdem gibt es noch bestimmte Transformationsregeln, die gestatten, aus einer wohlgeformten Formel eine andere herzuleiten. In diesen Transforma-

1. Vgl. Herberger, Maximilian und Simon, Dieter, a.a.O.

tionsregeln steckt (ggf. zusammen mit den zugrundegelegten Axiomen, die aber nicht unbedingt erforderlich sind) die eigentliche Deduktionsfähigkeit des Logik-Systems.

Um diesem rein formal (syntaktisch) beschriebenen Logik-System eine Deutung geben und damit potentiell auf beliebige Wissensinhalte anwenden zu können, bedarf es einer Interpretation seiner deskriptiven Ausdrücke, die durch Benutzung einer intensionalen oder extensionalen Semantik (vgl. Abschnitt III 3 b) geleistet wird. Unter Zugrundelegung eines beliebigen (d.h. möglicherweise unendlichen), aber nicht-leeren Individuenbereichs wird in der modernen Logik eine extensionale Semantik bevorzugt. Die extensionale Bedeutung eines Individuenzeichens ist ein Individuum; die eines einstelligen Prädikatzeichens eine Klasse von Individuen, allgemein die eines n-stelligen Prädikatzeichens eine Klasse geordneter n-tupel von Individuen; die eines Satzzeichens ein Wahrheitswert (in der zweiwertigen Logik der Wahrheitswert „wahr“ oder „falsch“).

Ziel der Logik ist es, eine Theorie des formal gültigen Schließens oder Schlußfolgerns zu erstellen. Ein *Schluß* ist eine Folge von Sätzen, in der der letzte Satz (der Schlußsatz, die Konklusion) aus den vorangehenden Sätzen (den Prämissen) folgt. *Gültig* heißt der Schluß dann, wenn die Konklusion wahr ist, falls die Prämissen wahr sind, d.h. wenn unter der Voraussetzung der Wahrheit der Prämissen die Konklusion nicht falsch werden kann. *Formal gültig* heißt der Schluß dann, wenn gewährleistet ist, daß der Schluß auch dann gültig bleibt, wenn die deskriptiven Zeichen oder Wörter der Sätze durch beliebige andere deskriptive Zeichen oder Wörter (desselben Typs) ersetzt werden.

Ein einfaches Beispiel aus der traditionellen Syllogistik (wobei hier die sog. copula „ist“ bzw. „sind“ als zusätzliche logische Konstante anzusehen ist): Der Schluß aus den beiden Prämissen „Alle Menschen sind sterblich“ und „Sokrates ist ein Mensch“ auf die Konklusion „Sokrates ist sterblich“ ist formal gültig; denn wenn ich die deskriptiven Wörter „Mensch“, „sterblich“ und „Sokrates“ durch die Wörter „Marsbewohner“, „vierbeinig“ und „Platon“ ersetze, so erhalte ich ebenfalls einen logisch gültigen Schluß, nämlich: „Alle Marsbewohner sind vierbeinig. Platon ist ein Marsbewohner. Also ist Platon vierbeinig.“ D.h. allgemein gilt: Aus „Alle S sind P“ und „m ist S“ folgt logisch „m ist P“.

Für die Logik als Schlußfolgerungs- oder Deduktionssystem sind hauptsächlich zwei Arten von Techniken entwickelt worden: die *syntaktisch orientierten* oder *beweistheoretischen Verfahren* und die *semantisch orientierten* oder *modelltheoretischen Verfahren*. Modelltheoretische Verfahren gehen von einer extensionalen Interpretation der deskriptiven Ausdrücke der zu beweisenden Formel aus und benutzen den Begriff der Allgemeingültigkeit (d.h. der Wahrheit bei allen möglichen Interpretationen). Beweistheoretische Verfahren verzichten darauf und operieren rein syntaktisch.

Ein *modelltheoretisches Verfahren* ist z.B. das Berech-

nen einer komplexen aussagenlogischen Formel durch die Belegung ihrer Teilformeln mit Wahrheitswerten anhand von Wahrheitstabellen. Ein anderes Beispiel ist die von dem Logiker *Beth* entwickelte Methode der semantischen Tafeln, welche die Allgemeingültigkeit einer Formel dadurch nachzuweisen versucht, daß sie deren Widerlegung ausschließt. Es handelt sich also um ein indirektes Verfahren: Man geht von der Annahme, die Formel sei falsch, aus, und versucht dann zu zeigen, daß dies zu Widersprüchen führt.

