

Arbeitsbericht Nr. 5

**Ansätze der Künstlichen Intelligenz-Forschung  
zur Unterstützung der Netzplantechnik**

von  
Dr. Stephan Zelewski

2. Auflage des Arbeitsberichts 2/1986

Köln 1986

Alle Rechte vorbehalten.

Abstract

Es wird untersucht, welche Beiträge Expertensysteme zur Fortentwicklung der Netzplantechnik leisten könnten. Hinsichtlich der Auswertung von Netzplänen wird die Erweiterung um Entscheidungsalternativen nur kurz gestreift, da sie auch schon seitens einiger konventioneller Netzplanvarianten geleistet wird. Das Schwergewicht der Ausführungen liegt auf einem Konzept, in stochastische Netzpläne explizites Wissen über Risikofaktoren, die den Projektfortschritt beeinflussen können, einzubeziehen. Mit Expertensystemen läßt sich dieses Risikowissen verwalten und (halb-)automatisch auf die Netzplanaktualisierung anwenden. In bezug auf die Konstruktion von Netzplänen werden Ansätze aus der Künstlichen Intelligenz-Forschung ergänzt, welche die Projektzerlegung in Teilaufgaben und die Ermittlung einer Präzedenzrelation über diesen Teilaufgaben unterstützen.

Inhaltsübersicht

	Seite
1 Einführung	1
2 Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Auswertung von Netzplänen	4
2.1 Deterministische Leistungserweiterung	5
2.2 Stochastische Leistungserweiterung	7
2.2.1 Erweiterung von Netzplänen durch Risikofaktoren	8
2.2.2 Repräsentation von Wissen über Netzpläne mit Risikofaktoren	9
2.2.3 Eine exemplarische Verwirklichung des Risikofaktoren-Konzepts	13
2.2.4 Erweiterungsperspektiven	16
3 Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Konstruktion von Netzplänen	21
3.1 Zerlegung eines Projekts in Teilaufgaben	22
3.2 Entwurf einer Präzedenzrelation über den Teilaufgaben	26
4 Flexibilität bei Auswertung und Konstruktion von Netzplänen	30
Literaturverzeichnis	34

## 1 Einführung

Der Erforschung der Künstlichen Intelligenz (KI) wird seit Beginn der achtziger Jahre seitens der Betriebswirtschaftslehre zunehmende Beachtung geschenkt. Insbesondere unter dem Etikett "Expertensystem" werden dem betrieblichen Anwender neuartige Leistungspotentiale informationsverarbeitender Automaten versprochen. Trotz anspruchsvoller Attribute - wie etwa dem der "wissensbasierten Problemlösung" - bleibt es oftmals unklar, worin die Neuartigkeit solcher Expertensysteme gegenüber konventioneller Software bestehen soll<sup>1)</sup>.

Ein Expertensystem wird hier als ein informationsverarbeitender Automat verstanden, der sich im Vergleich zu seinen konventionellen Pendanten dadurch auszeichnet, daß:

- der Benutzer den Automaten beauftragen kann, ein Problem zu bewältigen<sup>2)</sup>, ohne hierbei zu beschreiben, wie der Automat bei seiner Problembewältigung vorgehen soll (externer Aspekt der nonprozeduralen Benutzeroberfläche);

1) Vgl. hierzu z.B. die kritischen Anmerkungen bei Born (1986), S. 26ff.

2) Diese Sichtweise entspricht dem Performanzmodus der Künstlichen Intelligenz, der nicht - wie bei der weit verbreiteten Sichtweise des Simulationsmodus üblich - auf die Nachahmung menschlicher Fähigkeiten abhebt, sondern nur auf die Fähigkeit, vom Benutzer spezifizierte Probleme zu bewältigen. Oftmals wird zusätzlich gefordert, von einem Expertensystem erst dann zu sprechen, wenn die bearbeiteten Probleme denjenigen Schwierigkeitsgrad erreichten, den Aufgaben annehmen, die gewöhnlich von "Experten" übernommen werden. Wegen der Problemverschiebung auf den vagen Expertenbegriff wird dieses Postulat hier nicht übernommen. Es wird unterstellt, daß die nachfolgend skizzierten Probleme (Aufgaben, Funktionen) aus dem Bereich der Netzplantechnik in ihrer Gesamtheit als hinreichend schwierig angesehen werden, um den Begriff des Expertensystems - auch ohne dieses Postulat - als unstrittig anzuerkennen. Vgl. zur näheren Diskussion der oben angesprochenen Modi der Künstlichen Intelligenz sowie der involvierten begrifflichen Aspekte Zelewski (1986), S. 109ff. u. 142.

- der Automat bei seiner Problembewältigung Wissen aus dem Problembereich anwendet, das explizit in seiner "Wissensbasis" abgespeichert ist (interner Aspekt der Wissensbasierung).

Am Beispiel der Netzplantechnik<sup>3)</sup> wird aufgezeigt, auf welche Weise Ansätze aus der KI-Forschung dazu beitragen können, das Leistungspotential konventioneller Techniken im betriebswirtschaftlichen Bereich zu erweitern. Dabei steht nicht der Aspekt der horizontalen Leistungssteigerung im Vordergrund, die Techniken hinsichtlich der Ausführung solcher Funktionen (Aufgaben) effizienter zu gestalten, die bereits durch konventionelle Algorithmen des Operations Research erfüllt werden. Hierzu rechnen - im Rahmen der Netzplantechnik - vor allem die Funktionen der Zeit- und Kapazitätsplanung. Vielmehr werden vornehmlich Beiträge zur vertikalen Leistungssteigerung angesprochen, welche die Netzplantechnik um solche Funktionen ergänzen, die im konventionellen Rahmen noch nicht oder nur in sehr schwerfälliger Weise durch informationsverarbeitende Automaten realisiert werden können<sup>4)</sup>.

Es wird nicht beabsichtigt, eine Bereicherung der Netzplantechnik um grundsätzlich neuartige Instrumente vorzustellen. Intention ist stattdessen darzulegen, auf welche Weise Funktionen, die bisher wegen der Unmöglichkeit oder zumindest der Schwerfälligkeit ihrer konventionellen Automatisierung vornehmlich dem "Sachverstand" oder der "Intuition" von Anwendern der Netzplantechnik vorbehalten blieben, einer automatischen Ausführung durch Expertensysteme übertragen werden können.

---

3) Die Konzepte der Netzplantechnik werden hier als bekannt vorausgesetzt; vgl. etwa Küpper (1975); Neumann (1975), S. 188ff.; Matthes (1984), Sp. 1327ff.  
4) Es wird unterstellt, daß die betrachteten Techniken automatengestützt angewendet werden.

Vorzüge einer solchen Verlagerung des Funktionsträgers vom Menschen auf den Automaten können darin gesehen werden, daß:

- der Mensch von Routineaufgaben entlastet wird und hierdurch mehr Freiraum für anspruchsvollere Aufgaben erhält<sup>5)</sup>;
- Aufgaben, denen - nach Ansicht des Verf. - im Rahmen der Netzplantechnik wesentliche Bedeutung zukommt, dem diffusen Gebiet der menschlichen Intuition entzogen werden<sup>6)</sup>.

Da die automatengestützte Implementierung der letztgenannten Aufgaben die Operationalisierung der zugrundeliegenden Konzepte veranlaßt, trägt sie zu einer intensiven geistigen Durchdringung und zur Transparenz der Aufgabenerfüllung bei. Hieraus können sowohl inhaltliche Fortentwicklungen der Konzepte als auch ein breiterer Zugang zu ihrer Anwendung resultieren.

---

5) Allerdings kann dieser These entgegengehalten werden, daß das menschliche Denken nicht nur von Routineaufgaben entlastet, sondern zugleich auch den Standards der automatengestützten Informationsverarbeitung unterworfen wird. Hierdurch werde nicht die Kreativitätsentfaltung gefördert, sondern im Gegenteil erheblich behindert. Vgl. zu dieser Reduktionismus-These etwa Rogers (1984), S. 222ff., insbesondere S. 226f.; Floyd (1985), S. 3 u. 5. Daher ist beim Übergang von intuitiver zu automatengestützter Aufgabenerfüllung insbesondere darauf zu achten, welchen Grad von Anwendungsflexibilität dem Automaatennutzer erhalten bleibt. Diesbezüglich werden die nachfolgenden Ausführungen die These zu belegen versuchen, daß Ansätze der Künstlichen Intelligenz die Flexibilität der menschlichen Intuition tendenziell weit weniger einschränken, als es bei isolierter Anwendung der konventionellen Informationstechnik der Fall ist.

6) Hierin besteht jedoch auch die Gefahr einer Akzeptanzbarriere: Fachkräfte, die ihren Status bisher auf solches intuitives Wissen bezüglich der Anwendung der Netzplantechnik stützten, könnten eine Enteignung und Verbreitung ihres Expertenwissens befürchten. Vgl. zu dieser Enteignungs-These Briefs (1982), S. 113; Hoß (1984), S. 11, 45 u. 68. In Anerkennung dieser Akzeptanzproblematik sind die Ausführungen des Verf. nur auf den Fall bezogen, daß die vorgestellten Expertensystem-Konzepte von den potentiell Betroffenen als Unterstützung - nicht als Konkurrenz - empfunden werden.

Für den Entwurf eines Expertensystems auf dem Gebiet der Netzplantechnik wird phasenorientiert differenziert in:

- Konzepte zur Unterstützung der Modellkonstruktion, die im allgemeinen unter der Aufgabe der Strukturanalyse von Netzplänen zusammengefaßt werden, und
- Konzepte zur Unterstützung der Modellösung, welche die Auswertung bereits vorliegender, als Netzpläne formulierter Modelle betreffen.

Da sich die konventionelle Automatenunterstützung der Netzplantechnik fast ausschließlich auf die zweite Phase erstreckt und infolgedessen hier der Automateinsatz für potentielle Anwender einen - relativ - hohen Vertrautheitsgrad besitzt, wird zunächst auf die Netzplan-Auswertung eingegangen.

## 2 Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Auswertung von Netzplänen

Es wurden bereits einleitend Aspekte der horizontalen Leistungssteigerung in den Hintergrund gerückt. Daher erfährt hier der Einsatz nebenläufiger (paralleler) Algorithmen auf der Basis von Automaten mit Multiprozessor-Architektur, der gegenüber gewöhnlichen sequentiellen Algorithmen die Auswertung von Netzplänen erheblich beschleunigen könnte, keine nähere Würdigung<sup>7)</sup>. Zudem ließe sich darüber streiten, ob der Bereich nebenläufiger Algorithmen als spezifisches Anliegen der KI-Forschung betrachtet werden darf.

7) Vgl. hierzu Zelewski (1986a), S. 672ff. Speziell sei auf die Ausführungen von Pohl (1971), S. 130ff., verwiesen, welche die Ermittlung eines Weges minimaler Länge zwischen zwei ausgezeichneten Knoten in einem gerichteten Graphen mit Hilfe der bidirektionalen Suchstrategie beschreiben. Dieses Konzept stimmt strukturell mit der Bestimmung kürzester Wege in Netzplänen überein. Interessant ist hierbei der bei Pohl (1971), S. 130, Fig. 2, nachgewiesene Effizienzvorteil der bidirektionalen Suchstrategie gegenüber ihrem unidirektionalen Pendant, das auch den konventionellen Auswertungsmethoden der Netzplantechnik zugrundeliegt.

Ansätze zur vertikalen Leistungsausweitung der Netzplantechnik erstrecken sich vornehmlich:

- in deterministischer Hinsicht auf die komfortable Einbeziehung von Entscheidungsalternativen sowie
- unter stochastischem Blickwinkel auf die Möglichkeit, Wissen über Risikofaktoren explizit darzustellen und netzplanbezogen auszuwerten.

