

Arbeitsbericht Nr. 22

Expertensysteme für Prozeßplanung und  
-steuerung in der Fabrik der Zukunft  
- Ein Überblick über Konzepte  
und erste Prototypen -

von  
Dr. Stephan Zelewski

Köln 1988

Alle Rechte vorbehalten.

Abstract

Der Begriff "Expertensystem" hat in jüngster Zeit eine erstaunliche Rezeption erfahren. Hierbei wurde er allerdings oftmals so weit verwässert, daß nicht mehr klar ersichtlich ist, worin die Fortentwicklung gegenüber konventionellen informationsverarbeitenden Systemen bestehen soll.

Am Beispiel der Fabrik der Zukunft werden die besonderen Leistungspotentiale von Expertensystemen verdeutlicht, die sich einsetzen lassen, um die Planung und Steuerung von Produktionsprozessen für die Herstellung von Stückgütern zu unterstützen. Im Vordergrund stehen Produktionssysteme, die auf dem Organisationsprinzip der Werkstattfertigung beruhen. Aspekte der Fließfertigung gehen insofern ein, als Flexible Fertigungssysteme berücksichtigt werden, die auf einer Mischung von Werkstatt- und Fließfertigung beruhen.

Die Ausführungen konzentrieren sich auf die Funktionsbereiche der Arbeitsplanung einerseits sowie der Terminfeinplanung und -steuerung andererseits. Hinsichtlich des letztgenannten Bereichs finden sowohl die maschinenorientierte Betrachtungsweise des Ordinierens von Aufträgen (sequencing) als auch der fabrikorientierte Ansatz der Maschinenbelegung (scheduling und routing) Berücksichtigung. Ausblicke auf die Einbindung von Kundenaufträgen in die fabrikbezogene Planung und die technische Prozeßsteuerung unter Realzeitbedingungen erfassen die Schnittstellen zum Absatz bzw. zur ingenieurtechnisch orientierten Prozeßgestaltung.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einführung	1
1.1 Präzisierung des Untersuchungsumfangs	1
1.2 Eine Arbeitsdefinition für Expertensysteme	10
2 Expertensysteme für die Arbeitsplanung	17
2.1 Konzeptionelle Grundlagen	17
2.2 Exemplarische Expertensysteme zur Unterstützung der Arbeitsplanung	31
3 Expertensysteme für die Terminfeinplanung und -steuerung	36
3.1 Konzeptionelle Grundlagen	36
3.1.1 Terminplanung	38
3.1.2 Terminsteuerung	54
3.2 Exemplarische Expertensysteme zur Unterstützung der Terminfeinplanung und -steuerung	65
3.2.1 Übersicht	65
3.2.2 Verfeinernde Darstellung eines Expertensystems für die Termin- feinplanung und -steuerung	73
4 Ausblick	84
4.1 Auftragsumwandlung	84
4.2 Technische Prozeßsteuerung unter Realzeitbedingungen	87
Literaturverzeichnis	92

## 1 Einführung

### 1.1 Präzisierung des Untersuchungsumfangs

Die Fabrik der Zukunft wird hier grob als das Konzept eines Fabriktyps skizziert<sup>1)</sup>, in dem die Produktionsprozesse mit hochgradiger Automatenunterstützung geplant, gesteuert und realisiert werden. Im Gegensatz zu konventionellen Fabriken, die hinsichtlich der Automatisierung der Prozeßrealisierung bereits weit fortgeschritten sein können, zeichnet sich die Fabrik der Zukunft dadurch aus, daß der automatenunterstützten Planung und Steuerung von Produktionsprozessen besonderes Gewicht zukommt. Nachfolgend wird daher auf die Realisierung von Produktionsprozessen nicht weiter eingegangen.

Es wird nicht vorausgesetzt, daß die Planungs- und Steuerungsfunktionen in der Fabrik der Zukunft vollautomatisch erfüllt werden müssen. Vielmehr werden "intelligente" Automaten zunächst nur in ihrer Eigenschaft betrachtet, Arbeitskräfte bei ihren dispositiven Planungs- und Steuerungsleistungen zu unterstützen. In welchem Ausmaß solche Automaten auch menschliche Arbeitsleistungen substituieren und so zur Verwirklichung des Zukunftsbildes der menschenleeren Fabrik beitragen könnten, wird an dieser Stelle nicht erörtert<sup>2)</sup>.

Das Konzept der Fabrik der Zukunft erstreckt sich im allgemeinen auf die Produktion von Stückgütern. Diese läßt sich grob in die zwei Phasen der Teilefertigung und -montage differenzieren. Da sich bei hinreichend abstrakter Betrachtungsweise Planungs- und Steuerungsaufgaben für die Fertigung und die Montage von Produktteilen (Werkstücken) nicht wesentlich unterscheiden,

---

1) Vgl. zu einer detaillierteren Erörterung des Konzepts der Fabrik der Zukunft Zelewski (1986a), S. 543ff., und die dort angeführten Quellen.

2) Vgl. hierzu Zelewski (1986a), S. 544ff.; Zelewski (1988a), S. 88ff.

konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen auf die Teilefertigung<sup>3)</sup>.

Ein herausragendes Ziel, das mit der Fabrik der Zukunft angestrebt wird, ist eine deutliche Erhöhung der Fertigungsflexibilität. Innerhalb desselben Produktionssystems sollen ohne aufwendige Umrüstmaßnahmen unterschiedliche Produkte in rasch wechselnder Folge - bis hin zum Extrem der Losgröße 1 - gefertigt werden können. Es wird angestrebt, das Produktionsprogramm schnell und kostengünstig an kurzfristig veränderliche Absatzsituationen anpassen zu können. Von den beiden Grundprinzipien der Fertigungsorganisation - der verrichtungszentrierten Werkstattfertigung und der objektzentrierten Fließfertigung - unterstützt vor allem die Werkstattfertigung die beabsichtigte flexible Produktionsstruktur. Denn es wird darauf verzichtet, diese Struktur nach dem Objektprinzip auf die Produktionsanforderungen bestimmter einzelner Produkte zu fixieren. Daher wird fortan in erster Linie von Produktionssystemen ausgegangen, die nach dem Prinzip der Werkstattfertigung organisiert sind.

Eine weitere wesentliche Zielsetzung der Fabrik der Zukunft besteht darin, die Durchlaufzeiten von Aufträgen erheblich zu verkürzen. Hierzu sollen die Nebenzeiten für unproduktive Liegezeiten in Zwischenlagern drastisch reduziert werden. Eine solche Durchlaufzeitreduzierung wird am wirkungsvollsten durch eine Strukturierung des Produktionssystems nach dem Vorbild der Fließfertigung unterstützt. Da dies dem vorgenannten Organisationsprinzip der Werkstattfertigung zuwiderläuft,

---

3) Die Erkenntnisse lassen sich analog auf die Teilemontage übertragen. Für die Auswahl der Teilefertigung spricht, daß sich die meisten Konzepte und Expertensystem-Prototypen für Planungs- und Steuerungsaufgaben in der Fabrik der Zukunft auf Fertigungsprozesse erstrecken.

Da Montageprozesse nicht explizit berücksichtigt werden und die Produktion von Dienstleistungen sowie anderen immateriellen Produkten - wie z.B. Informationen - außer acht bleibt, werden fortan Fertigungs- und Produktionsbegriff synonym behandelt.

birgt das Konzept der Fabrik der Zukunft einen fertigungsorganisatorischen Konflikt in sich, der grundsätzlich nicht vollständig aufgelöst werden kann.

Praktische Ansätze zur Konfliktlinderung bemühen sich um einen Kompromiß zwischen den Zielen, die Fertigungsflexibilität zu erhöhen und die Durchlaufzeiten zu senken, indem die Organisationsprinzipien der Werkstatt- und der Fließfertigung miteinander kombiniert werden. Herausragende Beispiele hierfür sind Flexible Fertigungssysteme. Diese werden fortan als Konkretisierungen des Konzepts der Fabrik der Zukunft vorausgesetzt.

Der Realisierung von Produktionsprozessen in Flexiblen Fertigungssystemen vorgelagert ist die Aufgabe der Arbeitsplanung. Sie erfolgt jeweils in bezug auf ein Produkt oder eine Familie von Produktvarianten, die sich aus fertigungstechnischer Sicht einander stark ähneln<sup>4)</sup>. Die Arbeitsplanung für ein Produkt umfaßt zunächst die Identifizierung aller Arbeitsgänge, die zur Herstellung dieses Produkts an entsprechenden Werkstücken verrichtet werden müssen (Arbeitsgangplanung). Zweitens müssen die Ressourcen zugeordnet werden, die jeweils zur Realisierung eines Arbeitsganges erforderlich sind (arbeitsgangbezogene Ressourcenplanung). Hierbei handelt es sich vor allem um die Festlegung der technisch geeigneten Bearbeitungsmaschinen und der erforderlichen Werkzeuge. Gegebenenfalls müssen auch Fertigungshilfsmittel bestimmt werden, wie z.B. Vorrichtungen zum Aufspannen und Justieren der Werkstücke. Drittens gilt es die technologischen Reihenfolgebeziehungen zu ermitteln, die zwischen den Arbeitsgängen eingehalten werden müssen (Arbeitsablauf- oder Präzedenzplanung). Schließlich werden die Vorgabezeiten der einzelnen Arbeitsgänge festgesetzt. Sie fließen in die

---

4) Der Einfachheit halber wird nachfolgend nur noch von der Arbeitsplanung eines Produkts ausgegangen.

spätere Terminplanung als Grundlage der Sollzeiten für die Arbeitsgangausführungen ein<sup>5)</sup>.

Das Ergebnis der vorgenannten vier Teilaufgaben ist ein Arbeitsplan, in dem die Arbeitsgänge für die Herstellung eines Produkts einschließlich ihrer Ressourcen- und Zeitbedarfe in der technologisch erforderlichen Reihenfolge aufgelistet sind. Die computergestützte Erstellung von Arbeitsplänen wird zumeist unter das Akronym "CAPP" für "Computer Aided Process Planning" subsumiert<sup>6)</sup>.

Fortan wird von drei Vereinfachungen ausgegangen. Erstens bleiben Aspekte der Verfahrenswahl ausgeklammert. Er wird also nicht berücksichtigt, daß die Herstellung des gleichen Produkts durch unterschiedliche technische Produktionsverfahren realisiert werden kann, die jeweils zu anderen Ergebnissen der Arbeitsgangidentifizierung und Ressourcenplanung führen würden<sup>7)</sup>. Zweitens werden Aspekte der Ermittlung von Vorgabezeiten vernachlässigt, da die Erforschung der Künstlichen Intelligenz hierzu bisher keine Beiträge geliefert hat. Drittens werden Fertigungsaufträge mit Anweisungen gleichgesetzt, jeweils eine Einheit eines bestimmten Produkts herzustellen. Komplizierungen bleiben außer acht, die daraus resultieren können, daß mehrere Fertigungsaufträge in die Herstellung eines Produkts einfließen (mehrstufige Fertigung) oder derselbe Fertigungsauftrag mehrere Produkteinheiten umfaßt (losweise Fertigung).

---

5) Gewöhnlich werden die Vorgabezeiten zu Planungszwecken um einen Zeitgrad korrigiert; vgl. z.B. Kern (1980), S. 278.

6) Oftmals wird auch das verkürzte Akronym CAP für "Computer Aided Planning" benutzt, das jedoch hinsichtlich des Planungsobjekts undefiniert bleibt.

7) Vgl. zu Expertensystemen für die - hier ausgeklammerte - Verfahrenswahl Zelewski (1986a), S. 816f., und die dort angeführte Literatur.

Im Rahmen von Arbeitsplänen werden zwar technologisch bedingte Reihenfolgen von Arbeitsgängen festgelegt, nicht aber die Termine für das Starten (und Enden) von Arbeitsgängen. Letztes erfolgt erst durch die Terminplanung. Die Terminplanung läßt sich in eine mittelfristig angelegte Termingrob- und eine kurzfristig konzipierte Terminfeinplanung zerlegen.

Die Termingrobplanung, die im Rahmen der Auftragsterminierung als Durchlauf- und Kapazitätsterminierung erfolgt, wird nicht weiter berücksichtigt. Denn erstens ist es fraglich, ob die mittelfristige Terminplanung überhaupt noch der hohen Reagibilität entspricht, die Produktionssysteme in der Fabrik der Zukunft (z.B. Flexiblen Fertigungssystemen) zur Bewältigung von kurzfristig veränderlichen Absatz- und Produktionsprogrammen besitzen sollen. Zweitens erweist sich die Durchlaufterminierung von Aufträgen, die ohne Rücksicht auf knappe Kapazitäten erfolgt, aus planungsmethodologischer Sicht als problematisch, da sie Prämissen setzt, die in späteren Kapazitätsterminierungen oder Terminfeinplanungen ohnehin wieder aufgehoben werden. Drittens unterscheiden sich - bei Berücksichtigung von begrenzten Fertigungskapazitäten - die Methoden von Termingrob- und -feinplanung nicht erheblich.

In der Terminfeinplanung werden gewöhnlich die Starttermine von Arbeitsgängen und die zugehörigen Ressourcenzuordnungen festgelegt<sup>8)</sup>. Unvorhergesehene Störungen können bei der Realisierung von geplanten Produktionsprozessen z.B. durch Maschinenausfälle, nicht rechtzeitig bereitgestellte Vorprodukte, Ausschußproduktion, Schätzfehler bei der Vorgabe von Arbeitsgangdauern, Umdispositionen von Lieferterminen oder krankheitsbedingte Abwesenheit von Arbeitskräften verursacht werden. Sie führen oftmals dazu, daß die Vorgaben der Terminfeinplanung nicht eingehalten werden können. Da-

---

8) Die geplanten Endtermine ergeben sich aus der Addition der Sollzeiten für die Arbeitsgangausführung, die aus den Vorgabezeiten der Arbeitsplanung gewonnen werden.

her muß unter Berücksichtigung der jeweils aktuellen, mit Hilfe der Betriebsdatenerfassung festgestellten Produktionssituation laufend eine Anpassungsplanung erfolgen. In ihr werden die Arbeitsgangtermine und Ressourcenzuordnungen revidiert. Dies geschieht im Rahmen der Terminfein- oder Produktionssteuerung<sup>9)</sup>. Da sich die ursprüngliche Terminfeinplanung und die steuernde Anpassungsplanung konzeptionell nicht wesentlich voneinander unterscheiden, werden die zugehörigen Planungsfunktionen unter den Begriff der Terminfeinplanung und -steuerung - oder kurz: Feinterminierung - subsumiert.

Die Feinterminierung von Aufträgen erfolgt fabrikbezogen als Maschinenbelegung (scheduling und routing<sup>10)</sup>), wenn alle Maschinen eines Produktionssystems für die (Anpassungs-)Planung von Auftragsterminen simultan betrachtet werden<sup>11)</sup>. Dabei wird der Maschinenbegriff so weit gefaßt, daß er nicht nur Bearbeitungsmaschinen, sondern auch Handhabungsautomaten (Roboter) und Transportvorrichtungen (z.B. Flurförderfahrzeuge) umfaßt. Darüber hinaus induziert die Maschinenbelegung die Terminierung des Einsatzes von Arbeitskräften und der Bereitstellung von Vorprodukten (Materialien), auf die hier der Übersichtlichkeit halber nicht näher eingegangen wird.

---

9) Im kybernetischen Sinne stellt die Produktions-"steuerung" eine Regelung von Produktionsprozessen dar.

10) Beim Scheduling steht der maschinenorientierte Aspekt im Vordergrund, Maschinen mit Aufträgen zu belegen, während beim routing die auftragsorientierte Perspektive dominiert, die Aufträge durch ein Produktionssystem zu schleusen.

11) Fortan wird als Planung von Terminen sowohl deren originäre Planung (Terminplanung i.e.S.) als auch deren störungsbedingte Anpassungsplanung (Terminsteuerung) verstanden. Termine stellen jeweils - soweit nicht ausdrücklich anders vermerkt - Starttermine von Arbeitsgängen dar.

Die zeitbezogene Zuordnung von Aufträgen und Maschinen stellt oftmals ein derart komplexes Terminierungsproblem dar, daß die Terminfeinplanung und -steuerung in der Praxis zumeist nicht fabrik-, sondern maschinenbezogen erfolgt. Hierbei wird für jede Maschine des Produktionssystems isoliert die zeitliche Reihenfolge bestimmt, in der Aufträge ausgeführt werden, die vor der Maschine auf Abarbeitung warten (sequencing)<sup>12)</sup>. Dieses maschinenorientierte Ordinieren von Aufträgen reduziert zwar die Terminierungskomplexität erheblich. Doch läßt es alle fertigungstechnischen und -organisatorischen Interdependenzen unbeachtet, die daraus folgen, daß Aufträge die Abarbeitung auf mehreren Maschinen erfordern können. Daher läßt die maschinenbezogene Terminierung grundsätzlich nur suboptimale - allenfalls zufällig optimale - Planungsergebnisse zu.

Sowohl die fabrik- als auch die maschinenbezogene Terminierung beziehen sich nur auf Aufträge, die innerhalb eines Produktionssystems auszuführen sind (Fertigungsaufträge). Bei auftragsorientierter Produktion, die dem Einsatz flexibler Fertigungssysteme im Rahmen der Fabrik der Zukunft im allgemeinen zugrundeliegt, wird die Produktion jedoch durch Kundenaufträge angestoßen. Die Umsetzung absatzbezogener Kundenaufträge in produktionsbezogene Fertigungsaufträge erfolgt durch die Auftragsumwandlung. Sie bildet die Schnittstelle der Auftragsterminierung zur Absatzplanung und -steuerung (Angebotsterminierung).

---

12) Für jeden wartenden Auftrag wird der Starttermin seiner Ausführung auf der jeweils betrachteten Maschine festgelegt. Aus der Abfolge dieser Starttermine folge die zeitliche Reihenfolge der Auftragsabarbeitung. Im Regelfall wird unterstellt, daß sich in jedem Zeitpunkt nur ein Auftrag auf derselben Maschine ausführen läßt. Hiervon wird auch in dieser Ausarbeitung ausgegangen.

Die Feinterminierung ist zwar kurzfristig definiert, um den unmittelbaren Bezug zur Ausführung der geplanten und gesteuerten Produktionsprozesse herzustellen. Doch zeichnet sich die Stückgüterfertigung im Regelfall dadurch aus, daß die dispositiven Terminierungsaktivitäten von den ausgeführten Arbeitsgängen zeitlich entkoppelt sind. Es bestehen so große zeitliche Dispositionsspielräume, daß im Falle von Prozeßstörungen die Zeitdauern für die Aktivitäten der Anpassungsplanung nicht berücksichtigt zu werden brauchen. Die Produktion kann so lange in bezug auf ungestörte Maschinen und Aufträge fortgesetzt werden, bis die revidierten Angaben für die Wiederaufnahme unterbrochener Auftragsbearbeitungen aus der Produktionssteuerung übermittelt werden. Solche Produktionsverhältnisse werden als zeitunkritisch bezeichnet.

Einen Sonderfall stellt die Steuerung von zeitkritischen Produktionsprozessen dar. Hierbei reagieren Produktionssysteme auf Störungen derart empfindlich, daß die Zeitdauer zur Planung störungsbeseitigender Anpassungsmaßnahmen nicht mehr vernachlässigt werden kann. Vielmehr müssen zeitliche Restriktionen (Realzeitbedingungen) beachtet werden, die maximale Fristen zwischen dem Eintreten von Produktionsstörungen und gegensteuernden Maßnahmen festlegen. Da zur Produktionssteuerung unter Realzeitbedingungen eine enge Kopplung von Expertensystem und Produktionssystem erforderlich ist, wird auch von einer online-Steuerung gesprochen<sup>13)</sup>.

Die Produktionssteuerung unter Realzeitbedingungen spielt für die Fabrik der Zukunft nur dann eine Rolle, wenn entweder spezielle, verfahrenstechnisch determinierte Produktionsverhältnisse vorliegen oder aber wenn der Standardfall der Stückgüterfertigung verlassen wird. Erstes ist beispielsweise in Walzwerken der Fall

---

13) Vgl. Husson (1987), S. 312. Die Betrachtungsebene von Produktionssystemen, die unter Realzeitbedingungen gesteuert werden sollen, fällt sehr detailliert aus. Daher wird auch die Bezeichnung "microplanning" verwendet; vgl. Meyer, W. (1987), S. 401.

(Realzeitbedingungen aufgrund des Auskühlens der Bearbeitungsobjekte), zweites dagegen in Kraftwerken zur Erzeugung elektrischer Energie. Zwecks Abgrenzung von der zeitunkritischen, rein dispositiven Terminfeinsteuerung wird diese Art der Produktionssteuerung unter technisch determinierten Realzeitbedingungen fortan als technische Prozeßsteuerung bezeichnet.

## 1.2 Eine Arbeitsdefinition für Expertensysteme

Arbeitsplanung, Feinterminierung von Fertigungsaufträgen, Auftragsumwandlung und technische Prozeßsteuerung werden bereits durch Systeme der konventionellen Informationsverarbeitung unterstützt. Hier werden nur solche Beiträge aus der Erforschung der Künstlichen Intelligenz (KI) betrachtet, die neuartige Perspektiven für die Prozeßplanung und -steuerung in der Fabrik der Zukunft eröffnen könnten. Als herausragende Produkte der KI-Forschung genießen zur Zeit die Expertensysteme besondere Beachtung. Sie werden oftmals als vielversprechende Beiträge zur Gestaltung von Produktionsprozessen in der Fabrik der Zukunft angeführt<sup>14)</sup>.

---

14) Vgl. Crestin (1983), S. 346 u. 349; Warman (1983), S. 59f.; Sadowski (1984), S. 35f.; Dillmann (1984), S. 321f.; Rembold (1984), S. 506f.; Kempf (1985), S. 18ff. in Verbindung mit S. 13; Fisher (1985), S. 78ff.; Kochan (1985), S. 232ff.; Brödner (1985), S. 102ff.; Spur (1985), S. 8; Schmidt (1985), S. 2; Ben-Arieh (1985), S. 286; Major (1985), S. 20; Krallmann (1986a), S. 139ff.; Krallmann (1986b), S. 402ff.; Krallmann (1986c), S. 73ff.; Krallmann (1986d), S. 101ff.; Nedeß (1986), S. 729ff.; Hörnig (1986), S. 427ff.; Meyer, H. (1986), S. 6V-9 u. 6V-12f.; Walker (1986), S. 127; Meyer, W. (1987), S. 401 u. 408f.; Krallmann (1987b), S. 198f.; Steinmann (1987a), S. 205ff.; Steinmann (1987b), S. 166ff.; Stockert (1987), S. 325ff.; Rethfeld (1987), S. 440ff., insbesondere S. 456ff.

Diese Quellen beziehen sich oftmals nicht explizit auf die Fabrik der Zukunft, sondern auf den Expertensystemeinsatz im Rahmen des CIM-Konzepts. Die Vision des Computer Integrated Manufacturing ist jedoch inhaltlich so eng mit dem Konzept der Fabrik der Zukunft verknüpft, daß beide als unterschiedliche Formulierungen des gleichen Sachverhalts betrachtet werden können. Allerdings umfaßt das CIM-Konzept auch Funktionsbereiche - wie z.B. das computerunterstützte Konstruieren (CAD) -, die weit über die Thematik dieser Ausarbeitung - die Planung und Steuerung von Produktionsprozessen in der Fabrik der Zukunft - hinausreichen (vgl. beispielsweise Rethfeld (1987), S. 440ff.).

Dieser hohe Aufmerksamkeitswert verführte jedoch auch vielfach dazu, beliebige Software mit dem novitäts- und qualitätsverheißenden Etikett "Expertensystem" auszustatten. Infolgedessen verwässerte dieser Begriff bis zur leerformelhaften Marketingphrase<sup>15)</sup>. Daher ist es erforderlich, das Konzept der Expertensysteme inhaltlich zu konkretisieren.

Für den Expertensystembegriff hat sich bislang noch keine einheitliche Auffassung durchgesetzt. Den nachfolgenden Ausführungen wird eine vereinfachte Arbeitsdefinition zugrundegelegt, die sich auf zwei wesentliche Aspekte beschränkt<sup>16)</sup>: 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);

---

15) Dieser Leerformelcharakter äußert sich auch in dem Umstand, daß die Quellen, die in der voranstehenden Fußnote angeführt wurden, zwar den Einsatz von Expertensystemen in der Fabrik der Zukunft (oder zur Realisierung des CIM-Konzepts) herausstellen, jedoch in der Mehrzahl - ausgenommen vor allem Kempf, Krallmann und Steinmann - weder die Art dieses Einsatzes konkretisieren noch die Besonderheiten gegenüber konventionellen Informationsverarbeitungssystemen erläutern. Vgl. auch die skeptischen Anmerkungen zu den später vorgestellten "Expertensystemen" ICEM PINC und SCHEDULING für die Generierung von NC-Programmen bzw. für die Terminfeinplanung. Ein anderes Beispiel sind die Ausführungen von Arndt (1985), S. 293ff., zu "Methoden der Künstlichen Intelligenz für die Arbeitsplanung", die nicht erkennen lassen, worin der wesentliche Unterschied zur konventionellen Informationsverarbeitung auf der Grundlage von Entscheidungstabellen liegen soll.

16) Vgl. zur Vielfalt und zu den immanenten Schwierigkeiten der zur Zeit gebräuchlichen Definitionsansätze die Ausführungen in Zelewski (1988a), S. 105ff.

- 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 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.

Darüber hinaus wird zumeist unterstellt<sup>17)</sup>, 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 Aufgabenbeschreibung<sup>18)</sup> einerseits und Ab-

---

17) 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 (1988a), S. 126ff.

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

laufbeschreibung der Aufgabenerfüllung<sup>19)</sup> andererseits in zwei getrennte Automatenkomponenten aufgelöst<sup>20)</sup>.

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 selbstständig festlegen zu können. In den Begriffen der konventionellen Informationsverarbeitung ausgedrückt heißt dies, daß sich ein Expertensystem selbst - in prozeduraler Hinsicht - 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 dem Expertensystem ein Problem durch die Angabe von Ausgangssituation, erwünschter Zielsituation und zulässigen Operatoren, welche die Situationen ineinander transformieren können, vollständig beschreibt.