Beispiele für die *beweistheoretischen Verfahren* sind die axiomatischen Methoden, bei denen der Beweis einer Formel darin besteht, daß sie aus gewissen ausgezeichneten Sätzen (den Axiomen) mittels gewisser Schlußregeln ableitbar ist. Formal ist der Beweis der Formel F nichts anderes als eine endliche Folge von Formeln, deren jede entweder ein Axiom oder Ergebnis der Anwendung einer Schlußregel auf zwei vorangehende Formeln ist, und deren letzte Formel F selbst ist.

Die nicht-triviale Frage nach der Leistungsfähigkeit beider Verfahrensweisen ist von Logikern wie u.a. *Gödel* (1930) beantwortet worden: Beide Methoden sind äquivalent oder gleich leistungsfähig. D.h. alle (im modelltheoretischen Sinn) als allgemeingültig anerkannten Formeln sind auch (im beweistheoretischen Sinn) beweisbar (das ist die sog. logische Vollständigkeit), und umgekehrt sind alle beweisbaren Formeln auch allgemeingültig (das ist die sog. logische Widerspruchsfreiheit).

Es haben sich neben der Logik 1. Stufe durch die Hinzunahme weiterer Operatoren, deren Argumente Aussagen sind, noch andere Logiken entwickelt, die hier wenigstens Erwähnung finden sollen. Hierzu gehören Modallogiken (mit den Modaloperatoren „es ist notwendig, daß“, „es ist möglich, daß“, „es ist unmöglich, daß“), epistemische Logiken (mit den epistemischen Operatoren „a weiß, daß“, „a glaubt, daß“) sowie die für Juristen besonders interessanten Normenlogiken oder deontischen Logiken (mit den deontischen Operatoren „es ist geboten, daß“, „es ist erlaubt, daß“, „es ist verboten, daß“). Insbesondere in den deontischen Logiken treten eine Reihe von z.T. immer noch ungeklärten Grundlagenproblemen auf, etwa schon bei der Festlegung des Argumentbereichs für die deontischen Operatoren. Operieren diese tatsächlich auf Aussagen?

(1) Nimmt man an, daß Gebote, Erlaubnisse und Verbote Normen oder Imperative darstellen, dann operieren die deontischen Operatoren nicht auf Aussagen, sondern auf Handlungen. „Rauchen verboten“ wäre eine solche Norm. Präskriptiven Normen oder Imperativen aber kann man nicht ohne weiteres Wahrheitswerte zuordnen wie den Sätzen der Aussagenlogik. Was aber bedeutet dann die Behauptung, daß eine Norm aus einer anderen *folgt*? Und wie könnte der Satz „Wem es verboten ist, daß Peter raucht, dann raucht Peter“ ausgedrückt werden? — Will man diese Schwierigkeiten vermeiden so sind zwei andere Interpretationen möglich:

(2) Man läßt die deontischen Operatoren auf indikativen Aussagen operieren. Dann sind die deontischen Sätze Normsätze, d.h. deskriptive Aussagen, die die Geltung einer Norm behaupten. Z.B. „Es ist geboten, daß das Gebäude um 18 Uhr geschlossen wird“.

(3) Man läßt die deontischen Operatoren auf Normen oder imperativen Aussagen operieren. Dann sind die deontischen Sätze deskriptive Aussagen über oder Rechtfertigungen von Normen. Z.B. „Es ist angeordnet worden, daß das Dienstgebäude um 18 Uhr zu schließen ist.“ In den beiden letzteren Fällen (2) und (3) könnte den deontischen Aussagen ein Wahrheitswert zugeordnet werden.

Das Beispiel von Fall (2) wäre z.B. dann wahr, wenn ein solches Gebot bestünde; das Beispiel von Fall (3) wäre wahr, wenn eine solche Anordnung über eine Norm bzw. ein Gebot, eine Norm zu erlassen erfolgt wäre. Was jedoch würde man im Fall (2) mit folgendem Satz machen „Es ist geboten, daß  $2 + 3 = 5$ “? Wollte man ihn als sinnlos ausschließen, so müßte man eine inhaltliche Auswahl des Argumentbereichs für die Operatoren vornehmen und etwa nur Sätze zulassen, die Aktionen ausdrücken. — Schwierigkeiten dieser Art sollten hier nur gestreift werden. Sie sind der Grund dafür, daß es die deontischen Logiken bisher zu keinem einheitlichen Logiksystem gebracht haben.<sup>2</sup> — Für die Beschreibung der im Logik-Bereich anzutreffenden KI-Techniken kehren wir wieder zur Logik 1. Stufe zurück.