### 2.1 Deterministische Leistungserweiterung

Die konventionelle Netzplantechnik läßt zwar die Repräsentation von Entscheidungsalternativen zu<sup>8)</sup>. Doch vermochten sich diese Varianten in der praktischen Anwendung nicht durchzusetzen, weil allgemeingültige Algorithmen zur Auswertung solcher Entscheidungsnetzpläne strukturell so aufwendig ausfallen, daß sie keine breite Akzeptanz fanden<sup>9)</sup>.

Es bietet sich jedoch an, das Konzept der AND/OR-Graphen<sup>10)</sup> auf die Berechnung solcher Netzpläne zu übertragen. Es wurde seitens der KI-Forschung entwickelt, um Aufgabenkomplexe so weit in einfachere Teilaufgaben zu zerlegen, daß für die zuletzt erzeugten Teilaufgaben bereits implementierte Lösungsverfahren vorliegen. AND-Knoten verknüpfen hier Teilaufgaben, die zur Erfüllung ihrer jeweils übergeordneten Aufgabe gemeinsam ausgeführt werden müssen. OR-Knoten verbinden

8) Gemeint sind hiermit beispielsweise die Entscheidungsknoten bei Decision-CPM; vgl. Crowston (1970), S. 435ff. Der Verf. betrachtet dagegen stochastische Netzknoten im GERT-Konzept - vgl. Neumann (1975), S. 324f. - nicht als eine solche Darstellungsmöglichkeit, obwohl auch hier von Entscheidungsnetzplänen gesprochen wird. Denn mit Hilfe dieser stochastischen Netzknoten lassen sich zwar alternative Projektablaufe abbilden, doch werden diese Alternativen nicht als Entscheidungen modelliert, die im Rahmen der GERT-Technik getroffen werden können. Vielmehr werden ihre Realisierungen als Zufallseignisse im Rahmen vorgegebener Wahrscheinlichkeitsverteilungen behandelt.

9) Vgl. die Algorithmusbeschreibung bei Crowston (1970), S. 446ff. Selbst wenn GERT-Netzpläne als Darstellungsmöglichkeit von Entscheidungen akzeptiert würden, vgl. die Anmerkung bei Neumann (1975), S. 347, zu ihrer fehlenden praktischen Anwendungsmöglichkeit.

10) Vgl. Chang (1971), S. 117ff.; Nilsson (1980), S. 40f. u. 99ff.



dagegen alternative Teilaufgaben, von denen nur eine zur Ausführung ihrer übergeordneten Aufgabe erfüllt werden muß.

Entscheidungsnetzpläne lassen sich ohne Schwierigkeiten in solche AND/OR-Graphen transformieren). Hierzu sind gewöhnliche Netzknoten auf AND-Knoten sowie Entscheidungs-Netzknoten auf OR-Knoten abzubilden<sup>11)</sup>. Da für die Berechnung zieloptimaler Wege in AND/OR-Graphen leistungsfähige Algorithmen entwickelt wurden<sup>12)</sup>, können diese auf die Ermittlung zeit- oder kostenminimaler Wege in Entscheidungsnetzplänen mittelbar angewendet werden.

Es wäre betriebswirtschaftlich von Interesse, Expertensysteme zu entwickeln, welche ihren Benutzern weiterhin die Eingabe von Projektbeschreibungen in der gewohnten - allerdings um Entscheidungsknoten angereicherten - Netzplantechnik erlauben. Solche Automaten müßten diese Darstellungsweise intern in AND/OR-Graphen transformieren, jene entsprechend den Benutzerzielen<sup>13)</sup> auswerten und schließlich die Ergebnisse in benutzer-

11) Da in AND/OR-Graphen Knoten Aufgaben darstellen, die im Netzplan-Kontext als Vorgänge zur Erfüllung der Aufgaben zu interpretieren sind, können nur Netzpläne vom Vorgangsknoten-Typus unmittelbar in solche Graphen umgewandelt werden. Dies stellt jedoch keine Beschränkung der Allgemeingültigkeit dar, weil sich Netzpläne vom Vorgangskanten-Typus in solche vom Vorgangsknoten-Typus transformieren lassen.

12) Es handelt sich vornehmlich um den A\*-Algorithmus und dessen Derivate, deren Beschreibung den Rahmen dieser Ausführungen übersteigen würde. Vgl. hierzu Hart (1968), S. 100ff.; Chang (1971), S. 120ff.; Nilsson (1980), S. 72ff.; Pearl (1983), S. 2ff. Insbesondere verweisen diese Quellen auf Möglichkeiten, die Effizienz des A\*-Algorithmus durch spezifische Schätzwerte zu erhöhen, welche auf Wissen über die spezielle Struktur des graphisch modellierten Problems beruhen. Hierdurch eröffnen sich - bisher nur rudimentär in Angriff genommene - Perspektiven, die Wissensbasierung von Expertensystemen auch zur Effizienzsteigerung der Auswertung von Graphen - und mittelbar auch von Netzplänen - einzusetzen. Infolge des eingangs erwähnten geringen Stellenwerts von Effizienzgesichtspunkten wird dieser Aspekt jedoch nicht weiterverfolgt.

13) Da der A\*-Algorithmus von einer abstrakten Bewertungsfunktion für die Wege in AND/OR-Graphen ausgeht, können durch sie beliebige quantitativ formulierte Zielinhalte, wie z.B. Projektdauern oder -kosten, berücksichtigt werden.

freundlicher, z.B. wieder an Konventionen der Netzplantechnik orientierter Weise ausgeben.

Die grundsätzliche Durchführbarkeit einer solchen Verknüpfung von AND/OR-Graphen und Netzplantechnik demonstrieren Daniel und Marcus<sup>14)</sup>. Sie erweitern CPM-Netzpläne um Entscheidungsalternativen und repräsentieren das Resultat mit der Hilfe von AND/OR-Graphen. Auf dieser Basis wird die Entscheidung, die zur minimalen Projektdauer führt, bestimmt<sup>15)</sup>.

## 2.2 Stochastische Leistungserweiterung

Im zuvor geschilderten deterministischen Fall wird das Leistungsvermögen der Netzplantechnik dadurch aus-  
geweitet, daß eine im Ansatz bereits verfügbare, aber infolge unpraktikabler Auswertungs-Algorithmen nicht anwendungstaugliche Funktion - die Modellierung von Entscheidungen - durch Einbettung in Konzepte der Künstlichen Intelligenz so modifiziert wird, daß sie sich praktisch ausführen läßt. In stochastischer Hinsicht bieten Expertensysteme dagegen durch den expliziten Einbezug von qualitativem Wissen die Möglichkeit, konzeptionell neuartige Funktionen in die Automaten zur Unterstützung der Netzplantechnik zu integrieren. Diese Operationalisierung von qualitativem Wissen stellt einen wesentlichen Beitrag zu dem eingangs angeführten Aspekt dar, intuitives menschliches Expertenwissen auf Automaten zu übertragen.

14) Vgl. Daniel (1974), S. 818ff., und Marcus (1984), S. 1044ff. Zwar werden hier AND- und OR-Knoten in einem einzigen Knotentypus vermengt, doch bleibt diese Knotendifferenzierung in einer äquivalenten, oftmals üblichen Unterscheidung der Verknüpfung der Eingangskanten eines Knotens bewahrt.

15) Die Ausführungen bei Marcus (1984), S. 1046f., zur Graphen-Berechnung auf der Basis von konventionellen und von KI-orientierten Algorithmen verdeutlichen besonders anschaulich die Leistungsfähigkeit des in Fußnote 12) angesprochenen, von Marcus als "heuristische Suche" bezeichneten A\*-Algorithmus.

### 2.2.1 Erweiterung von Netzplänen durch Risikofaktoren

Die wissensbasierte Funktionserweiterung wird exemplarisch an der Berücksichtigung von Risikofaktoren, welche sich auf die Realisierung geplanter Projektdauern auswirken, verdeutlicht. Als Risikofaktoren werden alle Einflußgrößen eines Projekts angesehen, welche durch Variation ihrer Ausprägungen den Wert von mindestens einem Vorgangsattribut des zugrundeliegenden Netzplans verändern können. Als Vorgangsattribut wird nur die - im Rahmen der Netzplantechnik vorherrschende - Vorgangsdauer betrachtet<sup>16)</sup>. Risikofaktoren sind beispielsweise bei Transportvorgängen Unfälle und unerwartete Schwierigkeiten beim Überschreiten nationaler Grenzen, welche die geplante Dauer der Transporte verzögern, oder im Falle von Produktionsvorgängen unvorhergesehene Ausfälle von Betriebsmitteln, wodurch bis zur Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft die Ausführung der betroffenen Vorgänge unterbrochen wird.

Im Rahmen der konventionellen Netzplantechnik finden solche Risikofaktoren - sofern überhaupt - nur rudimentäre Berücksichtigung, indem den betroffenen Vorgängen anstelle deterministischer Ausführungsdauern Wahrscheinlichkeitsverteilungen über den Spektren möglicher Vorgangsdauern zugeordnet werden. Dieses Konzept erweist sich jedoch in mehrfacher Hinsicht als kritikwürdig:

- Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen besitzen statischen Charakter. Sie müssen ex ante fixiert werden. Sie lassen es daher nicht zu, bei der tatsächlichen Projektausführung den zugrundeliegenden Netzplan - je nach Eintritt oder Nichtrealisierung der erfaßten Risikofaktoren - dynamisch zu modifizieren.

---

16) Die nachfolgenden Ausführungen lassen sich ohne Schwierigkeiten von Vorgangsdauern auf Minimal- und Maximalfristen zwischen Anfangs- oder Endereignissen von Vorgängen, auf Vorgangskosten oder auf weitere Vorgangsattribute übertragen, da sie sich nicht auf spezielle Eigenschaften des Attributs "Vorgangsdauer" stützen.

- Sofern die Risikofaktoren qualitativer Art<sup>17)</sup> sind, verletzen sowohl kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen, wie sie etwa bei der GERT-Netzplantechnik gewöhnlich unterstellt werden, als auch diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich über Spektren von jeweils mehr als zwei möglichen Vorgangsdauern erstrecken, die Anforderung der meßskalentreuen Risikoabbildung.
- Wenn die Riskofaktoren mehr als drei, jeweils unterschiedliche Vorgangsdauern implizierende Ausprägungen besitzen, stellen sich die 3-Punkte-Schätzungen optimistischer, normaler und pessimistischer Vorgangsdauern, wie sie der PERT-Netzplantechnik zugrundeliegen, als strukturell inadäquat heraus.

Da im allgemeinen Projekte sowohl von Risikofaktoren mit dichotomen als auch von solchen mit mehr als dreiwertigen Ausprägungsbereichen abhängen, kann keines der o.a., jeweils auf einen bestimmten Risikotypus spezialisierten konventionellen Netzplantechnik-Konzepte das zeitbezogene Projektrisiko generell unverzerrt abbilden.

### 2.2.2 Repräsentation von Wissen über Netzpläne mit Risikofaktoren

Die KI-Forschung verließ die konventionelle Strategie des Operations Research, reale Einflußgrößen - hier die Risikofaktoren - auf quantitative formale Ersatzgrößen (hier: Wahrscheinlichkeitsverteilungen) abzubilden. Stattdessen wurde der Schwerpunkt auf die Verarbeitung qualitativ formulierten Wissens gelegt<sup>18)</sup>. Eine

17) Als qualitativ wird hier eine Einflußgröße verstanden, für die nur dichotome Ausprägungen, also keine graduellen Abstufungen, definiert sind. Eine solche Dichotomie liegt z.B. im Falle eines präzise spezifizierten Unfalls ein, der nur entweder eintreten kann oder nicht.

18) Da die automateninterne Repräsentation von qualitativem Wissen zumeist mit Hilfe einer Variante der symbolischen Logik (etwa der Prädikatenlogik) erfolgt, wird dieser Aspekt der Künstlichen Intelligenz in der Regel unter dem Stichwort der symbolischen Informationsverarbeitung hervorgehoben. Vgl. de Kleer (1979), S. 13ff., insbesondere S. 23ff.; Newell (1982), S. (1982), S. 37, 41f. u. 46ff.; Chandrasekaran (1984), S. 42f. u. 46ff.

