

KI-VERFAHREN ZUR UNTERSTÜTZUNG DER ÄRZTLICHEN URTEILSBILDUNG

Wolfgang Wahlster
Universität Hamburg¹

ZUSAMMENFASSUNG. Expertensysteme sind wissensbasierte KI-Systeme, die Expertenwissen und die darauf beruhenden Fähigkeiten maschinell verfügbar machen. Der Aufsatz gibt einen einführenden Überblick über Expertensysteme, die zur Unterstützung der ärztlichen Urteilsbildung entwickelt wurden. Es wird der Forschungs- und Entwicklungsstand im Bereich der Inferenz-, Planungs-, Erklärungs-, Wissenserwerbs- und Dialogkomponenten medizinischer Expertensysteme dargestellt. Die in medizinischen Expertensystemen verwendeten Wissensquellen und ihre Codierung in Wissensrepräsentationssprachen wie Produktionensystemen, Semantischen Netzen, Frame-Systemen, Inferenznetzen, Actor-Systemen und PLANNER-artigen Programmiersprachen werden skizziert. Zum Schluß werden die Anwendungs- und Forschungsperspektiven des vorgestellten Teilgebietes der Medizinischen Informatik und Künstlichen Intelligenz diskutiert.

Medizinische Expertensysteme als wissensbasierte KI-Systeme

Während sich die Informatik ganz allgemein mit der systematischen Verarbeitung von Information mit Hilfe von Rechenanlagen beschäftigt, werden im Teilgebiet *Künstliche Intelligenz* (KI) speziell solche Informationsverarbeitungsprozesse untersucht, die in besonders starkem Maße Strategien menschlicher Intelligenz voraussetzen (vgl. [50],[4], [29]). Eines der Fachgebiete der KI, iR dem erste Anwendungserfolge verzeichnet werden können, ist die Entwicklung von Expertensystemen (vgl. [26], [10], [34]).

Als *Expertensysteme* bezeichnet man KI-Systeme, die Expertenwissen und die darauf beruhenden Fähigkeiten maschinell verfügbar machen. Dabei wird unter *Wissen* in der KI eine Ansammlung von Kenntnissen, Erfahrungen und Problemlösungsmethoden verstanden, die den Hintergrund für komplexe Informationsverarbeitungsprozesse bildet. Das Wissen besteht aus Daten über Objekte, Relationen und Prozesse. Obwohl die Wahl einer problemgerechten Darstellung von Daten eine allgemeine Fragestellung innerhalb der Informatik ist, stellt sich das Problem der *Repräsentation von Wissen* (vgl. [23], [27], [42]) bei der Konstruktion von Expertensystemen verschärft, da solche Systeme auf einen umfangreichen Wissensfundus zurückgreifen müssen, der aus vielen heterogen strukturierten Einheiten bestehen kann.

In der KI wurden im Teilbereich 'Knowledge Engineering' verschiedene Hilfsmittel zur systematischen Repräsentation von Wissen entwickelt, die man als *Wissensrepräsentationssprachen* bezeichnet. Die durch eine Wissensrepräsentationssprache definierten Ausdrücke nennt man *Repräsentationskonstruktionen*. Die Gesamtheit an Wissen, die einem KI-System zur Verfügung steht, nennt man *Wissensbasis*. Die Wissensbasis gliedert sich in *Wissensquellen*, die wiederum aus einzelnen *Wissenseinheiten* bestehen. Wissen, das sich auf anderes Wissen innerhalb der Wissensbasis bezieht, nennt man *Metawissen*. Es sind im allgemeinen mehrere Metaebenen zu unterscheiden.

Expertensysteme sind *wissensbasierte Systeme*, deren wesentlichen Bestandteile eine Wissensbasis und eine *Inferenzkomponente* sind. Die Fähigkeit eines KI-Systems, eine Performanz auf Expertenniveau zu erreichen, hängt nur in geringem Maße von den in ihm implementierten allgemeinen Problemlösungsmethoden ab, sondern in erster Linie vom Umfang und semantischen Gehalt seiner Wissensbasis. Expertensysteme unterscheiden sich von traditionellen Informationssystemen u.a. dadurch, daß sie über einen Bestand an allgemeinem Hintergrundwissen verfügen und für komplexe,

¹Der vorliegende Aufsatz entstand im Rahmen des Projektes HAM-ANS, das mit Mitteln des BMFT gefördert wird.

heterogene Wissensbereiche, aber weniger für homogene Massendaten entwickelt werden. Abstrakt betrachtet, stellen Expertenwissen ein Kommunikationsmedium zwischen dem Benutzer und den für den Aufbau der Wissensbasis verantwortlichen Experten dar.

Für viele Anwendungen aus Wissenschaft und Technik wurden in der KI Expertensysteme entwickelt, z.B. um Chemikern bei der Strukturanalyse chemischer Verbindungen zu helfen (DENDRAL, [5]), um Geologen bei der Suche nach Erzlagerstätten zu unterstützen (PROSPECTOR, [18]), um Bauingenieure z.B. bei der Brückenplanung zu entlasten (SACON, [2]), um Informatikern bei der Konfigurierung von Rechensystemen zu helfen (R1 für die VAX, [24]), um Juristen im Körperschaftsrecht zu beraten (TAXMAN, [22]), um Elektrotechnikern bei der Analyse von Schaltkreisen zu helfen (EL, [38]) und schließlich auch um Ärzte bei ihrer diagnostischen und therapeutischen Tätigkeit zu unterstützen (vgl. [21], [12]).

Ziel des vorliegenden Aufsatzes ist es, Expertensysteme als eine Möglichkeit zur Unterstützung der ärztlichen Urteilsbildung einzuführen und einen Überblick zum Entwicklungsstand medizinischer Expertensysteme zu geben.

Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. das Expertensystem PUFF, [30]) sind medizinische Expertensysteme als interaktive *Beratungssysteme* konzipiert. (vgl. Fig. 1, [37]) Für den Einsatz als Beratungssystem muß ein Expertensystem zusätzlich mit *Beratungskompetenz* (vgl. [34]) ausgestattet werden, d.h. es muß dazu in der Lage sein, Beratungswunsch und -ziel des Benutzers zu verstehen, sein Expertenwissen für den Benutzer verständlich zu machen und seine Lösungsvorschläge auf Anfrage zu erklären. Die Beratungskompetenz wird in Expertensystemen durch die Integration von *Dialog-* und *Erklärungskomponente* aufgebaut.

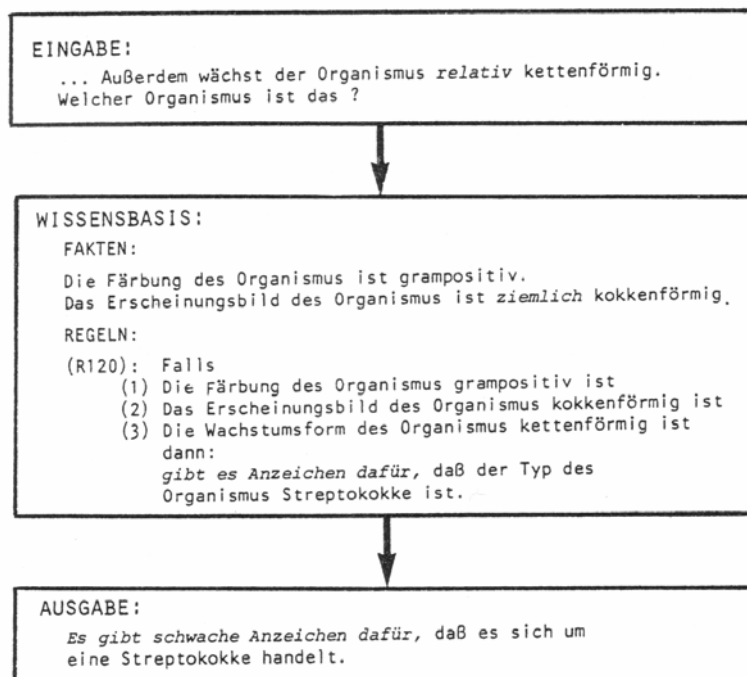


Fig. 1: Ein Beratungsdiallog mit MYCIN

Prinzipiell gibt es zwei wesentliche Motivationen zur KI-Forschung:

- eine technische Motivation: die Entwicklung von Systemen, die solche Aufgaben übernehmen können, von denen gegenwärtig gesagt wird, sie erforderten Intelligenz
- eine theoretische Motivation: die wissenschaftliche Beschreibung und Erklärung von kommunikativen und kognitiven Prozessen mit informatischen Mitteln.

Während die technische Motivation zur Entwicklung von *Leistungsmodellen* führt, in denen lediglich das Ein-/Ausgabeverhalten im Vordergrund steht, wird bei einer theoretischen Motivation der KI-Forschung eher die Simulation kommunikativer und kognitiver Prozesse durch *Funktionsmodelle* angestrebt, die Analogien zwischen der Arbeitsweise des Modells und des nachgebildeten Originals enthalten. Die hier betrachteten Expertensysteme sind als Ergebnisse anwendungsorientierter KI-Forschung primär als Leistungsmodelle konzipiert, bei denen einige Überlegungen aus dem Bereich der Simulation kognitiver Prozesse bei der ärztlichen Entscheidungsfindung einfließen. Keines der hier betrachteten KI-Systeme erhebt den Anspruch, ein vollständiges Funktionsmodell für den kognitiven Prozeß der ärztlichen Urteilsbildung darzustellen.

Die in der KI-Forschung entwickelten Expertensysteme sollen und können keineswegs das ärztliche Gespräch mit dem leidenden Patienten ersetzen. Vielmehr dienen Expertensysteme in der klinischen Situation dazu:

- das Qualitätsniveau der Diagnostik zu erhöhen
- den Diagnoseprozeß zu beschleunigen
- den Arzt von langwierigen Dosierungsberechnungen zu entlasten
- neuste medizinische Forschungsergebnisse im Not- und Behandlungsfall unmittelbar zur Verfügung zu stellen
- Fehldiagnosen zu vermeiden

Durch Expertensysteme kann auch die medizinische Lehre und Forschung unterstützt werden [7], da sie nicht nur das aus Lehrbüchern und der Fachliteratur hervorgehende Wissen, sondern erstmals auch eine explizite Repräsentation von Heuristiken, Strategien und Erfahrungswerten enthalten, die sich der Mediziner bisher nur durch eine langjährige praktische Tätigkeit aneignen konnte. Darüberhinaus hat die Repräsentation von Wissen in KI-Systemen gegenüber der Fachliteratur den Vorteil, daß sie kompakter, jederzeit verfügbar und für eine maschinelle Verarbeitung geeignet ist.

Die Architektur medizinischer Expertensysteme

Um die Pilotversion eines Expertensystems, das lediglich aus einer Wissensbasis und einer Inferenzkomponente besteht, in ein produktreifes Beratungssystem zu überführen, müssen die in Fig. 2 zusätzlich angegebenen Systemkomponenten ergänzt werden.