In der KI sind bereits seit den 50/60er Jahren die verschiedensten automatischen logischen Beweisprozeduren entwickelt worden.<sup>3</sup> Dabei machte man sich den bei der formalen Logik naheliegenden Gedanken zunutze, daß sämtliche Schritte in einem logischen Deduktionsverlauf auf rein syntaktische Zeichenmanipulationsprozesse zurückgeführt werden können. Es gibt dabei Prozeduren, die den gesamten Formalapparat der Logik 1. Stufe (mit allen 7 Operatoren) einbeziehen wie etwa die, die das Bethsche Verfahren der semantischen Tafeln bzw. das analoge der Kleeneschen Form der Sequenzenlogik zugrundelegen,<sup>4</sup> oder Methoden, die ein irgendwie bereits normalisiertes Logik-System benutzen, indem sie — sei es durch Rückführung der Formeln auf z.B. konjunktive, disjunktive, pränex Normalformen, sei es durch anderweitige Elimination bestimmter Operatoren — die logischen Formeln strukturell vereinfachen.<sup>5</sup>

Eine besondere Bedeutung in der KI haben Prozeduren gewonnen, die auf das 1965 von J. A. Robinson<sup>6</sup> entwickelte Resolutionsprinzip zurückgehen, weil sie eine noch stärkere Vereinfachung der logischen Formeln durch Überführung in sog. „clauses“ bewirken. Der Beweis verläuft wie beim Bethschen Verfahren indirekt, d.h. man geht von der Negation der Formel aus. Diese wandelt man in einem ersten Schritt in eine pränex Normalform um, bei der alle Quantoren vor der Gesamtformel stehen und der Operand der Quantoren oder die Matrix (d.h. der quantorenfreie Teil) der Formel eine konjunktive Normalform (also eine Konjunktion von Disjunktionen von Literalen, d.h. von negierten oder nicht-negierten Atomformeln) darstellt. In ei-

nem zweiten Schritt bringt man sie in die sog. *Skolem-Standardform*, d.h. eine pränex Normalform ohne Existenzquantoren. Das erreicht man dadurch, daß man die vorn stehenden Existenzquantoren der Formel streicht und die bisher durch sie gebundenen Individuenvariablen durch Funktionsausdrücke (*Skolem-funktionen*) ersetzt. In einem dritten Schritt zieht man nun die Allquantoren wieder in die Matrix hinein und erhält so eine Menge konjunktiv verknüpfter allquantifizierter Formeln, die aus Disjunktionen von Literalen bestehen. In einem letzten Schritt beseitigt man nun sowohl die Konjunktoren zwischen den Formeln wie auch die Allquantoren vor den Formeln (erstes ist gestattet, wenn man die so entstehende Formelmenge als konjunktiv miteinander verknüpft deutet, letzteres, wenn man alle Individuenvariablen als universell quantifiziert deutet, was voraussetzt, daß sie eindeutig von Individuenkonstanten unterscheidbar sein müssen) und erhält eine Menge von Disjunktionen von Literalen. Solche Disjunktionen von Literalen heißen Klauseln (*clauses*).

Da es sich um ein indirektes Beweisverfahren handelt, besteht die Deduktionsstrategie nun darin, einen Widerspruch und das heißt: eine inkonsistente Klauselmengenzu herleiten. Die Beweisprozedur benötigt dazu nur zwei Regeln: eine aussagenlogische Regel, die sich auf die Disjunktion bezieht, und eine Substitutionsregel, die sich auf die Einsetzungen für die als allquantifiziert geltenden Individuenvariablen bezieht.

Die aussagenlogische Regel ist die eigentliche *Resolutionsregel*, die eine Zerlegung der Klauseln in immer weniger und immer kürzere Klauseln herbeiführt und auf Paaren von Klauseln operiert. Sie geht auf eine von Herbrand 1930 formulierte Regel zurück und besagt: Kommen in zwei Klauseln zwei bis auf das Vorzeichen (negierte oder nicht negierte Formel) identische Literale vor, so darf man unter Streichung dieser beiden Literale die beiden Klauseln disjunktiv verknüpfen. Die Substitutionsregel wird durch den sog. *Unifikationsal-*