Vielzahl von Konzepten zur symbolischen Wissensrepräsentation wurde entwickelt<sup>19)</sup>. In der KI-Forschung hat sich für keine dieser Darstellungsweisen eine eindeutige Präferenz gebildet. Vielmehr herrscht Übereinstimmung, daß das Repräsentationskonzept jeweils entsprechend der Struktur des darzustellenden Wissens gewählt werden muß. Darüber hinaus stellt sich das Wissen, welches der Bearbeitung einer Aufgabe zugrundegelegt werden soll, zumeist als derart heterogen strukturiert heraus, daß es sich mit Hilfe eines homogenen Repräsentationskonzepts nicht adäquat erfassen läßt<sup>20)</sup>. Daher werden in jüngster Zeit mit Nachdruck Konzepte zur hybriden Wissensrepräsentation erforscht, die es gestatten, unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche strukturell verschiedenartige Repräsentationsformen zur Editierung einer heterogenen Wissensbasis zu verwalten<sup>21)</sup>.

Auch das Wissen über die Risikofaktoren eines Projekts erweist sich als heterogen. Deklaratives, komplex strukturiertes Wissen erstreckt sich zunächst auf die Art der Risikofaktoren und ihre jeweils möglichen Ausprägungen. Für diesen Wissenstypus hat sich das Repräsentationskonzept der semantischen Rahmen ("frames")<sup>22)</sup> bewährt: Jeder Risikofaktor wird samt seiner möglichen Ausprägungen durch einen solchen Rahmen abgebildet. Falls Abhängigkeiten zwischen diesen Faktoren in der Weise bestehen, daß die Realisierung eines Faktors die Realisierung anderer (Folge-)Faktoren induziert, kann dieser Sachverhalt durch "Vererbungsmechanismen"<sup>23)</sup> zwischen den entsprechenden semantischen Rahmen erfaßt werden.

Kausales Wissen betrifft die Auswirkungen, welche das Eintreten einer bestimmten Ausprägung des jeweils betrachteten Risikofaktors auf die Ausführungsdauern von Projektvorgängen ausübt. Dieses kausale Wissen kann in die o.a. semantischen Rahmen integriert werden,

19) Vgl. zur Übersicht Bobrow (1975), S. 2ff.; Barr (1981), S. 147ff.; Mylopoulos (1984), S. 4ff.

20) Vgl. z.B. Bungers (1984), S. 4 u. 9f.

21) Vgl. etwa Bungers (1984), S. 5; di Primio (1985), S. 33ff.

22) Vgl. Minsky (1975), S. 211ff.; Fikes (1985), S. 904ff.

23) Vgl. Barr (1981), S. 218.

falls die Vorgänge jeweils selbst durch solche Rahmen in der Wissensbasis des Expertensystems dargestellt werden. Denn die Rahmen verfügen über spezielle Prozeduren, mit denen sie andere Rahmen aufrufen und deren Inhalte - hier die Ausführungsdauern der involvierten Vorgänge - gezielt verändern können. Stattdessen läßt sich das kausale Wissen auch mit Hilfe separater Produktionsregeln<sup>24)</sup> darstellen, welche durch ihre "Wenn ... dann ..." -Struktur die Zuordnung von Ursachen (Realisierung einer Ausprägung eines Risikofaktors) und Wirkungen (Veränderung von Vorgangsdauern) in natürlicher Weise erlauben.

Heuristisches Wissen wird dann erforderlich, wenn der Projektplaner kein hinreichendes kausales Wissen über die Auswirkungen der Risikofaktoren auf die Vorgangsdauern besitzt. Heuristische Regeln übernehmen in diesem Fall die Funktion eines Substituts, das den Risikofaktoren aufgrund von Erfahrungswissen oder Plausibilitätsüberlegungen Auswirkungen auf die Vorgangsdauern zuordnet<sup>25)</sup>. Für die Darstellung solcher heuristischer Regeln empfiehlt sich wegen der strukturellen Gleichheit die Anwendung der zuvor erwähnten Produktionsregeln.

Ein Expertensystem, das die Auswirkungen von Risikofaktoren auf einen Netzplan verwalten soll, muß diesen Netzplan selbst als Wissenskomponente enthalten. Für diesen Zweck eignen sich - wie bereits oben angedeutet - semantische Rahmen, um das Wissen über die Vorgänge des Projekts zu repräsentieren. Ein solcher Rahmen kann als eine lineare Liste aufgefaßt werden, deren Felder ("slots") Informationen über alle netzplanrelevanten Vorgangsattribute - wie z.B. Vorgangsdauer, Ausführungs- und Beschleunigungskosten sowie die Kapazitätsbeanspruchung - enthalten. In diesem Sinne entsprechen die Vorgangs-Rahmen in der Wissensbasis des Expertensystems den Knoten im korrespondierenden Netzplan vom

---

24) Vgl. Davis (1975), S. 1ff.; Hayes-Roth (1985), S. 921ff.

25) Vgl. hierzu die Ausführungen auf S. 13f.

Vorgangsknoten-Typus<sup>26)</sup>. Darüber hinaus können die Rahmen auch die Informationen über die Kanten im Netzplan aufnehmen, indem in weiteren Feldern die Reihenfolgebeziehungen zu vor- und nachgelagerten Vorgängen vermerkt sowie Minimal- und Maximalfristen bezüglich der Ausführung dieser Vorgänge eingetragen werden. Auch dieses Wissen über die Projektstruktur stellt deklaratives Wissen dar.

Da das Expertensystem nicht nur den Netzplan, die Risikofaktoren und deren Auswirkungen auf die Vorgangsdauern beschreiben, sondern den Netzplan auch in Abhängigkeit von Realisierungen der Risikofaktoren dynamisch verwalten soll, muß als vierte Hauptkomponente seiner Wissensbasis prozedurales Wissen über die (Neu-)Berechnung von Netzplänen dargestellt werden. Hierbei handelt es sich um die Einbettung der Auswertungs-Algorithmen der konventionellen Netzplantechnik in das Expertensystem<sup>27)</sup>. Dieses Wissen kann in der Gestalt konventio-

---

26) Wie bereits in Fußnote 11) ausgeführt, werden Netzpläne vom Vorgangskanten-Typus mittelbar dadurch berücksichtigt, daß diese in Netzpläne vom Vorgangsknoten-Typus transformiert werden.

27) Daher wurde eingangs hervorgehoben, wissensbasierte Automaten aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz nicht als Alternative zur konventionellen Netzplantechnik, sondern als deren Erweiterung um zusätzliche Funktionen zu betrachten.

neller, mit Hilfe einer prozeduralen Programmiersprache verfaßter Routinen in der Wissensbasis abgelegt werden<sup>28)</sup>.

Die skizzierte heterogene Wissensbasis eines Expertensystems zur Unterstützung der Netzplantechnik mit expliziter Risikoberücksichtigung erfordert also die Integration von Repräsentationskonzepten, die auf semantischen Rahmen, auf Produktionsregeln und auf Prozeduren beruhen. Die KI-Forschung hat mehrere Entwicklungsumgebungen zur Erezugung und Verwaltung solcher hybriden Wissensbasen zur Verfügung gestellt. Hierzu zählen beispielsweise die Systeme BABYLON<sup>29)</sup>, KEE<sup>30)</sup> und LOOPS<sup>31)</sup>.

### 2.2.3 Eine exemplarische Verwirklichung des Risikofaktoren-Konzepts

Eine der ersten praktischen Realisierungen dieses Konzepts haben jüngst Levitt und Kunz vorgestellt<sup>32)</sup>. Mit Hilfe der Entwicklungsumgebung KEE erstellten sie das Expertensystem SCHEDULING ASSISTANT, das sich vornehmlich auf semantische Rahmen stützt. Diese dienen zur Darstellung eines PERT-Projektplans sowie acht separater Risikofaktoren. Die Routinen zur numerischen Netzplan-Auswertung sind als prozedurale Komponenten spezieller semantischer Rahmen implementiert. Über den oben erwähnten Vererbungsmechanismus semantischer Rahmen wurde die unkomplizierte Handhabung von Unternetzen realisiert, welche jeweils einen Vorgang des überge-

28) Auch semantische Rahmen bieten die Möglichkeit, als Erweiterung ihrer Informationsfelder Auswertungsroutinen als prozedurale Komponenten aufzunehmen. Da solche Rahmen ohnehin zur Repräsentation von Wissen über Vorgänge und Risikofaktoren verwendet werden, liegt es nahe, die Auswertungs-Algorithmen der Netzplantechnik in diese Rahmen ebenfalls einzubetten; vgl. Levitt (1985), S. 67. Hierbei handelt es sich allerdings um ein implementierungstechnisches Detail, dem keine grundsätzliche Bedeutung für die Strukturierung der Wissensbasis eines Expertensystems auf dem Gebiet der Netzplantechnik zukommt.

29) Vgl. di Primio (1985), S. 34ff.

30) Vgl. Levitt (1985), S. 59f.

31) Vgl. Stefik (1983), S. 3ff.

32) Vgl. Levitt (1985), S. 58ff.



ordneten Netzplans in eine verfeinerte Ablaufstruktur zerlegen.

Durch Produktionsregeln wird das - hier nur heuristische - Wissen darüber abgebildet, wie sich der Eintritt von Risikofaktoren auf die Ausführungsdauern von Projektvorgängen auswirkt. Als Risikofaktoren werden sowohl solche zugelassen, deren Realisierung hiervon abhängige Vorgänge verzögert (Negativfaktoren), als auch solche, deren Eintritt die betroffenen Vorgänge beschleunigt (Positivfaktoren). Es werden nur Faktoren mit jeweils dichotomer Ausprägungsmenge, welche die Elemente "realisiert" und "nicht-realisiert" umfaßt, berücksichtigt. Die PERT-spezifisch berechnete<sup>33)</sup> Standard-Vorgangsdauer wird durch eine Produktionsregel (Wirkungs-Regel) auf die pessimistische Schätz-Variante heraufgesetzt, wenn der durch diese Regel identifizierte Negativfaktor realisiert wird. Im Falle des Eintritts eines Positivfaktors wird die Standard-Schätzung entsprechend auf die optimistische Schätz-Variante herabgesetzt<sup>34)</sup>.

Die Besonderheit des Ansatzes von Levitt und Kunz liegt darin, daß der Benutzer kein Wissen über die Realisierung von Risikofaktoren als exogene Informationen einzugeben braucht. Vielmehr wird bei der erstmals erfolgenden Netzplan-Konstruktion und -Berechnung als Prämisse unterstellt, daß keiner der Risikofaktoren realisiert ist. Anstelle der Risikofaktoren werden als Indikatoren für deren Eintritt beobachtet: Es handelt sich um die zeitbezogenen Realisierungsabweichungen bei der Verwirklichung des geplanten Projekts. Falls bei realer Beendigung eines Vorgangs dessen Ist-Vorgangsdauer von seiner im Netzplan unterstellten Soll-Vorgangsdauer abweicht, wird dieser Vorgang als verzögert oder als beschleunigt gekennzeichnet.

Als heuristische Regel (Indikations-Regel) bezüglich der Realisierung von Risikofaktoren gilt: Wenn mindestens zwei verzögerte (beschleunigte) Vorgänge im aktuellen Projektzustand existieren, die vom Eintreten des-

33) Vgl. Neumann (1975), S. 212ff., insbesondere S. 217.

34) Vgl. Levitt (1985), S. 71.

selben Risikofaktors abhängen, wird dieser Negativfaktor (Positivfaktor) als realisiert angenommen<sup>35</sup>). Da die Signifikanzschwelle zweier Realisierungsabweichungen einen groben Indikator darstellt, der weder den absoluten Abweichungsbetrag noch den relativen Abweichungsgrad noch die von der Vorgangsart abhängige Abweichungsbedeutung erfaßt, fragt das Expertensystem stets, ob sein Benutzer die Risikofaktor-Annahme akzeptiert. Im negativen Fall bleibt der Netzplan - bis auf die automatische Aktualisierung aller Zeitgrößen - unverändert.

