

Arbeitsbericht Nr. 30

CAP-Expertensysteme
- Anwendungsaspekte Künstlicher Intelligenz
im Bereich der Arbeitsplanung -

von
Dr. Stephan Zelewski

Köln 1989

Alle Rechte vorbehalten.

Abstract

Als herausragende Produkte der Erforschung der Künstlichen Intelligenz (KI) genießen zur Zeit die Expertensysteme besondere Beachtung. Sie werden oftmals als vielversprechende Beiträge zur Gestaltung von Produktionsprozessen in der Fabrik der Zukunft angeführt. Eine wesentliche Grundlage für die spätere Prozeßausführung stellt die computerunterstützte Erstellung von Arbeitsplänen im Rahmen des CAP-Konzepts dar.

Es wird untersucht, welche neuartigen Beiträge CAP-Expertensysteme leisten können. Im Zentrum steht ihre Fähigkeit zur automatischen Synthese nonlinearer, hierarchischer Aktionspläne. Spezielle Planungskonzepte, wie der blackboard-Ansatz und die opportunistische Strategie, werden skizziert. Arbeitsplanungen finden im Rahmen sowohl der Neu- als auch der Ähnlichkeitsplanung Berücksichtigung. Bezüge zur konventionellen Arbeitsplanung werden anhand der Generierung von (C)NC-Teileprogrammen aufgezeigt. Erste prototypische CAP-Expertensysteme verdeutlichen die Praxistauglichkeit der vorgestellten KI-Konzepte.

Inhaltsverzeichnis

		Seite
1	Einführung	1
1.1	Erläuterungen zum Expertensystembegriff	1
1.2	Überblick über Expertensystemanwendungen im Bereich der computerunterstützten Arbeitsplanung	7
2	Konzeptionelle Grundlagen für CAP-Expertensysteme	9
2.1	Anwendungsspezifische Wissensbasen	9
2.2	Generieren von Aktionsplänen	12
2.2.1	Überblick	12
2.2.1.1	Arbeitsgangplanung	12
2.2.1.2	Arbeitsablaufplanung	15
2.2.2	Verfeinerungen und Erweiterungen	18
3	Beispiele für CAP-Expertensysteme	27
3.1	Explorative Vorstudien	27
3.2	Erste Prototypen für den industriellen Einsatz	30
4	Literatur	37

1 Einführung

1.1 Erläuterungen zum Expertensystembegriff

Die Erforschung der Künstlichen Intelligenz (KI) widmet sich im wesentlichen der Gestaltung und Analyse von informationsverarbeitenden Automaten, die sich durch die "intelligente" Auswertung von anwendungsspezifischem, explizit repräsentiertem Wissen auszeichnen. Derzeit erlangen solche wissensbasierten Systeme vor allem unter der plakativen Bezeichnung "Expertensysteme" besondere Beachtung. Sie werden oftmals als vielversprechende Beiträge zur Realisierung der Fabrik der Zukunft angeführt. Hier wird nur derjenige Teilaspekt beleuchtet, der sich auf die computerunterstützte Erstellung von Arbeitsplänen im Rahmen des CAP-Konzepts¹⁾ erstreckt.

Der hohe Aufmerksamkeitswert, den die KI-Forschung neuerdings genießt, verführte jedoch auch vielfach dazu, beliebige Software mit dem novitäts- und qualitätsverheißenden Etikett "Expertensystem" auszustatten. Infolgedessen verwässerte dieser Begriff mitunter bis zur leerformelhaften Marketingphrase²⁾. Solche dubiosen Praktiken werden dadurch begünstigt, daß sich bislang noch keine einheitliche Auffassung über den Expertensystembegriff durchzusetzen vermochte.

1) Der Verf. präferiert zwar das Akronym CAPP für "Computer Aided Process Planning"; vgl. z.B. SWYT (1988), S. 367. Doch hat sich in der betriebswirtschaftlichen Literatur allgemein die Verwendung dreistelliger "CA"-Akronyme für computerunterstützte Konzepte durchgesetzt. Daher schließt er sich auch hier der etablierten Bezeichnung "CAP-Konzept" für "Computer Aided Planning" an; vgl. etwa EVERSHEIM (1988), S. 50. Am Rande sei allerdings vermerkt, daß es sich bei dieser konventionellen Akronymverwendung um eine semantisch verarmte und wenig differenzierte Sprechweise handelt. Denn computerunterstützte Planungen finden in vielfältigen betriebswirtschaftlichen Kontexten statt - nicht nur im Bereich der Arbeitsplanung.

2) Dieser Leerformelcharakter äußert sich auch in dem Umstand, daß zwar der Einsatz von Expertensystemen oftmals herausgestellt wird. Doch in der Mehrzahl werden weder die Einsatzformen konkretisiert noch die Besonderheiten gegenüber konventionellen Informationsverarbeitungssystemen erläutert. Vgl. - als pars pro toto - die skeptischen Anmerkungen zu dem später vorgestellten "Expertensystem" ICEM PINC für die Generierung von NC-Programmen. Weitere Beispiele sind die Ausführungen von ARNDT (1985), S. 293ff., und von LOGAN (1989), S. 93 u. 95f. Erster thematisiert zwar "Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Arbeitsplanung" (S. 293), läßt jedoch nicht erkennen, worin der wesentliche Unterschied zur konventionellen Informationsverarbeitung auf der Grundlage von Entscheidungstabellen liegen soll. Zweiter stellt ein "Konzept der Arbeitsplanung vor ..., das in einem vollautomatischen expertensystemgestützten Arbeitsplanungssystem gipfelt" (S. 93), gelangt aber ebenfalls über einen konventionellen Entscheidungstabelleansatz nicht hinaus. Vgl. zur konventionellen Arbeitsplanung auf der Basis von Entscheidungstabellen z.B. HEIOB (1988), S. 14ff.; POESTGES (1988), S. 92ff. Vgl. zur Differenzierung zwischen konventionellen Entscheidungstabellen einerseits und KI-Techniken - insbesondere Produktionsregelsystemen - andererseits ZELEWSKI (1986a), S. 205ff., sowie - mit expliziter Bezugnahme auf den Bereich der Arbeitsplanung - MATHIS (1988), S. 75f.; REQUICHA (1988), S. 317, und ROTH (1988), S. 255.

Den nachfolgenden Ausführungen wird eine vereinfachte³⁾ Arbeitsdefinition zugrundegelegt, die sich auf zwei wesentliche Aspekte beschränkt: Ein Expertensystem läßt sich als ein informationsverarbeitender Automat ("Computer") auffassen, der sich - im Vergleich zu seinen konventionellen Pendanten - dadurch auszeichnet, daß:

- der Benutzer den Automaten beauftragen kann, ein Problem zu bewältigen, ohne hierbei zu beschreiben, wie der Automat bei seiner Problembewältigung vorgehen soll (externer Aspekt der nonprozeduralen oder deklarativen Benutzeroberfläche);
- der Automat bei seiner Problembewältigung Wissen aus dem betroffenen Problembereich anwendet, das in einer separaten Wissensbasis explizit dargestellt wird (interner Aspekt der Wissensbasierung).

Die Bewältigung eines Problems umfaßt sowohl dessen Lösung - sofern mindestens eine Problemlösung existiert - als auch die Erkenntnis, daß ein vorgegebenes Problem grundsätzlich nicht gelöst werden kann. Letztes kann z.B. als Folge einer in sich widersprüchlichen Problembeschreibung eintreten. Wenn diese Differenzierung unerheblich ist, wird fortan nicht weiter zwischen Problembewältigung und -lösung unterschieden.

Die Aspekte der deklarativen Benutzeroberfläche und der Wissensbasierung finden ihre implementierungstechnische Entsprechung in dem Sachverhalt, daß Expertensysteme in der Regel aus den zwei Hauptmodulen der Problemlösungskomponente und der Wissensbasis aufgebaut sind. Hinzu kommen weitere Funktionsbausteine, deren Bildung zwar nicht einheitlich fixiert ist, unter denen jedoch die Dialog-, die Erklärungs- und die Wissensakquisitionskomponente am häufigsten angeführt werden.

Im Gegensatz zu anderen geläufigen Definitionen wird weder auf ein bestimmtes Problemniveau abgestellt, das zumeist durch den Aufgabenbereich menschlicher Experten umschrieben wird, noch erfolgt die Forderung, daß ein Expertensystem bei seiner Problembewältigung die Vorgehensweise von Menschen

3) Vgl. zur Vielfalt und zu den immanenten Schwierigkeiten der zur Zeit gebräuchlichen Definitionsansätze die Ausführungen in ZELEWSKI (1989b), S. 105ff.

simulieren müsse. Auf den Expertenbezug wird erstens verzichtet, weil lediglich ein unscharfer Begriff (Expertensystem) durch einen ebenso unscharfen Begriff (Experte) erklärt würde. Zweitens sollen solche Systeme nicht ausgegrenzt werden, für die sich - wie etwa im Fall der Korrespondenzverwaltung - der Begriff "Expertensystem" bereits etabliert hat, deren Problembewältigung aber dem Niveau der Sachbearbeitung zuzurechnen ist. Der Simulationsbezug wird ausgeschlossen, da es im Interesse einer Problembewältigung irrelevant ist, ob diese in menschenähnlicher Weise erfolgt oder nicht.

Die vorgeschlagene Expertensystem-Definition läßt erkennen, worin die gravierenden Fortentwicklungen der konventionellen Informationsverarbeitung durch Konzepte der Künstlichen Intelligenz liegen. Die konventionelle Trennung von Daten und Programmen wird ersetzt durch die Unterscheidung zwischen Wissensbasis und Problemlösungskomponente. Erste enthält die vorgenannten Daten als Fakten neben anderen, aus den Programmen explizit herausgelösten Wissensbestandteilen. Zweite umfaßt dagegen die Verfahren (Inferenzmechanismen, Metawissen), die es gestatten, das Wissen in problemlösender Weise durch Ziehen von Schlußfolgerungen (Inferenzen) anzuwenden.

Zumeist wird sogar unterstellt⁴⁾, die Wissensbasis enthalte deklaratives Objektwissen, das nur Problemaspekte aus dem Anwendungsbereich eines Expertensystems beschreibt, ohne Vorgehensweisen zur Problemlösung anzubieten. Die Problemlösungskomponente umgreife im Gegensatz hierzu anwendungsneutrales Metawissen prozeduraler Natur, das abzuleiten gestattet, wie ein vorgegebenes Problem bewältigt werden kann.

Als wesentliches Resultat der KI-Forschung gilt die logische Zerlegung der prozeduralen Programme der konventionellen Informationsverarbeitung, die nach Maßgabe des Ablaufs der Aufgabenerfüllung strukturiert sind, in die Komponenten der Wissensbasis und der Problemlösungskomponente. Hierdurch wird die konventionelle Vermengung von Aufgabenbeschrei-

4) Die angeführten Unterstellungen besitzen nur die Qualität grober Tendenzaussagen. Die Anwendungsnähe und die (Non-)Prozeduralität von Objekt- und Metawissen eines Expertensystems verhalten sich in Wirklichkeit erheblich komplizierter als oben skizziert. Vgl. diesbezüglich ZELEWSKI (1989a), S. 126ff., und die Anmerkungen zu prozeduralen Komponenten der Wissensbasen von CAP-Expertensystemen, die in diesem Bericht passim erfolgen.

bung⁵⁾ einerseits und Ablaufbeschreibung der Aufgabenerfüllung⁶⁾ andererseits in zwei getrennte Automatenkomponenten aufgelöst⁷⁾).

Die neuartige Zerlegung des Gesamtwissens von informationsverarbeitenden Automaten in Wissensbasis und Problemlösungskomponente verspricht eine größere Systemflexibilität. Es wird vermutet, daß diese Aufteilung zu Systemmodulen führt, die den Aufgaben informationsverarbeitender Automaten angemessener sind als die konventionelle Unterscheidung zwischen Daten und Programmen. Das allgemeine, von bestimmten Anwendungsbereichen (weitgehend) unabhängige Modul der Problemlösungskomponente kann - ebenso wie die separaten Wissensakquisitions-, Erklärungs- und Dialogkomponenten - für verschiedenste Automatenanwendungen gemeinsam entwickelt oder verändert werden. Das anwendungsspezifische Modul der Wissensbasis läßt sich dagegen jeweils eng auf den Einsatzbereich des Automaten ausrichten, ohne daß hiervon die übrigen Module beeinflußt würden. Veränderte Bedingungen des Automateinsatzes erfordern nur eine Anpassung der Wissensbasis. Diese Wissensaktualisierung wird zudem durch hochgradig modulare KI-Techniken - z.B. durch die regel- und die frame-/objektorientierten Repräsentationsschemata - für die deklarative Wissensdarstellung unterstützt. Bei konventioneller prozeduraler Programmierung müßten dagegen im Regelfall die gesamten Anwendungsprogramme neu erstellt werden.

Die Neuartigkeit von Expertensystemen kann auch in der Weise umschrieben werden, daß sie die konventionelle Art der expliziten Anwendungsprogrammierung durch eine implizite oder "virtuelle" Programmierung ersetzen. Die Problemlösungskomponente erzeugt erst durch die Veranlassung des Automatenbenutzers, der ein Problem spezifiziert, eine explizite Prozedur (Inferenzkette). Am Ende der Prozedurausführung steht die Problemlösung - oder der Nachweis, daß es un-

5) Hierbei handelt es sich um den deklarativen Aspekt des "Was?", die Problemspezifizierung.

6) Dies betrifft den prozeduralen Aspekt des "Wie?", die Problemlösung im Sinne eines Verfahrensablaufs.

7) Die konventionelle Informationsverarbeitung unterscheidet dagegen zwischen Programmen, die als Algorithmen jeweils zur Lösung einer Klasse von Aufgaben dienen, einerseits und Daten, die jeweils eine bestimmte Aufgabe aus dieser Klasse festlegen, andererseits. Diese Differenzierung wird bei Expertensystemen nicht mehr aufrechterhalten. Daten gehen als aufgabenspezifische Fakten in die Wissensbasis ein.

möglich ist, das vorgegebene Problem zu lösen. Die Problemlösungskomponente enthält somit implizit die Klasse aller Anwendungsprogramme, die zulässige Problembeschreibungen durch den Zugriff auf Informationen aus der Wissensbasis zu bewältigen vermögen.

Das Schwergewicht der Automatenbenutzung verschiebt sich auf diese Weise von der Erstellung prozeduraler Anwendungsprogramme (Verarbeitungsalgorithmen), die bei der konventionellen Informationsverarbeitung dominiert, zur Formulierung adäquater Problembeschreibungen. Hierbei spielt die nonprozedurale Benutzeroberfläche von Expertensystemen eine ausschlaggebende Rolle. Es tritt eine Fokusverschiebung von algorithmischen zu deklarativen Aufgaben ein. Für den Expertensystembenutzer erlangen Schwierigkeiten der Problemwahrnehmung und der Strukturierung zunächst diffuser, unklarer Problemumschreibungen verstärkte Bedeutung. Konzeptualisierungen von schlecht-strukturierten Problemen, zu denen auch die Aufgaben der Arbeitsplanung zählen, rücken in den Vordergrund.

Die deklarative Benutzeroberfläche von Expertensystemen bedeutet, daß ihre Benutzer das Problem, das es jeweils zu lösen gilt, nur noch zu beschreiben brauchen, ohne den Ablauf der Problemlösung angeben zu müssen. Das Expertensystem muß intern über problemlösendes Wissen - auch prozeduraler Art - verfügen, um die Vorgehensweise bei der Erarbeitung der Problemlösung selbständig festlegen zu können. In den Begriffen der konventionellen Informationsverarbeitung ausgedrückt heißt dies, daß sich ein Expertensystem - in prozeduraler Hinsicht - selbst zu programmieren vermag. Daher braucht der Benutzer zur Lösung eines neuartigen Problems nicht mehr ein prozedurales Programm zu entwerfen und zu implementieren. Es reicht aus, wenn er für das Expertensystem ein Problem spezifiziert, indem er die Ausgangssituation, die erwünschte Zielsituation und die zulässigen Aktionen, welche die Situationen ineinander transformieren können, vollständig festlegt.

Darüber hinaus erfolgt in der Regel eine Arbeitsteilung zwischen dem Systembenutzer im engeren Sinne und dem Systementwickler derart, daß der zweite als "knowledge engineer" die zulässigen Aktionen vor der ersten operativen Systemnut-

zung implementiert. Dieses Aktionswissen stellt einen wesentlichen Teil des Anwendungswissens von Expertensystemen dar. Hierauf wird später im spezifischen Kontext der CAP-Expertensysteme zurückgekommen. Der Systembenutzer kann sich dann auf die Aufgabe beschränken, Ausgangs- und Zielsituationen seiner speziellen Problemstellung zu beschreiben.