2. zur deontischen Logik vgl.: Kutschera, Franz von: Einführung in die Logik der Normen, Werte und Entscheidungen. Freiburg, München 1973. — Tammelo, Ilmar und Schreiner, Helmut: Grundzüge und Grundverfahren der Rechtslogik. 2 Bde. Pullach bei München bzw. München 1974 und 1977. Herberger/Simon, a.a.O., S. 179ff.
3. Z.B. Wang, Hao: Towards mechanical mathematics. In: IBM Journal of research and development 4 (1960), S. 2-22. — Prawitz, D., Prawitz, H., Voghera, N.: A mechanical proof procedure and its realization in an electronic computer. In: Journal of the Association for Computing Machinery 7 (1960), S. 102-28.
4. Z.B. Dilger, Werner und Schneider, Martin: Automatisierbare und automatisierte Beweisverfahren für die Logik 1. Stufe. Konstanz 1976. Vgl. Kleene, Stephen Cole: Mathematical Logic. New York etc. 1967.
5. Vgl. Bibel, W.: An approach to a systematic theorem proving procedure in first order logic. In: TU München, Bericht Nr. 7207, 1974. Auch in: Computing 12, S. 43-55. — Bibel kommt mit drei Operatoren (Negation, Disjunktion und Existenzquantor) aus.
6. Robinson, J. A.: A machine oriented logic based on the resolution principle. In: Journal of the Association for Computing Machinery 12 (1965), S. 23-41.

gorithmus vorgenommen, der ein Herstellen von bis auf das Vorzeichen identischen Literalen auch für prädikatenlogische Literale (aus Prädikat- und Individuenzeichen bestehende Literale) bewirken soll, indem er durch Substitutionen die entsprechenden Literale einander angleicht oder „unifiziert“.

Das Resolutionsprinzip besteht also in einer gezielten Anwendung des Unifikationsalgorithmus, um Resolutionschritte zu ermöglichen. Die indirekte Deduktionsstrategie besteht darin, die Inkonsistenz der Klauselmengen durch einen Widerspruch aufzuzeigen. Dies geschieht so, daß man die Klauselmengen bis auf zwei Grundklauseln zurückzuführen versucht, die jeweils nur noch ein bis auf das Vorzeichen identisches Literal enthalten. Dies ist ein formaler Widerspruch, und durch eine letzte Anwendung der Resolutionsregel ergibt sich die leere Klauselmengen als Abbruchkriterium. Die Ausgangsformel ist damit (indirekt) bewiesen.

Diese Hinweise sollen genügen, um deutlich zu machen, daß die gesamte Deduktionsmethode der Logik 1. Stufe hier auf matching-, d.h. Vergleichsvorgänge bzgl. Prädikat-, Satz- oder Vorzeichen, Substitutionsvorgänge, Resolutionsvorgänge und Kombinationsvorgänge zurückgeführt wird, die eine Programmierung mit relativ wenig Aufwand gestatten. Auf Verfeinerungen und Variationen dieses Verfahrens wie die „resolution with selected literals“<sup>7</sup>, die Konnektionsgraphen-Methode, die Lock-Resolution oder die Horn-Clause-Logik<sup>8</sup> sei hier noch wegen ihrer momentanen Bedeutung in der KI hingewiesen.

Alle automatischen Theorem-Beweiser können jedoch eine prinzipielle Schranke der Logik 1. Stufe nicht überspringen, die der 1931 von Gödel und 1936 allgemeiner von Church bewiesenen Unentscheidbarkeit. Entscheidbar ist ein Logiksystem, wenn es sowohl für alle gültigen wie für alle nicht-gültigen Formeln eine effektive Beweisprozedur gibt, d.h. eine Prozedur, die dies nach endlich vielen Schritten zeigt. Während die Aussagenlogik entscheidbar ist, ist es die Prädikatenlogik (die Logik 1. Stufe) nicht mehr. Zwar gibt es tatsächlich für alle gültigen Formeln eine effektive Beweisprozedur, jedoch gibt es sie nicht für alle nicht-gültigen Formeln. Diese prinzipiellen Einschränkungen gelten natürlich auch für jede Maschine und für jeden Algorithmus. Fragt man daher nach der Gültigkeit einer Formel, so gibt es im positiven Fall auch immer einen Algorithmus, der die positive Antwort nach endlich vielen Schritten liefert. Es gibt also Ja-Maschinen. Im negativen Fall jedoch (wenn die Formel nicht gültig ist), gibt es nicht immer einen solchen Algorithmus. Hier kann das Verfahren weiterlaufen, ohne daß es sicher ist, ob es jemals zum Stillstand kommen wird. Das heißt: Es gibt keine Nein-Maschinen.