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 unmöglich ist, das vorgegebene Problem zu lösen. Die Problemlösungs-

---

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

20) 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.

komponente 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 wird auf diese Weise fort von der Erstellung prozeduraler Anwendungsprogramme (Verarbeitungsalgorithmen), die bei der konventionellen Informationsverarbeitung dominiert, hin zur Formulierung adäquater Problembeschreibungen verlagert. Hierbei spielt die nonprozedurale Benutzeroberfläche von Expertensystemen eine ausschlaggebende Rolle. Infolge dieser Fokusverschiebung von algorithmischen zu deklarativen Aufgaben erlangen aus der Sicht des Expertensystem-Anwenders Schwierigkeiten der Problemwahrnehmung (Konzeptualisierung) und der Strukturierung diffuser, unklarer Problemumschreibungen (schlecht-strukturierte Probleme) verstärkte Bedeutung, die an dieser Stelle nur stichwortartig angerissen werden können.

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.

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.

## 2 Expertensysteme für die Arbeitsplanung

### 2.1 Konzeptionelle Grundlagen

Ausschlaggebend für die Entwicklung von CAPP-Expertensystemen, die im Bereich der Arbeitsplanung eingesetzt werden sollen<sup>21)</sup>, ist die Gestaltung ihrer Wissensbasen. 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 definiert. Sie bezeichnet zunächst den Arbeitsgang, durch dessen Ausführung ein Bearbeitungszustand 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 Arbeitsgangausführung erforderlich sind<sup>22)</sup>. 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 darstellen<sup>23)</sup>. Hinzu

---

21) Vgl. zu konzeptionellen Grundlagen solcher CAPP-Expertensysteme Steinacker (1985), S. 28ff.; Mill (1985), S. 258ff.; Krallmann (1986b), S. 408ff.; Krallmann (1986d), S. 101; Krallmann (1987b), S. 198ff. Knappe Hinweise auf die Einsatzmöglichkeit von Expertensystemen für die Arbeitsplanung finden sich auch bei Wildemann (1987), S. 31f.; Rethfeld (1987), S. 458; Kuhn (1987), S. 252; Steinmann (1987a), S. 207; Steinmann (1987b), S. 170.

22) Vgl. Wilkins (1984), S. 274ff. u. 282f.; Tate (1984), S. 411; Krallmann (1986d), S. 101; Tsang (1987), S. 74.

23) 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.

kommen unter Umständen noch Angaben über aktionsspezifische Bearbeitungsparameter, wie z.B. die Vorschubgeschwindigkeiten und Eindringtiefen von Schneidwerkzeugen, die Umdrehungsgeschwindigkeiten von Bohrspindeln oder Bearbeitungstoleranzen<sup>24)</sup>.

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 werden. Die reichhaltige Definition einer Aktion besitzt nonprozeduralen Charakter, weil durch eine isolierte Aktion noch kein bestimmter Arbeitsablauf vorgegeben ist. Dieses deklarative Aktionswissen wird durch - ebenso deklaratives - Ressourcenwissen ergänzt. Es enthält Informationen über die technischen Eigenschaften der o.a. Ressourcen, die in einem Produktionssystem für die Aktionsausführung zur Verfügung stehen. Hierbei kann es sich z.B. um Angaben über quantitativen und qualitativen Kapazitäten von Bearbeitungsmaschinen oder über die Anzahl von gleichartigen Transportrobotern handeln<sup>25)</sup>.

Da die Wissensakquisition von CAPP-Expertensystemen darauf beruht, daß die arbeitgangweise Ressourcen- und die Vorgabezeitplanung bereits ausgeführt worden sind, unterstützen diese Expertensysteme nur die Arbeitsgang- und die Arbeitsablaufplanung. Für diese Aufgaben hat allerdings die KI-Forschung ein interessantes, im Rahmen der konventionellen Informationsverarbeitung bislang unbekanntes Konzept erarbeitet. Es handelt sich um die Synthese von nonlinearen, hierarchisch verfeinerten

---

24) Vgl. Mouleeswaran (1985), S. 4 u. 11; Krallmann (1986d), S. 101.

25) Vgl. Grasmück (1985), S. 7ff.; Krallmann (1986d), S. 101.

Aktionsplänen<sup>26)</sup>, die auf Arbeiten von Sacerdoti über prozedurale Netze zurückgehen<sup>27)</sup>. Hinsichtlich ihrer automatischen Erzeugung wurden sie vor allem von Tate und Daniel fortentwickelt<sup>28)</sup>.

Bei der Synthese von Aktionsplänen geht ein Expertensystem von einer Produktionsaufgabe und seinem Wissen über zulässige Aktionen 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. Bei dieser hierarchischen Aufgaben- und Zielverfeinerung kann auf Modelle der zu fertigenden Endprodukte zurückgegriffen werden, die sich aus CAD-Systemen gewinnen lassen<sup>29)</sup>. Voraussetzung hierfür ist, daß die Produktmodelle - ebenfalls in hierarchischer Weise - aus Komponenten zusammengesetzt sind, deren Herstellung sich jeweils als eine Fertigungsaufgabe ausdrücken läßt.

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 zuneh-

---

26) Vgl. z.B. Sacerdoti (1975), S. 207ff.; Sacerdoti (1977), S. 2, 27ff. u. 52ff.; Daniel (1984), S. 423ff.; Chapman (1985), S. 1022ff., sowie die Literaturangaben in den nachfolgenden Fußnoten zu speziellen Aspekten dieser Plansynthese, insbesondere zu den u.a. Expertensystemen ABSTRIPS, NOAH, NONLIN 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.

29) Vgl. Nau (1983), S. 258; Grasmück (1985), S. 2f.; Krallmann (1986b), S. 409; Krallmann (1986d), S. 101; Krallmann (1987b), S. 199; vgl. auch die später erfolgenden Anmerkungen zur CAD-Anbindung der Expertensysteme GUMMEX (APLEX), FERPLAN und PROPLAN.

memdem Detaillierungsgrad immer mehr der Ausführung konkreter Aktionen an. Die Aufgabendekomposition wird erfolgreich beendet, wenn auf der tiefsten, detailliertesten Planungsebene alle Unterziele aus der Ausführung von Aktionen bestehen. Sie determinieren die Menge derjenigen Arbeitsgänge, die zur Produktherstellung erforderlich sind (Arbeitsgangmenge).

Ein CAPP-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 ihm eine Produktionsaufgabe vorliegt, identifiziert es selbständig eine zur Aufgabenerfüllung taugliche Arbeitsgangmenge<sup>30)</sup>. Durch diese Identifikationsleistung erfolgt also eine automatische Arbeitsgangplanung.

Ein hierarchisch verfeinerter Aktionsplan liefert aber nicht nur die Arbeitsgangmenge. Vielmehr folgt aus der o.a. inhaltlich angereicherten Aktionsdefinition, daß sich aus dem Aktionswissen auch die arbeitsgangweise Ressourcenplanung, die Ausführungsdauern der Ar-

---

30) Es kann durchaus der Fall sein, daß mehrere Arbeitsgangmengen existieren, welche dieselbe Produktionsaufgabe erfüllen. Expertensysteme für die automatische Synthese von Aktionsplänen suchen aber immer im allgemeinen nur nach einem zulässigen, aufgabenerfüllenden Plan. Grundsätzlich ließe sich diese Suche aber auf die Generierung mehrerer zulässiger Aktionspläne ausweiten. Diese automatische Synthese von Alternativplänen könnte an dem Planungskonzept anknüpfen, das von Daniel (1984), S. 441ff., beschrieben wird. Dort wird jeder Aktionsplan mit einem Entscheidungsgraphen verknüpft, der alle Verfeinerungsentscheidungen enthält, die während der Suche nach einem zulässigen Aktionsplan getroffen wurden. Durch Variation der Entscheidungen in diesem Graphen lassen sich alternative Aktionspläne erzeugen (sofern sie existieren). Eine simultane Betrachtung von alternativen Aktionsplänen 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.

beitsgänge und die Ausprägungen von Bearbeitungsparametern unmittelbar explizieren lassen. Bedeutsamer ist aber, daß die Arbeitsgangmenge am Ende der Aktionsplansynthese nicht strukturlos ist, sondern eine Halbordnung besitzt. Die Arbeitsgänge bilden einen nonlinearen Aktionsplan (Arbeitsplan), in dem manche Arbeitsgänge sequentiell aufeinander folgen, während andere keiner bestimmten Anordnung unterliegen. Dieser nonlineare, halbgeordnete Arbeitsplan drückt genau diejenigen technologischen Reihenfolgebeziehungen aus, die bei der Werkstückbearbeitung aufgrund technischer Sachzwänge eingehalten werden müssen<sup>31)</sup>.

Ein solcher Arbeitsplan 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 ge-

---

31) Die Gesamtheit dieser technischen Reihenfolgebeziehungen definiert eine Präzedenzrelation auf der Arbeitsgangmenge. Daher wird die Erzeugung eines derart halbgeordneten Aktionsplans 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 CAPP-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. 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 fertigungstechnischen Gründen erforderlich wäre. Um diese planungsbedingten Verzerrungen auszuschließen, wird fortan weiter von dem allgemeinen Konzept nonlinearer, nur halbgeordneter Arbeitspläne ausgegangen.

bildet werden. Die gerichteten Kanten zwischen diesen Knoten repräsentieren die technologischen Reihenfolgebeziehungen.

Der Aktionsplan läßt sich auch graphisch in der betriebswirtschaftlich vertrauten Weise eines Netzplans vom Vorgangsknotentyp repräsentieren. In ihm sind den Vorgängen (Arbeitsgängen) noch keine Start- und Endtermine zugeordnet<sup>32)</sup>. Aus der Perspektive der Netzplantechnik leisten CAPP-Expertensysteme also eine automatische Analyse und Konstruktion der Netzstruktur<sup>33)</sup>.

Tatsächlich erfolgt die Synthese von nonlinearen Aktionsplänen durch CAPP-Expertensysteme weitaus komplizierter, als hier skizziert wurde. Denn die wesentlichen Schwierigkeiten - und Leistungen - solcher Expertensysteme liegen in der konkreten Ausgestaltung der o.a. Dekompositionsstrategie<sup>34)</sup>. Es stellt ein ausgesprochen anspruchsvolles Planungsproblem dar, das Ziel, ein bestimmtes Produkt herzustellen, in eine halbgeordnete Arbeitsgangmenge zu transformieren. Bei der hierarchischen Verfeinerung besteht auf jeder Planungsebene eine Vielfalt möglicher Verfeinerungsfortsetzungen, von denen in der Regel nur wenige das angestrebte Ziel letztlich zu erfüllen vermögen. Welche Fortsetzungen in diesem Sinne erfolgreich sind, ist aber auf der jeweils aktuellen Planungsebene nicht ersichtlich. Daher können bei der Dekomposition der ursprünglichen Produktions-

---

32) Vgl. Wilkins (1984), S. 294f.

33) 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.

34) 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.

aufgabe "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 (backtracking-Strategie<sup>35</sup>).

Von den Konzepten, die der Dekompositionsstrategie bei der hierarchischen Planverfeinerung zugrundegelegt werden, hängt die Effizienz der Aktionsplan-Synthese durch ein Expertensystem entscheidend ab. Sie bilden einen wesentlichen 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 angewendet<sup>36</sup>. Es würde den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen, die alternativen Dekompositionsstrategien zu erläutern, die für die hierarchische Verfeinerung von Aktionsplänen entwickelt worden sind<sup>37</sup>.

---

35) Vgl. Sacerdoti (1980), S. 8f. u. 10; Arlabosse (1987), S. 385f.; Cunis (1987b), S. 22; vgl. auch zur backtracking-Strategie im allgemeinen, also ohne Bezug auf die Synthese von Aktionsplänen, Zelewski (1986a), S. 257, und die dort angegebenen Quellen.

36) Vgl. zu diesem Kontroll- oder Metawissen Wilkins (1984), S. 294ff.; Cunis (1987b), S. 20ff. u. 29. Seine Anwendung durch die Problemlösungskomponente wird oftmals als Metaplanung bezeichnet.

37) 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.

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

Bemerkenswert ist aber die Strategie des verteilten (distributed) Problemlösens, die in jüngster Zeit für die Generierung von Aktionsplänen zunehmend Beachtung findet<sup>38)</sup>. Sie beruht auf Expertensystemen mit einer blackboard-Architektur<sup>39)</sup>. 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 dieser Informationsbasis durch die Agentenoperationen dynamisch verändert wird. Zum Zweck der Aktionsplansynthese 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 ge-

---

38) Vgl. Cunis (1987a), S. 417f.; Cunis (1987b), S. 22ff.

39) 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.

löst<sup>40</sup>). Häufig erfolgt die Konfliktlösung in opportunistischer Weise<sup>41</sup>). Es wird demjenigen Agenten die Planverfeinerung gestattet, dessen Operation aufgrund von heuristischen Auswahlregeln am erfolgversprechendsten erscheint<sup>42</sup>). Zusätzlich können "weiche" Restriktionen spezifiziert werden, die bei der Planverfeinerung nach Möglichkeit erfüllt werden sollen, aber aufgehoben werden können, falls kein zulässiger Aktionsplan gefunden wird<sup>43</sup>).

---

40) 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 vorgenannten 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.

41) 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.

Die Generierung eines Aktionsplans 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.

42) 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 Aktionsplan 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.

43) Vgl. Wilkins (1984), S. 278ff.; Descotte (1985), S. 183f. u. 197ff.

Die Expertensysteme ABSTRIPS<sup>44)</sup>, NOAH<sup>45)</sup>, NONLIN<sup>46)</sup> und SIPE<sup>47)</sup> stellen Implementierungen des Konzepts der automatischen Generierung von nonlinearen, hierarchisch verfeinerten Aktionsplänen dar. Zur Zeit wird für dieselbe Aufgabe das PLAKON-Konzept<sup>48)</sup> im Rahmen des Verbundprojekts TEX-K<sup>49)</sup> entwickelt, das vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wird. Auf seiner Grundlage sollen künftig entsprechende Expertensysteme implementiert werden.

Die vorgenannten implementierten bzw. konzipierten Expertensysteme sind allerdings 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

- 
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 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.
- 47) SIPE steht für "System for Interactive Planning and Execution Monitoring"; vgl. hierzu Wilkins (1984), S. 271ff. Dieses Expertensystem kann in zwei Modi genutzt werden. Sowohl die vollautomatische Synthese von Aktionsplänen als auch deren interaktive, halbautomatische Generierung sind möglich.
- 48) 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.
- 49) TEX steht für "Technische Expertensysteme", der Zusatz "K" (vermutlich) für "Planungs- und Konfigurierungsaufgaben".

dieser Expertensysteme untersucht wurden, lassen sich jedoch in die betriebliche Arbeitsplanung einordnen. Erstens handelt es sich um die Anwendung des Systems NOAH, bei der ein Montageplan für einen Luftkompressor erzeugt wird<sup>50)</sup>. Zweitens ist eine fortentwickelte Version des Exemplars NONLIN eingesetzt worden, um den Arbeitsplan für die Überholung eines elektrischen Turbo-generators zu generieren<sup>51)</sup>. Drittens wurde das Konzept PLAKON getestet, indem ein Arbeitsplan für die Vornahme von Bohrungen, Spanabhebungen und Lackierungen an einem Werkstück erstellt wurde<sup>52)</sup>.

Speziell auf den Einsatz von Expertensystemen für die Arbeitsplanung in der metallverarbeitenden Industrie ist dagegen das AMRF-Projekt<sup>53)</sup> 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 Fertigungsauftrags 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 modularen Strukturen (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 fertigungstechnische Restriktionen, die

---

50) Vgl. Sacerdoti (1977), S. 76ff.

51) Vgl. Daniel (1984), S. 446ff.

52) Vgl. Cunis (1987b), S. 14ff.

53) AMRF steht für "Automated Manufacturing Research Facility"; vgl. hierzu Nau (1983), S. 254 u. 256ff., insbesondere S. 258ff.; Miller (1984), S. 83.

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.

In der Regel werden diese fertigungstechnischen 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 rekursiver Weise durchsucht das Expertensystem seine Wissensbasis nach einer Arbeitsgangfolge, welche die gewünschte Oberflächenstruktur zu realisieren vermag. Des Weiteren ist eine Benutzerschnittstelle vorgesehen, über die ein Benutzer interaktiv die fehlenden Arbeitsgänge spezifizieren kann, wenn die gesuchte Arbeitsgangfolge nicht vollständig synthetisiert werden kann. Durch Abarbeiten aller Werkstückoberflächen resultiert schließlich der Arbeitsplan für den vorliegenden Fertigungsauftrag.

Dieses Konzept ist infolge seiner Orientierung an Werkstückoberflächen noch recht beschränkt. Es ließe sich beispielsweise dadurch erweitern, daß auf den Ansatz der Teilefamilienbildung (Gruppentechnologie) zurückgegriffen wird. Für Teile mit fertigungstechnisch verwandten Arbeitsgangkombinationen wird jeweils ein Wissensmodul mit den entsprechenden Aktionsbeschreibungen vorgehalten. Es erstreckt sich z.B. auf Informationen über die erforderlichen Arbeitsgänge und Materialqualitäten, über die vorhandenen Bearbeitungsmaschinen sowie die geometrischen Teilegestalten (für die Bahnsteuerung von Bearbeitungswerkzeugen). Auf dieser Basis

böten sich Expertensysteme vor allem für die Arbeitsplanung im Rahmen der Ähnlichkeitsplanung an<sup>54</sup>).

Wenn ein Fertigungsauftrag die Produktion erreicht, 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 lassen. 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) Inferenzfähigkeit<sup>55</sup>). Mit ihrer Hilfe vermag es aufgrund der Beschreibung des Fertigungsauftrags selbständig zu erschließen, welche Teilefamilien hinreichend ähnlich sind, um sie zur Fertigung 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 Fertigungsauftrag anpaßt.

Oftmals stehen für dieselbe Fertigungs(teil)aufgabe - etwa die dauerhafte Verbindung zweier Blechteile - mehrere technische Verfahrenskonzepte alternativ zur Verfügung, wie z.B. Bördel-, Niet-, Schraub- oder Schweißverfahren. Ein teilefamilienspezifisches Wis-

---

54) Falls ein Fertigungsauftrag 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.

55) Vgl. zu assoziativen Inferenzfähigkeiten von Expertensystemen Zelewski (1986), S. 175, 217f. u. 703f.

sensmodul kann in einem solchen Fall 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. 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 Fertigungsauftrag am besten entsprechen. Als Ergebnis resultiert schließlich der auftragspezifische Arbeitsplan mit den arbeitsgangbezogenen Ressourcenanforderungen.

Die Aufgabe der Arbeitsplanung ist mit der Vorlage eines Arbeitsplans gewöhnlich erfüllt. Die computergestützte Generierung von Arbeitsplänen legt es jedoch 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 in einigen Ansätzen geleistet. Daher eröffnen Expertensysteme in dieser Hinsicht keine grundsätzlich neuartige Computerunterstützung, sondern nur eine Variante bereits vorliegender Automaten<sup>56)</sup>.

---

56) Einen Überblick über die Beiträge der KI-Forschung zur automatischen Generierung von NC-Steuerungsprogrammen gewährt Kaplansky (1985), S. 30ff.

## 2.2 Exemplarische Expertensysteme zur Unterstützung der Arbeitsplanung

Expertensysteme für die Identifizierung von Arbeitsgangmengen und für die Synthese zugehöriger Arbeitspläne sind seitens der KI-Forschung in zahlreichen Exemplaren hervorgebracht worden<sup>57)</sup>. Im Gegensatz zu den o.a. allgemeinen Expertensystemen für die Synthese nichtlinearer Aktionspläne besitzen sie jedoch (noch) nicht die Fähigkeit, die Arbeitsgangmenge, die zur Erfüllung einer Produktionsaufgabe erforderlich ist, (voll-)automatisch zu identifizieren. Vielmehr setzen alle nachfolgend angeführten CAPP-Expertensysteme im Hinblick auf neuartige Produktionsaufgaben<sup>58)</sup> voraus, daß ihre Benutzer die erforderlichen Arbeitsgänge in einem Dialog mit den Automaten interaktiv spezifizieren.

Das Expertensystem GUMMEX<sup>59)</sup> wurde vom Battelle-Institut e.V. 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

---

57) Vgl. zu weiteren, nachfolgend nicht aufgeführten Exemplaren Leclair (1985), S. 246ff.; Rauch-Hindin (1985), S. 5ff.; Jardine (1986), S. 262ff.; Young (1987), S. 51ff.; Hansen (1987), S. 692ff.; sowie die bereits o.a. Applikationen der Expertensystem(konzept)e NOAH, NONLIN und PLAKON auf Arbeitsplanungsaufgaben. Auch die in Kapitel 3.2 vorgestellten Expertensysteme für die Terminfeinplanung involvieren die Fähigkeit, automatisch Arbeitspläne zu erzeugen, gehen jedoch hierüber durch ihre auftragsbezogene Termin- und Ressourcenplanung noch deutlich hinaus.

58) 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.

59) 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.

(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 Konstruktionskonzept wie das Exemplar GUMMEX beruht auch das Expertensystem APLEX<sup>60)</sup>. Es wird zur Arbeitsplanung für die fräsende und bohrende Bearbeitung von Werkstücken in flexiblen Bearbeitungszentren eingesetzt.

Auf der interaktiven Plansynthese beruht auch das Expertensystem CEMAS<sup>61)</sup>. Es enthält in seiner Wissensbasis das Modell einer flexiblen Fertigungszelle mit ihren Bearbeitungsmaschinen, Lagerplätzen und Transportvorrichtungen. Hinzu kommen Informationen über die Arbeitsgänge, die in der Fertigungszelle ausgeführt werden können. Für einen gegebenen Fertigungsauftrag erzeugt das Expertensystem in der Regel mehrere zulässige 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. Das Expertensystem unterstützt diese Interaktion dadurch, daß es seinen Benutzer auf kritische Aspekte der jeweils evaluierten Planungsalternativen hinzuweisen vermag.

Das Expertensystem FERPLAN<sup>62)</sup> erzeugt Arbeitspläne für das Stanzen von Blechteilen. Es geht von qualita-

---

60) APLEX steht (vermutlich) für "ArbeitsPLANungs-EXpertensystem"; vgl. hierzu Trum (1985), S. 1ff., allerdings ohne explizite Nennung des Expertensystems APLEX; Mörlner (1986), S. 6X-7ff.; Trum (1986), S. 69ff.

61) CEMAS steht für "Cell MANufacturing System"; vgl. hierzu Gliviak (1984), S. 154f.

62) FERPLAN steht (vermutlich) für "Expertensystem zur FERTigungsPLANung"; vgl. hierzu Grasmück (1985), S. 1ff.

tiven, nicht-geometrischen Beschreibungen der herzustellenden Produkte, von Spezifizierungen der erforderlichen Rohmaterialien und von der auftragsspezifischen Produktanzahl aus. Da die produktdefinierenden Daten, die in CAD-Systemen erzeugt und gespeichert werden, im allgemeinen numerisch-geometrischen Charakter besitzen, können die Produktbeschreibungen nicht - wie etwa beim o.a. Expertensystem GUMMEX - aus einer angekoppelten CAD-Expertensystem unmittelbar übernommen werden, sondern bedürfen einer zwischengeschalteten Transformation in qualitative Beschreibungsschemata, die auf hierarchisch strukturierten Zusammensetzungen von Produktkomponenten beruhen<sup>63</sup>). Diese Transformation erfolgt wieder im Rahmen eines Dialogs mit dem Systembenutzer.

Auf die Generierung von Arbeitsplänen für rotations-symmetrische Werkstücke, die auf Drehmaschinen gefertigt werden, ist das Expertensystem PROPLAN<sup>64</sup>) spezialisiert. Es wird in Princeton von der Siemens Corporate Research and Support, Inc. entwickelt. Als Besonderheit verfügt dieses Expertensystem über eine CAD-Schnittstelle, die es gestattet, numerisch-geometrische Produktbeschreibungen aus einem CAD-System einzulesen und automatisch in eine symbolisch-qualitative Beschreibung für die anschließende Arbeitsplansynthese zu transformieren.

Der Aspekt der Wissensbasierung von Expertensystemen für die Arbeitsplanung wird anhand des Exemplars GARI<sup>65</sup>) besonders deutlich. Es wurde für komplexe Bearbeitungsaufgaben in der metallbearbeitenden Industrie entwickelt. Die Generierung von Arbeitsplänen greift auf zwei unterschiedliche Wissensquellen zurück. Einer-

---

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

64) PROPLAN steht für "PROcess PLANning (Expert System)"; vgl. hierzu Mouleeswaran (1985), S. 2ff.; Phillips (1985), S. 10-4ff.; Krallmann (1986b), S. 410.

65) Vgl. Descotte (1981a), S. 2ff.; Descotte (1981b), S. 766ff.; Descotte (1985), S. 198ff.

seits werden auftragsbezogene Informationen über die geometrische Werkstückgestalt, die Oberflächeneigenschaften, die erforderlichen Arbeitsgänge und die zulässigen Fertigungstoleranzen 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.

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 PINC<sup>66)</sup> für die interaktive - also noch nicht einmal vollautomatische - Generierung von NC-Teilprogrammen 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 unterbreitet<sup>67)</sup>, 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 abgeleitet<sup>68)</sup>. Auch das Expertensystem TOM<sup>69)</sup> leistet die automatische

---

66) Vgl. Koch (1988), S. 95ff.

67) Vgl. Goscinski (1981), S. 191ff.; Szuba (1984), S. 234ff.

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

69) TOM steht für "Technostructure Of Machining"; vgl. hierzu Matsushima (1982), S. 329ff., insbesondere S. 331f,

Generierung von Arbeitsplänen und deren direkte Umsetzung in NC-Teileprogrammen.

Die Computer Aided Manufacturing-International, Inc. (CAM-I) betreibt zur Zeit das Projekt IMPACT<sup>70)</sup>. Ziel ist die Entwicklung von Expertensystemen, die sich an dreidimensionale CAD-Systeme koppeln lassen und in der Lage sind, aus den numerisch-geometrischen Produktbeschreibungen vollautomatisch Arbeitspläne und Teileprogramme für die Steuerung von (C)NC-Maschinen abzuleiten. An diesem Projekt beteiligen sich zahlreiche bedeutsame US-amerikanische Industrieunternehmungen<sup>71)</sup> und staatliche Institute.

Einen eng begrenzten Teilaspekt der Arbeitsplanung deckt das Expertensystem PP<sup>72)</sup> ab. Es unterstützt die Auswahl und "Optimierung" der Steuerungsparameter von NC-Maschinen, die zur Bearbeitung der Werkstücke eines Fertigungsauftrags eingesetzt werden sollen. Seine Funktion ist an der Schnittstelle zwischen Expertensystemen für die Arbeitsplansynthese einerseits und Expertensystemen zur Generierung von NC-Steuerungsprogrammen andererseits angesiedelt.

---

70) IMPACT steht für "Intelligent Manufacturing Planning and Control Technology"; vgl. hierzu Lineback (1984), S. 17f.; Becker (1985), S. 219.