Die Informationsverarbeitung intelligenter Automaten unterscheidet sich von der konventionellen Datenverarbeitung auch dadurch, daß das Schwergewicht auf der Verarbeitung von qualitativen Informationen liegt. Diese Symbol- oder Wissensverarbeitung geht in ihrer Leistungsfähigkeit über den konventionellen Umgang mit quantitativen (numerischen) Daten weit hinaus. Zwar erlaubt auch die gewöhnliche Datenverarbeitung, mit nicht-numerischen Informationen - wie z.B. Anschriftenlisten oder Schriftstücken - umzugehen. Doch bleibt das Verarbeitungspotential auf einfache Prozesse, etwa des Sortierens von Daten oder des Editierens von Texten, beschränkt. Diese konventionellen Operationen zeichnen sich gemeinsam dadurch aus, daß ihre Ausführung keine Kenntnisse über den sachlichen Inhalt der verarbeiteten Informationen erfordert. An diesem Punkt setzt die charakteristische Eigenschaft von Expertensystemen an, infolge ihrer Wissensbasierung gerade solche Kenntnisse über die Sachzusammenhänge eines Problems zu dessen Lösung intensiv gebrauchen zu können.

1.2 Überblick über Expertensystemanwendungen im Bereich der computerunterstützten Arbeitsplanung

Es erfolgen seitens der KI-Forschung intensive Bemühungen, Expertensysteme für den Bereich der computerunterstützten Arbeitsplanung zu entwickeln⁸⁾. Diese CAP-Expertensysteme berücksichtigen jedoch gewöhnlich nur einen Ausschnitt aus dem Aufgabenbereich der Arbeitsplanung. Sie konzentrieren sich in der Regel auf:

- die Identifizierung aller Arbeitsgänge, die zur Herstellung eines Produkts verrichtet werden müssen (Arbeitsgangplanung);
- die Zuordnung der Ressourcen, die jeweils zur Realisierung eines Arbeitsgangs erforderlich sind (arbeitsgangbezogene Ressourcenplanung) und
- die Ermittlung der technischen Reihenfolgebeziehungen, die zwischen den Arbeitsgängen eingehalten werden müssen (Arbeitsablauf- oder Präzedenzplanung).

Das Ergebnis der vorgenannten vier Teilaufgaben ist zunächst ein Arbeitsplan, in dem die Arbeitsgänge für die Herstellung eines Produkts einschließlich ihrer Ressourcen- und Zeitbedarfe in der technisch erforderlichen Reihenfolge aufgelistet sind.

Die computerunterstützte Generierung von Arbeitsplänen legt es nahe, die Automatisierung des Planungsprozesses noch einen Schritt weiter zu führen. Es handelt sich um die automatische Umsetzung von Arbeitsplänen in Steuerungsprogramme für NC-, insbesondere CNC-Maschinen (Teileprogramme) und für Roboter. Diese automatische Softwareproduktion wird jedoch schon im Rahmen der konventionellen Informationsverarbeitung durch spezielle Postprozessoren von CAD-Systemen oder durch

8) Vgl. zu solchen CAP-Expertensystemen und ihren konzeptionellen Grundlagen STEINACKER (1985), S. 28ff.; MILL (1985), S. 258ff.; MILACIC (1985), S. 153ff.; ARFMANN (1985), S. 3.1-3ff.; KRALLMANN (1986a), S. 408ff.; KRALLMANN (1986b), S. 101; KRALLMANN (1987), S. 198ff.; JOSHI (1988), S. 863ff.; WANG (1988), S. 999ff.; KEMPF (1988), S. 147ff.; REQUICHA (1988), S. 301ff.; MALETZ (1988), S. 435ff.; IWATA (1988), S. 3 u. 9ff.; WARNECKE, H. (1988), S. 62ff.; MATHIS (1988), S. 76ff.; ZELEWSKI (1989a), S. 112ff.

Knappe Hinweise auf die Einsatzmöglichkeit von Expertensystemen für die Arbeitsplanung finden sich auch bei PARKS (1985), S. 10; WILDEMANN (1987), S. 31f.; RETHFELD (1987), S. 458; KUHN (1987), S. 252; STEINMANN (1987a), S. 207; STEINMANN (1987b), S. 170; EVERSHEIM (1988), S. 52; MERTENS (1988), S. 15ff.; JANSEN (1988), S. 119ff.; DEKLEVA (1989), S. 9f.

integrierte CAD/CAM-Systeme geleistet⁹⁾. Daher eröffnen Expertensysteme in dieser Hinsicht keine grundsätzlich neuartige Computerunterstützung, sondern nur eine Variante bereits vorliegender Automaten¹⁰⁾.

Allerdings bietet sich hier ein interessanter Ansatz, bereits verfügbare konventionelle Programme für die Generierung von Maschinensteuerungen als prozedurale Bausteine in das Anwendungswissen eines CAP-Expertensystems zu integrieren¹¹⁾. Diese Schnittstelle zwischen Expertensystemen und konventioneller Softwaretechnik dürfte einen der ersten Ansatzpunkte darstellen, an dem die bisher vielfach diskutierte¹²⁾, aber noch weitgehend unbewältigte Integration beider Software-"Welten" zu konkreten und praxisrelevanten Ergebnissen führt¹³⁾. Darüber hinaus trägt diese Schnittstelle dazu bei, den Mythos zu überwinden, Expertensysteme seien *grundsätzlich* nonprozedural strukturiert. Stattdessen können sie - wie im Fall der o.a. Bausteine für die Generierung von Steuerungsprogrammen - durchaus interne prozeduralen Wissenskomponenten umfassen. Nur an ihrer Benutzeroberfläche zeichnen sie sich durch ihre deklarative Charakteristik aus, die nicht mehr ablauf-, sondern nur noch rein aufgabenorientiert ausgelegt ist.

Im Gegensatz zur (C)NC-Programmsynthese bleiben Aspekte der Verfahrenswahl aus der Entwicklung von CAP-Expertensystemen zumeist ausgeklammert¹⁴⁾. Er wird nicht berücksichtigt, daß die Herstellung des gleichen Produkts durch unter-

9) Vgl. HELLWIG (1985), S. 28ff., insbesondere S.32; REQUICHA (1988), S. 301ff.; BERR (1988), S. 244ff.; DAVIES, B. (1988), S. 27f.

10) Vgl. zu einer Integration von KI-Techniken in konventionelle Konzepte der automatischen Generierung von (C)NC-Steuerungsprogrammen REQUICHA (1988), S. 314ff. u. 322; DAVIES, B. (1988), S. 31ff.; BERR (1988), S. 247ff.

11) Im Sinne von VON BECHTOLSHEIM (1989), S. 76ff., liegt eine anwendungsbezogene Integration durch feste Kopplung vor.

12) Vgl. zum Themenkreis der Integration "intelligenter" und konventioneller Software ZELEWSKI (1986a), S. 1214ff.; VON BECHTOLSHEIM (1989), S. 76ff.

13) Vgl. aber auch VON BECHTOLSHEIM (1989), S. 78, zu den derzeit noch erheblichen Schwierigkeiten der (anwendungsbezogenen) Expertensystem-Integration (durch feste Kopplung).

14) Zwar existieren durchaus Expertensysteme für das betriebswirtschaftliche Problem der Verfahrenswahl, jedoch wurden diese nicht als CAP-Expertensysteme konzipiert; vgl. z.B. RYCHENER (1986), S. 878ff. Des Weiteren wurde eine konzeptionelle Vorstudie für die Entwicklung von Expertensystemen vorgelegt, die der "Technologieplanung" an der Schnittstelle zwischen Konstruktion und Produktion dienen sollen; vgl. WARNECKE, G. (1988), S. 559ff. Sie ließe sich zu einem Konzept für Verfahrenswahl-Expertensysteme ausbauen.

schiedliche technische Produktionsverfahren realisiert werden kann, die jeweils zu anderen Ergebnissen der Arbeitsgangidentifizierung und Ressourcenplanung führen würden. Auch zur Bestimmung von Vorgabezeiten hat die KI-Forschung bisher keine eigenständigen Beiträge geliefert. Schließlich werden Produktionsaufträge mit Anweisungen gleichgesetzt, jeweils eine Einheit eines bestimmten Produkts herzustellen. Komplizierungen bleiben außer acht, die daraus resultieren können, daß mehrere Produktionsaufträge in die Herstellung eines Produkts einfließen (mehrstufige Produktion) oder derselbe Produktionsauftrag mehrere Produkteinheiten umfaßt (losweise Produktion). Aspekte der Auftragsumwandlung werden also von typischen CAP-Expertensystemen nicht abgedeckt. Solche Aufgaben fallen in das Funktionsspektrum von PPS-Expertensystemen.

2 Konzeptionelle Grundlagen für CAP-Expertensysteme

2.1 Anwendungsspezifische Wissensbasen

Ausschlaggebend für die Entwicklung von CAP-Expertensystemen, die im Bereich der Arbeitsplanung eingesetzt werden sollen, ist die Gestaltung ihrer Wissensbasen¹⁵⁾. Im Idealfall müßten diese Expertensysteme über ein breites Aktionswissen verfügen. Dieses Aktionswissen repräsentiert in deklarativer Weise die Gesamtheit aller Informationen über Aktionen, die in einem Produktionssystem zwecks Fertigung und Montage von Produkten grundsätzlich ausgeführt werden können.

Eine Aktion umfaßt jeweils einen Arbeitsgang, ist aber inhaltlich komplexer definiert¹⁶⁾. Sie bezeichnet zunächst den Arbeitsgang, durch dessen Ausführung ein Bearbeitungs- zustand eines Werkstücks in einen Folgezustand überführt wird. Darüber hinaus gehören zur Aktionsdefinition aber auch Angaben über die Ressourcen - z.B. Bearbeitungsmaschinen, Werkzeuge, Spann- und Justier- vorrichtungen -, die zur Ar-

15) Ausführliche Darstellungen der Wissensbasierung von CAP-Expertensystemen finden sich bei WANG (1988), S. 1000ff.; IWATA (1988), S. 7f.

16) Vgl. zur Inhaltsfülle des Wissens, das in CAP-Expertensystemen für einzelne Aktionen vorausgesetzt wird, WILKINS (1984), S. 274ff. u. 282f.; TATE (1984), S. 411; KRALLMANN (1986b), S. 101; TSANG (1987), S. 74.; WANG (1988), S. 1005f.

beitsgangausführung erforderlich sind. Daher ist die arbeitsgangbezogene Ressourcenplanung bereits in die Definitionen von Aktionen eingeflossen. Gleiches gilt für die Aktionsdauern, die als Vorgabe- oder Sollzeiten für die Ausführung der jeweils betroffenen Arbeitsgänge eine weitere Konstituente der Aktionsdefinition darstellen¹⁷⁾. Hinzu kommen unter Umständen noch Angaben über aktionsspezifische Bearbeitungsparameter, wie z.B. die Vorschubgeschwindigkeiten und Eindringtiefen von Schneidwerkzeugen, die Umdrehungsgeschwindigkeiten von Bohrspindeln oder Bearbeitungstoleranzen¹⁸⁾. Es wird also vorausgesetzt, daß die Ressourcen- und Vorgabezeitplanung bereits ausgeführt worden sind. Daher unterstützen CAP-Expertensysteme im allgemeinen nur die Arbeitsgang- und die Arbeitsablaufplanung. Nur in einem Ausnahmefall wird von einem CAP-Expertensystem berichtet, das auch bei der Vorgabezeitplanung behilflich sein soll¹⁹⁾.

Die reichhaltige Definition einer Aktion besitzt nonprozeduralen Charakter, weil durch eine isolierte Aktion noch kein bestimmter Arbeitsablauf vorgegeben ist. Allerdings wird die zeitliche Anordnung der Aktionen in zulässigen Aktionsplänen durch technische Restriktionen partiell eingeschränkt. Angaben über solche technischen Reihenfolgebeziehungen (Präzedenzrelationen) bilden die zweite Komponente des deklarativen Aktionswissens²⁰⁾.

Das Aktionswissen wird durch ein - ebenso deklaratives - Ressourcen- und Produktwissen ergänzt²¹⁾. Es enthält Informationen über die technischen Eigenschaften der bereits oben erwähnten Ressourcen, die in einem Produktionssystem für die Aktionsausführung zur Verfügung stehen, und über das herzustellende Produkt. Beim Ressourcenwissen kann es sich z.B. um Angaben über quantitativen und qualitativen Kapazitäten von Bearbeitungsmaschinen oder über die Anzahl von gleich-

17) Vgl. TATE (1984), S. 411, der die Ausführungsdauer einer Aktion als einen Ressourcenverzehr sui generis behandelt; TSANG (1987), S. 74, der Aktionsdauern und weiterführende zeitliche Restriktionen in den Aktionsspezifizierungen zuläßt.

18) Vgl. MOULEESWARAN (1985), S. 4 u. 11; KRALLMANN (1986b), S. 101.

19) Vgl. KÖHLER (1988), S. 252ff.

20) Vgl. WANG (1988), S. 1006ff.

21) Vgl. z.B. WANG (1988), S. 1002ff. u. 1010f.

artigen Transportrobotern handeln²²⁾. Das Produktwissen erstreckt sich hingegen auf produktdefinierende Informationen wie Bestimmungen der Produktgeometrie und der Produktqualität (etwa der Oberflächengüte)²³⁾.

Bei der Konstruktion von Expertensystemen wird vorausgesetzt, daß die Arbeitsgänge, die sich in einem Produktionssystem grundsätzlich ausführen lassen, ebenso bekannt sind wie deren Ressourcenerfordernisse, Ausführungsdauern und sonstigen Bearbeitungsparameter. Diese Determinanten der Arbeitsplanung müssen als Aktionswissen beim Aufbau der Wissensbasen von erfahrenen Mitarbeitern aus der Arbeitsvorbereitung erhoben werden²⁴⁾. Die Akquisition dieses Aktionswissens kann in der betrieblichen Praxis erhebliche Schwierigkeiten bereiten, sogar zu dem dominierenden Engpaß der Entwicklung eines CAP-Expertensystems werden. Einerseits kann der Fall eintreten, daß die Mitarbeiter solches Wissen über Aktionsausführungen zwar implizit als "tacit knowledge" oder "skills" anwenden, es aber nicht zu explizieren vermögen. Andererseits ist es ebenso möglich, daß die Mitarbeiter zwar ihr Aktionswissen expliziert formulieren könnten, hierauf aber verzichten, weil sie sich von einer "kognitiven Enteignung" ihres beruflichen Know-hows bedroht fühlen. Beide Schwierigkeiten gelten jedoch nicht spezifisch für CAP-Expertensysteme. Vielmehr behindern sie die praktische Implementierung von Expertensystemen generell, wenn diese Systeme in betrieblichen Anwendungsumgebungen tatsächlich genutzt - und nicht auf Konzeptdemonstrationen mit "Spielzeugcharakter" beschränkt - werden sollen.

22) Vgl. GRASMÜCK (1985), S. 7ff.; KRALLMANN (1986b), S. 101.

23) Vgl. z.B. WANG (1988), S. 1002f.

24) Vgl. STIRLING (1988), S. 304ff.; dort wird eine praktisch ausgeführte Wissensakquisition für ein CAP-Expertensystem detailliert beschrieben. Auch bei dieser Akquisitionsarbeit lassen sich KI-Techniken einsetzen, wie z.B. die induktive Verallgemeinerung von Fallbeispielen zu heuristischen Erfahrungsregeln.

2.2 Generieren von Aktionsplänen

2.2.1 Überblick

2.2.1.1 Arbeitsgangplanung

Der herausragende Beitrag der KI-Forschung für die computerunterstützte Arbeitsplanung erstreckt sich auf die automatische Synthese von aufgabenspezifischen Arbeitsplänen. Hierzu wird die breite Basis des allgemeinen Aktionswissens ausgewertet, ohne daß sich der Benutzer eines CAP-Expertensystems um die Gestaltung des Auswertungsprozesses kümmern müßte. Der Benutzer - das heißt hier: der Arbeitsplaner - kann sich an der deklarativen Systemoberfläche auf die Beschreibung der zu bewältigenden Produktionsaufgabe konzentrieren. Auf das reichhaltige konzeptionelle Spektrum, das seitens der KI-Forschung für die automatische, wissensbasierte Plansynthese entwickelt worden ist, kann hier weder umfassend noch im Detail eingegangen werden²⁵⁾. Stattdessen werden diejenigen Aspekte skizziert, die für die Generierung von Arbeitsplänen spezielle Bedeutung erlangen.

Für die Arbeitsgang- und Arbeitsablaufplanung hat die KI-Forschung ein interessantes, im Rahmen der konventionellen Informationsverarbeitung bislang unbekanntes Konzeptbündel erarbeitet. Es handelt sich um die Generierung von nonlinearen, hierarchisch verfeinerten Aktionsplänen²⁶⁾, die auf Arbeiten von SACERDOTI über prozedurale Netze zurückgehen²⁷⁾. Hinsichtlich ihrer automatischen Erzeugung wurden sie vor allem von TATE und DANIEL fortentwickelt²⁸⁾.

25) Vgl. dazu z.B. die Überblicke bei HERTZBERG (1986), S. 149ff., und HERTZBERG (1989).

