

Künstliche Intelligenz und Wissenschaftspraxis

Ein Orientierungsversuch

Teil II

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 Wissenserwerb

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:

Ausblick: Wissenschaftsverständnis und Künstliche Intelligenz

2. Wissensfixierung und Wissensdistribution

Geht man von der Vorstellung des zu Beginn der hominiden Evolution noch sprachinkompetenten Menschen aus, so lassen sich gleichwohl die im letzten Abschnitt beschriebenen Wissenserwerbsformen der Beobachtung annehmen, ebenfalls (ggf. beim Beobachtungsvorgang selbst schon wirksame) rudimentäre Formen der induktiven Verallgemeinerung und Selektion von Beobachtungsdaten, wie es Experimente der Verhaltensforschung an Tieren wie Hunden, Affen oder Ratten bezeugen, ja sogar — setzt man ein gewisses Maß an Rationalität voraus — elementare Formen der Deduktion aus vorhandenem Wissen bzw. der Reflexion darauf. Und gleichermaßen sind nicht-sprachliche und non-verbale Kommunikationstechniken (etwa Mimik, Gestik oder bildliche Darstellung) bereits in der Lage, Distribution von Wissen zu ermöglichen.

Erst Sprache und Schrift jedoch haben zu höheren, d.h. geordneteren und systematischeren Formen der Wissensgewinnung geführt, und erst Sprache und

Schrift haben einen intensiven Austausch von Informationen und entwickeltere Formen der Distribution von Wissen ermöglicht. Dies beruht vor allem auf ihrer Fähigkeit, Wissen mehr oder weniger dauerhaft zu fixieren und damit Wissensverluste einzuschränken, Wissensredundanz zu vermeiden, die Verfügbarkeit des Wissens zu erhöhen und die Verarbeitung vorhandener Wissensbestände möglich zu machen. Insofern ist die Bedeutung, die Ethnologen, Anthropologen und Philosophen der Entstehung von Sprache und Schrift innerhalb der biologischen Evolution und kulturgeschichtlichen Entwicklung des Menschen beimessen, gar nicht hoch genug einzuschätzen.

Der sprach- und schriftlose Mensch war allein auf biologische Formen der Wissenskonservierung angewiesen, die die physiologisch vorhandenen Speichermöglichkeiten des Gedächtnisses benutzten. Damit war er der Gefahr des Erinnerungsverlusts und der Veränderung einmal erworbenen Wissens ausgesetzt, durch die physiologische Beschränkung des individuellen Gedächtnisses begrenzt und in seinen Wissensdistributionstechniken auf nicht-sprachliche bzw. nicht-verbale Kommunikationsformen angewiesen. Der noch schriftlose Sprecher konnte bereits mittels mündlicher Übertragungstechniken individuell erworbenes Wissen distribuieren und damit die individuell bedingten Wissensschwankungen und -begrenzungen in gewisser Weise ausgleichen. Wie auch heutige Untersuchungen mündlicher Kommunikationsformen (oral history) zeigen, kann auf diese Weise durchaus ein relativ konstanter Bestand an Wissen bewahrt, kumuliert und weitervermittelt werden. Aber die Gefahr der Verflüchtigung und Veränderung von Wissen und der Inkonzanz der Informationsübertragung ist immer noch unverhältnismäßig groß. Erst die Schrift und dauerhaftere Wissensfixierungs- und Wissensdistributionsformen als die akustisch orientierten jedoch ermöglichten eine gewisse Verfestigung des Wissensbestandes, die situationsinvariante Kumulierung von Wissen über das individuelle Fassungsvermögen hinaus und die von subjektiven Schwankungen relativ freie Wissensverteilung.

Die Erfindung des Buchdrucks schließlich steigerte die Verfügbarkeit und Kumulierbarkeit des Wissens und sorgte vor allem durch seine fehlerfreien Vervielfältigungstechniken für leichtere Zugänglichkeit, siche-

re Distribution und identische Übertragung von Wissen. Die ton-, bild- und schriftaufzeichnenden Speicherungs- und Übertragungstechniken unseres Zeitalters sind gegenüber dem Buchdruck dann nur noch graduell erweiternde und verbessernde Formen der Wissensfixierung und -distribution, nicht eigentlich qualitative Neuerungen. Dasselbe muß unter diesem Gesichtspunkt von dem Einsatz moderner EDV-Anlagen als Speicher- und Distributionsinstrumente gesagt werden. Der moderne Computer kann lediglich *mehr* Wissen auf *engerem* Raum kumulieren, aber er kumuliert es nicht unbedingt *besser* und *sicherer* als eine Bibliothek; und der Computer kann (bezieht man die heute bekannten nachrichtentechnischen Übertragungsformen von Rundfunk, Fernsehen, Telefon sowie die Herstellung von Rechner-Verbund-Netzen ein) nur *schneller* und *mehr* Wissen distribuieren, jedoch nicht unbedingt *besser* und *sicherer* als die direkte Übermittlung von Büchern etwa durch postalische Vorgänge. Beschleunigung der Wissensakkumulation und Wissensdistribution können daher wohl kaum als hinreichende Rechtfertigungen für die Redeweise vom „intelligenten Computer“ gelten. Vielmehr liegen die Plausibilitätsgründe für diese neue Terminologie eher in der *Art* der in EDV-Anlagen benutzten Speicherung von Wissen und der davon abhängigen Art der Wissensdistribution.