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

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

### 3 Expertensysteme für die Terminfeinplanung und -steuerung

#### 3.1 Konzeptionelle Grundlagen

Vielfach werden Expertensysteme als PPS-Systeme<sup>73)</sup> für Aufgaben empfohlen, die aus der Produktionsplanung und -steuerung stammen<sup>74)</sup>. Im Kontext der Fabrik der Zukunft gehören hierzu auch die zahlreichen Hinweise, Expertensysteme zur Realisierung des CIM-Konzepts heranzuziehen<sup>75)</sup> oder für das operative Management von Fle-

---

73) PPS steht für "Produktions-Planung und -Steuerung".

74) Der Einsatz von Expertensystemen (Künstlicher Intelligenz) für die o.a. Aufgabenbereiche wird von einer Vielzahl von Autoren angesprochen; vgl. etwa Chang (1985), S. 24ff.; Mertens (1985), S. 36; Kempf (1985), S. 22f.; Marchand (1985b), S. 145; Berard (1985), S. 348; Pabst (1985), S. 176; Krallmann (1986a), S. 140f.; Krallmann (1986b), S. 405ff.; Krallmann (1986c), S. 74f.; Krallmann (1986d), S. 101ff.; Hörnig (1986), S. 426 u. 428; Grant (1986a), S. 1ff.; Grant (1986b), S. 41ff.; Fröhner (1986), S. 169; Fox (1986b), S. 308; Wildemann (1987), S. 24ff.; Krallmann (1987a), S. 129 u. 131; Krallmann (1987b), S. 195ff.; Steinmann (1987a), S. 205ff. u. 225ff.; Kuhn (1987), S. 253ff.; Mertens (1987), S. 117; Neipp (1987), S. 81; Stockert (1987), S. 326, 329, 336ff. u. 352f.; Groditzki (1987), S. 507f.; Steinmann (1987b), S. 170; Pyper (1987), S. 32, der ein Statement von Mertens referiert.

Auch wurde bereits eine internationale Konferenz über die Einsatzmöglichkeiten von Expertensystemen für Produktionsplanungs- und -steuerungsaufgaben abgehalten (International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, 11.-13.05.1987 in Charleston/USA, deren Proceedings dem Autor allerdings nicht zugänglich waren); vgl. o.V. (1987), S. 7.

75) Vgl. hierzu die im Kapitel 1.1 angeführten Quellen.

xiblen Fertigungssystemen einzusetzen<sup>76)</sup>. In dieser Ausarbeitung werden aus den zahlreichen Teilfunktionen von PPS-Systemen nur die Bereiche der Termin(fein)planung und -steuerung<sup>77)</sup> näher untersucht<sup>78)</sup>.

---

76) Vgl. Ranky (1983), S. 53ff.; Shaw (1985), S. 184ff.; Subramanyam (1986), S. 244ff., insbesondere S. 249ff.; Turban (1986), S. 373ff., insbesondere S. 378ff. (dort werden allerdings eine Reihe von Systemen aufgeführt, die keine Bezüge zu PPS-Systemen erkennen lassen, wie z.B. das auf S. 381 angeführte System Palladio); Shaw (1986a), S. 223ff., insbesondere S. 227ff.; Shaw (1986b), S. 546ff.; Thesen (1986), S. 556 u. 558ff.; Lin (1986), S. 568ff.; Shen (1986), S. 581f. u. 585 (jedoch mit inhaltlich dubiosem Bezug zur Künstlichen Intelligenz); Kusiak (1987), S. 8ff.; Kiratli (1987), S. 165ff.; Krallmann (1987a), S. 134.

77) Es wurde bereits eingangs darauf hingewiesen, daß die Termingrobplanung nicht näher berücksichtigt wird. Daher kann vereinfachend auf das präzisierende Infix "-fein-" verzichtet, also nur noch von Terminplanung und -steuerung gesprochen werden.

78) Vgl. zu dieser engen Auslegung Kern (1980), S. 283. Vgl. dagegen Steinmann (1987a), S. 206ff., mit einer detaillierten Auflistung potentieller Expertensystemeinsätze für Teilbereiche eines weit gefaßten PPS-Konzepts, die auf S. 227ff. exemplarisch vertieft werden.

Im Bereich der Flexiblen Fertigungssysteme werden PPS-Systeme zumeist nicht unter dem Aspekt der Terminplanung und -steuerung, sondern unter den Perspektiven der Maschinenbelegung (scheduling) und des Durchschleusens von Fertigungsaufträgen durch das Fertigungssystem (routing) betrachtet. Inhaltlich unterscheiden sich die vorgenannten Betrachtungsweisen aber - bei hinreichend abstrakter Behandlung - nicht wesentlich, so daß sie nachfolgend alle unter die Terminplanung und -steuerung von PPS-Systemen subsumiert werden.

### 3.1.1 Terminplanung

Zunächst wird nur der Aspekt der fabrikorientierten Terminplanung betrachtet<sup>79)</sup>. Ihr Rahmen wird durch ein Produktionsprogramm gesteckt, das in der Regel die Herstellung mehrerer Produkte in unterschiedlichen Mengen für den Planungszeitraum vorgibt. Die Resultate der Arbeitsplanung werden hierbei als bekannt vorausgesetzt. Es kann auf die nonlinearen, hierarchisch verfeinerten Arbeitspläne zurückgegriffen werden, deren Synthese mit Hilfe der Künstlichen Intelligenz im voranstehenden Kapitel skizziert wurde.

Die Planung der Starttermine aller Arbeitsgänge, die zur Realisierung des gesamten Produktionsprogramms erforderlich sind, erfolgt zumeist innerhalb eines restriktionsorientierten Planungskonzepts<sup>80)</sup>. Hierbei wird versucht, zulässige Terminpläne zu erzeugen. Ein Terminplan ist genau dann zulässig (friktionsfrei), wenn er gestattet, das gesamte Produktionsprogramm im Planungszeitraum zu realisieren, und wenn zugleich eine große Anzahl von Restriktionen eingehalten wird. Als Restriktionen werden hierbei vor allem berücksichtigt<sup>81)</sup>:

---

79) Vgl. zu Konzepten für die fabrikorientierte Terminplanung durch Expertensysteme Meyer, F. (1987), S. 408ff.; vgl. auch die nachfolgend zu Detailspekten angeführte Literatur.

80) Die Restriktionsorientierung von Ansätzen für die fabrikorientierte Terminplanung tritt besonders plastisch zu Tage bei Fox (1982b), S. 81f.; Fox (1984a), S. 25f., 28ff. u. 33ff.; Fox (1984c), S. 6-14 u. 6-16; Doumeingts (1985), S. 205ff.; Le Pape (1985b), S. 199ff.; Fox (1986c), S. 4ff.; Smith (1986b), S. 46ff.; Krallmann (1986b), S. 407; Meyer, W. (1987), S. 410. Vgl. auch Descotte (1985), S. 184 u. 198, der sich allerdings auf die Arbeitsplanung bezieht. Siehe allgemein zur restriktionsorientierten Wissensrepräsentation ohne speziellen Fabrikbezug Sussman (1980), S. 1ff.; Stefik (1981), S. 112ff. u. 134ff.

81) Vgl. Tsang (1987), S. 66ff.; Cunis (1987b), S. 11.

- die technischen Reihenfolgebeziehungen, die für die Arbeitsgänge jedes Produkts in dessen Arbeitsplan enthalten sind;
- die Ausführungsdauern dieser Arbeitsgänge und
- die Kapazitätsbeschränkungen der zur Verfügung stehenden Ressourcen, insbesondere der Maschinenausrüstung der Fabrik.

Die Terminplanung stellt somit eine kombinierte Zeit- und Ressourcenplanung dar<sup>82)</sup>.

Voraussetzung für die Abbildung dieser Restriktionen in der Wissensbasis eines Expertensystems ist ein umfassendes Modell desjenigen Produktionssystems, in dem die Fertigungsaufträge ausgeführt werden sollen (Produktionsmodell). Daher hat die KI-Forschung die Entwicklung komplexer Produktionsmodelle ebenso stimuliert, wie sie von den bereits vorliegenden, im Rahmen der konventionellen Informationsverarbeitung erarbeiteten Produktionsmodellen befruchtet wurde. Beispielsweise wird für den Entwurf von PPS-Expertensystemen derzeit das - ohne Bezug auf intelligente Automaten etablierte - GRAI-Konzept<sup>83)</sup> zur Modellierung von flexiblen Fertigungssystemen herangezogen<sup>84)</sup>.

---

82) Ähnlich äußert sich Cunis (1987b), S. 11.

83) GRAI ist der Name des Laboratoriums an der Universität Bordeaux (I), an dem das o.a. Konzept entwickelt wurde; vgl. hierzu Doumeingts (1984), S. 200ff.

84) Vgl. Berard (1985), S. 345ff.; Doumeingts (1985), S. 202ff.; Meyer, W. (1987), S. 405ff.

Ein zulässiger Terminplan wird zumeist durch eine Implementierung des Konzepts der Restriktionspropagierung (constraints propagation)<sup>85)</sup> ermittelt. Hierbei wird zumeist in der folgenden zweistufigen Weise vorgegangen. Zunächst erfolgt die Einplanung eines ausgewählten Arbeitsgangs durch sukzessives Einbeziehen aller Restriktionen. Der Starttermin des Arbeitsgangs wird so festgelegt, daß eine Auswahl aus den vorgegebenen Restriktionen erfüllt wird. Anschließend werden einige derjenigen Restriktionen ergänzt, die im vorangehenden Schritt in der Restriktionsauswahl noch nicht enthalten waren. Diese Erweiterung der Menge relevanter Restriktionen wird fortgesetzt, bis alle Restriktionen erfaßt sind. Hierbei muß die ursprüngliche Arbeitsgangeinplanung revidiert werden, falls sie unter zusätzlichen Restriktionen nicht mehr friktionsfrei ist. Auf der zweiten Planungsstufe geht der Starttermin des eingeplanten ersten Arbeitsgangs als neue Restriktion in die Planung des zweiten Arbeitsgangs ein, für den die o.a. erste Planungsstufe erneut durchlaufen wird<sup>86)</sup>. In dieser rekursiven Verschränkung der beiden Planungsschritte wird so lange fortgeschritten, bis alle erforderlichen Arbeitsgänge in einem zulässigen Terminplan friktionsfrei angeordnet sind<sup>87)</sup>.

---

85) Vgl. zur Restriktionspropagierung im Rahmen der fabrikorientierten Terminplanung Smith (1983), S. 1 u. 14ff.; Fox (1984a), S. 37ff.; Rauch-Hindin (1985), S. 18f.; Meyer, W. (1987), S. 406 u. 410; Tsang (1987), S. 66ff.; siehe auch die Ausführungen in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 zur Terminplanung durch die Expertensysteme SOJA bzw. ISIS.

Vgl. auch Descotte (1985), S. 185 u. 199, der sich allerdings auf die Arbeitsplanung bezieht. Siehe allgemein zum Planungskonzept der Restriktionspropagierung ohne speziellen Fabrikbezug Sussman (1980), S. 1ff.; Stefik (1981), S. 115; Cunis (1987a), S. 412.

86) Wenn im Folgeschritt eine friktionsfreie Planung des Starttermins des nächsten Arbeitsgangs unmöglich ist, kann auf die vorangehende Planungsstufe zurückgeschritten und eine alternative Startterminplanung vorgenommen werden (backtracking).

87) Oder das Expertensystem erkennt, daß eine solche friktionsfreie Terminplanung nicht möglich ist.

Durch die Restriktionspropagierung wird immer nur ein zulässiger Terminplan erzeugt. Alle bisher vorgestellten fabrikbezogenen Terminplanungskonzepte der KI-Forschung zeichnen sich durch diesen Satisfizierungscharakter aus<sup>88</sup>). Hierdurch unterscheiden sie sich deutlich von den üblichen betriebswirtschaftlichen Terminplanungsmodellen, in denen fast immer eine Zielfunktion extremiert - d.h. minimiert oder maximiert - wird (Optimierungsmodelle).

Dieses Optimierungsdefizit von Expertensystemen für die Terminplanung ist aus theoretischer Sicht bedeutsam. Aus der Perspektive praktischer Terminplanungsaufgaben spielt es jedoch keine wesentliche Rolle. Denn die eingangs angeführten Störungen realer Produktionssysteme bei der Ausführung der geplanten Produktionsprozesse führen dazu, daß theoretisch ermittelte Planungsoptima zumeist nicht realisiert werden können<sup>89</sup>). Noch bevor ein optimaler Terminplan vollständig ausgeführt ist, ändern sich im allgemeinen die realen Produktionsbedingungen als Rahmenvorgaben der Terminplanung so stark, daß - im Sinne der Terminsteuerung - eine Anpassungsplanung vorgenommen werden muß. Infolge dieser Umsetzungsmängel optimaler Terminpläne reicht das Satisfizierungsniveau "nur" zulässiger Terminpläne für praktische Terminplanungs- und -steuerungsaufgaben in der Regel voll aus.

---

88) Daher vermag der Verf. Behauptungen nicht zu folgen, die einzelnen Expertensystemen für die fabrikorientierte Terminplanung die Erzeugung optimaler oder bestmöglicher Terminpläne zuschreiben. Vgl. hierzu beispielsweise die Anmerkungen im Kapitel 3.2.2. zum Expertensystem ISIS; vgl. auch Meyer, W. (1987), S. 405 (dort wird der Künstlichen Intelligenz die Aufgabe zugeordnet, bei der Terminplanung "Optimization Problems" zu lösen).

89) Vgl. Kern (1980), S. 279; Scheer (1983), S. 141f.; Kempf (1985), S. 17f., mit dem plastischen Verweis aus Murphy's "Gesetz", dem zufolge - frei auf PPS-Systeme übertragen - alle Störungen, die sich denken lassen, auch tatsächlich eintreten; Fox (1985), S. 487f.

Die Komplexität der fabrikorientierten Terminplanung wird bei realistischen Problemstellungen zumeist nicht beherrscht. Denn die Anzahl möglicher Zuordnungen zwischen Arbeitsgängen, Ressourcen und Startterminen der Arbeitsgänge unterliegt einer "kombinatorischen Explosion"<sup>90)</sup>. Dieses Phänomen erschwert bereits die konventionelle Maschinenbelegungsplanung bei Werkstattfertigung erheblich<sup>91)</sup>. Es wird durch die zusätzlichen Freiheitsgrade in Flexiblen Fertigungssystemen - etwa die Auswahlmöglichkeit zwischen unterschiedlichen Maschinen für die Ausführung desselben Arbeitsgangs - für die Fabrik der Zukunft noch gesteigert<sup>92)</sup>. Als typisches Beispiel hierfür sei die Fertigung gedruckter Schalt-

---

90) Vgl. Fox (1985), S. 487f.; Fox (1986b), S. 304; Meyer, W. (1987), S. 410.

91) Vgl. etwa Kern (1980), S. 279, oder Fox (1984a), S. 26f., zu der traditionell verwendeten Formel  $N=(n!)^m$ , um die Anzahl  $N$  derjenigen Zuordnungen zu ermitteln, die aus  $n$  Arbeitsgängen (Aufträgen) und  $m$  Arbeitsplätzen (Maschinen oder Arbeitskräften) kombiniert werden können. Hierbei ist die zusätzliche Festlegung von Startterminen für die Arbeitsgänge noch nicht einmal (explizit) berücksichtigt. Die kombinatorische Explosion beruht auf dem außerordentlich raschen Wachstum, das sowohl die Fakultätsfunktion  $f(x)=x!$  als auch die Exponentialfunktion  $f(x)=c^x$  kennzeichnet.

Für realistische Zuordnungsprobleme nimmt die Komplexität der konventionellen Maschinenbelegungsplanung schnell Ausmaße an, die - im optimierenden Sinne - praktisch nicht mehr bewältigt werden können. Beispielsweise sind für die Herstellung eines Schiffsdieselmotors ca. 40.000 Arbeitsgänge erforderlich, die von etwa 1.000 Arbeitskräften erbracht werden müssen; vgl. Kern (1980), S. 279. Schon für jeweils 1% der Arbeitsgänge und der Arbeitskräfte würden sich nach der o.a. Berechnungsformel mehr als  $10^{479}$  zulässige Zuordnungen ergeben (für die hundertmal größeren Anzahlen von Arbeitsgängen und Arbeitskräften übersteigen die Berechnungsformeln schon die Kapazität üblicher mathematischer Tabellenwerke!). Ein abstrakter Suchraum mit ebenso vielen Elementen müßte von optimierenden Methoden für Terminplanungsprobleme durchsucht werden, um die intendierte bestmögliche Lösung aufzufinden. Diese Größenordnung wird mit derzeit zur Verfügung stehenden Informationsverarbeitungssystemen (und akzeptierten Verarbeitungsressourcen) nicht beherrscht.

92) Vgl. Fox (1986b), S. 304.

kreise in einem Flexiblen Fertigungssystem betrachtet. Je Tag sollen laut Produktionsprogramm 6.000 Schaltkreise aus 50 verschiedenen Schaltkreistypen auf 12 Maschinen gefertigt werden, von denen drei gleiche Arbeitsgänge ausführen können. Wenn im Rahmen der Auftragsumwandlung 8 Fertigungsaufträge gebildet wurden, so existieren mehr als 6 Milliarden mögliche Zuordnungskombinationen<sup>93)</sup>.

Aus diesem Grund erfolgt in der betrieblichen Praxis - für Produktionen im Rahmen der Werkstattfertigung, insbesondere bei Flexiblen Fertigungssystemen - keine fabrik-, sondern eine maschinenorientierte Terminplanung. Die letztgenannte Planungsart beruht auf dem betriebswirtschaftlich vertrauten Konzept der prioritätsregelgestützten Auftragseinlastung<sup>94)</sup>. Hierbei werden jeweils nur eine isolierte Maschine und die Menge jener Fertigungsaufträge betrachtet, deren zugehörigen Werkstücke im Eingangslager der Maschine auf Bearbeitung warten. Für den nächsten Arbeitsgang an der Maschine wird genau ein Auftrag nach Maßgabe einer oder mehrerer<sup>95)</sup> Prioritätsregel(n) ausgewählt (eingelastet). Die Prioritätsregeln drücken heuristisches Wissen darüber aus, welche Vorgehensweisen sich in der Vergangenheit für die Auftragsauswahl erfolgreich bewährt haben (sollen).

Die Terminplanung erfolgt als Auftragseinlastung an allen Maschinen einer Fabrik in der Gestalt von entsprechend vielen maschinenspezifischen Termin(teil)plänen. Der Terminplan für das gesamte Produktionsprogramm ergibt sich hieraus mittelbar, indem die Fertigungsaufträge die Maschinen eines Produktionssystems jeweils in denjenigen Reihenfolgen durchsetzen, die von den Ar-

---

93) Vgl. Meyer, W. (1987), S. 410.

94) Vgl. zur heuristischen Terminplanung (Maschinenbelegungsplanung) mit der Hilfe von Prioritätsregeln im betriebswirtschaftlichen Kontext Conway (1967), S. 141ff., insbesondere S. 152ff.; Hoch (1973), S. 105ff.

95) Nachfolgend wird vereinfachend von nur einer Prioritätsregel ausgegangen.

beitsplänen der Produkte vorgeschrieben werden<sup>96)</sup>. Da die Prioritätsregeln nur in lokaler Weise diejenigen Aufträge berücksichtigen, die vor einer Maschine auf Bearbeitung warten, kann keine globale Optimierung der Terminplanung erfolgen. Die in der Praxis vorherrschende suboptimale, heuristische Terminplanung auf der Basis von Prioritätsregeln stützt nochmals die oben geäußerte praktische Unwesentlichkeit des Optimierungsdefizits von Expertensystemen für die Terminplanung.

---

96) Der Einfachheit halber wird hier unterstellt, daß die Herstellung aller Einheiten eines Produkts, deren Anzahl im Produktionsprogramm festgelegt ist, genau einem Fertigungsauftrag entspricht. Dann kann der Arbeitsplan für die Herstellung (einer Einheit) des Produkts unverändert auf die Auftragsausführung übertragen werden. Die Verhältnisse liegen jedoch komplizierter, wenn im Rahmen der Auftragsumwandlung ein produktbezogener Kundenauftrag in mehrere werkstückbezogene Fertigungsaufträge gesplittet wird oder falls mehrere Kundenaufträge, die sich auf unterschiedliche, aber fertigungsverwandte Produkte beziehen, in einem Fertigungsauftrag zusammengefaßt werden. Die beiden letztgenannten Komplikationen können auch kombiniert auftreten. Dies ist z.B. bei Baukastensystemen der Fall, sofern sich Kundenaufträge aus unterschiedlichen Bausteinen zusammensetzen (jeder Baustein führt zu einem anderen Fertigungsauftrag) und mehrere dieser Produkte in gemeinsamen Bausteinen partiell übereinstimmen (die jeweils in einem Fertigungsauftrag zusammengefaßt werden).

Expertensysteme können die maschinenorientierte Terminplanung dadurch unterstützen, daß sie ein Modell des Produktionssystems und Wissen über die Arbeitspläne der herzustellenden Produkte besitzen<sup>97)</sup>. Durch Anwendung

- 97) Zu den frühesten Ansätzen solcher umfassenden Produktionsmodelle gehören die - inhaltlich zusammenhängenden - Ausführungen von Bullers (1979), S. 118f., mit einem zwar ambitionierten, aber noch kaum konkretisierten Konzept; Bullers (1980), S. 357ff., wo der vorgenannte Ansatz detailliert entfaltet wird, und Lin (1986), S. 569ff., bezüglich einer Fortentwicklung dieser Konzeption; vgl. auch Zelewski (1986), S. 824f.

In den o.a. Quellen wird eine maschinenorientierte Terminplanung für Flexible Fertigungssysteme auf der Basis starrer Prioritätsregeln konzipiert. Sie beruht auf der prädikatenlogischen Beschreibung von Produktionssystemen. Auf ein solches prädikatenlogisches Produktionsmodell wird eine spezielle Technik aus der KI-Forschung für den indirekten Beweis prädikatenlogischer Theoreme angewendet, die jeweils einen Sachverhalt ausdrücken, der innerhalb des Produktionsmodells gelten soll. Diese Technik fußt auf der prädikatenlogischen Resolutionsprozedur; Näheres hierzu bei Zelewski (1986), S. 351ff., und den dort angegebenen Quellen. Mit ihrer Hilfe lassen sich Fragen über die aktuelle Produktionssituation beantworten, wie z.B. hinsichtlich des Betriebszustands von Maschinen oder des Abarbeitungszustands von Aufträgen. Ebenso können Fragen über die geplanten Fertigstellungstermine von Aufträgen beantwortet werden. Aufträge und Maschinen werden nach Maßgabe von - ex ante festgelegten - Prioritätsregeln einander zugeordnet.

Der Terminplanungsansatz wurde - historisch betrachtet - früh entwickelt, vermochte sich aber nicht durchzusetzen. Für reale Problemstellungen scheitert er zumeist daran, daß die prädikatenlogische Modellierung eines Fertigungssystems sehr aufwendig ausfällt und die Ausführung der Resolutionsprozedur so viel Rechenzeit benötigt, daß sie innerhalb der praktisch akzeptierten Antwortzeiten nicht erfolgreich eingesetzt werden kann. Dieses Effizienzdefizit von Wissensrepräsentation und -erschließung äußert sich mittelbar in den Beispielen, an Hand derer dieses Konzept demonstriert wurde. Es handelte sich etwa um ein Flexibles Fertigungssystem, das lediglich aus zwei Bearbeitungsmaschinen und einem Transportmittel bestand. Hinzu kam noch eine Station für das Ein-/Ausspannen von Werkstücken, die auf Paletten angeliefert oder abtransportiert werden, und für das korrespondierende Ent- bzw. Beladen des Transportmittels. Schon für dieses "Spielzeugsystem" fiel die Wissensrepräsentation ausgesprochen voluminös aus. ...

(Fortsetzung der Fußnote auf der folgenden Seite !)

verschiedener Prioritätsregeln auf die maschinenbezogene Auftragseinlastung läßt sich im Produktionsmodell der Durchsatz der Fertigungsaufträge simulieren<sup>98)</sup>. Als Ergebnisse dieser - deterministischen - Simulationen resultieren Terminpläne für die Realisierung des Produktionsprogramms unter alternativen Prioritätsregeln. Noch bevor die Auftragsabwicklung tatsächlich freigegeben wird, ist es möglich, unterschiedliche Prioritätsregeln auf ihre Wirksamkeit im Produktionsmodell in Abhängigkeit von den aktuellen Betriebsmittelauslastungen, der konkreten Zusammensetzung des Produktionsprogramms und den jeweils verfolgten Planungszielen<sup>99)</sup> zu testen. Auf diese Weise wird die konventionelle starre Anwendung von Prioritätsregeln wesentlich flexibler, d.h. situationsabhängig gestaltet.

Die Simulation der Prioritätsregelwirkungen kann auf ein reichhaltiges Angebot konventioneller Simulationsmodelle für Produktionssysteme zurückgreifen<sup>100)</sup>. Auch die Untersuchung der Zielwirksamkeit von Prioritätsre-

---

... (Fortsetzung der Fußnote von der vorangehenden Seite:)

Darüber hinaus leidet der prädikatenlogische Ansatz darunter, daß er über die starren Prioritätsregeln der konventionellen Maschinenbelegungsplanung nicht hinausgekommen ist. Damit blieben ihm die besonderen Planungsvorzüge von situationsabhängigen, flexiblen Prioritätsregeln verschlossen, die nachfolgend erläutert werden. Darüber hinaus basieren die derzeit entwickelten Expertensysteme auf einer regel- und frameorientierten anstatt einer prädikatenlogischen Wissensstrukturierung. Hierdurch wird eine wesentlich effizientere Wissensauswertung ermöglicht. Vgl. zur Regelbasierung die unmittelbar anschließenden Ausführungen und zu "frames" als modularen Wissensstrukturen die Anmerkungen zum Expertensystem ISIS in Kapitel 3.2.2.

98) Vgl. Chang (1985), S. 53ff.; Thesen (1986), S. 559ff.; Subramanyam (1986), S. 255 (ansatzweise).

99) Hierbei kann es sich z.B. um möglichst geringe Durchlaufzeiten für Auftragspakete oder um eine möglichst hohe durchschnittliche Auslastung aller Betriebsmittel handeln.

