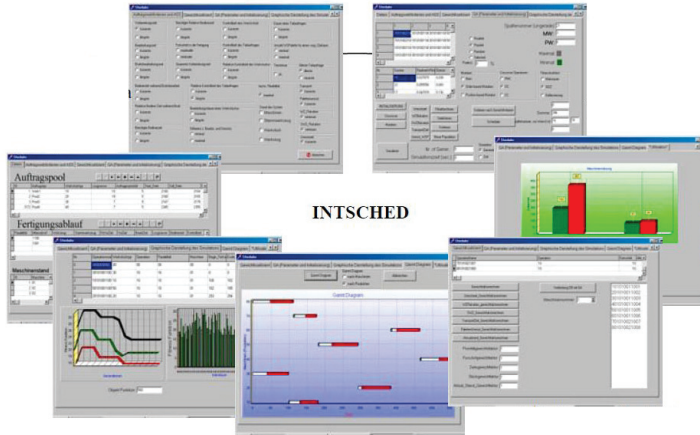




FORTSCHRITTSBERICHT SIMULATION FBS 6



Edmond Hajrizi

Intelligentes Online Planungs- und Steuerungssystem für Flexible Produktionssysteme basierend auf Simulation und Optimierung mit Genetischen Algorithmen

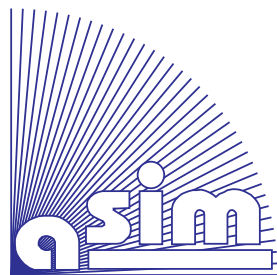


ISBN Ebook 978-3-903347-06-9

ISBN Print 978-3-901608-56-8

DOI: 10.11128/fbs.06





Fortschrittsberichte Simulation

FBS Band 6

Herausgegeben von ASIM

Arbeitsgemeinschaft Simulation, Fachausschuß 4.5 der GI

Edmond Hajrizi

Intelligentes Online Planungs- und Steuerungssystem für Flexible Produktionssysteme basierend auf Simulation und Optimierung mit Genetischen Algorithmen

ARGESIM / ASIM – Verlag, Wien, 2001

ISBN Print 978-3-901608-56-8

Ebook Reprint 2020 (Scan)

ISBN Ebook 978-3-903347-06-9

DOI: 10.11128/fbs.06

ASIM Fortschrittsberichte Simulation / ARGESIM Reports

Herausgegeben von ASIM, Arbeitsgemeinschaft Simulation, Fachausschuß 4.5 der GI und der ARGESIM

Betreuer der Reihe:

Prof. Dr. G. Kampe (ASIM)
Fachhochschule Esslingen
Flandernstraße 101, D-73732 Esslingen
Tel: +49-711-397-3741, Fax: --397-3763
Email: kampe@ti.fht-esslingen.de

Prof. Dr. D.P.F. Möller (ASIM)
Inst. F. Informatik, TU Clausthal-Zellerfeld
Erzstraße 1, D-38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel: +49-5323-72-2404, Fax: --72-3572,
moeller@vax.in.tu-clausthal.de

Prof. Dr. F. Breitenecker (ARGESIM / ASIM)
Abt. Simulationstechnik, Technische Universität Wien
Wiedner Hauptstraße 8 - 10, A - 1040 Wien
Tel: +43-1-58801-5374, Fax: +43-1-5874211,
Email: Felix.Breitenecker@tuwien.ac.at

FBS Band 6

Titel: Intelligentes Online Planungs- und Steuerungssystem für Flexible Produktionssysteme basierend auf Simulation und Optimierung mit Genetischen Algorithmen

Autor: Edmond Hajrizi
Email: ehajrizi@ubt-uni.net

Begutachter des Bandes:

Prof. Dr. F. Breitenecker TU Wien, Prof. Dr. D.P.F. Möller Univ. Hamburg

ARGESIM / ASIM – Verlag, Wien, 2001

ISBN Print 978-3-901608-56-8

Ebook Reprint 2020 (Scan)

ISBN Ebook 978-3-903347-06-9

DOI: 10.11128/fbs.06

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

© by ARGESIM / ASIM, Wien, 2001

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zur Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz - Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

DISSERTATION

**INTELLIGENTES ONLINE – PLANUNGS- UND
STEUERUNGSSYSTEM FÜR FLEXIBLE PRODUKTIONSSYSTEME
BASIEREND AUF SIMULATION UND OPTIMIERUNG MIT
GENETISCHEN ALGORITHMEN**

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
Felix BREITENECKER

eingereicht an der Technischen Universität Wien
TECHNISCH – NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT

von

Dipl.-Ing. Edmond HAJRIZI
9626602
Talgasse 10/12, 1150 Wien

Danksagung

Es ist mir ein Anliegen mich an dieser Stelle bei all jene Personen zu bedanken, die mich während meiner Doktorarbeit an der TU- Wien unterstützt haben.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Felix Breitenecker bedanke ich mich für die freundliche Aufnahme am Institut für Computersimulation, die persönliche und sehr menschliche Betreuung, sowie für die vielen Stunden, in denen er mich durch seine hohe fachliche Kompetenz gefördert und dadurch diese Doktorarbeit ermöglicht hat.

Ich bedanke mich bei meiner Familie und selbstverständlich auch bei meiner lieben Frau für die volle Unterstützung.

Speziell bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Alfred Kaminitschek, der mir mit großer Erfahrung geholfen hat den richtigen Weg zu finden und der durch seine aktive Hilfe einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet hat.

Ich widme meine Dissertation meinen Eltern, die mir durch ihre Liebe und Fürsorge das Fundament zu meiner wissenschaftlichen Laufbahn gelegt haben.

KURZFASSUNG

Flexible Fertigungssysteme (FFS) stellen die effizienteste Form heutiger auf CIM-Lösungen basierender Produktionssysteme dar. FFS-Abläufe sind eine extrem komplexe kombinatorische Optimierungsaufgabe, weil viele unterschiedliche Zwänge bei einer realen Problemstellung, wie z.B. alternative Prozesspläne für die Herstellung eines Produktes, sehr spezielle Produktionsstrukturen, der IST- Zustand des FFS, freie und bereits reservierte Produktionsmittel des Systems, Planungskriterien, etc. eine wichtige Rolle spielen.

Für einen effizienten Ablauf des FFS ist es erforderlich intelligente Werkzeuge zur Optimierung von Produktionsszenarien zu implementieren, um Konfliktsituationen auf elegante Weise lösen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein intelligentes Modul für die Leitstandssoftware vorgestellt, welches die Optimierung der dynamischen Planung und Überwachung von Fertigungsabläufen in einem komplexen FFS unterstützen soll.

Das Modul besteht aus einem Computermodell der untersuchten Anlage, sowie einer Reihe von Eingabe-, Ausgabe-, Kommunikations- und Analysemodulen. Hauptpunkt dieses Moduls ist der „Optimizer“, der zusammen mit anderen Modulen für eine Reihe automatisch durchgeführter Simulationsexperimente die optimale Lösung des vordefinierten Fertigungsproblems ausarbeitet. Für die Entwicklung des „Optimizers“ werden genetische Algorithmen als Optimierungsverfahren eingesetzt.

Dieses intelligente Modul wird auch softwaremäßig realisiert. Somit bekommt das Anlagepersonal am Leitstand ein zusätzliches Werkzeug zur Unterstützung bei Entscheidungen.

Mit Hilfe dieses Moduls kann das Verhalten des FFS als Folge der geplanten Maßnahmen (z.B. die Einlastung eines Auftrages mit hoher Priorität oder die Wegnahme von Maschinen bzw. Personal aus dem Betrieb oder auch die Änderung der Operationsreihenfolge in einem bestimmten Auftrag, usw.) untersucht werden. Auf Grund der durch Simulation gewonnenen Daten können Aussagen über Durchführbarkeit bzw. Konsequenzen der geplanten Maßnahmen getroffen werden.

Dieses Modul, das sowohl Optimierungs- als auch Simulationsuntermodule enthält, ist für die praktische industrielle Anwendung konzipiert.

ABSTRACT

Flexible manufacturing systems (FMS) are the most effective CIM- solution based production systems of today. The running off in FMS is an extremely complex combinatorial optimizing problem.

Many different constraints as there are: alternative production design, very special production structures, the actual situation of FMS, free and occupied production resources of the system, planning criteria are of important influence in real-life scheduling problems.

For efficient scheduling of FMS it is necessary to design and implement intelligent tools for optimization of FMS working scenarios and to solve conflict situations in a smart way.

In this work an intelligent module for control platform software is presented, which supports the optimization of dynamic planning and supervision in FMS. This module, a simulation of the investigated manufacturing systems, consists of several input, output, communication and analyzing modules. The central role of this module plays the optimizer. In combination with several other modules the optimizer works out the best solution for the predefined manufacturing problem. The development of the optimizer is made by insertion of genetic algorithms. The realization of this intelligent module was made in Borland Delphi under Windows. This special tool support the operator of the control platform in difficult situations and helps him to improve his decisions in critical but realistic problems.

INHALTVERZEICHNIS

Danksagung

Kurzfassung

Abstract

Inhaltverzeichnis

1. Flexible Fertigungssysteme	1
1.1 Definition von flexiblen Fertigungssystemen (FFS)	1
1.2 Flexibilitätskriterien für FFS	4
1.3 Vor- und Nachteile von FFS	6
1.4 Kennzeichen flexibler Fertigungssysteme	7
1.5 Probleme der FFS	15
1.5.1 Betriebsverhalten und Systemverfügbarkeit von FFS	15
1.5.2 Steuerungsrelevante Besonderheiten von FFS	18
1.5.3 Schwachstelle der Steuerungssoftware	19
2. Produktionsplanung und -steuerung in FFS	22
2.1 PPS	22
2.2 Produktionsplanung- und Steuerung – FFS- übergeordnete Ebene	24
2.3 Maschinenbelegungsplanung – FFS- operatives Plan	25
2.4 Ablaufplanung – FFS- interne Ebene	25
2.5 Ablaufsteuerung	26
2.6 Fertigungsleitstandsysteme	26
2.7 Integration von ergänzenden Funktionalitäten	27
2.8 Informationsflußanalyse zur Steuerung von FFS	28
2.9 Produktionsablauf	33
2.9.1 Arbeitsgang	33
2.9.2 Fertigungsablauf	36
2.9.3 Auftragstruktur	36
2.10 Leitstandspersonal	40
2.11 Verwaltung von Fertigungsmitteln und Bedinerzeit	42
2.12 Ablaufsequenz von Arbeitsgänge	42
2.13 Übergeordnete Regeln	45
2.14 Allgemeine Methoden zur Unterstützung der Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	45
2.14.1 Expertensysteme	45
2.14.2 Simulation	46
2.14.3 Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien	47

3. Optimierung der FFS-Abläufe	48
3.1 Der Maschinenbelegungsplan	49
3.2 Erstellen des Maschinenbelegungsplanes	50
3.3 Durchsetzen des Maschinenbelegungsplanes	51
3.4 Planungshorizont	51
3.5 Aufbau der Warteschlangen	52
3.6 Festlegen der Reihfolge von Arbeitsgängen	53
3.6.1 Aufgabenbestimmung	53
3.6.2 Annahmen	54
3.6.3 Operative Beschränkungen	56
3.6.4 Auswahl des optimalen Folgeauftrages	57
3.6.5 Auftragspriorität	57
3.6.6 Auftragswahlkriterien	57
3.6.7 Einplanen eines Folgeauftrages	58
3.6.8 Kombination der Auswahlkriterien	69
3.7 Optimierung der Maschinenbelegung durch Simulation	69
3.7.1 Integration der Optimierung in der Simulation – Parameteroptimierung	70
4. Computersimulation in FFS	72
4.1 Simulationsmerkmale und –schritte	74
4.2 Arten der Simulation	76
4.3 Einsatz der Simulation	78
4.4 Einsatz der Simulation in PPS	79
4.5 Simulation in FFS	82
4.6 Vorteile der Nutzung der Simulation in FFS	84
4.7 Nachteile der Simulation	86
4.8 Anforderungen an die Simulationsoftware	87
4.9 Simulationssoftware für Produktions- und Logistiksysteme	88
4.9.1 ARENA	89
4.10 Software für Feinkapazitätsplanung	89
4.10.1 Preactor	90
4.11 Vergleich zwischen Simulationssoftware und Scheduling- Software	91
5. Genetische Algorithmen	93
5.1 NP-Vollständig Probleme	93
5.2 Optimierung	93
5.2.1 Klassen von Optimierungsverfahren	95
5.2.2 Wahl der Optimierungsverfahren	100
5.3 Genetische Algorithmen	101
5.3.1 Grundgerüst eines genetischen Algorithmus	102
5.3.2 Codierung	104
5.3.3 Fitneßfunktion	105
5.3.4 Genetische Operatoren	109
6. Struktur eines intelligentes Moduls für die Leitstandssoftware von komplexen FFS	115
6.1 Konzept	115
6.2 Die Struktur des Moduls	115

1. FLEXIBLE FERTIGUNGSSYSTEME

1.1 Definition von flexiblen Fertigungssystemen

Der Begriff flexible Fertigungssysteme (FFS) ist nicht exakt definierbar und wird infolgedessen für Systeme sehr unterschiedlicher Flexibilität verwendet. In der deutschsprachigen Literatur gibt es mehrere Definitionen des Begriffes FFS.

Nach [50], [261] ist der Begriff flexibles Fertigungssystem folgendermaßen festgelegt:

„Ein FFS ist ein AFS (automatisiertes Fertigungssystem), das dazu fähig ist, mit einem Minimum manueller Eingriffe eine Gruppe oder Familie von Komponenten zu fertigen. Das System ist gewöhnlich so konstruiert, daß es wirtschaftlich kleine und mittlere Stückzahlen einer Familie von Komponenten kleiner und gemischter Losgrößen fertigt, und die Flexibilität wird normalerweise auf die Teilfamilie beschränkt sein, für die es konstruiert wurde. Das System enthält Mittel zur Fertigungsterminierung („scheduling production“) und zur Durchschleusung von Produkten oder Komponenten durch das System. Es enthält normalerweise auch Mittel zur Erstellung von Fertigungsberichten und Betriebsdaten.“

Nach [300], [9], [232] und [51] Flexible Fertigungssysteme wird definiert als

ein Produktionssystem, das aus einer bestimmten Anzahl von ersetzenden und/oder ergänzenden numerisch gesteuerten Maschinen besteht, die durch ein automatisiertes Transportsystem miteinander verbunden sind. Sämtliche Vorgänge in einem FFS werden durch einen Fertigungsleitreechner zentral gesteuert, der oft in eine Rechnerhierarchie eingebettet ist. Das FFS ist in der Lage Werkstücke eines bestimmten Werkstückspektrums in frei wählbarer Reihenfolge ohne nennenswerte Verzögerungen durch Systemumrüstvorgänge zu bearbeiten.

Nach [262] FFS wurden so definiert:

„a reprogrammable manufacturing system in its broadest sense, dealing with high level distributed data processing and automated material flow, using highly flexible, computer controlled (and in some cases manually operated) material and information processors within an integrated, multilayered feedback control architecture“,

oder folgendermaßen:

„FMSs are „computer with hands“ enabling the implementation of the CIM concepts on the shop floor, and as a consequence achieving a batch size, which can be as low as one, and a highly effective and productive manufacturing method which can cope with the dynamically changing product life cycles of different products“.

Weitere Begriffe über FFS kann man auch bei [188], [333], [264], [279] finden.

Aus der Literatur sind auch andere Erscheinungsformen sogenannter flexibler Produktionssysteme bekannt [51]:

- **Bearbeitungszentren**

Sie bestehen aus einer CNC-Maschine, die mit Werkzeug- und Werkstückwechseinrichtungen ausgestattet ist.

- **Flexible Fertigungszelle**

Sie entsteht durch die räumliche Zusammenfassung eines Bearbeitungszentrums mit einer Spannstation, sowie maschinenunabhängigen Werkstückspeichereinrichtungen (Zentralpuffer) und einem automatischen Werkstücktransportsystem, wodurch eine längere bedienerlose Fertigung möglich ist.

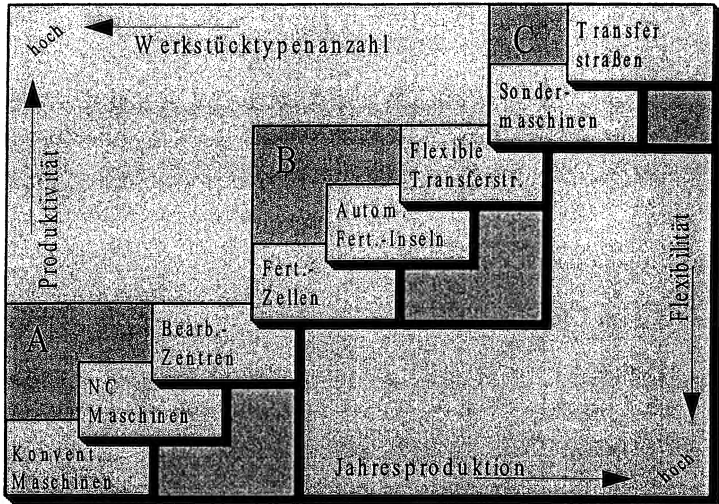
- **Flexible Transferstraße**

Sie besteht aus fest miteinander verketteten, nach dem Objektprinzip organisierten Bearbeitungsstationen, wobei der Materialfluß getaktet und innenverkettet ist. Der Materialfluß erfolgt ausschließlich in eine Richtung, die durch den Transportmechanismus vorgegeben ist. Ein Umrüsten von einem Teilespektrum auf ein anderes ist nur bei Stillstand der gesamten Transferstraße möglich und mit einer erheblichen Umrüstzeit verbunden.

- **Flexibles Fertigungsverbundsystem**

Flexible Fertigungsverbundsysteme bestehen aus Fertigungszellen und Fertigungsinseln, sowie aus Einzelmaschinen und manuellen Verrichtungsplätzen. Sie bilden eine ganzheitliche, rechnergeführte, logistische Einheit mit übergeordneter Werkstück- und Werkzeugversorgung, sowie integrierter Auftragsablaufsteuerung. Damit werden einzelnen autonomen Subsystemen, entsprechend ihrer maschinellen Ausstattung, verschiedenartige Fertigungsaufgaben zugeordnet. Beispielsweise ist eine Fertigungszelle für die anfallenden Bohr- und Fräsebearbeitungen oder Mehrspindelbohrbearbeitungen, eine Fertigungsinsel für spezielle Bohr-, Dreh-, Fräs- und Feinstbearbeitungen und eine weitere Fertigungszelle ausschließlich für Drehbearbeitungen bestimmt. Aufgrund der modularen Struktur des Gesamtsystems läßt sich stufenweise ein hochflexibler automatisierter Betrieb, entsprechend den jeweiligen Anforderungen individueller Fertigungsaufgaben, realisieren. Der Vorteil von flexiblen Fertigungsverbundsystemen gegenüber automatischen Fertigungslinien und Transferstraßen liegt in hohen Umstell- und Erweiterungsmöglichkeiten und kommt vor allem bei Programmänderungen und Produktionssteigerungen zum Tragen.

Die Einsatzbereiche unterschiedlicher flexibler Produktionssysteme sind in Abb. 1.1 gegeben.



A) Fertigung auf Einzelmaschinen, B) Flexible Fertigungskonzepte, C) Weigehend starre Fertigungseinrichtungen

Abb. 1.1 Einsatzbereiche unterschiedlicher flexibler Produktionssysteme [261]

Aus der Abb.1.1 kann man sehen, daß die flexiblen Fertigungssysteme einen optimalen Kompromiß zwischen Flexibilität und Produktivität bieten.

Tab. 1.1 Vergleich wichtigsten flexibler Produktionssysteme [169]

Konzept	Einsatzgebiet	Maschinentyp	Steuerung	Werkstück-Handhabung
Flexible Fertigungszelle	Serienfertigung, bei mittl. Losgrößen für ein begrenztes Teilespektrum	WZM mit vergröß. Wst.- Speicher und erweitertem Werkzeug - Speicher	CNC mit großem Programmspeicher und Überwachungseinrichtungen	Palettenbahnhof oder sortierter Wst-Vorrat
Flexible Fertigungsinsel	Versch. Maschinen zur Bearbeitung von Wst. ähnlicher Geometrie	Unterschiedliche, vorwiegend sich ergänzende Maschinen	Manuelle und gesteuerte Maschinen nach Bedarf	Manuell oder mit einfachen Transportmitteln
Flexible Fertigungssysteme	Teilfamilien in mittleren Stückzahlen und größerer Vielfalt	Mehrere gleiche oder untersch. WZM Komplettbearbeitung in 1 oder 2 Aufspann.	CNC+DNC +Leitrechner +Planungsrechner	Wst.-Transportsystem, ungetaktete Fertigung, minimaler Personalbedarf
Flexible Transferstraße	Größere Serien mit vielen Varianten	Sondermaschine und NC-Maschinen kombiniert und verkettet	SPS CNC Leitsystem	Getakteter Durchlauf mit der Möglichkeit Maschinen zu um.

Ein Vergleich zwischen unterschiedlichen flexiblen Produktionssystemen für die spanabhebende Bearbeitung sind in der Tabelle 1.1 zusammengestellt.

1.2 Flexibilitätskriterien für FFS

Der Begriff des „Flexiblen Fertigungssystems“ wurde von Dolezalek 1967 an der Universität Stuttgart geprägt [32]. Lange Zeit fehlte eine einheitliche Abgrenzung des Wortes „flexibel“ bezüglich der Verwendung im Zusammenhang mit Fertigungssystemen, sodass sich FFS hinsichtlich ihrer Flexibilität mitunter stark unterscheiden und nur sehr schwer zu vergleichen waren.

Der Flexibilitätsbegriff automatisierter Fertigungsanlagen läßt sich nach acht unterschiedlichen Kriterien gewichten (Abb. 1.2):

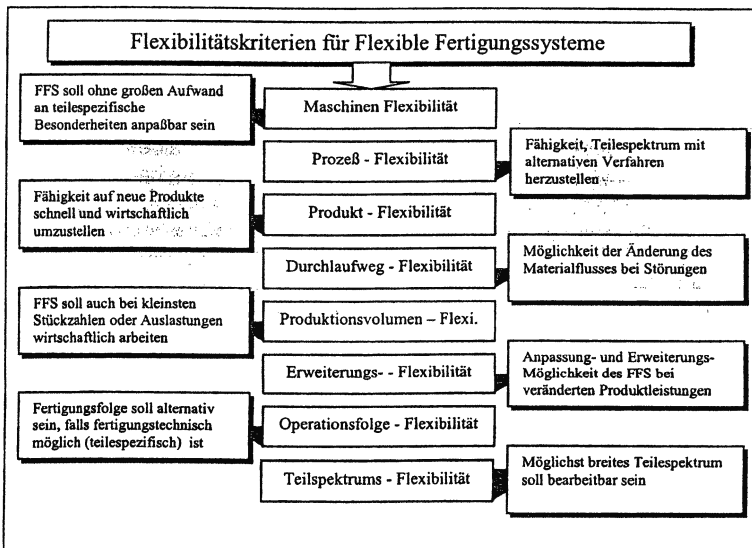


Abb. 1.2 Flexibilitätskriterien für FFS [32]

Unter der „Maschinen – Flexibilität“ (Umrüst – Flexibilität) wird die Fähigkeit des Fertigungssystems verstanden, schnell auf teilspezifische Umstellungen innerhalb des bekannten Produktionsprogrammes zu reagieren. Dieses umfaßt Vorgänge wie Werkzeugwechsel, Vorrichtungwechsel oder die Steuerprogramme.

Erlaubt das System einige Werkstücke des Produktionsprogramms mit alternativen Fertigungsverfahren herzustellen, spricht man von „Prozeß – Flexibilität“.

Die „**Produkt – Flexibilität**“ beschreibt die Anpassungsfähigkeit der Anlage bei der Aufnahme eines neuen Produktes in den Produktionsablauf. Dieser Begriff ist eng mit der noch zu erklärenden „**Erweiterungs – Flexibilität**“ verbunden und bezieht sich auf Systemänderungen oder –Anpassungen. Diese können sich auf die Hardware (Spannvorrichtungen, Werkzeuge, Transportmittel,...) wie auch auf die Software (NC-Programme, Steuerprogramme,...) erstrecken.

Unter der „**Durchlaufweg – Flexibilität**“ wird die Möglichkeit verstanden, die Durchlaufroute innerhalb des FFS zu variieren. Dieses Flexibilitätskriterium tritt besonderes bei Störungen des FFS in den Vordergrund (Maschinenausfälle, Transportmittelausfälle, ...).

Eines der Hauptziele beim Einsatz des FFS wird durch den Begriff der „**Produktionsvolumen – Flexibilität**“ beschrieben. Hierunter wird die Forderung verstanden, eine wirtschaftliche Fertigung selbst bei kleinsten Stückzahlen und schwankenden Systemauslastungen sicherzustellen. Dieses Ziel wird hauptsächlich durch eine Minimierung der Rüstzeiten und einen bedienungsarmen Betrieb erreicht.

Die bereits erwähnte „**Erweiterungs- – Flexibilität**“ soll die Möglichkeit eröffnen, auf geänderte Produktionsleistungen zu reagieren. Als Randbedingungen sind hier hauptsächlich die bestehenden Kapazitäten, Schnittstellen, Software-Erweiterungsmöglichkeiten und die Ausdehnung der Transportkapazitäten zu nennen.

Die „**Operationsfolge – Flexibilität**“ wird stark durch fertigungstechnische Erfordernisse begrenzt. Unter diesem Flexibilitätskriterium wird die Möglichkeit von Operationsfolgeänderungen innerhalb des Fertigungsablaufes eines Teiletyps verstanden. Meistens läßt sich jedoch die Reihenfolge der Fertigungsschritte nicht ohne weiteres verändern, da die Bearbeitungen in der Regel aufeinander aufbauen.

Die „**Teilespektrum – Flexibilität**“ bezieht sich auf die Fähigkeit des FFS, die wirtschaftliche Fertigung eines möglichst breiten Teilespektrums zu ermöglichen. Dieses ist wesentliche Voraussetzung zu Erzielung einer hohen „**Produktionsvolumen-Flexibilität**“, um auf Auslastungs- bzw. Stückzahlschwankungen innerhalb einer Teilegruppe reagieren zu können.

Alle flexiblen Produktionssysteme unterscheiden sich in unterschiedlichen Ausprägungen der oben genannten Flexibilitätskriterien. In Abb. 1.3 ist die Flexibilitätsbewertung:

- der flexiblen Transferstraße (FTS),
- der flexiblen Fertigungszellen (FFZ) und
- des flexiblen Fertigungssystems (FFS).

Die flexible Transferstraße zeichnet sich auch durch einen gerichteten und getakteten Materialfluß aus. Sie besitzt demzufolge eine geringe Prozeß-, Durchlaufweg- und Operationsfolge-Flexibilität.

Im Vergleich zu flexiblen Fertigungszellen (FFZ) bzw. zum FFS verzeichnet sie den geringsten Flexibilitätsgrad (Abb. 1.3). Auf diesen Anlagen läßt sich ein begrenztes Teilespektrum mit noch relativ hohen erforderlichen Stückzahlen wirtschaftlich herstellen. Auf neue Fertigungsaufgaben läßt sich in gewissem Maße reagieren (z.B. durch Auslegung

auf mehrere Werkstückvarianten, neue Produkte hingegen erfordern oft eine neue Anlage oder eine Umstellung der alten Anlage).

Auf Grund der einstufigen Bearbeitung, bei einer flexiblen Fertigungszellen, ist keine Prozeß- Flexibilität zu verzeichnen. Die Durchlaufweg- Flexibilität ist gleichfalls nicht vorhanden, da es sich um eine Einzelmaschine handelt.

Eine Operationsfolge: Flexibilität wäre innerhalb der Maschine realisierbar, würde allerdings keinen qualitativen Nutzen haben, da ohnehin nur ein Arbeitsgang zur gleichen Zeit durchführbar ist. Demzufolge wären die verfolgten Ziele, durch die Operationsfolge- Flexibilität bestehende Kapazitäten zu nutzen bzw. Störungen in bestimmten Bereichen zu überbrücken, nicht zu verwirklichen.