Als der wesentlich neue Aspekt moderner EDV-Anlagen erscheint auf der einen Seite die *einheitliche Datenstruktur* der unter formalen Darstellungsgesichtspunkten (als Bild, Karte, Text) heterogenen Wissensdaten, auf der anderen Seite die über die bisher üblichen statischen Reduplikationstechniken hinausgehende *dynamische Wissensfixierung*.

Die Digitalisierung der Daten und die binäre Verschlüsselung (d.h. maschineninterne Codierung) aller Daten ermöglichen eine einheitliche Erfassung und Verarbeitung aller Wissensdaten im Computer, gleichgültig welche Darstellungsformen für das Wissen benutzt werden und gleichgültig auf welche Weise das Wissen erworben wurde. Die bedeutende Erfindung des Dualzahlensystems bereits durch Leibniz im Jahre 1679 und ihre technologische Verwertung bei der Darstellung des gesamten vom Menschen verwendeten Zeichenvorrats als Binärcode in den modernen Rechenanlagen haben frühzeitig die Analogie zum datenverarbeitenden Menschen deutlich werden lassen. Auch im menschlichen Gehirn beruht die Darstellung der Wissensdaten oder Informationen auf der gleichartigen Erregung der Nervenzellen über Aktionspotentiale, die über Synapsen empfangen und weitervermittelt werden. Mit gewisser Berechtigung läßt sich also auch hier von einer binären Verschlüsselung (erregter und unerregter Zustand der Nervenzelle) sprechen. Und auch die Übertragung durch elektrische bzw. bioelektrische Vorgänge ist ähnlich. Von da aus liegt die früher geläufige Wendung „Elektronengehirn“ nahe und der Vergleich der Rechenmaschine mit dem Gehirn auf der Hand, wie er in älteren Arbeiten etwa von John von Neumann und Martin Kulp oder in neueren von Hofstadter angestellt wird.¹ Entscheidend ist je-

doch die Gleichartigkeit der Erfassung und Strukturierung der Daten, die jeweils bei neuronal bzw. elektronisch gespeicherten Daten vorliegt und die sozusagen für eine einheitliche Tiefenstruktur aller Daten bei ansonsten unterschiedlicher Datenqualität sorgt.

Gegenüber den „statischen“ Fixierungs- und Vervielfältigungstechniken, wie sie im Buchdruck, in Fotokopierverfahren u.ä. vorliegen, ist das im Computer gespeicherte Datenmaterial „dynamisch“ fixiert, d.h. einer vom Menschen relativ unabhängigen weiteren Wissensverarbeitung zugänglich. Überall da, wo die Wissenskonservierungstechniken eine vom ursprünglichen Wissenserwerbsprozeß unabhängige Weiterverarbeitung zulassen, kann man von einer dynamischen Wissensfixierung sprechen, also bereits bei den ersten mechanischen Rechenmaschinen des 17. Jahrhunderts, deren Daten in Form von (auf dezimaler Grundlage beruhenden) Zahnrad- und Hebelkonfigurationen gespeichert wurden, die dann durch mechanische (von den Wissensgewinnungsvorgängen unabhängige) Prozesse verändert und damit bearbeitbar gemacht werden konnten. Die einheitlich binär strukturierten Daten der modernen EDV-Anlagen potenzieren diese Möglichkeit der Weiterverarbeitung enorm, indem sie nicht nur starr-mechanische, sondern flexible und variable Verarbeitungstechniken zulassen; sie schaffen so die Möglichkeit, das einmal gespeicherte Wissen unabhängig von dem vom Menschen für dieses Wissen benutzten Erkenntnis- und Wissensgewinnungsstrategien weiter einer Bearbeitung zu unterziehen. Auch hier wieder die Parallele zum Gehirn: Unbewußte Vorgänge auf neuronaler Ebene können ebenso zu neuem Wissen bzw. zu einer Verarbeitung von durch andere, bewußte Praktiken erworbenem Wissen führen, wie es maschinelle Vorgänge auf elektronischer Ebene tun können.

Zwischen die nicht-bewußte neuronale Datenstruktur des Menschen (gewissermaßen die menschliche hardware-Ebene) und die darauf basierenden bzw. daraus resultierenden Wissensinhalte schiebt sich als vermittelnde Zwischenstufe die bewußte problembezogene Darstellung der Wissensinhalte. Jede Darstellung, jede Fixierung von Wissen ist aber bereits eine Strukturierung von Wissen. Insofern begründen bestimmte Darstellungsweisen bestimmte Formen des Wissens, d.h. sie begründen einen gewissen Wissenstyp. Wir haben in diesem Abschnitt auf die Schriftsprache als das wichtigste Mittel der Wissensdarstellung hingewiesen. Sie wird allerdings begleitet von anderen vor- oder nebensprachlichen Formen der Wissensfixierung. Fragt man unter systematisch-typologischen Gesichtspunkten nach möglichen Formen der dauerhaften Fixierung von Wissen überhaupt und beschränkt man sich dabei auf die weitaus wichtigsten optisch wahrnehmbaren Konservierungstechniken, so kann man etwa die folgende Klassifizierung vornehmen:

1 Neumann, John von: The Computer and the Brain. New Haven 1958. — Kulp, Martin: Menschliches und maschinelles Denken. Göttingen 1968. — Hofstadter, Douglas R.: Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. New York 1979.