100) Vgl. zu solchen Simulationsmodellen Dobler (1976), S. 3ff., insbesondere S. 18ff.; Bechte (1980), S. 79ff.; Chang (1985), S. 15ff.

geln in solchen Simulationsmodellen ist seit langem üblich<sup>101)</sup>. Doch werden bei der konventionellen Terminplanung die Prioritätsregeln - nachdem sie unter Umständen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit simuliert wurden - unabhängig von der jeweils aktuellen Produktionssituation angewendet. Der neuartige Beitrag von Expertensystemen liegt dagegen in der Flexibilität der situationsspezifischen Regelanwendung. Nicht die Simulation der Regelwirksamkeit an sich ist neuartig, sondern die vielfach wiederholte Simulation unter veränderten Produktionssituationen. So kann in jeder Produktionssituation - abhängig vom jeweils erzielten Simulationsergebnis - eine andere, situationsspezifisch besonders leistungsfähige Prioritätsregel angewendet werden.

Aber auch hinsichtlich der simulativen Bestimmung der Regelwirksamkeit bringt die KI-Forschung eine Perspektivenerweiterung. Die konventionelle Wirksamkeitssimulation erfolgt fast immer zweidimensional. Die Wirksamkeit verschiedener Regeln wird zumeist nur im Hinblick auf unterschiedliche Planungsziele untersucht<sup>102)</sup>. Seitens der KI-Forschung wird aber besonderes Gewicht auf die Beachtung einer dritten Dimension gelegt: die Regelwirksamkeit wird auch von der aktuellen Produktionssituation<sup>103)</sup> beeinflusst, unter der eine Prioritätsregel getestet oder später angewendet wird.

---

101) Vgl. z.B. Conway (1967), S. 219ff., insbesondere Table 11-1 auf S. 224; Hoch (1973), S. 111ff.

102) Vgl. die Quellenangaben in der voranstehenden Fußnote. Eine der seltenen Ausnahmen hiervon stellen die Ausführungen von Conway (1967), S. 239, dar, die bereits Strukturmerkmale der simulierten Produktionssysteme als dritte Wirksamkeitsdeterminante einbeziehen.

103) Der Begriff der Produktionssituation wird hier so weit gefaßt, daß er auch zeitinvariante Merkmale des jeweils betrachteten Produktionssystems umgreift. Hierdurch lassen sich auch Strukturmerkmale des Produktionssystems - etwa die Maschinenanzahl oder die Art der Maschinenverknüpfung - als Determinanten der Regelwirksamkeit betrachten.

Um diese situationsspezifischen Determinanten der Regelwirksamkeit zu erkennen, läßt sich auf ein spezielles Konzept der KI-Forschung für die Identifizierung von Regularitäten in großen, unstrukturierten Informationssammlungen zurückgreifen<sup>104)</sup>: die Mustererkennung. In einem Simulationsmodell<sup>105)</sup> wird ein Produktionssystem unter vielfach variierten Annahmen über die Produktionssituation bei Simulationsbeginn abgebildet. Für alle Situationen werden die Wirksamkeiten unterschiedlicher Prioritätsregeln im Hinblick auf verschiedene Planungsziele simuliert. Es resultiert eine Vielzahl von Informationstupeln, in denen jeweils Produktionssituation, Planungsziel, Prioritätsregel und Regelwirksamkeit aufeinander bezogen sind. Auf diese Tupelsammlung wird ein mustererkennendes Expertensystem angesetzt, um solche Informationsmuster zu identifizieren, in denen eine Prioritätsregel ein Planungsziel besonders wirksam erfüllt. Ziel ist es, in diesen Mustern Merkmale aufzudecken, die allen involvierten Produktionssituationen gemeinsam zukommen. Wenn dies gelingt, grenzen die Merkmale eine Klasse ähnlicher Produktionssituationen ab, bei deren Vorliegen sich die Prioritätsregel für die Erreichung des Planungsziels besonders wirksam erwiesen hat. Eine entsprechende Metaregel für die (ziel- und) situationsabhängige Prioritätsregelauswahl kann in die Wissensbasis eines Expertensy-

---

104) Die folgenden Ausführungen basieren auf einer Anregung von Mertens (1977), S. 789f., der einen von Puhl entworfenen Ansatz referiert.

105) Das Konzept für dieses Modell wird von Dobler (1976), S. 28ff., näher beschrieben.

stems für die maschinenorientierte Terminplanung aufgenommen werden<sup>106)</sup>.

Auf diese Weise werden das simulative Erkennen der situationsspezifischen Wirksamkeit von Prioritätsregeln einerseits und die Regelanwendung andererseits entkoppelt. Die Simulationsergebnisse über die Regelwirksamkeiten werden in Metaregeln kondensiert ("compiliert"), welche die situationsspezifische Anwendung von Prioritätsregeln bei der maschinenorientierten Terminplanung steuern<sup>107)</sup>. Hierdurch wird die aufwendige Wirksamkeitssimulation bei der Terminplanung durch die wesentlich rascher abzuwickelnde Anwendung von Metaregeln substituiert. Dieser effizienzsteigernde, zweistufige Ansatz der Wissenscompilierung stellt jedoch zur Zeit ein reines Konzept ohne praktische Umsetzung dar<sup>108)</sup>.

Tatsächlich realisierte Expertensysteme für die Terminplanung setzen die erste Stufe der Wissenskondensierung in Metaregeln als bereits gelöst voraus. Sie leisten nur die situationsspezifische Anwendung von Prioritätsregeln, die durch solche Metaregeln gelenkt wird.

---

106) Dieses Expertensystem müßte ebenfalls über mustererkennende Fähigkeiten verfügen, um für eine konkret vorgegebene Terminplanungsaufgabe feststellen zu können, zu welcher Situationsklasse die zugrundeliegende aktuelle Produktionssituation gehört. Strenggenommen wäre ein Mustervergleich (matching) erforderlich, in dem festgestellt wird, ob das Informationsmuster der aktuellen Produktionssituation zu einem der Muster "paßt", welche die zuvor ermittelten Situationsklassen definieren.

107) Hier wird also Metawissen in die Wissensbasis - nicht in die Problemlösungskomponente - von Expertensystemen aufgenommen. Dies zeigt, daß die anfangs skizzierte gewöhnliche komponentenorientierte Strukturierung von Expertensystemen tatsächlich vielschichtiger ausfällt, als in den meisten popularisierenden Werken über Expertensysteme üblich ist. Denn letztgenannte unterstellen in der Regel, daß das Metawissen über die Art der Wissensanwendung (hier: der Prioritätsregeln) Bestandteil der Problemlösungskomponente sei.

108) Vgl. zum Konzept der Wissenscompilierung Zelewski (1988b), S. 48ff., und die dort angeführten Quellen.

Da die Wissenscompilierung noch aussteht, wird dieser Analyseschritt im allgemeinen durch heuristisches Wissen ersetzt. Es gibt an, in welchen Produktionssituationen sich welche Prioritätsregeln in der Vergangenheit am besten bewährt haben<sup>109)</sup>. Diese Heuristiken werden zumeist als (Meta-)Regeln<sup>110)</sup> in die Wissensbasis eines Expertensystems derart eingebracht, daß sie jeweils Klassen von Produktionssituationen auszeichnen, für die situationsspezifische Prioritätsregeln zur Maschinenbelegung assoziiert werden. Beispielsweise kann eine solche Situationsklasse durch Auslastungsintervalle für die jeweils betrachteten Maschinen und durch die Schlupfzeiten, die Aufträgen bis zu ihren Lieferterminen für die Fertigstellung verbleiben, spezifiziert werden.

Bei Flexiblen Fertigungssystemen stehen die Maschinenbelegungsplanung (scheduling) und das Durchschleusen von Aufträgen (routing) durch das Fertigungssystem im Vordergrund der Terminplanung. Im Prinzip handelt es sich bei beiden um maschinenorientierte Terminplanungen, die sich lediglich hinsichtlich des Planungsansatzes - Maschinen bzw. Aufträgen - unterscheiden. Maschinenbelegung und Auftragsdurchschleusung werden

---

109) Vgl. Chang (1985), S. 38ff.; Subramanyam (1986), S. 253.

Auf die Problematik der Verkürzung von modellierten Regelwirkungen auf heuristisches Wissen über Regelwirkungen kann hier nur hingewiesen werden. Die "Bewährung" solcher Heuristiken wird in der Regel nicht belegt, sondern lediglich durch Urteile eines - zumeist selbsterklärten - "Experten" begründet. Sie läßt sich nicht kritisch hinterfragen. Dies gilt insbesondere auch für die Konstruktion von PPS-Expertensystemen. Daher ist grundsätzlich die Simulation der Regelwirkungen als Begründungsbasis vorzuziehen. Ebenso wären empirische Studien über die Wirksamkeit von Prioritätsregeln in realisierten Produktionsprozessen auf breiter statistischer Basis aussagekräftiger.

110) Die kategoriale Unterscheidung zwischen Objekt- und Metaregeln wird in den meisten Konzepten für regelbasierte Wissensbasen nicht berücksichtigt.

ebenfalls auf der Grundlage von lokal definierten, heuristischen Prioritätsregeln ausgeführt<sup>111)</sup>.

Unabhängig von den vorgenannten Unterschieden ist gemeinsames Charakteristikum der meisten Expertensysteme für die maschinenorientierte Terminplanung, daß die Prioritätsregeln für die Belegung von Maschinen oder für das Durchschleusen von Aufträgen in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Produktionssituation angewendet werden<sup>112)</sup>. Mehrere Simulationsexperimente für fiktive Terminplanungsprobleme wiesen nach, daß die von einem Expertensystem situationsabhängig ausgewählten Prioritätsregeln stets zu deutlich größeren Erfüllungsgraden der jeweils verfolgten Planungsziele führten als die konventionelle Anwendung starr definierter, ex ante festgelegter Prioritätsregeln<sup>113)</sup>.

Sowohl für die maschinenorientierte Terminplanung im allgemeinen als auch für die Maschinenbelegung und Auftragsdurchschleusung bei flexiblen Fertigungssystemen im besonderen wird die schon früher skizzierte blackboard-Architektur von Expertensystemen zur Diskussion gestellt<sup>114)</sup>. Das Modell des Produktionssystems bildet hier die dynamische Informationsbasis (blackboard), welche die jeweils aktuelle Produktionssituation abbildet. Sie kann z.B. genutzt werden, um die Auswirkungen

---

111) Es erfolgt lediglich insofern eine Konzepterweiterung, als für das Durchschleusen von Aufträgen auch auftragsorientierte Prioritätsregeln angewendet werden. Sie ergänzen die oben eingeführten maschinenorientierten Regeln. Vgl. zu den Prioritätsregeln für die Einplanung von Maschinen und Fertigungsaufträgen beispielsweise Ben-Arieh (1986), S. 361f.; Subramanyam (1986), S. 253.

112) Vgl. Chang (1985), S. 42ff. in Verbindung mit S. 38ff.; Subramanyam (1986), S. 253ff.; Thesen (1986), S. 561.

113) Vgl. die Dokumentationen solcher Simulationen bei Chang (1985), S. 53ff.; Thesen (1986), S. 561ff.

114) Vgl. hierzu die Anmerkungen anlässlich der Arbeitsplanung in Kapitel 2.1. Blackboards für PPS-Expertensysteme werden z.B. von Subramanyam (1986), S. 246 (in bezug auf flexible Fertigungssysteme), und Meyer, W. (1987), S. 411, empfohlen.

alternativer Prioritätsregelanwendungen zu simulieren und entsprechend auszuwerten.

Die blackboard-Architektur läßt sich aus der Perspektive des verteilten Problemlösens<sup>115)</sup> auch als ein Multiagentensystem behandeln. Hierbei operieren mehrere teilautonome Problemlösungskomponenten als Agenten (Aktoren oder "Dämonen") auf dem Produktionsmodell<sup>116)</sup>, das durch das blackboard-artige Komponente der Wissensbasis repräsentiert wird. Jeder dieser Agenten kann eine Sammlung von Fertigungsaufträgen vertreten, die er - in Konkurrenz mit den anderen Agenten - durch das Produktionssystem zu schleusen versucht. Ebenso ist es möglich, daß die Agenten einzelnen Maschinen oder Maschinengruppen zugeordnet sind<sup>117)</sup>.

Im ersten Fall verhalten sich die Agenten tendenziell nicht-kooperativ<sup>118)</sup>, weil jeder von ihnen die partielle problemlösende Strategie verfolgt, ihre Aufträge möglichst schnell durch das Produktionssystem zu führen oder möglichst zeitnah in bezug auf ihre Liefertermine fertigzustellen. Ein anschauliches Beispiel für die Agentenkonkurrenz liegt vor, wenn einem Agenten die Aufgabe übertragen wird, einen Eilauftrag durch das Produktionssystem mit besonderem Nachdruck zu schleusen<sup>119)</sup>. Im zweiten Fall überwiegt dagegen die Kooperation der maschinenbezogen definierten Agenten, die in Kontraktnetzen zusammenwirken, um die ihnen gemeinsam

---

115) Vgl. zu Beiträgen der KI-Forschung für das verteilte (distributed) Problemlösen im Kontext von Terminplanungs- und -steuerungsproblemen Shaw (1985), S. 184ff.; Smith (1985), S. 1013ff.; Van Dyke Parunak (1985), S. 653ff.; Shaw (1986a), S. 238; Van Dyke Parunak (1987), S. 285ff.; Krallmann (1987a), S. 131.

116) Vgl. zu einem anschaulichen Beispiel hierfür Van Dyke Parunak (1985), S. 655f.

117) Vgl. Van Dyke Parunak (1985), S. 656ff. in Verbindung mit S. 655; Shaw (1986b), S. 546; Van Dyke Parunak (1987), S. 290f.

118) Vgl. Fox (1986a), S. 410; Krallmann (1987a), S. 131.

119) Vgl. Krallmann (1987a), S. 131.

vorgegebene Produktionsaufgabe gemeinsam zu erfüllen. Bisher ist die Idee, die Terminplanung auf Multiagentensysteme zurückzuführen, jedoch noch nicht detailliert ausgearbeitet worden<sup>120)</sup>.

---

120) Zwar wird bereits das YAMS-Konzept (für "Yet Another Manufacturing System") zur Modellierung von Multiagentensystemen im Fabrikkontext vorgestellt; vgl. Van Dyke Parunak (1985), S. 656ff.; Van Dyke Parunak (1987), S. 288ff., insbesondere S. 290f. Doch läßt dieses Konzept noch keine überzeugende Konkretisierung im Hinblick auf Terminplanungs- und -steuerungsaufgaben erkennen.

### 3.1.2 Terminsteuerung

Für die Terminsteuerung bietet die KI-Forschung auf den ersten Blick keine eigenständigen Konzepte an. Vielmehr wird sie als Anpassungsplanung mit Hilfe der bereits oben ausgeführten Konzepte für die Terminplanung verwirklicht. Es erfolgt im allgemeinen eine Neuplanung, die sich von einer erstmals erfolgenden Terminplanung konzeptionell in keiner Weise unterscheidet.

Immerhin ließe sich auf der Basis der maschinenorientierten Terminplanung zumindest das Produktionsmodell in der Wissensbasis eines Expertensystems nutzen, um die Terminsteuerung gegenüber den Leistungen konventioneller PPS-Systeme anzureichern<sup>121)</sup>. Das Expertensystem bildet in seinem Modell des Produktionssystems den jeweils aktuellen Ausführungsstand der eingeplanten Fertigungsaufträge ab. Ebenso gibt das Modell die Verfügbarkeit aller Betriebsmittel wieder. Über die Betriebsdatenerfassung werden die Betriebsmittelbelegungen durch die Bearbeitung oder den Transport von Werkstücken und auch Störungen von Betriebsmitteln erfaßt. Im Falle von Betriebsstörungen können von der Instandhaltungsabteilung Informationen über die voraussichtliche Störungsdauer abgerufen werden. Die Gesamtheit aller vorgenannten Informationen spiegelt im Produktionsmodell die jeweils aktuelle Produktionssituation wieder.

Auf dieses Modell lassen sich für alle noch nicht fertiggestellten Aufträge und alle aus der Auftragsumwandlung neu eintreffenden Fertigungsaufträge heuristische Prioritätsregeln zur Aktualisierung der Terminplanung anwenden. Hierbei wird grundsätzlich in derselben Weise verfahren, wie sie oben als (modellbasierte) maschinenbezogene Terminplanung skizziert wurde.

---

121) Vgl. zum folgenden Krallmann (1986b), S. 405f.; Wildemann (1987), S. 25f.

Ein eigenständiger Beitrag der KI-Forschung zur Terminsteuerung würde erst dann erfolgen, wenn z.B. auf die Konzepte des nonmonotonen Schließens<sup>122)</sup> und der "truth maintenance systems"<sup>123)</sup> zurückgegriffen würde. Diese Ansätze erlauben es, eine Anpassungsplanung nicht mehr als Neu-, sondern als echte Änderungsplanung vorzunehmen<sup>124)</sup>. Sie beruhen auf der Feststellung jener Planungsprämissen, die der ursprünglichen Terminplanung zugrundelagen, aber in der aktuellen Produktionssituation nicht mehr zutreffen. Dabei kann es sich z.B. um die Annahme der Verfügbarkeit einer Maschine handeln, für die im Rahmen jener Terminplanung die Belegung durch einen Auftrag vorgesehen wurde, die jedoch noch vor Abarbeitung dieses Auftrags ausgefallen ist.

- 
- 122) Eine Schlußfolgerung (Inferenz) heißt nonmonoton, wenn die Formeln, die erschlossen worden sind, im Zeitpunkt ihrer Erzeugung gültig sind, aber durch Erwerb neuen Wissens ungültig werden können. Vgl. Zelewski (1986a), S. 359ff., und die dort angegebenen Quellen zum Konzept nonmonotoner Inferenzen. Klassische Logiken - wie insbesondere die Aussagen- und die Prädikatenlogik - verhalten sich dagegen immer monoton. In ihnen bleibt jede Formel (Aussage bzw. Prädikat) gültig, wenn sie einmal gefolgert werden konnte. Die Formelgültigkeit verhält sich monoton, weil sie trotz beliebiger Zunahme des verfügbaren expliziten Wissens unverändert bleibt.
- 123) Die "truth maintenance systems" wurden speziell zur Ermittlung der Auswirkungen solcher Wissensweiterungen entwickelt, die früher gefolgerte Formeln nachträglich ungültig werden lassen. Die Auswirkungen können sehr weit reichen, weil auf der Grundlage der zuvor gültigen Formeln unter Umständen eine Vielzahl weiterreichender Schlüsse gezogen wurde, die jetzt eventuell nicht mehr zutreffen. Vgl. de Kleer (1986), S. 197ff., zu solchen "truth maintenance systems".
- 124) Einen anderen Beitrag, der jedoch weniger klar als Konzept aus der Erforschung der Künstlichen Intelligenz hervortritt, stellt die Strategie des "turnpike scheduling" dar; vgl. Van Dyke Parunak (1987), S. 303f. Hierbei wird versucht, eine Anpassungsplanung derart vorzunehmen, daß eine Fortsetzung des Produktionsablaufs geplant wird, die zu einem Wiederanknüpfungspunkt im ursprünglich geplanten, aber zwischenzeitlich gestörten Maschinenbelegungsplan zurückführt. Auch hier wird darauf verzichtet, eine vollständige Neuplanung vorzunehmen.

Die nonmonotonen Inferenzfähigkeiten von Expertensystemen erlauben es, die Planungsprämissen aufzuheben, die durch die Veränderung der realen Produktionssituation ungültig geworden sind, und durch entsprechend modifizierte neue Planungsprämissen zu ersetzen. Die Auswirkungen dieser Prämissenvariation auf die Terminplanung werden mittels anspruchsvoller KI-Techniken ermittelt, die an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden können<sup>125</sup>). Allerdings sind dem Autor keine Expertensysteme für die Terminplanung und -steuerung bekannt, die auf diese subtilen Planungskonzepte zurückgreifen.

Stattdessen wird seitens der KI-Forschung für die Terminsteuerung das Konzept der opportunistischen Terminierung (opportunistic scheduling)<sup>126</sup>) verstärkt diskutiert. Es wird der o.a. Sachverhalt in besonderer Weise hervorgehoben, daß die Prozeßplanung so, wie sie von der Terminplanung vorgesehen wird, in praxi kaum realisiert werden kann, weil stets unvorhergesehene Störungen des Produktionssystems die Planumsetzung behindern. Hieraus wird die Konsequenz gezogen, weder optimierende noch suboptimale heuristische Planungskonzepte könnten praktisch erfolgreich sein. Vielmehr komme es auf die Art und die Häufigkeit der störungsbedingten Anpassungsplanungen an<sup>127</sup>).

Bei der konventionellen Terminplanung wird für jeden Fertigungsauftrag eine optimale oder eine heuristisch ermittelte, suboptimale Maschinenfolge bestimmt. Sie beruht auf den Startterminen für die Arbeitsgänge, die auf den Maschinen eines Produktionssystems zur Auf-

---

125) Vgl. die o.a. Quellen zu nonmonotonen Inferenzen und "truth maintenance systems".

126) Vgl. Fox (1985), S. 488ff.; Newman (1985), S. 168ff.; Fox (1987), S. 231ff.; Van Dyke Parunak (1987), S. 304.

127) Vgl. Fox (1985), S. 488, mit der pointierten Äußerung "... efforts to find optimal schedules and develop better heuristics may be misdirected ... greater benefits could be obtained by focusing on the criteria and frequency for rescheduling".

tragsabwicklung ausgeführt werden müssen. Bei eindeutig fixierten ("optimierten") Startterminen ergibt sich zwangsläufig eine lineare Anordnung der zu durchlaufenden Maschinen (ordinierende Strategie)<sup>128)</sup>. Die opportunistische Terminierung weicht von diesem reihenfolgenbildenden Planungsschema grundsätzlich ab, indem sie von maximal halbgeordneten Maschinenfolgen ausgeht.

Die opportunistische Terminierung verzichtet - in einem ersten, groben Ansatz<sup>129)</sup> - auf jede Terminplanung im o.a. konventionellen Verständnis des Ordinierens von Aufträgen. Vielmehr erfolgt von vornherein eine Produktionssteuerung. Es wird direkt mit der Ausführung derjenigen Arbeitsgänge begonnen, die zur Abwicklung der vom Produktionsprogramm vorgegebenen Fertigungsaufträge zuerst erforderlich sind. In jeder Produktionssituation wird bestimmt, welche Arbeitsgänge ausgeführt werden können (on-line decision making). Dies hängt einerseits von der Arbeitsplänen für die involvierten Aufträge und deren aktuellen Ausführungszustand ab. Andererseits wird dies von den Ressourcen de-

---

128) Hierbei wird von der - real stets zutreffenden - Vereinfachung ausgegangen, daß bei der Stückgüterfertigung in Fabriken die Arbeitsgänge eines Auftrags immer sequentiell hintereinander ausgeführt werden. Die theoretische Möglichkeit, einzelne Arbeitsgänge desselben Auftrags parallel (nebenläufig) abzuwickeln, wird nicht betrachtet. Sie wird praktisch nur bei der Realisierung großer Projekte - wie etwa im Schiffsbau - verwirklicht.

129) Tatsächlich wird eine verfeinerte, zweistufige Version vorgeschlagen. Auf der ersten Stufe (offline scheduler) sollen Maschinenteilfolgen für einige Arbeitsgänge der abzuwickelnden Fertigungsaufträge in konventioneller Weise geplant werden, ohne jedoch eine vollständige Terminplanung aller Aufträge vorzunehmen. Diese Partialterminplanung dient als mittelfristige Rahmenvorgabe für eine zweite Stufe (on-line scheduler), auf der die nachfolgend skizzierte opportunistische Terminierung für die kurzfristige Produktionssteuerung angewendet wird. Diese zweistufige Verfeinerungsperspektive ist jedoch bislang nicht konkretisiert worden. Insbesondere bleibt das Ausmaß, in dem die Partialterminplanung der ersten Stufe betrieben werden soll, vollkommen im dunkeln. Vgl. zu diesem Ansatz Fox (1985), S. 489f.

terminiert, die in der aktuellen Produktionssituation zur Verfügung stehen, also weder durch die Bearbeitung anderer Aufträge belegt noch gestört sind. Die Ausführung der ex ante nicht fest ordinierten Arbeitsgänge hängt also von den Produktionsmöglichkeiten ab, die in jeder Produktionssituation offenstehen (opportunistische Strategie).

Wenn in einer Produktionssituation an derselben Maschine mehrere Arbeitsgänge ausgeführt werden könnten, die sich gegenseitig ausschließen, läßt die opportunistische Terminierung offen, welche Auswahlstrategie verfolgt wird<sup>130</sup>). Doch sie läßt sich konsistent mit den o.a. Prioritätsregeln für die maschinenbezogene Terminplanung vereinbaren<sup>131</sup>), die jetzt jedoch nicht zu Planungs-, sondern zu Steuerungszwecken herangezogen werden.

Die zuvor skizzierte opportunistische Terminierung basiert auf zwei Grundprinzipien<sup>132</sup>): der kleinstmöglichen Bindung (principle of least commitment) und der größten Auswahlmöglichkeit (principle of opportunism). Die kleinstmögliche Bindung der Terminierung kommt dadurch zum Ausdruck, daß auf jede ex ante-Fixierung geplanter Starttermine von Arbeitsgängen, also von jeder Terminplanung vor Beginn der realen Produktionsprozesse abgesehen wird. Das Prinzip der größtmöglichen Auswahl-

---

130) Zwar finden sich bei Fox (1987), S. 234, drei Vorschläge für diese Auswahl, doch die Selektionskriterien bleiben inoperational. So wird beispielsweise vorgeschlagen, denjenigen Arbeitsgang auszuwählen, der die größten Auswahlmöglichkeiten für die zukünftige Auftragsfertigstellung garantiert. Wie sich diese Einschränkung messen läßt, wird zwar in der o.a. Quelle erörtert, bleibt jedoch letztlich infolge Fehlens eines befriedigenden Meßkonzepts unbestimmt. Insbesondere wird nicht erläutert, wie angesichts einer indeterminierten, von unvorhergesehenen Störungen abhängigen Zukunft die "Garantie" größter Auswahlmöglichkeiten geleistet werden soll.

131) Hierfür spricht auch, daß von Fox (1985), S. 489, ein geringer "look ahead" für die Auswahl auszuführender Arbeitsgänge postuliert wird.

132) Vgl. Fox (1985), S. 489; Fox (1987), S. 232.

möglichkeit bedeutet, daß in jeder Produktionssituation alle Arbeitsgangausführungen in Betracht gezogen werden sollen, die tatsächlich ausgeführt werden könnten. Eine notwendige Bedingung hierfür ist der bereits angeführte Verzicht auf die Fixierung von auftragsbezogenen Maschinenfolgen durch eine ordinierende Terminplanung.