Flexibilitätsbewertung			
	FTS	FTZ	FFS
Maschinen - Flexibilität	o	+	+
Prozeß - Flexibilität	-	o	+
Produkt - Flexibilität	o	++	+
Durchlaufweg Flexibilität	-	-	+
Produktionsvolumen - Flexi.	o	+	+
Erweiterungs- Flexibilität	-	+	+
Operationsfolge Flexibilität	-	o	+
Teilspektrums Flexibilität	o	o	+

+ hoch, o mittel, - gering bzw. nicht vorhanden

Abb. 1.3 Flexibilitätsbewertung der flexiblen Transferstraße, des flexiblen Bearbeitungszentrums und des FFS

Durch die Möglichkeit die FFS anhand der Wahl entsprechender Systemelemente beliebig zu konfigurieren, lassen sich Akzente bezüglich der Ausprägung aller acht Flexibilitätskriterien nach Abb. 1.2 setzen. Prinzipiell sind jedoch alle aufgeführten Flexibilitäten realisierbar.

1.3 Vor- und Nachteile von FFS

Maßnahmen zur Steigerung der Produktivität alleine können den gestiegenen Marktanforderungen nicht mehr genügen. Vielmehr bedingt die Entwicklung auf dem Absatzmarkt den Einsatz von Produktionseinrichtungen, mit denen immer kleiner Losgrößen mit hohem Grad an Produktivität und Qualität wirtschaftlich gefertigt werden können. Dadurch sind die Unternehmen gezwungen, ihre Produktion flexibel zu

automatisieren, um möglichst ein breites Werkstückespektrum bei geringem Rüstaufwand bearbeiten zu können.

Jedes FFS muß sich wirtschaftlich rechtfertigen lassen, was in der Regel schwierig ist.

Die *wirtschaftlichen Vorteile* flexibler Fertigungssysteme sind:

1. Aktivierung der zeitlichen und technischen Nutzungsreserven durch die höhere Automatisierung.
2. Steigerung der Produktivität (oft um das 2 bis 3,5 Fache) durch schnelle Umrüstbarkeit auf wechselnde Fertigungsaufgaben [262].
3. Verbesserung der Effektivität des Systems durch automatische Erfassung und Auswertung der Maschinen- und Betriebsdaten.
4. Reduzierung der Produktionsflächen durch Wegfall von Zwischenlagern und Arbeitsflächen an den Maschinen.
5. Schnelles Reagieren auf Marktveränderungen, d.h. flexible Prioritätsveränderungen in der Fertigung.
6. Anpassungsfähigkeit an geometrische und technologische Veränderungen der Werkstücke.
7. Erweiterungsmöglichkeit für neue Aufgaben.

Die flexiblen Fertigungssysteme haben auch ihre *Grenzen*:

1. Größe, Gewicht, Form, Material der bearbeitbaren Werkstücke,
2. Ausbringung des Systems bzw. Durchlaufzeit der Teile,
3. Art der durchführbaren Bearbeitungsvorgänge,
4. Moderne FFS sind komplex, nicht linear und dynamisch geworden. Zur effizienten Planung und Steuerung von diesen Systemen braucht man deshalb neue Werkzeuge und Methoden.

1.4 Kennzeichen flexibler Fertigungssysteme

Das gesamte FFS besteht aus mehreren Teilsystemen. Die Komponenten eines FFS sind in Abb.1.6 detailliert dargestellt. Alles außerhalb des FFS wird als Außenwelt bezeichnet. Das FFS selbst ist in zwei Subsysteme unterteilt: Leitstand und Fertigungsanlage. Die Fertigungsanlage wird in Kernsystem und peripheres System unterteilt.

Das Kernsystem stellt den aktiven Teil des Systems dar, in dem die Bearbeitung und der automatische Transport, der alle Kernsystemelemente verbindet, ablaufen. Im peripheren Subsystem dominieren Belade-, Entlade-, Umlade-, Vorbereitungstätigkeiten und Lagerung.

Ein flexibles Fertigungssystem ist durch folgende Charakteristika zu beschreiben [155]:

- **Teilespektrum**
Das FFS kann für einige hundert Teile ausgelegt sein. Während der Lebensdauer des FFS ändert sich das Teilespektrum ständig.
- **Losgröße**
Auf dem System können Losgrößen von einige bis einige hundert Stücke bearbeitet werden.

- **Bearbeitungsmaschinen**
Die Anzahl der Bearbeitungsmaschinen ist nicht begrenzt. Die Grundausrüstung der Maschinen kann unterschiedlich sein. Maschinen mit gleicher Grundausrüstung gehören zu einer Maschinengruppe. Das Umrüsten der Maschinen für einen Arbeitsgang an einem neuen Werkstück kann zum Teil manuell erfolgen, wofür Bedienungspersonal benötigt wird.
- **Meßmaschine**
Im System können eine oder mehrere Meßmaschinen integriert sein.
- **Werkstückmessung und Kontrolle**
Während der Durchführung eines Arbeitsganges an einem Los kann bei einer bestimmten Anzahl von Werkstücken ein- oder mehrmalige Werkstückkontrolle und -messung durchgeführt werden. Das kann an der Bearbeitungsmaschine, an der Meßmaschine oder außerhalb des FFS erfolgen. Während dieser Tätigkeiten wird die betreffende Bearbeitungsmaschine in den Wartezustand versetzt.
- **Bedienungspersonal**
Das Betreiben solcher Anlagen ist sehr bedienungsintensiv. Bediener werden zum Umrüsten der Maschine, zur Sicherung des Werkstück- und Werkzeugflusses, zur Betreuung der Maschine während der Bearbeitung und für Aufgaben am Leitstand benötigt. Die Anzahl der Bediener kann während der Betriebszeit variieren.
- **Automatisches Transportsystem**
Dem System steht ein automatisches Transportsystem zur Verfügung, über das der gesamte Werkstück- und Werkzeugfluß abgewickelt wird.
- **Werkstückträger**
Zum Transport der Werkstücke werden Werkstückpaletten als Werkstückträger eingesetzt. Es gibt mehrere Werkstückpalettentypen, und jeder Palettentyp kann mehrere Zustände haben. Es werden für den Transport jedes einzelnen Werkstückes ein oder mehrere Palettentypen und deren Zustände vorgeschrieben.

1.4.1 Materialfluß

Um eine Bearbeitungsmaschine in Betrieb zu setzen, muß man sie mit den notwendigen Informationen und dem notwendigen Material versorgen. Diese Versorgung ist über den Informations- und Materialfluß organisiert.

Durch den Materialfluß werden die Maschinen mit Werkzeugen, Werkstücken und Betriebsmitteln versorgt (Abb.1.4). Bei der losweisen Fertigung wird das Material gruppenweise transportiert.

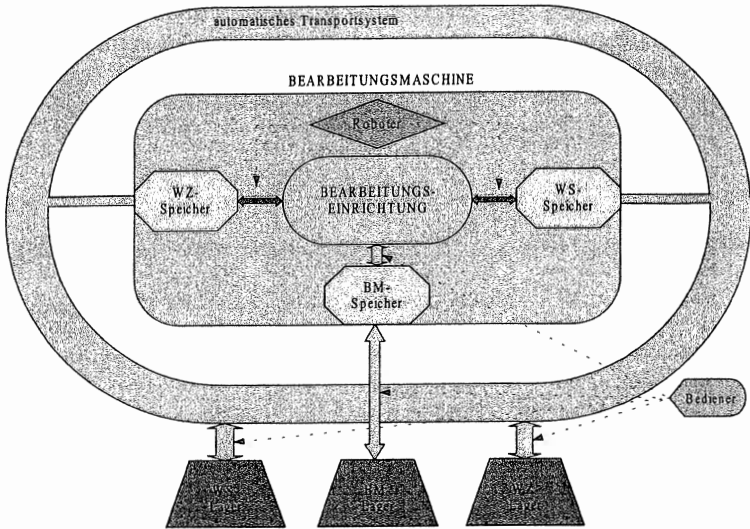


Abb.1.4 FFS-Materialfluß

1.4.2 Werkstückfluß

Der Werkstückfluß muß so organisiert werden, daß zur Durchführung eines Arbeitsganges das ganze Los über die Werkstückbeladestation ins System und nach der Bearbeitung über die Werkstückentladestation aus dem System gebracht wird.

Der Werkstückfluß innerhalb des Kernsystems wird mittels Systempaletten durch das automatische Transportsystem abgewickelt.

Jedes einzelne Werkstück kommt als Rohteil in das System. In der Beladestation für Werkstücke werden die Teile manuell auf die Systempaletten geladen. Bei freier Kapazität der Bearbeitungsmaschine wird die Werkstückpalette durch automatischen Transport zur Bearbeitungsmaschine gebracht. Wenn die Bearbeitungsmaschine die Palette nicht aufnehmen kann, wird sie in den Pufferspeicher transportiert. Dort wird sie aufbewahrt, bis die Bearbeitungsmaschine für ihre Bearbeitung bereit ist. Die Werkstücke werden der Reihe nach von der Palette genommen, in die Maschine eingelegt, bearbeitet und danach wieder auf die Palette zurückgelegt.

Wenn der letzte Teil der Palette bearbeitet wurde, wird die Palette für den automatischen Transport zur Entladestation (direkt oder über eine Pufferstation) freigegeben. In der Entladestation werden die bearbeiteten Teile manuell entladen und auf externen Paletten abgelegt. Falls diese Bearbeitung der letzte Schritt einer Reihe von Bearbeitungsschritten gewesen ist, werden die Werkstücke als Fertigteile vom System ausgeliefert. Falls noch weitere Bearbeitungsschritte notwendig sind, wird das Werkstück im Halbfertigteillager aufbewahrt, bis es zur weiteren Bearbeitung vorgesehen ist.

Während der Bearbeitung eines Loses kann man das Werkstück messen und kontrollieren. Diese Werkstückkontrolle kann man grundsätzlich auf drei Arten durchführen [155]:

- Messen und Kontrolle des Werkstückes auf der Bearbeitungsmaschine
- Messen und Kontrolle des Werkstückes außerhalb des FFS
- Messen und Kontrolle des Werkstückes auf der Meßmaschine, die in den automatischen Werkstückbearbeitungsablauf integriert ist.

1.4.3 Werkzeugfluß

Der Werkzeugfluß kann mittels Werkzeugpaletten organisiert werden. Die Werkzeuge, die zur Durchführung eines Arbeitsganges auf einer Losgröße benötigt werden, werden vorbereitet und je nach Werkzeugversorgungsstrategie auf einer oder mehreren Werkzeugpaletten zur Maschine gebracht.

Der Werkzeugfluß erfolgt analog zum Werkstückfluß. Die Werkzeuge werden in den Beladestationen auf Werkzeugpaletten geladen und mittels des automatischen Transportsystems durch das Kernsystem zur Bearbeitungsmaschine transportiert. Die Maschine wird mit den Werkzeugen automatisch aufgerüstet. Nach dem Abrüsten der Maschine werden die Werkzeuge wieder auf die Palette zurückgelegt und zur Entladestation (falls sie nicht zugänglich ist, dann zum Pufferspeicher) abtransportiert. Dort werden die Werkzeuge der Palette entnommen und ins Werkzeuglager zurückgebracht.

Der Werkstückfluß hat grundsätzlich mehrere Materialflußzyklen pro Arbeitsgang, abhängig davon, welche Werkzeugversorgungsstrategie angewendet wird. Ausnahmen gibt es nur bei Einzelfertigung bzw. bei kleinen Aufträgen, bei denen die ganze Losgröße auf eine Palette paßt. Der Werkzeugfluß kann innerhalb der Maschine mittels Industrieroboter organisiert sein.

1.4.4 Informationsfluß

Der Leitstand stellt die Zentralstelle für alle Daten im System dar (Abb.1.5). Von dort werden die Daten an alle anderen Systemkomponenten weitergeleitet und von den Komponenten gesammelt.

Die Maschinensteuerung einzelner Bearbeitungsmaschinen (BM) ist mittels Datenleitung über bidirektionale Schnittstelle mit dem Leitrechner verbunden.

Vom Leitrechner wird die Maschinensteuerung mit folgenden Daten versorgt:

- Teileprogramme
- Werkzeugdatenprogramme
- Paletten-Informationsprogramme
- Rüstprogramme
- Eichdaten für Meßtaster
- Daten für die Werkzeugbruchererkennung
- Steuerdaten (z.B. NC-Programm-Start).

Von der Maschinensteuerung werden folgende Daten an den Leitrechner übertragen:

- optimierte Teileprogramme
- Werkzeugdaten für die Reststandzeitverwaltung
- Maschinendaten
- Eichdaten für die Meßtaster
- Daten für die Werkzeugbrucherkenkung

Für das Betriebspersonal werden die notwendigen Daten am Bildschirm im peripheren Subsystem angezeigt. Zusätzlich werden die begleitenden Informationen auf Papier bedruckt. Die Bestätigungen erledigter Aufgaben werden dem Leitrechner vom Betriebspersonal durch eine Quittierung mitgeteilt.

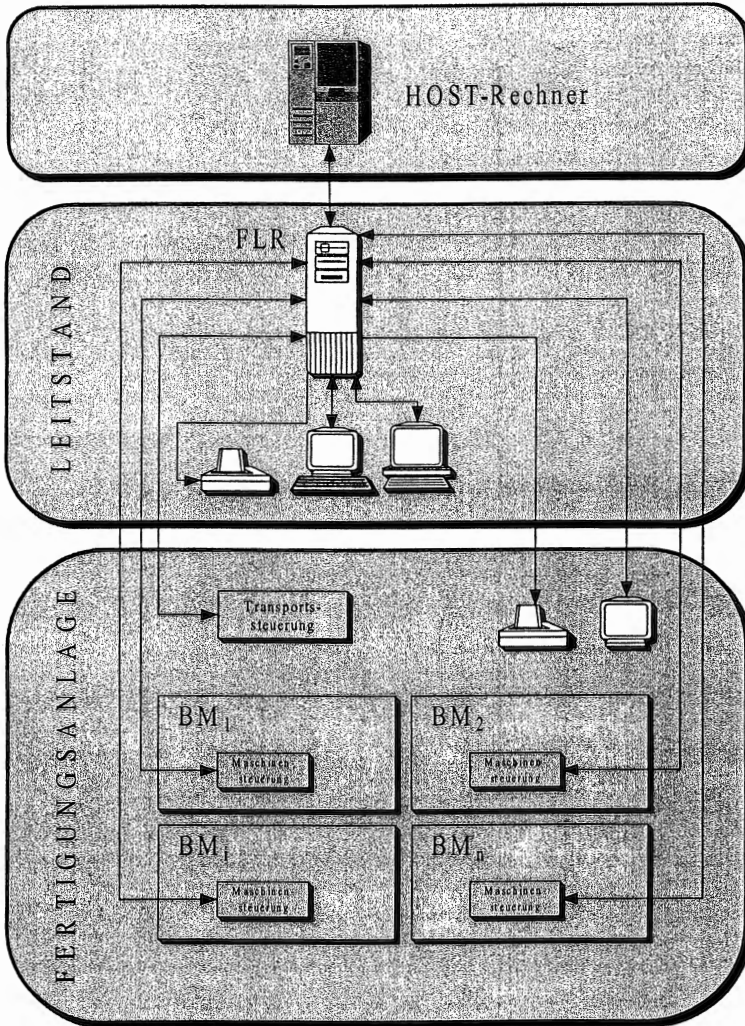


Abb.1.5 FFS-Informationsfluß

Mehr über den Informationsfluß wird im folgenden Kapitel geschrieben.

1.4.5 Begrenzte Fertigungsmittel

Die Fertigungsmittel stehen nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung. Fertigungsmittel sind ein Sammelbegriff für alle Mittel, die zur Durchführung eines Arbeitsganges notwendig sind, wie z.B. Maschinen, Werkzeuge, Werkstückpaletten, Werkzeugpaletten, Betriebsmittel usw.

1.4.6 Betriebsmittel

Betriebsmittel sind diejenigen Mittel, die sich während der Bearbeitung eines bestimmten Werkstückes auf der Maschine befinden müssen. Diese Betriebsmittel sind teilweise bestimmten Maschinen zugeordnet, teilweise können sie von allen Maschinen verwendet werden.

Der Betriebsmittelfluß wird manuell abgewickelt. Die Betriebsmittel werden vor Bearbeitungsbeginn durch den Bediener aus dem Betriebsmittellager zur Maschine gebracht und montiert und nach der Bearbeitung demontiert und wieder ins Lager abtransportiert. Somit haben die Betriebsmittel einen Materialflußzyklus pro Arbeitsgang.

Das Umrüsten einer Maschine besteht aus mehreren Vorgängen [155]:

- manuelles Umrüsten (z.B. Auswechseln des Robotergreifers)
- halbautomatisches Umrüsten (z.B. Werkzeughalter wechseln)
- automatisches Aufrüsten der Maschine mit Werkzeugen
- automatisches Abrüsten der Maschine von Werkzeugen.

1.4.7 Lagersystem

Abgesehen von den Lagern für Fertigungsmittel und Werkstücke, befinden sich im System die sogenannten Pufferplätze, die vom Transportroboter angefahren werden können und an denen die Werkstück- und Werkzeugträger zwischengespeichert werden.

Ein flexibles Fertigungssystem muß aber nicht alle oben angegebenen Charakteristika aufweisen.

Die Aufgabe der Steuerung eines FFS übernimmt ein Fertigungsleitreechner, der den gesamten Fertigungsablauf steuert und überwacht. Dazu gehören Aufgaben wie [169]:

- Werkstückvorrat überprüfen, Fehlmeldung veranlassen,
- vorhandene Werkzeuge und deren Standzeiten überprüfen,
- Bestückung der Werkzeugmagazine mit dem Programm vergleichen,
- Palettenumrüstung auf die erforderlichen Spannvorrichtungen veranlassen,
- Losgröße, Fertigungszeiten und Prioritäten berücksichtigen und daraus die
 - o Maschinenbelegung ermitteln,
- Programme bereitstellen,
- mit der Fertigung zeitgerecht (just in time) beginnen,
- auf Störungen schnell reagieren und
- Informationen ausgeben.

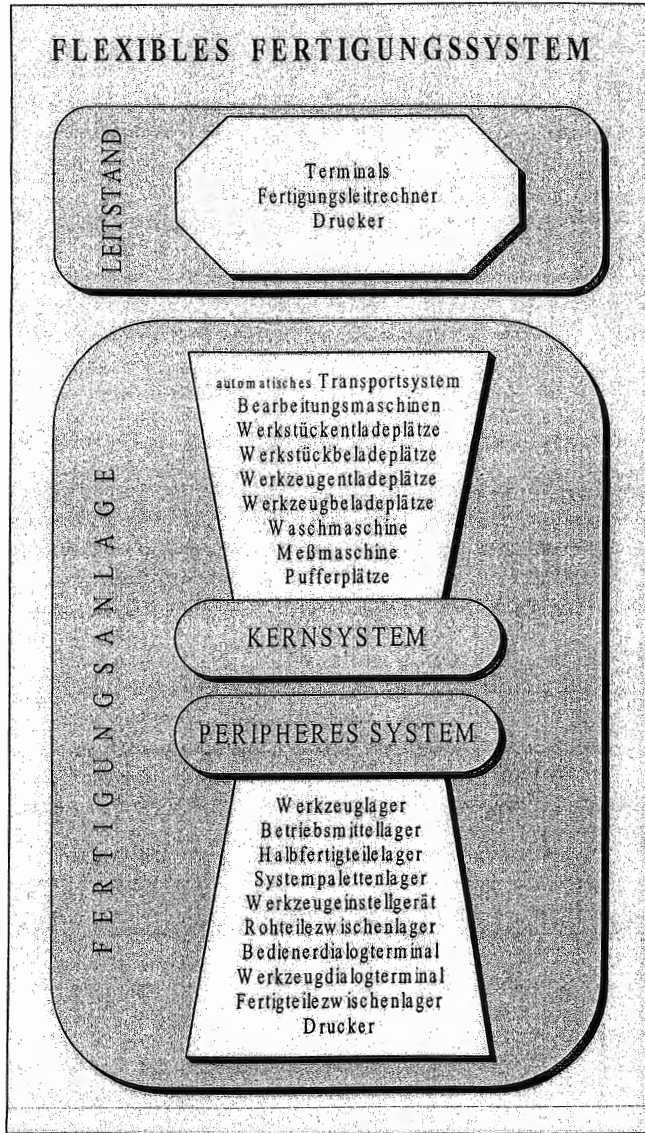


Abb. 1.6 Subsysteme eines FFS [155].

1.5 Probleme der FFS

1.5.1 Betriebsverhalten und Systemverfügbarkeit von FFS

Bei der Planung und Nutzung flexibler Fertigungssysteme ist die Frage der Systemverfügbarkeit sowie die Häufigkeit von Betriebsstörungen und des dadurch bedingten Stillstands von entscheidender Bedeutung. Hieraus resultieren Anforderungen an eine geeignete Steuerung.

Im allgemeinen steigt das Ausfallrisiko mit der Komplexität der Fertigungsanlage. Vor allem die Kopplung mehrerer sich ergänzender Teilesysteme mit gerichtetem Werkstückfluß führt zu einer erheblich geringeren Verfügbarkeit des Gesamtsystems im Vergleich zu der Verfügbarkeit der Einzelmaschinen des Systems. Demgegenüber ist die Systemverfügbarkeit bei sich ersetzenden Bearbeitungseinheiten deutlich höher, da bei Ausfall einer Bearbeitungseinheit mit den anderen in der Regel uneingeschränkt weitergearbeitet werden kann.

Für den Nachweis der Systemverfügbarkeit und der Produktivität flexibler Fertigungssysteme wurden Kenngrößen wie „technische Verfügbarkeit“ und „tatsächliche Nutzung“ definiert [174]. Unter dem Begriff „technische Verfügbarkeit“ wird dabei das Verhältnis der Differenz aus Maschinenlaufzeit und technisch bedingten Ausfallzeiten zur Maschinenlaufzeit verstanden:

$$\text{Technische Verfügbarkeit} = (\text{Maschinenlaufzeit} - \text{technisch bedingte Ausfallzeiten}) / \text{Maschinenlaufzeit}$$

Die technische Verfügbarkeit gibt Auskunft über den Anteil der Maschinenlaufzeit, der theoretisch für die Produktion genutzt werden kann [174].

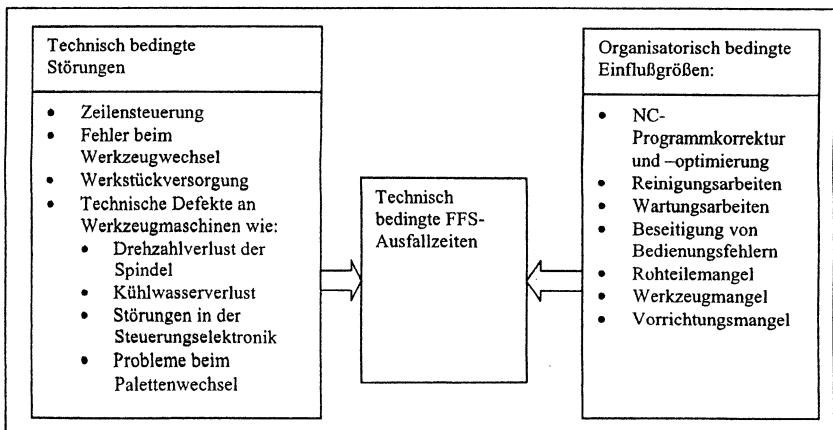


Abb. 1.7 Einflußgrößen auf FFS- Ausfallzeiten [191]

Die technisch bedingten Ausfallzeiten werden zum einen durch direkte Störungen verursacht, welche unmittelbar an den Bearbeitungszentren auftreten und zu Produktionsausfällen führen. Zum anderen können technisch bedingte Stillstandszeiten auch indirekt durch Störungen anderer Systemkomponenten hervorgerufen werden (Abb.1.7 links).

In der betrieblichen Praxis ist die „tatsächliche Nutzung“ eines FFS geringer anzusetzen als seine technische Verfügbarkeit, da neben den technischen auch die organisatorisch bedingten Ausfallzeiten abzuziehen sind (Abb. 1.7 rechts).

Die tatsächliche Nutzung eines Bearbeitungszentrums läßt sich somit über die

- Maschinenlaufzeit,
- die technisch bedingten Ausfallzeiten,
- die systembedingten Ausfallzeiten sowie
- die organisatorischen Ausfallzeiten berechnen.

Als Ergebnis der Untersuchungen stellte sich unter anderem heraus, daß die technische Verfügbarkeit in erster Linie von der Zuverlässigkeit der vom Systemlieferanten eingesetzten Systemkomponenten beeinflußt wird.

Die Abweichungen der Kenngröße „tatsächliche Nutzung“ von der Kenngröße „technische Verfügbarkeit“ sind überwiegend auf Probleme organisatorischer Art zurückzuführen, die vom Systembetreiber verursacht wurden, Bild 1.8 [174].

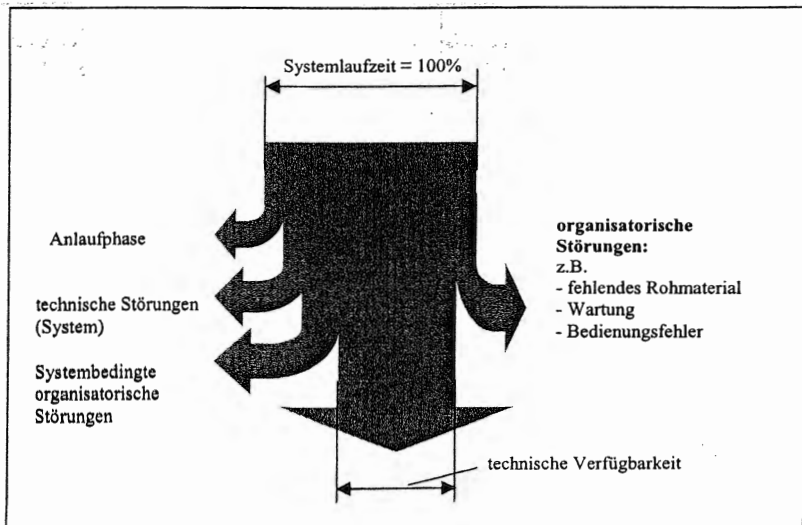


Abb.1.8 Verantwortungsbereiche für Ausfallzeiten [235]

Dem Systemlieferanten sind alle Ausfallzeiten aufgrund technisch bedingter Störung der von ihm gelieferten Systemkomponenten anzulasten. In bezug auf die Ausfallzeiten der Bearbeitungszentren, auf deren Basis die technische Verfügbarkeit des Gesamtsystems ermittelt wurde, läßt sich eine entsprechende Unterteilung in technisch bedingte und in systembedingte Ausfallzeiten vornehmen. Die Ursache dieser Störungen liegt in den unterschiedlichen Systemkomponenten, wie Bearbeitungszentren, Werkstück- oder Werkzeugversorgungssystem, aber auch in der mitgelieferten Steuerungssoftware selbst [292].

Vom Systembetreiber sind hingegen alle Ausfallzeiten zu verantworten, die auf organisatorische Störungen des Betriebsablaufes zurückzuführen sind, darunter fallen genauso Ausfälle aufgrund von Software-, d.h. Programmierfehlern im speziellen, sowie ebenfalls allgemeine Probleme hinsichtlich der Datenkonsistenz. Weitere Ausfallzeiten werden aber gleichermaßen durch mangelnde Rohteileversorgung, Bedienungsfehler oder auftretende Prozeßstörungen (Werkzeugbruch, etc.) gebildet. Weiterhin sind zu den organisatorisch bedingten Ausfallzeiten Wartungs- und Reinigungsarbeiten oder z.B. durch Krankheit fehlendes Personal zu zählen.

Die Hauptstörungsquellen beim Betrieb von flexiblen Fertigungssystemen sind sporadische Störungen im Bereich der elektrischen Anlagen, verursacht durch den Ausfall von Schaltern, Kontakten und Meßsystemen. Im Bereich der hydraulischen und pneumatischen Baugruppen handelt es sich meist um Defekte an Zylindern, Ventilen, Leitungen und Verschraubungen. Im mechanischen Bereich sind Ausfälle vorwiegend verschleißbedingt und treten relativ gleichmäßig auf. Die Ausfallursachen liegen hier sowohl im Erreichen der mechanischen Lebensdauer als auch in der Verschmutzung der Bauteile.

Die bei Befragungen der Systembetreiber meist in den Vordergrund gestellten Störungen an numerischen Steuerungen und vor allem an vorgeschalteten Zeilenrechnern treten relativ selten auf. Die Ausfallraten betragen in der Regel weniger als 2% [174].