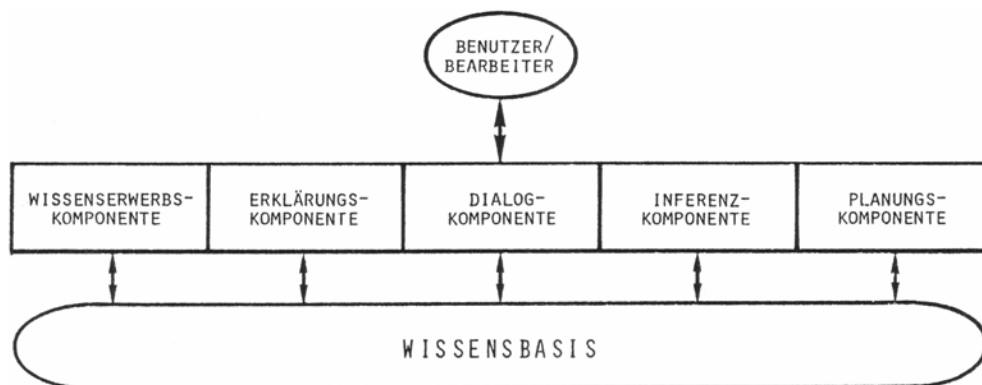


Fig. 2: Komponenten eines Expertensystems

Die Übersetzung der Benutzereingaben in die interne Wissensrepräsentationssprache und die Generierung kommunikativ adäquater Systemantworten wird von der *Dialogkomponente* eines Expertensystems übernommen. Auch die Formulierung von Anfragen des Expertensystems an den Benutzer gehört zu den Aufgaben der Dialogkomponente. Für medizinische Expertensysteme besonders geeignet ist der Einsatz von *natürlichsprachlichen KI-Systemen* (vgl. [43]) die es dem Benutzer

ermöglichen sollen, die medizinische Fachsprache zu benutzen. Da die Anwendung anspruchsvollerer KI-Verfahren zur Sprachverarbeitung mit hohen Betriebsmittelanforderungen verbunden ist, beschränkt man sich beim heutigen Stand der Technologie in der Dialogkomponente von Expertensystemen auf einfache Schlüsselwort- und Pattern-Matching-Verfahren sowie die Aufbereitung vorbereiteter Textpassagen. Mithilfe der *Inferenzkomponente* können Aussagen, die nicht explizit als *Faktenwissen* gespeichert sind, unter Anwendung von *Inferenzregeln* aus dem Faktenwissen abgeleitet werden. Die Inferenzkomponente von Expertensystemen wird meist als *patter-gesteuertes Inferenzsystem* (vgl. [45]) realisiert. Um die *kombinatorische Explosion* von Rechenzeit- und Speicherplatzanforderungen in der Inferenzkomponente zu vermeiden, muß die Anwendung der Inferenzregeln strategisch gesteuert werden. Dabei greift man auf *Metainferenzregeln* (vgl. [18]) zurück, in denen strategisches Wissen codiert ist. Bei der Konstruktion von Inferenzkomponenten für medizinische Expertensysteme sind auch approximative und *nicht-monotone Inferenzen* (vgl. [49]) zu berücksichtigen, da im Diagnoseprozeß häufig mit Unsicherheit behaftete bzw. rein hypothetische Schlußfolgerungen notwendig sind.

Für eine vorgegebene Zielbeschreibung erzeugt die *Planungskomponente* aufgrund von strategischem Wissen eine Folge von Handlungsschritten. Typisch für die in der KI entwickelten Planungssysteme (vgl. [36]) ist, daß das System die von ihm zunächst erzeugten Vorversionen eines Plans mehrfach einer Kritik und Revision unterwirft und den Plan bei veränderten Randbedingungen jederzeit abändern kann. Einsatzbereiche für Planungskomponenten in medizinischen Expertensystemen sind z.B. die Planung des Diagnoseprozesses und die Erstellung des Behandlungsplanes für chronisch Kranke, wobei Randbedingungen wie die Minimierung der Therapiekosten oder des Risikos beim Patienten vorgegeben werden können.

Aufgabe der *Erklärungskomponente* ist es, auf Anfrage eine für den Benutzer verständliche und im jeweiligen Dialogzustand angemessene Erklärung für eine inferenz-basierte Systemantwort zu generieren (vgl. [44]). Da der Arzt bei der Verwertung und Weitergabe von Systemauskünften eine besonders große Verantwortung trägt, ist die durch eine Erklärungskomponente erzielte Systemtransparenz eine Voraussetzung für die Akzeptanz medizinischer Expertensysteme. Der Forschungsschwerpunkt im Bereich von Erklärungskomponenten liegt derzeit auf der Generierung kohärenter, mehrsträngiger Erklärungen auf einer angemessenen Detaillierungsebene, in denen das beim Benutzer vermutete Vorwissen und der Informativitätsgrad berücksichtigt wird (vgl. [44]).

Die *Wissenserwerbskomponente* hat die Aufgabe, den Aufbau, die Erweiterung und die Korrektur der Wissensbasis zu unterstützen. Die Integration einer Wissenserwerbskomponente soll es ermöglichen, Eintragungen in die Wissensbasis allein von einem Experten des jeweiligen Anwendungsgebietes vornehmen zu lassen, ohne daß dieser dabei auf die Hilfe eines Informatikers mit KI-Kenntnissen zurückgreifen muß (vgl. [8], [16]). In medizinischen Expertensystemen umfaßt die Wissenserwerbskomponente eine benutzerfreundliche Schnittstelle zur Eingabe von Faktenwissen, begrifflichem Fachwissen, Inferenzregeln und Inferenzstrategien sowie Möglichkeiten zur Konsistenzprüfung der Wissensbasis und zur experimentellen Validierung des eingegebenen Regelwissens anhand von Testfällen mit vorgegebenen Diagnoseergebnissen. Da letztlich die diagnostischen Fähigkeiten eines Spezialisten weitgehend auf persönlicher Erfahrung und Heuristiken beruhen, die er durch eine langjährige praktische Tätigkeit erworben hat, muß die Wissenserwerbskomponente als interaktives System konzipiert werden, das dem Benutzer Hilfestellungen bei der Explikation seines Spezialwissens anbietet.