(1) die bildliche Darstellung (als unmittelbare, direkte Wiederholung des Wahrgenommenen; wie sie in perfektionierter Form in der Photographie vorliegt);

(2) die nicht-sprachliche Zeichen benutzende Darstellung: in Form der bereits abstrahierenden und selektierenden, aber immer noch anschaulich-bildhaften Struktur der Karte oder in Form der aus einem anderen Wahrnehmungsbereich übertragenen strukturalogen Darstellung der Notenskala;

(3) die funktionale Abhängigkeiten repräsentierende Darstellung in Form von Tabellen oder Diagrammen; — die Formen (2) und (3) setzen dabei gewisse sprachliche Erläuterungen (Legenden) voraus oder benutzen sogar bereits z.T. sprachliche Darstellungsmittel —

(4) die beliebig abstrakte, begrifflich operierende (numerische Sachverhalte einschließende) sprachliche Darstellung. In diesem Bereich der bewußt vollzogenen schriftlichen bzw. graphischen Fixierung der Wissensdaten vollzieht sich alle wissenschaftliche Praxis. Auf ihr beruhen alle wissenschaftlichen Methoden der Wissensverarbeitung und Wissensbegründung.

Ganz analog nun schieben sich auch im Bereich der EDV zwischen die binären elektronischen Datenstrukturen des Computers und die aus ihnen resultierenden Dateninhalte bestimmte problemorientierte Darstellungsformen des Wissens: die Programmiersprachen. Die ersten problemorientierten Programmiersprachen wurden seit der Mitte der 50er Jahre (ALGOL und FORTRAN seit 1955, COBOL seit 1959) entwickelt und hatten gegenüber den Maschinensprachen bzw. maschinenorientierten Sprachen den Vorteil, weitgehend maschinenunabhängig und im Prinzip (bei entsprechendem Compiler) auf jeder EDV-Anlage einsetzbar zu sein. Ihre Benutzung war also lediglich problemabhängig bzw. prägte einem Problem die jeweilige Struktur der Programmiersprache auf.

Der Bereich in der KI, der sich mit der Fixierung oder Darstellung von Wissen und mit der Frage der darstellungsabhängigen Strukturierung von Wissen befaßt, wird üblicherweise als *Wissensrepräsentation* (knowledge representation) bezeichnet. Die ursprünglichen Programmiersprachen legten eine sog. *prozedurale* (oder auch *imperative*) *Wissensrepräsentation* zugrunde, in der durchweg die Wissensfakten mit Wissensverarbeitungsprozeduren gekoppelt sind. Es gibt hier eigentlich keine von den die Verarbeitungsschritte steuernden Anweisungen getrennte Wissensbasis. *Alle* Sprachelemente haben den Charakter von Befehlen oder Anweisungen. Die Wissensbasis ist gewissermaßen eine Folge von Befehlen oder Prozeduren. Dabei lassen sich zwar deskriptive Anweisungen oder „non-executable statements“ (die als Anweisungen im weiteren Sinne etwa den Typ einer Variablen oder die Dimension eines Zahlenfeldes festlegen) von imperativen Anweisungen oder „executable statements“ unterscheiden (die als Anweisungen im engeren Sinne die Ausführung bestimmter Operationen befehlen),² aber Be-

fehle oder Anweisungen sind sie beide, handele es sich nun um Typ- oder Bereichszuweisungen oder die Anordnung von logischen bzw. numerischen Operationen. Die Programmierung mittels solcher prozeduraler Sprachen und Wissensrepräsentationsschemata ist starr. Die Maschine „weiß“ nur das, was aus expliziten bestimmte Aktionen veranlassenden Prozeduren resultiert.

Demgegenüber haben sich neuerdings andere nicht-prozedurale Programmiersprachen (so z. B. die 1972 in Marseille entwickelte Sprache PROLOG) und Wissensrepräsentationsschemata entwickelt, die bezeichnenderweise ganz ähnliche Differenzierungen von Wissensdarstellungsformen vornehmen, wie wir sie gerade typologisierend für den wissenschaftlichen Bereich unterschieden haben. Sie werden als Formen der *deklarativen Wissensrepräsentation* bezeichnet. Deklarative Wissensrepräsentationsschemata sind dadurch gekennzeichnet, daß sie ausschließlich beschreibende Formen der Wissensdarstellung verwenden. Die durch Beschreibung gewonnenen Wissensdaten sind eine in gewisser Hinsicht „statische“ Wissensbasis, auf der bestimmte Verarbeitungsregeln operieren, die jedoch unabhängig von der Wissensbasis sind. Während also bei der prozeduralen Wissensrepräsentation das (problem-lösende) Wissen aus einer Folge von Instruktionen besteht, wird bei der deklarativen Wissensrepräsentation vorhandenes Wissensmaterial zunächst beschrieben, erst dann werden daraus mittels des Wissen weiterverarbeitender Inferenzregeln Schlüsse gezogen.

Die KI kennt unter den deklarativen Wissensrepräsentationstechniken zunächst die *direkte Wissensrepräsentation*, bei der die Darstellung des Wissensbereichs nicht sprachlich beschreibend erfolgt, sondern durch die Angabe von Struktur- oder Homomorphiebeziehungen zwischen Darstellungsschema und dargestelltem Gegenstandsbereich vorgenommen wird. Sie liegt vor bei der Datendarstellung in Form von Bildern, Landkarten, Tabellen, Diagrammen, Notenskalen.

Als zweite deklarative Wissensrepräsentationstechnik gilt die sprachlich beschreibende, d. h. mit Hilfe von natürlich-sprachlichen oder künstlichen Begriffen den Gegenstandsbereich beschreibende Wissensdarstellung, die *deskriptive Wissensrepräsentation*.