Wenn der Benutzer die Indikation des Risikoeintritts jedoch bejaht, identifiziert das Expertensystem alle Projektvorgänge, die noch nicht abgeschlossen sind und von denen der Automat weiß, daß ihre Ausführungsdauer durch den realisierten Risikofaktor beeinflusst wird. Die Soll-Ausführungsdauern dieser abhängigen Vorgänge werden - entsprechend den o.a. heuristischen Wirkungsregeln - auf die pessimistische herauf- oder auf die optimistische Schätz-Variante herabgesetzt. Erst danach werden die Zeitgrößen des Netzplans unter zusätzlicher Berücksichtigung dieser risikoinduzierten Modifizierungen von noch nicht abgeschlossenen Vorgängen aktualisiert.

Die Funktionserweiterung gegenüber konventionellen Automaten zur Unterstützung der Netzplantechnik erfolgt hier - hinsichtlich der Einbeziehung von projektbeeinflussenden Risikofaktoren - also in drei Wissensbereichen, die erstmals explizit als Automatenwissen dargestellt werden:

---

35) Durch diese Kopplung mehrerer Vorgangsdauer-Abweichungen über einen gemeinsamen Risikofaktor wird die Prämisse stochastisch unabhängiger Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Vorgangsdauern, wie sie von der PERT-Netzplantechnik gefordert wird, implizit aufgehoben. Diese Interdependenz von Vorgängen entspricht eher der Realität, in der tatsächlich von derselben Einflußgröße (Risikofaktor) multiple Wirkungen (Vorgangsdauer-Abweichungen) ausgehen können.

- Deskriptives Wissen über einen Risikofaktor kennzeichnet jeweils die Vorgänge, die von seinem Eintritt betroffen sind, und gibt die Richtung dieser Auswirkungen an.
- Heuristisches Wissen schreibt Realisierungsabweichungen bei der Planausführung Indikatorqualität bezüglich des Eintritts von Risikofaktoren zu.
- Heuristisches Wissen legt die - mutmaßliche - Auswirkung der Realisierung eines Risikofaktors auf die (geplante) Ausführungsdauer aller abhängigen Vorgänge fest.

Die erste Komponente des Risikowissens wird durch das jeweils zu bearbeitende Projekt individuell determiniert. Sie entzieht sich daher einer verallgemeinernden Betrachtung. Die beiden folgenden heuristischen Wissenskomponenten geben jedoch zu einigen generellen Anmerkungen im Hinblick auf zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten des skizzierten Prototyps von Levitt und Kunz Anlaß.

#### 2.2.4 Erweiterungsperspektiven

Erstrebenswert wäre es im Sinne einer wirklichkeitsgetreuen Realitätsmodellierung, das ad hoc formulierte heuristische Wissen über Risikofaktor-Indikation und -Auswirkung durch kausales Wissen über die tatsächlich zugrundeliegenden Sachverhalte zu ersetzen. Insofern deckt das Bemühen um die Entwicklung von Expertensystemen durch seinen Zwang zur Wissens-Explizierung Mängel im aktuellen Wissensstand der Projektplanung auf. Die von Projektplanern in praxi zumeist intuitiv vorgenommene Wahrnehmung von Risikosituationen und die hieran anschließende Anpassung von Netzplänen hat bisher - gerade wegen der Inoperationalität intuitiver Planungshandlungen - im Regelfall nicht zu solchem kausalen Wissen geführt.

Die explizite Verfügbarkeit solchen kausalen Wissens würde es ermöglichen, die o.a. groben heuristischen Regeln durch differenzierte Annahmen über den Eintritt von Risikofaktoren und ihre zeitlichen Auswirkungen zu ersetzen. Falls etwa der Vorgang eines Überseetrans-

ports infolge militanter Auseinandersetzungen im Gebiet der geplanten Transportroute verzögert oder sogar verhindert wird, kann beispielsweise als revidierte Schätzung der Vorgangsdauer die (Standard-)Transportzeit für die zeitlich kürzeste Alternativroute angesetzt werden.

In diesem Zusammenhang beachtenswert ist, daß auf weitere Konzepte der Künstlichen Intelligenz zurückgegriffen werden kann, um das Problem der kausal fundierten Alternativplanung im Falle des Risikoeintritts zu unterstützen. Im zuvor geschilderten Beispiel des Überseetransports besteht nicht die Notwendigkeit, daß der Benutzer die Transportzeit auf der günstigsten Alternativroute explizit eingibt - sei es ex ante in die Wissensbasis des Expertensystems oder ex post bei Blockierung der ursprünglich geplanten Route. Vielmehr besitzen Expertensysteme die Fähigkeit, aufgrund vorgegebener Planungsziele und qualitativer Beschreibungen des Raums zulässiger Planungsalternativen zieloptimale Pläne selbständig zu erzeugen. Konkret bedeutet dies im hier betrachteten Exempel, daß aus dem geographischen Wissen über grundsätzlich mögliche Schifffahrtsrouten zwischen Start- und Zielhafen des Überseetransports, aus dem technischen Wissen über Eigenschaften des eingesetzten Schiffstyps (z.B. Tiefgang und Geschwindigkeit) sowie aus aktuellen Zustandsinformationen - hier der krisenbedingten Unpassierbarkeit einer Route - jeweils die aktuell günstigste Transportverbindung abgeleitet werden kann. Da auf die komplexen Techniken der Künstlichen Intelligenz zur Bewältigung solcher - grobenteils qualitativ spezifizierten - Planungsprobleme nicht näher eingegangen werden kann<sup>36)</sup>, sei zumindest auf zwei knappe Beispiele verwiesen, in denen jeweils ein Expertensystem Routenplanungen vorzunehmen vermag, die auch qualitatives Wissen über geographische und transporttechnische Gegebenheiten berücksichtigen<sup>37)</sup>.

Der Ansatz von Levitt und Kunz zeichnet sich u.a. durch seine endogene Ableitung des Eintritts von Risikofaktoren aus Realisierungsabweichungen der Projektab-

36) Vgl. als Übersichtsbeitrag Tate (1985).

37) Vgl. Hendrix (1981), S. 348 u. 350; Busche (1986), S. 7X-6f.

wicklung aus. Hierdurch wird einerseits der Beobachtungsaufwand des Benutzers auf die - ohnehin auch im Rahmen der konventionellen Netzplantechnik übliche - Überwachung der tatsächlichen Vorgangsdauern beschränkt. Andererseits wird jedoch die Möglichkeit ausgeschlossen, originäres Wissen über Risikofaktoren im Falle ihrer Realisierung einzubringen. Daher liegt es nahe, die heuristischen Indikator-Regeln nur dann anzuwenden, wenn keine zeitnahen Informationen über den Realisierungsstatus von Risikofaktoren vorliegen. Diese zweistufige Hierarchie von Konzepten zur Ermittlung der Risikoindikation stellt ihrerseits eine heuristische Metaregel bezüglich der Rangfolge alternativer Wissensquellen für das gleiche Wissensobjekt dar. Sie ließe sich bei Erschließung weiterer Wissensquellen entsprechend erweitern. Dies wäre etwa der Fall, wenn einander widersprechende exogene Informationen über die Risikoindikation vorliegen und dann die Glaubwürdigkeit dieser Informationen heuristisch beurteilt würde. Eine solche Bewertung könnte z.B. nach Maßgabe der Zuverlässigkeit der zugehörigen Informationsquellen in vergangenen Planungsperioden erfolgen, sofern entsprechende Angaben in der Wissensbasis im Zeitablauf akkumuliert wurden. Darüber hinaus könnte das Expertensystem auf Informationen über Realisierungen von Risikofaktoren zurückgreifen, die es aus einem anderen, auf die Funktion eines Frühwarnsystems spezialisierten Expertensystem<sup>38)</sup> im Rahmen der verteilten Informationsverarbeitung abrufen.

Eine noch weitergehende Ausweitung erfährt das Expertensystem-Konzept für die Netzplantechnik, wenn das Wissen über die Auswirkungen des Eintritts eines Risikofaktors nicht mehr auf die Ausführungsdauern von Vorgängen beschränkt wird. Es liegt zunächst auf der Hand, in diese Erweiterung ähnliche Vorgangsattribute - wie etwa die Vorgangskosten - einzubeziehen. Dies führt jedoch zu keinen strukturell neuartigen Erkenntnissen. Anders verhält es sich mit dem abstrakteren Attribut der Vorgangszulässigkeit.

38) Auf Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Gestaltung von Frühwarnsystemen kann hier nicht näher eingegangen werden; vgl. hierzu Zelewski (1986b).

In konventionellen Netzplänen wird implizit unterstellt, daß jeder dargestellte Vorgang grundsätzlich ausgeführt werden kann. Dies gilt auch für Entscheidungsnetzpläne, in denen alternative Vorgänge zwar nicht tatsächlich - bis auf einen - realisiert werden, deren Ausführungsmöglichkeit jedoch jederzeit vorausgesetzt wird. Bei realen Projekten kann jedoch der Fall eintreten, daß ein ursprünglich geplanter Vorgang sich nachträglich als unzulässig erweist. Diese Situation läßt sich am bereits oben eingeführten Beispiel erläutern, daß ein Schiffahrtsweg infolge militanter Konflikte der Anrainerstaaten nicht mehr passiert werden kann. Im Gegensatz zu den früheren Erörterungen, die nur eine Neuplanung der Dauer dieses Vorgangs betrafen, den Vorgang selbst aber nicht in Frage stellten, wird nun von der Variante ausgegangen, daß der betroffene Transportvorgang als Ganzes unmöglich wird<sup>39)</sup>.

Dieses Risiko der Gefährdung von Transportwegen durch politische Konflikte läßt sich in der Wissensbasis eines Expertensystems als eigenständiger Faktor abbilden, dessen Realisierung die von ihm abhängigen Vorgänge als unzulässig markiert. Darüber hinaus kann - in Anlehnung an die "truth maintaining"-Konzepte<sup>40)</sup> der Künstlichen Intelligenz - eine Komponente implementiert werden, welche den erstellten Netzplan hinsichtlich Veränderungen im Zulässigkeitsstatus seiner Vorgänge

---

39) Es spricht für die Anwendungsflexibilität des Expertensystem-Konzepts, daß es für denselben realen Sachverhalt - die Blockierung einer geplanten Schiffahrtsroute - je nach Benutzerwunsch zwei unterschiedliche Modellierungsweisen zuläßt. Die erste gehört einer abstrakteren Betrachtungsebene an, auf welcher der betroffene Vorgang (unabhängig von der konkret gewählten Route) nur durch den Transport zwischen Start- und Zielhafen determiniert wird. Hierbei ändert ein Routenwechsel bei identischen Anfangs- und Endpunkten die Vorgangsart nicht, sondern nur deren Dauer. Die zweite, konkretere Perspektive definiert dagegen den Transportvorgang zusätzlich durch die jeweils gewählte Route, so daß ein Routenwechsel zugleich eine Veränderung der Vorgangsart erfordert.

40) Vgl. Doyle (197), S. 127ff.; de Kleer (1986), S. 128ff.

überwacht<sup>41)</sup>. Wenn ein Vorgang als unzulässig erkannt wird, untersucht diese Komponente die Struktur desjenigen Teilnetzplans, der alle Vorgänge umfaßt, die kausale Nachfolger des unzulässigen Vorgangs darstellen. Setzt mindestens einer dieser Nachfolger-Vorgänge die Ausführung des unzulässigen Vorgangs notwendig voraus - dies ist der Normalfall der Netzplantechnik ohne Entscheidungsalternativen - so wird der ursprünglich geplante Netzplan undurchführbar. Das Expertensystem kann seinem Benutzer nicht nur dieses Faktum einschließlich des auslösenden unzulässigen Vorgangs anzeigen, sondern auch die Folgewirkungen in Gestalt der nicht mehr möglichen Nachfolger-Vorgänge auflisten. Hierdurch wird die Suche des Benutzers nach Alternativen für den unzulässigen Vorgang von vornherein auf die Beachtung relevanter Folgewirkungen fokussiert.