Da jede der genannten Komponenten eine Entwicklungszeit von mehreren Mannjahren erfordert, existieren bisher noch keine medizinischen Expertensysteme, in denen alle genannten Komponenten vollständig ausgebaut sind, obwohl in der KI-Literatur für jede Komponente implementierte Beispiele dokumentiert sind. Vielmehr unterscheiden sich die in Fig. 4 zusammengestellten medizinischen Expertensysteme gerade dadurch, daß einzelne der angeführten Komponenten beim Entwurf unberücksichtigt blieben oder nur ansatzweise implementiert wurden.

Die Wissensbasis eines medizinischen Expertensystems besteht aus dem begrifflichen und referentiellen Wissen. Das *begriffliche Wissen* ist weitgehend anwendungsunabhängig und bezieht sich

auf grundlegende medizinische Begriffe, Zusammenhänge und Verfahren, die eine Verständigung mit dem Arzt erst ermöglichen. Das *referentielle Wissen* kann wiederum in anwendungsspezifisches und patientenbezogenes Wissen gegliedert werden. Das *anwendungsspezifische Wissen* setzt sich aus dem Faktenwissen, Inferenzregeln und den Heuristiken eines medizinischen Fachgebietes zusammen. Das *patientenbezogene Wissen* kann aus der Krankenakte des Patienten, den erhobenen Befunden, den aktuellen Angaben des Patienten und/oder den Labordaten bestehen. Falls das Expertensystem als Dialogsystem eingesetzt wird, können als *dialogbezogene Wissensquellen*, in denen während des Dialogs temporär Information gespeichert wird, noch ein Partnermodell, ein Inferenzgedächtnis, der Fokus sowie syntaktische und semantische Dialoggedächtnisse hinzukommen.

Im *Partnermodell* ist Information über das beim Dialogpartner vermutete Vorwissen und seine voraussichtlichen Dialogziele gespeichert (vgl. [35]). Es enthält sowohl Wissen über prototypische Benutzerklassen (z.B. medizinischer Laie, Medizinstudent, Hausarzt, Facharzt, Wissenschaftler) als auch Information über das Dialogverhalten des Benutzers, die aus den bisherigen Dialogen extrahiert wurde. Durch die Integration eines Partnermodells wird ein Expertensystem wesentlich flexibler, da es sein Antwortverhalten auf das jeweilige Benutzerprofil einstellen kann.

Im *Inferenzgedächtnis* (vgl. 44]) wird eine formale Beschreibung der vom Expertensystem durchgeführten Inferenzen gespeichert, um später mithilfe der Erklärungskomponente inferenzbasierte Systemantworten erklären zu können.

Die als *Fokus* bezeichnete Wissensquelle enthält Information über die jeweiligen thematischen Schwerpunkte eines Gesprächsabschnittes (vgl. [15]). Diese Wissensquelle dient u.a. zur Disambiguierung von Benutzereingaben und zur Erzeugung von Kohärenz durch die Dialogkomponente sowie zur Steuerung von Suchprozessen in der Inferenz- und der Planungskomponente.

Die *syntaktischen und semantischen Dialoggedächtnisse* (vgl. [17]) dienen zur Analyse und Generierung von Ellipsen und anaphorischen Ausdrücken. Genauso wie für die oben genannten Systemkomponenten gilt auch für die hier angeführten Wissensquellen, daß in jedem der in Fig. 4 zusammengestellten medizinischen Expertensysteme nur eine spezifische Auswahl der genannten Wissensbereiche realisiert ist.

Wissensrepräsentationssprachen für medizinische Expertensysteme

Zur Darstellung von Wissen in Expertensystemen werden die in der KI zu diesem Zweck entwickelten Wissensrepräsentationssprachen (vgl. [3], [11]) eingesetzt. Es gehört zu den Aufgaben des in der Medizinischen Informatik arbeitenden KI-Spezialisten, die jeweils adäquate Wissensrepräsentationssprache zur Codierung der unterschiedlichen Wissensquellen eines medizinischen Expertensystems zu wählen. Man spricht von einer heterogenen Wissensbasis, falls in einem KI-System verschiedene Wissensrepräsentationssprachen verwendet werden.

Für den Aufbau der in Fig. 4 zusammengestellten medizinischen Expertensysteme wurden folgende Wissensrepräsentationssprachen benutzt:

- Produktionensysteme
- Semantische Netze
- Frame-Systeme
- Inferenznetze
- Actor-Systeme
- PLANNER-artige Programmiersprachen

In dem hier behandelten Teilgebiet der KI sind Produktionensysteme die am häufigsten verwendete Wissensrepräsentationssprache. Ein *Produktionssystem* besteht aus drei Komponenten: einer geordneten Menge von *Produktionen*, einer *Datenbasis* und einem *Interpreter*. Jede Produktion hat die

Form < Bedingung> → < Aktion >. Sowohl die linke als auch die rechte Seite einer Produktion kann Variablen enthalten. Die linke Seite ist ein bedingter Ausdruck, der sich auf den Inhalt der Datenbasis bezieht und, falls er vom Interpreter zu Wahr ausgewertet wird, die in der rechten Seite der Produktion codierten Aktionen auf der Datenbasis auslöst. Da das zu repräsentierende Wissen gerade im medizinischen Bereich meist aus approximativen Inferenzregeln besteht, sind in allen hier betrachteten Produktionensystemen Möglichkeiten zur Spezifikation der *Implikationsstärke* einer Produktion vorgesehen. Die verschiedenen in der KI entwickelten Interpreter für Produktionensysteme können danach unterschieden werden, ob die Produktionen von links nach rechts (Vorwärtsverkettung) oder von rechts nach links (Rückwärtsverkettung) gelesen werden, wie *Regelkonflikte* gelöst werden, ob nur eine Ableitung oder *Mehrfachableitungen* mit *Evidenzverstärkungsoperationen* durchgeführt werden und wie neue Evidenzwerte bei der Anwendung des Modus ponens und der Substitutionsregel berechnet werden (vgl. [44]).