Darüber hinaus muß aber auch gefordert werden, daß in den zugrundeliegenden Arbeitsplänen alle Ablaufalternativen enthalten sind, die aufgrund fertigungstechnischer Sachzusammenhänge überhaupt möglich sind. Dies setzt voraus, daß die Arbeitspläne maximal halbgeordnete Arbeitsgangmengen darstellen<sup>133)</sup>. Hier besteht eine enge Beziehung zu dem früher vorgestellten Konzept der KI-Forschung, durch hierarchische Verfeinerung von Produktionsaufgaben nonlineare Aktionspläne zu generieren. Denn solche Aktionspläne führen notwendig zu halbgeordneten Arbeitsgangmengen, wenn als Aktionen die Arbeitsgänge identifiziert werden, die zur Abwicklung von Fertigungsaufträgen erforderlich sind<sup>134)</sup>.

Eine Konsequenz dieser Halbordnung ist, daß Auswahlkonflikte im Arbeitsplan nicht aufgelöst werden, die darauf beruhen, daß sich derselbe Arbeitsgang auf unterschiedlichen Maschinen ausführen läßt. Bei konventioneller Arbeitsplanung - spätestens jedoch während der anschließenden ordinierenden Terminplanung - wäre eine dieser Maschinen für die Arbeitsgangausführung selektiert worden. Falls nun während der Planrealisierung genau diese Maschine im Produktionssystem ausfällt, wäre die Terminplanung hinfällig. In den maximal halbge-

---

133) Vgl. Fox (1985), S. 491f., insbesondere Fig. 2 auf S. 492.

Der Sachverhalt maximal halbgeordneter Arbeitsgangmengen läßt sich - inhaltlich äquivalent - auch als minimale Ordnung der Arbeitsgangmengen ausdrücken; vgl. Fox (1987), S. 232.

134) Die Arbeitsgangmengen heißen maximal halbgeordnet, wenn keine artifiziellen Restriktionen eingeflossen sind, die sich nicht aus der Spezifizierung der Produktionsaufgabe und der im Produktionssystem zur Verfügung stehenden Ressourcen zwingend herleiten lassen. Vgl. zu solchen artifiziellen Restriktionen Fox (1985), S. 489.

ordneten Arbeitsplänen der opportunistischen Terminierung wird jedoch auf diese Konfliktauflösung bewußt verzichtet. Daher kann im Zeitpunkt des Maschinenausfalls flexibel auf eine alternative Maschine umgesteuert werden. Dieses Offenhalten aller Ausführungsmöglichkeiten bis zum Zeitpunkt der tatsächlichen Arbeitsgangrealisierung kommt insbesondere dem Einsatz Flexibler Fertigungssysteme in der Fabrik der Zukunft zugute, die aufgrund ihrer Struktur eine Fülle von Fertigungsalternativen anbieten.

Die Verknüpfung von nonlinearen Arbeitsplänen mit den Prinzipien der größten Auswahlmöglichkeit und der kleinstmöglichen Bindung sowie das Hinzuziehen von situationsabhängig selektierten Prioritätsregeln bietet einen neuartigen Ansatz für die Terminplanung und -steuerung, der seitens konventioneller Forschungen auf dem Gebiet der PPS-Systeme bisher nicht in Betracht gezogen wurde. Das Konzept der opportunistischen Terminierung befindet sich in einem noch frühen, wenig konkretisierten Stadium<sup>135)</sup>, das noch nicht gestattet, seine Leistungsfähigkeit für praktische Produktionsaufgaben kritisch zu beurteilen. Auch liegt noch keine Implementierung als lauffähiges PPS-Expertensystem vor.

Aber immerhin wurde die opportunistische Terminierung mit einer konventionellen ex ante-Terminplanung, die zu linearen Maschinenfolgen führt, für den Grenzfall nur einer Maschine (eines Montageroboters) verglichen<sup>136)</sup>. Die Simulation stochastisch veränderlicher Produktionssituationen führt zu dem Ergebnis, daß die ordnierende Strategie - je nach Simulationsdesign - zwischen 25% und 95% größere Auftragsausführungszeiten bewirkte als die opportunistische Strategie.

---

135) Vgl. die Anmerkungen zur Auswahl tatsächlich auszuführender Arbeitsgänge und zur zweistufigen Konzeptverfeinerung.

136) Vgl. Fox (1985), S. 490f.; Fox (1987), S. 234ff.

Einen Grenzfall der Terminsteuerung bildet ein Konzept der KI-Forschung, das Aspekte der Terminplanung und -steuerung mit Beiträgen zur Diagnose mutmaßlicher Ursachen von Störungen oder Unterbrechungen des Betriebsablaufs kombiniert<sup>137)</sup>. Diagnose- Expertensysteme sollen eingesetzt werden, um Schwachstellen bei der Realisierung von geplanten Produktionsprozessen zu erkennen. Zu diesem Zweck sind sie unmittelbar an die Betriebsdatenerfassung gekoppelt, um die tatsächlich realisierten Isttermine einzelner Arbeitsgänge mit ihren geplanten Sollterminen zu vergleichen. Hierdurch sollen Diskrepanzen zwischen Ist- und Sollwerten aufgedeckt werden, die sich als Indikatoren für Schwachstellen im Produktionssystem interpretieren lassen<sup>138)</sup>. Solche Schwachstellen können Störungen der laufenden Produktionsprozesse infolge kritischer Abweichungen vom geplanten Prozeßverlauf bedeuten oder Betriebsunterbrechungen darstellen, die durch den Ausfall von Betriebsmitteln oder Arbeitskräften entstanden sind.

Die elaborierten Diagnose-Konzepte von Expertensystemen<sup>139)</sup> sollen zum Einsatz gelangen, um die mutmaßlichen Ursachen der erkannten Schwachstellen (Symptome) zu identifizieren. Über diese Diagnoseaufgabe i.e.S. hinaus wird eine Rückkopplung zum überwachten Produktionsprozeß angestrebt. Zu diesem Zweck wird aus der Er-

---

137) Vgl. Krallmann (1987a), S. 133; Zelewski (1988b), S. 90ff. (dort allerdings unter dem besonderen Gesichtspunkt der Realzeit-Prozeßsteuerung). Vgl. auch Biswas (1985), S. 121ff., wo allerdings ein weitergespanntes Verwertungsinteresse für die Diagnoseerkenntnisse als der Bereich der Terminplanung und -steuerung angestrebt wird ("operations analysis" als umfassende Auswahl, Gestaltung, und Fortentwicklung von Produktionssystemen), und die Quellen, die in den folgenden Fußnoten zu Detailspekten angeführt werden.

138) Diese Interpretation ist allerdings nicht zwingend. Denn die Abweichungen zwischen Ist- und Sollgrößen könnten ebenso durch mangelhafte Planung der Sollgrößen hervorgerufen sein. Hierauf wird später zurückgekommen.

139) Diese Konzepte werden ausführlicher bei Zelewski (1988b), insbesondere S. 12ff., erläutert; vgl. auch die dort angeführten vertiefenden Quellen.

kenntnis der Schwachstellenursachen eine Revision der ursprünglichen Terminplanung abgeleitet. Diese Anpassungsplanung der Starttermine von noch nicht ausgeführten Arbeitsgängen stellt eine diagnosebasierte Terminsteuerung dar.

Noch weiter reichen Überlegungen, Diagnose-Expertensysteme zu benutzen, um Schwachstellen in PPS-Systemen - nicht in den geplanten und gesteuerten Produktionsprozessen - aufzudecken und hinsichtlich ihrer mutmaßlichen Ursachen auszuwerten<sup>140</sup>). Die hieraus gewonnenen Diagnoseerkenntnisse ließen sich nutzen, um zukünftige Terminplanungen und -steuerungen durch das analysierte PPS-System zu verbessern<sup>141</sup>).

Die skizzierten Ideen, PPS-Expertensysteme um Diagnosefähigkeiten zu erweitern, wurden jedoch bisher im Rahmen der Terminplanung und -steuerung für werkstattorientierte Produktionssysteme (einschließlicher flexibler Fertigungssysteme) weder detailliert ausgeführt noch durch entsprechende Expertensystemimplementierungen

---

140) Vgl. Steinmann (1987a), S. 235.; Mertens (1987), S. 117.

Wenn bereits das Diagnoseobjekt - das PPS-System - ein Expertensystem darstellt, liegt eine reflexive Nutzung von Erkenntnissen der KI-Forschung vor. Expertensysteme (Diagnose-Systeme) werden auf der Metaebene eingesetzt, um Expertensysteme (PPS-Systeme) aus der Objektebene zu überwachen und zu verbessern. Diese Betrachtung des reflexiven Expertensystemeinsatzes ließe interessante Spekulationen über die evolutionäre Fortentwicklung des Leistungspotentials intelligenter Automaten zu, die jedoch den Rahmen dieser Ausarbeitung übersteigen würden.

141) Vgl. Mertens (1987), S. 117.

gen konkretisiert<sup>142)</sup>. Es existieren zur Zeit nur wenige rudimentäre Ansätze, die zwar den Anspruch erkennen lassen, zu lauffähigen Expertensystemen mit den o.a. Diagnosepotentialen führen zu wollen, aber von diesem Ziel noch weit entfernt sind.

Beispielsweise haben Wiendahl und Mitarbeiter auf der Basis des PPS-Konzepts der belastungsorientierten Ausstragsfreigabe ein Kontrollsystem KOSYF entwickelt<sup>143)</sup>, in dem vier charakteristische Kennzahlen über die Realisierung von Terminplanungen in einem Produktionssystem gebildet werden. Hierzu wird auf Meldungen aus der Betriebsdatenerfassung über den aktuellen Produktionsfortschritt zurückgegriffen. Anhand dieser Kennzahlen lassen sich Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Terminplanung erkennen. Es wird angeregt<sup>144)</sup>, Expertensysteme zu konzipieren, welche diese Abweichungen hinsichtlich mutmaßlicher Abweichungsursachen analysieren und hieraus Maßnahmen für den steuern- den Eingriff in die laufende Produktion ableiten. Konkrete Umsetzungen dieser anspruchsvollen Empfehlung in implementierte Expertensysteme wurden jedoch bislang nicht vorgelegt.

---

142) Anders verhält es sich im Hinblick auf den Spezialfall der Steuerung technischer Prozesse unter Realzeitbedingungen. Dort werden bereits konkrete Konzepte und implementierte Expertensysteme vorgelegt; vgl. hierzu den Ausblick in Kapitel 4.2 (z.B. hinsichtlich des Expertensystem-Projekts TEX-I) und die Ausführungen bei Zelewski (1988b), S. 90ff.

Auch das o.a. Konzept der "operations analysis" hat zu einer Implementierung geführt; vgl. Biswas (1985), S. 122ff. Doch erstrecken sich die Leistungen dieses Expertensystems OASES (für "Operations AnalySis Expert System") nicht auf die hier interessierenden Rückkopplungen zur Terminplanung und -steuerung.

143) Vgl. Wiendahl (1986), S. 438ff.; Steinmann (1987b), S. 172.

144) Vgl. Wiendahl (1986), S. 440; Wiendahl (1987), S. 302 u. 304ff.; Neipp (1987), S. 81.

Ein ähnliches Konzept, Expertensysteme die Planabweichungen bei der Prozeßausführung in Produktionssystemen erkennen zu lassen und hieraus Maßnahmen für die Produktionssteuerung abzuleiten, wurde auf der Basis der bereits o.a. GRAI-Produktionsmodelle vorgestellt<sup>145)</sup>. Aber auch hier liegen noch keine lauffähigen Implementierungen vor.

---

145) Vgl. Doumeingts (1985), S. 197ff., insbesondere S. 208, 211, 215 u. 217; Berard (1985), S. 345ff., insbesondere S. 346f. Hier wird jedoch ein Ansatz ("piloting" oder "guiding") verfolgt, der weit über den Aspekt der schwachstellenbezogenen Produktionssteuerung hinausweist. Es ist beabsichtigt, ein Produktionssystem vor seiner Realisierung im Rahmen der Fabrikplanung auf mögliche Schwachstellen hin zu untersuchen und auch während seines Routinebetriebs hinsichtlich möglicher Systemverbesserungen zu analysieren. Hierbei steht die Strukturierung des Produktionssystems, nicht die Steuerung der in ihm ausgeführten Produktionsprozesse im Vordergrund.

### 3.2 Exemplarische Expertensysteme zur Unterstützung der Terminfeinplanung und -steuerung

#### 3.2.1 Übersicht

In der Gruppe der PPS-Expertensysteme überwiegen bei weitem diejenigen, die für die Terminplanung in Produktionssystemen mit werkstatorientierter Produktionsorganisation entworfen wurden<sup>146</sup>). Es dominiert der Aspekt der Maschinenbelegungsplanung, bei der die Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen im Vordergrund steht. Die hiermit verknüpfte Termin(fein)planung wird dagegen des öfteren nicht entsprechend herausgestellt, weil die explizite Angabe von Zeitgrößen in der KI-Forschung weniger üblich als betriebswirtschaftlich wünschenswert ist<sup>147</sup>).

Einen typischen Vertreter der Expertensysteme für die fabrikorientierte Terminplanung bei Werkstattfertigung stellt das Exemplar SOJA<sup>148</sup>) dar. Es beruht auf Restriktionen, die aus der Beschreibung des Produktionssystems und der einzuplanenden Aufträge gewonnen werden. Die Maschinenbelegung erfolgt nach dem Konzept der Restriktionspropagierung. Hierbei werden den Fertigungsaufträgen aus dem Produktionsprogramm Prioritäten zugeordnet. Nach Maßgabe dieser Rangindices werden die

---

146) Vgl. zu weiteren, nachfolgend nicht näher angesprochenen Expertensystemen für die Terminplanung (und -steuerung) Kerr (1985), S. 5ff.; Walker (1986), S. 122ff.; Liebowitz (1987), S. 262ff., mit einer detaillierten Anführung vor allem solcher Expertensysteme, die bei der US-Raumfahrtbehörde NASA eingesetzt oder entwickelt werden; Heine (1987), S. 61ff.

147) Diese Minderbeachtung der Anschauungsform Zeit kann auf die erheblichen Probleme zurückgeführt werden, welche die Repräsentation von und der Umgang mit Zeit in den meisten Konzepten der KI-Forschung bereitet; vgl. hierzu Smith (1983), S. 2; Sauerwein (1984), S. 8ff. u. 73f.; Zelewski (1986), S. 189, 191f., 194ff., 198 u. 362ff.

148) SOJA steht für "Système d'Ordonnancement Journalier d'Atelier"; vgl. hierzu Le Pape (1985a), S. 852ff.; Le Pape (1985b), S. 196ff.; Heine (1987), S. 53ff., 65f. u. 69f.

Aufträge sukzessiv eingeplant. Die Restriktionen besitzen Nutzenindices. Bei der Bearbeitung jedes einzelnen Auftrags wird zunächst nur die Restriktion mit dem höchsten Nutzenindex berücksichtigt, dann die Restriktion mit dem zweithöchsten Nutzenindex usw., bis alle Restriktionen erfaßt sind<sup>149)</sup>.

Das Expertensystem ist für die tägliche Terminplanung ausgelegt. Dennoch kann es nicht zum Bereich der Terminsteuerung gerechnet werden. Denn erstens erfolgt die Maschinenbelegung niemals als Änderungs-, sondern immer als Neuplanung. Daher wird der Ansatz der Terminplanung im Prinzip nicht verlassen, allenfalls zur steuernden Anpassungsplanung erweitert. Zweitens führt die Anpassungsplanung nicht zu steuernden Eingriffen in den Produktionsablauf. Vielmehr erfolgt sie im Batchbetrieb über Nacht, so daß die revidierte Terminplanung erst am nächsten Morgen bei Wiederaufnahme der Produktion vorliegt. Eine Terminsteuerung durch direkte Beeinflussung laufender Produktionsprozesse wird zwar langfristig beabsichtigt, ist jedoch zur Zeit noch nicht verwirklicht.

Das Expertensystem TLP<sup>150)</sup> gehört zu den wenigen Ausnahmen, die bei der Maschinenbelegung nicht die Zuordnung von Maschinen und Aufträgen, sondern den Zeitaspekt in den Vordergrund rücken. Die die Planung von Arbeitsgangterminen erfolgt auch hier fabrikorientiert.

Einen Grenzfall der Expertensysteme für die fabrikorientierte Terminplanung bildet das Exemplar SCHEDULING<sup>151)</sup>, das an der Universität Karlsruhe am Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research entwickelt wurde. Es genügt nicht den o.a. Konzepten

---

149) Vgl. hierzu die detailliertere Beschreibung des Einplanungsverfahrens für das Expertensystem ISIS unten im Kapitel 3.2.2. Es stimmt konzeptionell mit der Vorgehensweise des Expertensystems SOJA weitgehend überein.

150) TLP steht für "Temporal Logic Planner"; vgl. hierzu Tsang (1987), S. 69ff.

151) Vgl. Lamatsch (1986); Neumann (1987), S. 270f.

der KI-Forschung. Es handelt sich vielmehr um ein Methodenbanksystem, das um einige Regeln zur Steuerung der Methodenanwendung erweitert ist<sup>152)</sup>. Insgesamt werden 37 verschiedene Algorithmen als Lösungsmethoden für spezielle Problemtypen aus dem Bereich der Maschinenbelegungsplanung vorgehalten. Tatsächliche Produktionssysteme entsprechen jedoch oftmals nicht den Produktionssystemen, die von diesen Algorithmen idealtypisch vorausgesetzt werden. Daher dienen Reduktionsregeln dazu, ein konkret vorgegebenes Terminplanungsproblem so umzuformulieren, daß das resultierende Ersatzproblem mit mindestens einem der Algorithmen aus der Methodenbank gelöst werden kann. Falls mehrere Algorithmen in Frage kommen, werden sie dem Systembenutzer - mit Angaben über die Ressourcenbedarfe der Algorithmen - zur Auswahl vorgeschlagen.

Abgesehen von der fragwürdigen Verzerrung der ursprünglich vorgegebenen Probleme durch die Reduzierung auf idealtypische Ersatzprobleme erscheint der KI-Bezug dieses "Expertensystems" äußerst fragwürdig. Allein die Anwendung von (Reduktions-)Regeln rechtfertigt nach Ansicht des Verf. noch nicht diese Qualifizierung. Allenfalls handelt es sich hier um ein intelligentes Methodenbanksystem, das den Expertensystemgedanken auf die Methodenauswahl bezieht. Hinsichtlich der Maschinenbelegungsplanung ist jedoch keine Verarbeitung von Konzepten aus der KI-Forschung zu erkennen.

Für die maschinenorientierte Terminplanung wurde eine größere Anzahl von Expertensystemen entwickelt<sup>153)</sup>. Als Beispiel wird das Exemplar PEPS<sup>154)</sup> näher betrachtet. Es handelt sich um ein Expertensystem für

---

152) Auch Wildemann (1987), S. 24, führt ein solches Methodenbanksystem als einen möglichen Beitrag der KI-Forschung zur Gestaltung von PPS-Systemen an.

153) Vgl. zu solchen Expertensystemen auch Bruno (1986), S. 32ff.; Krallmann (1987a), S. 134.

154) PEPS steht für "Prototype Expert Priority Scheduler"; vgl. hierzu Robbins (1985), S. 13-11 u. 13-15ff.; Krallmann (1986b), S. 405 u. 407; Heine (1987), S. 58f.; Krallmann (1987a), S. 134f.

eine einfache Belegungsvariante, die Zuordnung von Aufträgen zu nur einer Maschine. Alle Aufträge werden durch je 12 Merkmale gekennzeichnet, aus denen auftragspezifische Prioritäten abgeleitet werden. Die Prioritäten können auf unterschiedliche, situationsabhängige Arten ermittelt werden. Jede Ermittlungsweise wird durch die Anwendung eines spezifischen Ermittlungsmodells determiniert. Das Expertensystem verfügt über eine Modellbanksystem, in dem im Prinzip beliebig viele Ermittlungsmodelle vorgehalten werden können. Die Modellanwendung wird durch Bewertungsregeln gesteuert, welche einzelnen Modellen in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Produktionssituation Punkte zuordnen. Hierdurch wird die situationspezifische Anwendung von Prioritätsregeln ermöglicht. Zur Ermittlung der aktuellen Auftragsprioritäten wird jeweils dasjenige Ermittlungsmodell herangezogen, das die höchste situationsbezogene Bewertung besitzt.

Ein Expertensystem<sup>155)</sup>, bei dem die Situationsabhängigkeit der Prioritätsregeln besonders deutlich ausgeführt wird, stammt von Chang. Es gilt für ein Produktionssystem mit beliebig vielen Maschinen, das nach dem Prinzip der Werkstattfertigung organisiert ist. Auf einer ersten Planungsstufe werden Regeln angewendet, welche die jeweils aktuelle Produktionssituation klassifizieren. Auf der nächsten Stufe dienen weitere Regeln dazu, um mit jeder Situationsklasse die relevanten, situationsabhängigen Planungsziele für die Maschinenbelegung zu assoziieren<sup>156)</sup>. Erst auf der dritten Ebene kommen in Abhängigkeit von der Situationsklasse und von den situationspezifischen Planungszielen die Prioritätsregeln zum Zuge. Mit ihrer Hilfe wird aus Aufträgen, die vor der gleichen Maschine warten, jeweils einer zur weiteren Bearbeitung ausgewählt.

---

155) Vgl. Chang (1985), S. 38ff. u. 45ff.

156) Es werden hier also nicht nur die Prioritätsregeln, sondern auch die Planungsziele an die jeweils herrschende Produktionssituation angepaßt.

Für die Produktionsplanung und -steuerung von Flexiblen Fertigungssystemen wurden mehrere Expertensysteme entwickelt<sup>157)</sup>, die sich insbesondere auf Flexible Fertigungszellen beziehen<sup>158)</sup>. Beispielsweise wird bei der Philips Autoradio-Produktion in Wetzlar ein Expertensystem untersucht, das die Terminplanung der Produktion von gedruckten SMD-Schaltungen<sup>159)</sup> in Flexiblen Fertigungszellen unterstützen soll. Ein weiteres Exemplar stellt das Expertensystem KBRS<sup>160)</sup> dar. Seine Leistungsfähigkeit wurde in Simulationsstudien mit alternativen konventionellen Strategien für das Durchschleusen von Aufträgen durch Flexible Fertigungszellen verglichen<sup>161)</sup>. Dabei erwies sich das Expertensystem - in Abhängigkeit von der jeweils verglichenen konventionellen Strategie und dem Simulationsdesign - hinsichtlich der entstehenden Auftragswarteschlangen und Maschinenauslastungsgrade um 50% bis 100% überlegen. Allerdings war hierfür eine fast fünfzehnmals so große Rechenzeit erforderlich.

- 
- 157) Vgl. auch Subramanyam (1986), S. 252ff.; Shaw (1986a), S. 229ff.; Shaw (1986b), S. 548ff. An der Grenze zwischen Expertensystemen und konventionellen Systemen steht das Exemplar PATRIARCH für die umfassende Planung und Steuerung der Produktion in Flexiblen Fertigungssystemen; vgl. Morton (1984), S. 314ff.; Morton (1986), S. 151ff.; Subramanyam (1986), S. 245, der dieses System noch als konventionell einstuft; Kusiak (1987), S. 8, der das System bereits als Beitrag der KI-Forschung behandelt. Die Nähe zur Künstlichen Intelligenz begründet vor allem der Ansatz zur expliziten Wissensrepräsentation. Allerdings entsprechen die Planungs- und Steuerungstechniken nicht den Inferenzmethoden von Expertensystemen.
- 158) Vgl. Shaw (1985), S. 184; Shaw (1986a), S. 227f. u. 238; Shaw (1986b), S. 551; Van Dyke Parunak (1987), S. 289f.
- 159) SMD steht für "Surface Mounted Devices"; es handelt sich um die Oberflächenmontage diskreter elektronischer Bauteile, die auf Schaltplatinen mit aufgedruckten Leiterbahnen aufgeklebt werden.
- 160) KBRS steht (vermutlich) für "Knowledge Based Routing System"; vgl. hierzu Ben-Arieh (1985), S. 287ff.; Ben-Arieh (1986), S. 353ff.
- 161) Vgl. Ben-Arieh (1985), S. 288f.; Ben-Arieh (1986), S. 360ff., insbesondere S. 363.

Die meisten Konzepte der KI-Forschung für die Terminplanung konzentrieren sich - ebenso wie konventionelle PPS-Systeme - auf die Zuordnung von Fertigungsaufträgen zu Bearbeitungsmaschinen und die Festlegung der Starttermine für die zugehörigen Arbeitsgänge. Die Belegungs- und Zeitplanung für andere Betriebsmittel<sup>162)</sup> - insbesondere Transportvorrichtungen - bleibt dagegen zumeist unberücksichtigt. Zu den seltenen Ausnahmen gehört ein Expertensystem-Konzept, das speziell für den Transport von Werkstücken in einem flexiblen Fertigungssystem vorgesehen ist<sup>163)</sup>. Ein Expertensystem plant hier spezifisch für jeden Fertigungsauftrag die Routen, auf denen die zu bearbeitenden Werkstücken zwischen den einzelnen Fertigungszellen transportiert werden müssen. Besondere Beachtung wird hierbei dem Aspekt der Terminsteuerung geschenkt, die Transportrouten nachträglich anzupassen, wenn während der Auftragsausführung Betriebsstörungen im flexiblen Fertigungssystem eintreten.

Für die eng verwandte Aufgabe, die Transportmittelauswahl bei mehreren Transportalternativen zu unterstützen, wurde das Expertensystem EXTRA entwickelt<sup>164)</sup>. Es besitzt zwar ursprünglich keinen Bezug zu PPS-Expertensystemen, ließe sich aber in ein Expertensystem für die Terminplanung und -steuerung von flexiblen Fertigungssystemen einbetten.

---

162) Die Zuordnung und Zeitplanung einer weiteren wesentlichen Ressource, der Arbeitskräfte, werden in der Regel nicht zur fabrik- oder maschinenorientierten Terminplanung und -steuerung gerechnet. Sie erfolgen vielmehr im Rahmen der Personaleinsatzplanung und durch die konkrete Auftragsfreigabe vermittelt durch Ausgabe der Auftragsunterlagen.

163) Vgl. Warman (1984), S. 60ff.

164) EXTRA steht (vermutlich) für "EXpertensystem für die TRANsportmittelauswahl"; vgl. hierzu Kuhn (1987), S. 265ff.

Nicht der Transport von Objekten über weitere Strecken, sondern die Handhabung von Werkstücken in der unmittelbaren Umgebung von Bearbeitungsmaschinen ist der Anwendungsbereich eines weiteren Expertensystems<sup>165)</sup>. Es steuert Roboter, die Werkstücke in Reaktionsbehälter für die elektrochemische Oberflächenveredelung tauchen und hieraus wieder entnehmen.