Mit der Komplexität der Fertigungsanlagen steigt auch das Ausfallrisiko. Vor allem die Kopplung mehrerer Teilesysteme kann, besonders bei FFS mit sich ergänzenden Maschinen und gerichtetem Werkstückfluß, zu einer erheblich geringeren Verfügbarkeit des Gesamtsystems führen. Die verfügbare Kapazität der einzelnen Bearbeitungseinheiten kann daher in der Regel nur beschränkt genutzt werden. In bezug auf die Verfügbarkeit haben solche Systeme zudem den Nachteil, daß der Ausfall einer Maschine, oder auch nur eines Aggregates, zum Stillstand der Gesamtanlage führt. Der erreichbare Nutzungsgrad liegt bei Systemen mit Bearbeitungsfolge daher oft nur zwischen 70% und 80% [174].

Demgegenüber kann bei Fertigungssystemen mit sich ersetzenden Maschinen zumeist partiell weiter produziert werden. Außerdem besteht bei solchen Systemen meist auch die Möglichkeit, bei Störung der Systemsteuerung oder der Werkstück- bzw. Werkzeugversorgung manuell weiterzuarbeiten. Mit einem Totalausfall ist daher, wenn überhaupt, nur kurzzeitig zu rechnen [174].

Die über das Nutzungsverhalten gewonnenen Erfahrungen haben ergeben, daß etwa sechs Monate nach Inbetriebnahme eines rechnergesteuerten Fertigungssystems eine technische Verfügbarkeit von etwa 90% der gesamten Maschinenkapazität erreicht wird. Die

technische Verfügbarkeit der einzelnen in dem System integrierten Maschinen liegt über 96%. Diese Verfügbarkeit sollte bereits vor der Installation der Systemperipherie sichergestellt sein. Bei günstigen Rahmenbedingungen ist eine technische Gesamtverfügbarkeit bis ca. 95% nach einjähriger Betriebszeit zu realisieren [174].

1.5.2 Steuerungsrelevante Besonderheiten von FFS

Bei der Steuerungssoftware für flexible Fertigungssysteme muß den verschiedenen Operationsarten, die in einem FFS integriert sein können, Sorge getragen werden. Typische Funktionalitäten sind dabei, neben den eigentlichen Bearbeitungsschritten, Aktionen wie Kommissionieren, Montieren, Messen, Lagern, usw.. Auch beim Vorgang „*Bearbeiten*“ müssen unterschiedlichste Verfahren, wie Drehen, Fräsen, aber auch Stanzen, Schleifen, Funkenerodieren oder Schweißen berücksichtigt werden.

Weiterhin muß die FFS- Steuerung auf unterschiedlichste Zusammenstellungen und Verkettungen der einzelnen Zellen eingehen. Je nach Produktionsanforderungen wird die Gruppierung von Bearbeitungsmaschinen anders ausfallen. Es können gleichartige Maschinen, also beispielsweise mehrere Bearbeitungszentren eines Typs, zu einer Zelle zusammengefaßt werden, oder auch eine Mischung von Dreh- und Fräsmaschinen erfolgen, um einen optimalen Ablauf der Fertigung zu erzielen. In einer Zelle wiederum kann der Ablauf unterschiedlich strukturiert sein. Ebenso kann das Materialhandling innerhalb der Zelle sehr verschieden ausgelegt sein. Weitere Unterschiede sind zum Beispiel die Möglichkeit, parallele Bearbeitung in einer Zelle zuzulassen, oder eine zelleninterne Auftragsreihenfolgesteuerung zu ermöglichen. Weiterhin können in Zellen Teilbereiche mit manueller Tätigkeit integriert sein oder eine Zelle aus rein manueller Tätigkeiten (z.B. Auf- und Abspannen von Werkstücken auf Transportpaletten) bestehen, die aber in einen ansonst vollautomatischen Gesamtlauf zu integrieren sind.

Weitere System- oder auch anwenderspezifische Kriterien sind Anzahl und Art der in einem FFS vertretenen Transportsysteme. Je nach Anwendungsfall wird ein andersartiges Transportsystem in das FFS integriert sein. Es können ebenso verschiedene Transportsysteme parallel vorhanden sein, die jeweils für spezifische Aufgaben zuständig sind. Dies ist z.B. der Fall, wenn Werkzeug- und Werkstücktransporte mit unterschiedlichen Systemen abgewickelt werden.

Andere Varianten, die auftreten können, resultieren aus der eingesetzten Art der Transportbinde. Häufig werden heute die zu bearbeitenden Werkstücke fest auf einer Transportpalette aufgespannt und auf dieser Palette bearbeitet. Eine weitere Möglichkeit besteht aber z.B. darin, Werkstücke auf einem besonderen Transportbinde an- und abzutransportieren und zellenintern für die Bearbeitung auf spezielle Vorrichtungen aufzuspannen. Die Art der für den Werkstücktransport eingesetzten Transportpaletten variiert dabei je nach Anwendungsfall. Es können z.B. neben Spezialpaletten, auf denen für die unterschiedlichen Werkstücke spezielle Ablagepositionen vorgesehen sind, Schuttgutcontainer eingesetzt werden.

Eine weitere Besonderheit, die in diesem Zusammenhang denkbar ist, besteht in einem kombinierten Werkstück- und Werkzeugtransport auf einem einzigen Transportbinde zur jeweiligen Zelle. Es ist eine weitere Eigenart eines Fertigungsablaufes, wenn Werkstücke

zur Bearbeitung von einem Transportgebilde entnommen werden. Somit erfolgt der Weitertransport nach der Bearbeitung in einer anderen Palette. In diesem Zusammenhang sind auch Split- bzw. Zusammenfügeoperationen zu betrachten. Nach einer Bearbeitung können Werkstücke auf mehreren, unterschiedlichen Paletten zu entsprechenden weiteren (ggf. auch verschiedenartigen) Bearbeitungsschritten transportiert werden und bei einer Montageoperation zusammengefügt und anschließend auf einer einzigen Transportpalette abgesetzt werden. Diese neue Palette kann danach weitere Bearbeitungsschritte durchlaufen.

Dies sind einige der vielschichtigen Varianten bzw. Besonderheiten von FFS, die im Rahmen einer Produktion entstehen können und somit von einer FFS- Steuerung abgedeckt werden müssen.

1.5.3 Schwachstelle der Steuerungssoftware

Es gibt derzeit eine große Zahl sehr unterschiedlich ausgelegter Steuerungssoftware für flexible Fertigungssysteme (FFS), welche für die verschiedensten Produktionsaufgaben im Einsatz sind. Diese Software ist verfügbar und in der Praxis erprobt, sodass die gewonnenen Erfahrungen als Grundlage einer Beurteilung dienen können.

Viele Installationen der Steuerungssoftware sind jedoch Speziallösungen für den jeweiligen Anwendungsfall. Daraus folgt, daß bei einer Konfigurationsänderung des Fertigungssystems, einer Erweiterung oder bei Änderung des Produktionsablaufes äußerst kostspielige und zeitintensive Anpassungen an der Steuerungssoftware erforderlich sind. Dadurch resultieren auch die heutigen immensen Kosten für FFS- Steuerungssoftware.

Gleiches gilt auch für die Neuentwicklung von Leitsoftware (mehr im folgenden Kapitel) für flexible Fertigungssysteme, die für einen veränderten Einsatzzweck oft völlig überarbeitet oder größten Teiles neu geschrieben werden muß. Hierdurch entstehen hohe Kosten, die die Rentabilität des gesamten FFS in Frage stellen können.

Auf der anderen Seite besteht bei Software, die für unterschiedliche Systeme konfigurierbar ist, häufig eine Komplexitätsgrenze, welche die universelle Anwendbarkeit einschränkt. Zum einen ist diese Software nur für einen bestimmten Maschinentyp oder ein besonderes Produktionsverfahren ausgelegt und zum anderen meistens auf eine bestimmte, schon bei der Softwareerstellung festgelegte Maximalzahl von zu kontrollierenden Maschinen.

Weiterhin ist durch die Vorgabe von Systemhardware und Betriebssystemen oftmals ein Einsatz auf der schon existierenden Rechnerhardware beim Anwender nicht möglich, so daß unter weiterem Kosten aufwand ein spezielles Rechnersystem angeschafft werden muß, wobei eine Verbindungsmöglichkeit beider Systeme oft nicht berücksichtigt wird [13].

Ein zusätzliches Problem, das selbst bei Berücksichtigung der oben aufgeführten Punkte auftritt, ist die Verkettung unterschiedlicher Softwaremodule untereinander. Die Möglichkeit, daß die Ablaufsteuerung eines Fertigungssystems unmittelbar auf die Vorgaben einer PPS- Planung oder Feinplanung zugreifen kann, ist bei unterschiedlichen

Programmsystemen meist nicht gegeben und kann nur mit hohem Aufwand realisiert werden. Ein weiterer Nachteil bei der heutigen FFS- Leitsoftware ist das Unvermögen , von anderen Softwareapplikationen auf den Datenbestand der Steuerungssoftware zuzugreifen, selbst wenn sich beide Applikationen auf ein und derselben Hardware befinden.

Durch das beschränkte Kommunikationsvermögen ergeben sich auch Einschränkungen im Hinblick auf die Einbindung der Fertigungsleittechnik in ein bereichsübergreifendes CIM-Konzept, was im Sinne der aktuellen Entwicklung zu unternehmensweiter und bereichsübergreifender Datenkommunikation vor dem Hintergrund des weltweiten Konkurrenzdruckes nicht mehr tragbar ist.

Die zur Zeit fehlenden Schnittstellen – Standards, die hohen Kosten für die Steuerungssoftware, aufwendige Anpassarbeiten bei Systemänderungen und – Erweiterungen, nicht vorhandene einheitliche Mensch – Maschine – Schnittstellen etc., stellen eine starke Einschränkung hinsichtlich der geforderten Flexibilität des Fertigungssystems dar. Die erforderliche hohe Systemauslastung bei geringen Durchlaufzeiten, vor allem in bedienerarmen Schichten, wird aufgrund mangelnder Planungsfunktionalitäten, sowie nur ansatzweise vorhandener Störfallstrategien oftmals nicht erreicht.

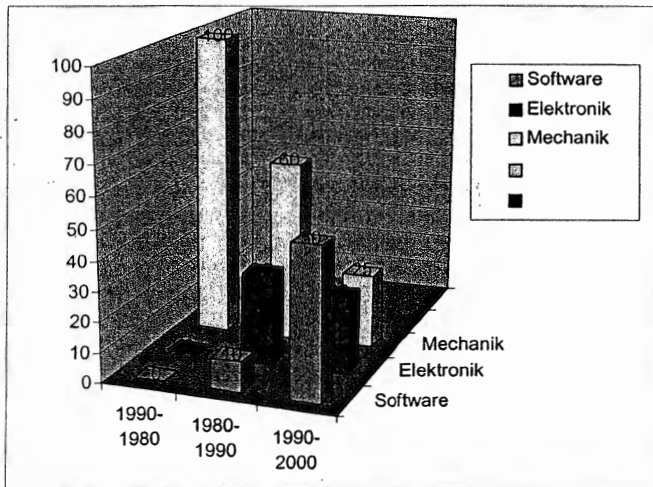


Abb. 1.9 Entwicklungsschwerpunkte auf dem Weg zur automatisierten Fabrik (nach [172])

Vor diesem Hintergrund wird die Notwendigkeit von Steuerungskonzepten deutlich, die durch ihre modulare Struktur unter Verwendung von Schnittstellenstandards, in Verbindung mit dem Einsatz eines offenen Datenhaltungssystems, die

informationstechnischen Anforderungen zur Steuerung FFS kostengünstig verwirklichen können [245].

Dies wird zudem durch Aufwandsversicherung bei der Errichtung von Fertigungsanlagen verstärkt (Abb.1.9). Während bis 1980 der Entwicklungsschwerpunkt und die zugeordneten Kosten sich im wesentlichen auf den mechanischen Bereich begrenzen, sind im Rahmen der FFS- Entwicklungen hohe Aufwendungen in den Bereichen Elektronik und Software hinzugekommen. Auf dem Weg zu integrierten Systemen werden zukünftig die Kosten der Software gegenüber den Hardwarekosten überwiegen.

2. PRODUKTIONSPLANUNG UND -STEUERUNG IN FFS

Unter werkstattnaher Produktionssteuerung werden Funktionen verstanden, die vor Ort in der Produktion eingesetzt werden, um den Fertigungsablauf selbst zu steuern wie aber auch die Überwachung und Ermittlung von fertigungsbezogenen Ereignissen zu ermöglichen. Im Gegensatz hierzu stehen PPS-, CAD- und CAE- Systeme, die im Vorfeld der Fertigung eingesetzt werden und keinen direkten Kontakt zur Produktion besitzen [225]. Zur Steuerung im weitläufigeren Sinne gehört neben der technischen Überwachung des Produktionsvorganges auch die organisatorische Vorbereitung und Kontrolle der Auftragsabwicklung. Hier werden heute unterschiedliche Funktionsmodule im Umfeld eines flexiblen Produktionssystems benötigt [11]. Diese Funktionsmodule können sich sogar teilweise funktionell überschneiden bzw. auch ergänzen. Im folgenden werden zusammenfassend die wichtigen und häufig wiederkehrenden Begriffe aus dem Bereich der Fertigungs- und Produktionssteuerung erläutert.

2.1 PPS

PPS, die Produktionsplanung und -steuerung ist die betriebswirtschaftliche CIM-Komponente. Nach [12], [51] definiert man PPS als (Abb. 2.1):

den Einsatz rechnerunterstützter Systeme zur organisatorischen Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsabläufe von der Angebotsbearbeitung bis zum Versand unter Mengen-, Termin- und Kapazitätsaspekten.

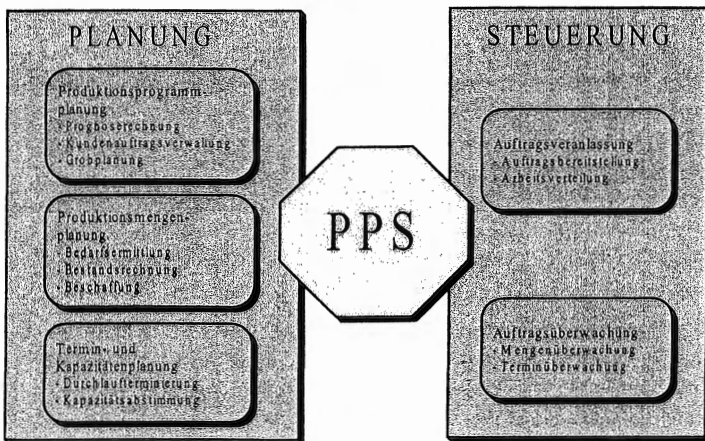


Abb. 2.1 PPS-Funktionen [315]

Ziel der Planung ist es, den Produktionsablauf des FFS so zu organisieren, daß die höchste Produktivität des FFS bei der Bearbeitung eines ständigen Stroms von Werkstücken bzw. Fertigungsaufträgen erreicht wird [155]. Höchste Produktivität bedeutet, daß ein Maximum an Werkstücken in vorgegebener Zeit unter Berücksichtigung aller Systemengpässe und der Verfügbarkeit aller Fertigungsmittel bearbeitet wird.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Zeiten, welche den kritischen Produktionsweg betreffen, so kurz wie möglich gehalten werden. Dazu muß die Arbeit der Bearbeitungsmaschinen, die zusätzliche Ausrüstung und das Bedienungspersonal aufeinander abgestimmt werden. Die Planung muß anhand eines ausgewählten Szenariums des FFS-Arbeitsablaufes folgende Daten festlegen:

- Reihenfolge
- Zeitpunkt des Beginns
- Zeitdauer der einzelnen Aktivitäten.

Unter Aktivitäten sind hier die Tätigkeiten, die durch Maschinen, Transportsystem und Bedienungspersonal ausgeführt werden (z.B. Werkzeugvorbereitung, Umrüsten der Maschinen, Bearbeitung, Transport der Paletten usw.), zu verstehen.

Der Schwerpunkt bei der Auslegung von PPS-Systemen liegt bei der:

- Grunddatenverwaltung
- Mengenplanung
- Produktionsprogrammgestaltung
- Auftragsüberwachung und -veranlassung und
- Termin- und Kapazitätsplanung.

Die Integration der kommerziellen Funktionen im CIM-Konzept ist noch nicht abgeschlossen, und eine strategische Einbindung ist noch nicht vorhanden [232].

In Abb.2.2 sieht man die PPS-Struktur eines FFS. Aus der Sicht des FFS läßt sich die Planung in drei große Bereiche gliedern [155], [308], [232]:

- Produktionsplanung (Grobplanung)
- Maschinenbelegungsplanung und
- Ablaufplanung.

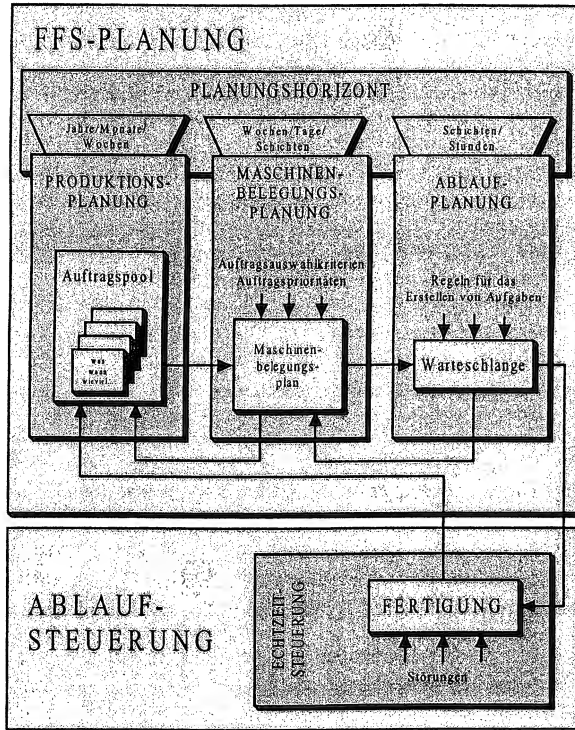


Abb. 2.2 PPS-Struktur des FFS

2.2 Produktionsplanung - FFS-übergeordnete Ebene

Auf dieser Ebene (PPS-Ebene) wird die Gesamtproduktion für einen längeren Zeitraum festgelegt. Abhängig vom Planungszeitraum spricht man von wöchentlichen, monatlichen und jährlichen Produktionsplänen. Durch die Planung bestimmt man die Aufgaben, die im FFS durchzuführen sind. Dabei muß man auch oft auf widersprüchliche Anforderungen achten (Abb. 2.3). Daher stellt jede Lösung einen Kompromiß dieser Anforderungen dar.

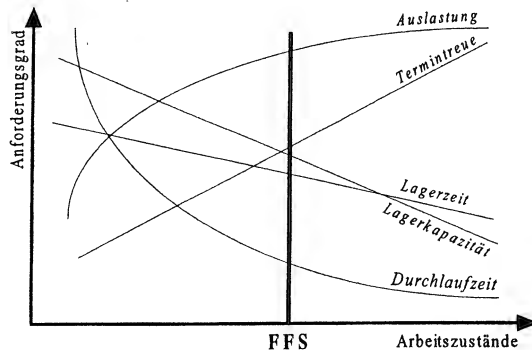


Abb. 2.3 Kompromißlösung.

Die auf der PPS-Ebene bestimmten Aufträge werden in einen Auftragspool freigegeben und von dort weiter abgearbeitet.

2.3 Maschinenbelegungsplanung - operatives Planen

Die Maschinenbelegungsplanung ist eine mittelfristige Planung, die sich über den Zeitraum von mehreren Schichten bis zu wenigen Wochen erstrecken kann. In diesem Zeitraum betrifft die Planung nur eine begrenzte Anzahl von Aufträgen. Hier werden aufgrund aktueller Kapazitätssituationen einzelner Systemkomponenten und Prioritäten einzelner Aufträge die Entscheidungen über die Verplanung von Aufträgen getroffen. Im Anschluß an die meist aufwendige Planungsvorbereitung und Analyse in der Produktionsplanung findet die Maschinenbelegungsplanung, an deren Anfang eine Vorauswahl geeigneter Aufträge steht, statt. Daraufhin werden technisch mögliche Planungsvarianten für die Funktionsbereiche Bearbeiten, Lagern und Transportieren aufgestellt, sodaß ein objektiver Vergleich der erarbeiteten Aufträge möglich ist. Bei diesem Vergleich müssen die einzelnen Aufträge vor allem nach Kosten, aber auch bezüglich des Ist- und Sollzustandes des FFS ausgewertet werden.

Die Maschinenbelegungsplanung ist nach [155] eine der wichtigsten Aufgaben der PPS-Systeme.

2.4 Ablaufplanung - FFS-interne Ebene

Die Ablaufplanung (kurzfristige Planung) ist eng mit der Ablaufsteuerung verknüpft. Hier wird der Zeitraum der nächsten Stunden bis zu wenigen Schichten behandelt. Das Resultat der Ablaufplanung ist die Feststellung einzelner Tätigkeiten für das Personal, sowie die Sicherstellung aller benötigten Ressourcen wie Maschinen, Werkzeuge, Transportsystem und Vorrichtungen.

Die Ablaufplanung stellt wegen der großen Anzahl der zu bearbeitenden Daten eine aufwendige Planungstätigkeit dar. Jeder Auftrag wird im Laufe der Maschinenbelegungsplanung zuerst einer Maschine zugewiesen und im weiteren in viele kleinere Aufgaben zerlegt. Jede Aufgabe ist als unteilbare Tätigkeit zu verstehen. Es handelt sich hier grundsätzlich um das Verteilen von Aufgaben an die Systemkomponenten. Zu diesem Zeitpunkt ist die Prioritätsvergabe bei der endgültigen Ablaufplanerstellung noch nicht festgelegt. Die Ablaufplanung muß anhand eines ausgewählten Szenarios des FFS-Ablaufes die Reihenfolge, den Beginn und die Zeitdauer der einzelnen Aktivitäten (Werkzeugvorbereitung, Betriebsmittelvorbereitung, Bearbeitung, Umrüsten der Maschinen, Transport usw.) berechnen und anschließend festlegen. So wird für jede Systemkomponente eine Warteschlange von Aufgaben erstellt.

2.5 Ablaufsteuerung

Die Ablaufsequenzen, die als Vorgabe für die Ablaufsteuerung dienen, werden durch die Maschinenbelegungsplanung festgelegt. Die Ablaufsteuerung übernimmt die Sollzustände des Systems und steuert dadurch das Personal, das Transportsystem und die Maschinen und versucht das System entsprechend den Planungsvorgaben zu führen. Die Schnittstelle zwischen Maschinenbelegungsplanung und Ablaufsteuerung, durch welche die Vorgaben für die Ablaufsteuerung und die Rückmeldungen an die Maschinenbelegungsplanung erfolgen, sind die Warteschlangen, die durch die Maschinenbelegungsplanung aufgebaut, durch die Ablaufplanung in die Aufgaben transformiert und von der Ablaufsteuerung abgebaut werden. Die Rückmeldungen beziehen sich auf den Erfolg oder den Mißerfolg der Durchführung einzelner Aufgaben.

2.6 Fertigungsleitstandsysteme

PPS- Systeme übernehmen keine steuernden Funktionen; sie sind weniger auf technische als viel mehr auf betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte ausgerichtet. Die Steuerung der technischen Betriebsabläufe ist nicht Inhalt von PPS- Systemen.

Der Leistungsumfang der heutigen FFS- Kontrollsysteme, auch als Fertigungsleit- und Steuerungssysteme (FLS) bezeichnet, umfaßt einen großen Einsatzbereich. Grundsätzlich sind die FFS- Kontrollsysteme zwischen den PPS- Systemen und dem eigentlichen Fertigungsbereich einzuordnen. Im Gegensatz zu den reinen Fertigungsleitständen, die nur planende und terminkontrollierende Funktionen besitzen, setzen die Fertigungsleitstandssysteme die vorgegebenen Fertigungsaufträge automatisiert durch. Dabei ist die Interaktion mit dem Bedienpersonal je nach Leitstandssoftware unterschiedlich stark erforderlich.

In gewissen Bereichen ist die Abgrenzung von einem zum anderen der genannten Systeme fließend [15], [293]. Es gibt eine Reihe von Funktionen, die sowohl Bestandteil des einen wie auch des anderen Systems sind.

Die Grenze der PPS- Systeme zu den elektronischen Leitständen bzw. den FLS- Systemen ist am deutlichsten auszumachen. Die Ausrichtung der PPS- Systeme läuft stark in die betriebswirtschaftliche Richtung, was durch Funktionalitäten wie Finanz- und

Rechnungswesen, Kostenrechnung, Personalwesen oder Vertrieb deutlich gemacht wird. Dieses sind Einsatzgebiete, die weder von den FLS- Systemen noch von den elektronisch arbeitenden Leitständen abgedeckt werden können. Die PPS- Systeme haben ihre Grenze in dem Punkt erreicht an dem die eigentliche Fertigungssteuerung gefordert ist, wo Funktionalitäten (z.B. Toolmanagement oder Materialflußsteuerung) die diesen Bereich erfassen, in den PPS- Systemen bisher nicht vorgesehen sind [107].

Hier treten die FLS- Systeme und Leitstände in Funktion. Die Abgrenzung zwischen diesen beiden Konzepten ist deutlich schwieriger festzulegen als gegenüber dem PPS-Konzept. Grundlegende Aufgabe beider Steuerungssysteme ist die Feinterminierung der Aufträge und die Steuerung der Arbeitsgänge auf den verschiedenen Werkzeugmaschinen [173], [210].

Auch die hierarchische Einordnung zwischen dem PPS- System auf der einen Seite und der eigentlichen Fertigung auf der anderen Seite ist bei beiden gleich. Gegenüber den PPS- Systemen kann in bezug auf die Verarbeitung von durch das BDE/MDE- System erfaßten Daten ein deutlicher Unterschied ausgemacht werden. Während bei den PPS- Systemen die Daten auflaufen und erst auf Interaktion des Anlagenführers in die Planung einfließen, werden diese Daten in den beiden anderen Konzepten online verarbeitet.

Während ein elektronisch arbeitender Leitstand grundsätzlich in seiner Funktion auf die Unterstützung des Benutzers bei der Fertigungssteuerung ausgerichtet ist, ist seine Grenze erreicht, wenn ein vollautomatischer Fertigungsablauf erzielt werden soll. Anhand dieses Kriteriums kann eine deutliche Trennung zwischen FLS- System und Leitstand durchgeführt werden.

Zur automatischen Abwicklung der Produktion sind die Funktionen nötig, welche die FFS-Kontrollsysteme von den elektronischen Plantafeln unterscheiden. Einige Beispiele wären Materialflußverfolgung und -Steuerung, Materialverwaltung sowie als wichtige Funktion die DNC- Behandlung, d.h. selbständiges Auslösen von Produktionsabläufen. Dies sind die wesentlichsten Funktionen, die benötigt werden, um eine Fertigungsanlage zu fahren, sofern die Anlage neben der NC- Ausrüstung der Werkzeugmaschinen auch über ein entsprechendes Transportsystem (z.B.: Fahrerloses Transportsystem (FTS)) verfügt.

2.7 Integration von ergänzenden Funktionalitäten

Häufig ist der Anschluß von zusätzlichen, ergänzenden Funktionalitäten wünschenswert. In diesem Zusammenhang sind insbesondere BDE- und MDE-Funktionalitätserweiterungen zu nennen.

Die Aufgabe der Betriebs- und Maschinendatenerfassung ist es, alle erforderlichen Ist-Daten aus dem Betrieb zu sammeln und in verarbeitungsgercheter Form für die Fertigungsdisposition und -Steuerung, zur Ermittlung neuer Soll Daten, sowie für die Kostenrechnung, die Materialwirtschaft und den Materialtransport bereitzustellen.

Die im Fertigungsprozeß anfallenden Betriebsdaten dienen dazu, die Abweichungen des Fertigungsprozesses von einem Sollzustand zu erkennen und so über die Fertigungsplanung und -Steuerung eine erforderliche Korrektur des Ist- Zustandes zu bewirken, Abb. 2.4.