Ein *Semantisches Netz* ist ein bewerteter, gerichteter Graph, in dem semantische Einheiten, die als Knoten des Graphen repräsentiert werden, in verschiedenen semantischen Relationen zueinander stehen, die als bewertete, gerichtete Kanten dargestellt werden. Durch *Partitionierung* von Semantischen Netzwerken können Netzteile zu Einheiten zusammengefaßt werden, zwischen denen dann wiederum semantische Relationen definiert werden (z.B. zur Darstellung von Zeitabläufen). Die Semantik der meist aus einer kleinen Zahl von Kantenprimitiven aufgebauten Graphen wird erst durch die für das Semantische Netzwerk definierten Such-, Traversierungs- und Inferenzalgorithmen spezifiziert. So gehen z.B. die Transitivität der Oberbegriffsrelation und die beschränkte Transitivität der Teil-von-Relation in die über Semantischen Netzen definierten Inferenzprozesse ein.

Frame-Systeme bestehen aus einer Hierarchie von zusammengesetzten Datenstrukturen, die speziell zur Repräsentation von *prototypisches Wissen* entworfen wurden. Solche Prototype-Frames, denen ein eindeutiger Bezeichner zugeordnet wird, sind aus einer Menge von innerhalb des Frames eindeutig bezeichneten Attributen aufgebaut, an die *Deskriptoren*, *Metadeskriptoren* und *objektbezogene Prozedurdefinitionen* gebunden sind. Deskriptoren geben Bedingungen an, die von den Werten der entsprechenden Attribute der Objektframes, die meist durch *partielle Instantiierung* eines Prototype-Frames entstehen, erfüllt sein müssen. Metadeskriptoren ermöglichen die deklarative Darstellung von Eigenschaften der Attribute und Deskriptoren eines Frames. Beispielsweise werden durch Metadeskriptoren diejenigen Deskriptoren gekennzeichnet, die als Voreinstellung (DEFAULT) oder als grundlegendes Merkmal des durch den Frame repräsentierten Konzeptes aufgefaßt werden (CRITERIAL). Die Instantiierung eines Frames und der Vergleich mit anderen Frames kann durch objektbezogene Prozedurdefinitionen gesteuert werden. Außerdem ergänzen diese die in Frame-Systemen enthaltenen *Vererbungsmechanismen* bei der Suche und der Weiterverbreitung von eingegebenen Attributbelegungen.

Inferenznetze sind bewertete, gerichtete Graphen ohne Schleifen und Kreise, deren Kanten als Implikationsrelationen und deren Knoten als Aussagen oder Hypothesen interpretiert werden. In einem Inferenznetz gibt es Knoten mit positiven und negativen Evidenzwerten die der Datenbasis eines Produktionensystems entsprechen, sowie Knoten mit unbekanntem Evidenzwert. Zu jedem Inferenznetz gehört ein Traversierungsalgorithmus, dem die Funktion des Interpreters in Produktionensystemen zukommt. Unter Verwendung von verschiedenen im Rahmen der *Fuzzy Logiken* entwickelten Operatoren zur Verknüpfung von Evidenzwerten werden durch den Traversierungsalgorithmus vom Benutzer vorgegebene Evidenzwerte im gesamten Inferenznetz, das man als ein kompiliertes Produktionensystem auffassen kann, weiterverbreitet.

Der *Actor-Formalismus* ist ein von C. Hewitt (vgl. [20]) entwickeltes Verfahren zur prozeduralen, heterarchisch verteilten Repräsentation von Wissen. Ein Actor-System besteht aus einem Netzwerk kooperierender, jeweils nebenläufiger und unabhängig voneinander sequentiell arbeitender Actors, die aufgrund definierter Kontrollbeziehungen untereinander Botschaften austauschen. Jeder Actor ist eine abstrakte Maschine, die bei Aktivierung durch Eingang einer Botschaft ein sequentielles Programm unter einem lokalen Zustand abarbeitet und danach den lokalen Zustand ändert und/oder Botschaften an Actors absendet (vgl. [33]). Ein Actor-System kann als eine Gesellschaft kooperierender Experten

aufgefaßt werden, in der nebenläufig eine Informationsverarbeitungsaufgabe gelöst wird.

PLANNER-artige Programmiersprachen enthalten zusätzlich zum Sprachumfang von LISP (vgl. [51]) einen Pattern-Matcher, automatische Deduktionsmechanismen, eine Verwaltung für mehrere unabhängige assoziative Datenbasen sowie Möglichkeiten zum *pattern-gesteuerten Prozeduraufruf* zur pattern-gesteuerten Suche und zum gesteuerten oder automatischen *Backtracking*. Insgesamt wurden diese Sprachen ausgehend von PLANNER als sehr hohe Programmiersprachen konzipiert, deren Daten- und Kontrollstrukturen eine flexible Darstellung, eine modulare Organisation und eine effiziente Verarbeitung komplexer Wissensstrukturen fördern sollen.