26) Vgl. z.B. SACERDOTI (1975), S. 207ff.; SACERDOTI (1977), S. 2, 27ff. u. 52ff.; DANIEL (1984), S. 423ff.; CHAPMAN (1985), S. 1022ff.; MALETZ (1988), S. 437ff., insbesondere S. 444ff.; HUMMEL (1988), S. 122ff.; MATHIS (1988), S. 81f.; HERTZBERG (1989), S. 81ff.; vgl. auch die Literaturangaben in den nachfolgenden Fußnoten zu speziellen Aspekten dieser Plansynthese; vgl. auch die späteren Quellenangaben zu den Expertensystemen ABSTRIPS, NOAH, NONLIN, O-Plan und SIPE.

27) Vgl. SACERDOTI (1975), S. 207ff.; SACERDOTI (1977), S. 7f.; GRAHAM (1983), S. 89ff., sowie - hinsichtlich einer Erweiterung auf Plannetze, welche die iterationsfreien (schleifenlosen) prozeduralen Netze um iterative Aktionsfolgen bereichert, - DRUMMOND (1985), S. 1010ff.

28) Vgl. hierzu die Anmerkungen zum u.a. Expertensystem NONLIN.

Bei der Synthese eines Aktionsplans geht ein Expertensystem von einer Produktionsaufgabe sowie seinem Wissen über Aktionen, Ressourcen und Produkte aus. Die Produktionsaufgabe definiert als Ziel der - noch unbekannt - auszuführenden Aktionen, ein Werkstück in einem erwünschten, fertig bearbeiteten Zustand als Endprodukt zu erhalten. Im Rahmen einer Dekompositionsstrategie wird dieses Oberziel schrittweise in Unterziele zerlegt.

Einerseits stellt die Realisierung aller Unterziele aus derselben Verfeinerungsebene die Verwirklichung des Oberziels, d.h. die intendierte Produktherstellung sicher. Andererseits nähern sich die Unterziele mit zunehmendem Detaillierungsgrad immer mehr der Ausführung konkreter Aktionen (Arbeitsgänge) an. Die Aufgabendekomposition wird erfolgreich beendet, wenn auf der tiefsten, detailliertesten Planungsebene alle Unterziele aus elementaren Teilaufgaben bestehen. Eine solche elementare Produktionsaufgabe liegt vor, wenn sie durch das Ausführen eines einzelnen Arbeitsgangs - einer konkreten Aktion aus dem Aktionswissen des CAP-Expertensystems - erfüllt werden kann. Die vollständige Zerlegung der ursprünglichen Produktionsaufgabe in elementare Teilaufgaben determiniert die Menge derjenigen Arbeitsgänge, die zur Produktherstellung erforderlich sind (Arbeitsgangmenge).

Ein CAP-Expertensystem braucht also nicht a priori zu wissen, welche Arbeitsgänge zur Herstellung eines bestimmten Produkts erforderlich sind. In seinem Aktionswissen hält es nur Informationen über alle Aktionen (Arbeitsgänge) vor, die in einem Produktionssystem grundsätzlich ausgeführt werden können. Wenn sein Benutzer eine Produktionsaufgabe beschreibt, identifiziert es selbständig eine zur Aufgabenerfüllung taugliche Arbeitsgangmenge²⁹⁾. Durch diese Identifikationsleistung erfolgt eine automatische Arbeitsgangplanung. Der Prozeß der Plangenerierung läuft als interne Leistung der Inferenzkomponente eines CAP-Expertensystems ab,

29) Vgl. GOLDBOGEN (1988), S. 287 u. 291ff.

ohne daß der aufgabenbeschreibende Systembenutzer hiervon Kenntnis nehmen müßte³⁰⁾.

Bei der hierarchischen Aufgaben- und Zielverfeinerung kann auf Modelle der zu fertigenden Endprodukte zurückgegriffen werden, die sich aus CAD-Systemen gewinnen lassen³¹⁾. Voraussetzung hierfür ist, daß die Produktmodelle - ebenfalls in hierarchischer Weise - aus Komponenten zusammengesetzt sind. Ferner muß für die Herstellung jeder elementaren Produktkomponente in der Wissensbasis des CAP-Expertensystems ein entsprechender Arbeitsgang für die Komponentenfertigung vorgesehen sein. Aus dieser Perspektive ergibt sich ein zweiter Ansatzpunkt für die Integration von CAP-Expertensystemen in konventionelle Softwareumgebungen. Während die oben angesprochene (C)NC-Kopplung den Informationsoutput eines CAP-Expertensystems - einen Arbeitsplan - betraf, liegt hier auf der Seite des Informationsinputs eine komplementäre Kopplungsmöglichkeit mit CAD-Systemen vor. Daher zeichnet sich das Konzept der CAP-Expertensysteme durch die bemerkenswerte Eigenschaft aus, in einem umfassenden CIM-Konzept für den durchgängigen Informationsfluß aus dem CAD- in den CAM-Bereich eine wohlstrukturierte, zugleich mit "Eigenintelligenz" versehene Systemschnittstelle anzubieten³²⁾.

Der Rückgriff von CAP-Expertensystemen auf Produktmodelle aus CAD-Systemen böte auch die Gelegenheit, die computerunterstützte Arbeitsplanung mit Simulationsintelligenz anzureichern. Ausgangspunkt dieses Konzepts ist eine Schwach-

30) Es kann durchaus der Fall sein, daß mehrere Arbeitsgangmengen existieren, welche dieselbe Produktionsaufgabe erfüllen. Expertensysteme für die automatische Synthese von Arbeitsplänen suchen aber immer im allgemeinen nur nach einem zulässigen, aufgabenerfüllenden Plan. Grundsätzlich ließe sich diese Suche aber auf die Generierung mehrerer zulässiger Arbeitspläne ausweiten. Diese automatische Synthese von Alternativplänen könnte an dem Planungskonzept anknüpfen, das von DANIEL (1984), S. 441ff., beschrieben wird. Dort wird jeder Arbeitsplan mit einem Entscheidungsgraphen verknüpft, der alle Verfeinerungsentscheidungen enthält, die während der Suche nach einem zulässigen Arbeitsplan getroffen wurden. Durch Variation der Entscheidungen in diesem Graphen lassen sich alternative Arbeitspläne erzeugen (sofern sie existieren). Eine simultane Betrachtung von alternativen Arbeitsplänen ist auch in dem Expertensystem SIPE möglich, auf das unten näher zurückgekommen wird; vgl. WILKINS (1984), S. 295. Vgl. des weiteren die späteren Anmerkungen zu den Fähigkeiten der Expertensysteme CEMAS und ISIS, Planungsalternativen erfassen zu können.

31) Vgl. NAU (1983), S. 258; GRASMÜCK (1985), S. 2f.; KRALLMANN (1986a), S. 409; KRALLMANN (1986b), S. 101; KRALLMANN (1987), S. 199; JOSHI (1988), S. 867ff.; vgl. auch die später erfolgenden Anmerkungen zur CAD-Anbindung der Expertensysteme GUMMEX (APLEX), FERPLAN und PROPLAN.

32) Dieser Aspekt der durchgängigen CAD/CAM-Kopplung durch CAP-Expertensysteme klingt auch bei DAVIES, B. (1988), S. 27, an.

stelle fast aller bisher vorgelegten CAP-Expertensysteme³³⁾. Sie resultiert daraus, daß das Wissen über auszuführende Aktionen (Arbeitsgänge), bearbeitete Werkstücke und eingesetzte Betriebsmittel im allgemeinen nicht ausreicht, um die korrekte Realisierung der Aktionsausführungen sicherzustellen. Grund hierfür ist, daß die Werkzeuge bei der Aktionsausführung mit dem bearbeiteten Werkstück oder - beim simultanen Einsatz mehrerer Werkzeuge - auch miteinander kollidieren können. Daher reicht es für einen tatsächlich ausführbaren Arbeitsplan oftmals nicht aus, die vorgegebene Produktionsaufgabe vollständig in elementare Teilaufgaben zu zerlegen.

Vielmehr müßte durch Simulation der Aktionsausführungen nachgewiesen werden, daß sich die Teilaufgaben kollisionsfrei bewältigen lassen. Solche Ausführungssimulationen setzen voraus, daß ein CAP-Expertensystem auf dreidimensionale Modelle der jeweils bearbeiteten Werkstücke und der bearbeitenden Betriebsmittel zugreifen kann. Solche "Produkt"-Modelle ließen sich grundsätzlich aus CAD-Systemen übernehmen, die eine dreidimensionale Objektkonstruktion erlauben. Die Simulation von Aktionsausführungen in einem nachgeschalteten CAP-Expertensystem kann als vierdimensionale CAD/CAP-Kopplung aufgefaßt werden.

2.2.1.2 Arbeitsablaufplanung

Ein hierarchisch verfeinerter Aktionsplan liefert nicht nur die Menge aller Aktionen, die für die Ausführung einer beschriebenen Produktionsaufgabe erforderlich sind. Vielmehr folgt aus der o.a. inhaltlich angereicherten Aktionsdefinition, daß sich aus dem Aktionswissen auch die arbeitgangweise Ressourcenplanung, die Ausführungsdauern der Arbeitsgänge und die Ausprägungen von Bearbeitungsparametern unmittelbar explizieren lassen. Bedeutsamer ist aber, daß die Arbeitsgangmenge am Ende der Aktionsplan-Synthese nicht strukturlos ist, sondern eine Halbordnung besitzt. Die Arbeits-

33) Vgl. REQUICHA (1988), S. 318 u. 322.

gänge bilden einen nonlinearen Aktionsplan (Arbeitsplan)³⁴). In ihm folgen manche Arbeitsgänge sequentiell aufeinander, während andere keiner bestimmten Anordnung unterliegen. Dieser nonlineare, halbgeordnete Arbeitsplan drückt genau diejenigen Reihenfolgebeziehungen aus, die bei der Werkstückbearbeitung aufgrund technischer Sachzwänge eingehalten werden müssen³⁵). Er unterscheidet sich deutlich von konventionell erstellten Arbeitsplänen, die gewöhnlich eine streng lineare, rein sequentielle Anordnung aller Arbeitsgänge vornehmen.

Die Delinearisierung konventioneller Arbeitspläne, die in halbgeordneten Aktionsplänen von CAP-Expertensystemen vorliegt, eröffnet für nachgeschaltete PPS- und CAM-Systeme einen zusätzlichen Freiheitsgrad³⁶). Denn diese Folgesysteme können bei Planung und Steuerung der Produktionsprozesse sowohl zeitlich parallele als auch zeitlich überlappende Arbeitsgangausführungen sowie unterschiedliche Arbeitsgangreihenfolgen festlegen, sofern diese nicht gegen die zeitliche Halbordnung der nonlinearen Aktionspläne verstoßen. Diese Planungs- und Steuerungsoption wird zwar von konventionellen PPS- und CAM-Systemen noch kaum genutzt, da sie vornehmlich auf der konventionellen Basis linearer Arbeits-

34) Die Halbordnung und daraus folgende Nonlinearität von Arbeitsplänen wird von MALETZ (1988), S. 436 u. 446, besonders herausgestellt.

35) Die Gesamtheit dieser technischen Reihenfolgebeziehungen definiert eine Präzedenzrelation auf der Arbeitsgangmenge. Daher wird die Erzeugung eines derart halbgeordneten Arbeitsplans auch als Präzedenzplanung bezeichnet; vgl. CUNIS (1987a), S. 412; CUNIS (1987b), S. 10f.

Die Arbeitsgänge, die zur Herstellung eines Produkts erforderlich sind, können im Einzelfall durch die Präzedenzrelation auch vollständig geordnet sein. Dann resultiert ein linearer Arbeitsplan. Solche linearen Pläne bilden den Standardfall der konventionellen Arbeitsablaufplanung. Sie werden oftmals auch in CAP-Expertensystemen unreflektiert als Ergebnis der Synthese von Arbeitsplänen unterstellt; vgl. z.B. MATSUSHIMA (1982), S. 329 u. 331f.; IUDICA (1985), S. 23f.; GRASMÜCK (1985), S. 15f.; PHILLIPS (1985), S. 10-3; LINDSAY (1985), S. 130; MATHIS (1988), S. 81; HUMMEL (1988), S. 132. Dann kann die Vorgabezeit für die Herstellung einer Produkteinheit als Summe der Vorgabezeiten für alle erforderlichen Arbeitsgänge ermittelt werden; vgl. GRASMÜCK (1985), S. 16.

Im allgemeinen wirken die technologischen Reihenfolgebeziehungen jedoch nicht so restriktiv, daß sie einen linearen Arbeitsplan erzwingen. Vielmehr resultieren die linearen Arbeitspläne meistens aus der Eigenart der Vorschriften für die Planerzeugung. Hierdurch werden die zulässigen Arbeitsabläufe stärker eingeschränkt, als es aus produktionstechnischen Gründen erforderlich wäre. Um diese planungsbedingten Verzerrungen auszuschließen, wird fortan weiter von dem allgemeinen Konzept nonlinearer, nur halbgeordneter Arbeitspläne ausgegangen. Vgl. dazu auch die vortreffliche Kritik von MALETZ (1988), S. 437f., daß die praktisch üblichen linearen Arbeitsplänen in der Regel nicht nur nicht notwendig sind, sondern sogar Informationsverluste und Einbußen an Planungsfreiheit bedeuten. Auf den letztgenannten Aspekt wird anschließend näher eingegangen.

36) Vgl. zur Vorteilhaftigkeit nonlinearer Arbeitspläne auch die überzeugenden Ausführungen von MALETZ (1988), S. 438.

pläne entwickelt wurden. Aber zukünftige Systemverbesserungen - vor allem auch entsprechende PPS- und CAM-Expertensysteme - könnten den zusätzlichen Freiheitsgrad halbgeordneter Aktionspläne ausnutzen. Dies gilt insbesondere für Flexible Fertigungssysteme, in denen kurzfristige Umplanungen von Arbeitsgangausführungen je nach aktueller Kapazitätsauslastung und -verfügbarkeit möglich sein sollten.

Der Arbeitsplan, den ein CAP-Expertensystem generiert hat, stellt im Hinblick auf die technisch notwendigen Arbeitsgangreihenfolgen prozedurales Wissen dar. Im Rahmen der KI-Forschung wird er daher auch als prozedurales Netz bezeichnet, dessen Knoten aus den Arbeitsgängen der Produktionsaufgabe gebildet werden. Die gerichteten Kanten zwischen diesen Knoten repräsentieren die technologischen Reihenfolgebeziehungen. Der Arbeitsplan läßt sich auch in der betriebswirtschaftlich vertrauten Weise eines Netzplans vom Vorgangsknotentyp repräsentieren. In ihm sind den Vorgängen (Arbeitsgängen) noch keine Start- und Endtermine zugeordnet³⁷⁾. Aus der Perspektive der Netzplantechnik leisten CAP-Expertensysteme also eine automatische Analyse und Konstruktion der Netzstruktur³⁸⁾. Hier bietet sich ein interessanter Anknüpfungspunkt, um Erkenntnisse aus der Netzplantechnik in die Arbeitsplanung mit Expertensystemen einzubeziehen. Insbesondere die Algorithmen der Netzterminierung können als prozedurale Komponenten in die Wissensbasen von CAP-Expertensystemen aufgenommen werden.

37) Vgl. WILKINS (1984), S. 294f.

38) Daher lassen sich auch Konzepte, die seitens der KI-Forschung zur Unterstützung der Strukturanalyse von Netzplänen entwickelt wurden, auf die Arbeitsplanung übertragen. Die Erörterung dieser Konzepte würde jedoch hier zu weit führen; vgl. dazu ZELEWSKI (1986b), S. 5ff. - insbesondere S. 21ff. zur Strukturanalyse -, und die dort angeführte Literatur.

2.2.2 Verfeinerungen und Erweiterungen

Tatsächlich erfolgt die Synthese von nonlinearen Arbeitsplänen durch CAP-Expertensysteme weitaus komplizierter, als es zuvor skizziert wurde. Der wesentliche Gehalt solcher Expertensysteme liegt in der konkreten Ausgestaltung der Strategien für die hierarchische Planverfeinerung³⁹⁾. Es würde den Rahmen dieser Ausführungen sprengen, in extenso die alternativen Verfeinerungsstrategien zu erläutern, die für die hierarchische Dekomposition von Produktionsaufgaben entwickelt worden sind⁴⁰⁾. Stattdessen werden nur einige Aspekte exemplarisch beleuchtet.

Die Dekompositionsstrategien bilden den herausragenden Bestandteil des Kontroll- oder Metawissens von Expertensystemen. Es wird in der Problemlösungskomponente als prozedurales Wissen vorgehalten und zur Steuerung von problemlösenden - d.h. hier: von arbeitsplanerzeugenden - Inferenzprozessen angewendet⁴¹⁾. Die theoretischen und praktischen Kenntnisse über die Ausgestaltung dieses inferenzlenkenden Metawissens sind derzeit jedoch noch so dürftig, daß die bisher vorgelegten CAP-Expertensysteme mit erheblichen Effizienzproblemen kämpfen⁴²⁾. Hier besteht ein weiterer Engpaß der KI-Forschung, der einen erheblichen Entwicklungsbedarf anzeigt.