Rechnergesteuerte Fertigungsanlagen (DNC- Systeme) bieten wegen ihrer vorhandenen Online- Verbindung zwischen Rechner und Werkzeugmaschine ideale Voraussetzungen für eine Betriebsdatenerfassung. Außer der manuellen Eingabe über ein Terminal ist in einem DNC- System auch eine automatische Datenerfassung möglich. Sensoren und

Meßwertgeber liefern die Daten aus dem Prozeß, während z.B. Bearbeitungszeiten und Stückzahlen aus Maschinenbelegungs- bzw. Stückzahllisten des DNC- Programmsystems abgeleitet werden können.

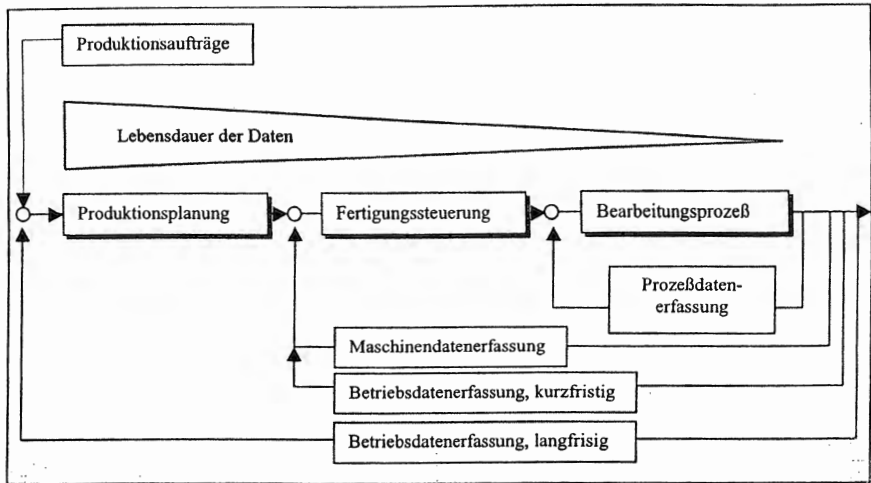


Abb. 2.4 Datenfassung zur Steuerung und Regelung von FFS

Die im Fertigungsrechner gesammelten und vorverdichteten Daten werden im einfachsten Fall auch vom Fertigungsrechner ausgewertet. Um die so gewonnene Transparenz des Fertigungsprozesses voll ausschöpfen zu können, sollten durch Kopplung zu einem übergeordneten Betriebsrechner die Daten auch im Online – Betrieb der Fertigungsplanung und –Steuerung zur Verfügung gestellt werden.

Dem erwähnten Regelkreis (vgl. Abbild 2.4) gemäß ist dadurch eine kurzfristige Reaktion auf Soll/Istabweichungen, d.h. eine Änderung des Maschinenbelegungsplans bzw. der Auftragsdisposition, möglich.

Relativierend zu bemerken ist noch, daß die so ermittelten Daten bei dem größten Teil der übergeordneten PPS- Systeme nicht automatisch zu einer Aktualisierung der Planung führen, sondern erst auf Initiierung des Benutzers ein „Update“ durchgeführt wird.

Die verfügbaren PPS- Systeme müssen heutzutage noch vorwiegend im Batch – Betrieb gefahren werden, das heißt, daß normalerweise erst am Wochenende ein aktualisierender Planungsdurchlauf angestoßen wird.

2.8 Informationsflussanalyse zur Steuerung von FFS

Neben der Steuerung der während der Fertigung ablaufenden technischen Vorgänge ist die Einbindung des FFS in den gesamten Produktionsablauf sehr wichtig [91]. Dabei muß auf die FFS- spezifischen Besonderheiten Rücksicht genommen werden, um eine effiziente Nutzung des FFS zu ermöglichen [80], [95]. Neben speziellen Anforderungen hinsichtlich

der informationstechnischen Anbindung muß dabei auch die Art der Einleistung der Produktionsaufträge betrachtet werden [202]. Ein FFS muß entkoppelt von den Abläufen der konventionellen Fertigung seine Aufgaben bearbeiten können. Die Flexibilität eines FFS würde nicht effizient genutzt, wenn die Auftragszuweisung eine lange Liegezeit ermöglicht. Dies wäre der Fall, wenn das FFS „auf Lager produziert“. Hierbei würden die Vorteile einer schnellen Umrüstbarkeit einer flexiblen Produktionseinrichtung nicht genügend genutzt.

Bei der Informationsflußanalyse zur Steuerung von FFS müssen wesentlich umfassendere Datenströme als bei einer konventionellen Fertigung betrachtet werden. Beispielsweise muß aufgrund des hochautomatisierten Ablaufes wesentlich mehr an Informationen bereitgestellt werden bzw. an Ereignissen abgespeichert werden, da auch Vorkommissionen wie die Werkstückhandhabung detailliert beschrieben werden müssen. Weiterhin muß die Möglichkeit gegeben sein, Aufträge detailliert zu bearbeiten, zu spezifizieren und einzelne Werkstücke bei jedem Produktionszwischenstadium zu identifizieren. Zusätzlich muß eine präzise Rückmeldung über den Produktionsfortschritt gegeben werden können.

2.8.1 Erforderliche Informationsflüsse zur Steuerung von FFS

In Abb.2.5 sind dabei die folgenden Informationsflüsse in den ovalen SA-Diagrammelementen aufgeführt.

- Auftragserteilung:	Produktdefinition, Stückzahlen, gewünschter Liefertermin
- Auslieferungstermin:	Termin der Fertigstellung, Preis
- Bestellungen:	Material und Betriebsmittelanforderungen
- Materialeingänge:	Lieferbestätigungen von Material und Betriebsmitteln
- Konstruktionsauftrag:	Pflichtenheft, Bearbeitungsfrist
- Fertigmeldung Konstruktion:	Datenbankverweise auf Konstruktionsdaten
- neue/alte Konstruktionsunterlagen:	Einzelteilzeichnung, Modellzeichnung, Anbauzeichnung, Bestellzeichnung, Zusammenstellungszeichnung, Montagezeichnung, Stücklisten
- Arbeitsplanungsauftrag:	Querverweise zu Konstruktionsdaten, Losgrößen, Bearbeitungsfrist
- Fertigmeldung der Planung:	Neue Teilnummer, Querverweise zu Planungsdaten
- Arbeitsplanung- und Systemdaten:	CAD- Daten, Stammdaten (Maschinen, Werkzeuge,...), Systemlayout, alte Planungsunterlagen (Arbeitsplan, NC-Programme, etc.)
- Planungsdaten:	NC- und RC- Programme, Arbeitspläne
- Fertigungsauftrag:	Produktionsauftragsnummer
- Fertigungsfortschritt:	Meldung des Produktionsfortschrittes, Störungen
- Planungs- und Auftragsdaten:	Produktionsauftragsnummer, Termine, Stückzahlen, Prioritäten,

- System- und Planungsdaten:
- Steuerungs- und Planungsdaten:

Werkstückbezeichnung, Arbeitsplanverweise
 Zur Fertigung benötigte Daten (Arbeitspläne,
 Programme, Auftragsnummer,...),
 Selbst erstellte, intern benötigte Daten

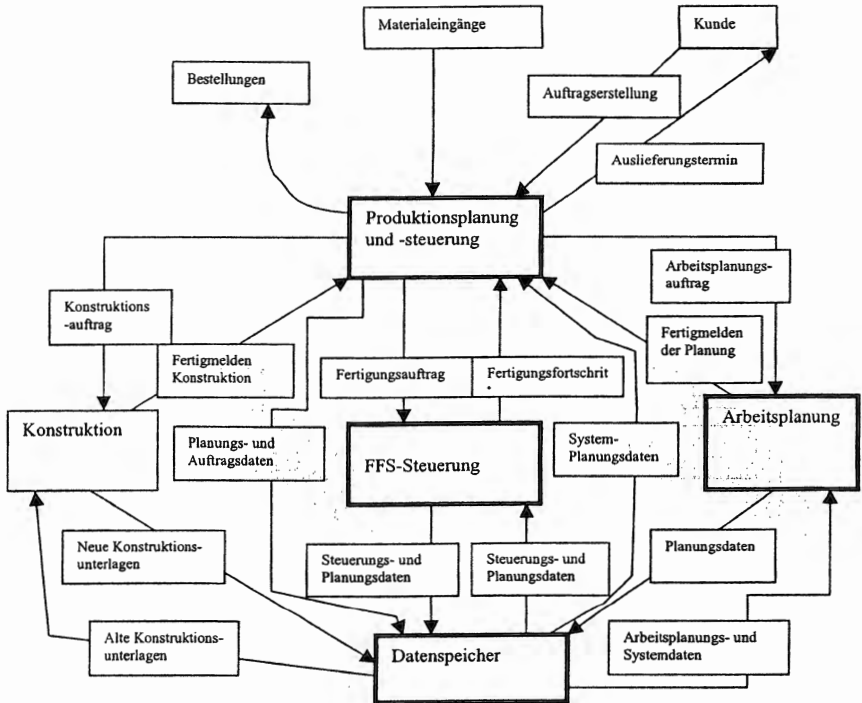


Abb 2.5 Einbindung einer FFS- Steuerung in die Unternehmensinformationsflüsse

Betrachtet man alle an der Auftragsabwicklung mitwirkenden Unternehmensbereiche als ein abgeschlossenes System, so wird eine Reaktion des Systems, d.h. Produzieren und Ausliefern von Produkten, durch eine Kundenbestellung initiiert. Das Ereignis der Auftragserteilung durch den Kunden an das Unternehmen führt zu einer Reihe von systeminternen Folgereaktionen an deren Ende die Benachrichtigung des Kunden über den Auslieferungstermin und den Preis steht. Die systeminternen Reaktionen und die damit zusammenhängenden Informationsflüsse müssen für die Konzipierung einer universellen Ablaufsteuerung analysiert werden, da hieraus die für eine Fertigungssteuerung erforderlichen Module resultieren.

Das PPS- Modul entscheidet über eine Auftragsnahme und in der Folge über eine Grobterminierung der einzelnen Schritte zur Auftragsabwicklung. Handelt es sich um einen Neuteilauftrag, werden die erforderlichen Konstruktionsaufträge vergeben. Als Informationsträger dient das Pflichtenheft, in dem die kundenseitigen Produkthanforderungen zusammengefaßt sind.

Innerhalb einer vom PPS- Modul festgelegten Frist sind die Aufträge von der Konstruktionsabteilung zu bearbeiten und anschließend an des PPS- Modul, unter Angabe entsprechender Datenbankverweise, als fertig zu melden. Die Konstruktionsabteilung greift nach Möglichkeit auf bestehende, im Datenspeicher abgelegte Konstruktionsunterlagen, zurück (Abb.2.5).

Im Anschluß an die Konstruktion gibt das PPS- Modul einen Auftrag an die Arbeitsplanung. Neben Querverweisen zu den neuen Konstruktionsunterlagen werden auch die Losgröße des Auftrags und eine Bearbeitungsfrist übermittelt.

Alle notwendigen Informationen für die Erstellung der Planungsunterlagen bekommt die Arbeitsplanung aus einem Informationspool, in dem neben den CAD- Daten der Konstruktion auch das Systemlayout (Art und Anzahl der Maschinen, Transportmittel,...), die Stammdaten (Maschinendaten, Werkzeuge,...) und alte Arbeitsplanungsunterlagen gespeichert sind. Die neuen Planungsdaten (NC-, RC- Programme, Arbeitspläne,...) werden ebenfalls im Datenspeicher abgelegt, und das PPS- Modul erhält in Verbindung mit der neuen Teilnummer eine Fertigmeldung.

Anhand der Konstruktions- und Planungsunterlagen sowie der erforderlichen Losgröße werden Bestellungen initiiert, die der Beschaffung aller notwendigen Betriebsmittel und Materialien dienen.

Sobald die Arbeitsplanung ihren Teilauftrag ausgeführt hat, kann das PPS- Programmmodul mit Hilfe der System- und Planungsdaten (auftragsneutrale Arbeitspläne, Systemlayout,..) eine Grobterminierung des Auftrages durchführen. Dem Auftrag wird eine Produktionsauftragsnummer zugeteilt unter der im Datenspeicher Angaben über Termine, Stückzahlen, Prioritäten, Werkstückbenennung, Arbeitsplanverweise usw. abgelegt werden. Unter Angabe der Auftragsnummer wird die Auftragsfreigabe an die FFS-Steuerung weitergeleitet.

Dem PPS- Modul wird der Auftrag unter Angabe der Produktionsauftragsnummer fertigmeldet. Soweit nötig, erfolgt zudem eine Meldung über größere Störungen in den Zellen. Im Abb.2.6 sind diese Komponenten abgebildet.

- **Feinplanung:** Erhält grobgeplante Aufträge vom PPS- Modul. Führt anhand der Auftrags- und Systemdaten eine Terminfeinplanung durch (Auslösung durch Benutzeroberfläche (BO). Gefertigte Aufträge und Störungen werden der BO gemeldet.
- **FFS- Steuerung:** Setzt die von der Feinplanung geplanten und freigegebenen Aufträge gemäß Termin- und Prioritätsaspekten in der Fertigung durch. Koordiniert den gesamten Material- und Betriebsmittelfluß. Reagiert auf gemeldete Störungen der Fertigungszellen.
- **Fertigungszellen:** Ausführen der übertragenen Zellenaufträge.

- Benutzeroberfläche : Initiieren einer Feinplanung. Auslösen einzelner Eilaufträge.
Anzeige des aktuellen Systemzustandes sowie zusätzlicher Benutzerinformationen.
- Meldungen: Auftragsauslösung, Meldungen zur Auftragsabwicklung
Störungsmeldungen

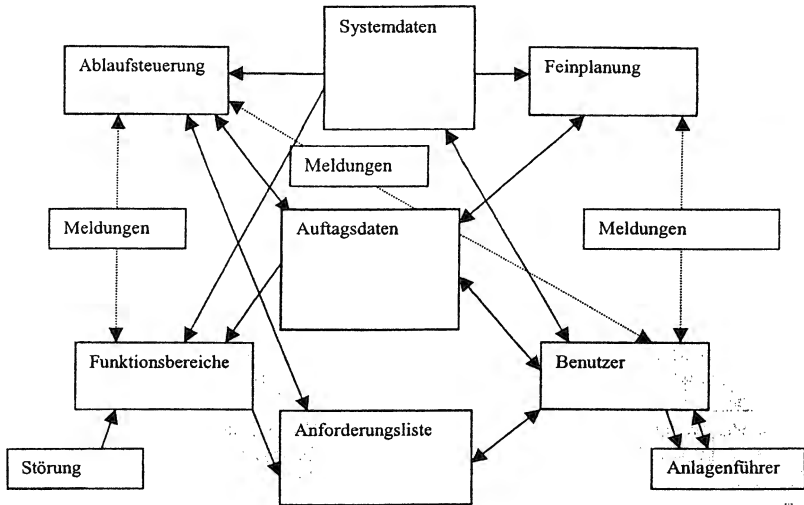


Abb.2.6 Informationstechnische Verbindung.

Um Aktionen zwischen einer FFS- Ablaufsteuerung und Fertigungszellen zu koordinieren bzw. zu initiieren, sind spezielle Meldungen nötig. Um eine weitergehende Entkopplung zwischen der Ablaufsteuerung und von der Funktionalität gegebenenfalls sehr unterschiedliche Zellen zu erhalten, müssen dies zellenfunktionsunabhängige Meldungen sein. Auf diese Anforderung wird in Kapitel 5 und 6 bei der Erarbeitung der FFS-Steuerungsarchitektur detailliert eingegangen.

Weiterhin ist aus Abb. 2.6 ersichtlich, daß eine Benutzeroberfläche Verbindung zu allen Datenbankdateien besitzen sollte. Somit ist die Benutzeroberfläche in der Lage, dem Anlagenführer alle angefragten Informationen zu liefern. Zusätzlich besteht ein direkter Informationsfluß zur Feinplanung und Ablaufsteuerung. Hierdurch können Umlanungsbefehle oder der Wunsch zur Einplanung eines Eilauftrages vom Anlagenführer über die Benutzeroberfläche an das Feinplanungsmodul bzw. die Ablaufsteuerung geschickt werden. Außerdem werden Fertigmeldungen über einzelne Aufträge, Arbeitsgänge und Arbeitsschritte sowie Störungen in den Fertigungszellen über die Ablaufsteuerung an die Benutzeroberfläche und somit an den Anlagenführer gesandt.

Vom PPS- System freigegebene Aufträge werden unter Mitteilung der Produktionsauftragsnummer von dem PPS- System in einer gesonderten Datei abgelegt. Zusätzlich erhält die Benutzeroberfläche eine Nachricht über neue Aufträge. Der Anstoß zum Erstellen einer neuen Feinplanung kann dann vom Anlagenführer über die Benutzeroberfläche ausgelöst werden.

Anhand einer übermittelten Auftragsnummer kann die Feinplanung alle benötigten Auftragsdaten (Auftragsneutraler Arbeitsplan, Stückzahlen,...) aus der zugehörigen Datei lesen und erstellt in Verbindung mit den „Systemdaten“ (Systemlayout), unter Berücksichtigung der individuellen Zellenauslastungen, für jeden Auftrag einen auftragspezifischen Arbeitsplan. Zu den einzelnen im Arbeitsplan vorgesehen Arbeitsgängen werden Zellaufträge generiert, denen nunmehr endgültig ein Bearbeitungsort und ein fester Termin zugewiesen werden. Zum Einplanen eines einzelnen Eilauftrages bzw. zum kompletten Ersetzen der internen Reihenfolgeliste muß eine gesonderte Meldung zur Initiierung eines neuen Feinplanungslaufes an die Ablaufsteuerung geschickt werden.

Die Ablaufsteuerung kann somit alle neuen Zellaufträge in eine interne Warteliste einreihen und für eine termingerechte Durchführung sorgen. Anhand einer Auftragsnummer können die individuellen Auftragsdaten gelesen und somit die Termine, Prioritäten, Bearbeitungsorte usw. ermittelt werden.

Die Zellen übernehmen eingeplante Aufträge, und melden einen Betriebsmittelbedarf. Über eine Auftragsannahme entscheidet jede Zelle autark. Hierzu gleicht sie die für eine Auftragsbearbeitung erforderlichen Ressourcen mit den vorhandenen ab. Über fertige Aufträge und über Störungen wird die Ablaufsteuerung durch entsprechende Meldungen informiert.

Aufbauend auf diesen Überlegungen wurden entsprechende SA- Diagramme für die intern in den Zellen ablaufenden Aktionen entwickelt. Als Beispiel für solche intern ablaufenden Aktionen seien hier die Durchführbarkeitsüberprüfung von zugeteilten Aufträgen, den Abgleich freier Fertigungskapazität, die Koordinierung der intern ablaufenden Fertigungsvorgänge oder auch Ermittlung und Anforderung der begleitend benötigten Fertigungshilfsmittel genannt. Unter Fertigungshilfsmitteln können dabei Werkzeuge, Betriebsmittel wie Spannvorrichtungen oder Robotergreifer oder auch spezielle Transportmittel fallen, die zur Durchführung der zelleninternen Abläufe erforderlich sind. Diese Hilfsmittel können sich auch außerhalb der betrachteten Zelle befinden und müßten somit von ihr im Vorfeld der eigentlichen Auftragsbearbeitung angefordert werden.

Weitere zelleninterne Aktionen sind beispielsweise die Übernahme neuer bzw. der Abtransport fertig bearbeiteter Aufträge oder ein Störungsmanagement, um auftretende Störungen zu beheben bzw. gestörte Aufträge aus der Zelle zu entfernen.

2.9 Produktionsablauf

2.9.1 Arbeitsgang

Ein Arbeitsgang ist die Erledigung einer Bearbeitungstätigkeit an einem Werkstück, bzw. allen Werkstücken des Loses. Dazu ist eine Reihe von Ver- und Entsorgungsoperationen durchzuführen. Dem zeitlichen Fortschritt des Arbeitsganges entsprechend gibt es hier Termine, bis zu denen die jeweilige Versorgung zu erfolgen hat, um einen Stillstand der Maschine zu vermeiden.

Gleichfalls parallel zur Hauptzeit erfolgt der Abtransport nicht mehr benötigter Mittel. Das ist weniger zeitkritisch als die Versorgung, kann jedoch zu Maschinenstillständen führen. Falls die Versorgung durch nicht benötigte Mittel blockiert wird, kann die Maschine selbst in Stillstand geraten. Eine Störung anderer Maschinen kann auftreten, wenn der Abtransport von Fertigungsmitteln, die an den anderen Maschinen benötigt werden, nicht rechtzeitig erfolgt.

Im Bezug auf die Hauptzeit lassen sich alle für einen Arbeitsgang notwendigen Operationen grundsätzlich unterteilen in [261]:

1. Hauptzeitoperationen an der Maschine
2. Hauptzeitparallele Versorgung
3. Hauptzeitparallele Entsorgung.

Hauptzeitoperationen an der Maschine

Die Hauptzeitoperationen an der Maschine stellen die Bearbeitungs- und Umrüstoperationen dar:

- **Manuelles Umrüsten**
Hier erfolgt der manuelle Umbau der Maschine für den neuen Arbeitsgang, wobei die Spannbacken und Greiferbacken des vorherigen Ganges demontiert und die neuen montiert werden.
- **Halbautomatisches Umrüsten**
Mit Hilfe des Rüstprogramms erfolgt hier der manuelle Umtausch von Werkzeughaltern. Das Rüstprogramm automatisiert dabei das Verfahren des Werkzeugmagazines in die notwendigen Wechsellagen.
- **Automatisches Aufrüsten**
Dieses umfaßt das automatische Laden der Werkzeugköpfe von der Werkzeugpalette in die Werkzeughalter, sowie das Verfahren der Lünette und des Reitstockes in die jeweilige Arbeitsposition. Auch hier erfolgt die Steuerung durch das Rüstprogramm.
- **Bearbeiten der Werkstücke**
In diesem Prozeß werden die Werkstückpaletten abgearbeitet, wobei jedes Werkstück mittels Rohteilgreifers von der Palette genommen und ins Backenfutter gespannt wird. Nach der Bearbeitung wird das Werkstück mit dem Fertigteilgreifer entnommen und am ursprünglichen Palettenplatz abgelegt.

- **Automatisches Abrüsten**
Dieses erfolgt nach der Abarbeitung der letzten Werkstückpalette. Dabei werden alle für den nächsten Arbeitsgang nicht benötigten Mittel (Lünette, Reitstock, Werkzeuge, Werkstückgreifer) von der Maschine in die Abstellpositionen abtransportiert.

Hauptzeitparallele Versorgung

Diese umfaßt die Versorgung der Maschine mit den zur Durchführung eines Arbeitsganges benötigten Fertigungsmitteln:

- **Rüstelemente, Sonderwerkzeuge, Rüstprogramme**
Diese werden für das manuelle und halbautomatische Umrüsten benötigt und müssen spätestens zu Beginn des Umrüstens für den folgenden Arbeitsgang zur Verfügung stehen. Sie verbleiben bis zum Beginn des automatischen Aufrüstens an der Maschine.
- **Werkzeuge, Werkzeug-Datenprogramm**
Ihre Zulieferung muß spätestens bei Beendigung des halbautomatischen Umrüstens der Maschine mit Werkzeugen erfolgen. Sie verbleiben bis zum Bearbeitungsende an der Maschine.
- **Teileprogramm**
Das NC-Programm für die Bearbeitung muß nach Abschluß des Rüstens in der Maschinensteuerung vorhanden sein.
- **Werkstückpaletten und Paletten-Informationsprogramm**
Die Werkstückpaletten sind so anzuliefern, daß die Bearbeitung gleich nach dem Aufrüsten anfangen kann. Das gesamte Los sollte ohne Unterbrechung abgearbeitet werden. Parallel zur Zulieferung einer Palette muß das entsprechende Paletten-Informationsprogramm in der Maschinensteuerung vorliegen.

Hauptzeitparallele Wegräumung

- **Rüstelemente, Sonderwerkzeuge**
Nach dem Umrüsten können die nicht mehr benötigten Rüstelemente und Sonderwerkzeuge in die entsprechenden Systemlager abtransportiert werden.
- **Werkstücke**
Nach der Bearbeitung des letzten Werkstückes einer Palette verläßt die Palette die Maschine und kann zur Entladung (direkt oder über den Pufferspeicher) abtransportiert werden.
- **Werkzeuge**
Nach der Abarbeitung des gesamten Loses sind die Werkzeuge automatisch abzurüsten und zur Entladung abzutransportieren.
- **NC-Programme**
Optimierte Teileprogramme werden von der NC-Programmierung zum Nachbearbeiten der Quellenprogramme benötigt und sind daher aus der Maschinensteuerung an den Fertigungsleitreechner zu übertragen.

2.9.2 Fertigungsablauf

Ein Fertigungsablauf ist eine Folge von Arbeitsgängen, die am Werkstück ausgeführt werden, ohne daß dieses das FFS verläßt. Für das FFS gilt ein Werkstück vor dem ersten Arbeitsgang als Rohteil und nach dem letzten als Fertigteil, während es dazwischen als Halbfertigteil bezeichnet wird. Wird der Fertigungsablauf durch einen externen Arbeitsgang unterbrochen, so gelten die Teilabläufe vor und nach dem externen Arbeitsgang als eigenständige FFS-Fertigungsabläufe. Diese Unterscheidung ist notwendig, denn aus der Sicht der FFS-Logistik kann ein externer Arbeitsgang weder geplant noch kontrolliert werden.

Betrachtet man alle Aufträge (Bearbeitungs-, Ver- und Entsorgungsoperationen) eines Fertigungsablaufs und ihre Abwicklung im Arbeitsplan, spricht man vom Auftragsablauf. Jeder Auftragsablauf erstreckt sich in der Regel über mehrere Bearbeitungsmaschinen.

2.9.3 Auftragsstruktur

Auftrag

Der Produktionsablauf eines FFS verlangt ein hierarchisch geordnetes Planen auf mehreren Ebenen [155]. Der Auftrag einer höheren Ebene ist daher auf niedrigerer Ebene in mehrere Aufträge zu zerteilen. Somit wird der Auftrag mehr und mehr konkretisiert und detailliert. Auf der Ausführungsebene ist er so detailliert, daß er in der Regel nur noch eine einzige Tätigkeit beinhaltet, wie z.B.: Beladung einer Werkstückpalette, Transport der Palette von einer Position in eine andere usw. (Abb.2.7).

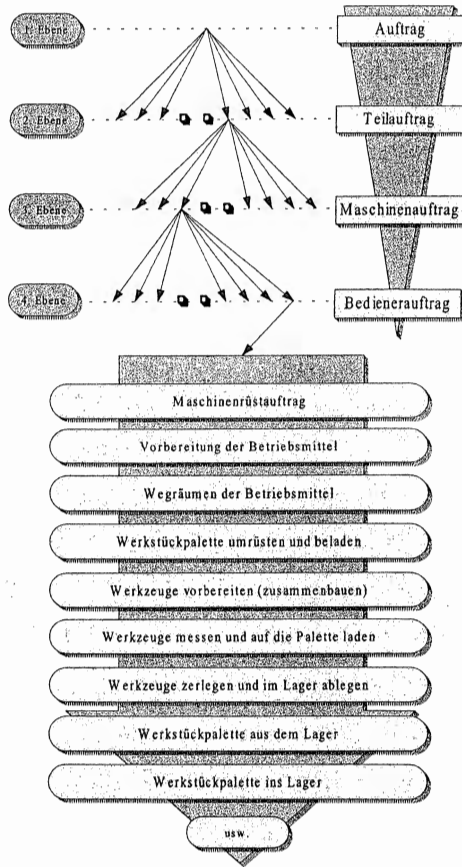


Abb.2.7 Auftragsstruktur [155]

Ein Auftrag, der von der übergeordneten Planung (PPS) an das FFS gegeben wird, beinhaltet folgende wichtige Daten:

- Rückmeldenummer - Identifikation des Auftrages
- Werkstückbezeichnung - Identifikation des zu fertigenden Werkstückes
- Losgröße
- Auftragspriorität
- gewünschter Termin der Fertigstellung

Die Erledigung des Auftrages wird dem PPS rückgemeldet.