Ein Beispiel dafür wäre die logische Repräsentation von Wissen, bei der das logische Wissen in Form von Axiomen in die Wissensbasis geschrieben wird, auf denen gewisse Inferenzregeln operieren und so das logische Wissen weiterverarbeiten.

Ein zweites Beispiel wäre die Repräsentation von Wissen in Form semantischer oder assoziativer Netzwerke, in denen Begriffe durch Knoten, Beziehungen zwischen den Begriffen durch Kanten symbolisiert werden, wie etwa Teil-Ganzes- (part-of-) Beziehungen oder Merkmals- (is-a-) Beziehungen. Die Gesamtstruktur des semantischen Netzes soll demnach die assoziativen semantischen Verbindungen der Wissensfakten untereinander darstellen.

² Vgl. Dworatschek, Sebastian: Einführung in die Datenverarbeitung. 1973, S. 307.

Ebenfalls hierher gehören dürfte das neuere von R. Wille³ entwickelte, an verbandstheoretischen Modellen orientierte Verfahren der sog. *formalen Begriffsanalyse*, die allerdings wohl zwischen direkten und deskriptiven Verfahren der deklarativen Wissensrepräsentation anzusiedeln wäre. Hier werden mit Hilfe mengentheoretischer Modelle die Begriffsstrukturen vorhandener Datenkontexte möglichst vollständig erfaßt und in verbandstheoretischen Liniendiagrammen veranschaulicht. Solche Begriffsverbände können der Ableitung von hierarchischen Klassifikationen von Gegenständen oder der Ableitung von Begriffsinplikationen, schließlich auch der Darstellung und dem Abfragen von Wissen dienen.

Eine gewisse Mischform zwischen prozeduralen und deklarativen Wissensrepräsentationsschemata stellen die „frame representation languages“ dar, die in Form von sog. „frames“ die wesentlichen Elemente einer Situation (scene) sowie deren Beziehungen untereinander beschreiben und daraus mit Hilfe sogenannter „frame-axioms“ neue Situationen ableiten.

Jede Fixierung macht eine Distribution, aber auch eine Weiterbearbeitung von Wissen allererst möglich. Die verschiedenen *Darstellungsweisen* des Wissens legen diesem — wie wir sahen — eine bestimmte Struktur auf. Diese Strukturierung von Wissen beginnt sogar schon eine Stufe vorher, beim originären *Wissenserwerb*. Auch die dem Menschen eigenen Erkenntnisorgane strukturieren bereits Wissen. Die Sinnesorgane des Menschen liefern z. B. andere Objektbilder als die der Fliege. Die dem menschlichen Wissen (durch physiologisch-erkenntnistheoretische Wahrnehmungslernen und durch Darstellungstechniken bedingte) doppelt aufgeprägte Struktur zieht naturgemäß auch spezifische Wissensbearbeitungs- oder Wissensverarbeitungsformen nach sich, denen wir uns jetzt zuwenden. Dabei wird sich zeigen, daß die beiden Weisen der Vorstrukturierung von Wissen sich auch in den Bearbeitungstechniken der KI widerspiegeln.

3. Wissensverarbeitung

Versucht man, die Formen der Wissensverarbeitung (oder Wissensbearbeitung) fächerübergreifend und systematisch zu ordnen, so lassen sich zunächst Techniken angeben, die in irgendeiner Form beobachtend-sichtend oder musternd-suchend das Datenmaterial bearbeiten, wie: (identifizierendes oder differenzierendes) Vergleichen von Daten, (suchendes) Auswählen oder Verknüpfen bzw. Zusammenordnen von Datenelementen, (gliederndes) Zerlegen (Analysieren) in oder Zusammensetzen (Kombinieren) aus Datenelementen, schließlich auch Zählen und Messen. Diese Bearbeitungsformen sollen hier *sichtende Bearbeitungstechniken* heißen. Hinter solchen das Datenmaterial noch relativ neutral sichtenden Beobachtungstechniken stehen Verarbeitungspraktiken, die bestimmte Gewichtungen des Datenmaterials vornehmen und so gleichsam die sichtenden Vorgänge steuern oder leiten, wie: das (mehr oder weniger bewußte) Assoziieren, Abstrahieren, Subsumieren und Definieren aufgrund von Bewer-

tungs- oder Relevanzkriterien. Sie mögen *gewichtende Bearbeitungstechniken* heißen. Wiederrum gleichsam übergeordnet stehen über den selbst Steuerungsfunktionen übernehmenden gewichtenden Techniken höhere Bearbeitungsmodi, die eine mehr oder minder gerichtete Ordnungsstruktur in das Datenmaterial zu bringen versuchen und deshalb *ordnend-richtende Bearbeitungstechniken* genannt werden sollen. Hierzu gehören das (hierarchische: analysierende und kombinierende) Klassifizieren von Daten, das induktiv-verallgemeinernde Bilden von Hypothesen, Gesetzmäßigkeiten oder Vermutungen und das (begründende, erklärende und prognostizierende oder auslegende) Beweisen oder Schlußfolgern, das mehr oder weniger explizit geschieht. Alle diese Bearbeitungstechniken sind eingebettet in allgemeinste Planungs-, Problemlösungs- oder Lern- bzw. Wissensakquisitionsvorgänge. Das wissenschaftliche Forschen ist ja kein ziel- und wahlloses Umherschweifen, sondern der Wissenschaftler vergleicht, zergliedert und klassifiziert seine Daten, er stellt Gesetzhypothesen auf, er entwirft ein axiomatisches System seiner Disziplin, um einen gewissen Plan, ein gewisses Ziel zu verwirklichen, um ein Problem zu lösen oder um etwas zu lernen, d. h. sich neues Wissen anzueignen. D. h. auf höchster Ebene sind wissenschafts-intentionale, ziel- oder zweckgerichtete Planungsvorgänge steuernd. Wir wollen daher hier von den *intentional-planenden Bearbeitungstechniken* sprechen.