39) Näheres zum Konzept der KI-Forschung, Aufgaben (Oberziele) dadurch zu erfüllen, daß eine hierarchische Dekomposition in Teilaufgaben (Subziele) bis hin zu konkreten Aktionsausführungen erfolgt, findet sich bei BARR (1981), S. 24f. u. 36ff.; NIIZUMA (1985), S. 117ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 258ff., und der dort zitierten weiterführenden Literatur.

40) Vgl. hierzu SACERDOTI (1974), S. 119ff.; SACERDOTI (1975), S. 208ff.; SACERDOTI (1977), S. 2, 27ff. u. 52ff.; SACERDOTI (1980), S. 8ff.; DANIEL (1984), S. 433f. u. 439ff., insbesondere S. 442ff. u. 449ff.; WILKINS (1984), S. 283ff. (mit wesentlichen Einschränkungen auf S. 294ff.); SMITH (1985), S. 1013ff.; CROFT (1985); ZELEWSKI (1986a), S. 302f.; CUNIS (1987a), S. 413ff.; CUNIS (1987b), S. 10ff.; ARLABOSSE (1987), S. 385f.; KEMPF (1988), S. 156ff.

Vgl. des weiteren die u.a. Literatur zu intelligenten Automaten für die Synthese nonlinearer, hierarchisch verfeinerter Arbeitspläne im besonderen sowie die o.a. Quellen zur Dekompositionsstrategie im allgemeinen.

41) Vgl. zu diesem Kontroll- oder Metawissen WILKINS (1984), S. 294ff.; CUNIS (1987b), S. 20ff. u. 29; HUMMEL (1988), S. 125ff. u. 133ff.; MIELKE (1988), S. 95; BERR (1988), S. 249. Seine Anwendung durch die Problemlösungskomponente wird oftmals als Metaplanung bezeichnet.

42) Vgl. DESCOTTE (1985), S. 206; REQUICHA (1988), S. 318 u. 322; HAAG (1988), S. 113 u. 118ff.

Es stellt ein ausgesprochen anspruchsvolles Planungsproblem dar, das Ziel, ein bestimmtes Produkt herzustellen, in eine halbgeordnete Arbeitsgangmenge zu transformieren. Bei der hierarchischen Dekomposition der ursprünglichen Produktionsaufgabe besteht auf jeder Planungsebene eine Vielfalt möglicher Verfeinerungsfortsetzungen. Um zwischen diesen Dekompositionsalternativen auszuwählen, kann auf verschiedene Konfliktlösungsstrategien zurückgegriffen werden⁴³⁾.

Diese Strategien beruhen im allgemeinen auf heuristischem Regeln, die sich erfahrene Arbeitsplaner in ihrer langjährigen Berufspraxis hinsichtlich der "zweckmäßigen" Zerlegung von Produktionsaufgaben angeeignet haben⁴⁴⁾. Dieses heuristische Erfahrungswissen kann aber auch durch betriebswirtschaftliche Kostenargumente überlagert werden. So wird bereits mit CAP-Expertensystemen experimentiert, die es erlauben, den Prozeß der hierarchischen Planverfeinerung durch Schätzungen derjenigen Kosten zu lenken, die von den alternativen Verfeinerungsrichtungen zu erwarten sind⁴⁵⁾.

Allgemein lassen sich die KI-Techniken für die systematische Dekomposition von Produktionsaufgaben durch betriebswirtschaftliches Wissen über "praktisch bewährte" oder "theoretisch vorteilhafte" Methoden der Arbeitsplanung ergänzen. Hierbei kann auf konzeptionelle Entwürfe von Methodenbanksystemen für die Arbeitsplanung⁴⁶⁾ zurückgegriffen werden. Dieses Methodenwissen, das - in Anlehnung an konventionelle Informationsverarbeitungsschemata - noch in prozeduraler Weise strukturiert ist, muß allerdings in die KI-spezifischen Wissensrepräsentationsformen transformiert werden⁴⁷⁾. Auch hierin liegt derzeit noch ein Engpaß bei der Wissensakquisition für praxistaugliche CAP-Expertensysteme. Zu den einfachsten, derzeit vorherrschenden Varianten der Wissenstransformation zählt die Zerlegung von konventionellen Arbeitsplanungsmethoden in eine Sammlung von Planungsre-

43) Näheres zur Bedeutung dieser Konfliktlösungsstrategien für CAP-Expertensysteme findet sich bei HUMMEL (1988), S. 128; REQUICHA (1988), S. 318.

44) Vgl. KEMPF (1988), S. 158f.

45) Vgl. KEMPF (1988), S. 157f.

46) Vgl. EVERSHEIM (1988), S. 50ff.

47) Mit den speziellen Repräsentationskonzepten für Arbeitsplanungswissen setzt sich detailliert WANG (1988), S. 1000ff., auseinander.

geln⁴⁸⁾. Diese können - wie die oben angeführten heuristischen Erfahrungsregeln - zur Lenkung der hierarchischen Dekomposition von Produktionsaufgaben in die Wissensbasen von CAP-Expertensystemen eingebunden werden.

Die regelgestützte Aufgabendekomposition läßt sich durch die Strategie der Restriktionspropagierung (constraint propagation)⁴⁹⁾ unterstützen⁵⁰⁾. Hierbei werden aus der Beschreibung der Produktionsaufgabe Restriktionen gewonnen und - z.B. von erfahrenen Arbeitsplanern - nach ihrer Wichtigkeit geordnet. Als solche Restriktionen kommen vor allem die technischen Reihenfolgebeziehungen zwischen auszuführenden Aktionen in Betracht. Die Restriktionen werden entsprechend ihrer Bedeutung sukzessive in den Prozeß der Plangenerierung einbezogen. Es werden nur solche Dekompositionsschritte ausgeführt, welche alle alten und die jeweils neu hinzugefügten Restriktionen einhalten. Ein zulässiger Arbeitsplan resultiert, wenn schließlich alle aufgabenspezifischen Restriktionen erfüllt werden⁵¹⁾.

Die Suche nach einem zulässigen Arbeitsplan wird im allgemeinen dadurch erschwert, daß während der Dekomposition einer Produktionsaufgabe nicht bekannt ist, ob die Verfeinerungsalternativen schließlich zu zulässigen Arbeitsplänen führen. Welche Fortsetzungen des Dekompositionsprozesses in diesem Sinne erfolgreich sind, ist auf der jeweils aktuellen Planungsebene zumeist nicht ersichtlich. Daher können bei der Dekomposition der ursprünglichen Produktionsaufgabe "Sackgassen" im abstrakten Suchraum zulässiger Planverfeinerungen eingeschlagen werden. Ein Expertensystem muß diese Sackgassen erkennen, sie merken, um sich in ihnen nicht erneut zu verfangen, und verlassen. Nachdem es zu einer früheren, weniger detaillierten Planungsebene zurückgekehrt ist, sind alternative Verfeinerungsfortsetzungen zu untersuchen

48) Vgl. zur Dominanz der regelbasierten Wissensrepräsentation bei derzeit verfügbaren CAP-Expertensystemen REQUICHA (1988), S. 317 u. 322.

49) Vgl. allgemein zur KI-Technik der Restriktionspropagierung RIT (1986), S. 383ff.; DAVIES, E. (1987), S. 281ff.; HERTZBERG (1989), S. 167ff.; VOB (1989), S. 218ff.; THUY (1989), S. 118ff.

50) Vgl. DESCOTTE (1985), S. 199; REQUICHA (1988), S. 318.

51) Dabei kann der Dekompositionsprozeß an einen Punkt gelangen, an dem mindestens eine Restriktion verletzt wird. Dann wird wieder auf die bereits o.a. backtracking-Strategie zurückgegriffen, um alternative Dekompositionsschritte zu versuchen.

(backtracking-Strategie⁵²). Falls alle backtracking-Versuche erfolglos in Sackgassen enden, stellt das Expertensystem die Unmöglichkeit fest, einen zulässigen Arbeitsplan zu erzeugen.

Das Konzept der backtracking-Strategie liegt auch Operations Research-Programmen in der Gestalt von branch and bound-Algorithmen zugrunde. Es wurden jedoch in jüngerer Zeit seitens der KI-Forschung alternative Strategien für die Suche in abstrakten Lösungsräumen entwickelt, zu denen keine Parallele im Bereich konventioneller Algorithmen existiert. Es handelt sich hierbei vor allem um die hierarchische Plan- generierung auf der Grundlage des "assumption-based truth maintenance"-Konzepts⁵³). Eine nähere Darstellung dieser originären KI-Strategien ist zwar an dieser Stelle nicht möglich, weil sie detaillierte Einblicke in die Erforschung der Künstlichen Intelligenz erforderte. Doch ist immerhin bemerkenswert, daß sie bereits in Entwürfe fortschrittlicher CAP-Expertensysteme eingeflossen ist⁵⁴).

Eine spezielle Planungsstrategie aus dem Bereich der KI-Forschung stellt auch das verteilte (distributed) Problemlösen dar. Es findet in jüngster Zeit für die Generierung von Arbeitsplänen zunehmend Beachtung⁵⁵). Konzeptionelle Grundlage ist die blackboard-Architektur für Expertensysteme⁵⁶). Hierbei operieren mehrere teilautonome Problemlösungskomponenten als Agenten auf einer gemeinsamen Informationsbasis, dem "blackboard". Die Operationen der Agenten werden über diese Informationsbasis lose gekoppelt, während der Inhalt

52) Vgl. SACERDOTI (1980), S. 8f. u. 10; ARLABOSSE (1987), S. 385f.; CUNIS (1987b), S. 22; KEMPF (1988), S. 159; REQUICHA (1988), S. 318; vgl. auch zur backtracking-Strategie im allgemeinen, also ohne Bezug auf die Synthese von Arbeitsplänen, ZELEWSKI (1986a), S. 257, und die dort angegebenen Quellen.

53) Vgl. DE KLEER (1986a), S. 127ff.; DE KLEER (1986b), S. 197ff.; HAAG (1988), S. 114ff.; DRESSLER (1988), S. 67ff.; DRESSLER (1989), S. 13ff.

54) Vgl. HAAG (1988), S. 121ff. u. 130; MALETZ (1988), S. 447ff.

55) Vgl. CUNIS (1987a), S. 417f.; CUNIS (1987b), S. 22ff. Vgl. auch zu einer ersten Rezeption des Konzepts verteilten Problemlösens in einem betriebswirtschaftlich ausgerichteten Beitrag aus dem umfassenderen Bereich der Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme MERTENS (1988), S. 24ff.; MERTENS (1989), S. 6ff. Vgl. ebenso die Ausführungen bei KAMEL (1988), S. 367ff., insbesondere S. 375ff., die sich auf das verteilte Problemlösen bei einfachen Handhabungsoperationen erstrecken.

56) Vgl. zu diesem Architekturkonzept für Expertensysteme ERMAN (1975), S. 483ff.; HAYES-ROTH (1979a), S. 285ff.; HAYES-ROTH (1979b), S. 376ff.; HAYES-ROTH (1985), S. 260ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 214 u. 328ff., und die dort angegebene Literatur.

dieser Informationsbasis durch die Agentenoperationen dynamisch verändert wird. Zum Zweck der Arbeitsplansynthese wird in diesen Agenten Metawissen über unterschiedliche Verfahrensweisen der Planverfeinerung vorgehalten. Auf einer Planungsebene stehen mehrere Agenten zueinander in Konflikt, wenn sie angewendet werden könnten, aber zu verschiedenen Verfeinerungsfortsetzungen führen würden. Diese konfliktionär aktivierten Agenten bilden eine Agenda der zur Auswahl stehenden nächstmöglichen Verfeinerungsschritte.

Der Konflikt, aus der Agenda einen bestimmten Agenten für die Fortsetzung der Plansynthese auszuwählen, wird durch eine übergeordnete Kontrollkomponente gelöst⁵⁷⁾. Häufig erfolgt die Konfliktlösung in opportunistischer Weise⁵⁸⁾. Es wird demjenigen Agenten die Planverfeinerung gestattet, dessen Operation aufgrund von heuristischen Auswahlregeln am erfolgversprechendsten erscheint⁵⁹⁾. Zusätzlich können "weiche" Restriktionen spezifiziert werden. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß sie bei der Planverfeinerung nach Möglichkeit erfüllt werden sollen, aber aufgehoben werden können, falls kein zulässiger Arbeitsplan gefunden wird⁶⁰⁾.

57) Näheres hierzu bei HAYES-ROTH (1985), S. 268ff.; CUNIS (1987b), S. 24f. u. 27.

Die Kontrollkomponente kann z.B. durch Agenten 2. Ordnung realisiert werden, die als "Auswahlspezialisten" die Entscheidung zwischen den konfliktionär aktivierten vorgeannten Agenten (1. Ordnung) determinieren.

Das Kontrollwissen der Kontrollkomponente besitzt die Qualität von Meta-Metawissen, da es auf das Metawissen angewendet wird, das in den Agenten 1. Ordnung vorgehalten wird. Dies verdeutlicht, daß das Komponentenschema der eingangs vorgestellten Arbeitsdefinition für Expertensysteme nicht alle Erscheinungsformen von Expertensystemen abzudecken vermag. Im Falle einer blackboard-Architektur ist vielmehr "die" Problemlösungskomponente in lose gekoppelte Teilkomponenten (Agenten) aufgelöst und um eine Metakomponente zur Kontrolle der verteilten Operationen dieser Teilkomponenten erweitert.

58) Vgl. HAYES-ROTH (1979a), S. 276f. u. 284ff.; HAYES-ROTH (1979b), S. 375ff.; HENNINGS (1985), S. 113ff.; CUNIS (1987a), S. 414; CUNIS (1987b), S. 25 u. 29; MATHIS (1988), S. 82.

Die Generierung eines Arbeitsplans auf der Basis von blackboard-Architekturen und opportunistischen Kontrollstrategien stimmt nicht mehr genau mit der o.a. schrittweisen Planverfeinerung überein, sondern kompliziert den Prozeß der Plansynthese. Näheres hierzu bei HAYES-ROTH (1979a), S. 303ff.; ansatzweise auch bei WANG (1988), S. 1012.

59) Da sich diese Auswahlregeln in lokaler Weise nur auf den aktuellen Ausführungszustand der Plansynthese beziehen, können sie nicht die globale Gewähr bieten, daß die Operation des ausgewählten Agenten tatsächlich zu einem zulässigen Arbeitsplan führt. Daher kann es weiterhin erforderlich sein, im nachhinein - bei erfolgloser Agentenoperation - wieder auf die o.a. backtracking-Strategie zurückzugreifen; vgl. HAYES-ROTH (1979a), S. 276; CUNIS (1987b), S. 23f. u. 26.

60) Vgl. WILKINS (1984), S. 278ff.; DESCOTTE (1985), S. 183f. u. 197ff.; MATHIS (1988), S. 83; HAAG (1988), S. 123 (allerdings im Kontext von automated truth maintenance-Systemen).

Die automatische Generierung von Arbeitsplänen durch hierarchische Aufgabendekomposition eignet sich vor allem für die Neuplanung solcher Produkte, die in gleicher oder ähnlicher Weise zuvor noch nicht gefertigt wurden. Stattdessen ließe sich aber auch auf den Ansatz der Teilefamilienbildung (Gruppentechnologie) zurückgreifen, um CAP-Expertensysteme im Bereich der Ähnlichkeitsplanung einzusetzen⁶¹⁾. Hierbei wird für Teile mit fertigungstechnisch verwandten Arbeitsgangkombinationen jeweils ein Wissensmodul mit den entsprechenden Aktionsbeschreibungen vorgehalten. Es erstreckt sich z.B. auf Informationen über die erforderlichen Arbeitsgänge sowie Materialqualitäten, über die vorhandenen Bearbeitungsmaschinen und über die geometrischen Teilegestalten (für die Bahnsteuerung von Bearbeitungswerkzeugen). Ein solches Wissensmodul läßt sich als ein abstrakter Plan - ein "Skript" oder "Planskelett"⁶²⁾ - auffassen, der für alle Mitglieder einer Teilefamilie gilt⁶³⁾.

Wenn ein Produktionsauftrag eintrifft, versucht ein solches Expertensystem zunächst, diesen so in Bearbeitungen einzelner Teile (Werkstücke) zu zerlegen, daß sich die Teile zu den Teilefamilien aus seiner Wissensbasis zuordnen lassen⁶⁴⁾. Die Suche nach geeigneten Teilefamilien erfolgt nicht - wie bei der konventionellen Informationsverarbeitung - auf der Basis von identifizierenden Teilefamilienschlüsseln, die ein Benutzer eingeben müßte. Stattdessen besitzt das Expertensystem eine analoge (ähnlichkeitsbezogene) oder assoziative (inhaltsadressierte) Inferenzfähigkeit⁶⁵⁾. Beide beruhen auf der KI-Technik der Mustererkennung (pattern matching), mit deren Hilfe ähnliche Informationsmuster einander zugeordnet werden. Durch analoge oder assoziative In-

61) Vgl. MILACIC (1988), S. 39ff., insbesondere S. 43ff.

62) Vgl. zum KI-spezifischen Planungskonzept, aus abstrakten Planskeletten konkrete Pläne zur Lösung von Aufgaben abzuleiten, FRIEDLAND (1985), S. 161ff.; HORZ (1988), S. 169ff.; IUDICA (1989a), S. 7f. u. 11.