Teilauftrag

Aufträge können so groß sein, daß sie wegen vorhandener Engpässe im System nicht oder nur mit schlechter Effizienz des Gesamtsystems gefertigt werden können. Um die Anpassung der Kapazitätsbelastung an die verfügbare Kapazität zu erleichtern [83] und dadurch die Gesamteffizienz zu erhöhen, kann so ein Auftrag entsprechend den zur Verfügung stehenden Fertigungsmitteln geteilt werden [155]. Solche geteilten Aufträge nennt man Teilaufträge, unabhängig davon welche Loseilungsstrategie angewendet wird. Teilaufträge werden als getrennte Aufträge betrachtet.

Dabei wird der allerletzte Zeitpunkt, zu dem die Abarbeitung des Auftrages laut Planung beginnen muß ($\hat{A}P_{\text{spätester_beginn}}$), berechnet [155]:

$$\hat{A}P_{\text{spätester_beginn}} = \hat{A}P_{\text{endtermin}} - \hat{A}T_{\text{bearbeitung}} - \hat{A}T_{\text{sicherheit}}$$

Dabei sind:

$\hat{A}P_{\text{endtermin}}$	- Zeitpunkt, bis zu dem der Auftrag beendet sein muß
$\hat{A}T_{\text{bearbeitung}}$	- Zeitdauer der Bearbeitung des Auftrages
$\hat{A}T_{\text{sicherheit}}$	- Zeitdauer als Sicherheitsfaktor

Maschinenauftrag

Der Maschinenauftrag bezeichnet alle Tätigkeiten, die an einer Bearbeitungsmaschine zur Durchführung eines bestimmten Arbeitsganges an allen Werkstücken eines Loses notwendig sind. Er wird von der Planung auf Durchführbarkeit geprüft und in die Warteschlange der Maschinenaufträge der jeweiligen Maschine eingereiht.

Bedienerauftrag

Als Bediener wird das Personal der Fertigungsanlage (z.B. Maschinenführer, Werkzeugeinsteller) bezeichnet. Der Bedienerauftrag bezieht sich auf eine einzelne, detaillierte Tätigkeit des Bedieners (s. Unterkapitel 0). Er wird von der Fertigungsleitersoftware an die Bediener vergeben.

Der Bedienerauftrag wird immer am entsprechenden Terminal mit einer zusätzlichen Kurzinformation angezeigt. Zusätzlich erfolgt bei den meisten Bedieneraufträgen auch eine Druckausgabe, welche alle Informationen, die zur Erledigung der Tätigkeit notwendig sind, enthält. Die Erledigung des Bedienerauftrages wird am Terminal quittiert und somit dem Fertigungsleiter zur Kenntnis gebracht.

Aufgaben des Personals

In einem FFS unterscheidet man zwischen dem Leitstandpersonal, das die Aufgaben am Leitstand durchführt, und dem für die Bedieneraufträge in der Fertigungsanlage zuständigen Personal (Anlagepersonal). Die Anforderungen an das Personal im FFS unterscheiden sich wesentlich von denen, die an Personen in einem klassischem Produktionssystem oder einem Unternehmen anderer Branchen gestellt werden. Eine der wesentlichen Voraussetzungen zum Betreiben der Fertigungsanlage ist qualifiziertes Bedienungspersonal [261]. Trotzdem wird der Mensch hier eher als eine Systemkomponente betrachtet. Nach dem Verplanen eines Auftrags in der Maschinenbelegungsplanung steht der Bediener in einer untergeordneten Position

gegenüber dem PPS-System. Seine Tätigkeit wird ebenso gründlich überwacht, wie die Tätigkeit an den übrigen Systemkomponenten.

Anlagepersonal

Die Arbeitsinhalte in der Fertigungsanlage liegen im Bereich der Maschinenbedienung sowie der Fertigungsmittelbereitstellung. Diese Aufgaben sind stark an die Produktion gekoppelt. Eine Kumulation der Arbeitsleistung ist nur im Bereich der Versorgungstätigkeiten (Palettenbeladung) möglich [155].

Der Personalbedarf in der Anlage hängt von folgenden Faktoren ab [261]:

- Größe des FFS
- Komplexität und Bedienerintensität der Werkstücke
- Losgröße
- Änderung des Teilespektrums
- Erfahrung mit der Anlage.

Um „mannarme“ Produktionsschichten zu realisieren, ist die Maschinenbelegung für diese Zeit so zu planen, daß hier die geringstmögliche Bedienerbelastung auftritt. Die dazu notwendigen Vorbereitungstätigkeiten werden in den ersten zwei Schichten erledigt. Typische Aufgaben des Anlagepersonals sind [155], [261], [232]:

- Manuelle Rüstvorgänge
 - Reinigen der Maschine
 - Spannbacken wechseln
 - Greiferbacken wechseln
 - Lünette montieren/demontieren
 - Rollkörner montieren
 - Werkzeughalter wechseln
- Manuelle Eingriffe während der Bearbeitung
 - Beseitigung von Störungen
 - Beenden programmierter Maschinenstillstände durch Erledigung der notwendigen Tätigkeit (z.B. Späne entfernen)
- Werkstückversorgung
 - Werkstückpaletten umrüsten/beladen/entladen
 - Werkstückpaletten extern lagern
 - extern gelagerte Werkstückpaletten ins System bringen
 - Schwerteile ins Spannfutter laden/entladen
- Werkzeugversorgung
 - Werkzeuge montieren und vermessen
 - Werkzeugpaletten beladen/entladen
 - Werkzeuge reinigen und lagern
- Rüstelementeversorgung
 - Rüstelemente aus den Lagern entnehmen und zur Maschine transportieren
 - Abtransport und Lagerung nicht mehr benötigter Rüstelemente
- Fertigungsmittel vorbereiten
 - Ausdrehen weicher Spannbacken
 - Eichen von Meßtastern

2.10 Leitstandpersonal

Die Tätigkeit am Leitstand läßt dem Personal mehr Freiheit und Kreativität als jene in der Fertigungsanlage. Die größere Verantwortung kommt daher dem Personal am Fertigungsleitstand zu.

Das Leitstandpersonal ist vor allem mit dem Planen der organisatorischen Prozeßführung beschäftigt. Die Tätigkeit ist weitgehend von der Produktion entkoppelt, eine Kumulation der Arbeitsleistung ist möglich. Bei guter Unterstützung durch die Leitrechner-Software ist ein Bediener nur teilweise ausgelastet und kann Vorleistungen erbringen, die seine Abwesenheit während einer mannarmen Schicht zulassen.

Die Arbeitsinhalte am Leitstand sind [155], [261], [232]:

- **Auftragsversorgung**
Ist keine automatische Übernahme der Fertigungsaufträge vom übergeordneten PPS-Rechner möglich, sind diese am Leitrechner zu erfassen. Für die neuen Aufträge ist zu prüfen, ob alle dafür benötigten Fertigungsmittel und Informationen zur Verfügung stehen. Bei Bedarf sind fehlende Mittel zu organisieren. Falls die Durchführbarkeitsprüfung erfolgreich ist, wird der Auftrag freigegeben und kann von der Maschinenbelegungsplanung berücksichtigt werden.
- **Planung der Maschinenbelegung**
Die Planung der Maschinenbelegung kann vom Leitrechner weitgehend automatisch durchgeführt werden. Der Bediener hat jedoch die Möglichkeit, die Rahmenbedingungen durch entsprechende Parameter vorzugeben, korrigierend einzugreifen bzw. einen Belegungsplan auch manuell zu erstellen.
- **Pflege der technologie- und fertigungsmittelbezogenen Daten**
Um ein einwandfreies Funktionieren des FFS zu gewährleisten, sind diese Daten immer auf dem neuesten Stand zu halten.
- **Erstellen von Analysen und Statistiken**
Durch entsprechende Funktionen der Leitrechner-Software läßt sich die Leistung (Verfügbarkeit, Produktivität, Termintreue usw.) des FFS analysieren. Der Bediener hat dafür die entsprechenden Parameter vorzugeben und die Ergebnisse zu interpretieren. Bei entsprechender Erfahrung kann er aufgrund der Ergebnisse die Systemparameter optimieren (z.B. Nachbestellung kritischer Fertigungsmittel).
- **Überwachung des Systemzustandes**
Dem Bediener am Leitstand wird durch entsprechende Hilfsmittel die Möglichkeit gegeben, einen Überblick über den Zustand der Fertigungsanlage zu erhalten. Hier wird vor allem die graphische Darstellung des Anlagezustandes, die ein schnelles Erkennen von Problemen ermöglicht, eingesetzt.
- **Systembetreuung des Leitrechners**
Hier ist die Betriebssystem-Software und die Leitsoftware zu betreuen. Dazu gehören unter anderem Tätigkeiten wie Starten des Leitrechners, Beenden der Leitrechner-Software, Abschalten des Rechners, Feierabendschaltung, Datensicherung, Einspielen neuer Softwareversionen sowie das Überwachen des Leitrechners.

Richtlinien für das Anlagepersonal

Um zu gewährleisten, daß ein FFS mit größtmöglicher Effizienz arbeitet, muß man es so organisieren und führen, daß die Summe an verlorenen Maschinenzeiten möglichst klein bleibt. Dieses Ziel läßt sich durch die Beachtung folgender Regel erreichen [155]:

- Organisatorische Stillstände
Maschinen sollen nicht zu organisatorischen Stillständen kommen. Jeder einzelnen Maschine im System muß ungestörte Arbeit ermöglicht werden. In dem Sinne ist es notwendig, jeder Maschine NC-Programme, Werkstücke, Werkzeuge, andere Fertigungsmittel und Bearbeitungsanweisungen rechtzeitig zur Verfügung zu stellen.
- Umrüstzeiten
Umrüstzeiten der Maschinen sollen möglichst kurz sein und sollen daher ohne Verzögerung begonnen werden. Alle benötigten Betriebsmittel müssen rechtzeitig vorbereitet sein.
- Maschinenstillstände
Im Falle von Maschinenstillständen müssen diese so schnell wie möglich beseitigt und die Maschinen wieder in Betrieb gesetzt werden.

Daraus ergeben sich einige Strategien für das Verhalten des Anlagepersonals bei gewissen Eingriffen, die im Kernsystem durchgeführt werden müssen (wie z.B. Messen, Korrekturangaben, Störungen beheben, usw.). Solche Eingriffe werden dem Anlagepersonal durch ein optisches und/oder akustisches Signal auf der betreffenden Maschine bekanntgegeben.

Die Richtlinien bei einem Maschinenruf sehen in syntaktischer Form folgendermaßen aus [155], [232]:

- Der erste freie Bediener soll diesen Auftrag übernehmen und ihn ohne Verzögerung durchführen.
- Falls kein Bediener frei ist, soll der erste Bediener, der nicht an einer Maschine arbeitet, seine Tätigkeit unterbrechen und diese Aufgabe übernehmen.
- Falls alle Bediener mit Aufgaben an Maschinen beschäftigt sind, soll derjenige Bediener reagieren, der am längsten mit seiner aktuellen Tätigkeit beschäftigt wäre.
- Falls die schon begonnene Tätigkeit an einer Maschine länger dauern würde als die an der Maschine, die gerade „ruft“, muß der Bediener seine aktuelle Tätigkeit unterbrechen und den Auftrag der Maschine sofort übernehmen. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, bleibt der Bediener bei seiner aktuellen Tätigkeit.
- Wenn ein Bediener seine aktuelle Tätigkeit an einer Maschine beendet, muß er von den wartenden Aufgaben diejenige auswählen, die in kürzester Zeit die Maschine wieder in den Arbeitszustand versetzt.

Wenn es keine wartenden bzw. unterbrochenen Tätigkeiten an den Maschinen mehr gibt, muß der Bediener die vorher unterbrochene Tätigkeit wieder aufnehmen. Gibt es keinerlei Tätigkeiten, ist der Bediener bis zur Vergabe des nächsten Bedienerauftrages frei.

2.11 Verwaltung von Fertigungsmitteln und Bedienerzeiten

Das System verfügt über eine begrenzte Menge von Fertigungsmitteln. Es handelt sich hier um ein äußerst komplexes System, das sehr viele einander bedingende Engpässe aufweisen kann. Aus diesem Grund werden die Fertigungsmittel auf der Ebene des gesamten Systems verwaltet [155].

Engpaß bedeutet, daß Fertigungsmittel die limitierenden Faktoren bei der Durchführung eines Arbeitsganges darstellen. Engpässe treten bei Maschinen, Werkzeugen, Betriebsmitteln, Paletten, Bedienerzeiten usw. auf. Diese Vielfalt von Engpässen bedingt, daß die Abarbeitung der Aufträge so organisiert werden muß, daß diese Engpässe auf die Effizienz des Systems einen möglichst geringen Einfluß haben. Die ganze Organisation muß sich darauf konzentrieren, mit diesen begrenzten Mitteln das System zu fahren.

Man muß eine Bearbeitungsmaschine für jeden Arbeitsgang umrüsten, dafür sind Fertigungsmittel und ein Bediener erforderlich. Um den Umrüstvorgang ohne Verzögerung durchführen zu können, müssen rechtzeitig Vorbereitungen getroffen werden. Art und Umfang dieser Vorbereitungen hängen von der benötigten und der bereits vorhandenen Ausrüstung der Maschine ab. Daraus folgt, daß die Entscheidung, auf welcher Maschine und zu welchem Zeitpunkt der Arbeitsgang durchgeführt wird, zeitgerecht und somit relativ früh vor Beginn des Arbeitsganges getroffen werden muß. Zu bestimmten Zeitpunkten müssen die Fertigungsmittel einer Maschine zugeordnet werden und verbleiben dort eine gewisse Zeit. Während sie sich auf der Maschine befinden, sind sie für andere Maschinen nicht verfügbar.

Aus diesen Zusammenhängen ist zu ersehen, daß die Maschinen nicht unabhängig voneinander arbeiten, sondern einander über komplexe Zusammenhänge beeinflussen. Somit können sich die Schwierigkeiten auf einer Maschine zu einem späteren Zeitpunkt mehrfach auch auf alle anderen Maschinen auswirken.

2.12 Ablaufsequenz von Arbeitsgängen

Bei der Arbeit einer Bearbeitungsmaschine wiederholen sich rhythmisch zwei Vorgänge: Umrüsten der Maschine und Bearbeiten der Werkstücke des gesamten. Die kritischen Zeiten können nur durch Reduzierung der Umrüstvorgänge an den Maschinen optimiert werden, denn die Bearbeitungszeiten können bei der Steuerung nicht mehr beeinflusst werden. Ausmaß, Zeit und Mittel der Umrüstvorgänge sind abhängig von der Bearbeitungsreihenfolge der verschiedenen Werkstücke.

Der Ablauf eines Arbeitsganges an einem Los auf einer Maschine verlangt einen synchronisierten Betriebsmittel-, Werkzeug- und Werkstückfluß. Jeder Fluß muß gewährleisten, daß die Mittel zur rechten Zeit und über einen bestimmten Zeitraum der Maschine zur Verfügung stehen. Die Betriebsmittel müssen spätestens zu Beginn des Umrüstens der Maschine für einen Arbeitsgang zur Verfügung stehen. Sie verbleiben bis zum Ende des Umrüstens für den nachfolgenden Arbeitsgang an der Maschine.

Die Zulieferung der Werkzeuge muß spätestens zu Beginn des automatischen Aufrüstens der Maschine mit Werkzeugen erfolgen. Sie werden unmittelbar nach Beendigung der Bearbeitung automatisch abgerüstet und verlassen die Maschine.

Die Werkstücke kommen palettenweise zur Maschine. Die erste Palette muß spätestens bis zum Ende des automatischen Aufrüstens bei der Maschine sein. Jede weitere Palette muß bis zum Ende der Bearbeitung der vorherigen Palette bei der Maschine sein. Nach der Bearbeitung des letzten Werkstückes einer Palette verläßt die Palette die Maschine.

Weil die Zeitspanne für das automatische Auf- und Abrüsten der Maschine mit Werkzeugen im Vergleich zur Zeitdauer des gesamten Arbeitsganges sehr kurz ist, werden diese Tätigkeiten der Bearbeitungszeit zugeordnet. So kann man - einfach ausgedrückt - sagen, daß die ersten Werkzeuge und die ersten Werkstücke gleichzeitig zur Maschine geliefert werden müssen. Ebenso werden mit der Fertigstellung des letzten Werkstückes auch die Werkzeuge frei.

In Abb.2.8 ist eine Serie von Arbeitsgängen auf einer Bearbeitungsmaschine dargestellt. Die Abkürzungen bedeuten folgendes:

- WS(i) Vorbereitungstätigkeit an der ersten Werkstückpalette des Werkstückflusses für die Abarbeitung des i -ten Arbeitsganges
- WZ(i) Vorbereitungstätigkeit an der ersten Werkzeugpalette des Werkzeugflusses für die Abarbeitung des i -ten Arbeitsganges
- BM(i) Betriebsmittelvorbereitung für den i -ten Maschinenauftrag
- U(i) Umrüsten der Maschine für den i -ten Maschinenauftrag
- B(i) Bearbeitung des i -ten Maschinenauftrag
- bm(i) Wegräumen der Betriebsmittel nach der Bearbeitung des i -ten Maschinenauftrags und Umrüsten der Maschine für den $(i+1)$ -ten Arbeitsgang
- wz(i) Wegräumen der Werkzeuge von der letzten Werkzeugpalette des Werkzeugflusses nach der Abarbeitung des i -ten Arbeitsganges
- ws(i) Wegräumen bearbeiteter Werkstücke von der letzten Werkstückpalette nach der Abarbeitung des i -ten Arbeitsganges

Um den i -ten Arbeitsgang zu erledigen, muß die Maschine umgerüstet werden U(i), danach erfolgt die Bearbeitung des i -ten Arbeitsganges B(i). Um das Umrüsten U(i) ohne Verzögerung zu gewährleisten, müssen die Betriebsmittel vorbereitet sein BM(i). Diese Vorbereitung BM(i) betrifft nur die Differenz zwischen den benötigten Betriebsmitteln und den bereits auf der Maschine befindlichen Betriebsmitteln bei der Bearbeitung des $(i-1)$ -ten Arbeitsganges. Nach dem Umrüsten der Maschine U(i) werden die nicht mehr benötigten Betriebsmittel abgeräumt und in das Betriebsmittellager gebracht bm(i-1). Spätestens bei Beendigung des Umrüstvorganges U(i) muß die schon vorbereitete Werkzeugpalette WZ(i) und die erste vorbereitete Werkstückpalette WS(i) zur Maschine geliefert werden. Nach Erfüllung dieser Bedingungen wird die Bearbeitung des i -ten Arbeitsganges B(i) begonnen. Nach der Bearbeitung des letzten Werkstückes des Arbeitsganges werden die Werkzeuge und die bearbeiteten Werkstücke abgeräumt wz(i), ws(i).

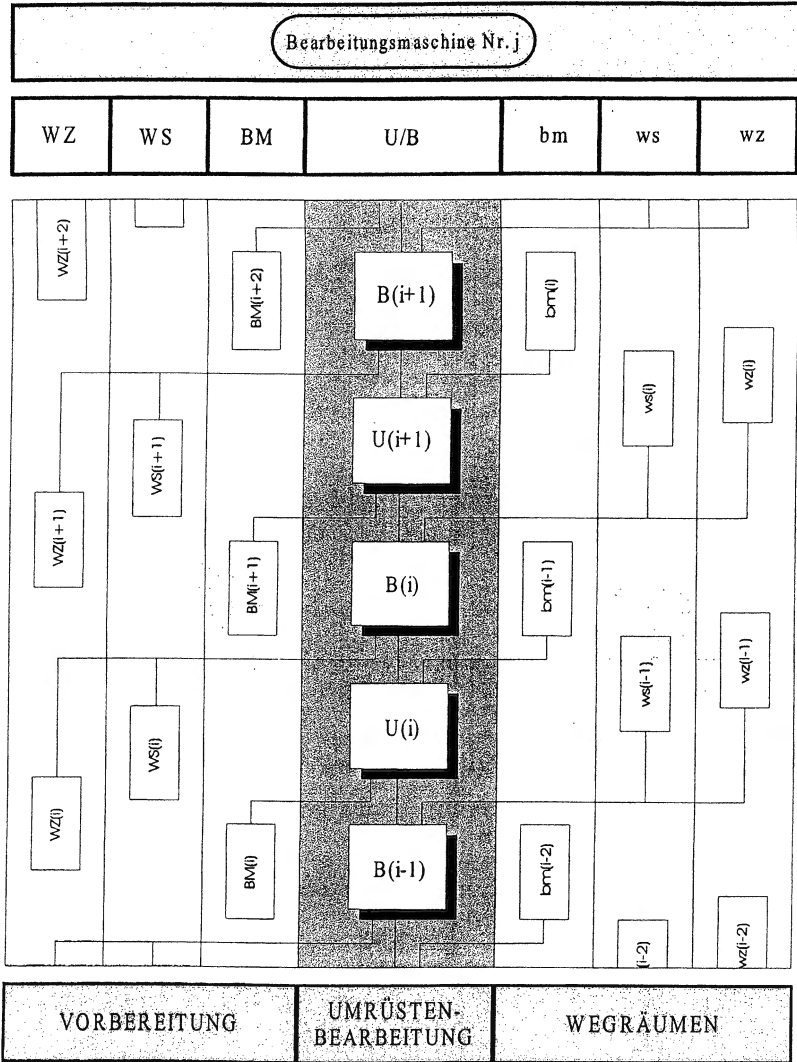


Abb.2.8 Ablaufsequenz einer Arbeitsgängeserie auf einer Maschine [155]

2.13 Übergeordnete Regeln

Die übergeordneten Regeln bestimmen die wichtigsten Funktionen des FFS. Man unterscheidet zwischen den Leitstrategien und der Unterstützung für ungestörte Arbeit der Bearbeitungsmaschinen.

1. Gruppe: Die Leitstrategien [155], beziehen sich auf das Verhalten des gesamten FFS und werden immer bevorzugt. Sie bestimmen welche Tätigkeiten gegenüber anderen Vorrang haben und damit wie sich das FFS verhalten muß:

1. Der Materialfluß in Richtung *peripheres System* -> *Kernsystem* hat Vorrang gegenüber dem Materialfluß *Kernsystem* -> *peripheres System*, dadurch erhält die Versorgung der Maschinen höchste Priorität.
2. Vorrang haben diejenigen Aufgaben, die den Maschinenstillstand unmittelbar bzw. in kürzester Zeit beenden, auch wenn andere Aufgaben deshalb unterbrochen werden müssen. Bei gleichwertigen Aufgaben haben kürzer dauernde Vorrang.
3. An Bedeutung gewinnt die Optimierung der Reihenfolge der Aufträge unter Berücksichtigung der externen Bedingungen, des Systemzustandes und des Zustandes der Umgebung.

2. Gruppe: Die weiteren Regeln bestimmen, welche Prioritäten an einzelne Tätigkeiten des FFS zugeteilt sind, um die Störungsfaktoren wie Verzögerungen, Ausfälle usw. möglichst niedrig halten zu können. Diese Regeln kommen erst nach den Leitstrategien zur Geltung. Prinzipiell muß jeder Maschine im System ungestörte Arbeit ermöglicht werden:

1. Die NC-Programme, Werkstücke, Werkzeuge, andere Fertigungsmittel und Bearbeitungsanweisungen müssen jeder Maschine rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden.
2. Die Umrüstvorgänge der Maschinen sollen ohne Verzögerung begonnen werden und alle benötigten Betriebsmittel müssen rechtzeitig vorbereitet sein.
3. Im Falle von Maschinenstillständen müssen diese so schnell wie möglich beseitigt und die Maschinen wieder in den Arbeitszustand versetzt werden.

2.14 Allgemeine Methoden zur Unterstützung der PPS

Es gibt eine Reihe von Methoden, die sich in der Praxis bewährt haben. Drei davon werden hier vorgestellt.

2.14.1 Expertensysteme

Die Beschränkungen der Planung in FFS versucht man durch den Übergang zu intelligenten Planungsmethoden zu eliminieren. Diese Planungsmethoden bieten neue

Möglichkeiten zur effizienteren Lösung dieser Probleme [232]. Eine dieser Methoden stellen Expertensysteme dar.

Die Definition des Expertensystems [258]:

Expertensysteme sind Programme, mit denen das Spezialwissen und die Schlußfolgerungsfähigkeit qualifizierter Fachleute auf eng begrenzten Aufgabengebieten nachgebildet werden soll. Dabei gehen wir vorläufig von der Vorstellung aus, daß Experten ihre Problemlösungen aus Einzelkenntnissen zusammensetzen, die sie selektieren und in passender Anordnung verwenden.

Das Gebiet der Expertensysteme ist die Lösungssuche bei nur teilweise festgelegten Situationen. Zur Lösung solcher Probleme benützen sie normalerweise eine Kombination formaler Methoden und verwenden semantische Informationen, die Auskunft über die Zustände nach der Lösung der nächsten Konfliktsituation geben [232]. Die Planung und die Steuerung von FFS fällt in diese Problemklasse.

Den Anteil der PPS-Anbieter, die innerhalb ihrer Software die Expertensystem-Technologie nutzen, zeigt Abb. 2.10.

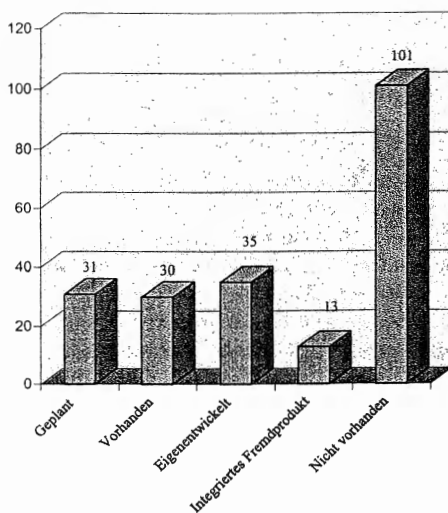


Abb. 2.10 Einsatz von Expertensystemen in PPS-Systemen [83]

2.14.2 Simulation

Die Simulation stellt sowohl für die lang- und mittelfristige Planung auf der Ebene des PPS-Systems als auch für die kurzfristige Ablaufsteuerung ein wesentliches Planungsmittel dar. Durch simulationbasierte Einplanung im PPS-System kann so z.B. ein auf die verfügbaren Kapazitäten optimal abgestimmtes Produktionsprogramm bestimmt oder mit Hilfe elektronischer Leitstände eine Optimierung des Belegungsplanes von Maschinen und

Arbeitsplätzen durchgeführt werden [315]. In knapp 80% von PPS-Systemen wird die Simulation eingesetzt (Abb. 2.11).

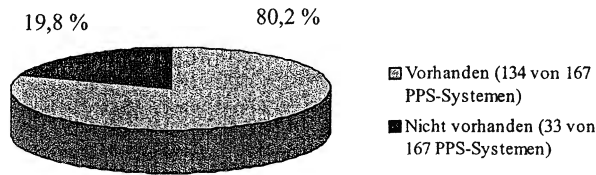


Abb. 2.11 Simulation in PPS-Systemen [83]

Die simulationsbasierten (SB) Softwaresysteme für Feinkapazitätsplanung eignen sich besonders für die Lösung der Probleme in der Ablaufsteuerung. Ein entsprechend konfiguriertes und mit anderen Softwaresystemen gekoppeltes SB-System ermöglicht dem Operator, alle oder nur einige ausgewählte Aufträge, die schon eingeplant wurden und auf die Abarbeitung warten, mittels eines Modells des FFS schnell umzuplanen. Aufgrund einiger Solcherart generierter Ablaufszenarien kann der Operator eines davon auswählen und einplanen. Der neue Arbeitsplan muß keinen optimierten Plan darstellen. Er versichert nur, daß die Fertigung mit möglichst kleiner Wartezeit weiterlaufen kann. Dadurch gewinnt man Zeit, um eventuell einen detaillierten Optimierungsvorgang für die restlichen Aufträge durchzuführen.

2.14.3 Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien

Die Evolutionsstrategien basieren auf einem Modell der Evolution, das in den 60er Jahren von Ingo Rechenberg an der Technischen Universität in Berlin entwickelt wurde. Mit seinem Buch *Evolutionsstrategie* gründete er die neue eigenständige Fachrichtung: Evolutionsstrategien. Die verschiedenen Evolutionsstrategien stellen unterschiedliche Stufen der Imitation der biologischen Evolution dar [283].