Legt man diesen Versuch einer systematischen Gliederung der Wissensverarbeitungs- und Wissensbegründungsvorgänge zugrunde, so läßt sich auch eine Ordnung in die verwirrende Vielzahl der einander ergänzenden oder auch überschneidenden Bearbeitungstechniken der KI bringen. Die bloß datensichtenden, grundlegenden Bearbeitungsverfahren sind seit je als besonders vielversprechende und leistungsfähige Einsatzmöglichkeiten von EDV-Anlagen bekannt. Sie finden hier Anwendung vor allem im Bereich des sog. „information-retrieval“, bei der Anlage und Auswertung von Datenbanken und Dokumentationssystemen, in der Textverarbeitung, schließlich bei Evaluations- und Rechenvorgängen. Solche heute schon zu den Standardverfahren gehörigen Techniken der EDV gehen allenfalls als vorbereitende Techniken in die KI-Methoden ein, und wir können uns daher hier mit ein paar Hinweisen begnügen.

Die übrigen (höheren) gewichtenden, ordnend-richtenden sowie intentional-planenden, zielgerichteten Bearbeitungsverfahren sind das eigentliche Feld der heutigen KI-Forschung. Dabei kreist die KI-Tätigkeit um folgende Haupt-Themenkomplexe:

(1) die Untersuchung von *konzeptuellen Graphen und semantischen Netzen*, die in erster Linie die assoziierenden, abstrahierenden, subsumierenden, definierenden und klassifizierenden Techniken unserer zweiten und dritten Stufe benutzen;

³ Vgl. Wille, Rudolf: Liniendiagramme hierarchischer Begriffssysteme. In: Studien zur Klassifikation Bd. 15 (Ed. H. H. Bock). Frankfurt 1984. S. 32–51.

(2) die streng logisch ausgerichteten, deduktiv operierenden *automatischen Beweissysteme* (*ATP-systems: automatic theorem proving systems*);

(3) die *Expertensysteme*: die sowohl deduktive wie induktive Ableitungs- und Begründungstechniken, aber auch klassifizierende Verfahren verwenden. Sie können die Form von sog. Dialogsystemen oder sprachverstehenden Systemen (dem Verstehen natürlicher Sprachen angenäherten Systemen: *natural language understanding systems*) annehmen und beziehen gewöhnlich übergeordnete mit Such-, Planungs- und Lernvorgängen sich beschäftigende Techniken mit ein.

Wir werden in diesem Abschnitt *einerseits* (nur knapp) die elementaren, die KI-Methoden vorbereitenden, das Wissen organisierenden Verarbeitungsverfahren, die in den Umkreis des information-retrieval und der Textverarbeitung gehören, erörtern, *andererseits* die hier unter (1) genannten, der Anfbereitung des Wissens dienenden Techniken, die auf Baum- und Netzstrukturen zurückgreifen. Im nächsten Abschnitt werden wir dann die weniger klassifizierenden, als mehr beweisenden, begründenden und planenden Verarbeitungstechniken beschreiben, also hauptsächlich die hier unter (2) und (3) genannten automatischen Theorembeweiser und Expertensysteme.

a. Textverarbeitung und „Information Retrieval“

Verwaltung, Organisation und Erschließung der heute anfallenden enormen Wissensmengen, Evaluation der in statistischen Erhebungen, Tests oder Fragebögen enthaltenen Daten sowie Berechnung von komplizierten in Naturwissenschaft und Technik auftretenden Formeln sind das ureigenste Einsatzfeld der modernen EDV-Anlagen. (Wir beschränken uns hier auf den ersten der erwähnten Bereiche, der sich am spätesten entwickelt hat.) Es ist deshalb verständlich, wenn heute immer mehr informations- oder Dokumentationssysteme entstehen, die die besonderen information-retrieval-Fähigkeiten des Computers ansutzen. Beispielshalber erwähnt seien hier etwa die (auch in dieser Zeitschrift erörterten) juristischen Informationssysteme JURIS (im deutschen Sprachraum), WESTLAW und LEXIS (in den USA), die z.T. als Volltextdatenbanken Rechtsprechung, Normen und Literatur erfassen, oder der Informationsdienst der Universität Düsseldorf, der die philosophische Sekundärliteratur erschließt.

Volltextdatenbanken ermöglichen die sog. Freitextsuche, d. h. die Möglichkeit des Zugriffs auf im Prinzip jedes Wort oder jede Wortkombination aufgrund bestimmter Suchprozeduren. Mittels inhaltbeschreibender Deskriptoren arbeitende Dokumentationssysteme (wie der Düsseldorfer Informationsdienst) oder wissenschaftliche Aufsätze in abstract-Form verarbeitende Systeme ermöglichen zumindest den schnellen Zugang zu Informationen über Relevanz und Trächtigkeit der zu untersuchenden Literatur.