63) Vgl. MALETZ (1988), S. 436ff. u. 452ff.; MATHIS (1988), S. 83; KEMPF (1988), S. 155.

64) Falls ein Produktionsauftrag vorliegt, der sich in keine der bisher gebildeten Teilefamilien einordnen läßt, müßte von einem "Wissensingenieur" eine neue Teilefamilie mit allen zugehörigen Informationen über Arbeitsgänge, Betriebsmittel usw. spezifiziert werden. Zur Unterstützung solcher Fälle, zu deren Bearbeitung die Wissensbasis des Expertensystems nicht ausreicht, müßten Schnittstellen für Interaktionen mit einem Benutzer aus der Arbeitsvorbereitung (Dialogschnittstelle) oder für Zugriffe auf CAD-Systeme aus der Produktkonstruktion vorgesehen werden.

65) Vgl. zu assoziativen Inferenzfähigkeiten von Expertensystemen ZELEWSKI (1986a), S. 175, 217f. u. 703f.

ferenzen vermag das Expertensystem aus der Beschreibung des Produktionsauftrags selbständig zu erschließen, welche Teilefamilien hinreichend ähnlich sind, um sie zur Herstellung der Teile des Auftrags heranzuziehen. Die verbleibenden Diskrepanzen zwischen den assoziierten Teilefamilien und den tatsächlich zu fertigenden Teilen schließt das Expertensystem, indem es die verfahrenstechnischen Informationen in den teilefamilienbezogenen Wissensmodulen - z.B. durch Variation der Bearbeitungsparameter - an den Produktionsauftrag anpaßt⁶⁶).

Schließlich läßt sich der generierte konkrete Arbeitsplan für den Produktionsauftrag als neu erschlossenes Wissen in die Wissensbasis des CAP-Expertensystems aufnehmen⁶⁷). Bei einer späteren Wiederholung des gleichen Produktionsauftrags braucht dann die Synthese des Arbeitsplans nicht mehr erneut angestoßen zu werden. Ein derart "autoepistemisches" CAP-Expertensystem weist die bemerkenswerte Fähigkeit auf, aus seinen eigenen Problemlösungsprozessen dauerhaft lernen und hierdurch sein Leistungsvermögen durch praktischen Einsatz inkrementell steigern zu können.

Bisher wurde unterstellt, daß die Wissensbasis eines CAP-Expertensystems für jede elementare Produktionsaufgabe genau einen Arbeitsgang zur Aufgabenerfüllung enthält. Dies muß jedoch keineswegs der Fall sein. Vielmehr können für dieselbe Produktions(teil)aufgabe mehrere technische Verfahrenskonzepte alternativ zur Verfügung stehen. So lassen sich z.B. für die dauerhafte Verbindung von Blechteilen Bördel-, Niet-, Schraub- oder Schweißverfahren einsetzen. Ein teilefamilienspezifisches Wissensmodul kann eine Liste von alternativen Arbeitsgängen vorhalten, die auf jeweils anderen technischen Verfahren beruhen. Jede Alternative wird durch ein eigenes Submodul abgebildet, das wieder Informationen über die Ressourcen zur Arbeitsgangausführung enthält, insbesondere über die erforderlichen quantitativen und qualitativen Betriebsmittelkapazitäten. Hierdurch wird zum dem o.a. Freiheitsgrad nonlinearer, halbgeordneter Arbeitspläne ein zweiter bemerkenswerter Freiheitsgrad von CAP-Expertensystemen hinzugefügt. Sie können nicht nur alternative zeitliche

66) Vgl. z.B. KEMPF (1988), S. 156f.

67) Vgl. KEMPF (1988), S. 157.

Arbeitsganganordnungen in ihre Arbeitsplangenerierungen einbeziehen, sondern auch alternative technische Verfahrensoptionen.

Diese breite verfahrenstechnische Wissensbasis ließe es beispielsweise zu, Arbeitspläne in Abhängigkeit von der aktuellen Betriebsmittelauslastung zu erzeugen. Ebenso wäre es möglich, diejenigen Verfahrenstechniken auszuwählen, die den Qualitäts- und Kostenvorgaben für den Produktionsauftrag am besten entsprechen. Als Ergebnis resultierte schließlich der auftragsspezifische Arbeitsplan mit den arbeitgangbezogenen Ressourcenanforderungen. Hierbei handelt es sich allerdings um konzeptionelle Ausblicke auf das Potential künftiger Fortentwicklungen von CAP-Expertensystemen. Die bisher vorgelegten Prototypen verfügen - wie schon eingangs dargelegt wurde - noch kaum über die Fähigkeit, zwischen alternativen technischen Produktionsverfahren zu wählen.

Bereits in der konkreten Entwicklung befinden sich dagegen CAP-Expertensysteme, die das Detaillierungsniveau ihres Outputs an die Informationsbedürfnisse charakteristischer Benutzerklassen anzupassen vermögen. Solche Expertensysteme halten in ihren Dialogkomponenten Benutzermodelle vor, die als Informationsfilter wirken: Die Arbeitspläne werden systemintern maximal detailliert generiert, um die korrekte Erfüllung der vorgegebenen Produktionsaufgaben jeweils sicherstellen zu können. Bei der Arbeitsplanausgabe werden aber solche Informationen unterdrückt, die von den angesprochenen Systembenutzern aufgrund der zugehörigen Benutzermodelle als trivial oder irrelevant eingestuft würden. Beispielsweise hat KEMPF ein Entwicklungsprojekt präsentiert, bei dem ein CAP-Expertensystem unterschiedlich detaillierte Arbeitspläne für drei Benutzergruppen erzeugen soll⁶⁸). Es erstellt detailreiche Arbeitspläne für Benutzer aus dem operativen PPS-Bereich (Arbeitsverteilung und Feinterminierung). Dagegen werden für Benutzer aus dem taktischen PPS-Bereich (Grobterminierung und Kapazitätsplanung) oder aus dem CAD-Bereich reduzierte Arbeitspläne ausgegeben, die auf relevante Durchlaufzeit- und Kapazitätsbedarfe bzw. konstruktionsabhängige Fertigungskosten eingeschränkt sind.

68) Vgl. KEMPF (1988), S. 155.

Auf diese Weise soll eine "intelligente" Reduzierung des systemseitigen Informationsangebots auf den benutzerseitigen Informationsbedarf erfolgen. Dies entspricht dem Anspruch der KI-Forschung, "konviviale" oder "kooperative" Expertensysteme zu entwickeln. Bei ihnen soll sich der Mensch nicht mehr an die technischen Eigenschaften des Automaten anpassen müssen. Stattdessen wird angestrebt, an der Benutzeroberfläche das Automatenverhalten zunehmend an den kognitiven Bedürfnissen des Menschen auszurichten. Aus dieser Perspektive tragen die Benutzermodelle von CAP-Expertensystemen dazu bei, das informationstechnische Konzept der Softwareergonomie zu einem Konzept "kognitiver Ergonomie" zu verfeinern.

3 Beispiele für CAP-Expertensysteme

3.1 Explorative Vorstudien

Durch die Expertensysteme ABSTRIPS⁶⁹⁾, NOAH⁷⁰⁾, NONLIN⁷¹⁾, O-Plan⁷²⁾ und SIPE⁷³⁾ wird das Konzept der automatischen Synthese von nonlinearen, hierarchisch verfeinerten Aktionsplänen implementiert. Zur Zeit wird im Rahmen des Verbundprojekts TEX-K⁷⁴⁾ das PLAKON-Konzept⁷⁵⁾ entwickelt. Auf seiner Grundlage sollen künftig entsprechende Expertensysteme implementiert werden, die - neben anderen Fähigkeiten - auch die Generierung solcher Aktionspläne beherrschen.

Die vorgenannten implementierten bzw. konzipierten Expertensysteme sind nicht auf den Anwendungsbereich der Arbeitsplanung zugeschnitten. Sie dienen vielmehr dazu, das Leistungspotential von Expertensystemen für allgemeine Planungsaufgaben auf der Basis prozeduraler Netze zu erforschen. Drei einfache Beispiele, die zur Demonstration der Planungskompetenz dieser Expertensysteme untersucht wurden, lassen sich jedoch in die betriebliche Arbeitsplanung einordnen:

-
- 69) ABSTRIPS steht für "Abstraction-Based STRIPS", wobei STRIPS (für "Stanford Research Institute Problem Solver") ein Vorgänger des Automaten ABSTRIPS war; vgl. zu dem letztgenannten SACERDOTI (1974), S. 116ff.; SACERDOTI (1977), S. 27; BARR (1981), S. 135ff.; ZELEWSKI (1986a), S. 303, mit weiteren Quellenangaben.
- 70) NOAH steht für "Nets of Action Hierarchies"; vgl. hierzu SACERDOTI (1975), S. 207ff.; SACERDOTI (1977), S. 1f., 7ff. u. 69ff.; CORKILL (1979), S. 168ff.; DANIEL (1984), S. 433ff., sowie - mit weiteren Literaturverweisen - ZELEWSKI (1986a), S. 260.
- 71) NONLIN steht für "NON-LINear Planner"; vgl. hierzu TATE (1976a); TATE (1976b); TATE (1977), S. 888ff.; DANIEL (1977); DANIEL (1984), S. 438ff.; TATE (1984), S. 410ff.
- 72) O-Plan steht für "Open Planning Architecture"; vgl. TATE (1987), S. 268ff. Es handelt sich um eine konzeptionelle Fortentwicklung der beiden vorgenannten Expertensysteme NOAH und NONLIN.
- 73) SIPE steht für "System for Interactive Planning and Execution Monitoring"; vgl. hierzu WILKINS (1984), S. 271ff.; WILKINS (1987), S. 663ff. Dieses Expertensystem kann in zwei Modi genutzt werden. Sowohl die vollautomatische Synthese von Arbeitsplänen als auch deren interaktive, halbautomatische Generierung sind möglich.
- 74) TEX steht für "Technische EXpertensysteme", der Zusatz "K" (vermutlich) für "Planungs- und Konfigurierungsaufgaben".
- 75) PLAKON steht (vermutlich) für "Konzept zur Wissensrepräsentation und Problemlösung bei PLANungs- und KONfigurierungsaufgaben"; vgl. hierzu CUNIS (1987a), S. 407ff.; CUNIS (1987b), S. 1ff., insbesondere S. 10ff. bezüglich des Planungsablaufs.

- Bei einer Anwendung des Systems NOAH wird ein Montageplan für einen Luftkompressor erzeugt⁷⁶⁾.
- Eine fortentwickelte Version des Exemplars NONLIN wurde eingesetzt, um den Arbeitsplan für die Überholung eines elektrischen Turbogenerators zu erstellen⁷⁷⁾.
- Das Konzept PLAKON wurde getestet, indem ein Arbeitsplan für die Vornahme von Bohrungen, Spanabhebungen und Lackierungen an einem Werkstück generiert wurde⁷⁸⁾.

Speziell auf den Einsatz von Expertensystemen für die Arbeitsplanung in der metallverarbeitenden Industrie ist dagegen das AMRF-Projekt⁷⁹⁾ des National Bureau of Standards in den USA zugeschnitten. In ihm wird das Konzept erforscht, Expertensysteme diejenigen Arbeitsgänge ableiten zu lassen, die auf den Betriebsmitteln einer Unternehmung ausgeführt werden können. Ausgangspunkt ist die Beschreibung eines Werkstücks durch den Expertensystem-Benutzer, das im Rahmen eines Produktionsauftrags hergestellt werden soll. Die Werkstückbeschreibung erfolgt oberflächenorientiert. Für jede Werkstückoberfläche prüft das Expertensystem, ob es über verfahrenstechnisches Wissen verfügt, wie diese Werkstückoberfläche erzeugt werden kann.

Zu diesem Zweck verfügt es in seiner Wissensbasis über eine reichhaltige Sammlung von Modulen (frames), die jeweils einen Arbeitsgang beschreiben. Die Arbeitsgangmodule geben den Typ der Oberflächenstruktur an, der - wie z.B. eine Bohrung - durch die Ausführung des Arbeitsgangs erzielt wird. Zusätzlich enthalten sie produktionstechnische Restriktionen, die bei der Arbeitsgangausführung eingehalten werden müssen. Hierbei kann es sich beispielsweise um maximale Bohrungsdurchmesser und Fertigungstoleranzen handeln. Schließlich umfassen die Module Informationen über die Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit die Arbeitsgänge ausgeführt werden können.

76) Vgl. SACERDOTI (1977), S. 76ff.

77) Vgl. DANIEL (1984), S. 446ff.

78) Vgl. CUNIS (1987b), S. 14ff.

79) AMRF steht für "Automated Manufacturing Research Facility"; vgl. hierzu NAU (1983), S. 254 u. 256ff., insbesondere S. 258ff.; MILLER (1984), S. 83; BROWN (1986), S. 245ff.; SWYT (1988), S. 357ff.

In der Regel werden diese produktionstechnischen Bedingungen noch nicht realisiert sein. Dann untersucht das Expertensystem selbständig, ob es in seiner Wissensbasis andere Module besitzt, die solche Arbeitsgänge repräsentieren, welche die Anwendungsbedingungen der zuvor betrachteten Module herbeiführen würden. In retrograder Weise durchsucht das Expertensystem seine Wissensbasis nach einer Arbeitsgangmenge, welche die gewünschte Oberflächenstruktur zu realisieren vermag. Hierin liegt das wesentliche Inferenzpotential des Expertensystems: Durch Rückwärtsverkettung von produktionstechnischen Bedingungen und bedingungserfüllenden Arbeitsgängen wird versucht, einen zulässigen Arbeitsplan automatisch zu synthetisieren.

Des Weiteren ist eine Benutzerschnittstelle vorgesehen. Über sie kann ein Benutzer die fehlenden Arbeitsgänge interaktiv spezifizieren, falls sich die gesuchte Arbeitsgangmenge nicht vollständig ableiten läßt. Durch Abarbeiten aller Werkstückoberflächen resultiert schließlich der Arbeitsplan für den vorliegenden Produktionsauftrag.

3.2 Erste Prototypen für den industriellen Einsatz

Expertensysteme für die automatische Generierung von Arbeitsplänen sind seitens der KI-Forschung in zahlreichen Exemplaren hervorgebracht worden⁸⁰⁾. Allerdings handelt es sich dabei noch nicht um praxisreife Exemplare. Die immer wieder auftauchende Ansicht, Expertensysteme würden bereits im betrieblichen Routineeinsatz erfolgreich genutzt⁸¹⁾, erscheinen dem Verfasser - zumindest im hier untersuchten Gebiet der Arbeitsplanung - äußerst fragwürdig. Solche Erfolgsmeldungen entspringen wohl eher dem Wunsch- oder Rechtfertigungsgedenken der Systementwickler und -auftraggeber. Insbesondere REQUICHA und VANDENBRANDE haben die gegenwärtigen Einschränkungen und Mängel von CAP-Expertensystemen dargelegt⁸²⁾.

Die nachfolgend vorgestellten CAP-Expertensysteme besitzen vielmehr den Charakter von Prototypen. Mit ihnen soll die grundsätzliche Realisierungsmöglichkeit der zuvor skizzierten Konzepte aus dem Bereich der KI-Forschung nachgewiesen werden⁸³⁾. Zugleich dienen sie dazu, im experimentellen Systembetrieb Erkenntnisse über notwendige oder besonders erfolgversprechende Fortentwicklungsrichtungen zu sammeln.

Eine wesentliche Einschränkung der nachfolgend angeführten CAP-Expertensysteme besteht beispielsweise darin, daß sie bei der Synthese nonlinearer Arbeitspläne die Arbeitsgangmenge, die zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe erforderlich ist, noch nicht (voll-)automatisch identifizieren können⁸⁴⁾. Vielmehr setzen alle CAP-Expertensystemen im Hin-

80) Vgl. zu weiteren, nachfolgend nicht aufgeführten Exemplaren LECLAIR (1985), S. 246ff.; RAUCH-HINDIN (1985), S. 5ff.; LINDSAY (1985), S. 127ff.; DARBYSHIRE (1985), S. 130ff.; JARDINE (1986), S. 262ff.; TIERNEY (1986), S. 171ff.; YOUNG (1987), S. 51ff.; HANSEN (1987), S. 692f.; BERR (1988), S. 248ff.; JOSHI (1988), S. 873ff.; KÖHLER (1988), S. 251ff.; KEMPF (1988), S. 148ff.; REQUICHA (1988), S. 319ff.; MALETZ (1988), S. 452ff.; ROTH (1988), S. 256ff.; IWATA (1988), S. 10ff.; DAVIES, B. (1988), S. 32ff.; MILACIC (1988), S. 40ff.; TIERNEY (1988), S. 114ff.; KNOP (1988), S. 44f.; MÖRLER (1988), S. 32f. u. 35; MERTENS (1988), S. 16f.; o.V. (1988), S. 33; sowie die bereits o.a. Applikationen der Expertensystem(konzept)e NOAH, NONLIN und PLAKON auf Arbeitsplanungsaufgaben.