John Holland, Gründer der Fachrichtung der genetischen Algorithmen begann praktisch zeitgleich, aber völlig unabhängig von Ingo Rechenberg, ab Mitte der 60er Jahre mit der Simulation und dem theoretischen Unterbau der Evolution [283], [116]. Er interessierte sich vor allem für die informationstheoretischen Aspekte der Evolution. Im Vordergrund stand bei ihm folgendes Problem: „Wie können durch genetische Mechanismen Informationen gewonnen, verarbeitet, ausgewertet, zerstört und von Generation zu Generation ohne größere Fehler weitergereicht werden“.

Beide Ansätze eignen sich besonders für die kombinatorische und optimierungsorientierte Probleme [221], die bei der Auftragsauswahl und Maschinenbelegung im Vordergrund stehen.

3. OPTIMIERUNG DER FFS-ABLÄUFE

Moderne FFS sind komplexe Anlagen, die für ihre effiziente Arbeit umfassende und intelligente Produktionsplanung und -steuerung benötigen. Effizientes Funktionieren dieser Anlagen bedeutet, daß ein Maximum an Werkstücken, in vorgegebener Zeit, unter Berücksichtigung aller Systemengpässe und der Verfügbarkeit aller Ressourcen, bearbeitet wird.

Die Bearbeitung eines breiten Teilespektrums benötigt eine Reihe unterschiedlicher Fertigungsmittel. Aus wirtschaftlichen Gründen soll die Anzahl der gleichartigen Fertigungsmittel so gering wie möglich gehalten werden, ohne die Funktionsfähigkeit des FFS zu beeinträchtigen. Die Ausstattung des FFS mit Ressourcen soll eine zufriedenstellende Wirtschaftlichkeit des FFS gewährleisten. Die Verringerung des Einsatzes von Fertigungsmittel verursacht eine Steigerung des Planungsaufwandes bei der Realisation dieses Zieles. Um sich einem Optimum annähern zu können und während der Produktion auch nahe zu bleiben, wird in der Produktionsplanung die Optimierung der Produktionsabläufe eine wichtige Rolle spielen.

Das Ziel dieser Optimierung ist es, jede Maschine des FFS laufend mit Aufträgen zu versorgen, sodaß sie nicht zum Stillstand kommt. Es wird versucht Parallelabläufe von Aufträgen, die gemeinsam mehr Fertigungsmittel benötigen als zur Verfügung stehen, zu vermeiden. Die Fertigungsmittel werden an die Maschine aus einer zentralen Stelle zugeteilt. Unmittelbar nach dem Beenden der Bearbeitung werden diese Fertigungsmittel wieder auf die zentrale Stelle gebracht. Aus diesem Grund bekam die Betreuung der Fertigungsmittel eine der höchsten Prioritäten im FFS. Die Optimierung fordert den Einsatz von intelligenten Methoden.

Die Intelligenz der Produktionsplanung und -steuerung kann man durch softwaremäßige Änderungen am Leitstand beeinflussen. Diese Änderungen beziehen Erfahrungen aus der Vergangenheit mit ein, um die Qualität der Entscheidungen zu verbessern. Diese Erfahrungen sind als logische und schöpferische Entscheidungen des Personals zu verstehen. In

Tab.3.1 sind typische Produktionstätigkeiten des FFS vier Vorgangsweisen (direkte Datenübernahme, formale Berechnungen, logische Entscheidungen und schöpferische Überlegungen) zugeordnet.

	Direkte Datenübernahme	Formale Berechnungen	Logische Entscheidungen	Schöpferische Überlegungen
Auftragsversorgung	■			
Pflege der technologischen Daten			■	
Erstellen von Analysen und Statistiken		■		
Überwachung des Systemzustandes			■	
Systembetreuung			■	
Auftragsauswahl				■
Auswahl der Auftragsauswahlkriterien				■
Maschinenauswahl			■	
Auswahl der Palette			■	
Auswahl der Werkzeuge			■	
Bearbeitungsfolge festlegen				■
Festlegung der Rüstzeiten		■		
Festlegung der Haupt-/Nebenzeiten		■		
Zuordnung des Bedienungspersonal				■
Auftragsdaten aus der Stückliste	■			
Bestimmung der Wege der Transportroboter				■

Tab.3.1 Vergleich der Möglichkeiten des Lösungsverhaltens beim Verplanen von Aufträgen

Die Optimierung der Maschinenbelegung ist aus diesem Grund zur Zeit als Schwerpunkt bei der Entwicklung von flexiblen Fertigungssystemen zu erkennen.

3.1 Der Maschinenbelegungsplan

Im Maschinenbelegungsplan (MBP) ist für die folgende Fertigungsperiode festgelegt wann welcher Teilauftrag auf welcher Maschine gefertigt wird. Aufgrund der Vorgaben des

Maschinenbelegungsplanes (MBP) steuert die Abalaufsteuerung (AST) den Fertigungsverlauf. Der gesamte Materialfluß im Fertigungssystem wird auf dieser Basis koordiniert. Aus den Vorgaben des MBP, wann welcher Fertigungsauftrag wie zu fertigen ist, lassen sich neben den Werkstücktransporten auch die erforderlichen Betriebsmittel und Werkzeuge zuordnen.

Im MBP wird auch angegeben, ob einander ersetzende Maschinen für die Bearbeitung zulässig sind. Entsprechend den zur Verfügung stehenden Varianten kann dann die AST abhängig vom jeweiligen Systemzustand eine optimale Auftragsverteilung durchführen.

Im MBP sind nur die Fertigungsschritte mit den zugehörigen vorgesehenen Durchführungsarten aufgeführt, nicht aber die diversen Transportschritte, die mit diesen Fertigungsbereichsaufträgen (FAT) verbunden sind.

Die erforderlichen Transportaufträge, die zur Abwicklung des zellenexternen Materialflusses benötigt werden, werden bei Bedarf aktuell von der AST generiert. Aus dem MBP entnimmt die AST, welche Aktionen beispielsweise bei der Fertigung eines FAT durchzuführen sind. Entsprechend der Verfügbarkeit der Station, an der der Folgeschritt durchgeführt werden soll generiert sie die entsprechenden Transportaufträge und weist sie dem dafür geeigneten FBR-Transport zur Abwicklung zu. Dies hat den Vorteil, daß entsprechend dem aktuellen Systemzustand eine unabhängige Steuerentscheidung von der AST getroffen werden kann. Sie kann somit bei Störungen oder unerwarteten Ereignissen im Rahmen der Vorgabevarianten eine optimale Neuzuteilung treffen, ohne durch bereits vorgegebene Transport-FAT's im MBP eingeengt zu werden. Nur so kann sie der Anforderung nachkommen flexibel reagieren zu können und nicht auf alle möglichen Störungen einzugehen. Falls die AST aber keine Möglichkeit besitzt, den Fertigungsablauf zu beeinflussen, muß nach jeder aufgetretenen Störung oder Verzögerung ein neuer Ablaufplan durchlaufen generiert werden. Auf diese Art und Weise ist es machbar der AST die Aufgabe zu übertragen innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite zu steuern bis schließlich die auftretenden Störungen ein vordefiniertes Maß überschreiten. Dann muß ein neuer Feinplanungsablauf durchgeführt werden, um einen neuen Maschinenbelegungsplan zu erstellen, damit weiterhin ein effizienter Fertigungsablauf sichergestellt wird.

3.2 Erstellen des Maschinenbelegungsplanes

Aufbauend auf den Kundenaufträgen und den zu den Produkten gehörenden Arbeitsplänen werden von einem Grobplanungssystem, z.B. einem PPS-Modul, die unterschiedlichen hierfür erforderlichen Werkstattaufträge mit den einzelnen Fertigungsschritten ermittelt. Diese groben Produktionsvorgaben werden von einem Feinplanungsmodul detailliert. Aufgabe der Feinplanung ist es dabei, für die zu fertigenden Aufträge einen optimalen Ablauf zu ermitteln. Neben einer genauen Berücksichtigung der vorhandenen Fertigungskapazitäten müssen dabei auch die Verfügbarkeit von Hilfsressourcen, wie Werkzeuge oder Vorrichtungen, gesichert werden.

Damit eine optimale Abstimmung auf die Belange des FFS erreicht wird, muß der Feinplanungsalgorithmus auf das Produktionssystem abgestimmt werden. Im Gegensatz zur AST, die applikationsneutral auslegt werden kann, muß das Modul der AFP somit, um

eine optimale Wirkung zu erzielen, anwenderspezifisch ausgelegt werden. Aus diesem Grunde ist in der Leitstandssteuerungsarchitektur eine klare Trennung der Funktionen des AST- und des AFP- Moduls definiert. Die AST- Funktionalitäten sorgen dabei nur für die Durchsetzung der Planungsvorgaben des MBP. In den Aufgabenbereich der AST fällt dabei auch die Behebung von Störungen im Produktionsverlauf bzw. die Umsteuerung von Fertigungsaufträgen innerhalb des FFS, sofern in den Fertigungsvorgaben diese Möglichkeit zugelassen ist.

Die AFP befindet sich bei der Erstellung des MBP in einem Dilemma. Eine Planung ist umso wirkungsvoller, je präziser die einzelnen zu planenden Bearbeitungsschritte festgelegt und aneinandergereiht werden und umso länger die betrachtete Planungsperiode ist. Wirkungsvoll bedeutet in diesem Zusammenhang Erhöhung der Systemgesamtausbringung. Je detaillierter und langfristiger sie aber ausgelegt ist, desto eher wird das Planungsergebnis durch aufgetretene Fertigungsstörungen hinfällig und desto eher muß wieder ein neuer Feinplanungslauf durchgeführt werden [33][294].

Vor diesem Hintergrund gibt es heute unterschiedliche Feinplanungsverfahren. Genauso unterschiedlich sind die möglichen Verzahnungen zwischen den Feinplanungs- und Ablaufsteuerungskomponenten eines Steuerungssystems [128].

Um die Feinplanung zu unterstützen, verfügt die AST über eine Zusatzfunktionalität. Innerhalb der Feinplanung braucht nur der Typ von Werkzeugen bzw. Hilfsmitteln auf Verfügbarkeit für einen speziellen FAT untersucht zu werden. Die AST lokalisiert sich selbständig, abhängig vom Systemzustand. Die erforderlichen Komponenten werden aus den zur Zeit verfügbaren Komponenten dieses Typs.

3.3 Durchsetzen des Maschinenbelegungsplanes

Das Durchsetzen des MBP ist die AST. Sie weist entsprechend den Vorgaben des MBP den unterschiedlichen FBR des Fertigungssystems die im Belegungsplan spezifizierten FATs zu, organisiert die hierfür erforderlichen Produktionshilfsmittel und koordiniert den zellenübergreifenden Materialfluß. Die AST koordiniert daraufhin die Versorgung des FBR. Bei der Auftragsverteilung werden Eil- und Transportaufträge vorrangig bearbeitet. Wenn bei der Abwicklung des MBP Störungen auftreten, versucht die AST sie durch besondere Eingreifemechanismen zu beheben. Wenn beispielsweise ein vorgesehener FBR ausfällt, versucht die AST den oder die betreffenden Aufträge auf andere FBR zu verteilen, sofern diese Alternativen von der AFP zugelassen wurden. Falls dies nicht möglich ist zieht die AST andere verfügbare FAT's vor, bis die Störung behoben ist und die ursprünglich geplanten Aufträge bearbeitet werden können.

3.4 Planungshorizont

Der Planung muß immer der Ablauf folgen. Dies kann auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden. Den Zeitpunkt, in dem es zum Starten der Maschinenbelegung kommt, bezeichnet man als P_{start} ; einen Planungshorizont bezeichnet man als P_{horizont} . Zwischen diesen zwei Zeitpunkten befindet sich eine Planungsperiode.

Der Planungshorizont stellt den Abstand fest, mit welchem man mit dem Planen von Aufträgen anfangen muß, um zum Zeitpunkt der Bearbeitung alles vorbereitet zu haben. Man kann sich entweder auf die Anzahl der einzuplanenden Aufträge oder auf eine zeitliche Abgrenzung konzentrieren:

1. Die Anzahl der einzuplanenden Aufträge: Für jede Systemkomponente wurde eine Anzahl der Aufträge vorgeschrieben.
2. Zeitliche Abgrenzung: Kann entweder als ein fixer oder ein variabler Zeitpunkt der Vorplanung gesehen werden.
 1. Fixer Zeitpunkt weist auf eine festgestellte Zeitgrenze hin, zu welcher die Aufträge vorgeplant werden müssen.
 2. Variabler Zeitpunkt beschreibt einen Zeitabstand bei der Planung, mit welchem die Planung dem Ablauf vorauslaufen muß.

3.5 Aufbau der Warteschlangen

Eine der wichtigsten Tätigkeiten der FFS-Planung (FFS-Leitstandssoftware) ist der Aufbau der Warteschlangen. Die Warteschlangen in FFS lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. Die Reihenfolge der Maschinenaufträge für jede einzelne Maschine innerhalb einer Planungsperiode. Für diese Verteilung sorgt die Maschinenbelegungsplanung.
2. Die Reihenfolge der Aufgaben für gemeinsam genutzte Systemkomponenten des FFS. Für diese Verteilung sorgt die Ablaufplanung. Den Systemkomponenten nach lassen sich die Warteschlangen in weitere drei Gruppen unterteilen:
 1. Die Reihenfolge aller Aufgaben zur Werkstückvorbereitung und -beladung auf passende Werkstückpaletten.
 2. Die Reihenfolge der Vorbereitung, Messung und Beladung der Werkzeuge auf Werkzeugpaletten.
 3. Die Reihenfolge der Vorbereitung der Betriebsmittel.

Für die Gesamteffizienz des FFS sind die Warteschlangen der ersten Gruppe wichtig. Aus diesem Grund wird die Maschinenbelegung im folgenden Kapitel detailliert ausgearbeitet.

3.6 Festlegen der Reihenfolge von Arbeitsgängen

Die optimale Planung eines Fertigungssystems war immer eine Herausforderung für einen Fertigungsingenieur. Mit der zunehmenden Komplexität der Fertigungssysteme ist diese Aufgabe heutzutage noch vielfältiger und komplizierter geworden als je zuvor. Außerdem hat die Anzahl der möglichen Wechselbeziehungen zugenommen. Bei allen Fertigungsvorgängen stellt sich die Aufgabe, die Reihenfolge der Arbeitsgänge festzulegen. Beispielsweise müssen Teilfamilien im Verlauf der Fertigung eine Folge von Bearbeitungsschritten durchlaufen, bevor sie fertiggestellt werden.

Mit dem Festlegen der Fertigungsreihenfolge wird das Durchlaufen der Aktivitäten für die Erstellung des Produkts bestimmt. Die Route bezeichnet einen speziellen Weg des Produktes durch eine Fertigungsanlage, der beim Durchlaufen der verschiedenen Prozesse zu befolgen ist.

Die Aufgabe der Festlegung der Reihenfolge kann grob in zwei Klassen unterteilt werden: 1) in eine statische bzw. deterministische Reihenfolgeplanung und 2.), in eine dynamische bzw. stochastische Reihenfolgeplanung. Das Reihenfolgeproblem läßt sich nach der Art des Fertigungsbedarfs weiter klassifizieren [64], zum Beispiel als Zufuhr von Teilen für das Fertigungssystem. Diese Zufuhren werden entweder als deterministische oder als stochastische Aktivitäten aufgefaßt. Jede Art von Zufuhrprozeß wird dann anhand der Anzahl der benötigten Maschinen klassifiziert (Einstufenprozeß im Vergleich zu einem Mehrstufenprozeß).

Auf der nächsten Klassifizierungsebene erfolgt eine Einteilung nach den Merkmalen der Auftragsbearbeitung und zum Schluß nach der Art der Rüst- und Bearbeitungszeiten (d.h. abhängige bzw. unabhängige Rüst- und Bearbeitungszeiten). Natürlich ließe sich dieses Klassifizierungsschema noch weiter verfeinern. So ist es zum Beispiel möglich, daß bei der Rüstzeit Abhängigkeitsbeziehungen auftreten, bei gleichzeitiger Unabhängigkeit von der Bearbeitungszeit und umgekehrt. Wie dem auch sei, es geht darum, die zentrale Bedeutung der Reihenfolgeproblematik zu unterstreichen.

3.6.1 Aufgabenbestimmung

Das Festlegen der Fertigungsreihenfolge beinhaltet den Ablauf von Fertigungsoperationen, die an einer Produktfamilie (bzw. an Produkten) ausgeführt werden.

Das Reihenfolgeproblem läßt sich am besten anhand der folgenden charakteristischen Eigenschaften eines Fertigungssystems umreißen [236]:

1. Es gibt N Produkte und M Prozesse.
2. Einige der Produkte können weniger als M Prozesse durchlaufen.
3. Jeder für ein Produkt erforderliche Prozeß ist möglicherweise für ein anderes Produkt ebenfalls erforderlich.
4. Bei jedem Bearbeitungsschritt wird ein gewisser Prozentsatz an Ausschuß erzeugt.
5. Bei der Anlage, auf die sich das Reihenfolgeproblem bezieht, handelt es sich um eine bereits bestehende Anlage.
6. Für jedes Produkt besteht täglich Bedarf.

7. Die Bearbeitungszeit für jeden Arbeitsgang ist eine Funktion von vorhergegangenen Arbeitsgängen.
8. Die Rüstzeit ist eine Funktion, die erstens von den zuvor bearbeiteten Produkten und zweitens von den vorhergegangenen Arbeitsgängen abhängt.
9. Es wird angenommen, daß die Zeit für den Transport zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten vernachlässigt werden kann.
10. Alle Produkte eignen sich für eine losweise Fertigung.

3.6.2 Annahmen

Bei den hier behandelten Problemen werden bestimmte grundlegende Annahmen gemacht:

1. Die technische Reihenfolge aller Produkte, durch alle Prozesse hindurch, ist im voraus bekannt [120].
2. Die technische Reihenfolge kann für jedes Produkt verschieden sein.
3. Die Bearbeitungszeiten und die Rüstzeiten sind für jede Maschine und für jedes Produkt charakteristisch und bekannt, wobei ein Wissen über Vorrangbeziehungen vorausgesetzt wird.
4. Die Unterberechnung von Aufträgen ist nicht zulässig. Dies bedeutet, daß ein einmal auf einer bestimmten Maschine begonnener Auftrag nicht unterbrochen werden darf, um einen anderen Auftrag auszuführen. Erst nach Beendigung des begonnenen Auftrags ist die Bearbeitung eines anderen Auftrags möglich.
5. Das Ziel der Planung kann entweder die Minimierung des gesamten Zeitaufwandes, von Beginn des ersten Auftrags bis zum Ende des letzten Auftrags, bzw. die Minimierung der gesamten Produktionskosten sein.
6. Alle Aufträge sind gleich wichtig [127].
7. Alle Aufträge werden so bald wie möglich erledigt.
8. Alle N Aufträge stehen zur selben Zeit und zu Beginn jedes Planungszeitraums zur Verfügung.
9. Alle M Maschinen sind zu Beginn des Planungszeitraums verfügbar und stehen für die Bearbeitung jedes der N Aufträge bereit.
10. Auf einer Maschine kann zur gleichen Zeit nur ein Los bearbeitet werden.
11. Fertigungsbestände sind zugelassen.
12. Die auf einer beliebigen Maschine verfügbare Zeit kann für anderweitige, nützliche bzw. gewinnbringende Arbeiten eingesetzt werden [127].

Das Ziel ist die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Festlegung der Arbeitsgangreihenfolge für den Entscheidungsprozeß, das sowohl die Besonderheiten eines Problems als auch die oben genannten Annahmen beinhalten kann.

Damit man dieses Ziel erreicht, müssen bestimmte Steuerungsvariablen angegeben werden. Diese Steuerungsvariablen lassen sich modifizieren (bzw. lockern), um verschiedene Modelle mit möglichen, unterschiedlichen Randbedingungen zu erstellen. Sie bezeichnen auch die Art eines Produkts und dessen Transport im System. Die Dauer der im System zugebrachten Zeit und der Fertigungsausstoß des Systems sind eine Funktion dieser Steuerungsvariablen; gleichfalls ist das Erreichen der Operationsziele eine solche Funktion.

Es lassen sich die folgenden spezifischen Steuerungsvariablen erkennen:

3.6.3 Reihenfolge

Der Produktzustand im Modell wird von der Reihenfolge der durchzuführenden Bearbeitungsschritte bestimmt. Dies gilt allgemein für Aufgaben zur Festlegung der Reihenfolge. Oft jedoch sind einige andere Parameter ebenfalls Funktionen des Produktzustandes. Es handelt sich um die folgenden Parameter:

- **Bearbeitungszeit**

Die Bearbeitungszeit einer gegebenen Maschine bzw. eines gegebenen Prozesses ist nicht konstant; vielmehr ändert sie sich, je nach Fertigungszustand eines Produkts.

- **Rüstzeit**

Die Rüstzeit ist ebenfalls eine Funktion des momentanen Zustandes, in dem sich das Produkt befindet, wenn es bei der betreffenden Maschine ankommt.

Lösgröße

Die Menge an Produkten, die zwischen zwei Fertigungsschritten transportiert wird, hängt vom Produktzustand ab. Dies bedeutet, das das Auffüllen von Produkten zwischen den einzelnen Stufen, um fehlerbehaftete Teile zu ersetzen, nicht erlaubt ist.

Anzahl der Maschinen

Die Anzahl der Maschinen, die in einer bestimmten Bearbeitungsstation erforderlich ist, kann vom Produktzustand, sowie von der für jedes Produkt gewählten Losgröße abhängen. Die wichtigste Aufgabe liegt im Herausfinden welche innere Beziehung diese Steuerungsvariablen haben und was deren Auswirkungen auf die Fertigungsplanung in bezug auf das Kostenminimum (bzw. Zeitminimum) sind. Die Algorithmen, die bei der Lösung eines Problems verwendet werden, berücksichtigen die Wechselwirkungen dieser Steuerungsvariablen zueinander. Bei der Entwicklung der Planungsverfahren verwendet man eine deterministische Planungsperspektive. Es ist nicht unmittelbar einsichtig, wie man die Sequenzierungsaufgabe abtrennen kann bzw. wie man den Einfluß von Entscheidungen zur Sequenzbildung auf andere Entscheidungen bzw. umgekehrt bestimmen kann [64]. Es ist sogar möglich, daß sich bei einer Fertigungsanlage keine Sequenzierungsmethode erkennen läßt, da sie von anderen Anteilen an den gesamten Produktionskosten (z.B. Rechnungskostenwesen, Lagerhaltung, Kapitalplanung, Auslastung sowie Entwicklung und Konstruktion) abgeschirmt werden, ohne eine starke Abhängigkeit zu zeigen.

Die Wahl eines Kriteriums zu einem systeminternen Leistungsmaßstab ist in der Tat eine erhebliche Vereinfachung. Dies schließt gewöhnlich die spezielle Betrachtung von einigen der in einem Betrieb auftretenden Schwierigkeiten automatisch aus. Einige der Faktoren, die das Sequenzierungsproblem beeinflussen oder davon beeinflusst werden, sind unten aufgelistet. Jeder von diesen Faktoren kann entweder maximiert oder minimiert werden, um eine optimale Lösung zu erhalten:

- *bezogen auf die Fabrik:* Leerlaufkapazität, Rüstkosten, Ausstoß, Materialhandhabungskosten, Reservekapazität, Ausnutzung, Kosten für die einzelnen Arbeitsgänge usw.
- *bezogen auf die Produkte:* prozeßinterne Lagerbestände, Liefertermine, Route, technische Anforderungen, Lagerbestand an Rohmaterial und Fertigteilen, Gesamtdurchlaufzeit, Alterungs- und Verderbverluste usw.

Diese Schwierigkeiten sind insbesondere für das Management von Bedeutung. Ein Fertigungssystem läßt sich so modellieren, daß das individuelle und das kollektive Optimum für jede mögliche Zielsetzung erreicht werden kann. Wollte man dies erreichen, würde dies bedeuten, für alle jeweils untersuchten Planungsprobleme bei Fabrikanlagen, Termin- und Ablaufplanungsprobleme sowie Steuerungsprobleme eine Lösung gefunden zu haben.

Sequenzierungsprobleme hängen von Faktoren innerhalb der Fabrik, als auch von den Eigenschaften eines Produkts ab. Das bedeutet, es ist wichtig die Sequenzierungsprobleme so zu modellieren, wie sie von diesen beiden Bereichen beeinflußt werden. Die Modellierung von Sequenzierungsproblemen, bei denen man die Fertigungskosten und das Minimum der verstrichenen Zeit als Kriterien benutzt, ist damit möglich.

3.6.4 Operative Beschränkungen

Bei der Lösung der Aufgabe, die Fertigungsreihenfolge festzulegen, sind eine Reihe von Randbedingungen zu beachten. Einige dieser Beschränkungen erschweren das Problem zusätzlich. Ein System läßt sich durch folgende Randbedingungen vereinfachen [236]:

1. Es existieren ausführbare Auftragsreihenfolgen (d.h. es wird in der Regel Vorrangbeschränkungen für einzelne Arbeitsgänge geben).
2. Die Anzahl der Produkte, die zwischen den einzelnen Bearbeitungsstufen gelagert werden können, ist begrenzt.
3. Für die Investitionskosten gelten bestimmte Obergrenzen.
4. Die Nachfrage ist bekannt.
5. Die Bearbeitungszeit in den Maschinen ist bekannt.
6. Es wird angenommen, daß die Maschinen in einer Arbeitsstation von gleicher Art sind.
7. Jede Arbeitsstation muß über mindestens eine Maschine verfügen.

Die Vorrangbeschränkungen für die einzelnen Prozesse eines jeden Produkts bestimmen viele andere Variablen des Systems. Die Variablen, wie etwa Bearbeitungszeit und Rüstzeit, hängen wiederum von der Reihenfolge der Produkte und der jeweiligen Bearbeitungsschritte ab.

Die Anzahl der Bearbeitungsschritte im System ist wichtig, da diese festlegt, ob es sich um einen Mehrstufen- oder Einstufenprozeß handelt. Notwendige, parallele Bearbeitungsschritte ergeben sich aus der Nachfrage, Abfolgeterminen und Lieferterminen.

Gruppierungen nach Produkttypen helfen beim Erstellen von Produkttrouten, die von den Vorratbeschränkungen für die Produkte und die Maschinen vorgegeben werden. Die Bearbeitungszeiten und die Rüstzeiten ergeben sich aus den Randbedingungen, die die Reihenfolge festlegen. Diese Zeiten sind für das Aufstellen von Optimierungskriterien für das jeweils betrachtete Problem wesentlich. Die von Station zu Station transportierten Losgrößen wirken sich auf andere Variablen im System aus. Außerdem können diese den

prozeßinternen Bestand beeinflussen. Nachfrage und Liefertermine sind erforderlich um realistische Kapazitätsanforderungen zu definieren.

3.6.5 Auswahl des optimalen Folgeauftrages

Eines der Ziele der Planung ist es, möglichst gut geeignete Folgeaufträge für die bereits bestehende Auftragswarteschlange (Abb. 3.1) zu ermitteln, wobei hier die zentrale Optimierungsfunktion der Planung zu sehen ist.

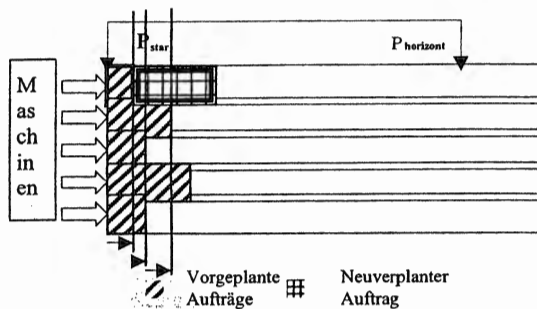


Abb.3.1 Ermitteln/Einplanen eines Folgeauftrages

Ein gut geeigneter Folgeauftrag ist jener, der bestimmten systembedingten Kriterien entspricht. [155] nennt nachfolgende drei Grundkriterien nach absteigender Wichtigkeit. Beim Ermitteln von neuen Aufträgen werden immer jene Aufträge aus dem Gesamtvorrat untersucht, die die höchste Priorität aufweisen.

3.6.6 Auftragspriorität

Die Auftragspriorität wird von der obersten Leitung des FFS, von der übergeordneten Produktionsplanung, bestimmt. Die Auftragspriorität wird auf Grund des wirtschaftlichen Druckes der Außenwelt festgelegt. Sie beschreibt den *Eilighkeitsgrad* des Auftrags. Die Auftragspriorität hat mehrere Stufen. Jedem Auftrag wird eine Prioritätsstufe zugeordnet. Die Aufträge, die höhere Auftragspriorität erhalten haben, werden im Prozeß der Maschinenbelegungsplanung gegenüber Aufträgen mit kleinerer Auftragspriorität bevorzugt.