#### b. Expertensysteme

Sind solche die Grenzen eines Logiksystems betreffende Fragen allenfalls für den formalen Logiker oder Mathematiker interessant, so dürften sie kaum für den wissenschaftlichen Praktiker, der logische Verfahren anwendet, von Belang sein. In der Regel hat er es mit

Sätzen zu tun, die tatsächlich entscheidbar sind. Ja selbst Eigenschaften wie die Vollständigkeit sind für ihn nicht von der Wichtigkeit wie für den theoretischen Logiker. Es kommt für ihn gewöhnlich nicht darauf an, alle gültigen Formeln überhaupt beweisen zu können, sondern lediglich die für sein Wissensgebiet interessanten. So ist das der Programmiersprache PROLOG zugrundeliegende Logik-System nicht vollständig, also schwächer als das der 1. Stufe. Somit läßt sich in PROLOG zwar nicht mehr jede gültige Formel beweisen, jedoch wird das in Kauf genommen, um in den gewöhnlichen Fällen effizientere Prozeduren entwickeln zu können.<sup>9</sup> Ebenso gibt es automatische Frage-Antwort-Systeme (Frage-Antwort-Systeme können ja als logisch-deduktive Systeme konzipiert werden, in denen die positive Antwort auf jede Ja-Nein-Frage deduktiv aus dem vorhandenen Wissen abgeleitet werden kann), die Unvollständigkeit in Kauf nehmen, um nicht bei möglichen Widersprüchen in der Wissensbasis jede beliebige Frage mit „ja“ beantworten zu müssen. Vielmehr soll auch dann die Beantwortung der Frage von gewissen semantischen Übereinstimmungen zwischen Frage und Wissensbasis abhängen. In der Praxis dürfte es ja auch kaum vorkommen, etwa die Sätze „London liegt an der Themse“ und „London liegt nicht an der Themse“ heranzuziehen, um aus ihnen auf die Frage „Ist Paris die Hauptstadt Frankreichs?“ die Antwort „ja“ logisch zu deduzieren, eine Deduktion, die in einem vollständigen Logiksystem tatsächlich korrekt ist.

Auch Expertensysteme benutzen gewöhnlich keine vollständigen automatischen Theorem-Beweiser, sondern legen schwächere, logisch unvollständige Deduktionssysteme zugrunde. Auf der anderen Seite sind sie in bezug auf ihre Schluß- oder Inferenzfähigkeit wesentlich reichhaltiger. Expertensysteme erheben den Anspruch, in bestimmten Wissensbereichen Wissen und Wissensbearbeitungsfähigkeit eines Experten, im wissenschaftlichen Bereich: eines kompetenten Wissenschaftlers, simulieren zu können.

Expertensysteme sind in der Regel sog. wissensbasierte Systeme (*knowledge-based systems*), die sich die neuere (im Abschnitt III 2 besprochene) Form der deklarativen Wissensrepräsentation zunutze machen, im Gegensatz zu sog. datenbasierten Systemen (*database systems*), die lediglich in der Lage sind, bestimmte eingegebene Daten mit Hilfe einer relativ starren Bearbeitungsprozedur zu verarbeiten. Deren Wissen besteht nämlich in nichts anderem als in der korrekten Bearbeitung eingegebener Daten gemäß einer intern vorhandenen Prozedur. Deshalb unterscheidet man bei Expertensystemen zwei Komponenten: die Wissensbasis (die die Fakten eines Wissensbereichs enthält) und die Inferenzmaschine, die „inference engine“ (die eine

7. Kowalski, R. und Kuehner, D.: Linear Resolution with Selection Function. Mathematics Unit, Edinburgh University. 1970.

8. Eine Horn-Clause ist eine Klausel mit höchstens einem positiven Literal.

9. Vgl. Sowa, a.a.O. S.198.

Reihe von Inferenzregeln enthält, die auf der Wissensbasis operieren).