81) Vgl. z.B. KÖHLER (1988), S. 251; MÖRLER (1988), S. 33.

82) Vgl. REQUICHA (1988), S. 318ff., vor allem S. 322; vgl. des weiteren DESCOTTE (1985), S. 206f.; DAVIES, B. (1988), S. 35; BULLINGER (1988), S. 53.

83) Vgl. z.B. DESCOTTE (1985), S. 207; GOLDBOGEN (1988), S. 302.

84) Vgl. GOLDBOGEN (1988), S. 286.

blick auf neuartige Produktionsaufgaben⁸⁵⁾ voraus, daß ihre Benutzer die erforderlichen Arbeitsgänge in einem Dialog mit den Automaten interaktiv spezifizieren. Bei Produktionsaufgaben, die lediglich Varianten bereits bekannter Produktionen darstellen, können die Expertensysteme dagegen zumeist auf die Arbeitsgangmengen zurückgreifen, die bereits früher interaktiv gebildet wurden. In diesem Fall sind automatische Synthesen von modifizierten Arbeitsplänen möglich.

Das Expertensystem GUMMEX⁸⁶⁾ wurde vom Battelle-Institut e.V./Frankfurt zur Generierung von Arbeitsplänen für die Herstellung von Elastomeren - wie z.B. Gummimembranen oder Dichtungsringen - entwickelt. Es besteht eine Schnittstelle zu einem konventionellen CAD-System (COMVAR). Daher kann die Akquisition von planungsrelevantem Wissen durch unmittelbare Übernahme von produktbeschreibenden Konstruktionsinformationen aus dem CAD-System vereinfacht werden. Bei der Erstellung eines Arbeitsablaufplans für eine neuartige Produktionsaufgabe steuert das Expertensystem einen Dialog mit dem Benutzer, in dem die erforderlichen Arbeitsgänge spezifiziert werden.

Auf dem gleichen interaktiven Konzept wie das Exemplar GUMMEX beruht das Expertensystem APLEX⁸⁷⁾. Es wird zur Arbeitsplanung für die fräsende und bohrende Bearbeitung von Werkstücken in Flexiblen Bearbeitungszentren eingesetzt. Seine Planungsstrategie basiert auf dem fortschrittlichen "assumption-based truth maintenance"-Konzept, das an früherer Stelle als KI-spezifische Alternative zum weit verbreiteten backtracking-Konzept angeführt wurde.

Das Expertensystem CEMAS⁸⁸⁾ greift ebenfalls auf die dialogische Plansynthese zurück. Es enthält in seiner Wissensbasis das Modell einer Flexiblen Fertigungszelle mit ihren

85) Bei Produktionsaufgaben, die lediglich Varianten bereits bekannter Produktionen darstellen, können die Expertensysteme dagegen zumeist auf die Arbeitsgangmengen zurückgreifen, die früher für die letztgenannten interaktiv spezifiziert wurden. In diesem Fall sind automatische Synthesen von modifizierten Arbeitsplänen möglich.

86) GUMMEX steht für "GUMMi-EXperte"; vgl. hierzu IUDICA (1985), S. 22ff.; MARCHAND (1985), S. 135ff., allerdings ohne explizite Nennung des Expertensystems GUMMEX; TRUM (1986), S. 69ff.; MÖRLER (1986), S. 6X-7ff.; STEINMANN (1987b), S. 167ff.

87) APLEX steht (vermutlich) für "ArbeitsPLANungs-EXpertensystem"; vgl. hierzu TRUM (1985), S. 1ff., allerdings ohne explizite Nennung des Expertensystems APLEX; MÖRLER (1986), S. 6X-7ff.; TRUM (1986), S. 69ff.; HAAG (1988), S. 113f. u. 120ff.

88) CEMAS steht für "CELL Manufacturing System"; vgl. hierzu GLIVIAK (1984), S. 154f.

Bearbeitungsmaschinen, Lagerplätzen und Transportvorrichtungen. Hinzu kommen Informationen über die Arbeitsgänge, die in der Fertigungszelle ausgeführt werden können. Für einen gegebenen Produktionsauftrag erzeugt das Expertensystem in der Regel mehrere Arbeitspläne. Da das Fachwissen von Mitarbeitern aus der Arbeitsvorbereitung nicht vollständig in die Wissensbasis von CEMAS eingebracht werden konnte, obliegt es den Systembenutzern, aus den alternativen Plänen einen auszuwählen, der sich tatsächlich ausführen läßt. Das Expertensystem unterstützt diese Interaktion dadurch, daß es seine Benutzer auf kritische Aspekte der jeweils evaluierten Planungsalternativen hinzuweisen vermag. An diesem Expertensystemexemplar zeigt sich besonders deutlich, daß die Dialogfähigkeit keineswegs eine rühmenswerte Systemfunktion darstellen muß. Vielmehr dient sie hier lediglich dazu, Mängel bei der Wissensakquisition nachträglich zu kompensieren.

Als Nachfolger des o.a. Exemplars GUMMEX wurde am Battelle-Institut e.V./Frankfurt das Expertensystem MUMP⁸⁹⁾ entwickelt. Auch hier liegt das Schwergewicht darauf, aus einer vorliegenden CAD-Produktbeschreibung einen entsprechenden Arbeitsplan abzuleiten. Die hierbei erbrachten Syntheseleistungen sollen allerdings gegenüber dem Vorläufer GUMMEX weit fortgeschritten sein. So sind interaktive Benutzerleistungen angeblich nur noch dann erforderlich, wenn in der CAD-Beschreibung Informationen für die Arbeitsgangausführung fehlen, wie z.B. Fertigungstoleranzen für auszuführende Bohrungen. Darüber hinaus ist es möglich, automatisch alternative Arbeitspläne erzeugen zu lassen⁹⁰⁾. Dabei wird auf Wissen über die jeweils aktuelle Fertigungssituation und über die Eigenschaften vorhandener Betriebsmittel zurückgegriffen. Ebenso lassen sich bereits vordefinierte Teilpläne nutzen, um die Plansynthese zu beschleunigen.

89) MUMP steht für: "Multi-Method Planning Tool"; vgl. IUDICA (1989a), S. 1 u. 5ff.; IUDICA (1989b), S. B4. Strenggenommen handelt es sich bei MUMP nicht um das Expertensystem selbst, sondern um eine CAD-spezifische Expertensystem-Schale, mit deren Hilfe das o.a. Expertensystem entwickelt worden ist.

90) Das Expertensystem MUMP könnte derart fortentwickelt werden, daß die Fertigungskosten eines Produkts für unterschiedliche Arbeitspläne ermittelt werden. Anschließend wäre die kostengünstigste Alternative auszuwählen. Diese Kostenbestimmung könnte interaktiv durch die Hilfe des Systembenutzers oder auch durch systeminterne Regeln für die heuristische Kostenplanung erfolgen. Falls diese arbeitsplanbasierten Kosteninformationen an das vorgeschaltete CAD-System zurückgegeben würden, ließe sich hierdurch eine expertensystemgestützte, kostenorientierte Konstruktion mittels CAD/CAP-Kopplung verwirklichen.

Das Expertensystem HI-MAPP⁹¹⁾ stellt einen relativ weit fortgeschrittenen Systemtyp dar. Bei den voranstehend erläuterten Exemplaren dominiert der interaktive Systembetrieb, bei dem das automatische Abarbeiten von heuristischen Arbeitsplanungsregeln mit Benutzerleistungen zusammenwirken. Die Heuristiken sind aber noch nicht in das oben skizzierte Konzept der hierarchischen Aufgabendekomposition zur (voll)-automatischen Erzeugung von nonlinearen Arbeitsplänen integriert. HI-MAPP gehört dagegen zu den wenigen CAP-Expertensystemen, die dieses Dekompositionskonzept konkret anwenden.

Auch das CAP-Expertensystem XCUT⁹²⁾ beruht auf der hierarchisch verfeinernden Dekompositionsstrategie. Allerdings schöpft es das Strategiepotehtial nicht voll aus, sondern erzeugt nur konventionelle lineare Arbeitspläne. Dafür zeichnet es sich durch eine relativ fortschrittliche Verwendung von Metawissen für die Lenkung der Aufgabendekomposition aus. Hierbei wird insbesondere darauf geachtet, eine Produktionsaufgabe so in Teilaufgaben zu zerlegen, daß bei den Arbeitsgangausführungen die Anzahl der insgesamt erforderlichen Werkzeugwechsel möglichst gering ausfällt.

Das Expertensystem FERPLAN⁹³⁾ erzeugt Arbeitspläne für das Stanzen von Blechteilen. Es geht von qualitativen, nicht geometrisch formulierten Beschreibungen der herzustellenden Produkte, von Spezifizierungen der erforderlichen Rohmaterialien und von der auftragsspezifischen Produktanzahl aus. Die produktdefinierenden Daten, die in CAD-Systemen erzeugt werden, besitzen jedoch im allgemeinen numerisch-geometrischen Charakter. Daher können diese Produktbeschreibungen nicht - wie etwa beim o.a. Expertensystem GUMMEX - aus einem angekoppelten CAD-System unmittelbar übernommen werden. Stattdessen bedürfen die CAD-Daten einer zwischengeschalteten Transformation in qualitative Beschreibungsschemata, die auf hierarchisch strukturierten Zusammensetzungen von Produktkomponenten beruhen⁹⁴⁾. Diese Transformation erfolgt wieder im Rahmen eines Dialogs mit dem Systembenutzer.

91) Vgl. BERENJI (1986), S. 47ff.; KEMPF (1988), S. 148f.; REQUICHA (1988), S. 320.

92) Vgl. HUMMEL (1988), S. 120ff.; KEMPF (1988), S. 150.

93) FERPLAN steht (vermutlich) für "Expertensystem zur FERTigungsPLANung"; vgl. hierzu GRASMÜCK (1985), S. 1ff.; BULLINGER (1988), S. 49ff.

94) Diese hierarchische, komponentenorientierte Produktstruktur korrespondiert unmittelbar mit der hierarchischen Arbeitsplanverfeinerung.

Auf die Generierung von Arbeitsplänen für rotationssymmetrische Werkstücke, die auf Drehmaschinen gefertigt werden, ist das Expertensystem PROPLAN⁹⁵⁾ spezialisiert. Es wird in Princeton von der Siemens Corporate Research and Support, Inc. entwickelt. Es realisiert eine bemerkenswerte konzeptionelle Fortentwicklung gegenüber dem Exemplar FERPLAN. Denn seine CAD-Schnittstelle gestattet es, numerisch-geometrische Produktbeschreibungen aus einem CAD-System einzulesen und automatisch in symbolisch-qualitative Beschreibungen für die anschließende Arbeitsplansynthese zu transformieren.

Der Aspekt der Wissensbasierung von Expertensystemen für die Arbeitsplanung wird anhand des Exemplars GARI⁹⁶⁾ besonders deutlich. Es wurde für komplexe Bearbeitungsaufgaben in der metallbearbeitenden Industrie entwickelt und gehört zu den derzeit am detailliertesten dokumentierten CAP-Expertensystemen. Die Generierung von Arbeitsplänen greift auf zwei unterschiedliche Wissensquellen zurück. Einerseits werden auftragsbezogene Informationen über die geometrische Werkstückgestalt, die Oberflächeneigenschaften, die erforderlichen Arbeitsgänge und die zulässigen Produktionstoleranzen ausgewertet. Andererseits fließt in die Arbeitsplanung maschinenbezogenes Wissen über die technischen Eigenschaften des Betriebsmittelbestands ein. So werden Informationen über die vorhandenen Maschinentypen sowie ihre quantitativen und qualitativen (präzisionalen, dimensional, variationalen) Kapazitäten berücksichtigt. Technische Reihenfolgebeziehungen werden nach Maßgabe der Strategie sukzessiver Restriktionspropagierung erfaßt.

Für die automatische Generierung von Steuerungsprogrammen von NC-Werkzeugmaschinen auf der Grundlage von bereits vorliegenden Arbeitsplänen wurden mehrere Expertensysteme entwickelt. Oftmals ist es jedoch schwer, sie von konventionellen informationsverarbeitenden Systemen abzugrenzen. Beispielsweise läßt das "Expertensystem" ICEM PINC⁹⁷⁾ für die interaktive - also noch nicht einmal vollautomatische -

95) PROPLAN steht für "PROcess PLANning (Expert System)"; vgl. hierzu MOULEESWARAN (1985), S. 2ff.; PHILLIPS (1985), S. 10-4ff.; KRALLMANN (1986a), S. 410; BULLINGER (1988), S. 46ff.; KEMPF (1988), S. 151.

96) Vgl. DESCOTTE (1981a), S. 2ff.; DESCOTTE (1981b), S. 766ff.; DESCOTTE (1985), S. 198ff.; REQUICHA (1988), S. 317ff.; KEMPF (1988), S. 148f.;

97) Vgl. KOCH (1988), S. 95ff.

Generierung von NC-Teileprogrammen keine klaren Bezüge zur Erforschung der Künstlichen Intelligenz erkennen. Es ist nicht ersichtlich, durch welche Fähigkeiten, welche zugrundeliegenden Konzepte oder welche Strukturkomponenten es sich als ein Expertensystem ausweisen sollte.

Dagegen haben GOSCINSKI und SZUBA ein Konzept unterbreitet⁹⁸⁾, dessen automatische Programmsynthese für die Steuerung von NC-Maschinen auf Resultaten der KI-Forschung basiert. Die Steuerungsprogramme werden durch automatisches Beweisen von Theoremen im Rahmen des Resolutionskonzepts der KI-Sprache PROLOG abgeleitet⁹⁹⁾. Auch die Expertensysteme TOM¹⁰⁰⁾ und CHAMP¹⁰¹⁾ dienen der automatischen Generierung von Arbeitsplänen und deren direkter Umsetzung in NC-Teileprogramme.

Einen eng begrenzten Teilaspekt der Arbeitsplanung deckt das Expertensystem PP¹⁰²⁾ ab. Es unterstützt die Auswahl und "Optimierung" der Steuerungsparameter von NC-Maschinen, die zur Bearbeitung der Werkstücke eines Produktionsauftrags eingesetzt werden sollen. Seine Funktion ist an der Schnittstelle zwischen Expertensystemen für die Arbeitsplansynthese einerseits und Expertensystemen zur Generierung von NC-Steuerungsprogrammen andererseits angesiedelt.

98) Vgl. GOSCINSKI (1981), S. 191ff.; SZUBA (1984), S. 234ff.

99) Vgl. zum theorembeweisenden Ansatz für die intelligente, automatische Softwareproduktion ZELEWSKI (1986a), S. 580ff., und die dort angeführten Quellen.

100) TOM steht für "Technostructure Of Machining"; vgl. hierzu MATSUSHIMA (1982), S. 329ff., insbesondere S. 331f.; IWATA (1985), S. 139ff.; KEMPF (1988), S. 151.

101) CHAMP steht für "Computer Heuristic Aided Manufacturing and Planning"; vgl. BERR (1988), S. 248ff.; MIELKE (1988), S. 87ff.

102) PP steht für "Process Parameter System"; vgl. hierzu HSU (1985), S. 29ff.

Schließlich betreibt die Computer Aided Manufacturing-International, Inc. (CAM-I) zur Zeit das Projekt IMPACT¹⁰³). Ziel ist die Entwicklung von Expertensystemen, die sich an dreidimensionale CAD-Systeme koppeln lassen und in der Lage sind, aus den numerisch-geometrischen Produktbeschreibungen Arbeitspläne und Teileprogramme für die Steuerung von (C)NC-Maschinen vollautomatisch abzuleiten. Am CAM-I-Konsortium beteiligen sich zahlreiche bedeutsame US-amerikanische Industrieunternehmen¹⁰⁴) und staatliche Institute. Neuerdings wird im Rahmen der Expertensystemstudien dieses Konsortiums auch daran gearbeitet, das o.a. CAP-Expertensystem GARI weiterzuentwickeln¹⁰⁵).

103) IMPACT steht für "Intelligent Manufacturing PLanning and Control Technology"; vgl. hierzu LINEBACK (1984), S. 17f.; BECKER (1985), S. 219. Vgl. zum CAM-I-Konsortium - ohne Bezugnahme auf das IMPACT-Projekt - auch KEMPF (1988), S. 145 u. 148.

104) Es handelt sich um Boeing, General Dynamics, General Electric, General Motors, IBM, Martin Marietta und McDonnell Douglas.

105) Vgl. REQUICHA (1988), S. 316; KEMPF (1988), S. 148.