Die Grundausrüstung der Maschinen ist oft unterschiedlich. Somit lassen sich nicht alle Rüstelemente zu jeder Bearbeitungsmaschine zuordnen. Die *interne Priorität* des Auftragsstyps gibt denjenigen Aufträgen Vorrang, die weniger Möglichkeiten haben auf irgendeiner Bearbeitungsmaschine des FFS bearbeitet zu werden. Die interne Priorität kann man als Unterstützung von außergewöhnlichen Aufträgen sehen. Die interne Priorität

eines Auftragsstyps ist direkt auf die Grundausrüstung der Bearbeitungsmaschinen bezogen. Sie ist grundsätzlich den Auftragsprioritäten untergeordnet.

3.6.7 Auftragswahlkriterien

In einem extremen Fall kann passieren, daß ein Auftrag mit allerhöchster Auftragspriorität die Bearbeitung von anderen Aufträgen behindert. Dieser Auftrag kann sogar andere Bearbeitungsmaschinen zum Stillstand bringen. Falls es nicht durchführbar ist, versucht man die Aufträge mit anderen Mitteln auf einer untergeordneten Planungsebene in der Maschinenbelegung zu betreuen. Hier werden die Auftragsauswahlkriterien eingesetzt, die einerseits Auftragspriorität in die Praxis umsetzen, andererseits ihre Nachteile durch angepaßte Strategien beseitigen.

Frei wählbare Kriterien dienen der Feinsteuerung der Maschinenbelegung, wobei auf den momentanen Systemzustand Rücksicht genommen wird. In der oben angeführten Arbeit werden 39 frei wählbare Kriterien angeführt, von denen hier die wichtigsten genannt werden. Sie lösen typische Konfliktsituationen, die bei den Arbeitsabläufen eines FFS für die Bearbeitung von Drehteilen auftreten können. Die Kriterien beziehen sich prinzipiell auf Maschinenaufträge aus einer Prioritätsgruppe, sind aber auch auf den gesamten Vorrat nicht erledigter Maschinenaufträge anwendbar. Teilweise sind sie auch für höhere Planungsebenen (PPS) einsetzbar.

Diese Auftragsauswahlkriterien beziehen sich prinzipiell auf Aufträge aus allen Prioritätsgruppen des gesamten Auftragspools.

1. Ein durch Zufall ausgewählter Auftrag

$$K_1 = \text{rand}(AG_1, AG_2, AG_3, \dots, AG_1, \dots, AG_n) \quad (1)$$

Aus einer Gruppe von n freigegebenen Aufträgen wird per Zufall ein Auftrag ausgewählt. Falls dieser Auftrag auf der vorgesehenen Maschine und zu dieser Zeit durchführbar ist, wird er eingeplant, andernfalls wird ein anderer ausgewählt. Für dieses Auftragsauswahlkriterium bleibt der aktuelle Zustand des FFS und die Zusammenhänge zwischen den Aufträgen außer Betracht.

2. Erster durchführbarer Auftrag

$$K_2 = \text{next}(AG_1, AG_2, AG_3, \dots, AG_1, \dots, AG_n) \quad (2)$$

3. Kürzeste Umrüstzeit

$$K_3 = \min \left({}^{\text{MAj}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}} \right) \quad (3)$$

wobei: i - Auftrag, j - Maschine

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe und die vorgegebene Maschine werden die Umrüstzeiten berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird der Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Umrüstzeit ${}^{\text{MAj}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}}$ hat.

4. Kürzeste Bearbeitungszeit eines Auftrages

$$K_4 = \min \left({}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) \quad (4)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird der Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Bearbeitungszeit hat. Wenn nach diesem Auftragsauswahlkriterium vorgegangen wird, kann der Betrieb eines FFS bedienerintensiv sein, weil die Maschinen oft umgerüstet werden müssen.

5. Längste Bearbeitungszeit eines Auftrages

$$K_5 = \max \left({}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) \quad (5)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird der Auftrag ausgewählt, der die längste Bearbeitungszeit hat.

6. Kürzeste Dauer eines Auftrags

$$K_6 = \min \left({}^{\text{MAj}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}} + {}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) \quad (6)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Umrüstzeiten ${}^{\text{MAj}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}}$ und die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Die gesamte Dauer eines Auftrages wird als Summe der beiden Zeiten berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird der Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Auftragsdauer hat. Auf diese Art und Weise ist es möglich, den nächsten Umrüstvorgang auf den frühestmöglichen Zeitpunkt vorzuziehen.

7. Längste Dauer eines Auftrages

$$K_7 = \max \left({}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}} + {}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) \quad (7)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Umrüstzeiten ${}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}}$ und die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Die gesamte Dauer eines Auftrages wird als Summe der beiden Zeiten berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die längste Auftragsdauer hat. Auf diese Art und Weise ist es möglich den nächsten Umrüstvorgang auf den spätestmöglichen Zeitpunkt zu verschieben.

8. Kürzeste Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes

$$K_8 = \min \left[\left({}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}} + {}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) / {}^{\text{WS}}N^{\text{AGi}} \right] \quad (8)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Umrüstzeiten ${}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}}$ und die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Die Auftragsdauer wird als Summe der beiden Zeiten berechnet. Die Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes ist der Quotient aus Auftragsdauer und der Anzahl der Werkstücke des Auftrages ${}^{\text{WS}}N^{\text{AGi}}$. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes hat.

9. Längste Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes

$$K_9 = \max \left[\left({}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}} + {}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}} \right) / {}^{\text{WS}}N^{\text{AGi}} \right] \quad (9)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Umrüstzeiten ${}^{\text{MAJ}}T^{\text{AGi}}_{\text{umrüsten}}$ und die Bearbeitungszeiten ${}^{\text{WS}}T^{\text{AGi}}_{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Die Auftragsdauer wird als Summe der beiden Zeiten berechnet. Die Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes ist der Quotient aus Auftragsdauer und der Anzahl der Werkstücke des Auftrages ${}^{\text{WS}}N^{\text{AGi}}$. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die längste Bruttobearbeitungszeit eines Werkstückes hat.

10. Maximaldifferenz zwischen Bearbeitungszeit und Umrüstzeit

$$K_{10} = \max \left(WS_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}} - MAJ_{T^{AGi}}^{\text{umrüsten}} \right) \quad (10)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bearbeitungszeiten $MAJ_{T^{AGi}}^{\text{umrüsten}}$ und die Umrüstzeiten $WS_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die maximale Differenz zwischen Bearbeitungszeit und Umrüstzeit hat.

11. Maximale technologische Flexibilität

$$K_{11} = \max \left(\frac{WS_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}} - MAJ_{T^{AGi}}^{\text{umrüsten}}}{WS_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}}} \right) \quad (11)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Umrüstzeiten $MAJ_{T^{AGi}}^{\text{umrüsten}}$ und die Bearbeitungszeiten $WS_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}}$ berechnet. An Hand dieser Zeiten wird die technologische Flexibilität der Maschine für jeden einzelnen Auftrag ermittelt. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die maximale technologische Flexibilität hat.

12. Kürzeste benötigte Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages

$$K_{12} = \min \left(BE_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}} \right) \quad (12)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bedienerzeiten pro Auftrag $BE_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Hiervon sind die Bedienerzeiten, die auf alle Vorbereitungs- und Ausräumungstätigkeiten entfallen, ausgeschlossen. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages benötigt.

13. Längste benötigte Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages

$$K_{13} = \max \left(BE_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}} \right) \quad (13)$$

Für die j-te Maschine und alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bedienerzeiten pro Auftrag $BE_{T^{AGi}}^{\text{bearbeitung}}$ berechnet. Hiervon sind die Bedienerzeiten, die auf alle Vorbereitungs- und Ausräumungstätigkeiten entfallen, ausgeschlossen. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die längste Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages benötigt.

14. Kürzeste benötigte relative Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages

$$K_{14} = \min \left(\frac{BE_{T^{AGi}}^{bearbeitung}}{WS_{T^{AGi}}^{bearbeitung}} \right) \quad (14)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bedienerzeiten während der Laufzeit der Maschine $BE_{T^{AGi}}^{bearbeitung}$ und die Bearbeitungszeiten $WS_{T^{AGi}}^{bearbeitung}$ des Auftrags berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag, der den kleinsten Quotienten aus Bediener- und Bearbeitungszeit hat, ausgewählt. Wegen der variablen Anzahl des Bedienerpersonals während der Produktion, wäre es günstig, die Aufträge nach diesem Auftragsauswahlkriterium auszuwählen, wenn eine bedienerarme Zeit bevorsteht (z.B. dritte Schicht).

15. Längste benötigte relative Bedienerzeit während der Bearbeitung des Auftrages

$$K_{15} = \max \left(\frac{BE_{T^{AGi}}^{bearbeitung}}{WS_{T^{AGi}}^{bearbeitung}} \right) \quad (15)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die Bedienerzeiten während der Laufzeit der Maschine $BE_{T^{AGi}}^{bearbeitung}$ und die Bearbeitungszeiten des Auftrages $WS_{T^{AGi}}^{bearbeitung}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der den größten Quotienten aus Bediener- und Bearbeitungszeit hat. Wegen der variablen Anzahl des Bedienerpersonals während der Produktion, wäre es günstig die Aufträge nach diesem Auftragsauswahlkriterium auszuwählen, wenn zusätzliche Bediener zur Verfügung stehen.

16. Kürzeste benötigte Bedienerzeit

$$K_{16} = \min \left(BE_{T^{AGi}}^{summe} \right) \quad (15)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die gesamten Bedienerzeiten $BE_{T^{AGi}}^{summe}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der die kürzeste Bedienerzeit hat.

17. Längste benötigte Bedienerzeit

$$K_{17} = \max \left(BE_{T^{AGi}}^{summe} \right) \quad (17)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die gesamten Bedienerzeiten $BE_{T^{AGi}}^{summe}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird der Auftrag ausgewählt, der die längste Bedienerzeit hat.

18. Kürzeste benötigte relative Bedienerzeit

$$K_{18} = \min \left(\frac{BE_{T^{AGi}}}{WS_{T^{AGi}} \text{ summe}} \right) \quad (18)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die gesamten Bedienerzeiten $BE_{T^{AGi}} \text{ summe}$ und die Auftragsdauer $WS_{T^{AGi}} \text{ summe}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der den kleinsten Quotienten aus Bedienerzeit und Auftragsdauer hat.

19. Längste benötigte relative Bedienerzeit

$$K_{19} = \max \left(\frac{BE_{T^{AGi}}}{WS_{T^{AGi}} \text{ summe}} \right) \quad (19)$$

Für alle freigegebenen Aufträge aus der Gruppe werden die gesamten Bedienerzeiten $BE_{T^{AGi}} \text{ summe}$ und die Auftragsdauer $WS_{T^{AGi}} \text{ summe}$ berechnet. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der den größten Quotienten aus Bedienerzeit und Auftragsdauer hat.

20. Maximaler Fortschritt in der Fertigung

$$K_{20} = \min \left[WS_{N^{ABG}} \text{ noch_zu_fertigen} + \left(\frac{WS_{N^{ABG}} \text{ noch_zu_fertigen}}{WS_{N^{ABG}}} \right) \right] \quad (20)$$

$WS_{N^{ABG}} \text{ noch_zu_fertigen}$ - Anzahl der Arbeitsgänge, die noch zu fertigen sind,

$WS_{N^{ABG}}$ - Gesamtanzahl der Arbeitsgänge

Für alle freigegebenen, aber nicht fertiggestellten Aufträge wird der Fortschrittsgrad nach dem Klammerausdruck in der obigen Gleichung berechnet.

Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der den größten Fortschrittsgrad hat. Nach diesem Auftragsauswahlkriterium werden diejenigen Aufträge abgeschlossen, die nur mehr wenige Arbeitsgänge für ihre Fertigstellung benötigen. Damit wird das Lager für Halffertigteile entlastet. Im Falle, daß zwei Aufträge noch die gleiche Anzahl von Arbeitsgängen benötigen, wird derjenige Auftrag bevorzugt, an dem schon mehr Arbeitsgänge durchgeführt wurden. Das heißt es besteht die Tendenz bereits begonnene Aufträge abzuschließen und erst dann neue Aufträge zu beginnen.

21. Älteste Aufträge

$$K_{21} = \max (P_{\text{jetzt}} - {}^{\text{WS}} P^{\text{I.ABG}}_{\text{start_bearbeitung}}) \quad (21)$$

Für alle freigegebenen, aber nicht fertiggestellten Aufträge wird der Zeitpunkt des Bearbeitungsbeginns des ersten Arbeitsganges ${}^{\text{WS}} P^{\text{I.ABG}}_{\text{start_bearbeitung}}$ festgestellt. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener Auftrag ausgewählt, der sich schon am längsten im System befindet. Dieses Auftragsauswahlkriterium erlaubt eine Befreiung des Systems von liegendebliebenen Aufträgen. Dieses Auftragsauswahlkriterium ist in der Literatur allgemein bekannt als *First-In-First-Out* (FIFO).

22. Vermeidung der Bedienerüberlastung

$$K_{22} : {}^{\text{BE}} N_{\text{bedarf}} \leq {}^{\text{BE}} K_{\text{überlastung}} \cdot {}^{\text{BE}} N_{\text{verfügbar}} \quad (22)$$

Dieses Auftragsauswahlkriterium soll verhindern, daß es durch zu viele parallele Bedientätigkeiten zur Überlastung der Bediener kommt. Der Koeffizient der erlaubten Überlastung der Bediener ${}^{\text{BE}} K_{\text{überlastung}}$ zeigt an, wieviel geplante Überlastung erlaubt ist. Diesen Koeffizienten kann man auch noch mit der Zeitdauer der Überlastung kombinieren.

Wenn es nicht erlaubt ist den Bediener zu überlasten ist ${}^{\text{BE}} K_{\text{überlastung}} = 1$ und die Zeitdauer gleich Null.

23. Kürzeste Vorbereitungszeit

$$K_{23} = \min \left[\max \left(\begin{array}{l} {}^{\text{BM}} T_{\text{vorbereiten}} + {}^{\text{MA}} T^{\text{AG}}_{\text{umrüsten}} ; \\ {}^{\text{WZ}} T^{\text{P}}_{\text{vorbereiten}} + {}^{\text{WZ}} T^{\text{P}}_{\text{transportieren}} ; \\ {}^{\text{WS}} T^{\text{I.P}}_{\text{vorbereiten}} + {}^{\text{WS}} T^{\text{I.P}}_{\text{transportieren}} \end{array} \right) \right] \quad (23)$$

Für alle Aufträge berechnet man die Zeiten zur Vorbereitung für:

- 1) **Maschine** (Betriebsmittel vorbereiten ${}^{\text{BM}} T_{\text{vorbereiten}}$, Maschine umrüsten ${}^{\text{MA}} T^{\text{AG}}_{\text{umrüsten}}$)
- 2) **Werkzeuge** (vorbereiten ${}^{\text{WZ}} T^{\text{P}}_{\text{vorbereiten}}$, zur Maschine transportieren ${}^{\text{WZ}} T^{\text{P}}_{\text{transportieren}}$)
- 3) **Werkstücke** (auf Werkstückpalette laden ${}^{\text{WS}} T^{\text{I.P}}_{\text{vorbereiten}}$, zur Maschine transportieren ${}^{\text{WS}} T^{\text{I.P}}_{\text{transportieren}}$)

Die Vorbereitungszeit ist die limitierende Größe für den Beginn eines Auftrages. Von allen durchführbaren Aufträgen wird jener mit der kürzesten Vorbereitungszeit ausgewählt, wodurch die Maschine zum frühestmöglichen Zeitpunkt mit der Bearbeitung des ersten Werkstückes beginnen kann. Dieses Auftragsauswahlkriterium ist zu benutzen, wenn man das System aus dem Feierabend hochfahren möchte.

24. Kürzeste Bearbeitungsdauer eines Werkstückes

$$K_{24} = \min(MA_T^{1WS_{\text{bearbeitung}}}) \quad (24)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen wird derjenige ausgewählt, der die kürzeste Arbeitsgangdauer hat. Arbeitsgangdauer ist hier definiert als die Maschinenzeit, die zur Bearbeitung eines Werkstückes benötigt wird $MA_T^{1WS_{\text{bearbeitung}}}$. Dieses Auftragsauswahlkriterium ist in der Literatur allgemein bekannt als *Shortest-Operation-Time* (SOT).

25. Längste Bearbeitungsdauer eines Werkstückes

$$K_{25} = \max(MA_T^{1WS_{\text{bearbeitung}}}) \quad (25)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen wird derjenige ausgewählt, der die längste Arbeitsgangdauer $MA_T^{1WS_{\text{bearbeitung}}}$ hat. Dieses Auftragsauswahlkriterium ist in der Literatur allgemein bekannt als *Longest-Operation-Time* (LOT).

26. Kürzeste Kontrollzeit eines Werkstückes

$$K_{26} = \min(T^{1WS_{\text{kontrolle}}}) \quad (26)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen wird jener ausgewählt, der die kürzeste Kontrollzeit eines Werkstückes $T^{1WS_{\text{kontrolle}}}$ hat.

27. Längste Kontrollzeit eines Werkstückes

$$K_{27} = \max(T^{1WS_{\text{kontrolle}}}) \quad (27)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen wird jener ausgewählt, der die längste Kontrollzeit eines Werkstückes $T^{1WS_{\text{kontrolle}}}$ hat.

28. Kürzeste Kontrollzeit des Auftrages

$$K_{28} = \min \left({}^A T_{\text{kontrolle}}^{\text{WS}} \right) \quad (28)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die kürzeste Gesamtkontrollzeit ${}^A T_{\text{kontrolle}}^{\text{WS}}$ hat.

29. Längste Kontrollzeit des Auftrages

$$K_{29} = \max \left({}^A T_{\text{kontrolle}}^{\text{WS}} \right) \quad (29)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die längste Gesamtkontrollzeit ${}^A T_{\text{kontrolle}}^{\text{WS}}$ hat.

30. Kürzeste relative Kontrollzeit eines Werkstückes

$$K_{30} = \min \left(T_{\text{kontrolle}}^{\text{1WS}} / {}^{\text{MA}} T_{\text{bearbeitung}}^{\text{1WS}} \right) \quad (30)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die kürzeste relative Kontrollzeit eines Werkstückes hat. Die relative Kontrollzeit eines Werkstückes ist das Verhältnis $T_{\text{kontrolle}}^{\text{1WS}} / {}^{\text{MA}} T_{\text{bearbeitung}}^{\text{1WS}}$.

31. Längste relative Kontrollzeit eines Werkstückes

$$K_{31} = \max \left(T_{\text{kontrolle}}^{\text{1WS}} / {}^{\text{MA}} T_{\text{bearbeitung}}^{\text{1WS}} \right) \quad (31)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die längste relative Kontrollzeit eines Werkstückes hat.

32. Kürzeste relative Kontrollzeit des Auftrags

$$K_{32} = \min \left(\frac{{}^{\text{WS}} T_{\text{kontrolle}}^{\text{AGi}}}{{}^{\text{MAj}} T_{\text{umrüsten}}^{\text{AGi}} + {}^{\text{WS}} T_{\text{bearbeitung}}^{\text{AGi}}} \right) \quad (32)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die kürzeste relative Gesamtkontrollzeit hat. Die relative Gesamtkontrollzeit ist das Verhältnis ${}^{\text{WS}} T_{\text{kontrolle}}^{\text{AGi}} / ({}^{\text{MAj}} T_{\text{umrüsten}}^{\text{AGi}} + {}^{\text{WS}} T_{\text{bearbeitung}}^{\text{AGi}})$.

33. Längste relative Kontrollzeit des Auftrages

$$K_{33} = \max \left(\frac{WS_{T_{AGI} \text{ Kontrolle}}}{MAJ_{T_{AGI} \text{ umrüsten}} + WS_{T_{AGI} \text{ bearbeitung}}} \right) \quad (33)$$

Von allen freigegebenen Aufträgen, wird jener ausgewählt, der die längste relative Gesamtkontrollzeit hat.

34. Minimale Anzahl von Werkstückpaletten für einen vorgegebenen Zeitraum

$$K_{34} = \min \left({}^{WSP} N / T_{\text{planungs_periode}} \right) \quad (34)$$

An Hand der Anzahl der Werkstückpaletten pro Palettentyp, die durch das System geschleust werden, kann man bei FFS mit kleinem Werkstückespektrum relativ gute Aussagen über die Systemauslastung machen. Bei komplexen Systemen mit einem breiten Werkstückespektrum lassen sich diese Aussagen nicht mit so großer Sicherheit treffen. Dieses Auftragsauswahlkriterium kann somit für komplexere Systeme nur als indirektes Auftragsauswahlkriterium verwendet werden.

35. Maximale Anzahl von Werkstückpaletten für einen vorgegebenen Zeitraum

$$K_{35} = \max \left({}^{WSP} N / T_{\text{planungs_periode}} \right) \quad (35)$$

36. Termintreue

$$K_{36} : {}^A P_{\text{end_ter_min_bearbeitung}} - P_{\text{jetzt}} < T_0 \quad (36)$$

Der Endtermin ist für das FFS ein externes Auftragsauswahlkriterium. Falls die Einhaltung des Endtermins gefährdet scheint, wird er als oberstes Auswahlkriterium angewendet.

37. Aufträge, die bestimmte Fertigungsmittel verwenden und/oder andere ausschließen

$$K_{37} : {}^{AUSWAHL} FML = \left({}^{AUSWAHL} FML_1 \right) \text{ ODER. } \left({}^{AUSWAHL} FML_2 \right) \text{ ODER. } (\dots) \text{ ODER. } \\ \left({}^{AUSWAHL} FML_i \right) \text{ ODER. } (\dots) \text{ ODER. } \left({}^{AUSWAHL} FML_n \right) \quad (37)$$

$${}^{AUSWAHL} FML_i = \left({}^{AUSWAHL} FML_{i, \text{affirmativ}} \right) \text{ UND. } \left({}^{AUSWAHL} FML_{i, \text{negativ}} \right)$$

$$\text{AUSWAHL}_{\text{FML}_{i,\text{affirmativ}}} = \{ {}^a\text{FML}_{i,1}, {}^a\text{FML}_{i,2}, \dots, {}^a\text{FML}_{i,j}, \dots, {}^a\text{FML}_{i,m} \}$$

$$\text{AUSWAHL}_{\text{FML}_{i,\text{negativ}}} = \{ {}^n\text{FML}_{i,1}, {}^n\text{FML}_{i,2}, \dots, {}^n\text{FML}_{i,j}, \dots, {}^n\text{FML}_{i,n} \}$$

Die Fertigungsmittel werden bestimmt durch Typ, Bezeichnung und Anzahl **FML**(**Typ, Bezeichnung, Anzahl**). In der Produktion gibt es Situationen, in denen bestimmte Fertigungsmittel gezielt zu verwenden bzw. nicht zu verwenden sind. Aus obigen Fertigungsmitteln können Gruppen $\text{AUSWAHL}_{\text{FML}_i}$ kombiniert werden, welche Mittel beinhalten, die verwendet werden müssen $\text{AUSWAHL}_{\text{FML}_{i,\text{affirmativ}}}$, und solche, die auszuschließen sind $\text{AUSWAHL}_{\text{FML}_{i,\text{negativ}}}$. Das Auftragsauswahlkriterium K_{37} wählt somit einen Auftrag, der die Bedingungen einer dieser Gruppen erfüllt.

38. Aufträge mit minimaler Werkzeugfluktuation

$$K_{38} = \min \left({}^{\text{WZ}}N_{\text{flukt}} \right) \quad (38)$$

Dieses Auftragsauswahlkriterium wählt jene Aufträge, bei denen die geringste Werkzeugfluktuation notwendig ist. Werkzeugfluktuation bedeutet in diesem Fall Transport oder Verwendung von Werkzeugen ${}^{\text{WZ}}N_{\text{flukt}}$ verschiedener Sekundär-speicher-Gruppen (z.B. Werkzeugkassetten). Durch dieses Auftragsauswahlkriterium kann der Transportaufwand und die Bedienerbelastung für die Werkzeugvorbereitung gesenkt werden.

39. Maximale Verwendung von Stammwerkzeugen

$$K_{39} = \max \left({}^{\text{STAMM_WZ}}N^{\text{AGI}} \right) \quad (39)$$

Hier erfolgt eine optimale Ausnutzung der auf der Maschine befindlichen Stammwerkzeuge ${}^{\text{STAMM_WZ}}N^{\text{AGI}}$, wodurch eine größere Unabhängigkeit der Maschine von der Werkzeugversorgung während der Bearbeitung erreicht werden kann.

40. Minimale Anzahl der Teilaufträge

$$K_{40} = \min \left({}^{\text{TA}_i}N / T_{\text{planungs_periode}} \right) \quad (40)$$

Dieses Auftragsauswahlkriterium führt dazu, die Anzahl der Teilaufträge auf möglichst niedrigem Niveau zu halten. ${}^{\text{TA}_i}N$ stellt die gesamte Menge der Teilaufträge dar.

Dieses Auftragsauswahlkriterium führt dazu, die Anzahl der Teilaufträge auf möglichst niedrigem Niveau zu halten. $T^A N$ stellt die gesamte Menge der Teilaufträge dar.

41. Maximale Anzahl der Teilaufträge

$$K_{41} = \max \left(T^A_i N / T_{\text{planungs_periode}_i} \right) \quad (41)$$

Dieses Auftragsauswahlkriterium führt dazu, möglichst viele Aufträge auf die Teilaufträge zu teilen.

42. Maximale Konzentration der Teilaufträge

$$K_{42} = \max \left(T^A_i N^{MA_i} / T_{\text{planungs_periode}_i}^{MA_i} \right) \quad (42)$$

Aus dem Auftragspool sollten vor allem die Teilaufträge ausgewählt und verplant werden. Mittels dieses Kriteriums werden vor allem die Teilaufträge eines Auftrages verplant.

3.6.8 Kombination der Auftragsauswahlkriterien

Die Auftragsauswahlkriterien können einzeln oder als Kombination mehrerer Kriterien angewendet werden.

Bei der Kombination mehrerer Auftragsauswahlkriterien wird folgendermaßen vorgegangen: Man rangiert alle freigegebenen Aufträge innerhalb der einzelnen Auftragsauswahlkriterien. Die Auswahlfunktion erfaßt die Wertung der einzelnen Auftragsauswahlkriterien. Dann wird auf Grund der Auswahlfunktion der günstigste Auftrag ausgewählt.

Die Abhängigkeit der Systemnutzung von unterschiedlichen Auswahlkriterien bzw. Zielfunktionen zur Reihenfolgeplanung kann durch statistische Untersuchung mittels Simulation [85] oder durch Erprobung am realen System erfolgen.

3.7 Optimierung der Maschinenbelegung durch Simulation

Man versucht die möglichen Szenarien des Produktionsablaufes für einen gewissen Zeitraum im voraus aufzubauen und zu untersuchen. Die Maschinenbelegungsplanung geht

Die Simulation kann aus diesem Grund als Mittel zur Optimierung der Maschinenbelegung verwendet werden. Die Vorhersagen der Simulation sind für die Aufträge am Anfang der Warteschlange wahrscheinlicher als für die späteren Aufträge. Die Wahrscheinlichkeit, daß Störungen im System auftreten, nimmt mit der Zeit zu.

Durch die Simulation kann man Aussagen über den Produktionsfortschritt und das Systemverhalten bekommen. Beispielsweise wann die Bearbeitung von Aufträgen beendet wird; über welche Reserven von Fertigungsmittel das System verfügt; Auslastung des Personals und Maschinenauslastung. Die so aufgebauten Szenarien werden vom Operator nach unterschiedlichen Gesichtspunkten beurteilt. Falls ein Szenario geeignet erscheint, wird es für die Ablaufsteuerung freigegeben.