In den Geisteswissenschaften wird bei vielen neuen historisch-kritischen Texteditionen die EDV-Volltextfassung durchgeführt, welche bereits in einem frü-

hen, vorläufigen Bearbeitungsstand einen prinzipiell vollständigen Zugang zu beliebigen im Text enthaltenen Informationen verschafft. Wortformenregister ohne und mit Kontext (letztere sog. KWICs: *key-word-in-context*-Listen) ermöglichen auch hier (sieht man einmal von dem nicht trivialen Problem der Lemmatisierung ab), im Prinzip auf jede mögliche Wortkombination zuzugreifen. Bei der Textfassung selber verhelfen die in vielen Textverarbeitungsprogrammen heute selbstverständlichen Vergleichs-, Such-, Ersetzungs- und Löschprozeduren zu einer fehlerfreieren und einfacheren Textgestaltung.

Formale Vollständigkeit verbürgt aber noch keinen vollständigen Zugang zum Wissensmaterial. Auch die komplette Erfassung eines Wortformenbestandes erfordert noch die Durchsicht seitens des Wissenschaftlers; denn die Bearbeitung des Datenmaterials kann auch nach vorbereitender Sichtung durch den Computer noch so viel Aufwand erfordern, daß sie die eigentliche inhaltliche Sichtung untendrückt oder erschwert. Ebenfalls ist der Eindruck falsch, eine Volltextfassung verschaffe vollständigen und allgemeinen Zugang zu jeder im Text enthaltenen (formal unterscheidbaren) Information. Die geeigneten Suchwörter kann (etwa bei alten) Texten nur der kennen, der den Text bereits vorher gelesen hat; nur er kann auch bestimmte wissenverbergende Sprach- und Terminologiegepflogenheiten aufhellen, die nicht immer so einfach aufzuklären sind wie in den Fällen der Homonymie. Erschließungen von Datenbanken und Editionstexten durch Wortformenindizes oder Freitextsuche können daher nicht als Ersatz, sondern nur als Ergänzung oder Unterstützung für traditionelle Texterschließungsverfahren in Gestalt von Registern gelten.

b. Konzeptuelle Graphen und semantische Netze

Graph- oder Baumstrukturen und Netzwerke (networks) spielen in der KI für die aufbereitende Strukturierung der Wissensdaten eine wichtige Rolle, wie Bereits bei der Beschreibung der Wissensrepräsentationstechniken deutlich wurde. Es handelt sich um Strukturen, die aus Knoten bestehen, die durch sog. Kanten, d. h. Linien miteinander verbunden sind. Verwendung finden sie in der Linguistik beim sog. „Parsing“, dem grammatischen Zergliedern sprachlicher Äußerungen in ihre syntaktischen oder semantischen Konstituenten (z. B. des Satzes „Der Täter wurde in Münster festgenommen“ in seine Konstituenten: die Nominalphrase „der Täter“, die Verbalphrase „wurde ... festgenommen“ und die Präpositionalphrase „in Münster“). Hier symbolisieren die Knoten die Sprach-Konstituenten, die gerichteten Kanten die Abhängigkeitsbeziehungen zwischen diesen. Sie werden ebenfalls verwendet (als sog. Such-Graphen oder Such-Bäume) bei Problemlösungsvorgängen oder (als Spiel-Bäume) bei Spielanalysen, wenn man ein Problem oder ein Spiel in seine verschiedenen Zustände vom Anfangszustand oder Spielanfang bis zur Problemlösung oder zum Spielende zerlegt. Dann entsprechen den Knoten Problemzustände oder Spielsituationen (Spielstände), den Kanten Opera-

tionen oder Aktionen, die einen Problemzustand in einen anderen überführen, bzw. Spielzüge, die aus einem Spielstand einen anderen erzeugen. Weiter können sie angewandt werden bei der Strukturierung logischer Beweise (z. B. in der sog. „connection graph method“). Dann repräsentieren die Knoten Formeln oder Formelmengen, die Kanten die logischen Regeln, die aus einer Formel(menge) eine andere Formel(menge) generieren. Schließlich werden sie bei der allgemeinen begrifflichen Strukturierung in den Wissenschaften benutzt zwecks Darstellung der zwischen den vorkommenden Begriffen herrschenden Beziehungen. Auf die letztere, am meisten fächerübergreifende Methode will ich mich hier beschränken.

Repräsentationen begrifflicher Zusammenhänge durch Baumdarstellungen haben eine sehr lange Tradition. Schon seit der Antike werden (insbesondere dichotomische) Darstellungen verwendet, wie etwa die nach dem spätantiken Philosophen Porphyrios benannte „arbor Porphyriana“, die zu Definitionszwecken aufgestellt wurde. Traditionell unterscheidet man zwei mögliche, gegenläufige Deutungen eines solchen Begriffsbaums oder einer solchen Begriffspyramide, die man mit der modernen Logik als intensionale und extensionale Interpretation von Begriffen bezeichnet. Die Intension (der Inhalt) eines Begriffs ist die Menge der Merkmale, in die er sich zerlegen läßt. Das üblicherweise verwandete Verfahren ist dabei die Analyse eines Begriffs in seine Gattung (*genus proximum*) und spezifische Differenz (*differentia specifica*): etwa des Begriffs „Mensch“ in seine Bestandteile „vernünftig“ (die spezifische Differenz) und „Lebewesen“ (das *genus proximum*). Untergliedert man diese Merkmale weiter, so gelangt man zu einem intensional interpretierten dichotomischen Baum. Umgekehrt ist die Extension (der Umfang) eines Begriffs die Menge der Individuen bzw. geordneten Paare, Tripel etc. von Individuen, auf die er zutrifft. Die Menge der Lebewesen würde so in die Teilmenge der vernünftigen und der nicht-vernünftigen Lebewesen zerlegt werden können. Auch hier kann man die entsprechende Zerlegung fortsetzen und gelangt dann zu einem extensional interpretierten dichotomischen Baum.