4 Literaturverzeichnis

- ARFMANN,G.: Anwendung von Expertensystemen in der Umformtechnik; in: o.V.: 1. Aachener Stahlkolloquium 1985, 03.-04.10.1985 in Aachen, o.O. 1985, S. 3.1-1 - 3.1-8.
- ARLABOSSE,F.; GAUSSENS,E.; BIGHAM,J.; WITTIG,T.: Knowledge Representation and Inference Techniques in Industrial Control - ESPRIT P387 KRITIC; in: Brauer,W.; Wahlster,W. (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme, 2. Internationaler GI-Kongreß, 20.-21.10.1987 in München, Informatik-Fachberichte 155, Berlin - Heidelberg - New York ... 1987, S. 380-387.
- ARNDT,W.: Artificial Intelligence: Methodologies in Process Planning; in: o.V.: CAMP'85 - Computer Graphics Anwendungen für Management und Produktivität, 24.-27.09.1985 in Berlin, Tagungsband, o.O. 1985, S. 292-299.
- BARR,A.; FEIGENBAUM,E.A. (HRSG.): The Handbook of Artificial Intelligence, Vol. I, Stanford - Los Altos 1981.
- BECKER,H.: Künstliche Intelligenz als Basis einer rechnerintegrierten Fertigung; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 127 (1985), S. 218-219.
- BERENJI,H.R.; KHOSHNEVIS,B.: Use of Artificial Intelligence in Automated Process Planning; in: ASME Computers in Mechanical Engineering, Vol. 5 (1986), No. 2, S. 47-55.
- BERR,U.; MIELKE,T.: Entwicklung eines Expertensystems zur automatischen Arbeitsplanerstellung; in: Werkstattstechnik, 78. Jg. (1988), S. 243-250.
- BROWN,P.F.; MCLEAN,C.: Interactive Process Planning in the AMRF; in: o.V.: Symposium on Knowledge-Based Expert Systems for Manufacturing, ASME Winter Annual Meeting, im Dezember 1986 in Anaheim, o.O. o.J. (1986), S. 245-262.
- BULLINGER,H.-J.; LAY,K.; WARSCHAT,J.: Wissensbasierte Systeme im Bereich CAD/CAP; in: Bullinger,H.-J.; Fähnrich, K.-P. (Hrsg.): Expertensysteme - Wissensbasierte Systeme in der betrieblichen Anwendung, Ehningen 1988, S. 36-53.
- CHAPMAN,D.: Nonlinear Planning: A Rigorous Reconstruction; in: o.V.: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-85, 19.-23.09.1985 in Los Angeles, Los Altos 1985, Vol. 2, S. 1022-1024.
- CORKILL,D.D.: Hierarchical Planning in a Distributed Environment; in: o.V.: IJCAI-79, Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 20.-23.08.1979 in Tokyo, o.O. (Stanford) 1979, Vol. 1, S. 168-175.
- CROFT,D.: Choice Making in Planning Systems, Technical Report No. 11, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, Edinburgh 1985.
- CUNIS,R.; GÜNTER,A.; SYSKA,I.: PLAKON - Ein übergreifendes Konzept zur Wissensrepräsentation und Problemlösung bei Planungs- und Konfigurierungsaufgaben; in: Balzert,H.; Heyer,G.; Lutze,R. (Hrsg.): Expertensysteme'87 - Konzepte und Werkzeuge, Fachtagung, 07.-08.04.1987 in Nürnberg, Stuttgart 1987, S. 406-420 (a).

- CUNIS,R.; GÜNTER,A.; SYSKA,I.: Planen mit PLAKON, Arbeitsbericht, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, Preprint eines Vortrags für den Workshop "Planen", 10.-11.03.1987 in Sankt Augustin, Hamburg o.J. (1987) (b).
- DANIEL,L.M.: Planning: Modifying Non-linear Plans, DAI Working Paper No. 24, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, Edinburgh 1977.
- DANIEL,L.(M.): Planning and Operations Research; in: O'Shea, T.; Eisenstadt,M. (Hrsg.): Artificial Intelligence - Tools, Techniques, and Applications, New York - Cambridge - Philadelphia ... 1984, S. 423-452.
- DARBYSHIRE,I.; DAVIES,B.J.: EXCAP - an Expert Systems' Approach to Recursive Process Planning; in: Peklenik,J.; Spur,G.; Merchant,E.M.; Weill,R. (Hrsg.): Proceedings of the CIRP Seminars (on) manufacturing systems, Vol. 14 (1985), S. 127-138.
- DAVIES,B.J.; DARBYSHIRE,I.L.; WRIGHT,A.J.; ZHANG,K.F.: IKBS Process Planning System for Rotational Parts; in: Milacic,V.R. (Hrsg.): Intelligent Manufacturing Systems II, Chapters based on papers presented at the Second International Summer Seminar on Intelligent Manufacturing Systems, 24.-29.08.1987 in Dubrovnik, Amsterdam - Oxford - New York ... 1988, S. 27-38.
- DAVIES,E.: Constraint Propagation with Interval Labels; in: Artificial Intelligence; vol. 32 (1987), S. 281-331.
- DE KLEER,J.: An Assumption-based TMS; in: Artificial Intelligence, Vol. 28 (1986), S. 127-162 (a).
- DE KLEER,J.: Problem Solving with the ATMS; in: Artificial Intelligence, Vol. 28 (1986), S. 197-224 (b).
- DEKLEVA,J.; MENART,D.; STRANCAR,D.: Diagnostics in Production Flow Analysis; in: Pressmar,D.; Jäger,K.E.; Krallmann,H.; Schellhaas,H.; Streitferdt,L. (Hrsg.): Operations Research Proceedings 1988 - DGOR, Vorträge der 17. Jahrestagung, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 9-10.
- DESCOTTE,Y.: GARI: Un system expert pour la conception de gammes d'usinages, ADEPA-Research Report No. 231, o.O. 1981 (a).
- DESCOTTE,Y.; LATOMBE,J.-C.: GARI: A Problem Solver That Plans How to Machine Mechanical Parts; in: Drinan,A. (Hrsg.): Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-81, 24.-28.08.1981 in Vancouver, o.O. (Menlo Park) 1981, Vol. 2, S. 766-772 (b).
- DESCOTTE,Y.; LATOMBE,J.-C.: Making Compromises among Antagonist Constraints in a Planner; in: Artificial Intelligence, Vol. 27 (1985), S. 183-217.
- DRESSLER,O.: Assumption-based Truth Maintenance; in: Stoyan, H. (Hrsg.): Begründungsverwaltung - Beiträge zu einem Workshop über Reason Maintenance, 09.10.1986 in Berlin, Proceedings, Informatik-Fachberichte 162, Berlin - Heidelberg - New York ... 1988, S. 63-85.
- DRESSLER,O.; FREITAG,H.: Truth Maintenance Systeme; in: KI - Künstliche Intelligenz: Forschung, Entwicklung, Erfahrungen, 3. Jg. (1989), Heft 2, S. 13-19.

- DRUMMOND, M.E.: Refining and Extending the Procedural Net; in: o.V.: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-85, 19.-23.09.1985 in Los Angeles, Los Altos 1985, Vol. 2, S. 1010-1012.
- ERMAN, L.D.; LESSER, V.R.: A Multi-Level Organization for Problem Solving Using Many, Diverse, Cooperating Sources of Knowledge; in: o.V.: Advance Papers of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-75), 03.-08.09.1975 in Tbilisi, o.O. (Cambridge/Massachusetts) 1975, Vol. 1, S. 483-490.
- EVERSHEIM, W.; COBANOGU, M.; DIELS, A.: Aufbau von Methodenbanken für die Arbeitsplanung; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 130 (1988), Nr. 10, S. 50-55.
- FRIEDLAND, P.E.; IWASAKI, Y.: The Concept and Implementation of Skeletal Plans; in: Journal of Automated Reasoning, Vol. 1 (1985), S. 161-208.
- GLIVIAK, F.; KUBIS, J.; MICOVSKY, A.; KARABINOSOVA, E.: A Manufacturing Cell Management System CEMAS; in: Plander, I. (Hrsg.): Artificial Intelligence and Information-Control Systems of Robots, Proceedings of the Third International Conference, 11.-15.06.1984 in Smolenice, Amsterdam 1984, S. 153-156.
- GOLDBOGEN, G.; HOERNES, P.: Expert System for Extracting Manufacturing Features from a CAD Database; in: Oliff, M.D. (Hrsg.): Expert Systems and Intelligent Manufacturing, Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 03.-05.05.1988 in Charleston, New York - Amsterdam - London 1988, S. 285-304.
- GOSCINSKI, A.; SZUBA, T.: Application of Theorem Proving Methods for Automatic Program Synthesis for N.C. Machine Tools; in: Angewandte Informatik, 23. Jg. (1981), S. 191-197.
- GRAHAM, N.: Künstliche Intelligenz, Sprendlingen 1983.
- GRASMÜCK, R.; GULDNER, A.: Wissensbasierte Fertigungsplanung in Stanzereien mit FERPLAN: Ein Systemüberblick, Memo Nr. 2, KI-Labor am Lehrstuhl für Informatik IV, Universität Saarbrücken, Saarbrücken 1985.
- HAAG, A.; ZETZSCHE, F.; ZINSER, G.: Die Behandlung von Alternativen in der Planung: Erfahrungen mit ATMS-basierten Expertensystemarchitekturen; in: Hertzberg, J.; Günter, A. (Hrsg.): Beiträge zum 2. Workshop Planen und Konfigurieren, Arbeitspapiere der GMD 310, Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH/Bonn, Sankt Augustin 1988, S. 113-132.
- HANSEN, H.R.; NEUMANN, G. (Hrsg.): Beiträge zur Expertensystemforschung an der Wirtschaftsuniversität Wien, Wien 1987.
- HAYES-ROTH, B.; HAYES-ROTH, F.: A Cognitive Model of Planning; in: Cognitive Science, Vol. 3 (1979), S. 275-310 (a).
- HAYES-ROTH, B.; HAYES-ROTH, F.: Modeling Planning as an Incremental, Opportunistic Process; in: o.V.: IJCAI-79, Proceedings of the Sixth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 20.-23.08.1979 in Tokyo, o.O. (Stanford) 1979, Vol. 1, S. 375-383 (b).

- HAYES-ROTH, B.: A Blackboard Architecture for Control; in: Artificial Intelligence, Vol. 26 (1985), S. 251-321.
- HEIOB, W.: Rechnergestützte Arbeitsplanung (CAP) mit Entscheidungstabellen; in: Arbeitsvorbereitung, 25. Jg. (1988), S. 14-18.
- HELLWIG, H.-E.; HELLWIG, U.; PAULUS, M.: Die Kopplung und die Integration von CAD und CAM - Teil 3: CAD/NC-Kopplung; in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 127 (1985), Nr. 1/2, S. 28-32.
- HENNINGS, R.D.: Expertensysteme: Grundlagen, Entwicklung, Anwendungen, Trends; in: Hennings, R.D.; Munter, H.: Artificial Intelligence - 1. Expertensysteme, Berlin 1985, S. 13-310.
- HERTZBERG, J.: Planerstellungsmethoden der Künstlichen Intelligenz; in: Informatik-Spektrum, Bd. 9 (1986), S. 149-161.
- HERTZBERG, J.: Einführung in die Planerstellungsmethoden der Künstlichen Intelligenz, Mannheim - Wien - Zürich 1989.
- HORZ, A.: Über die Kombination von Abhängigkeiten und Planskeletten - Ein Beitrag zur Diskussion des Begriffs "Wissensbasiertes Planen" innerhalb der Arbeitsgruppe "Wissensbasiertes Planen und Konfigurieren"; in: Hertzberg, J.; Günter, A.: Beiträge zum 2. Workshop Planen und Konfigurieren, Arbeitspapiere der GMD 310, Sankt Augustin 1988, S. 167-173.
- HSU, C.-L.: An Expert System Approach for Selection and Optimization of Machining Process Parameters, Dissertation, University of Illinois at Chicago, Ann Arbor 1985.
- HUMMEL, K.E.; BROOKS, S.L.: Using Hierarchically Structured Problem-Solving Knowledge in a Rule-Based Process Planning System; in: Oliff, M.D. (Hrsg.): Expert Systems and Intelligent Manufacturing, Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 03.-05.05.1988 in Charleston, New York - Amsterdam - London 1988, S. 120-137.
- IUDICA, N.R.: GUMMEX - ein Expertensystem zur Generierung von Arbeitsplänen für die Fertigung; in: Nachrichten für Dokumentation, 36. Jg. (1985), S. 22-27.
- IUDICA, N.; ANSALDI, S.: Generatives Arbeitsplanungssystem mit CAD-Kopplung, Bericht, Battelle-Institut e.V., Frankfurt 1989 (a).
- IUDICA, N.: Fertigungsvorbereitung / CAD-Schnittstelle erkennt und kategorisiert die fertigungsrelevanten geometrischen und topologischen Merkmale - Expertensystem schließt Lücke zwischen CAD und Arbeitsplanung; in: Handelsblatt, Ausgabe vom 13.09.1989 (Nr. 177), S. B4 (b).
- IWATA, K.; SUGIMURA, N.: A Knowledge Based Computer Aided Process Planning System for Machine Parts; in: Peklenik, J.; Spur, G.; Merchant, E.M.; Weill, R. (Hrsg.): Proceedings of the CIRP Seminars (on) manufacturing systems, Vol. 14 (1985), S. 139-152.

- IWATA, K.: Knowledge Based Computer Aided Process Planning; in: Milacic, V.R. (Hrsg.): Intelligent Manufacturing Systems II, Chapters based on papers presented at the Second International Summer Seminar on Intelligent manufacturing Systems, 24.-29.08.1987 in Dubrovnik, Amsterdam - Oxford - New York ... 1988, S. 3-25.
- JANSEN, M.: Ein wissensbasiertes System für die Generierung von Arbeitsplänen in einem Unternehmen der Optik, Feinmechanik und Elektronik; in: Mertens, P.; Wiendahl, H.-P.; Wildemann, H. (Hrsg.): CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung - Expertensysteme in der Produktion, München 1988, S. 117-126.
- JARDINE, T.J.: A Machinability Knowledge Based System; in: Kowalik, J.S. (Hrsg.): Knowledge Based Problem Solving, Englewood Cliffs 1986, S. 257-269.
- JOSHI, S.; VISSA, N.N.; CHANG, T.-C.: Expert process planning system with solid model interface; in: International Journal of Production Research, Vol. 26 (1988), S. 863-885.
- KAMEL, M.; SYED, A.: An Automated Multiagent Planning System; in: Oliff, M.D. (Hrsg.): Expert Systems and Intelligent Manufacturing, Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 03.-05.05.1988 in Charleston, New York - Amsterdam - London 1988, S. 367-384.
- KEMPF, K.: Artificially Intelligent Tools for Manufacturing Process Planners; in: Oliff, M.D. (Hrsg.): Intelligent Manufacturing, Proceedings from the First International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 1987 in Charleston, Menlo Park - Reading - Don Mills ... 1988, S. 131-163.
- KNOP, M.: GRINDEX - ein Expertensystem zur Schleifscheibenauswahl; in: Industrie-Anzeiger, 110. Jg. (1988), Nr. 57/58, S. 44-45.
- KOCH, R.: NC-Programmierung mit Hilfe eines Expertensystems, dargestellt am Beispiel ICEM PINC; in: Werkstattstechnik, 78. Jg. (1988), S. 95-99.
- KÖHLER, F.; KÖNIG, D.: PIA, ein wissensgestütztes Programmsystem zur automatischen Erstellung von Montagearbeitsplänen; in: Werkstattstechnik, 78. Jg. (1988), S. 251-255.
- KRALLMANN, H.: Expertensysteme für die computerintegrierte Fertigung; in: Warnecke, H.J. (Hrsg.): Produktionsplanung, Produktionssteuerung in der CIM-Realisierung - Erfahrungen, Strategien, Neue Ansätze, 18. IPA-Arbeitstagung, 22.-23.04.1986 in Stuttgart, Berlin - Heidelberg - New York ... 1986, S. 396-423 (a).
- KRALLMANN, H.: Expertensysteme für die computerintegrierte Fertigung; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 35. Jg. (1986), S. 100-106 (b).
- KRALLMANN, H.: Expert Systems Applied to Computer Integrated Manufacturing; in: Menges, G.; Hövelmanns, N.; Baur, E. (Hrsg.): Expert Systems in Production Engineering, Proceedings of the International Workshop, 18.-22.08.1986 in Spa, Lecture Notes in Engineering 29, Berlin - Heidelberg - New York ... 1987, S. 193-208.