Darüber hinaus bietet sich bei der Verwendung von Entscheidungsnetzplänen die Gelegenheit, seitens der Überwachungskomponente prüfen zu lassen, ob der unzulässige Vorgang ein Element aus einer Menge von Vorgangs-Alternativen darstellt, in der noch mindestens ein nicht als unzulässig markierter Vorgang enthalten ist. Bei positivem Prüfungsergebnis ist ferner festzustellen, ob die (zuletzt) unzulässig gewordene Vorgangs-Alternative in der gerade aktuellen Netzplan-Variante zur Menge der eingeplanten Vorgänge zählt. Sofern dies nicht der Fall ist, hat die Kenntnis der Realisierung des Risikofaktors keine Auswirkung auf den aktuellen Netzplan, so daß auch keine Information des Automatenbenutzers zu erfolgen braucht. Wenn jedoch der unzulässige Vorgang ursprünglich als Entscheidungsalternative ausgewählt war, kann das Expertensystem aus der Restmenge weiterhin zulässiger Alternativ-Vorgänge einen anderen Vorgang auswählen und zugleich den Netzplan bezüglich aller noch nicht realisierten Vorgänge neu berechnen. Das Ergebnis dieser automatischen Netzplananpassung wird dem Automatenbenutzer - auf Wunsch unter Angabe der auslösenden Vorgangs-Unzulässigkeit -

---

41) Ansatzweise ist eine solche Komponente in dem Expertensystem SIPE verwirklicht, das weiter unten näher vorgestellt wird; vgl. Wilkins (1984), S. 298.

mitgeteilt. Auf diese Weise wird der Benutzer - bis auf die Eingabe der Realisierung von Risikofaktoren - von der Routineaufgabe der Neuberechnung von Netzplänen auch im Falle der Unzulässigkeit einzelner Vorgänge befreit, sofern nur das Projekt als Ganzes weiterhin ausgeführt werden kann.

### 3 Beiträge der Künstlichen Intelligenz zur Konstruktion von Netzplänen

In den Anmerkungen zur Auswertung von Netzplänen mit Hilfe von Techniken der Künstlichen Intelligenz wurden bereits Aspekte der Netzplan-Konstruktion berührt. Denn die Schätzung aktualisierter Soll-Vorgangsdauern aufgrund von Handlungsalternativen und die Ablösung unmöglich gewordener Vorgänge durch Ersatzvorgänge involvierten Konzepte zur konstruktiven Veränderung von Netzplänen.

Techniken der Künstlichen Intelligenz zur Konstruktion von Netzplänen<sup>42)</sup> erstrecken sich auf zwei Bereiche:

- die schrittweise Zerlegung eines Projekts in Teilaufgaben, deren Erfüllung jeweils einen Vorgang im Sinne der Netzplantechnik definiert;
- den Entwurf einer zeitlichen Halbordnung (Präzedenzrelation) zwischen den Aufgabenerfüllungen bzw. Vorgängen.

Der erste Bereich bezieht sich auf die Konstruktion der Knoten eines Netzplans (vom Vorgangsknoten-Typus), der zweite betrifft die Ableitung der knotenverknüpfenden Kanten.

---

42) Vgl. als weitere, dem Verf. nicht zugängliche Quelle zur Netzplan-Konstruktion mit Hilfe von Expertensystemen Maher (1985), belegt bei Levitt (1985), S. 75f.



### 3.1 Zerlegung eines Projekts in Teilaufgaben

Für die Zerlegung einer Gesamtaufgabe, welche durch das zu planende Projekt definiert ist, in Teilaufgaben setzt die KI-Forschung die Dekompositionsstrategie<sup>43)</sup> ein. Bei ihrer einphasigen Variante wird eine Aufgabe so in Teilaufgaben zerlegt, daß die gemeinsame, zeitlich noch nicht geordnete Erfüllung aller Teilaufgaben die Erfüllung der ursprünglichen Aufgabe impliziert. Gegebenenfalls kann auch die Möglichkeit erfaßt werden, die originäre Aufgabe in alternative Kombinationen von Teilaufgaben aufzulösen. Zur Darstellung dieses Wissens über die Aufgabenzerlegung dienen die bereits oben eingeführten AND/OR-Graphen.

Soweit ein Expertensystem nur das Ergebnis der Aufgabenzerlegung repräsentiert, den Zerlegungsprozeß aber im Dialogbetrieb der Initiative des Benutzers überläßt, bleibt sein Unterstützungsbeitrag auf den einer Edittierhilfe beschränkt. Interessanter wird der Expertensystem-Einsatz erst bei der mehrfach erfolgenden Planung einander - zumindest partiell - ähnlicher Projekte. In diesem Fall kann in der Wissensbasis für jede einmal erfaßte Aufgabe ihre Zerlegung in Teilaufgaben gespeichert werden. Anlässlich der Planung eines neuen Projekts durchsucht das Expertensystem bei jedem Zerlegungsschritt seine Wissensbasis, ob für die jeweils zu zerlegende Aufgabe bereits die zugehörige Segmentierung in Teilaufgaben enthalten ist. Wenn dies zutrifft, kann die Aufgabenzerlegung automatisch erfolgen. Der Benutzer braucht die Segmentierung nur noch dann vorzunehmen, wenn die zu zerlegende Aufgabe vormals noch nicht bearbeitet wurde. Auf diese Weise wird in der Wissensbasis ein Dekompositionswissen akkumuliert, das mit zunehmender Dauer des Expertensystem-Einsatzes Benutzeroperationen tendenziell immer weniger erforderlich macht. Voraussetzung ist allerdings, daß sich das Spektrum der zu erfüllenden Aufgaben nicht wesentlich ändert. Diese dürfen im Rahmen der abzuwickelnden Pro-

---

43) Vgl. Itzinger (1976), S. 112ff.; Nilsson (1980), S. 37ff.; Barr (1981), S. 24f. u. 36ff.

jekte - neben wenigen neuartigen, noch nicht "vorzerlegten" Aufgaben - nur in variierenden Kombinationen zusammengeführt werden.

Bei der zweiphasigen Variante der Dekompositionsstrategie werden auf jeder Zerlegungsstufe die originären Aufgaben als Ziele interpretiert. In seiner Wissensbasis besitzt ein Expertensystem Wissen über Aktionen, deren Ausführung jeweils einerseits bestimmte Ziele verwirklicht und andererseits die Erfüllung bestimmter Bedingungen voraussetzt. Dieses Aktionswissen stammt - wie bei der einphasigen Variante - aus der Wissensakquisition während der Bearbeitung früherer Projekte. Bei einem gegebenen Ziel durchsucht ein Expertensystem seine Wissensbasis nach Aktionen, welche das Ziel verwirklichen. Wird mindestens eine solche Aktion aufgefunden, definieren ihre Ausführungsvoraussetzungen auf der nächsttieferen Hierarchiestufe neue Teilaufgaben (Subziele). Bei mehreren geeigneten Aktionen lassen sich Alternativen bei der Projektausführung modellieren. Wenn keine Aktion das gegebene Ziel zu erfüllen vermag, wird der Benutzer zur Eingabe einer entsprechenden Aktion einschließlich ihrer Ausführungsvoraussetzungen aufgefordert.

Auf diese Weise wird das Projekt hierarchisch in Aktionen zerlegt, die aus der Sicht der Netzplantechnik genau den Projekt-Vorgängen entsprechen. Die Segmentierung wird abgebrochen, wenn die Anwendungsvoraussetzungen aller nicht weiter zerlegten Aktionen vom Benutzer bereits bei Projektbeginn als erfüllt betrachtet werden. AND/OR-Graphen lassen sich auch bei dieser Variante anwenden, um die hierarchische Zerlegung des Projekts in jeweils gemeinsam zu erfüllende Aktionen (AND-Knoten) und sich wechselseitig ausschließende Aktionen-Kombinationen (OR-Knoten) darzustellen.

Die zweiphasige Variante ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht als Dekompositionsstrategie für die Netzplantechnik vorzuziehen, weil ihr Baiskonzept - die auszuführende Aktion - dem Vorgangskonzept von Netzplänen strukturell entspricht. Die Aufgaben der einstufigen Variante erfordern dagegen - vermittelt der nicht direkt abgebildeten Aufgabenerfüllung - eine indirekte

Interpretation für ihre Einbettung in die Netzplantechnik. Darüber hinaus stimmt die Beziehung zwischen Aktionen und von ihnen verwirklichteten Zielen mit der betriebswirtschaftlich vertrauten Mittel-Zweck-Relation bei der hierarchischen Problemzerlegung überein.

Dementsprechend ist zu begrüßen, daß die KI-Forschung mehrere Expertensysteme entwickelt hat, die auf der aktionsorientierten Variante der Dekompositionsstrategie beruhen. Hierzu zählen insbesondere die Exemplare NOAH<sup>44)</sup>, NONLIN<sup>45)</sup>, SIPE<sup>46)</sup> und SCINAPSE<sup>47)</sup>.

Bisher wurde vorausgesetzt, daß der Projektplaner mit dem Expertensystem in einer formalisierten Planungssprache arbeitet, deren begriffliche Konstrukte an wohldefinierten Aufgaben oder an Zielen und Aktionen anknüpfen. Dies setzt voraus, daß der Planer in einer vorgelagerten Phase das Projekt bereits in entsprechender Weise konzeptionell strukturiert hat. Auch für diese Funktion läßt sich die Unterstützung durch ein Expertensystem vorstellen.

Hierbei kann auf die Entwicklung natürlichsprachlicher<sup>48)</sup> Automaten zurückgegriffen werden, denen die KI-Forschung - vor allem als kooperative Auskunfts- und Zugriffssysteme - seit längerer Zeit große Beachtung widmet<sup>49)</sup>. In einer besonderen, auf die Simulationstechnik bezogenen Variante dienen solche Automaten dazu, in einem interaktiven Dialog vom Benutzer die natürlichsprachliche Beschreibung seines Problems zu erfragen und diese intern in die formalsprachlichen

44) Vgl. Sacerdoti (1975), S. 207ff.; Daniel (1984), S. 433ff.

45) Vgl. Tate (1976); Daniel (1984), S. 438ff.

46) Vgl. Wilkins (1984), S. 271ff.

47) Vgl. Busche (1986), S. 7X-5ff.

48) Das Attribut der Natürlichsprachlichkeit ist zur Zeit als eine programmatische Forderung, nicht als Bezeichnung einer bereits vollständig realisierten Automatenfähigkeit zu verstehen; vgl. z.B. Winograd (1984), S. 96. Seitens der KI-Forschung wird eine fortschreitende Befreiung des Automatennutzers von formalsprachlichen, insbesondere syntaktischen Restriktionen des Dialogs mit einem Automaten angestrebt. Auf Möglichkeiten und Grenzen dieses Ansatzes wird aus der Sicht des Automatennutzers näher bei Zelewski (1986a), S. 1071ff., eingegangen.

49) Vgl. als Übersichtsbeiträge Wahlster (1982), S. 203ff.; Guenther (1986), S. 162ff.

Konstrukte einer Simulationssprache zu übersetzen. Beispielsweise erlaubt das Expertensystem NLPQ<sup>50)</sup> einen natürlichsprachlichen Dialog zur Erzeugung eines ablauffähigen GPSS-Simulationsprogramms<sup>51)</sup>.

Simulations-Expertensysteme orientieren sich vornehmlich am Ansatz der objektorientierten Programmierung, deren Objekte den oben erwähnten semantischen Rahmen strukturell entsprechen. Darüber hinaus extrahieren sie aus der Benutzerbeschreibung die jeweils verfolgten Simulationsziele. Daher liegt es nahe, diese Expertensysteme so zu modifizieren, daß sie aus der natürlichsprachlichen Problembeschreibung anstelle der Simulationsobjekte - in derselben objektorientierten Vorgehensweise - Aktionen synthetisieren, die aus der Sicht der Netzplantechnik als Vorgänge des zu planenden Projekts interpretiert werden. Ebenso sind die zu beachtenden Projektziele (wie etwa Projektdauer und Projektkosten) abzuleiten. Obgleich solche Expertensysteme nach Kenntnis des Verf. noch nicht entwickelt wurden, ähneln semantische Rahmen, die der Repräsentation von Wissen über Projektvorgänge dienen, und Simulations-Objekte einander doch so stark, daß eine Anpassung der Simulations-Expertensysteme an die Netzplantechnik nicht auf gravierende Schwierigkeiten stoßen sollte.