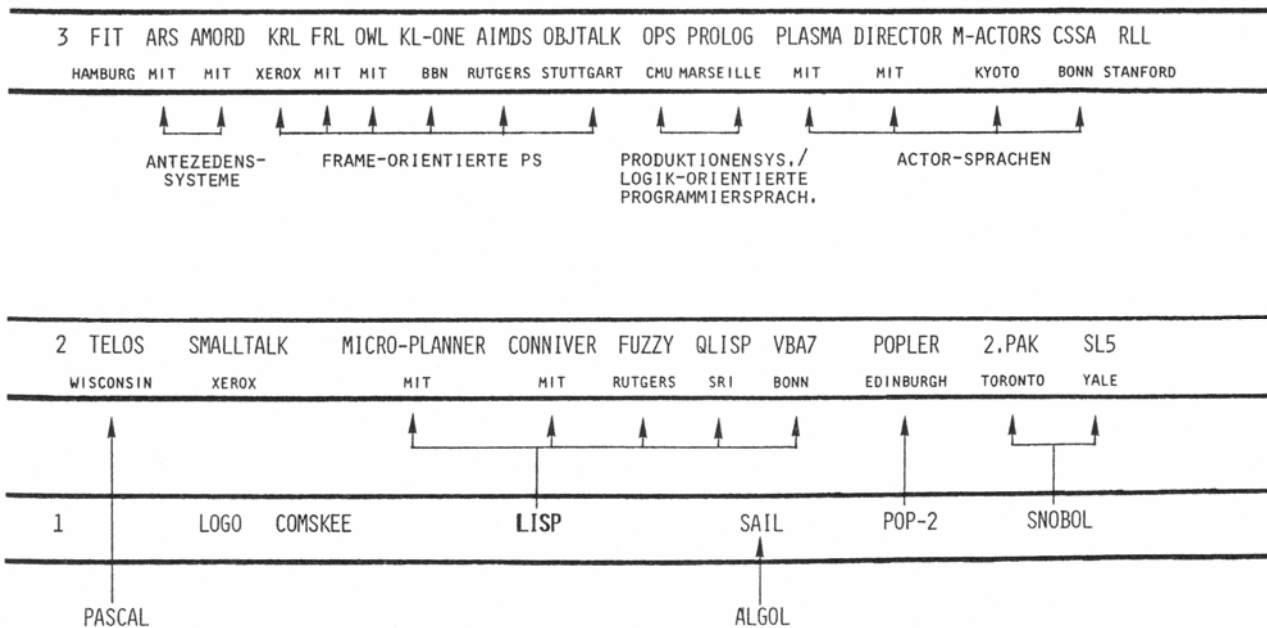


Fig. 3: Drei Generationen von KI-Sprachen

Im strengen Sinne handelt es sich bei den genannten Wissensrepräsentationssprachen um Sprachfamilien, die ein breites Spektrum von verschiedenen Ausprägungen des Grundparadigmas der jeweiligen Repräsentationssprache enthalten. Einige der in der KI entwickelten Wissensrepräsentationssprachen sind in Fig. 3 zusammen mit dem Ort ihrer ersten Implementation verzeichnet.

Obwohl es bereits eine große Zahl von Wissensrepräsentationssprachen gibt, müssen in KI-Projekten wegen spezieller Randbedingungen der zu lösenden Repräsentationsprobleme häufig neue Varianten von KI-Sprachen entworfen werden. Es lag daher nahe mit dem System RLL (Representation Language Language, vgl. [14]) eine programmiersprachliche Umgebung zu schaffen, die den Benutzer bei der Spezifikation der Syntax und Semantik neuer Wissensrepräsentationssprachen unterstützt.

Der Entwicklungsstand medizinischer Expertensysteme

Wie Fig. 4 zeigt, wurden für medizinische Fachgebiete sehr unterschiedlicher Größe Expertensysteme entwickelt. Das Spektrum reicht von großen Fachgebieten wie der Inneren Medizin (INTERNIST, EXPERT/PI) bis zu speziellen Erkrankungen wie der Cholestase (MDX). Entsprechend variiert auch die Größe der Wissensbasis. Die derzeit größte Wissensbasis eines medizinischen Expertensystems ist die von INTERNIST. Sie besteht aus 24 000 Inferenzregeln, die durch weitere 3000 Einheiten referentiellen Wissens und 400 Einheiten begrifflichen Wissens ergänzt werden. Am Ende des Spektrums liegt das System PUFF mit nur 250 Inferenzregeln. Eine Wissensbasis mittlerer Größe (z.B. MYCIN) enthält 500 bis 1000 Inferenzregeln.

Seit zwei Jahren zeichnet sich ein Trend zur Entwicklung von Rahmensystemen ab, die aus einer Verallgemeinerung bisheriger Expertensysteme bestehen und als Werkzeuge zum Aufbau wissensbasierter KI-Systeme dienen sollen. Beispiele für solche Rahmensysteme sind EMYCIN (vgl. [25]), EXPERT (vgl. [48]) und AGE (vgl. [28]).

SYSTEMNAME/LITERATUR	MEDIZINISCHES FACHGEBIET	WISSENSREPRÄSENTATIONSSPRACHE
CASNET [47]	Glaucoma	Inferenznetz
CENTAUR [1]	Auswertung von Lungenfunktionsprüfungen	Frames & Produktionensysteme
DIGITALIS ADVISOR [39]	Digitalis-Dosierung	OWL-Prozeduren
EMYCIN/HEADMED [19]	Präskription von Psychopharmaka	Produktionensystem
EMYCIN/PUFF [30]	Auswertung von Lungenfunktionsprüfungen	Produktionensystem
EXPERT/PI [13]	Innere Medizin	Produktionensystem
EXPERT/Thyroid [13]	Schilddrüsenerkrankungen	Produktionensystem
EXPERT/General Rheumatology [13]	Rheumatologie	Produktionensystem
EXPERT/Connective Tissue Diseases [13]	Erkrankungen des Bindegewebes	Produktionensystem
INTERNIST I/II [32]	Innere Medizin	Produktionensystem
IRIS [41]	Augenheilkunde	Semantisches Netz & Inferenzprozeduren
MDX [6]	Cholestase	Actor-System
MYCIN [37]	Bakterielle Infektionen & Antibiotika-Therapie	Produktionensystem
PIP [40]	Nierenleiden	Frames
VM [9]	Datenauswertung in der Intensivstation	Produktionensysteme