Auch wenn nun — wie gerade betont — die Inferenzfähigkeit eines Expertensystems in logischer Hinsicht begrenzt ist, so ist dies deshalb kein entscheidender Nachteil, weil auch der praktisch arbeitende Wissenschaftler nur selten ausschließlich logische Regeln für seine Begründungen heranzieht, vielmehr „inhaltsgeleitet“ schließt, also semantische Überlegungen mitbenutzt. Er darf dabei zwar nicht „gegen die Denkgesetze verstoßen“, ein — wie der Jurist weiß — als Revisionsgrund geahndeter Verstoß,<sup>10</sup> aber für eine Kontrolle zu diesem Zweck dürfte die Logik-Basis der Expertensysteme auch ausreichen. Jedoch muß er auch die Beschränkung rein logisch-deduzierender Systeme vermeiden, die jeder mit empirischen Daten umgehende Wissenschaftler kennt: Durch ein rein logisches Verfahren kann man niemals — mit Carnap zu reden — (empirischen) Gehalt (d.h. Wissen) gewinnen.<sup>11</sup> Expertensysteme erreichen dies dadurch, daß neben den deduktiven Inferenzregeln (*deductive inference rules*) auch induktive Inferenzregeln (*inductive inference rules*) in die Inferenzmaschine eingebaut sind. Die verallgemeinernde Induktion (vgl. Abschnitt III 1) gehört zu den wichtigsten Verfahren der empirischen Wissensgewinnung. Zu diesem Zweck enthalten Expertensysteme Generalisierungsregeln, die es gestatten, aus speziellen Faktenbehauptungen (d.h. Beobachtungsdaten oder Beschreibungen von einzelnen Sachverhalten) auf allgemeine Behauptungen wie Hypothesen oder Theorien induktiv zu schließen, derart, daß diese Fakten und mögliche andere dann wieder deduktiv aus den Hypothesen oder Theorien folgen, d.h. logisch ableitbar sind.<sup>12</sup> Mit Hilfe solcher Ableitungen kann dann durchaus neues Wissen (d.h. im Carnap'schen Sinn: empirischen Gehalt besitzendes Wissen) gewonnen werden, nämlich jenes, welches bei der früher vorgenommenen induktiven Generalisierung selbst nicht berücksichtigt wurde.

Im Zusammenhang mit induktiven Methoden beziehen Expertensysteme auch statistische Verfahren, wie sie bei der Auswertung von Experimenten oder Erhebungen oder bei der Prüfung von Hypothesen eine Rolle spielen können, mit ein, sowie Verfahren der Wahrscheinlichkeitsrechnung und probabilistischen Logik. Die probabilistische Logik läßt im Gegensatz zur „klassischen“ nicht nur zwei Wahrheitswerte für Aussagen zu, sondern graduell unterschiedliche Bewertungen von 0 bis 1, je nach Wahrscheinlichkeit des Eintretens des durch die Aussage beschriebenen Ereignisses. Hinzu kommt die in jüngster Zeit von L. A. Zadeh entwickelte sog. „fuzzy logic“.<sup>13</sup> Auch hier wird ein gradueller Wertebereich von 0 bis 1 zugrundegelegt, der sich jedoch nicht auf die Wahrheit von Sätzen, sondern auf den Grad bezieht, bis zu dem ein Element als zu einer Menge (*fuzzy set*) gehörig gilt. *Fuzzy logic* bezieht sich also auf unscharfe Begriffe und Mengen oder Kontinuum-Teile mit unscharfen Grenzen, so daß für beliebige Elemente nicht sicher feststeht, inwieweit sie zu der Menge oder dem Kontinuum-Teil gehören oder nicht. Solche unscharfen Begriffe werden durch Wörter

wie „groß“, „klein“, „alt“, „jung“ bezeichnet. Um von Wörtern der Sprache bezeichnete Grade auszudrücken, werden daher hier zusätzliche unscharfe Quantoren wie „viele“, „die meisten“, „wenige“, „fast alle“ zugelassen.

Inferenzformen wie die der *fuzzy logic* sind stark an Schlußweisen angelehnt, wie sie in natürlich-sprachlichen Argumentationsverläufen eine Rolle spielen. Es sind Formen des sog. approximativen Schließens. In der KI ist es üblich, für den Approximationsgrad einen numerischen Wert, den „certainty-factor“ anzugeben.

Weitere aus den natürlichen Sprachen in Expertensysteme übernommene Schlußformen werden als plausibles Rasonieren (*plausible reasoning*) bezeichnet, welches stark an inhaltliche Schlußweisen der natürlichen Sprachen, das sog. „common sense reasoning“ angelehnt ist.<sup>14</sup> Aus Schanks Beispiel „John gab Mary eine Aspirin-Tablette“ läßt sich z.B. plausibel auf die folgenden Aussagen schließen: „John glaubt, daß Mary eine Aspirin-Tablette wünscht“, „Mary ist krank“, „Mary möchte, daß es ihr besser geht“ und „Mary wird eine Aspirin-Tablette einnehmen“.