- KUHN,A.; NOCHE,B.; HELLINGRATH,B.: Expertensysteme in der Logistik; in: Wildemann,H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 250-270.
- LECLAIR,S.R.: A Multiexpert Knowledge System Architecture for Manufacturing Decision Analysis, Dissertation, Arizona State University, Ann Arbor 1985.
- LINDSAY,K.J.: Frame-Based Knowledge Representation for Process Planning; in: o.V.: Proceedings of the First Annual Conference on Aerospace Applications of Artificial Intelligence, im September 1985 in Dayton, o.O. o.J. (1985), S. 127-135.
- LINEBACK,J.R.: AI transforms CAD/CAM to COM; in: Electronics Week, Vol. 57 (1984), No. 36, S. 17-18.
- LOGAN,F.A.: Automatisierungsstufen der rechnerunterstützten Arbeitsplanung; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 84. Jg. (1989), S. 93-96.
- MALETZ,M.C.: Knowledge-Based Planning of Manufacturing Operations; in: Oliff,M.D. (Hrsg.): Expert Systems and Intelligent Manufacturing, Proceedings of the Second International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 03.-05.05.1988 in Charleston, New York - Amsterdam - London 1988, S. 435-458.
- MARCHAND,H.: Knowledge Engineering in CAE - First Industrial Experiences; in: Bernold,T.; Albers,G. (Hrsg.): Artificial Intelligence: Towards Practical Application, Proceedings of the Joint Technology Assessment Conference, 12.-13.04.1984 in Rüschnikon, Amsterdam - New York - Oxford 1985, S. 135-141.
- MATHIS,C.; NENZ,H.-J.: Wissensbasierte Arbeitsplanungssysteme in der mechanischen Fertigung; in: Dillmann,R.; Swiderski,D. (Hrsg.): WIMPEL'88, 1. Konferenz über Wissensbasierte Methoden für Produktion, Engineering und Logistik, Stuttgart 1988, S. 72-85.
- MATSUSHIMA,K.; OKADA,N.; SATA,T.: The Integration of CAD and CAM by Application of Artificial-Intelligence Techniques; in: Annals of the CIRP (International Institution for Production Engineering Research), Vol. 31 (1982), S. 329-332.
- MERTENS,P.: Wissensbasierte Systeme im Produktionsbereich: Bestandsaufnahme; in: Mertens,P.; Wiendahl,H.-P.; Wildemann,H. (Hrsg.): CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung - Expertensysteme in der Produktion, München 1988, S. 7-38.
- MERTENS,P.: Verbindung von verteilter Produktionsplanung und -steuerung und verteilten Expertensystemen; in: Information Management, 4. Jg. (1989), Heft 1, S. 6-11.
- MIELKE,T.: CHAMP: Ein Expertensystem zur wissensbasierten Erstellung von Arbeitsplänen; in: Dillmann,R.; Swiderski,D. (Hrsg.): WIMPEL'88, 1. Konferenz über Wissensbasierte Methoden für Produktion, Engineering und Logistik, Stuttgart 1988, S. 86-97.

- MILACIC, V.R.; KALAJDZIC, M.: Logical Structure of Manufacturing Process Design - Fundamentals of an Expert System for Manufacturing Process Planning; in: Peklenik, J.; Spur, G.; Merchant, E.M.; Weill, R. (Hrsg.): Proceedings of the CIRP Seminars (on) manufacturing systems, Vol. 14 (1985), S. 153-167.
- MILACIC, V.R.; UROSEVIS, M.; VELJOVIC, A.; MILER, A.; RACE, I.: SAPT - EXAPT System Based on Hybrid Concept of Group Technology; in: Milacic, V.R. (Hrsg.): Intelligent Manufacturing Systems II, Chapters based on papers presented at the Second International Summer Seminar on Intelligent Manufacturing Systems, 24.-29.08.1987 in Dubrovnik, Amsterdam - Oxford - New York ... 1988, S. 39-51.
- MILL, F.G.; SPRAGGETT, S.: Process Planning with an Intelligent Knowledge Based System; in: Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.J. (Hrsg.): Toward the Factory of the Future, Proceedings of the 8th International Conference on Production Research and 5th Working Conference of the Fraunhofer-Institute for Industrial Engineering, 20.-22.08.1985 in Stuttgart, Berlin - Heidelberg - New York ... 1985, S. 258-263.
- MILLER, R.K.: Artificial Intelligence: A New Tool for Industry and Business, Volume I: Technology and Applications, Fort Lee 1984.
- MÖRLER, G.: Expertensysteme für Konstruktion und Planung in der Fertigung: Auslegung und Konfigurierung von Anlagen, Arbeitsplanung; in: o.V.: KOMMTECH'86, 3. Internationale Kongreßmesse für Technische Automation (Fachmesse für Kommunikation und Technische Automation), Kongreß VI: KI/Künstliche Intelligenz und Expertensysteme, Software-Engineering und PC-Anwendungstechnik, 13.-16.05.1986 in Essen, Velbert 1986, S. 6X-1 - 6X-11.
- MÖRLER, G.: Planungsaufgaben in technischen Unternehmensbereichen - eine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten wissensbasierter Systeme; in: Bullinger, H.-J.; Fähnrich, K.-P. (Hrsg.): Expertensysteme - Wissensbasierte Systeme in der betrieblichen Anwendung, Ehningen 1988, S. 26-35.
- MOULEESWARAN, C.B.; FISCHER, H.G.: A Knowledge-Based Environment for Process Planning, Paper, Siemens Corporate Research and Support, Inc., Princeton o.J. (1985).
- NAU, D.S.; CHANG, T.-C.: Prospects for Process Selection Using Artificial Intelligence; in: Computers in Industry, Vol. 4 (1983), S. 253-263.
- NIIZUMA, S.; KITAHASHI, T.: A Problem-Decomposition Method Using Differences or Equivalence Relations between States; in: Artificial Intelligence, Vol. 25 (1985), S. 117-151.
- o.V.: Wissensbasiertes Planungssystem für Bohroperationen; in: Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (Hrsg.): Sonderschau Industrie-Automation: METAV 88 - Beschreibung der Projekte, Frankfurt 1988, S. 33.
- PARKS, C.M.: A Prototype for a Knowledge-Based Manufacturing Planning System; in: o.V.: Conference on Artificial Intelligence in Engineering, 21.-23.10.1985 an der George-Washington-University, New York 1988, S. 9-10.

- PHILLIPS,R.H.; MOULEESWARAN,C.B.: A Knowledge-Based Approach to Generative Process Planning; in: o.V.: Proceedings Autofact'85, 04.-07.11.1985 in Detroit, Amsterdam 1985, S. 10-1 - 10-15.
- POESTGES,A.: Der Einsatz von Entscheidungstabellen in der Auftragsklärung; in: Arbeitsvorbereitung, 25. Jg. (1988), S. 92-95.
- RAUCH-HINDIN,W.B.: Artificial Intelligence in Business, Science, and Industry, Vol. II: Applications, Englewood Cliffs 1985.
- REQUICHA,A.A.G.; VANDENBRANDE,J.: Automated Systems for Process Planning and Part Programming; in: Kusiak,A. (Hrsg.): Artificial Intelligence - Implications for CIM, Kempston/Bedford - Berlin - Heidelberg ... 1988, S. 301-326.
- RETHFELD,U.; BURGERMEISTER,W.: Expertensysteme als neue CAI-Problemlösungstechnik; in: Wildemann,H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 438-470.
- RIT,J.-F.: Propagating temporal constraints for scheduling; in: o.V: proceedings aaai-86, fifth national conference on artificial intelligence, 11.-15.08.1986 in Philadelphia, Vol. 1: science, Los Altos 1986, S. 383-388.
- ROTH,H.-P.; ZEH,K.-P.; MUTHSAM,H.: Artificial intelligence in future manufacturing; in: Warnecke,H.-J.; Steinhilper, R. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Flexible Manufacturing Systems and the 20th Annual IPA Conference, 13.-14.09.1988 in Stuttgart, Kempston/Bedford - Berlin - New York 1988, S. 249-263.
- RYCHENER,M.D.; FARINACCI,M.L.; HULTHAGE,I.; FOX,M.S.: Integration of Multiple Knowledge Sources in ALADIN, an Alloy Design System; in: o.V.: proceedings aaai-86, fifth national conference on artificial intelligence, 11.-15.08.1986 in Philadelphia, Vol. 2: engineering, Los Altos 1986, S. 878-882.
- SACERDOTI,E.D.: Planning in a Hierarchy of Abstraction; in: Artificial Intelligence, Vol. 5 (1974), S. 115-135.
- SACERDOTI,E.D.: The Nonlinear Nature of Plans; in: o.V.: Advance Papers of the Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-75), 03.-08.09.1975 in Tbilisi, o.O. (Cambridge/Massachusetts) 1975, Vol. 1, S. 206-214.
- SACERDOTI,E.D.: A Structure for Plans and Behavior, New York - Oxford - Amsterdam 1977.
- SACERDOTI,E.D.: Problem Solving Tactics; in: AI Magazine, Vol. 2 (1980/81), No. 1 (1980), S. 7-15.
- SMITH,S.F.; OW,P.S.: The Use of Multiple Problem Decomposition in Time Constrained Planning Tasks; in: o.V.: Proceedings of the Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI-85, 19.-23.09.1985 in Los Angeles, Los Altos 1985, Vol. 2, S. 1013-1015 (auch: Report CMU-RI-TR-85-11, Intelligent Systems Laboratory, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1985).

- STEINACKER, I.: Ein Expertensystem als Bindeglied zwischen CAD und CAM; in: Trost, H.; Retti, J. (Hrsg.): Österreichische Artificial Intelligence-Tagung, 24.-27.09.1985 in Wien, Berlin - Heidelberg - New York ... 1985, S. 28-33.
- STEINMANN, D.; SCHEER, A.-W.: Expertensysteme (ES) in Produktionsplanung und -steuerung (PPS) unter CIM-Aspekten; in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 202-248 (a).
- STEINMANN, D.: Entscheidungsunterstützungssysteme in CIM; in: Scheer, A.-W.: CIM - Computer Integrated Manufacturing / Der computergesteuerte Industriebetrieb, 2. Aufl., Berlin - Heidelberg - New York ... 1987, S. 166-172 (b).
- STIRLING, D.; BUNTINE, W.: Process routings in a steel mill: a challenging induction problem; in: Gero, J.S.; Stanton, R. (Hrsg.): Artificial Intelligence Developments and Applications, Edited Selection of Papers to the Australian Joint Artificial Intelligence Conference, 02.-04.11.1987 in Sydney, Amsterdam - New York - Oxford ... 1988, S. 301-313.
- SWYT, D.A.: AI in Manufacturing: The NBS AMRF as an Intelligent Machine; in: Oliff, M.D. (Hrsg.): Intelligent Manufacturing, Proceedings from the First International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 1987 in Charleston, Menlo Park - Reading - Don Mills ... 1988, S. 357-372.
- SZUBA, T.: Automatic program synthesis system for N.C. machine tools based on PC-PROLOG; in: Angewandte Informatik, 26. Jg. (1984), S. 234-243.
- TATE, A.: NONLIN: A Heuristic Non-linear Planner, DAI Memo No. 25, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, Edinburgh 1976 (a).
- TATE, A.: NONLIN: Project Planning Using a Hierarchic Non-linear Planner, Research Report No. 25, Department of Artificial Intelligence, University of Edinburgh, Edinburgh 1976 (b).
- TATE, A.: Generating Project Networks; in: o.V.: 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence - 1977, IJCAI-77, Proceedings of the Conference, 22.-25.08.1977 in Cambridge (Massachusetts), o.O. (Pittsburgh) 1977, Vol. 2, S. 888-893.
- TATE, A.; WHITER, A.M.: Planning with Multiple Resource Constraints and an Application to Naval Planning Problem; in: o.V.: First Conference on Artificial Intelligence Applications, 05.-07.12.1984 in Denver, Silver Spring 1984, S. 410-416.
- TATE, A.: Goal Structure, Holding Periods and "Clouds"; in: Georgeff, M.P.; Lansky, A.L. (Hrsg.): Reasoning about Actions & Plans, Proceedings of the 1986 Workshop, 30.06.-02.07.1986 in Timberline, Los Altos 1987, S. 267-277.
- THUY, N.H.C.; SCHNUPP, P.: Wissensverarbeitung und Expertensysteme, München - Wien 1989.

- TIERNEY, K.; BOWDEN, R.; BROWNE, J.: A Prototype Expert System for Technological Planning in Robot Based Flexible Assembly Systems; in: Stecke, K.E.; Suri, R. (Hrsg.): Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems - Operations Research Models and Applications, 12.-15.08.1986 in Ann Arbor, Amsterdam - Oxford - New York ... 1986, S. 169-180.
- TIERNEY, K.; BOWDEN, R.; BROWNE, J.: ESPFAS - A Prototype Expert System for Technological Planning in Robot-Based Flexible Assembly Systems; in: Annals of Operations Research, Vol. 15 (1988), S. 111-130.
- TRUM, P.: A Hierarchical Constrained-Based Planner for Computer-Aided Process Planning, Paper, Battelle-Institut e.V., Frankfurt 1985.
- TRUM, P.: Automatische Generierung von Arbeitsplänen; in: State of the Art, o.Jg. (1986), Heft 1, S. 69-72.
- TSANG, E.P.K.: TLP - A Temporal Planner; in: Hallam, J.; Mellish, C. (Hrsg.): Advances in Artificial Intelligence, Proceedings of the 1987 AISB Conference, 06.-10.04.1987 in Edinburgh, Chichester - New York - Brisbane ... 1987, S. 63-78.
- VON BECHTOLSHEIM, M.: Die informationstechnische Integration von Expertensystemen: Stand der Technik, Probleme und Lösungsansätze; in: o.V.: Jahresbericht 1988 - Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung mbH, Sankt Augustin 1989, S. 71-83.
- VOB, A.; VOB, H.: Formalizing Local Constraint Propagation Methods; in: Christaller, T. (Hrsg.): Künstliche Intelligenz, 5. Frühjahrsschule, KIFS-87, 28.03.-05.04.1987 in Günne, Proceedings, Informatik-Fachberichte 202, Berlin - Heidelberg - New York ... 1989, S. 218-257.
- WANG, H.-P.; WYSK, R.A.: A knowledge-based approach for automated process planning; in: International Journal of Production Research, Vol. 26 (1988), S. 999-1014.
- WARNECKE, G.; MERTENS, P.: Aufbau und Anwendung von wissensbasierten Technologieplanungssystemen; in: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung, 83. Jg. (1988), S. 559-562.
- WARNECKE, H.J.; KÜHNLE, H.; WIEDENMANN, H.: Eine Wissensbasis zur rechnerunterstützten Arbeitsplanerzeugung; in: Dillmann, R.; Swiderski, D. (Hrsg.): WIMPEL'88, 1. Konferenz über Wissensbasierte Methoden für Produktion, Engineering und Logistik, Stuttgart 1988, S. 59-71.
- WILDEMANN, H.: Expertensysteme als CIM-Baustein - Betriebswirtschaftlich-technologische Anforderungen an wissensbasierte Systeme in der Produktion; in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 1-57.
- WILKINS, D.E.: Domain-independent Planning: Representation and Plan Generation; in: Artificial Intelligence, Vol. 22 (1984), S. 269-301.

- WILKINS, D.E.: Hierarchical Planning: Definition and Implementing; in: du Boulay, B.; Hogg, D.; Steels, L. (Hrsg.): Advances in Artificial Intelligence-II, Seventh European Conference on Artificial Intelligence, ECAI-86, 20.-25.07.1986 in Brighton, Amsterdam - New York - Oxford ... 1987, S. 659-671.
- YOUNG, R.L.; O'NEILL, D.M.; MULLARKEY, P.W.; GINGRICH, P.C.; JAIN, A.; SARDANA, S.: An Object-Based Architecture For Manufactured Parts Routing; in: o.V.: Proceedings of the Third Conference on Artificial Intelligence Applications, 23.-27.02.1987 in Hyatt Orlando, Washington 1987, S. 50-57.
- ZELEWSKI, S.: Das Leistungspotential der Künstlichen Intelligenz - eine informationstechnisch-betriebswirtschaftliche Analyse, Bd. 1-3, Dissertation, Universität Köln 1985, Witterschlick/Bonn 1986 (a).
- ZELEWSKI, S.: Ansätze der Künstlichen Intelligenz-Forschung zur Unterstützung der Netzplantechnik, Arbeitsbericht Nr. 5, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1986 (b).
- ZELEWSKI, S.: Expertensysteme für die Arbeitsplanung - Konzepte und Prototypen; in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 38. Jg. (1989), S. 112-117 (a).
- ZELEWSKI, S.: Einsatz von Expertensystemen in den Unternehmen - Anwendungsmöglichkeiten, Bewertungsaspekte und Probleme künstlicher Intelligenz, Ehningen - Stuttgart 1989 (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-Informationen-Systemen, 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 Informationsbanksysteme - 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 Industrieunternehmen - aus produktiver und sozialer Sicht -, Köln 1988.
- Nr. 25: HÖLSCHER,ANDREAS: Unterstützung der Forschung und Entwicklung in der Pharmaindustrie durch externe Informationen - Möglichkeiten und Grenzen -, Köln 1988.
- Nr. 26: SCHRÖDER,HANS-HORST: Entwicklungsstand und -tendenzen bei PPS-Systemen, Köln 1989.
- Nr. 27: ZELEWSKI,STEPHAN: Eine Metakritik an der Kritik konventioneller Rationalitätsauffassungen durch kulturwissenschaftlich fundierte Konzepte praktischer und prozeduraler Rationalität, Köln 1989.
- Nr. 28: ZELEWSKI,STEPHAN: Petrinetze für die Konstruktion und Konsistenzanalyse von logisch orientierten Problembeschreibungen, Köln 1989.
- Nr. 29: ELLE,HANS-DIETER: Aufgeklärter Konstruktivismus - Ein Beitrag zur erkenntnis- und wissenschaftsprogrammatiscen Diskussion innerhalb der Betriebswirtschaftslehre, Köln 1989.
- Nr. 30: ZELEWSKI,STEPHAN: CAP-Expertensysteme - Anwendungsaspekte Künstlicher Intelligenz im Bereich der Arbeitsplanung -, Köln 1989.