Fig. 4: Medizinische Expertensysteme

Eine effiziente Implementation von Expertensystemen erfordert Speichermedien mit großer Kapazität und kurzer Zugriffszeit sowie Rechnerarchitekturen mit großen Adressräumen (≥ 24 Bits) und Befehlssätzen, die auf die Anforderungen der Symbolverarbeitung abgestimmt sind. Obwohl für die Entwicklung von Expertensystemen z.Z. fast ausschließlich Rechenanlagen vom Typ DECsystem 10 und DECsystem 20 verwendet werden, wird allgemein ein Wechsel zu den speziell in Hinblick auf die genannten Anforderungen entwickelten LISP-Maschinen erwartet (vgl. [46]). Da mithilfe der heute erhältlichen LISP-Maschinen schlüsselfertige Expertensysteme (Hardware und Software) zu einem Preis von rd. 250 TDM hergestellt werden können, ist der dezentrale Einsatz von Expertensystemen

auch in mittleren und kleinen medizinischen Instituten und Krankenhäusern technologisch und ökonomisch möglich geworden.

Die wichtigsten drei Fragen, die in den nächsten Jahren im Bereich medizinischer Expertensysteme durch KI-Grundlagenforschung geklärt werden müssen, lauten:

- Wie kann der Zeit- und Personalaufwand für den Aufbau der Wissensbasis von Expertensystemen reduziert werden?
- Wie können verschiedene medizinische Expertensysteme gekoppelt werden, um durch eine auf breiterem Fachwissen beruhende Gesamtsicht die Diagnosequalität weiter zu erhöhen?
- Welche allgemeinen Hilfsmittel zur Validierung von Expertensystemen gibt es (vgl. [31])?

Ob die dargestellten KI-Techniken nach Klärung dieser Fragen auf breiterer Basis bis hin zu den niedergelassenen Ärzten eingesetzt werden, hängt im Gegensatz zu technischwissenschaftlichen Anwendungen von Expertensystemen weniger von der KI-Forschung, sondern vor allem von empirischen Ergebnissen der Akzeptanz- und Wirkungsforschung ab, durch die u.a. sichergestellt sein muß, daß der Einsatz von Expertensystemen keine negativen Auswirkungen auf die Vertrauenssphäre zwischen Arzt und Patient hat.

Literatur

- [1] Atkins, J.: Prototype and production rules: An approach to knowledge representation for hypotheses formation. In: Proc. of the 6th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, S. 1-3, Tokio, 1979
- [2] Bennet, J., Creary, L., Engelmores, R.S., Melosh, R.: SACON: a knowledge-based consultant for structural analysis. Stanford Univ., Dept. of Computer Science, Memo HPP-78-28, 1978.
- [3] Bobrow, D., Collins, D.A. (eds.): Representation and Understanding: Studies in Cognitive Science. New York: Academic 1975
- [4] Boden, M.A.: Artificial Intelligence and natural man. Hassocks: Harvester 1977
- [5] Buchanan, B.G., Feigenbaum, E.A.: DENDRAL and META-DENDRAL: Their applications dimensions. In: Artificial Intelligence, 11, S. 5-24, 1978.
- [6] Chandrasekaran, B., Gomez, F., Mittal, S., Smith, J.: An approach to medical diagnosis based on conceptual structures. In: Proc. of the 6th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, S. 134-142, Tokio, 1979.
- [7] Clancey, W.J.: Tutoring rules for guiding a case method dialogue. In: Intern. Journal of Man-Machine Studies, 11, S. 25-49, 1979.
- [8] Davis, R.: Applications of meta-level knowledge to the construction, maintenance and use of large knowledge bases. Stanford Univ., Ph.D. Thesis, 1976.
- [9] Fagan, L.M., Kunz, J.C., Feigenbaum, E.A., Osborn, J.J.: Representation of dynamic clinical knowledge: measurement interpretation in the intensive care unit. In: Proc. of the 6th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, S. 260-262, Tokio, 1979.
- [10] Feigenbaum, E.A. : Expert systems: looking back and looking ahead. In: Wilhelm, R. (ed.): GI-10. Jahrestagung 1980, Saarbrücken, Informatik-Fachberichte Nr. 33, Heidelberg: Springer, S. 1-14, 1980.
- [11] Findler, N.V. (ed.): Associative networks. Representation and use of knowledge by computers. New York: Academic, 1979
- [12] Freiherr, G.: The seeds of artificial intelligence: SUMEX-AIM. NIH Publication No. 80-2071, März 1980.
- [13] Goldberg, R.N., Weiss, S.M.: An experimental translation of a large expert knowledge-base. Rutgers Univ., Dept. of Computer Science, Technical Report CBM-TR-110, Mai 1980.
- [14] Greiner, R., Lenat, D.B.: A representation language. In: Proc. of the 1st annual national Conf. on Artificial Intelligence, Stanford, S. 165-169, 1980.
- [15] Grosz, B.J.: The representation and use of focus in a system for understanding dialogs. In: Proc. of the 5th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Cambridge, S. 67-76, 1977.
- [16] Haas, N., Hendrix, G.G.: An approach to acquiring and applying knowledge. In: Proc. of the 1st annual national Conf. on Artificial Intelligence, Stanford, S. 235-239, 1980.