Hierher gehören schließlich auch Inferenzmethoden wie der Analogie-Schluß, das *argumentum a fortiori* oder ähnliche in der Jurisprudenz geläufige Schlußformen und das unvollständige Schließen, z.B. das Enthymem. In der KI sind unvollständige Schlußweisen unter dem Namen „default reasoning“ bekannt. Alle solche Schlußformen lassen sich zwar bei gewissen Annahmen der Prämissenvervollständigung oder Prämissenrechtfertigung in eine logische Form bringen (beim Enthymem, indem man die „gemeinte“, aber fehlende Prämisse hinzufügt, beim Analogieschluß, indem man etwa bestimmte Bedingungen für die in den Prämissen vorkommenden Relationen angibt), jedoch liegt das Problem oft in der Frage, inwieweit solche Annahmen zulässig sind und inwieweit sie aus bestimmten Wissensdaten folgen.

Expertensysteme versuchen also, das im weitesten Sinn inhaltliche oder qualitative Schließen in den Griff zu bekommen, indem sie die in den sprachlichen Formen versteckten semantischen Bezüge mitberücksichtigen. (Es ist klar, daß konzeptuelle Graphen und semantische Netze hier eine besondere Bedeutung erlangen können.) Damit ist es ihr Ziel, sich dem Ideal von natürlicher Sprache verstehenden Systemen (*natural language understanding systems*) anzunähern.

10. Vgl. Herberger, Maximilian und Simon, Dieter, a.a.O. S. 17.

11. Carnap. Symbolische Logik, S. 21. Der Gehalt ist um so größer, je mehr Fälle er ausschließt.

12. Im Sinne der sog. deduktiv-nomologischen Erklärung: vgl. Stegmüller, Wolfgang: Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Bd I. Berlin etc. 1969: Kapitel I.

13. Zadeh, Lofti A.: Fuzzy logic and its application to approximate reasoning. In: Information Processing 74. Amsterdam 1974. S. 591-594. — Vgl. Gardner, Martin: Logic Machines and Diagrams. Brighton/Sussex 1982. S. 146ff.

14. Vgl. Schank, Roger C. und Nash-Webber, Bonnie L. (Ed.): Theoretical Issues in Natural Language Processing. Association for Computational Linguistics 1975. Vgl. Sowa, a.a.O. S. 19.

Im Zusammenhang damit steht, daß Expertensysteme intendieren, eine möglichst dem natürlichen Kommunikationsprozeß angeglichene Kommunikation zwischen Maschine und Benutzer zu ermöglichen. Waren herkömmliche Frage-Anwort-Systeme zunächst so konzipiert, daß der Benutzer zu einem bestimmten Wissensbereich Fragen stellen konnte, die das System aufgrund seiner Inferenzfähigkeit beantwortete, so versuchen Expertensysteme, eine variable Kommunikation zwischen Benutzer und System zu ermöglichen, d.h. einen interaktiven Wechsel im Frage-Antwort-Verhalten, der zudem implizites Umweltwissen miteinbezieht. Man spricht unter diesem Aspekt auch von Dialogsystemen.

Voraussetzung hierfür ist, daß auch bei der zwischen Maschine und Benutzer verwendeten Kommunikationssprache eine Annäherung an natürliche Kommunikationsformen vorgenommen wird. Dem menschlichen Benutzer soll das mühsame Erlernen einer Programmiersprache erspart bleiben. Daher benutzen manche Expertensysteme im englischsprachigen Raum als Kommunikationssprache bereits ein formalisiertes Englisch, etwa die von *Fain* und anderen entwickelte Version ROSIE oder die von *Skuce* entwickelte Version LESK.<sup>15</sup> Bei ROSIE z.B. ist in erster Linie die Verwendung funktionaler Ausdrücke wie des Hilfsverbs „is“, des bestimmten Artikels „the“ oder von Präpositionen wie „of“ festgelegt. Der bestimmte Artikel muß beispielsweise immer auf eine vorher erwähnte Entität desselben Typs verweisen. Es handelt sich also hier um ein im Hinblick auf natürliche Sprechweisen genormtes Englisch, welches den Benutzer ohne große Anpassungsschwierigkeiten in die Lage versetzen soll, Fragen an das System zu richten, Antworten des Systems zu verstehen, aber auch neues Wissen in das System einzugeben.