Beide Interpretationen sind noch heute in den Wissenschaften anzutreffen. Der Jurist kann sowohl intensional seine Begriffe definieren wie auch extensional Einzelfälle als Elemente einer Menge verstehen, die durch Aufzählung aller Einzelfälle definiert ist.⁴ Der Mediziner kann den Begriff einer Krankheit durch intensionale Anführung ihrer Symptome definieren oder durch extensionale Anführung aller konkreten (ihm bekannten) Vorkommnisse erläutern. Auch die taxonomische Klassifikation des Biologen läuft auf eine solche (nicht mehr bloß dichotomische) Einteilung der Organismen hinaus, die sich sowohl intensional als hierarchische Gliederung in immer weniger Merkmale enthaltende Organismen auffassen läßt (der Begriff des Säugetiers enthält weniger Merkmale als der Begriff des Hundes) wie auch umgekehrt extensional als hierarchische Gliederung der Klasse der Säugetiere (*mammalia*) in die Unterklasse (für den Biologen: die Unter-

familie) der Hunde (*caninae*). In der Praxis der Wissenschaft werden gewöhnlich beide Interpretationen parallel (einander ergänzend) angewandt. Denn weder eine vollständige Angabe aller Exemplare, die unter einen Begriff fallen, noch die Angabe aller Merkmale, in die er sich zerlegen läßt, ist in der Regel möglich.

In der KI tauchen diese intensionalen oder extensionalen Deutungen von Baustrukturen bei der Interpretation begrifflicher Repräsentationsschemata wieder unter neuem Namen auf. Die Bezeichnung „konzeptueller Graph“ ist dabei so weit gefaßt, daß seine Knoten

(1) sowohl konkrete Begriffe (*concepts*), die auf zusammenfassende assoziative Verknüpfungen einer Reihe von Sinneseindrücken (*percepts*) zurückgehen (z. B. der Begriff der Katze), wie auch abstrakte Begriffe repräsentieren, bei denen dieser Rückgang auf sinnlich wahrnehmbare Bilder nicht möglich ist (z. B. der Begriff der Gerechtigkeit);

(2) sowohl Individuen (z. B. „Peter Schulz“) wie auch Allgemeinbegriffe (z. B. „Mensch“) darstellen;

(3) sowohl Objekte („Haus“) wie auch Situationen (das „Eine Bibliothek-Benutzen“) wie auch Ereignisse oder Tätigkeiten (z. B. „Autofahren“) bezeichnen können.

Die Beziehungen, die durch die gerichteten Kanten ausgedrückt werden, sind nun die Beziehungen, die für die betreffenden an den Knoten stehenden Konzepte gelten. Ein konzeptueller Graph, der z. B. den Sachverhalt „Der Mann kauft das Buch“ beschreiben soll, würde aus drei Knoten bestehen, die die Konzepte „Mann“, „Buch“ und „Kaufen“ repräsentieren und die durch zwei gerichtete Pfeile so miteinander verbunden wären, daß der eine von „Kaufen“ auf „Mann“ zeigt und den Mann als Handelnden oder Träger der Kaufstätigkeit kennzeichnet, und der andere von „Kaufen“ auf „Buch“ zeigt und das Buch als Objekt der Kaufstätigkeit kennzeichnet.

Gelegentlich werden die Termini „semantische Netze“ und „konzeptuelle Graphen“ synonym gebraucht. Autoren wie Sowa⁵ jedoch meinen mit dem semantischen Netz den umfassenderen Terminus: Konzeptuelle Graphen sind demnach in allgemeine semantische Netze eingebettet; d. h. semantische Netze sind die Menge aller durch bestimmte konzeptuelle Graphen ausgedrückten Beziehungen, in denen dessen Konzepte zu allen anderen Konzepten stehen, während konzeptuelle Graphen nur eine bestimmte (einen Sachverhalt darstellende) Relation zwischen den Konzepten repräsentiert. Semantische Netze geben also im Idealfall alle Verwendungsweisen bestimmter Begriffe in einer Sprache wieder, also etwa ihre Verbindungen zu Wahrnehmungsvorgängen, zu Bewegungsvorgängen u. ä., ihre Einordnung in eine Typenhierarchie von Konzepten oder bereichsspezifische Abgrenzungen.

⁴ Vgl. Herberger, Maximilian und Simon, Dieter: Wissenschaftstheorie für Juristen. Logik — Semiotik — Erfahrungswissenschaften. Frankfurt/M. 1980. S. 308 ff.

⁵ Sowa, John F.: Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine. Reading/Mass. etc. 1984. S. 76–78.

Das dazu, d. h. für eine vollständige Analyse der Konzept-Beziehungen notwendige Hintergrundwissen ist das, was in der KI durch den Terminus „Schema“ oder auch (auf Minsky zurückgehend⁶) als „frame“ bzw. (auf Schank und Abelson zurückgehend⁷) als „script“ bezeichnet wird.