Expertensysteme, die speziell auf die Terminsteuerung zugeschnitten sind, existieren zur Zeit noch kaum. Die meisten Exemplare beschränken sich darauf, im Falle von Störungen der ursprünglichen Terminplanung Anpassungsplanungen vorzunehmen, die im Prinzip der vorangehenden Terminplanung gleichen.

Eine der seltenen Ausnahmen stellt das Expertensystem ACS.1<sup>166)</sup> dar, das allerdings nicht für die Steuerung von Aufträgen in Fertigungssystemen, sondern für die flexible Einsatzplanung von Fliegerstaffeln der US-Marine ausgelegt ist. Doch sein Steuerungskonzept ließe sich auf die Steuerung von Produktionssystemen übertragen. Durch Informationen über die Realisierung der ursprünglich geplanten Aktionen (Arbeitsgänge) werden vom Expertensystem Abweichungen zwischen Soll- und Istterminen festgestellt. Es stellt selbständig fest, ob die Terminabweichungen den geplanten Endtermin des gesamten Projekts (Fertigungsauftrags) in Frage stellen. Falls solche kritischen Terminabweichungen erkannt werden, führt das Expertensystem automatisch eine Revision der originären Terminplanung aus.

---

165) Vgl. Thesen (1986), S. 558ff. Ein eng verwandter Ansatz für eine ähnliche Problemstellung findet sich bei Muller (1987), S. 1665ff., insbesondere S. 1667ff.

166) ACS.1 steht für "Automated Command Support 1"; vgl. hierzu Pease (1978), S. 725ff.

In ähnlicher Weise unterstützt das Expertensystem ISA<sup>167)</sup> der Digital Equipment Corp. die Terminsteuerung. Bei ihm steht die Kopplung zwischen produktionsorientierter Terminplanung und absatzbezogener Verwaltung von Kundenaufträgen im Vordergrund. Es überwacht einerseits, ob die Kundenaufträge, aus denen die Fertigungsaufträge im Rahmen der Auftragsumwandlung hervorgegangen sind, innerhalb der vereinbarten Liefertermine fertig- und zugestellt werden können. Andererseits prüft es, ob Neuzugänge, Änderungen oder Stornierungen von Kundenaufträgen, Verzögerungen bei der Ressourcenbereitstellung oder Finanzierungsprobleme eine Anpassung der fertigungsbezogenen Terminplanung erfordern. Für den Fall, daß sich der geplante Liefertermin aus den vorgenannten Gründen nicht einhalten läßt, verfügt das Expertensystem über unterschiedliche Anpassungsstrategien. Hierbei ist es möglich, entweder die Liefertermine im Sinne einer Lieferverzögerung zu modifizieren oder aber die Ressourcen- und die Finanzierungsvorgaben abzuändern. In einem Dialog werden die Anpassungsalternativen einem Benutzer präsentiert, der auf diese Weise die tatsächliche Anpassungsweise interaktiv festlegen kann.

---

167) ISA steht für "Intelligent Scheduling Assistant"; vgl. hierzu Orciuch (1984), S. 315ff.; O'Connor (1984), S. 154f.

### 3.2.2 Vertiefende Darstellung eines Expertensystems für die Terminfeinplanung und -steuerung

Das Expertensystemen ISIS<sup>168)</sup> stellt den in der Literatur am detailliertesten dokumentierten Versuch dar, die Maschinenbelegung mit Hilfe der Künstlichen Intelligenz in fabrikorientierter Weise zu verwirklichen.

Es wurde ursprünglich am Robotics Institute der Carnegie-Mellon University in Pittsburgh entwickelt. Die Wissensakquisition erfolgte jedoch mit starkem Praxisbezug anhand eines realen Produktionssystems, der Fabrikation von Turbinenschaufeln in den Werkstätten (Turbine Component Plant) der Westinghouse Electric Corp.<sup>169)</sup>. Das Expertensystem wurde als Prototyp für diese Produktionsstätte konkret genutzt. Etliche Autoren rechnen es zu den derzeit leistungsfähigsten Expertensystemen, die für reale Problemstellungen eingesetzt

---

168) ISIS steht für "Intelligent Scheduling and Information System"; vgl. zu diesem Expertensystem, das meistens in seiner Version ISIS-II behandelt wird, Fox (1982a), S. 155ff.; Fox (1983a), S. 31ff.; Fox (1983c), S. 76ff.; Smith (1983), S. 1ff.; Fox (1984a), S. 26ff.; Fox (1984b), S. 34f.; Fox (1984d), S. 3ff.; Doumeingts (1984), S. 251ff.; Miller (1984), S. 66ff. u. 72ff.; Doumeingts (1985), S. 205ff.; Smith (1985), S. 1013ff.; o.V. (1985), S. 3ff.; Rauch-Hindin (1985), S. 14ff.; Fox (1986a;), S. 410ff.; Fox (1986c), S. 5ff.; Smith (1986b), S. 54ff.; Krallmann (1986b), S. 407f.; Kuhn (1987), S. 254f.; Krallmann (1987a), S. 135f.; Heine (1987), S. 40ff. u. 65ff.; Papas (o.J.), S. 1ff.

Bei dem Expertensystem ISIS handelt es sich um eine Teilentwicklung innerhalb des umfassender angelegten IMS-Projekts (für "Intelligent Management System"); vgl. zum letzten z.B. Fox (1981) S. 1058; Fox (1983b), S. 105ff.; Fox (1984b), S. 29ff., und Fox (1984d), S. 1ff., mit einer Auflistung der weiteren zu IMS zählenden Teilprojekte; o.V. (1985), S. 1f.

169) Vgl. Lipford (1985), o.S.

werden<sup>170</sup>). Es gelangte dennoch nicht zum Routineeinsatz, insbesondere weil die Integration in die konventionelle betriebliche Informationsverarbeitung nicht befriedigend gelang<sup>171</sup>). Auch vermochte die Effizienz der Systemnutzung nicht zu überzeugen, da die Inferenzen in der Wissensbasis von immerhin ca. 10 MByte Volumen zu unbefriedigend hohen Antwortzeiten führten<sup>172</sup>).

Die Konzepte des Expertensystems ISIS für Wissensrepräsentation und inferentielle Wissenserschließung sind so allgemein ausgelegt, daß es sich für nahezu jedes Produktionssystem zur heuristischen Maschinenbelegung einsetzen läßt<sup>173</sup>). In der Wissensbasis werden ein umfassendes Produktionsmodell und ebenso detaillierte Informationen über die einzuplanenden Fertigungsaufträge vorgehalten. Das Produktionsmodell bildet z.B. ab:

- den gesamten Betriebsmittelbestand samt seiner fertigungstechnisch relevanten Eigenschaften;
- die technischen Verfahrenskonzepte, die mit Hilfe dieser Betriebsmittel verwirklicht werden können;
- die Eigenschaften von Arbeitsplätzen;

---

170) Vgl. z.B. Krallmann (1986b), S. 408; Kuhn (1987), S. 254.

Diese Autoren lassen aber nicht erkennen, anhand welcher Kriterien sie die Leistungsfähigkeit von Expertensystemen beurteilt und aufgrund welcher empirischen Leistungsdaten sie die Kriterienerfüllung gemessen haben (wollen).

171) Vgl. zu den Anwendungsproblemen des Expertensystems ISIS Krallmann (1987a), S. 136; Heine (1987), S. 76f.; Kuhn (1987), S. 255.

172) Aus diesem Grund wird eine Reimplementierung des Expertensystems mit einer "abgemagerten" Wissensbasis und einer effizienteren Implementierungssprache beabsichtigt, die nicht an der Änderungsflexibilität, sondern an der Auswertungseffizienz ausgerichtet ist; vgl. hierzu Papas (o.J.), S. 4ff.

173) Im Vordergrund stehen zwar eindeutig Produktionssysteme vom Typ der Werkstattfertigung; vgl. Fox (1983a), S. 97ff. u. 143ff.; Fox (1983b), S. 122ff. Das Design dieses Expertensystems erwies sich aber als derart flexibel, daß es auch schon im Rahmen der Fließfertigung erprobt wurde; vgl. Fox (1983b), S. 117.

- die Einschränkungen, die sich aus den Lagerbeständen von Repetierfaktoren (Vor- und Zwischenprodukte) ergeben.
- die organisatorische Struktur des Produktionssystems.

Der Bestand an Fertigungsaufträgen wird durch das Produktionsprogramm vorgegeben. Er wird im wesentlichen durch die Restriktionen beschrieben, welche die technologischen Reihenfolgebeziehungen zwischen den Arbeitsgängen gleicher Fertigungsaufträge wiedergeben. Sie stammen aus einer vorgelagerten Arbeitsablaufplanung. Auch Optionen für die Ausführung desselben Arbeitsgangs auf verschiedenen Maschinen lassen sich in der Wissensbasis festhalten. Der Benutzer kann für die Terminplanung einzelner Aufträge zusätzliche Restriktionen dispositiver Natur vorgeben, wie z.B. spätest zulässige Fertigstellungstermine oder maximale Fertigungskosten.

Die voranstehenden Anmerkungen verdeutlichen das Gewicht, das der Problembeschreibung durch Restriktionen in Expertensystemen für die fabrikorientierte Terminplanung zukommt<sup>174</sup>). Durch Restriktionspropagierung versucht das Exemplar ISIS, eine friktionsfreie Maschinenbelegung zu planen<sup>175</sup>). Hierbei werden allen Aufträgen des vorgegebenen Produktionsprogramms Prioritäten zugeschrieben, die an die Abstände der Planungszeitpunkte von den Lieferterminen der Aufträge anknüpfen (Schlupfzeiten) und zusätzlich auf exogen vorgegebenen Prioritätsklassen beruhen können. Die Aufträge werden

---

174) Vgl. auch Fox (1984a), S. 28ff.; Smith (1986b), S. 46ff.

175) Vgl. hierzu z.B. Fox (1984a), S. 37ff.; Rauch-Hindin (1985), S. 18ff.; Smith (1986b), S. 49ff.

nach Maßgabe ihrer Prioritäten sukzessiv eingeplant<sup>176)</sup>.

Um den abstrakten Suchraum möglicher Maschinenbelegungen zu beschränken, werden nacheinander einzelne der oben skizzierten Restriktionen eingeführt, welche das Produktionssystem und den Auftragsbestand beschreiben. Die Restriktionseinbeziehung erfolgt nach heuristischen Kriterien für die Restriktionswichtigkeit<sup>177)</sup>. Wenn in einer Planungsphase die bis dahin berücksichtigten wichtigsten Restriktionen durch den vorläufigen Belegungsplan nicht gemeinsam erfüllt werden können, erzeugt das Expertensystem Alternativbelegungen. Hierzu wird auf frühere Planungsebenen zurückgeschritten (backtracking), um die friktionsverursachenden Festlegungen zu erkennen, aufzuheben und durch andere Einplanungen zu ersetzen (Relaxationstechnik). Es lassen sich auch mehrere zulässige Belegungen planen, die durch Nutzenindices bewertet werden. Für nachfolgende Planungsphasen werden nur die vorläufigen Pläne mit den höchsten Nutzenindices weiter berücksichtigt. Schließlich wird in diesem aufwendigen Suchprozeß - gegebenenfalls nach Erzeugen von Alternativen und korrigierendem

---

176) Es könnte der Einwand erhoben werden, es erfolge keine (reine) fabrikorientierte Terminplanung. Denn der o.a. Prioritätsregelbezug verweise auf eine maschinenorientierte Terminplanung.

Diese Behauptung ist jedoch falsch. Denn bei der maschinenorientierten Terminplanung dienen Prioritätsregeln dazu, aus einer Menge von Aufträgen, die vor derselben Maschine auf Bearbeitung warten, jeweils ein Element auszuwählen. Beim Expertensystem ISIS werden aber während der Prioritätsregel-Anwendung keine Maschinen betrachtet, sondern die noch nicht eingeplanten Aufträge aus dem vorgegebenen Produktionsprogramm. Die Prioritätsregeln sind dort also nicht maschinen-, sondern produktionsprogrammbezogen. Daher besteht keine Verwandtschaft mit den prioritätsregelgestützten Auftragszuordnungen zu einzelnen Maschinen bei der maschinenorientierten Terminplanung.

177) Es erstaunt, daß die Ermittlung der Restriktionswichtigkeit in keinem der Beiträge zum Expertensystem ISIS problematisiert wird. Sie wird vermittels Wissensakquisition auf den Systembenutzer verschoben.

Zurückschreiten - eine zulässige Belegung der Maschinen gefunden. Sie schreibt für den ausgewählten Auftrag vor, wie dieser durch das Produktionssystem geschleust wird.

Es werden neue Restriktionen erzeugt, die beschreiben, welche Ressourcen für die Abwicklung dieses nunmehr fest eingeplanten Auftrags gebunden oder verbraucht werden. In der dynamischen Wissensbasis wird das Modell des Produktionssystems um diese Restriktionen erweitert. Der nächste Auftrag mit der höchsten Priorität aus der Menge der noch nicht eingeplanten Aufträge wird ausgewählt. Dieser auftragsorientierte Einplanungszyklus wird so lange wiederholt, bis der gesamte Auftragsbestand abgearbeitet ist (sofern er sich friktionsfrei einplanen läßt)<sup>178)</sup>.

---

178) Bei dieser Planung wird der abstrakte Suchraum mindestens dreimal in heuristischer Weise eingeschränkt. Dies geschieht erstens bei der prioritätsgestützten Auswahl der jeweils einzuplanenden Aufträge. Alternative Auftrags-Einplanungssequenzen, die unter Umständen zu einer besseren Maschinenbelegung führen würden, können hierbei übersehen werden. Darüber hinaus werden jeweils nur solche Restriktionen simultan betrachtet, die sich auf den gerade untersuchten Auftrag beziehen. Komplexwirkungen, die aus der gleichzeitigen Gültigkeit von Restriktionen für mehrere Aufträge resultieren können, lassen sich auf diese Weise nicht simultan erfassen. Hierfür kommt z.B. die Konkurrenz mehrerer Aufträge um die knappe Kapazität eines Betriebsmittels in Frage, wobei die auftragsspezifischen Kapazitätsbedarfe die simultan zu berücksichtigenden Restriktionen darstellen. Da die Aufträge vom Expertensystem ISIS nacheinander eingeplant werden, ist eine optimale Lösung solcher Engpaßprobleme im allgemeinen nicht - höchstens zufällig - möglich. Denn Optimierungen würden stets eine simultane Erfassung aller konkurrierenden Aufträge erfordern. Vgl. zu diesem Problem des sukzessiven Berücksichtigens auftragspezifischer Restriktionen Heine (1987), S. 50. Auch schließt die sukzessive Auftragseinplanung aus, reihenfolgeabhängige Rüstkosten an den Maschinen in optimierender Weise einzubeziehen. ... (Fortsetzung der Fußnote auf der folgenden Seite!)

Statt der vollautomatischen Generierung eines Terminplans kann das Expertensystem ISIS auch in einem interaktiven Betriebsmodus eingesetzt werden. Hierbei berät es einen Benutzer in einem Dialog hinsichtlich der Erstellung von Maschinenbelegungsplänen. Vor allem erfüllt es die Funktion zu überprüfen, ob der vom Benutzer editierte Belegungsplan alle Planungsrestriktionen erfüllt<sup>179)</sup>.

---

... (Fortsetzung der Fußnote von der vorangehenden Seite:)

Zweitens werden Restriktionen schrittweise nach ihrer "Wichtigkeit" in die Planung einbezogen und jeweils solche vorläufigen Belegungen geplant, welche unter den bis dahin berücksichtigten Restriktionen zulässig sind. Da die Auswahl friktionsfreier Belegungen sensitiv auf die heuristische Reihenfolge der Restriktionseinbeziehung reagiert, ist es wieder möglich, an besseren Belegungen vorbeizuplanen. Drittens kann der gleiche Effekt aus den Nutzenbewertungen von Belegungsalternativen resultieren. Denn die Nutzenindices werden nicht in globaler Weise unter Berücksichtigung ihrer Nebenwirkungen auf das Planungsergebnis gebildet, sondern in sehr einfacher, starrer, heuristischer Weise bestimmt.

Aus den vorgenannten Gründen wäre es fehlerhaft anzunehmen, das Expertensystem ISIS verwirkliche eine vollständige Exploration des abstrakten Suchraums möglicher Maschinenbelegungen. Diese Ansicht könnte aus einer Mißinterpretation der Anmerkung von Fox (1984a), S. 37, resultieren, der nur die Suche im Raum aller möglichen Maschinenbelegungen konstatiert, ohne jedoch auszusagen, daß dieser Suchraum vollständig durchsucht werde ("... ISIS conducts a hierarchical, constraint-directed search in the space of all possible schedules."). Daher trifft auch die mitunter geäußerte Behauptung nicht zu, das Expertensystem ISIS könne optimale oder bestmögliche Maschinenbelegungen planen; vgl. zu dieser Ansicht Krallmann (1986b), S. 407; Krallmann (1986c), S. 74f.; Krallmann (1986d), S. 103 (er behauptet, das Expertensystem ISIS strebe einen "bestmöglichen Fertigungsplan" an); Wildemann (1987), S. 27 (der die Ausführungen von Krallmann übernimmt). Denn jede Optimierung setzt eine vollständige Erfassung des abstrakten Suchraums voraus. Dem widerspricht jedoch die oben erläuterte heuristische Suchraumbeschränkung. Vgl. auch Heine (1987), S. 65f.

179) Näheres zu den interaktiven Unterstützungsleistungen des Expertensystems ISIS bei Fox (1983c), S. 80f.; Fox (1984a), S. 44f.; Smith (1986b), S. 56f.

Das Expertensystem ISIS besitzt auch die Fähigkeit zur Terminsteuerung. Es ist möglich, auf Störungen im Produktionssystem "intelligent" zu reagieren, die ein Ausführen der ursprünglich geplanten Maschinenbelegung vereiteln. Es braucht keine vollständige Neuplanung vorgenommen zu werden. Stattdessen werden zunächst nur die Aufträge neu eingeplant, die von einem Maschinenausfall unmittelbar betroffen sind. Die Belegungen aller übrigen Aufträge werden als "weiche" Restriktionen für die Anpassungsplanung behandelt. Nur wenn mittelbare Auswirkungen der wenigen neu eingeplanten Aufträge dazu führen, daß sich einige dieser weichen Restriktionen nicht einhalten lassen, werden die hiervon indirekt betroffenen Aufträge in die Anpassungsplanung einbezogen.

Die Leistungsfähigkeit des Expertensystems ISIS wurde in mehr als einem Dutzend Simulationsexperimenten getestet<sup>180</sup>). Allerdings fand kein Vergleich mit konventionellen Systemen für die Maschinenbelegungsplanung, sondern nur eine absolute Leistungsbeurteilung statt. Dabei zeigten sich in Abhängigkeit von der jeweils implementierten Strategie für die Restriktionspropagierung zum Teil erhebliche Unzulänglichkeiten, wie z.B. die Überschreitung der vorgegebenen Liefertermine von 65 der insgesamt 85 simulierten Aufträge (Überschreitungsquote: 76%)<sup>181</sup>). Obwohl es sich hierbei um einen Extremfall handelt, werden doch die eingangs angesprochenen Preisungen der Leistungsfähigkeit dieses Expertensystems relativiert. Selbst die Simulationsreihen mit den besten Ergebnissen konnten die Überschreitungsquote nicht unter 16% drücken (14 Aufträge von 85 verspätet)<sup>182</sup>). Spätere Leistungstests brachten sogar zu Tage, daß das Expertensystem ISIS in Simulationsexperimenten zu höheren Verspätungskosten, Durchlaufzeiten und Anzahlen von Rüstaktivitäten führte als eine

---

180) Vgl. Fox (1983c), S. 80; Fox (1984a), S. 41ff.; Fox (1986c), S. 10 u. 12.

181) Vgl. Fox (1983c), S. 80; Fox (1984a), S. 43.

182) Vgl. Fox (1983c), S. 80; Fox (1984a), S. 43f.

konventionelle Maschinenbelegungsplanung, die auf einer starren Prioritätsregel vom COVERT-Typ für die Auftragseinplanung beruhte<sup>183)</sup>.

Als Reaktion auf diese Effizienzprobleme wurde das Expertensystem ISIS unter der Bezeichnung OPIS<sup>184)</sup> fortentwickelt. Es beruht nicht mehr nur auf der sukzessiven, prioritätsgesteuerten Auftragseinplanung. Vielmehr verfügt es auch über zwei alternative Einplanungsstrategien, die ressourcen- oder ereignisbezogen erfolgen.

Bei der ressourcenorientierten Strategie werden alle Restriktionen gemeinsam betrachtet, die jeweils für eine Maschine gelten. Hierdurch können Engpaßprobleme, die aus der Konkurrenz mehrerer Aufträge um die knappe Kapazität einer Maschine resultieren, und Rüstkosten, die von der Auftragsreihenfolge an einer Maschine abhängen, erstmals adäquat erfaßt werden<sup>185)</sup>. Im Rahmen der ereignisbezogenen Strategie werden dagegen alle Wirkungen zusammengefaßt, die von derselben Einplanungsentscheidung in einem Zeitpunkt ausgehen.

Alle drei Einplanungsstrategien berücksichtigen jeweils Teilaspekte des komplexen Terminplanungsproblems. Keine von ihnen vermag das Problem bei isolierter Anwendung in allen Facetten zu durchdringen. Daher muß jede von ihnen zu suboptimalen Belegungsplanungen füh-

---

183) Vgl. Ow (1986), S. 16ff., insbesondere S. 18 u. 22ff.; Smith (1986a), S. 2-128ff.

Die COVERT-Regel (für "COst OVER Time") besagt, an einer Maschine denjenigen Auftrag einzuplanen, der innerhalb der Menge der dort wartenden Aufträge den größten Quotienten aus Verspätungskosten und noch erforderlichen Bearbeitungszeiten aufweist.

184) OPIS steht für "Opportunistic Intelligent Scheduler"; vgl. hierzu Ow (1985), S. 1ff., dort allerdings noch ohne expliziten Bezug auf das System OPIS; Ow (1986), S. 3 u. 8ff.; Smith (1986a), S. 2-126ff.; Smith (1986b), S. 57ff.; Fox (1986c), S. 12f.; Heine (1987), S. 49ff.; Krallmann (1987a), S. 136.

185) Vgl. hierzu die o.a. Kritik an der rein auftragsbezogenen Sukzessivplanung des Expertensystems ISIS.

ren. Der Ansatz der opportunistischen Metaplanung<sup>186)</sup> des Expertensystems OPIS besteht im wesentlichen darin, die drei Einplanungsstrategien so miteinander zu kombinieren, daß das Terminplanungsproblem möglichst umfassend bewältigt wird.

Zu diesem Zweck wird zunächst die ressourcenbezogene Strategie verwendet, um Engpaßprobleme aufzudecken und so zu lösen, daß vorgegebene Liefertermine eingehalten werden<sup>187)</sup>. Dabei wird zur Planverfeinerung auf die ereignisorientierte Strategie zurückgegriffen. Für alle übrigen Ressourcen, die sich nicht als Engpässe herausgestellt haben, erfolgt die auftragsorientierte Einplanung nach dem Schema, das oben für das Expertensystem ISIS erläutert wurde. Das Zusammenwirken dieser Strategien wird mittels einer blackboard-Architektur realisiert, bei der Agenten die Ausführung jeweils einer Einplanungsstrategie betreiben<sup>188)</sup>. Eine übergeordnete Komponente legt als Meta-Agent in jeder Planungsphase fest, welcher von den (Objekt-)Agenten auf das blackboard einwirken, d.h. im Produktionsmodell eine Belegung einplanen darf.

Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß auch die Ausweitung der rein auftragsbezogenen Belegungsplanung zum opportunistischen Mix dreier Einplanungsstrategien nicht zu garantieren vermag, Terminplanungsprobleme in optimaler Weise zu lösen. Die Terminplanung

---

186) Hierbei handelt es sich um ein anderes Opportunitätsverständnis, als es der früher angeführten opportunistischen Terminsteuerung zugrundelag.

187) Hierbei handelt es sich im Prinzip um eine Termin-grobplanung auf der Basis der Durchlaufterminierung. Aufträge werden zunächst unabhängig von ihren Ressourcenbedarfen eingeplant, um anhand des vorläufigen - Planungsergebnisses festzustellen, welche Ressourcen (Maschinen) Engpaßfaktoren darstellen. Auf die derart identifizierten Engpässe wird die ressourcenorientierte Einplanungsstrategie angewendet. Ihre Ergebnisse gehen als Restriktionen ("Inseln der Stabilität") in die nachfolgenden Planungsschritte ein.

188) Die tatsächlich wesentlich komplexere Agenten-Struktur wird hier grob vereinfacht dargestellt.

behält grundsätzlich ihren heuristischen, suboptimalen Charakter. Denn erstens erfolgt kein Beweis, daß durch die drei Strategien das Terminplanungsproblem vollständig überdeckt wird. Selbst wenn dies der Fall wäre, so wird in jeder Planungsphase doch nur wieder eine Strategie isoliert angewendet. Daher werden zweitens Interdependenzen zwischen auftrags-, ressourcen- und ereignisbezogenen Problemdeterminanten grundsätzlich übersehen. Drittens liegt keine ausgereifte Theorie vor, anhand derer die Metaplanung durch den übergeordneten Agenten hinsichtlich des Optimierungsziels validiert werden könnte. Die Aufrufe der strategieausführenden Objekt-Agenten durch den Meta-Agenten erfolgen nach einem heuristischen, intuitiv-plausiblen Schema, das in keiner Weise theoretisch fundiert ist<sup>189)</sup>.

Immerhin konnte jedoch in Simulationsexperimenten<sup>190)</sup> aufgezeigt werden, daß die heuristische Belegungsplanung des Expertensystems OPIS mit seinem Strategiemix dem monostrategischen Vorläufer-Expertensystem ISIS deutlich überlegen ist. Das erstgenannte Exemplar führte zu geringeren Verspätungskosten, Durchlaufzeiten und auch Anzahlen von Rüstaktivitäten das zweitgenann-

---

189) Die Planungsstrategien, die im Meta-Agenten implementiert sind, bilden die bedeutsamste Schwachstelle des Expertensystems OPIS. Über solche Metastrategien existieren derzeit sowohl im Rahmen der KI-Forschung als auch seitens der anthropozentrischen Intelligenzforschung kaum gesicherte Erkenntnisse. Es bereitet erhebliche Schwierigkeiten, problemadäquate Metastrategien aus theoretischen Erwägungen zu erschließen. Ebenso scheitern die meisten Versuche, diese Strategien auf empirischer Basis durch Befragen oder Beobachten menschlicher Problemlöser zu erkunden. Mitunter wird die These vertreten, es handele sich um problemlösendes Wissen, das von erfahrenen Experten zwar erfolgreich angewendet, aber nicht sprachlich expliziert werden könne ("sprachloses Wissen" oder "tacit knowledge"); Näheres zu dieser These bei Zelewski (1986), S. 894ff., und den dort angeführten Quellen. Vgl. zur Problematik mangelhaften Wissens über Metastrategien im Hinblick auf das Expertensystem OPIS auch Smith (1986a), S. 2-132ff.; Ow (1986), S. 2; Heine (1987), S. 75f.