Damit ergibt sich ein weiteres Merkmal für Expertensysteme: Sie haben keine feste, unveränderliche Wissensbasis, sondern das zugrundeliegende Wissen kann ständig durch Neueingabe seitens des Benutzers erweitert werden. Man strebt hier ähnliche Formen der Erweiterung der Wissensbasis an, wie sie dem Menschen als Instruktion durch einen Lehrer (*learning by instruction*) oder als Instruktion durch Erfahrung (*instruction by experience*) zur Verfügung stehen (wenn man an die Einbeziehung von Sensoren in Expertensysteme denkt, vgl. Abschnitt III 1). Es handelt sich somit um zumindest der Tendenz nach „lernende Systeme“. Diese Flexibilität in der Behandlung und Verwendung der Wissensbasis zeigt sich zudem daran, daß es sowohl Expertensysteme gibt, die eine leere Wissensbasis haben (*expert-system-shells*) und die erst nach Anreicherung mit spezifischen Wissensbasen benutzbar werden, wie auch Systeme, die mehrere verschiedene Wissensbereiche (*knowledge sources*) zunächst getrennt bearbeiten, welche dann erst über ein sog. „blackboard“ miteinander verbunden werden.

Aufgrund solcher Eigenschaften zeigt es sich, daß die für den Dialog mit dem Benutzer konzipierten Expertensysteme in besonderer Weise Planungs-, Lern- und Problemlösungsvorgänge zumindest partiell simu-

lieren können, wie sie ständig auch im wissenschaftlichen Alltag auftreten. Jedenfalls dürften sie als entscheidungsunterstützende Instrumente von nicht zu unterschätzendem Wert sein. Der wissenschaftliche Benutzer kann z.B. das durch die Inferenzmaschine erschlossene Wissen persönlich weiterverarbeiten, d.h. daraus durch Assoziation mit nicht-eingebauten Wissensbereichen Folgerungen ziehen und diese dann wieder als neues Wissen der Wissensbasis des Systems hinzufügen, um es dem Inferenzmechanismus zu unterwerfen. So hätte man ein die wissenschaftlichen Problemlösungs-, Entscheidungs- und Planungsvorgänge interaktiv ergänzendes Instrument gewonnen.

Daß die Expertensysteme diese Einbettung in Planungsvorgänge intendieren, beweist die Tatsache, daß für die Wissensbearbeitung und -begründung neben den Inferenzmechanismen im engeren Sinne auch Generalstrategien für Problemlösung und Planung berücksichtigt werden, die eine lange Tradition in der wissenschaftlichen Praxis besitzen: So kennen Expertensysteme einerseits die Planungsstrategie der Rückwärtsverkettung (*backward chaining*), bei der man vom Ziel ausgeht und durch dessen Zerlegen in Teilziele („subgoalings“ genannt) dieses Ziel auf elementarere Fakten zurückzuführen versucht. Die oben erwähnte indirekte Beweismethode ist etwa ein solches Zerlegen des Beweisziels in Teilziele. Andererseits kennen sie umgekehrt die Vorwärtsverkettung (*forward chaining*), bei der man von den Fakten der Wissensbasis auszugehen versucht, um von da aus ein Planungsziel zu erreichen. Axiomatische Beweise, die von den Axiomen als Wissensfakten ausgehen, um aus ihnen mit Hilfe von Deduktionsregeln kompliziertere Theoreme zu erzeugen, kann man etwa als eine solche kombinierende Methode des *forward chaining* verstehen.

Berücksichtigt man zudem, daß in die Expertensysteme alle hier in hierarchischer Reihenfolge besprochenen Techniken des Vergleichs, der Klassifikation, der Erzeugung von konzeptuellen Beziehungen in Form von Graphen oder Netzen Eingang finden können, so dürften Expertensysteme heute als die wohl komplexesten Formen des Umgangs mit Wissen innerhalb der KI gelten.

Eines der am häufigsten genannten Expertensystem ist das von *Shortliffe* 1976 entwickelte medizinische System MYCIN,<sup>16</sup> welches gestattet, im Dialog mit einem Benutzer bakterielle Erkrankungen zu diagnostizieren und Therapievorschläge zu entwickeln.

*Feigenbaum* hat 1977 für den Bereich der KI, der sich mit Expertensystemen befaßt, den Terminus „knowledge engineering“ geprägt. Die Entwicklung des knowledge engineering ist noch in vollem Gang.

15. *Fain, J. D., Hayes-Roth, F., Rosenschein, S., Sowizral, H. und Waterman, D.*: The ROSIE Language Reference Manual. The Rand Corporation, N-1647-ARPA. 1981. — *Skuce, Douglas R.*: LESK: a language synthesizing natural language, computer language, and logic. COLING 82 Abstracts. 1982. S. 262–65. Vgl. *Sowa, a.a.O.* S. 326–28.
16. *Shortliffe, Edward Hance*: Computer-Based Medical Consultations: MYCIN. New York 1976.