- [17] v. Hahn, W., Hoepfner, W., Jameson, A., Wahlster, W.: The anatomy of the natural language dialogue system HAM-RPM. In: Bole, L. (ed.): Natural Language Based Computer Systems. München/London: Hanser/Macmillan, S. 119-235, 1980.
- [18] Hart, P., Duda, R.: PROSPECTOR - computer-based consultation system for mineral exploration. SRI International, Menlo Park, AI Center, Tech. Note 155, 1977
- [19] Heiser, J.F., Brooks, R.E.: A computerized psychopharmacology advisor. In: Proc. of the 4th annual Artificial Intelligence in Medicine Workshop, Rutgers Univ., S. 68-69, Juni 1978.
- [20] Hewitt, C: Viewing control structures as patterns of passing messages. In: Artificial Intelligence, 8, S. 323-364, 1977
- [21] Kulikowski, C.A.: Artificial intelligence methods and systems for medical consultation. In: IEEE Transact, on Pattern Analysis and Machine Intelligence, VOL-PAMI-2, 5, S. 464-476, 1980.
- [22] McCarty, L.T., Sridharan, N.S., Sangster, B.C.: The implementation of TAXMAN II: An experiment in AI and legal reasoning. Rutgers Univ., Dept. of Computer Sc. , Report LRP-TR-2, 1979.
- [23] McDermott, D.: The last survey of representation of knowledge. In: Proc. of AI SB/ GI Conf. on Artificial Intelligence, Hamburg, S. 206-221, 1978.
- [24] McDermott, J.: R1: an expert in the computer systems domain. In: Proc. of the 1st annual national Conf. on Artificial Intelligence, Stanford, S. 269-271, 1980.
- [25] van Melle, W.: A domain-independent production-rule system for consultation programs. In: Proc. of the 6th Intern. Joint Conference on Artificial Intelligence S. 923-925, Tokio, 1979.
- [26] Michie, D. (ed.): Expert systems in the micro-electronic age. Edinburgh: Univ. Press 1979.
- [27] Mylopoulos, J.: An overview of knowledge representation. In: SIGART Newsletter, No. 74, S. 5-12, 1981.
- [28] Nii, H.P., Aiello, N.: AGE (Attempt to generalize): A knowledge-based program for building knowledge-based programs. In: Proc. of the 6th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, S. 645-655, Tokio, 1979.
- [29] Nilsson, N.: Principles of artificial intelligence. Palo Alto: Tioga 1980.
- [30] Osborn, J., Fagan, L., Fallat, R., McClung, D., Mitchell, R.: Managing data from respiratory measurement. In: Medical Instrumentation, 13, 6, 1979.
- [31] Politakis, P., Weiss, S.M.: A system for empirical experimentation with expert knowledge. Rutgers Univ., Dept. of Computer Sc. , Submitted to IJCAI-81.
- [32] Pople, H.: The formation of composite hypotheses in diagnostic problem solving. In: Proc. of the 5th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Cambridge, S. 1030-1037, 1977.
- [33] Raulefs, P.: Actors und Agenten. In: Rundbrief der Fachgruppe Künstliche Intelligenz der GI, Nr. 20, S. 16-18, 1980.
- [34] Raulefs, P.: Expert systems: state of the art and future prospects. In: Siekmann, J. (ed.): Proc. of the 5th German Workshop on Artificial Intelligence, Bad Honnef, Informatik-Fachberichte, Heidelberg: Springer 1981.
- [35] Rich, E.: Building and exploiting user models. Carnegie-Mellon-Univ., Dept. of Computer Science, Report CMU-CS-79-119 , 1979.
- [36] Sacerdoti, E.D.: A structure for plans and behavior. New York: Elsevier 1977.
- [37] Shortliffe, E.H.: Computer-based medical consultations: MYCIN. N.Y.: Elsevier 1976.
- [38] Stallman, R.M., Sussman, G.J.: Forward reasoning and dependency-directed backtracking in a system for computer-aided circuit analysis. In: Artificial Intelligence, 9, S. 135-196, 1977.
- [39] Swartout, W.R.: A digitalis therapy advisor with explanations. MIT Lab. for Comp. Sc., Report TR-176, 1977.
- [40] Szolovits, P., Pauker, S.G.: Categorical and probabilistic reasoning in medical diagnosis. In: Artificial Intelligence, 11, S. 115-144, 1978.
- [41] Trigoboff, M., Kulikowski, C.A.: IRIS: A system for the propagation of inferences in a semantic net. In: Proc. of the 5th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, S. 274-280, Cambridge, 1977.
- [42] Wahlster, W.: Die Representation von vagem Wissen in natürlichsprachlichen Systemen der Künstlichen Intelligenz. FB Informatik der Univ. Hamburg, Bericht IfI-HH-B-38/77, 1977.
- [43] Wahlster, W.: Natürlichsprachliche KI-Systeme: Entwicklungsstand und Forschungsperspektive. In: Siekmann, J. (ed.): Proc. of the 5th German Workshop on Artificial Intelligence, Bad Honnef, Informatik-Fachberichte , Heidelberg: Springer 1981.

- [44] Wahlster, W.: Natürlichsprachliche Argumentation in Dialogsystemen. KI-Verfahren zur Rekonstruktion und Erklärung approximativer Inferenzprozesse. Informatik-Fachberichte, Heidelberg: Springer 1981.
- [45] Waterman, D., Hayes-Roth, F. (eds.): Pattern-directed inference systems. New York: Academic 1978.
- [46] Weinreb, D., Moon, D.: The Lisp Machine Manual. 4th Edition, Symbolic Inc., Woodland Hills, Order No. LMM-4, Juni 1981.
- [47] Weiss, S., Kulikowski, C, Amarel, S., Safir, A.: A model-based method for computer-aided medical decision-making. In: Artif. Intelligence, 11, S. 145-172, 1978.
- [48] Weiss, S., Kulikowski, C: EXPERT: A system for developing consultation models. In: Proc. of the 6th Intern. J. Conf. on Artif. Intelligence, S. 942-947, 1979.
- [49] Winograd, T.: Extended inference modes in reasoning by computer systems. In: Artificial intelligence., 13, S. 5-26, 1980.
- [50] Winston, P.H.: Artificial intelligence. Reading: Addison-Wesley 1977
- [51] Winston, P.H., Horn, B.K.P.: LISP. Reading: Addison-Wesley 1981.