---

50) Vgl. Heidorn (1976), S. 302ff.; Barr (1982), S. 303, 311 u. 370ff.

51) Auch Simon (1983), S. 22ff., befaßt sich mit dem Konzept, mit Hilfe von Techniken der Künstlichen Intelligenz aus natürlichsprachlichen Problembeschreibungen automatisch formalsprachliche Problemrepräsentationen zu erzeugen. Allerdings bezieht er sich weder auf den Simulationsbereich noch auf den nachfolgend angesprochenen objektorientierten Ansatz.

### 3.2 Entwurf einer Präzedenzrelation über den Teilaufgaben

Der zweite Bereich der Netzplan-Konstruktion, die Erstellung einer zeitlichen Halbordnung<sup>52)</sup> auf der Menge der zuvor gebildeten Aktionen (Projektvorgänge), könnte auf den ersten Blick durch eine Vielzahl von Techniken aus der KI-Forschung abgedeckt werden, die zum Zweck der Plansynthese entwickelt wurden<sup>53)</sup>. Sie dienen dazu, Pläne zu entwerfen, die durch Ausführung von Aktionen jeweils einen Ausgangszustand (Projektbeginn) in einen erwünschten Endzustand (Projektende) transformieren. Dennoch lassen sie sich zumeist nicht zur Unterstützung der Netzplantechnik anwenden, weil sie als Strukturprämisse für die erzeugten Pläne in der Regel von einer zeitlich linearen Anordnung aller Aktionen ausgehen. Dies widerspricht grundsätzlich der zeitlichen Halbordnung der Vorgänge in einem Netzplan. Auch das o.a. Expertensystem NOAH läßt (in seiner ursprünglichen Version) nur Aktionssequenzen zu. Es scheidet daher für den zweiten Bereich der Netzplan-Konstruktion aus.

Eine spezielle Planungstechnik, die auf dem Konzept der nicht-linearen, prozeduralen Netze<sup>54)</sup> beruht, erfüllt jedoch die Halbordnungs-Prämisse der Netzplantechnik. Bei der Anwendung dieser KI-Technik werden alle Aktionen nebenläufig, d.h. in keiner ex ante zeit-

---

52) Strenggenommen impliziert die Anordnung der Aktionen im einem AND/OR-Graphen bereits eine zeitliche Halbordnung. Denn eine Aktion, deren Ausführung erst die Anwendungsvoraussetzungen einer unmittelbar nachgelagerten Aktion erfüllt, muß abgeschlossen sein, bevor diese nachgelagerte Aktion begonnen werden kann. Im AND/OR-Graphen wird diese zeitliche (Normalfolgen-)Beziehung jedoch nicht explizit abgebildet; er ist auf die Repräsentation der logischen Aktionsbeziehungen beschränkt.

53) Vgl. als Übersichtsbeitrag Hertzberg (1986), S. 149ff.

54) Vgl. Sacerdoti (1975), S. 207ff.

lich definierten Reihenfolge (Sequenz), angeordnet<sup>55)</sup>, sofern keine Restriktion eine bestimmte zeitliche Reihenfolge erzwingt<sup>56)</sup>. Das Planungsergebnis ist eine zeitlich halbgeordnete Aktionenmenge, die strukturell der Vorgangsmenge eines Netzplans genau entspricht: Zwei zeitlich (unmittelbar) nacheinander angeordnete Aktionen bilden im Netzplan ein Vorgangspaar, das durch eine - im Sinne der zeitlichen Aktionen-Abfolge gerichtete - Kante verknüpft ist. Zwei nebenläufige Aktionen stimmen dagegen mit zwei Vorgängen überein, zwischen denen im Netzplan kein gerichteter Weg existiert.

Im einfachsten Fall vermag ein Expertensystem Restriktionen zeitlicher Art zu berücksichtigen, welche die technischen Reihenfolgebeziehungen<sup>57)</sup> aus der Netzplantechnik wiedergeben. Diese Restriktionen sind vom

---

55) Der "ex ante"-Zusatz bezieht sich auf den Bereich der Projektzerlegung in einzelne Aktionen (Vorgänge). Hier verhalten sich zwei Aktionen zueinander nebenläufig, wenn keine von ihnen notwendig ist, um durch ihre Ausführung die Ausführungsvoraussetzungen der jeweils anderen - mittelbar oder unmittelbar - zu erfüllen. Nebenläufigkeit bedeutet folglich logische Unabhängigkeit der Aktionen, die jede zeitliche Reihenfolge als auch Zeitgleichheit der Aktionsausführungen zuläßt. Im AND/OR-Graphen äußert sich die Nebenläufigkeit zweier Aktionen dadurch, daß kein gerichteter Weg zwischen ihnen besteht.

Wird im zweiten Bereich der Netzplankonstruktion zur Berücksichtigung von Restriktionen eine bestimmte Ausführungsreihenfolge geplant, handelt es sich dagegen im o.a. Sinne um eine ex post eingeführte Sequentialisierung.

56) Als Restriktionen gelten auch die - bereits im AND/OR-Graphen dargestellten - logischen Beziehungen zwischen Aktionen, die zueinander im Mittel-Zweck-Verhältnis stehen.

57) Als technische Reihenfolgebeziehungen werden hier nur noch solche betrachtet, die noch nicht durch die logischen Beziehungen zwischen Aktionen im AND/OR-Graphen erfaßt sind. Technische Reihenfolgebeziehungen, die Normalfolgen zwischen Aktionen betreffen, sind bereits in diese logischen Reihenfolgebeziehungen implizit eingeflossen; vgl. die Anmerkungen in Fußnote 52. Eine technische Reihenfolgebeziehung ohne Normalfolgen-Charakter wäre z. B. die Anforderung, daß in einem Walzwerk der Beginn eines Bearbeitungsvorgangs eine maximale Zeitspanne nach Beendigung eines vorangehenden Aufwärmvorgangs nicht überschreiten darf, damit die minimal erforderliche Bearbeitungstemperatur des Rohlings nicht durch Auskühlung unterschritten wird.

Benutzer in die Wissensbasis des Expertensystems als zusätzliches deklaratives Wissen einzugeben. Aus ihrer Kenntnis und der zuvor ermittelten, zeitlich ungeordneten Aktionenmenge wird automatisch ein halbgeordneter Aktionsplan abgeleitet, der den gesuchten Netzplan darstellt. Dieses Konzept wird von dem bereits oben eingeführten Expertensystem NONLIN realisiert<sup>58)</sup>.

Darüber hinaus bieten die Expertensysteme SIPE und SCINAPSE die Möglichkeit, die Wissensbasis um weitere, nicht-zeitbezogene Restriktionsarten zu erweitern<sup>59)</sup>. Hierdurch läßt sich die aus der Netzplantechnik bekannte Kapazitätsplanung in das Konzept nicht-linearer, prozeduraler Pläne integrieren. Als Restriktion wird die verfügbare Menge (Kapazität) einer knappen Ressource einschließlich der Ressourcenbeanspruchung durch die einzelnen Aktionen eingegeben. Es können simultan mehrere Ressourcenarten von den Expertensystemen verwaltet werden. Als Planungsergebnis generieren sie jeweils einen Aktionsplan (Netzplan), dessen Ausführung nicht nur die technischen Reihenfolgebeziehungen, sondern auch die Kapazitätsbeschränkungen einhält.

Der Vorzug der vorgestellten Expertensysteme für den zweiten Bereich der Netzplan-Konstruktion besteht nicht nur darin, daß dem Benutzer die Routinetätigkeit abgenommen wird, aus den projektspezifischen Restriktionen für die Vorgänge eine explizite Präzedenzrelation zu konstruieren. Interessant ist vielmehr auch, daß - in bezug auf die Automaten SIPE und SCINAPSE - Restriktionen zeitlicher und nicht-zeitlicher Art in der gleichen Weise behandelt werden: Alle Restriktionen werden bereits bei der Erzeugung der Netzplan-Kon-

58) Vgl. als Beispiel die Ausführungen von Daniel (1984), S. 446ff., zur automatischen Konstruktion eines nicht-linearen, prozeduralen Plans (Netzplans) für die Überholung eines Turbogenerators.

59) Allerdings erfolgt die Behandlung von Ressourcen noch in rudimentärer Weise. So kann das Expertensystem SIPE nicht-zeitliche Restriktionen nur dadurch erfassen, daß eine knappe Ressource zu einem Zeitpunkt nur von höchstens einer Aktion beansprucht werden darf; vgl. Wilkins (1984), S. 289ff. Der für betriebswirtschaftliche Planungsprobleme typische Fall einer begrenzten, aber den Wert 2 übersteigenden Anzahl von verfügbaren Ressourceneinheiten wird nicht erfaßt.

struktionskonstruktion berücksichtigt. Dies steht im Gegensatz zur konventionellen Netzplantechnik, bei der während der Netzplan-Konstruktion nur die zeitlichen Restriktionen (technischen Reihenfolgebeziehungen) erfaßt werden. Erst wenn der Netzplan vorliegt, können im Rahmen der kombinierten Zeit- und Kapazitätsplanung knappe Ressourcen Berücksichtigung finden.

Abgesehen von dem formal-ästhetischen Argument, die einheitliche Handhabung von Restriktionen durch die einstufige KI-Technik sei der zweistufigen Verfahrensweise der Netzplantechnik vorzuziehen, besteht zunächst keine grundsätzliche Überlegenheit eines der beiden Konzepte. Dennoch weist der Ansatz der Künstlichen Intelligenz hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung einen wesentlichen Vorzug auf. Denn in Verbindung mit dem Ansatz der AND/OR-Graphen<sup>60)</sup> lassen sich alternative Ablaufstrukturen (Halbordnungen) eines Projekts, die sich nicht in den auszuführenden Vorgängen, sondern nur in unterschiedlichen Sequenzen ihrer Vorgänge unterscheiden, in der gleichen Weise modellieren und auch auswerten, wie dies weiter oben in bezug auf alternative Vorgänge bereits dargestellt wurde. Solche alternativen Ablaufstrukturen entstehen immer dann, wenn Vorgänge, deren parallele Ausführung mindestens eine Restriktion verletzen würde, nacheinander angeordnet werden müssen und mindestens zwei verschiedene Vorgangssequenzen zulässig sind. In einem solchen Fall repräsentiert der AND/OR-Graph in der Wissensbasis eines Expertensystems, der um zusätzliche OR-Knoten für Alternativsequenzen für gleiche Vorgangsteilmengen erweitert ist, eine Familie von Netzplänen, die alle zur Realisierung des gleichen Projekts geeignet sind. Mit Hilfe der Algorithmen, die seitens der KI-Forschung zur Auswertung von AND/OR-Graphen entwickelt wurden<sup>61)</sup>, läßt sich ein Netzplan mit zieloptimaler - z.B. projektdauerminimaler - Ablaufstruktur automatisch ableiten. Darüber hinaus kann bei der realen Projektabwicklung aus der Wissensbasis sofort eine alternative Ablaufstruktur abgerufen werden, wenn sich die ursprünglich geplante

60) Diese Verbindung wurde jedoch bei den Expertensystemen SIPE und SCINAPSE noch nicht verwirklicht.

61) Vgl. hierzu die Anmerkungen auf S. 6.



Ablaufstruktur nachträglich als nicht ausführbar herausstellt. Dies könnte z.B. eintreten, wenn eine knappe Ressource in noch geringeren Ausmaß zur Verfügung steht, als es während der Planung angenommen wurde.