190) Vgl. Ow (1986), S. 16ff.; Smith (1986a), S. 2-128ff.; Smith (1986b), S. 57f.

te. Dabei brauchte OPIS für die Ermittlung der besseren Maschinenbelegungspläne noch nicht einmal die Hälfte der Laufzeit seines Pendantes ISIS.

Darüber hinaus erwies sich das Expertensystem OPIS auch einem konventionellen Planungssystem auf der Basis der starren COVERT-Prioritätsregel hinsichtlich aller drei vorgenannten Zielkriterien als überlegen.

## 4 Ausblick

### 4.1 Auftragsumwandlung

Die Auftragsumwandlung verbindet die Planung von Produktionsprozessen mit der Auftragsakquisition und der Absatzplanung. Einerseits führt sie durch die Ableitung von Fertigungsaufträgen zu Rahmenvorgaben für die Prozeßplanung im Produktionssystem. Andererseits muß sie auf Informationen über die aktuelle Situation des Produktionssystems zurückgreifen, um ausführbare Fertigungsaufträge generieren zu können. Daher bildet die Auftragsumwandlung eine wichtige und zugleich komplexe Schnittstelle zwischen Absatz- und Produktionsplanung<sup>191)</sup>.

Expertensysteme für die Auftragsumwandlung müssen zunächst auf Wissen über die Arbeitspläne für diejenigen Produkte (Produktfamilien) zurückgreifen, die in einem vorliegenden Kundenauftrag geordert werden. Insofern können sie als eine Erweiterung der im 2. Kapitel beschriebenen Expertensysteme für die Arbeitsplanung aufgefaßt werden oder aber die Ergebnisse solcher - vorgeschalteten - Expertensysteme abrufen. Da Arbeitspläne jedoch nicht kunden-, sondern produktbezogen erstellt werden, entsprechen sie häufig den speziellen Produkthanforderungen eines Kunden noch nicht. Daher sollten Expertensysteme für die Auftragsumwandlung die kundenspezifische Anpassung von Arbeitsplänen unterstützen.

Darüber hinaus müssen diese Expertensysteme in einem Produktionsmodell Wissen über die aktuelle Situation des zur Verfügung stehenden Produktionssystems vorhalten. Nur so ist es möglich, die Arbeitspläne auch produktionspezifisch anzupassen. Dies ist immer dann von Bedeutung, wenn mindestens ein Arbeitsgang für die Herstellung eines Produkts auf mindestens zwei alternati-

---

191) Der Planungsbegriff (i.w.S.) umfaßt - wie schon eingangs festgelegt - auch die Anpassungsplanungen der Absatz- und Produktionssteuerung.

ven Maschinen ausgeführt werden kann oder wenn für dieses Produkt mehrere technische Herstellungsverfahren zur Auswahl stehen<sup>192)</sup>. Unter diesen Voraussetzungen kann aus dem Produktionsmodell abgeleitet werden, welche Maschinen- oder Verfahrenswahlen wegen Störungen der zugehörigen Komponenten des Produktionssystems zu vermeiden sind. Ebenfalls ist es möglich, in Abhängigkeit von den aktuellen Kapazitätsauslastungen der Systemkomponenten jeweils diejenigen Maschinen bzw. Verfahren für die Arbeitsplananpassung zu selektieren, die zum Planungszeitpunkt besonders gering ausgelastet sind. Die früher skizzierte opportunistische Strategie für die Produktionssteuerung bietet sich an, die hier skizzierte Auftragsumwandlung unter Rücksicht auf die aktuelle Produktionssituation in einem Expertensystem zu realisieren.

Als zusätzliche Determinanten der Auftragsumwandlung kommen bereits vorliegende, aber noch nicht angearbeitete Kundenaufträge für das gleiche Produkt oder für Varianten aus derselben Produktfamilie in Frage. Ebenso gilt es die Lagerbestände an Zwischen- und Endprodukten zu berücksichtigen, die zur Realisierung eines Kundenauftrags herangezogen werden können, ohne entsprechende Fertigungsprozesse anstoßen zu müssen. Aufgrund dieses Wissens lassen sich mehrere Kundenaufträge durch Losbildung zu einem Fertigungsauftrag bündeln bzw. Fertigungsaufträge durch Rückgriff auf Lagerbestände vermeiden. Insbesondere die Losbildung bei mehrstufiger synthetischer Produktion stellt ein sehr komplexes Planungsproblem dar<sup>193)</sup>. In der betrieblichen Praxis wird

---

192) Die Aspekte der Maschinen- und Verfahrenswahl, die hier der Übersichtlichkeit halber getrennt behandelt werden, verhalten sich im Regelfall interdependent. Denn einerseits impliziert ein technisches Produktionsverfahren zumeist die Verwendung verfahrensspezifischer Maschinen. Andererseits bedeutet die Festlegung auf eine Maschinenkombinationen gewöhnlich die Einschränkung auf ein kombinationsspezifisches Verfahren der Produktherstellung.

193) Vgl. Stadtler (1988), insbesondere S. 240ff.

es zumeist nicht mit der Hilfe überaus aufwendiger Optimierungsmodelle, sondern durch Anwendung von heuristischen Erfahrungsregeln gelöst.

Es zeigt sich, daß die Auftragsumwandlung auf eine Fülle qualitativen Wissens zurückgreifen muß, um der Prozeßplanung im Produktionssystem konkrete Fertigungsaufträge vorgeben zu können. Einzelne Aspekte - wie z.B. die aktuelle Kapazitätsauslastung einer Maschine oder Lagermenge eines Zwischenprodukts - lassen sich zwar numerisch abbilden. Aber es ist kaum möglich, die Interdependenzen zwischen diesen vielfältigen Determinanten in quantitativen Modellen vollständig, kompakt und übersichtlich zu erfassen. Hierzu gehören etwa der Sachverhalt, einen Arbeitsgang auf unterschiedlichen, sich gegenseitig ausschließenden Maschinen ausführen zu können, oder heuristische Regeln, die Erfahrungswissen über "zweckmäßige" Zusammenfassungen von Kundenaufträgen zum Los eines Fertigungsauftrags ausdrücken<sup>194)</sup>.

Der symbolverarbeitende Umgang von Expertensystemen mit qualitativem Wissen legt deren Anwendung auf die Auftragsumwandlung nahe. Erste Ansätze in dieser Richtung liegen bereits vor, schöpfen jedoch die Breite und Tiefe des voranstehend skizzierten Umwandlungswissens bei weitem noch nicht aus.

Beispielsweise wurde von der Sperry Corp. das Expertensystem ORDER EDIT<sup>195)</sup> entwickelt, das im Dialogbetrieb genutzt werden kann, um Kundenaufträge zu bearbeiten. Hierbei werden diese Aufträge so lange durch Rückgriff auf produkt- und produktionsspezifisches Wissen interaktiv umgeformt, bis am Ende Fertigungsaufträge in die laufende Produktion eingespeist werden können.

---

194) Vgl. zu solchen heuristischen Loszusammenfassungen Stadtler (1988), S. 262ff., insbesondere S. 278f.

195) Vgl. Parker (1983), S. 39.

#### 4.2 Technische Prozeßsteuerung unter Realzeitbedingungen

Produktionsprozesse können aus technischen Gründen Realzeitbedingungen unterworfen sein, die im Falle von Störungen des Produktionsprozesses ein rasches Planen, Einleiten und Ausführen von gegensteuernden Maßnahmen zur Wiederherstellung des ungestörten Normalzustands erfordern. Oftmals übersteigt es in solchen zeitkritischen Situationen die kognitiven Fähigkeiten von Arbeitskräften, entsprechende Steuerungseingriffe vorzunehmen.

Diese kognitive Überlastung resultiert aus drei Effekten, die sich gegenseitig verstärken. Einerseits muß zur Steuerung industrieller Produktionssysteme eine Fülle von Betriebsdaten überwacht und zu einer Beurteilung der aktuellen Prozeßsituation verdichtet werden. Der Umgang mit bis zu 20.000 Rohinformationen<sup>196)</sup>, die über Sensoren aus einem Produktionssystem übermittelt werden, und bis zu 500 Alarmsignalen<sup>197)</sup> von potentiell gestörten Systemkomponenten kann in realen Produktionssystemen erforderlich werden. Andererseits ist es notwendig, die Maßnahmen zur Störungseindämmung und -beseitigung unter objektiv engen Zeitrestriktionen - beispielsweise in wenigen Minuten oder sogar Sekunden - ergreifen zu müssen.

Hinzu kommt der subjektive Streß, kurzfristig Eingriffsentscheidungen mit unter Umständen weitreichenden Konsequenzen treffen zu müssen. Ein vielfach in diesem Zusammenhang diskutiertes Problem stellt die Realzeitsteuerung von Kraftwerken dar. Insbesondere anläßlich der gravierenden Störfälle der Kernkraftwerke von Harrisburg und Tschernobyl zeigten sich die Mannschaften in den Kraftwerksleitständen vollkommen überfordert. Es wurden erhebliche Zweifel laut, ob die Realzeitsteue-

---

196) Vgl. Wittig (1985), S. 391; Knickerbocker (1985), S. 61.

197) Vgl. Moore (1984), S. 569.

rung komplexer technischer Systeme mit hohen störungsbedingten Gefährdungspotentialen Menschen überlassen werden sollte.

Es bietet sich an, das eingriffsrelevante menschliche Steuerungswissen in Expertensysteme einzubringen, deren Wissensbasen ohne Zeitdruck parallel zur Entwicklung neuer Produktionssysteme erstellt und während der Systemerprobung getestet werden können. Wenn die Nutzung der Produktionssysteme angelaufen ist, lassen sich die zugehörigen Expertensysteme als Realzeit-Monitore einsetzen, um die laufenden Produktionsprozesse zu überwachen und bei Erkennen von Produktionsstörungen automatisch gegensteuernde Eingriffe in das Produktionssystem vorzunehmen<sup>198</sup>).

Die Konzepte und Schwierigkeiten, die diesem Expertensystemeinsatz zur Prozeßsteuerung unter Realzeitbedingungen innewohnen, hat der Autor an anderer Stelle skizziert<sup>199</sup>). Hinsichtlich der praktischen Umsetzung dieser Konzepte ist aber bemerkenswert, daß sie auf ihren ursprünglich dominanten Applikationsbereich - die Realzeitsteuerung von Kernkraftwerken<sup>200</sup>) - bei weitem nicht mehr fixiert sind. Vielmehr wird heute die Anwendung von Expertensystemen in zeitkritischen Situationen

---

198) Vgl. z.B. Knight (1984), S. 411f.

199) Vgl. Zelewski (1988b), S. 90ff.

200) Vgl. hierzu die Anmerkungen in Zelewski (1988b), S. 95f., und die dort angeführte Literatur.

für eine breite Vielfalt technischer Prozeßsteuerungen diskutiert<sup>201)</sup>.

Zu den bekanntesten Expertensystemen für die technische Prozeßsteuerung gehört das Exemplar PICON<sup>202)</sup>. Mit seiner Hilfe können bis zu 20.000 Einzelbeobachtungen eines überwachten Produktionssystems erfaßt und unter Realzeitbedingungen ausgewertet werden. Ein vollautomatisches Steuern der überwachten Prozesse wird noch nicht realisiert. Stattdessen sollen Arbeitskräfte in Leitständen durch Alarmmeldungen über Betriebsstörungen und durch Empfehlungen für gegensteuernde Maßnahmen unterstützt werden. Als Besonderheit wird jedoch eine automatische Fokussierung auf "wesentliche" Steuerungsbereiche verwirklicht. Wenn das Expertensystem eine Betriebsstörung erkennt, wird die Sensorbeobachtung der

---

201) Vgl. Walker (1986), S. 113ff., zu einem Überblick über solche Expertensysteme. Vgl. auch die dort auf S. 113 aufgeführte Sammlung ihrer potentiellen Anwendungsbereiche in der technischen Prozeßsteuerung. Eberts (1984), S. 215ff., insbesondere S. 218ff., und Milberg (1987), S. 188ff., bieten konzeptionelle Überblicke über den Einsatz von Expertensystemen für die industrielle Prozeßsteuerung (Fertigungsleittechnik), gehen jedoch auf den wesentlichen Aspekt der Realzeitbedingungen nicht näher ein. Raulefs (1987), S. 120ff., berücksichtigt dagegen die Realzeitbedingungen in seiner Konzeption für die Prozeßsteuerung durch Expertensysteme ausdrücklich. Knight (1984), S. 409ff., betrachtet Expertensysteme für die industrielle Prozeßsteuerung im kybernetischen Regelkreiskonzept als intelligente Regler, die Stellgrößen zur Prozeßbeeinflussung aus speziellem, in Regeln repräsentiertem Kontrollwissen ableiten.

Vgl. zu weiteren Expertensystemen für die Realzeit-Steuerung von zeitkritischen industriellen Produktionsprozessen Moore (1984), S. 569f.; Böhme (1986), S. 46ff.; Husson (1987), S. 305ff.; Haton (1987), S. 26ff.; sowie die Beiträge in dem Sammelwerk Mamdani (1986). Auf die Möglichkeit, Expertensysteme für die Produktionssteuerung unter Realzeitbedingungen anzuwenden, weisen auch Fox (1984c), S. 6-15f.; Wildemann (1987), S. 28, und Neipp (1987), S. 81f., hin.

202) PICON steht für "Process Intelligent CONTROL"; vgl. hierzu Moore (1984), S. 570ff.; Knickerbocker (1985), S. 61ff.; Wittig (1985), S. 391f. u. 395f.; Walker (1986), S. 115f.

Störungsumgebung intensiviert, um die Störungsquelle möglichst rasch lokalisieren zu können<sup>203</sup>).

In jüngster Zeit werden auch Konzepte für Expertensysteme diskutiert, die in der Fabrik der Zukunft im Rahmen des CIM-Ansatzes Produktionsprozesse unter Realzeitbedingungen steuern sollen<sup>204</sup>). Im europäischen Raum haben sich z.B. unter der Führerschaft der Krupp Atlas Elektronik GmbH Unternehmungen und Forschungsinstitutionen zu dem Projekt KRITIC<sup>205</sup>) mit dem Ziel zusammengeschlossen, ein allgemeingültiges Entwurfskonzept für solche Expertensysteme zu erarbeiten. Es soll helfen, KI-Planungsstrategien für industrielle Anwendungsbereiche mit hoher organisatorischer Komplexität unter Realzeitbedingungen zu implementieren. Die Planung und Steuerung von Produktionsprozessen in flexiblen Fertigungssystemen bilden hierfür ein typisches Beispiel<sup>206</sup>).

Bei der Betrachtung von flexiblen Fertigungssystemen unter Realzeitbedingungen verschmelzen Prozeßplanung und -steuerung zu einer Einheit. Aus der prozeßvorausseilenden Terminplanung (off-line planning/scheduling) und der prozeßbegleitenden Terminsteuerung wird ein Amalgam, das sowohl als Realzeitplanung (on-line-

---

203) Während die vorgenannten Funktionen, die sich vornehmlich auf das Erkennen und Behandeln von Betriebsstörungen erstrecken, bereits implementiert sind, wird die "Optimierung" der Steuerung laufender Produktionsprozesse erst für die Zukunft angestrebt; vgl. Moore (1984), S. 573.

204) Vgl. z.B. Meyer, W. (1987), S. 401f. u. 404ff., insbesondere S. 405, 408f. u. Fig. 8 auf S. 411; o.V. (1988), S. 52.

205) KRITIC steht für "Knowledge Representation and Inference Techniques in Industrial Control"; vgl. hierzu Rathke (1985), S. 23; Wittig (1986), S. 1ff.; o.V. (1986), S. 24; Arlabosse (1987), S. 380ff.

206) Allerdings wurde das KRITIC-Konzept bisher noch nicht auf diese Anwendung bezogen. Vielmehr fand es - in der Gestalt von Prototyp-Expertensystemen - Einsatz zur Diagnose von Fernmeldevermittlungseinrichtungen und zur Lastverteilung in Versorgungsnetzen für elektrische Energie.

planning/scheduling) als auch als zeitkritische Prozeßsteuerung angesehen werden kann. Dieses Zusammenfließen von Planungs- und Steuerungsfunktion wurde bereits oben bei der Erläuterung des KI-Konzepts der opportunistischen Terminierung deutlich. Es wird jedoch hier um die Einhaltung von Realzeitbedingungen verschärft. Der Einsatz von Expertensystemen für die Realzeitplanung von Flexiblen Fertigungssystemen erlangt in jüngster Zeit zunehmende Beachtung<sup>207)</sup>. Ebenso werden Expertensysteme für die Realzeitplanung bei Werkstattfertigung entwickelt<sup>208)</sup>.

Im Verbundprojekt TEX-I<sup>209)</sup>, das vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wird, soll ein Kern-Expertensystem entwickelt werden, daß die Prozeßsteuerung unter Realzeitbedingungen mit dem Erkennen von Betriebsstörungen und der Diagnose mutmaßlicher Störungsursachen kombiniert. Es ist beabsichtigt, auf seiner Basis mehrere Expertensysteme als Realzeit-Monitore für unterschiedliche industrielle Produktionssysteme abzuleiten.

Ein Expertensystem, das schon derzeit sowohl auf die Diagnose und Behandlung von Betriebsstörungen als auch auf die Steuerung des Normalbetriebs von Produktionssystemen angewendet werden kann, stellt das Exemplar KARL<sup>210)</sup> dar. Allerdings sind hier die Fähigkeiten zur Auswertung großer Volumen von Sensorinformationen unter Realzeitbedingungen nicht so deutlich ausgeprägt wie beim System PICON.

---

207) Vgl. Subramanyam (1986), S. 244f.; Lin (1986), S. 568ff.

208) Vgl. Chang (1985), S. 24ff.

209) TEX-I steht für "Technische Expertensysteme zur Dateninterpretation, Diagnose und Prozeßführung"; vgl. hierzu Bathelt (1987), S. 308ff.; Carls (1987), S. 394ff.

210) KARL steht für "Knowledge Application of Rule-based Logic"; vgl. hierzu Knaeuper (1985), S. 711ff.

Literaturverzeichnis

- 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 - London - Paris - Tokyo 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.
- Bathelt, P.: Diagnoseexpertensysteme: Stand der Entwicklung im BMFT-Verbundvorhaben TEX-I, 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 - London - Paris - Tokyo 1987, S. 308-317.
- Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung, Dissertation, Universität Hannover, Hannover 1980.
- Becker, H.: Künstliche Intelligenz als Basis einer rechnerintegrierten Fertigung, in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 127 (1985), S. 218-219.
- Ben-Arieh, D.; Moodie, C.L.; Nof, S.Y.: Knowledge Based Control System for Automated Production and Assembly, 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 - Tokyo 1985, S. 285-293.
- Ben-Arieh, D.: Knowledge Based Control Systems for Automated Production and Assembly, in: Kusiak, A. (Hrsg.): Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems, Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo 1986, S. 347-368.
- Berard, C.; Braud, V.; Doumeingts, G.: Guiding techniques for manufacturing system using Artificial Intelligence, 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 - Tokyo 1985, S. 345-350.
- Biswas, G.; Oliff, M.; Sen, A.: Design of an Expert System in Operations Analysis, in: o.V.: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 12.-12.11.1985 in Tuscon, New York 1985, S. 121-125.

- Böhme, B.; Wieland, R.: Zur Anwendung von Elementen der künstlichen Intelligenz bei der Prozeßsteuerung, in: Wissenschaftliche Berichte der TH Leipzig, Nr. 4, 5. Wissenschaftliche Konferenz: Anlagenautomatisierung, 20.-22.05.1986 in Leipzig, Leipzig 1986, S. 45-50.
- Brödner, P.: Fabrik 2000 - Alternative Entwicklungspfade in die Zukunft der Fabrik, Berlin 1985.
- Bruno, G.; Elia, A.; Laface, P.: A Rule-Based System to Schedule Production, in: Computer, Vol 19, (1986), No. 7, S. 32-48.
- Bullers, W.I.; Nof, S.Y.; Whinston, A.B.: A Logic Representation of Manufacturing Control, 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. 117-119.
- Bullers, W.I.; Nof, S.Y.; Whinston, A.B.: Artificial Intelligence in Manufacturing Planning and Control, in: AIIE Transactions, Vol. 12 (1980), S. 351-363.
- Carls, H.: Eine Intelligente Schnittstelle zur Ankopplung Technischer Prozesse an ein Experten-System, in: Balzert, H.; Heyer, G.; Lutze, R. (Hrsg.): Expertensysteme '83 - Konzepte und Werkzeuge, Fachtagung, 7.-8.04.1987 in Nürnberg, Stuttgart 1987, S. 394-405.
- Chang, F.-C.: A Knowledge-Based Real-Time Decision Support System for Job Shop Scheduling at the Shop Floor Level, Dissertation, Ohio State University, o.O. (Ann Arbor) 1985.
- 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.
- Conway, R.W.; Maxwell, W.L.; Miller, L.W.: Theory of Scheduling, Reading - Palo Alto - London - Don Mills 1967.
- 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.
- Crestin, J.P.: Syntax and Semantics of Programming Languages versus CAD/CAM Requirements: The Role of Artificial Intelligence Languages, in: Ponomaryov, V.M. (Hrsg.): Artificial Intelligence, Proceedings of the IFAC Symposium, 4.-6.10.1983 in Leningrad, Oxford - New York - Toronto - Sydney - Paris - Frankfurt 1984, S. 343-350.
- 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, 7.-8.04.1987 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.

de Kleer,J.: Problem Solving with the ATMS, in: Artificial Intelligence, Vol. 28 (1986), S. 197-224.

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.

Dillmann,R.: Modular Computer Controls for Manufacturing Equipment, in: Rembold,U.; Dillmann,R.: Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing, Advanced CREST Course on Computer Integrated Manufacturing (CIM 83), 5.-16.10.1983 in Karlsruhe, Lecture Notes in Computer Science 168, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1984, S. 267-328.

Dobler,G.: Ein umfassendes Mensch-Maschine-Kommunikations-Modell zur On-Line-Simulation von Produktionsabläufen in der Werkstatt- und Reihenfertigung und sein Einsatz im Rahmen des computerunterstützten Entscheidungsstrainings, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen - Nürnberg 1976.

Doumeings,G.: Methodology to Design Computer Integrated Manufacturing and Control of Manufacturing Unit; in: Rembold,U.; Dillmann,R. (Hrsg.): Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing, Advanced CREST Course on Computer Integrated Manufacturing (CIM 83), 5.-16.10.1983 in Karlsruhe, Lecture Notes in Computer Science 168, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1984, S. 194-265.

- Doumeingts, G.; Berard, C.; Breuil, D.; Maisonneuve, M.: Use of Artificial Intelligence for Piloting Manufacturing Unit, in: Falster, P.; Mazumder, R.B. (Hrsg.): Modeling Production Management Systems, Proceedings of the IFIP WG 5.7 Working Conference on M.P.M.S., 29.-31.08.1984 in Kopenhagen, Amsterdam - New York - Oxford 1985, S. 197-218.
- 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.
- Eberts, R.E.; Nof, S.Y.; Zimolong, B.; Salvendy, G.: Dynamic Process Control: Cognitive Requirements and Expert Systems, in: Salvendy, G. (Hrsg.): Human-Computer Interaction, Proceedings of the First USA-Japan Conference, 18.-20.08.1984 in Honolulu, Amsterdam 1984, S. 215-228.
- Eiben, B.; Eisermann, J.; Fedderwitz, W.: PARES - Ein Expertensystem für die Leitwartentechnik, in: Balzert, H.; Heyer, G.; Lutze, R. (Hrsg.): Expertensysteme'83 - Konzepte und Werkzeuge, Fachtagung, 7.-8.04.1987 in Nürnberg, Stuttgart 1987, S. 102-116.
- 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), 3.-8.09.1975 in Tbilisi, o.O. (Cambridge/Massachusetts) 1975, Vol. 1, S. 483-490.
- Fisher, E.L.: Expert Systems Can Lay Groundwork For Intelligent CIM Decision Making, in: Industrial Engineering, Vol. 17 (1985), No. 3, S. 78-83.
- Fox, M.S.: The Intelligent Management System: An Overview, Technical Report CMU-RI-TR-81-4, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon-University, Pittsburgh 1981.
- Fox, M.S.; Allen, B.; Strohm, G.: Job-Shop Scheduling: An Investigation in Constrained-Directed Reasoning; in: o.V.: Proceedings of the Second Annual National Conference on Artificial Intelligence AAAI-82, 18.-20.08.1982 in Pittsburgh, Menlo Park 1982, S. 155-158 (a).
- Fox, M.(S.): The Need for Active Systems in the Factory of the Future - Intelligent Systems Laboratory, in: o.V.: Proceedings of the 1982 Annual Conference of The Society For Information Management, o.O. 1982, S. 81-88 (b).
- Fox, M.S.: Constrained-Directed Search: A Case Study of Job Shop Scheduling, Dissertation, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1983 (a).
- Fox, M.S.: The Intelligent Manufacturing System: An Overview, in: Sol, H.G. (Hrsg.): Processes and Tools for Decision Support, Proceedings of the Joint IFIP WG 8.3/IASA Working Conference on Processes and Tools for Decision Support, 19.-21.07.1982 in Laxenburg, Amsterdam - New York - Oxford 1983, S. 105-130 (b).

Fox, M.S.; Smith, S.F.; Allen, B.P.; Strohm, G.A.; Wimberly, F.C.: ISIS: A Constrained-Directed Reasoning Approach to Job Shop Scheduling, in: o.V.: Proceedings Trends & Applications 1983 - Automating Intelligent Behavior - Applications and Frontiers, Silver Spring 1983, S. 76-81 (c).

Fox, M.S.; Smith, S.F.: ISIS - a knowledge-based system for factory scheduling, in: Expert Systems, Vol. 1 (1984), No. 1, S. 25-49 (a).

Fox, M.S.: Artificial Intelligence in the Factory of the Future, in: o.V.: Proceedings of the 12th Annual Computer Science Conference in Philadelphia, New York 1984, S. 29-38 (b).