Die intensionale Interpretation solcher Graphen oder semantischen Netze zeigt sich in der KI wieder bei dem Bemühen, alle Begriffe eines Wörterbuchs mit Hilfe einer geringen Zahl von primitiven Begriffen zu definieren.⁸ Die primitiven Begriffe — in der Philosophie unter der Bezeichnung der Kategorien oder allgemeinsten Aussageweisen geläufig und bei Philosophen wie Leibniz als eine der wichtigsten, aber auch schwierigsten Aufgaben für die Grundlegung der Wissenschaften bezeichnet — werden von Fodor und Katz unter dem Namen „semantic markers“ wiedereingeführt.⁹ Aber auch Verfahren, eine Typenhierarchie von Super- und Subkonzepten bei der Erstellung von konzeptuellen Graphen zu bilden, lassen intensionale Sehweisen erkennen.

Auf der anderen Seite gibt es mehr extensional ausgerichtete Verfahren wie die Definitionen durch Beispiele oder Prototypen (*prototypes*), die sich am Wittgensteinschen Begriff der „Familienähnlichkeit“ orientieren. Charakteristisch ist dabei, daß zwecks Definition eines Konzepts aus der Menge der die Extension des Konzepts ausmachenden Exemplare ein „prototyp“ (das sozusagen typischste Exemplar) ausgewählt wird. Die Extension dieses Begriffs wird dann dadurch bestimmt, daß man alle Objekte dazu zählt, die mit diesem Prototyp mehr Ähnlichkeit haben als mit jedem anderen Prototyp.

Eine Art Zwischenstellung nimmt das sog. „conceptual clustering“ ein, d. h. das Bündeln oder Zusammenfassen beliebiger Merkmale zur Beschreibung einer bestimmten Klasse, deren Extension dann dadurch bestimmt wird, daß man Exemplare zu finden versucht, auf die diese Merkmale wahrscheinlich zutreffen.¹⁰

All diese Methoden sind Assoziations-, Abstraktions-, Subsumtions- und Definitionstechniken benutzende Verfahren, die zum Zweck der ordnend-klassifizierenden Aufbereitung des Begriffs- und Sprachmaterials einer Wissenschaft angestellt werden. Sie sind so allgemein, daß sie eine Verwendung in fast allen Wissenschaften zulassen. Das große Problem bei der automatischen Beobachtung, d. h. dem Durchlaufen und Durchsuchen solcher konzeptueller Graphen ist jedoch die exponentiell anwachsende Zahl der Verzweigungsmöglichkeiten, das Problem der sog. „combinatorial explosion“. Für eine Tiefe (d. h. die Zahl der Knoten-„Ebenen“ eines Baums bzw. die Zahl der Schritte vom Anfang zum Ende eines Suchbaums, m.a.W. der

Schritte eines „Pfades“) von n Schritten und einen Verzweigungsfaktor (den „branching factor“, d. h. die Zahl der von einem Knoten weiterführenden Pfeile) von k Möglichkeiten ist die Zahl der möglichen Durchläufe oder Spielzüge k^n . Bei einem Schachspiel mit einem Verzweigungsfaktor von durchschnittlich 35 (also 35 möglichen Antwortzügen) würde er bei einer nur 8 Züge dauernden Spielpartie bereits 35^8 , d. h. über 2,2 Billionen Spielmöglichkeiten (Spielverläufe) betragen.¹¹ Solche auch für große Computer nicht realisierbaren Schrittfolgen machen es erforderlich, nach Abkürzungsmöglichkeiten zu suchen. Je nach Problemgehalt des entsprechenden Graphen hat dies zur Entwicklung folgender Prozeduren geführt: der „depth-first“-Algorithmus arbeitet (um im Bild des Schachspiels zu bleiben) zuerst jeden einzelnen Spielverlauf von Anfang bis zu Ende ab, d. h. er durchläuft jeden möglichen Pfad von Anfang bis zu Ende und springt dann durch sog. „backtracking“ an die erste Verzweigung im Spielverlauf zurück; der „breadth-first“-Algorithmus arbeitet demgegenüber alle möglichen Verzweigungen im Spielverlauf parallel ab; das „best-first“-Verfahren schließlich versucht, aufgrund bestimmter Bewertungskriterien den jeweils vielversprechendsten Spielzug zuerst zu untersuchen. Ähnlich verfährt das sog. Baumbeschneiden (*pruning*), welches unwahrscheinliche oder wenig erfolgversprechende Spielmöglichkeiten oder Spielzüge im voraus (*forward pruning*) ausscheidet oder die während des Spielverlaufs erhaltenen Informationen über Erfolg oder Mißerfolg bestimmter Spielzüge für die weitere Spielanalyse sich zunutze macht (*backward pruning*).

(wird fortgesetzt)

6 Minsky, Marvin L.: A framework for representing knowledge. In: Winston, Patrick Henry (Ed.): The Psychology of Computer Vision. New York 1975.

7 Schank, Roger C. und Abelson, Robert P.: Scripts, Plans, Goals and Understanding. New York 1977.

8 Z. B. Masterman, Margaret: Semantic message detection for machine translation, using an interlingua. In: Proceedings 1961, International Conference on Machine Translation. S. 438–475.

9 Katz, Jerrold J. und Fodor, Jerry A.: The structure of a semantic theory. In: Language 39 (1963), S. 170–210.

10 Vgl. Sowa, a.a.O. (Fn. 5) S. 16f., 332; Michalski, Ryszard S. und Stepp, Robert E.: Learning from observation: conceptual clustering. In: Michalski, Carbonell & Mitchell (Ed.): Machine Learning. Palo Alto, CA, 1983.

11 Sowa, a.a.O. S. 199.