Diese Verwaltung alternativer Ablaufstrukturen ist im Rahmen der konventionellen Netzplantechnik hingegen nicht vorgesehen (obgleich theoretisch nicht ausgeschlossen<sup>62)</sup>). Hier werden bei Ressourcenknappheit durch lokal definierte Planungsheuristiken<sup>63)</sup> einzelne Vorgänge so lange zeitlich verschoben, bis die verfügbaren Kapazitäten im jeweils betrachteten Planungszeitpunkt nicht mehr überschritten werden. Durch diese Verschiebungen erfolgt eine Sequentialisierung ursprünglich nebenläufiger Vorgänge, die in der resultierenden Ablaufstruktur festgeschrieben wird. Weder wird die Möglichkeit erfaßt, durch unterschiedliche lokale Verschiebungen in globaler Hinsicht die Ablaufstruktur in bezug auf die Projektziele zu verbessern. Noch wird das Wissen alternativer Verschiebungsmöglichkeiten für den später möglichen Fall der Netzplanrevision konserviert.

#### 4 Flexibilität bei Auswertung und Konstruktion von Netzplänen

Abschließend sei noch einmal auf die eingangs erwähnte Reduktionismus-These zurückgekommen, der zufolge die Unterstützung durch informationsverarbeitende Automaten ihre Benutzer in ein Korsett zwingt, das bei der flexiblen, jeweils an die individuelle Problemsituation anpaßten Problembewältigung behindert.

Auf Expertensysteme kann dieses Argument in der skizzierten rigiden Form nicht angewendet werden. Denn die schrittweise Erweiterung des Expertensystem-Konzepts um unterschiedliche Funktionen zur Erfassung der

62) Vgl. Neumann (1975), S. 307ff., allerdings mit dem deutlichen Hinweis auf die mangelnde praktische Ausführungsmöglichkeit der theoretischen Ansätze, die bei praktischen Projektplanungen infolge der erforderlichen kombinatorischen Optimierung zu einem "explosiven" Anwachsen des Ressourcenbedarfs führen würden.

63) Vgl. Neumann (1975), S. 309ff.

Einflüsse von Risikofaktoren auf die Abwicklung eines Projekts verdeutlichte exemplarisch, wie flexibel die Techniken der Künstlichen Intelligenz - insbesondere die unterschiedlichen Formen der Wissensrepräsentation - an die jeweils vorliegenden Problemsituationen adaptiert werden können. Auch sei nochmals auf die Möglichkeit verwiesen, den gleichen Sachverhalt - je nach Abstraktionsgrad der Modellierungsperspektive des Netzplan-Anwenders - auf unterschiedlichen Ebenen darzustellen und zu behandeln<sup>64)</sup>.

Die Flexibilität der Expertensystem-Anwendung wird durch einen weiteren Abstarktionsprozeß gesteigert, der den oben - im Kontext von Simulations-Expertensystemen - erwähnten objektorientierten Ansatz der Problembeschreibung in die Netzplantechnik einbettet<sup>65)</sup>. Hierbei werden die konkreten Vorgangsbeschreibungen der Netzplantechnik dadurch verallgemeinert, daß die von den Vorgängen betroffenen Objekte durch Variablen substituiert<sup>66)</sup> und in der Wissensbasis als eigenständige Wissenskomponenten - z.B. wieder durch semantische Rahmen - repräsentiert werden. Auf diese Weise können abstrakte Netzpläne formuliert werden, in denen noch alternative Ausführungsmöglichkeiten von Vorgängen bezüglich der involvierten Objekte offenstehen. Der Projektplaner kann die erforderlichen Auswahlentscheidungen dem Expertensystem überlassen, das die von einem Vorgang benötigten Objekteigenschaften mit den Eigenschaften der Objekte in seiner Wissensbasis vergleicht und dementsprechend zulässige Objekt-Vorgangs-Zuordnungen vornimmt. Beispielsweise reicht es für einen Überseetransport aus, Objekte in Gestalt grundsätzlich verfügbarer Transportschiffe zu modellieren und den Transportvorgang über der Variable "Transportschiff" zu definieren.

64) Vgl. die Ausführungen in Fn. 39.

65) Vgl. Busche (1986), S. 7X-4 u. 7X-6f., in bezug auf das Expertensystem SCINAPSE.

66) Diese Ersetzung bedeutet den Übergang von der aussagenlogischen Repräsentation konkreter, vollständig bestimmter Vorgänge zur prädikatenlogischen Darstellung abstrakter Vorgänge, die noch zu belegenden Variablen enthalten. Es kommt dieser objektbezogenen Abstrahierung zugute, daß sich die KI-Forschung bei der symbolischen Wissensrepräsentation vornehmlich mit dem prädikatenlogischen Kalkül befaßt.

Hieraus resultiert ein Flexibilitätsgewinn, weil mit denselben abstrakten Vorgangsbeschreibungen ein breites Spektrum unterschiedlicher Projekte abgedeckt werden kann, die sich nur dadurch unterscheiden, daß die abstrakten Vorgänge sich auf verschiedene Objekte erstrecken. Hierdurch wird auch der oben angesprochene Wiederholungsgrad ähnlicher Projekte tendenziell erhöht. Dies ist für die Ausnutzung der Wissensakkumulation von Expertensystemen für die Aufgabe der Netzplan-Konstruktion aus bereits bekannten Teilaufgaben (Vorgängen) von entscheidendem Vorteil<sup>67)</sup>.

Zuletzt sei kontrastierend hervorgehoben, daß der Einsatz von Expertensystemen im Hinblick auf das Flexibilitätskriterium geradezu gegenläufig zu konventioneller Software für die Netzplantechnik wirken kann. Denn im Rahmen der konventionellen, automatenunterstützten Netzplantechnik wird des öfteren die Anregung vorgetragen, von projektindividuellen Netzplänen zu Standard-Prozeßplänen überzugehen<sup>68)</sup>. Diese enthalten eine allgemeine Prozeßstruktur, die sich - nach Angaben ihrer Proponenten - durch einige wenige, unkomplizierte Modifizierungen an die konkrete Struktur eines bestimmten Projekts anpassen lasse. Ein allgemeines Modifizierungs-Schema, anhand dessen sich die Anzahl und die Schwierigkeit der erforderlichen Eingriffe abschätzen ließe, wird jedoch nicht spezifiziert. Daher teilt hier der Verf. den Verdacht der Reduktionismus-These, daß zur Verringerung des Ressourceneinsatzes für die arbeitsintensive Phase der Netzplan-Konstruktion verstärkt nach dem Prokrustes-Prinzip vorgegangen wird: Nicht der Netzplan als formale Problembeschreibung wird der Struktur des realen Problems angepaßt. Vielmehr wird das Realproblem so lange zu einem Ersatzproblem verzerrt, bis es in die relativ starre, nur "geringfügig" veränderte Ablaufstruktur eines Standard-Netzplans.

Expertensysteme geben im Gegensatz zu Standard-Prozeßplänen keine Ablaufstruktur grob vor, sondern

---

67) Vgl. S. 21f.

68) Vgl. Backhaus (1980), S. 52ff.; Bergfeld (1986), S. 16.

können ihre Benutzer - wie oben dargelegt - bei der Strukturbildung durch Übernahme vormals intuitiver menschlicher Strukturierungsarbeit erheblich entlasten. Daher versetzen sie ihre Benutzer bei unverändertem menschlichem Arbeitsvolumen in die Lage, sich verstärkt mit der projektspezifischen Gestaltung von Netzplänen auseinanderzusetzen. Hiermit führen sie tendenziell zu einer erhöhten Flexibilität bei der Anwendung der Netzplantechnik.

Literaturverzeichnis

Backhaus,K.: Auftragsplanung im industriellen Anlagen-  
geschäft, Stuttgart 1980.

Barr,A. u. E.A. Feigenbaum (Hrsg): The Handbook of Ar-  
tificial Intelligence, Vol. I, Stanford - Los Altos  
1981.

Barr,A. u. E.A. Feigenbaum (Hrsg): The Handbook of Ar-  
tificial Intelligence, Vol. II, Stanford - Los Altos  
1982.

Bergfeld,H.: Projektmanagement nutzt Erfahrungen von  
Großprojekten: Computer erteilen Auskunft über Termin-  
und Kapazitätsplanung, in: VDI nachrichten, 40. Jg.  
(1986) , Nr. 34, S. 16.

Bobrow,D.G.: Dimensions of Representation, in: Bobrow,  
D.G. u. A.M. Collins (Hrsg.): Representation and Under-  
standing - Studies in Cognitive Science, New York - San  
Francisco - London 1975, S. 1- 34.

Born,A.: KI - Komplexe Informationsverarbeitung: Mit  
Zauberwort auf Kundenfang, in: online, Jg. 1986, Heft  
3, S. 26-32.

Briefs,U.: Zukünftige Anforderungen an die Systemge-  
staltung aus der Sicht der Gewerkschaften, in: Reich-  
wald,R. (Hrsg.): Neue Systeme der Bürotechnik - Beiträ-  
ge zur Büroarbeitsgestaltung aus Anwendersicht, Berlin  
1982, S. 109-120.

Bungers,D. u. F. di Primio: Funktionsschema für Exper-  
tensysteme, in: Bungers,D., F. di Primio, W. Klar u. E.  
Rome: Konzept einer Expertensystem-Architektur, Ar-  
beitspapier Nr. 91 der Gesellschaft für Mathematik und  
Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1984, S. 3-  
12.

Busche,R., M. Fliegner u. M.-J. Schachter-Radig: Pla-  
nung - eine Aufgabe für wissensbasierte Systeme / dar-  
gestellt an einem Rahmensystem für wissensbasierte Pla-  
nungssoftware, in: o.V. (ONLINE GmbH): KOMMTECH'86, 3.  
Internationale Kongreßmesse für Technische Automation,  
Essen 13.-16.05.1986, Kongreß VI: KI/Künstliche In-  
telligenz und Expertensysteme, Software-Engineering und  
PC-Anwendungstechnik, Velbert 1986, S. 7X-1 - 7X-12.

Chandrasekaran,B.: Expert Systems: Matching Techniques  
to Tasks, in: Reitman,W. (Hrsg.): Artificial Intelli-  
gence Applications For Business, Proceedings of the NYU  
Symposium, 18.-20.05.1983 in New York, Norwood 1984, S.  
41-64.

Chang,C.L. u. J.R. Slage: An Admissible and Optimal Al-  
gorithm for Searching AND/OR Graphs, in: Artificial In-  
telligence, Vol. 2 (1971), S. 117-128.

Crowston,W.B.: Decision CPM: Network Reduction and  
Solution, in: Operational Research Quarterly, Vol. 21  
(1970), S. 435-452.

Daniel,L.M.: AND/OR graphs and critical paths, in: Ro-  
senfeld,J.L. (Hrsg.): Information Processing 74, 5.-  
10.08.1974 in Stockholm, Amsterdam - London - New York  
1974, S. 818-822.