Fox, M.S.; Smith, S.F.: The Role of Intelligent Reactive Processing in Production Management, in: o.V.: Proceedings of the CAM-I's 13th Annual Meeting and Technical Conference, 13.-15.11.1984 in Clearwater Beach, o.O. 1984, S. 6-13 - 6-17 (c).

Fox, M.S.: Intelligent Management Systems in Manufacturing, Technical Paper EE84-826, Society of Manufacturing Engineers, Preprint eines Vortrags, anläßlich: EMTAS'84 Conference, 9.-11.10.1984 in Raleigh, Dearborn 1984 (d).

Fox, M.S.: Complexity, Uncertainty and Opportunistic Scheduling, in: o.V.: The Second Conference on Artificial Intelligence Applications, 12.-13.12.1985 in Miami Beach, Silver Spring 1985, S. 487-492.

Fox, M.S.; McDermott, J.: The Role of Databases in Knowledge-Based Systems, in: Brodie, M.L.; Mylopoulos, J. (Hrsg.): On Knowledge Base Management Systems - Integrating Artificial Intelligence and Database Technologies, Berlin - Heidelberg - London - Paris - Tokyo 1986, S. 407-430 (a).

Fox, M.S.: Industrial Applications of Artificial Intelligence, in: Robotics, Vol. 2 (1986), S. 301-311 (b).

Fox, M.S.: Observations on the Role of Constraints in Problem Solving, Preprint eines Vortrags, anläßlich: Annual Conference of the Canadian Society for Computational Studies of Intelligence, im Mai 1986 in Montreal (c).

Fox, M.S.: The Implementation of Opportunistic Scheduling, in: Hertzberger, L.O.; Groen, F.C.A. (Hrsg.): Intelligent Autonomous Systems - An International Conference, 8.-11.12.1986 in Amsterdam, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1987, S. 231-240.

Fröhner, K.-D.; Heinrich, G.: Langfristige Entwicklungen bei der Produktionsplanung und -steuerung - Beitrag der PPS zur produktionswirtschaftlichen Flexibilität, in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 35. Jg. (1986), S. 166-170.

Gliviak, F.; Kubis, J.; Micovsky, A.; Karabinosova, E.: A Manufacturing Cell Management System CEMAS, in: Plan-der, 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.

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.

Grant, T.J.: Knowledge-Based Scheduling, Paper presented at Institution of Electrical Engineers Colloquium on Knowledge-Based Planning and Scheduling, 9.04.1986, Brunel University, Knowledge-Based Planning Group, Uxbridge 1986 (a).

Grant, T.J.: Lessons for O.R. from A.I.: A Scheduling Case Study, in: Journal of Operational Research Society, Vol. 37 (1986), S. 41-57 (b).

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.

Groditzki, G.: Expertensysteme in der Fertigungsindustrie unter IBM-Expert System Environment, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 494-513.

Haton, J.-P.: Manufacturing: A Challenge for Artificial Intelligence Technology, in: Bernold, T. (Hrsg.): Artificial Intelligence in Manufacturing - Key to Integration?, Proceedings of the Technology Assessment and Management Conference, 7.-8.11.1985 in Rüslikon, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1987, S. 21-32.

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.

Heine, D.: Expertensysteme für die Terminplanung bei Werkstattfertigung, Diplomarbeit Nr. 3/383, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1987.

Hennings, R.D.: Expertensysteme: Grundlagen, Entwicklung, Anwendungen, Trends, in: Hennings, R.D.; Munter, H.: Artificial Intelligence - 1. Expertensysteme, Berlin 1985, S. 13-310.

- Hoch, P.: Betriebswirtschaftliche Methoden und Zielkriterien der Reihenfolgeplanung bei Werkstatt- und Gruppenfertigung, Frankfurt- Zürich 1973.
- Hörnig, K.M.: Methoden der künstlichen Intelligenz in Produktionsplanung und -steuerung, 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 - Tokyo 1986, S. 425-431.
- Homem de Mello, L.S.; Sanderson, A.C.: AND/OR Graph Representation of Assembly Plans, Report CMU-RI-TR-86-6, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1986.
- Hsu, C.-L.: An Expert System Approach for Selection and Optimization of Machining Process Parameters, Dissertation, University of Illinois at Chicago, Ann Arbor 1985.
- Husson, J.-M.: PILOTEX: Expert System for Process Control and Maintenance, in: Bernold, T. (Hrsg.): Artificial Intelligence in Manufacturing - Key to Integration?, Proceedings of the Technology Assessment and Management Conference, 7.-8.11.1985 in Rüslikon, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1987, S. 305-312.
- Iudica, N.R.: GUMMEX - ein Expertensystem zur Generierung von Arbeitsplänen für die Fertigung, in: Nachrichten für Dokumentation, 36. Jg. (1985), S. 22-27.
- Jardine, T.J.: A Machinability Knowledge Based System, in: Kowalik, J.S. (Hrsg.): Knowledge Based Problem Solving, Englewood Cliffs 1986, S. 257-269.
- Kaplansky; Koch, R.: KI-Verfahren für die NC-Teilprogrammierung, in: CAD-CAM Report, 6. Jg. (1987), Nr. 2, S. 30-38.
- Kempf, K.G.: Manufacturing and Artificial Intelligence, in: Robotics, Vol. 1 (1985), No. 1, S. 13-25.
- Kern, W.: Industrielle Produktionswirtschaft, 3. Aufl., Stuttgart 1980.
- Kerr, R.M.; Ebsary, R.V.: Implementation of an Expert System for Production Scheduling in a Small Manufacturing Company - A Case Study, Working Paper, University of New South Wales, o.O. 1985.
- Kiratli, G.: Assessment of the Application of Expert Systems in Flexible Manufacturing, in: Bernold, T. (Hrsg.): Artificial Intelligence in Manufacturing - Key to Integration?, Proceedings of the Technology Assessment and Management Conference, 7.-8.11.1985 in Rüslikon, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1987, S. 159-169.
- Knaeuper, A.; Rouse, W.B.: A Rule-Based Model of Human Problem-Solving Behavior in Dynamic Environments, in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15 (1985), S. 708-719.

- Knickerbocker, C.G.; Moore, R.L.; Hawkinson, L.B.; Levin, M.E.: The PICON Expert System for Process Control, in: Expert Systems and their Applications, 5th International Workshop, Papers, Avignon 1985, S. 59-66.
- Knight, B.; Endersby, R.; Voller, V.R.: The use of expert systems in industrial control, in: Measurement and Control, Vol. 17 (1984), S. 409-413.
- Koch, R.: NC-Programmierung mit Hilfe eines Expertensystems, dargestellt am Beispiel ICEM PINC, in: Werkstattstechnik, 78. Jg. (1988), S. 95-99.
- Kochan, D.; Schaller, J.: Development Stages from Intelligent Systems of Production Planning towards Computer Integrated Manufacturing (CIM), in: o.V.: CAMP'85 - Computer Graphics Anwendungen für Management und Produktivität, 24.-27.09.1985 in Berlin, Tagungsband, o.O. 1985, S. 231-236.
- Krallmann, H.; Bader, C.: Expertensysteme für die computerintegrierte Fertigung (CIM), in: Krallmann, H. (Hrsg.): Expertensysteme im Unternehmen, Möglichkeiten - Grenzen - Anwendungsbeispiele, Berlin 1986, S. 135-152 (a).
- 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 - Tokyo 1986, S. 396-423 (b).
- Krallmann, H.: Anwendungen in CIM, in: State of the Art, o.Jg. (1986), Heft 1, S. 73-78 (c).
- Krallmann, H.: Expertensysteme für die computerintegrierte Fertigung, in: Fortschrittliche Betriebsführung und Industrial Engineering, 35. Jg. (1986), S. 100-106 (d).
- Krallmann, H.: Expertensysteme, in: Geitner, U.W. (Hrsg.): CIM-Handbuch - Wirtschaftlichkeit durch Integration, Braunschweig - Wiesbaden 1987, S. 127-138 (a).
- 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 - London - Paris - Tokyo 1987, S. 193-208 (b).
- Krogh, B.H.; Sanderson, A.C.: Modeling and Control of Assembly Tasks and Systems, Report CMU-RI-TR-86-1, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1985.
- Kuhn, A.; Noche, B.; Hellingrath, B.: Expertensysteme in der Logistik, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 250-270.
- Kusiak, A.: Artificial Intelligence and Operations Research in Flexible Manufacturing Systems, in: INFOR, Vol. 25 (1987), S. 2-12.

- Lamatsch, A.; Morlock, M.; Neumann, K.; Rubach, T.: SCHEDULE - An Expert System for Machine Scheduling, Report WIOR-294, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1986.
- Leclair, S.R.: A Multiexpert Knowledge System Architecture for Manufacturing Decision Analysis, Dissertation, Arizona State University, Ann Arbor 1985.
- Le Pape, C.; Sauve, B.: SOJA: Un système d'ordonnancement journalier d'atelier, in: o.V.: Les systèmes experts et leurs applications, 5th International Workshop, Avignon 1985, S. 849-867 (a).
- Le Pape, C.: SOJA: A Daily Workshop Scheduling System, in: o.V.: Expert Systems 85, Proceedings of the Fifth Technical Conference of the British Computer Society Specialist Group on Expert Systems, im Dezember 1985, o.O. 1985, S. 195-211 (b).
- Liebowitz, J.; Lightfoot, P.: Expert Scheduling Systems: Survey and Preliminary Design Concepts, in: Applied Artificial Intelligence, Vol. 1 (1987), S. 261-283.
- Lineback, J.R.: AI transforms CAD/CAM to COM, in: Electronics Week, Vol. 57 (1984), No. 36, S. 17-18.
- Lin, L.-E.S.; Chung, S.-L.: A Systematic FMS Model for Real-Time on-line Control and Question-Answerer Simulation Using Artificial Intelligence, 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 - Tokyo 1986, S. 567-579.
- Lipford, A.: Carnegie-Mellon and major firms join in AI projects, in: American Metal Market/Metalworking News, Ausgabe vom 14.01.1985.
- Major, F.: CIM fordert den Manager der Zukunft - Messe und Kongress Camp 85 in Berlin: Computerintegrierte Fertigung zwingt gewachsene Betriebsstrukturen zu überdenken, in: VDI nachrichten, 39. Jg. (1985), Nr. 40, S. 20.
- Mamdani, A.; Efstathiou, J. (Hrsg.): Expert Systems and Optimisation in Process Control, Aldershot 1986.
- Marchand, H.: KI im Software-Alltag: Neue Wege für die Programmierung, in: computer magazin, 13. Jg. (1984), Heft 10, S. 46-48.
- 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 Rüslikon, Amsterdam - New York - Oxford 1985, S. 135-141 (a).

Marchand, H.: Objektorientierte Wissensdarstellung in industriellen Expertensystemen, in: Brauer, W.; Radig, B. (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme, Internationaler GI-Kongreß'85, 28.-29.10.1985 in München, Informatik-Fachberichte 112, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985, S. 145-151 (b).

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.: Die Theorie der Mustererkennung in den Wirtschaftswissenschaften, in: (Schmalenbachs) Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 29. Jg. (1977), S. 777-794.

Mertens, P.; Allgeyer, K.; Schumann, M.: Stand des Projekts "Expertensysteme zur Unterstützung betriebswirtschaftlicher Diagnosen", Arbeitspapiere der Informatik-Forschungsgruppe VIII, Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg 1985.

Mertens, P.: Expertensysteme in den betrieblichen Funktionsbereichen - Chancen, Erfolge, Mißerfolge, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 112-175.

Meyer, H.-D.: Der kommerzielle Einsatz von Expertensystemen zur strategischen Unterscheidungsunterstützung in der computerintegrierten Fertigung, in: o.V.: KOMM-TECH'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. 6V-1 - 6X-15.

Meyer, W.: ESPRIT 932: Knowledge Based Real-Time Supervision in Computer Integrated Manufacturing (CIM), 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 - London - Paris - Tokyo 1987, S. 401-412.

Milberg, J.; Lutz, P.: Wissensverarbeitung - eine Herausforderung für die Produktionstechnik, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 176-201.

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 - Tokyo 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.

Moore, R.L.; Hawkinson, L.B.; Knickerbocker, C.G.; Churchman, L.M.: A Real-Time Expert System for Process Control, in: o.V.: First Conference on Artificial Intelligence Applications, 5.-7.12.1984 in Denver, Silver Spring 1984, S. 569-576.

Morton, T.E.; Fox, M.S.; Smunt, T.(L.): A Planning and Scheduling System for Flexible Manufacturing, in: o.V.: Proceedings of the First TIMS-ORSA Conference on Flexible Manufacturing Systems, im August 1984, o.O. 1984, S. 314-326.

Morton, T.E.; Smunt, T.L.: A Planning and Scheduling System for Flexible Manufacturing, in: Kusiak, A. (Hrsg.): Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies, Amsterdam - New York - Oxford 1986, S. 151-164.

Mouleeswaran, C.B.; Fischer, H.G.: A Knowledge-Based Environment for Process Planning, Paper, Siemens Corporate Research and Support, Inc., Princeton o.J. (1985).

Muller, H.; De Samblanckx, S.; Matthys, D.: The expert system approach and the flexibility-complexity problem in scheduling production systems, in: International Journal on Production Research, Vol. 25 (1987), S. 1659-1670.

Nau, D.S.; Chang, T.-C.: Prospects for Process Selection Using Artificial Intelligence, in: Computers in Industry, Vol. 4 (1983), S. 253-263.

Nedeß, C.; Friedewald, A.; Plog, J.: Expertensysteme - Erfahrung ergänzt das CIM-Konzept, in: VDI-Z(eitschrift), Bd. 128 (1986), S. 729-733.

Neipp, G.: Künstliche Intelligenz in der Produktion, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 58-111 (Anmk. des Verf.: anstelle des Druckfehlers "Intelligent" ist "Intelligenz" gemeint).

Neumann, K.: Operations-Research-Expertensysteme - Wissenstransfer für die klein- und mittelständische Industrie, in: Henn, R. (Hrsg.): Technologie, Wachstum und Beschäftigung, Festschrift für Lothar Späth, Berlin - Heidelberg - New York - London - Paris - Tokyo 1987, S. 264-273.

Newman, P.A.; Kempf, K.G.: Opportunistic Scheduling for Robotic Machine Tending, in: Weisbin, C.R. (Hrsg.): Artificial Intelligence Applications - The Engineering of Knowledge-Based Systems, Proceedings of the Second Conference, 11.-13.12.1985 in Miami Beach, Washington - Amsterdam 1985, S. 168-175.

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'Connor, D.E.: Using Expert Systems to Manage Change and Complexity in Manufacturing, in: Reitman, W. (Hrsg.): Artificial Intelligence Applications for Business, Proceedings of the NYU Symposium, 18.-20.05.1983 in New York, Norwood 1984, S. 149-157.

O'Leary, D.E.: Expert Systems in Production Management, in: Lev, B. (Hrsg.): Production Management: Methods and Studies, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1986, S. 175-185.

Orciuch, E.; Frost, J.: ISA: Intelligent Scheduling Assistant, in: o.V.: First Conference on Artificial Intelligence Applications, 5.-7.12.1984 in Denver, Silver Spring 1984, S. 314-320.

o.V.: Project Sampler, Intelligent Systems Laboratory, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1985.

o.V.: Künstliche Intelligenz für die Prozeßbeschreibung - Mit Wissen steuern - "Kritic" soll europäische Position stärken, in: VDI nachrichten, 40. Jg. (1986), Nr. 33, S. 24.

o.V.: International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production Planning and Control, in: SIGART Newsletter, No. 100 (1987), S. 7.

o.V.: Gemeinsame Forschung für Expertensysteme, in: dialog, Magazin der Nixdorf Computer AG, o.Jg. (1988), Heft 2, S. 52.

Ow, P.S.; Smith, S.F.: Towards an Opportunistic Scheduling System, (Working Paper,) Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1985.

Ow, P.S.; Smith, S.F.: Viewing Scheduling as an Opportunistic Problem-Solving Process, Working Paper, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1986.

Pabst, H.-J.: Analyse der betriebswirtschaftlichen Effizienz einer computergestützten Fertigungssteuerung mit CAPOSS-E in einem Maschinenbauunternehmen mit Einzel- und Kleinserienfertigung, Frankfurt - Bern - New York 1985.

Papas, P.N.: ISIS Project in Review, Pittsburgh o.J.

Parker, R.: An expert for every office, in: Computer Design, Vol. 22 (1983), No. 12, S. 37-46.

- Pease III, M.C.: ACS.1: An Experimental Automated Command Support system, in: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-8 (1978), S. 725-735.
- Phillips, R.H.; Mouleeswaran, C.B.: A Knowledge-Based Approach to Generative Process Planning, in: o.V.: Proceedings Autofact'85, 4.-7.11.1985 in Detroit, Amsterdam 1985, S. 10-1 - 10-15.
- Pyper, M.: Logistik integriert Transport und Fertigung - Die Unternehmen werden anpassungsfähiger - Expertenwissen im Computer, in: VDI nachrichten, 41. Jg. (1987), Nr. 39, S. 32.
- Ranky, P.: The Design and Operation of FMS - Flexible Manufacturing Systems, Amsterdam 1983.
- Rathke, H.; Wittig, T.: Expertenwissen und Expertensysteme in der industriellen Prozeß- und Fertigungssteuerung - Für die menschliche Expertise gibt es vorerst keinen Ersatz - Zeitkritische Dialoge lassen keinen Dialog mit dem Benutzer zu, in: VDI nachrichten, 40. Jg. (1986), Nr. 50, S. 23.
- Rauch-Hindin, W.B.: Artificial Intelligence in Business, Science, and Industry, Vol. II: Applications, Englewood Cliffs 1985.
- Raulefs, P.; D'Ambrosio, B.; Fehling, M.; Forrest, S.; Wilber, M.: Real-Time Process Management for Materials Composition, in: o.V.: 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications, 23.-27.02.1987 in Kissimmee, Proceedings, Washington 1987, S. 120-125.
- Rembold, U.; Epple, W.K.: Present State and Future Trends in the Development of Programming Languages for Manufacturing, in: Rembold, U.; Dillmann, R. (Hrsg.): Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing, Advanced CREST Course on Computer Integrated Manufacturing (CIM 83), 5.-16.10.1983 in Karlsruhe, Lecture Notes in Computer Science 168, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1984, S. 483-528.
- Rethfeld, U.; Burgermeister, W.: Expertensysteme als neue CAI-Problemlösungstechnik, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 438-470.
- Robbins, J.H.: PEPS: The Prototype Expert Priority Scheduler, in: o.V.: Proceedings Autofact'85, 4.-7.11.1985 in Detroit, Amsterdam 1985, S. 13-10 - 13-34.
- 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), 3.-8.09.1975 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.

Sadowski, R.P.: Computer-Integrated Manufacturing Series Will Apply Systems Approach To Factory of Future, in: Industrial Engineering, Vol. 16 (1984), No. 1, S. 34-40.

Sauerwein, W.: Planerstellen mit besonderer Berücksichtigung der Zeit-Komponente, Diplomarbeit, Universität Bonn, Institut für Informatik, Bonn 1984.

Scheer, A.-W.: Stand und Trends der computergestützten Produktionsplanung und -steuerung (PPS) in der Bundesrepublik Deutschland, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 53. Jg. (1983), S. 138-155.

Schmidt, E.: Mit Robotern und Computern zur Fabrik von morgen - Expertensysteme werden helfen, komplexe Produktionsanlagen zu programmieren, in: VDI nachrichten, 39. Jg. (1985), Nr. 18, S. 2.

Shaw, M.J. (P.); Whinston, A.B.: Task Bidding and Distributed Planning in Flexible Manufacturing, in: o.V.: The Second Conference on Artificial Intelligence Applications - The Engineering of Knowledge-Based Systems, o.O. (Silver Spring) 1985, S. 184-189.

Shaw, M.J.P.; Whinston, A.B.: Applications of Artificial Intelligence to Planning and Scheduling in Flexible Manufacturing, in: Kusiak, A. (Hrsg.): Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies, Amsterdam - New York - Oxford 1986, S. 223-242 (a).

Shaw, M. (J.P.): A Pattern-Directed Approach to FMS Scheduling, in: Steckel, 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 - Tokyo 1986, S. 545-554 (b).

Shen, S.; Chang, Y.-L.: An AI Approach to Schedule Generation in A Flexible Manufacturing System, in: Steckel, 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 - Tokyo 1986, S. 581-592.

Smith, S.F.: Exploiting Temporal Knowledge to Organize Constraints, Report CMU-RI-TR-83-12, Intelligent Systems Laboratory, The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh 1983.

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).

Smith, S.F.; Ow, P.S.; Lepape, C.; McLaren, B.; Muscettola, N.: Integrating Multiple Scheduling Perspectives to Generate Detailed Production Plans, in: o.V.: Proceedings 1986 SME Conference on Artificial Intelligence in Manufacturing, 1986 in Long Beach, o.O. 1986, S. 2-123 - 2-137 (a).

Smith, S.F.; Fox, M.S.; Ow, P.S.: Constructing and Maintaining Detailed Production Plans: Investigations into the Development of Knowledge-Based Factory Scheduling Systems, in: AI Magazine, o.Jg. (fall 1986), S. 45-61 (b).

Spur, G.: Der Ingenieur braucht die Kreativität des Künstlers, in: IBM Nachrichten, 35. Jg. (1985), Heft 276, S. 6-15.

Stadtler, H.: Hierarchische Produktionsplanung bei losweiser Fertigung, Heidelberg 1988.

Stefik, M.: Planning with Constraints (MOLGEN: Part 1), in: Artificial Intelligence, Vol. 16 (1981), S. 111-139.

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 - Tokyo 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 - London - Paris - Tokyo 1987, S. 166-172 (b).

Stockert, A.: Anforderungen an Expertensysteme im Produktions- und -steuerungsbereich, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 323-353.

Subramanyam, S.; Askin, R.G.: An Expert Systems Approach to Scheduling in Flexible Manufacturing Systems, in: Kusiak, A. (Hrsg.): Flexible Manufacturing Systems: Methods and Studies, Amsterdam - New York - Oxford 1986, S. 243-256.

Sussman, G.J.; Steele, G.L.: CONSTRAINTS: A Language for Expressing Almost-Hierarchical Descriptions, in: Artificial Intelligence, Vol. 14 (1980), S. 1-39.

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, 5.-7.12.1984 in Denver, Silver Spring 1984, S. 410-416.

Thesen,A.; Lei,L.: An "Expert" System for Scheduling Robots in a Flexible Electroplating System with Dynamically Changing Workloads, in: Steckel,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 - Tokyo 1986, S. 555-566.

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, 6.-10.04.1987 in Edinburgh, Chichester - New York - Brisbane - Toronto - Singapore 1987, S. 63-78.

Turban,E.; Sepehri,M.: Applications of Decision Support and Expert Systems In Flexible Manufacturing Systems, in: Kusiak,A. (Hrsg.): Modelling and Design of Flexible Manufacturing Systems, Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo 1986, S. 369-386.

Van Dyke Parunak,H.; Irish,B.W.; Kindrick,J.; Lozo,P.W.: Fractal Actors for Distributed Manufacturing Control, in: Weisbin,C.R. (Hrsg.): Artificial Intelligence Applications - The Engineering of Knowledge-Based Systems, Proceedings of the Second Conference, 11.-13.12.1985 in Miami Beach, Washington Amsterdam 1985, S. 653-660.

Van Dyke Parunak,H.: Manufacturing Experience with the Contract Net, in: Huhns,M.N. (Hrsg.): Distributed Artificial Intelligence, London - Los Altos 1987, S. 285-310.

Walker,T.C.; Miller,R.K.: Expert Systems 1986 - An Assessment of Technology and Applications, Madison 1986.

Warman, E.A.: Manufacturing and Artificial Intelligence, in: Ponomaryov, V.M. (Hrsg.): Artificial Intelligence, Proceedings of the IFAC Symposium, 4.-6.10.1983 in Leningrad, Oxford - New York - Toronto - Sydney - Paris - Frankfurt 1984, S. 59-63.

Wiendahl, H.-P.; Lüssenhop, T.: Ein neuartiges Produktionsprozeßmodell als Basis eines Expertensystems für die Fertigungssteuerung, 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 - Tokyo 1986, S. 433-454.

Wiendahl, H.-P.; Ludwig, E.: Grundlagen eines modellorientierten Expertensystems zur kurzfristigen Fertigungsablaufdiagnose, in: Wildemann, H. (Hrsg.): Expertensysteme in der Produktion, München 1987, S. 297-322.

Wildemann, H.: Expertensysteme als CIM-Baustein - Betriebswirtschaftlich-technologische Anforderungen an wissenbasierte 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.

Wittig, T.: Expertensysteme in der Prozeßleittechnik, in: Brauer, W.; Radig, B. (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme, Internationaler GI-Kongreß'85, 28.-29.10.1985 in München, Informatik-Fachberichte 112, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo 1985, S. 384-397.

Wittig, T.: ESPRIT-Project KRITIC, Technical Memo 1, Project 387, Krupp Atlas Elektronik GmbH, Bremen 1986.

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 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.: Betriebswirtschaftliche Aspekte des industriellen Einsatzes von Expertensystemen - Anwendungsmöglichkeiten und Bewertung -, Arbeitsbericht Nr. 21, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1988 (a).

Zelewski, S.: Expertensysteme zur Sicherung der Betriebsbereitschaft in der Fabrik der Zukunft, Arbeitsbericht Nr. 23, Seminar für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft, Universität Köln, Köln 1988 (b).

## **Errata**

Im Literaturverzeichnis sind die Quellenangaben:

- Fox (1985)
- Fox (1987)

fehlerhaft. Sie sind zu ersetzen durch:

### **Fox, B. (1985)**

Fox, B.R.; Kempf, K.G.: Complexity, Uncertainty and Opportunistic Scheduling; in: Weisbin, C.R. (Hrsg.): Artificial Intelligence Applications - The Engineering of Knowledge-Based Systems, Proceedings of the Second Conference, 11.-13.12.1985 in Miami Beach, Washington - Amsterdam 1985, S. 487-492.

### **Fox, B. (1987)**

Fox, B.R.: The Implementation of Opportunistic Scheduling; in: Hertzberger, L.O.; Groen, F.C.A. (Hrsg.): Intelligent Autonomous Systems, An International Conference, 8.-11.12.1986 in Amsterdam, Amsterdam - New York - Oxford - Tokyo 1987, S. 231-240.

Verzeichnis der Arbeitsberichte des  
Seminars für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre,  
Industriebetriebslehre und Produktionswirtschaft der  
Universität zu Köln

(bis Sommer 1986: Seminar für Allgemeine  
Betriebswirtschaftslehre und Fertigungswirtschaft)

---

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

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