- Daniel, L. (M.): Planning and Operations Research, in: O'Shea, T. u. M. Eisenstadt (Hrsg.): Artificial Intelligence - Tools, Techniques, and Applications, New York - Cambridge - ... - Sao Paulo - Sydney 1984, S. 423-452.
- Davis, R. u. J. King: An Overview of Production Systems, Memo AIM-271 am Stanford Artificial Intelligence Laboratory / Report No. STAN-CS-75-524 am Computer Science Department of the Stanford University, Stanford 1975.
- de Kleer, J.: Qualitative and Quantitative Reasoning in Classical Mechanics, in: Winston, P.H. u. R.H. Brown (Hrsg.): Artificial Intelligence: An MIT Perspective, Vol. 1: Expert Problem Solving - Natural Language Understanding - Intelligent Computer Coaches - Representation and Learning, Cambridge (Massachusetts) - London 1979, S. 11-30.
- de Kleer, J.: An Assumption-based TMS, in: Artificial Intelligence, Vol. 28 (1986), S. 127-162.
- di Primio, F. u. G. Brewka: BABYLON: Kernsystem einer integrierten Umgebung für Entwicklung und Betrieb von Expertensystemen, in: Nachrichten für Dokumentation, 36. Jg. (1985), S. 33-37.
- Doyle, J.: A Glimpse of Truth Maintenance, in: Winston, P.H. u. R.H. Brown (Hrsg.): Artificial Intelligence: An MIT Perspective, Vol. 1: Expert Problem Solving - Natural Language Understanding - Intelligent Computer Coaches - Representation and Learning, Cambridge (Massachusetts) - London 1979, S. 119-135.
- Fikes, R. u. T. Kehler: The Role of Frame-Based Representation in Reasoning, in: Communications of the ACM, Vol. 28 (1985), S. 904-920.
- Floyd, C.: Wo sind die Grenzen des verantwortbaren Computereinsatzes?, in: Informatik-Spektrum, Bd. 8 (1985), S. 3-6.
- Fox, M.S.: Constrained-Directed Search: A Case Study of Job Shop Scheduling, Dissertation am Robotics Institute of the Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1983.
- Guenthner, F.: Verarbeitung natürlicher Sprache - ein Überblick, in: Informatik-Spektrum, Bd. 9 (1986), S. 162-173.
- Hart, P.E., N.J. Nilsson u. B. Raphael: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, in: IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol. SSC-4 (1968), S. 100-107.
- Hayes-Roth, F.: Ruled-Based Systems, in: Communications of the ACM, Vol. 28 (1985), S. 921-932.
- Heidorn, G.E.: Automatic Programming Through Natural Language Dialogue: A Survey, in: IBM Journal of research and development, Vol. 20 (1976), S. 302-313.
- Hendrix, G.G. u. E.D. Sacerdoti: Natural Language Processing - The Field in Perspective, in: BYTE, Vol. 6 (1981), No. 9, S. 304-352.
- Hertzberg, J.: Planerstellungs-Methoden der Künstlichen Intelligenz, in: Informatik-Spektrum, Bd. 9 (1986), S. 149-161.

Hoß, D., K.-U. Gerhardt, H. Kramer u. A. Weber: Wirtschaftliche und soziale Auswirkungen des Einsatzes von integrierten CAD/CAM-Systemen, Untersuchungsteil II: Die sozialen Auswirkungen der Integration von CAD und CAM - Vorstudie für ein empirisches Hauptprojekt, RKW-Projekt A 148/83 am Institut für Sozialforschung Frankfurt am Main, Düsseldorf 1984.

Itzinger, O.: Methoden der maschinellen Intelligenz, München - Wien 1976.

Küpper, W., K. Lüder u. L. Streitferdt: Netzplantechnik, Würzburg - Wien 1975.

Levitt, R.E. u. J.C. Kunz: Using Knowledge Of Construction And Project Management For Automated Schedule Updating, in: Project Management Journal, Vol. 1985, No. December, S. 57-76.

Maher, M.L. u. S.J. Fenves: HI-RISE: A Knowledge-Based Expert Design of High Rise Buildings, Report R-85-146 am Department of Civil Engineering of the Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1985.

Marcus, R.: An Application of Artificial Intelligence to Operations Research, in: Communications of the ACM, Vol. 27 (1984), S. 1044-1047.

Matthes, W.: Netzplantechnik, Erweiterungen der, in: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (Ungekürzte Sonderausgabe zur 1. Aufl. Stuttgart 1979), Stuttgart 1984.

Minsky, M.: A Framework for Representing Knowledge, in: Winston, P.H. (Hrsg.): The Psychology of Computer Vision, New York - St. Louis - ... - Tokyo - Toronto 1975, S. 211-277.

Mylopoulos, J. u. H.J. Levesque: An Overview of Knowledge Representation, in: Brodie, M.L., J. Mylopoulos u. J.W. Schmidt (Hrsg.): On Conceptual Modelling - Perspectives from Artificial Intelligence, Databases, and Programming Languages, New York - Berlin - Heidelberg - Tokyo 1984, S. 3-17.

Neumann, K.: Operations Research Verfahren, Bd. III: Graphentheorie - Netzplantechnik, München - Wien 1975.

Newell, A. u. H.A. Simon: Computer Science as Empirical Enquiring: Symbols and Search, in: Haugeland, J. (Hrsg.): Mind Design - Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence, 2. Druck der 1. Aufl., Cambridge (Massachusetts) - London 1982, S. 36-66.

Nilsson, N.J.: Principles of Artificial Intelligence, Palo Alto 1980.

Pearl, J.: Knowledge versus Search: A Quantitative Analysis Using A\*, in: Artificial Intelligence, Vol. 20 (1983), S. 1-13.

Pohl, I.: Bi-directional Search, in: Meltzer, B. u. D. Michie (Hrsg.): Machine Intelligence 6, Edinburgh 1971, S. 127-140.

Rogers, P.C.: AI as a dehumanising force, in: Yazdani, M. u. A. Narayanan (Hrsg.): Artificial intelligence: human effects, New York - Chichester - Brisbane - Toronto 1984, S. 222-234.

Sacerdoti, E.D.: The Nonlinear Nature of Plans, in: o. V.: Advance Papers of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-75), 3.-8.09.1975 in Tbilisi, Vol. 1, o.O. (Cambridge/Massachusetts) 1975, S. 206-214.

Simon, H.A.: Search and Reasoning in Problem Solving, in: Pearl, J. (Hrsg.): Search and Heuristics, Reprinted from the Journal of Artificial Intelligence, Volume 21, Numbers 1, 2, Amsterdam - New York - Oxford 1983, S. 7-29.

Stefik, M., D.G. Bobrow, S. Mittal u. L. Conway: Knowledge Programming in LOOPS: Report on an Experimental Course, in: The AI Magazine, Vol. 4 (1983), No. 3, S. 3-13.

Tate, A.: NONLIN: A Heuristic Non-Linear Planner, DAI Memo 25 am Department of Artificial Intelligence of the Edinburgh University, Edinburgh 1976.

Tate, A.: A Review of Knowledge-Based Planning Techniques, Report No. 9 am AI Applications Institute, Edinburgh 1985.

Wahlster, W.: Natürlichsprachliche Systeme - Eine Einführung in die sprachorientierte KI-Forschung, in: Bibel, W. u. J.H. Siekmann (Hrsg.): Künstliche Intelligenz, Frühjahrsschule Teisendorf, 15.-24.03.1982 in Teisendorf, Informatik-Fachberichte 59, Berlin - Heidelberg - New York 1982, S. 203-283.

Wilkins, D.E.: Domain-independent Planning: Representation of Plan Generation, in: Artificial Intelligence, Vol. 22 (1984), S. 269-301.

Winograd, T.: Software für Sprachverarbeitung, in: Spektrum der Wissenschaft, Jg. 1984, Heft 11, S. 88-102.

Zelewski, S.: Das Leistungspotential der Künstlichen Intelligenz - eine informationstechnisch-betriebswirtschaftliche Analyse, Dissertation am Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Fertigungswirtschaft der Universität Köln 1985, Witterschlick/Bonn 1986 (a).

Zelewski, S.: Einsatzmöglichkeiten der Künstlichen Intelligenz zur Fortentwicklung von Frühwarnsystemen, Arbeitsbericht 4/1986 am Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft der Universität Köln, Köln 1986 (b).



Verzeichnis der Arbeitsberichte des  
Seminars für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,  
Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft der  
Universität zu Köln  
(bis Sommer 1986: Seminar für Allgemeine  
Betriebswirtschaftslehre und Fertigungswirtschaft)

---

- Nr. 1: ZELEWSKI,STEPHAN: Entscheidungsmodelle zur Verschrottung von Fertigungshilfsmitteln, Köln 1984.
- Nr. 2: KERN,WERNER; ZELEWSKI,STEPHAN: Ein Zuordnungsmodell für Meßgeräte in Energie-Informationssystemen, Köln 1985.
- Nr. 3: KERN,WERNER; PETERS,ULRICH: Energiebewirtschaftung in industriellen Betrieben - Bericht über eine Befragung, Köln 1985.
- Nr. 4: BOOS,JOCHEN: Lokalisierung von Meßstellen für ein Informations-System zur Energiebewirtschaftung in industriellen Betrieben - Entwicklung eines OR-Modells mit einem Lösungsvorschlag -, Köln 1986.
- Nr. 5: ZELEWSKI,STEPHAN: Ansätze der Künstlichen Intelligenz-Forschung zur Unterstützung der Netzplantechnik, Köln 1986.
- Nr. 6: ZELEWSKI,STEPHAN: Schnittstellen bei betrieblichen Informationssystemen - eine Darstellung aus systemtheoretischer und betriebswirtschaftlicher Sicht -, Köln 1986.
- Nr. 7: ZELEWSKI,STEPHAN: Konzepte für Frühwarnsysteme und Möglichkeiten zu ihrer Fortentwicklung durch Beiträge der Künstlichen Intelligenz, Köln 1986.
- Nr. 8: ZELEWSKI,STEPHAN: Das Konzept der unscharfen Mengen unter besonderer Berücksichtigung ihrer linguistischen Interpretation - eine Lösung für unscharfe Probleme? -, Köln 1986.
- Nr. 9: ZELEWSKI,STEPHAN: Der tau-Wert: Aspekte eines neueren spieltheoretischen Ansatzes zur fairen Preisbildung aus kostenrechnerischer Perspektive, Köln 1986.
- Nr. 10: ZELEWSKI,STEPHAN: Competitive Bidding aus der Sicht des Ausschreibers - ein spieltheoretischer Ansatz -, Köln 1986.
- Nr. 11: ZELEWSKI,STEPHAN: Netztheoretische Ansätze zur Konstruktion und Auswertung von logisch fundierten Problembeschreibungen, Köln 1986.

- Nr. 12: ZELEWSKI,STEPHAN: Netztheoretische Fundierung von parallelen Algorithmen für die Lösung linear-ganzzahliger OR-Modelle, Köln 1986.
- Nr. 13: ZELEWSKI,STEPHAN: Intelligente Informationssysteme - benutzerfreundliche Instrumente für die Informationsvermittlung? -, Köln 1986.
- Nr. 14: ZELEWSKI,STEPHAN: Komplexitätstheorie - ihr Beitrag zur Klassifizierung und Beurteilung von Problemen des Operations Research -, Köln 1986.
- Nr. 15: ZELEWSKI,STEPHAN: Der Informationsbroker, Köln 1986.
- Nr. 16: ZELEWSKI,STEPHAN: Soziale Verantwortbarkeit von Technologien, Köln 1986.
- Nr. 17: ZELEWSKI,STEPHAN: Expertensysteme - Übersicht über Konzeptionen und betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten -, Köln 1986.
- Nr. 18: ZELEWSKI,STEPHAN: Das Leistungspotential der Künstlichen Intelligenz für Industrieanwendungen - Ein Überblick -, Köln 1987.
- Nr. 19: ZELEWSKI,STEPHAN: Expertensysteme im "Büro der Zukunft" - Ein Überblick über Anwendungsperspektiven und Bewertungsaspekte -, Köln 1987.
- Nr. 20: KUMMER,SEBASTIAN: Computerunterstützung schöpferischer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, Köln 1987.
- Nr. 21: ZELEWSKI,STEPHAN: Betriebswirtschaftliche Aspekte des industriellen Einsatzes von Expertensystemen - Anwendungsmöglichkeiten und Bewertung -, Köln 1988.
- Nr. 22: ZELEWSKI,STEPHAN: Expertensysteme für Prozeßplanung und -steuerung in der Fabrik der Zukunft - Ein Überblick über Konzepte und erste Prototypen -, Köln 1988.
- Nr. 23: ZELEWSKI,STEPHAN: Expertensysteme zur Sicherung der Betriebsbereitschaft in der Fabrik der Zukunft, Köln 1988.
- Nr. 24: ZELEWSKI,STEPHAN: Ansätze zur Bewertung des Einsatzes Künstlicher Intelligenz in Industrieunternehmungen - aus produktiver und sozialer Sicht -, Köln 1988.