Den Planungshorizont kann man so weit verschieben, daß die Simulation zur Optimierung der täglichen, wöchentlichen und monatlichen Maschinenbelegung benützt werden kann. Bei der Simulation kann man die Fertigungsmittel als aufstockbar erklären, d.h. es gibt die Möglichkeit ihre Anzahl zu erhöhen. Dadurch zeigt die Simulation ein Szenario, in dem die Fertigungsmittel keinen limitierenden Faktor darstellen. Aus diesem Szenario kann man erkennen, ob die Fertigungsmittel einen Engpaß bei der eventuellen Durchführung des Szenarios bilden. Daraus ist auch zu erkennen, wann und um wieviel die Anzahl der Fertigungsmittel erhöht werden muß, damit dieses Szenario durchführbar wird.

Die Simulation ist bei größeren Störfällen von besonderem Interesse, bei denen die Aufträge, die betroffen sind, storniert werden müssen. Nicht betroffene Aufträge und der Systemzustand sind die Ausgangsdaten für die Simulation. Die Simulationsergebnisse werden zum Aufbau alternativer Szenarien benützt. Für die Ablaufsteuerung einfacherer Systeme kann die Simulation als Ablaufplanung dienen und direkt mit der Ablaufsteuerung verbunden werden.

3.7.1 Integration der Optimierung in der Simulation – Parameteroptimierung

Simulationssysteme bilden reale Vorgänge in Computermodellen ab. Der Experte kann anhand des Modells alternative Entscheidungen durchspielen. Die Entscheidungen beziehen sich auf Parameterkonstellationen. In einem Simulationsmodell für die Fertigung z.B. müssen Kapazitätsgrößen, Wiederauffüllmengen, Meldemengen und Auftragsprioritäten simultan bestimmt werden. Die Entscheidungen betreffen sowohl die Aufbau- als auch die Ablauforganisation eines Betriebes.

Der herkömmliche Weg besteht darin, zunächst einen Experimentierplan zu erstellen. Dabei ist die Auslegung von Experimenten nicht immer einfach. Auf der einen Seite darf der Experimentierplan nicht zu umfangreich sein, weil die Menge der Daten des Ergebnisreport nicht mehr zu bewältigen ist. Es müssen sehr viele Szenarios verwaltet, dokumentiert, ausgewertet und vor allem verglichen werden. Auf der anderen Seite müssen sehr viele Alternativen getestet werden, weil sonst eine akzeptable Lösung nicht gefunden werden kann. Die Interdependenzen zwischen den einzelnen Parametern sind häufig nicht

durchschaubar. Eine isolierte Betrachtung einzelner Bereiche führt in der Regel zu Suboptima. Ein Plan muß umgestoßen werden, wenn die Interpretation der Simulationsergebnisse weitere Untersuchungen erfordert. Auf jeden Fall erfordert das Aufstellen des Experimentierplanes sehr viel Detailwissen über das Problemfeld.

Die angeführten Überlegungen führen zu der Forderung, daß ein gutes Simulationssystem eine Optimierungskomponente enthalten sollte, die automatisch gute Parameterkonstellationen generiert. Der Anwender muß von diesen Aufgaben entlastet werden. Abbildung 3.2 gibt ein allgemeingültiges Konzept an, wie ein derartiges System aussehen könnte. Eine Simulationsdatenbank enthält alle passiven und ein Simulationsmodell alle aktiven Objekte. Während eines Simulationslaufes verändern die aktiven Objekte die passiven Objekte im Zeitablauf. Auf das Simulationsprogramm wird ein Optimierungsprogramm gesetzt, das alle relevanten Parameter herausucht und entsprechend einer zu optimierenden Zielfunktionen variiert. Die Modellerstellung beschränkt sich auf die Definition von passiven und aktiven Objekten. Die anderen Vorgänge müssen nur gestartet bzw. überwacht werden.

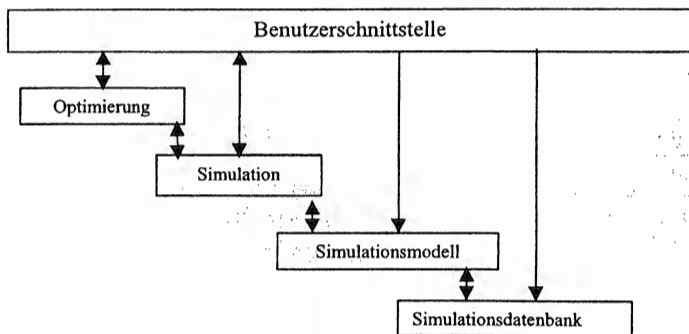


Abb.3.2 Simulation und Optimierung.

Das vorgestellte Konzept ist ein ideales System, das sich nicht realisieren läßt, da nur für spezielle Aufgabenstellungen Optimierungsverfahren existieren. Für die konkrete Ausgestaltung der Optimierungskomponente muß daher ein anderer Weg eingeschlagen werden. Es bieten sich evolutionäre Verfahren an, die durch ihre einfachen Grundkonzepte und ihre Problemunabhängigkeit überzeugen. Die Verfahren betrachten mehrere Lösungspunkte gleichzeitig und erzeugen neue Lösungen durch gezielte Auswahltechniken, Parameterkombinationen und -veränderungen. Die Techniken sind zufallsgesteuert, so daß nur von einer Heuristik gesprochen werden kann, die nicht zwangsläufig zum Optimum führen muß. Die Ergebnisse sind aber hinreichend gut unter Berücksichtigung der Randbedingungen, wie der Zeit. Der Anspruch der Optimierung wird fallengelassen. Er wird durch Begriffe, wie Verbesserung und Lösungssuche ersetzt. Das Zielsystem setzt sich aus einer Datenbank-, einer Simulations- und einer Verbesserungskomponente zusammen.

4. COMPUTERSIMULATION IN FFS

Das Wort *simulieren* leitet sich vom lateinischen Worte *simulare* ab, was im Deutschen als *ähnlich machen, nachbilden, nachahmen* übersetzt werden kann.

Mit der Weiterentwicklung der Simulationstechnik ändert sich auch die Simulationsdefinition. Im technischen Gebrauch ist es allgemein klar, was man unter diesem Begriff versteht. Doch unterscheiden sich die in der Fachliteratur zu findenden Definitionen durch einige Nuancen. Zum Vergleich seien auf dieser Stelle einige davon erwähnt:

The phrase „modelling and simulation“ designates the complex of activities associated with constructing models of real world systems and simulating them on a computer [333].

A „simulation“ is an exyperiment run inside the computer (instead of in what is generally, in the field, termed the „real world“) in order to obtain information about a system (existing or proposed), about modifications to a system, or about several competing systems [75].

Während die Modellierung früher von der Simulation selbst mehr oder weniger getrennt war, wird sie in den 90-er Jahren als Bestandteil der Simulation definiert.

[250] definiert Simulation als:

the process of designing a model of a real system and conducting experiments with this model for the purpose of understanding the behaviour of the system and/or evaluating various strategies for the operation of the system.

Ähnlich sagt auch [300]:

Unter Simulation versteht man die Abbildung eines realen Problems (Realsystems) durch ein formales Modell sowie die Beobachtung des (i.a. dynamischen) Modellverhaltens bei experimenteller Veränderung von exogenen, den Modellablauf beeinflussenden Parametern.

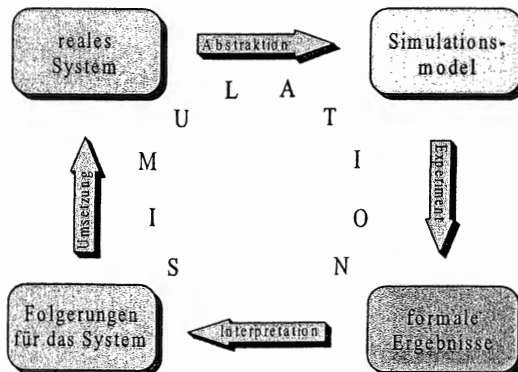


Abb.4.1 Simulationskreislauf [272]

VDI-Richtlinie 3633 definiert Simulation folgenderweise [309] (Abb. 4.1):

Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.

In Abb.4.2 ist die Rolle der Simulation in der Analyse eines Systems dargestellt. Man geht davon aus, daß die Simulation an realen Systemen nur selten zum Einsatz kommt; die Systeme werden in Form eines Modells nachgebildet und weiter erforscht.

Unter dem Begriff *Modell* versteht man meistens ein mathematisches Modell, das zum rechnerunterstützten Simulationslauf dient. Ein System kann auch in Form eines maßstabgetreuen physischen Modells nachgebildet werden, an dem die Simulationsläufe durchgeführt werden. Immerhin ist die Rolle des Rechners bei der Simulation so groß geworden, daß man unter dem Begriff Simulation automatisch die mittels digitalen Rechners durchgeführte Simulation versteht. Andere Simulationsarten weisen spezifische Bezeichnungen auf und werden gegebenenfalls besonders betont.

Die ersten Ansätze der Computersimulation (außerhalb des militärischen Bereiches) sind in den 50er Jahren zu finden, als die ersten Computer auf dem Markt auftauchten. Seitdem ist die Simulation in fast jedem Bereich der heutigen Gesellschaft vorgedrungen.

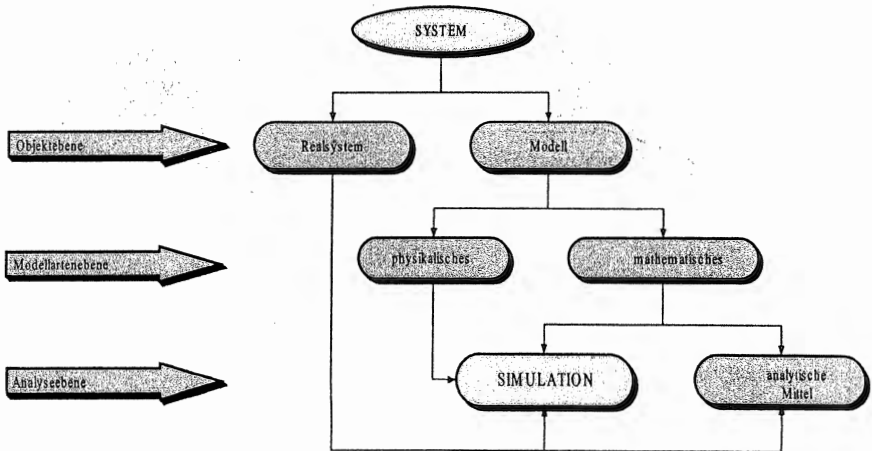


Abb.4.2 Rolle der Simulation in der Systemanalyse

4.1 Simulationsmerkmale und -schritte

Abb.4.3 sind einige wichtigen Simulationsmerkmale dargestellt. In der Simulation lassen sich die drei Hauptphasen, die ihrerseits noch mehrere Simulationsschritte (Abb. 4.4) umfassen, unterscheiden:

Vorbereitung

Dies umfaßt die Vorbereitungstätigkeiten, beginnend von der Problemstellung bis zur Umsetzung in ein Software-Modell.

Durchführung

Die Experimentdurchführung erfolgt in direkter Abhängigkeit von den definierten Zielen, die mit der Simulationsanwendung verfolgt werden.

Auswertung

Simulationsergebnisse sind Rückmeldungen über das Verhalten des simulierten Systems. Der Auswertung von Simulationsergebnissen kommt eine besondere Bedeutung zu, da nicht nur die Qualität der Simulationsergebnisse, sondern auch ihre Interpretation die Qualität der Rückschlüsse und die daraus abgeleiteten Maßnahmen bestimmt.

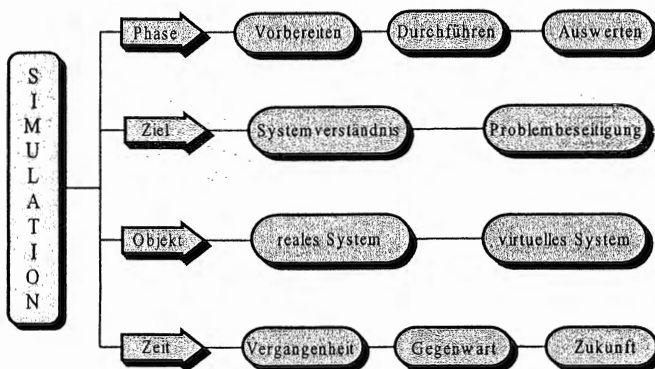


Abb. 4.3 Simulationsmerkmale

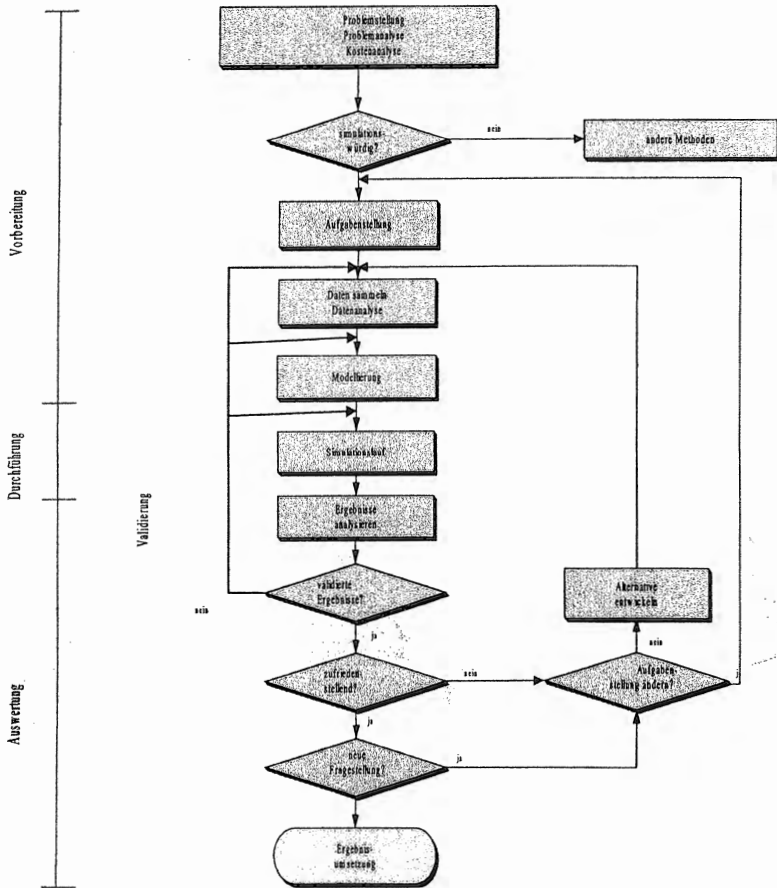


Abb. 4.4 Simulationsschritte [21], [193], [309]

Die Phasen werden bei der Modellentwicklung und Modellnutzung wiederholt durchlaufen. Für die Gestaltung von Abläufen oder die Dimensionierung von Systemen sind in der Regel mehrfache Simulationenläufe notwendig, bei denen Modellparameter, Ablaufregeln und Anfangszustände systematisch variiert werden, so daß vergleichende Bewertungen möglich sind. Aus der Resultatauswertung ergeben sich oft neue Fragestellungen, die weitere Simulationsexperimente erfordern. Die Planung der Experimentdurchführung (*design of experiment - DOE*) hat im wesentlichen zur Aufgabe, die zu variierenden Parameter und deren Werte zu definieren und als Reihenfolge so zu systematisieren, daß das bessere Systemverständnis und/oder die Problembeseitigung mit möglichst wenigen Experimentierschritten erreicht werden.

Das zu untersuchende System muß nicht tatsächlich existieren oder zu simulierende Charakteristiken aufweisen, um mittels Simulation untersucht zu werden (Abb.4.4). Die Simulation macht es möglich, auch noch nicht bestehende Systeme oder noch nicht vorhandene Charakteristiken bestehender Systeme nachzubilden und anhand der Simulationsläufe an die Wirkungen zu schließen. Die Simulationsergebnisse können sich auch auf die Vergangenheit des Systems beziehen.

4.2 Arten der Simulation

Die Simulationsmodelle können nach verschiedenen Aspekten klassifiziert werden. Einige Aspekte und dazu entsprechende Klassifizierung sind in Abb.4.5 dargestellt.

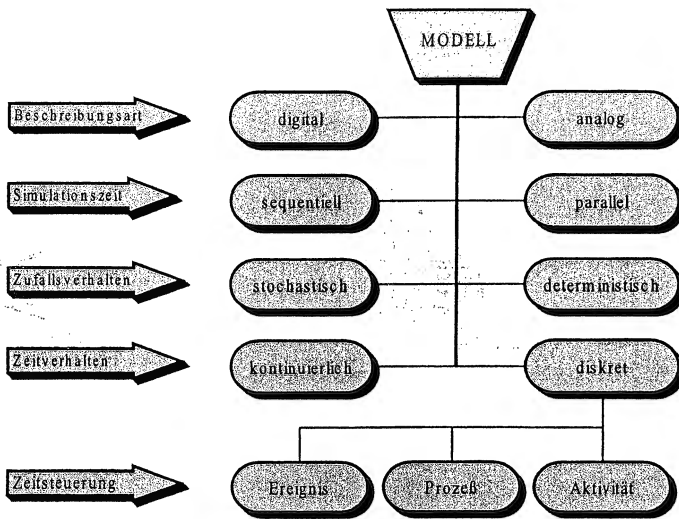


Abb.4.5 Klassifizierung von Simulationsmodellen

Achtet man auf die Beschreibungsart des Modells, dann läßt sich Simulation einteilen in:

Digitale Simulation

Die Modellerstellung und die Experimente werden interaktiv vom Benutzer und einem Digitalrechner durchgeführt.

Analogsimulation

Dabei werden physische Modelle oder Analogrechner eingesetzt.

Computersysteme, Transport- und Verkehrssysteme, Kommunikationssysteme und viele andere Gebiete in Natur, Technik und Wirtschaft zeichnen sich durch einen hohen Grad an Parallelität aus. Bei ihrer Simulation laufen die zu simulierenden Vorgänge parallel ab, müssen jedoch in der Regel in Simulationsalgorithmen für sequentielle Rechner abgebildet werden. Durch den Einsatz von Parallelrechnern (Transputer, Connection Machine) versucht man umgekehrt, sequentielle Simulationsprogramme zu parallelisieren und ihre Abarbeitung zu beschleunigen. Von diesem Standpunkt her lassen sich zwei Simulationsarten unterscheiden:

- Sequentielle Simulation
- Parallele und distribuierte Simulation.

Bezüglich des Zufallsverhaltens innerhalb des Modells unterscheidet man zwischen zwei Arten:

- Stochastische Simulation
- Deterministische Simulation.

In der Praxis gibt es aber sehr selten Fälle, wo Werte von Modellvariablen rein zufällig oder rein deterministisch sind. Zufallsgrößen werden generell mit deterministischen Algorithmen abgebildet.

In bezug auf das Zeitverhalten des Simulationsmodells unterscheidet man:

Diskrete Simulation

Die Zustandsänderungen innerhalb des Systems erfolgen diskret.

Kontinuierliche Simulation.

Dabei erfolgen die Zustandsänderungen stetig; d.h. die Zeit wird kontinuierlich nachgebildet.

Kombinierte Simulation

Bei dieser Simulation werden die zwei vorhererwähnten Verfahren miteinander kombiniert.

Monte-Carlo-Simulation.

Diese ist keine Simulation im eigentlichen Sinne; die Probleme werden mit Hilfe von Zufallsprozessen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesetzen gelöst.

Bei der Abbildung eines Systems durch ein diskretes Modell ist eine Entscheidung über die zugrundezuliegende Steuerung und Kontrolle des zeitlichen Ablaufs zu treffen. Folgende Orientierungen von Simulationsmodellen lassen sich unterscheiden:

Ereignisorientierung

Hier wird der Simulationsablauf als eine Folge von Ereignissen (z.B. Ankünfte von Kunden, Arbeitsschluss von Maschinen usw.) dargestellt, die den Zustand des Systems beeinflussen. Die einzelnen Ereignisse werden vom Anwender definiert und zeitlich eingeplant. Ein rein ereignisorientiertes Simulationssystem stellt dem Anwender lediglich eine Bibliothek von Hilfsfunktionen und eine generelle Ablaufsteuerung zur Verfügung.

Prozeßorientierung

Prozeßorientierte Simulationsmodelle bilden das dynamische Verhalten des Systems durch eine Folge von Prozessen ab, die durch bewegliche Systemelemente (Transaktionen) ausgelöst werden. Prozesse sind häufig wiederkehrende Folgen von Ereignissen. Der Anwender definiert nicht mehr die einzelnen Ereignisse, sondern er verwendet vordefinierte Prozesse, die jeweils mehrere Ereignisse umfassen. Transaktionen fließen durch ein prozeßorientiertes Simulationsmodell und lösen damit Prozesse aus, die den Zustand des simulierten Systems verändern.

Aktivitätsorientierung

In einem aktivitätsorientierten Simulationsmodell definiert der Anwender die möglichen Aktivitäten und formuliert Bedingungen unter denen die Aktivitäten durchgeführt werden sollen. Da diese Bedingungen bei jeder Systemzustandsänderung überprüft werden müssen, sind aktivitätsorientierte Simulationskonzept mit einem relativ hohen Rechenzeitbedarf verbunden.

Die genannten Modellierungsorientierungen könne in einigen Simulationspaketen auch kombiniert eingesetzt werden. Üblicherweise versucht man zunächst ein System durch ein prozeßorientiertes Simulationsmodell abzubilden. Lassen sich einzelne Elemente des Systems nicht durch die verfügbaren Prozeßtypen abbilden, dann können diese z.B. ereignisorientiert simuliert werden [299]. Zum Beispiel, SIMAN und SLAM II unterstützen eine Kombination kontinuierlicher Simulation mit allen drei Orientierungen diskreter Simulation.

Manche Autoren unterscheiden auch zwischen

- dynamischen Modellen, wo der Zeitfaktor eine wichtige Rolle spielt, und
- statischen Modellen, wo der Zeitfaktor vernachlässigt werden kann.

4.3 Einsatz der Simulation

Heute findet man kaum einen Bereich, in dem die Verwirklichung der Simulationsidee nicht gegriffen hätte. Als die wichtigsten sind folgende Bereiche zu nennen:

Militärbereich

Bei der Entwicklung von neuen Waffen, beim Ausüben verschiedener Taktiken, beim Üben mit verschiedenen Raumschiff-, Flug- und Fahrtsimulatoren spielt die Simulation eine wichtige Rolle. Viele Ergebnisse solcher Forschungen werden in kommerzielle Bereiche übertragen und dort weiterentwickelt.

Computersysteme

Hardwarekomponenten, Softwaresysteme, Hardwarenetze werden ebenso simuliert. Ergebnisse auf diesem Gebiet dienen als Basis für den allgemeinen technischen Fortschritt.

Forschung

Technik, Naturwissenschaft oder Sozialforschung usw. wären heutzutage ohne Verwirklichung des Simulationskonzeptes undenkbar. Die moderne Wissenschaft beruht auf dem Experiment und der Nachvollziehbarkeit und ist ohne Simulation unmöglich.

Produktionstechnik

In diesem Bereich ist die Simulationstechnik zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel geworden. Beim Systementwurf, in Materialflußsystemen, Montagelinien, automatisierten Lagersystemen usw. wären die immer wieder vorkommenden „Wenn-Wann-Fragen“ der komplexen Fertigungssysteme ohne Simulation kaum zu beantworten.

Unternehmen aller Art

Bei der Erprobung verschiedener Marktstrategien, der Planung und dem Scheduling heutiger Finanz-, Transport- und Dienstleistungsbetriebe, wie etwa Krankenhäuser, Poststellen, Restaurants, Flughäfen, Bahnhöfe usw. läßt sich der Material- und Informationsfluß effizient simulieren und dadurch die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens steigern, (siehe z.B. [214], [204], [81], [238], [322], [85] usw.)

Unterhaltung

„Virtual Reality“ hat den guten Boden für die Verbreitung der Simulation in der Unterhaltungsindustrie gemacht. Heute ist es so weit, daß man immer öfter vor dem gefährlichen Einfluß der Simulation auf Menschen warnt. Die fortschreitende Unterhaltungsindustrie warf die Frage auf, ob die Anwendung solcher Programme ethisch gerechtfertigt sei [42].

Generell läßt sich sagen, daß die Simulation seit den 80-er Jahren auf dem europäischen Boden an Bedeutung gewann. Immerhin ist der Einsatz der Simulation in den USA viel breiter als in Europa. Erst in Zukunft darf man erwarten, daß die Europäer hinsichtlich des Vertrauens in die Simulationstechnik den Amerikanern näher kommen.

4.4 Einsatz der Simulation in PPS

Die Firmen, die in Zukunft konkurrenzfähig sein wollen, müssen neben den traditionellen Marktanforderungen, wie hohe Qualität und gutes PreisLeistungsverhältnis, auch neue Bedingungen wie hohe Flexibilität, Variantenvielfalt und kurze Lieferzeiten erfüllen. Ein Produktionssystem muß sich kurz- und langfristig ständig ändernden Randbedingungen anpassen. Gegenwärtige und zukünftige Situationen in der Produktion müssen in ihren dynamischen Zusammenhängen sehr schnell analysiert und gelöst werden.

Die Fertigungsprozesse sind heute nach [29] gekennzeichnet durch:

- lange Durchlaufzeiten mit großen Schwankungsbreiten,
- hohe Bestände ,
- ungleichmäßige Auslastung,
- geringe Flexibilität,
- geringe Übersichtlichkeit ,
- ungenaue, asynchrone Kostenbestimmung,
- Fertigung prognostizierter Aufträge, deren Verkauf ungewiß ist,
- widersprechende Teilziele ,
- Optimierung der Ressourcennutzung, statt der Produktherstellung,
- Glaubenskriege der Planer und Steuerer,
- Schlechte Erkennbarkeit von Maßnahme und Wirkung.

Diese Probleme resultieren in enormen Verlusten. Die typische Bilanzstruktur von Unternehmen des Maschinenbaus verdeutlicht z.B., daß 30 bis 50 % des Kapitals in Form von Beständen gebunden ist [315].

Mit der hohen Arbeitsleistung hängen aber auch lange Durchlaufzeiten, Überlastung der Produktion, komplizierte Produktionsplanung und -steuerung zusammen. Herkömmliche Methoden und Werkzeuge für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zeigen aber auch sehr viele Schwachstellen vor allem auf dem Gebiet der Zeitwirtschaft und Auftragsterminierung. Sie arbeiten oftmals isoliert vom realen Prozeß, verwenden falsche Planungsdaten und statische Berechnungsverfahren (z.B. konstante Durchlaufzeiten bei der Rücklafterminierung oder Auftragsfreigabe). Diese teuren und schwerfälligen Monster können sich den Strukturen und Prozessen der Unternehmen nur mangelhaft anpassen. Sie arbeiten häufig in veralteten, zentralisierten, funktionalen Organisationsstrukturen. Der Benutzer solcher Systeme beherrscht oftmals nicht das Steuerungsprinzip und ist degradiert zum Erfüllungsgehilfen eines allmächtigen PPS- Systems.

Die Auswirkungen dieser Situation sind fehlerhafte Produktionspläne, sowie Termine, Kapazitäten und Bestände, die außer Kontrolle geraten.

Eine grundsätzliche Verbesserung ist durch den Einsatz der Simulationstechnik möglich. Innerhalb eines Planungszeitraums können im Rechner aktuelle Aufträge auf die im Simulationsmodell vorhandenen Ressourcen eingelastet werden. Durch systematisches Verlieren von Kapazitäten und Reihenfolgen können die Aufträge, bei unmittelbarer Einsicht in die aktuelle Situation in der Produktion, realitätsnah disponiert werden. Diese Vorgehensweise unterstützt eine flexible und dezentrale Organisationsstruktur und nützt Erfahrungen, Intelligenz und Kreativität des Fertigungsplaners.

Untersuchungen haben ergeben, daß die Durchlaufzeiten stark streuen und die Liege- und Transportzeiten (d.h. „nicht-wertsteigernde“ Zeiten) ca. 80-90% der gesamten Durchlaufzeit ausmachen. Die Liege- und Transportzeiten (Übergangszeiten) sind keine konstanten Größen sondern sind variabel und abhängig vor allem von der Anzahl der Aufträge in der Fertigung, von klassischen Terminierungsverfahren bei denen die dynamischen Zusammenhänge zwischen Durchlaufzeiten, Auftragsmix, Ressourcenverfügbarkeit und anderen Komponenten und können nicht exakt analysiert werden.

Ein Simulationsmodell ist im Gegensatz zu den PPS- Systemen flexibel und anpassungsfähig an verschiedene Situationen und erlaubt interaktive Eingriffsmöglichkeiten des Fertigungsplaners mit kurzen Maßnahme/ Wirkungszykeln (Was- Wenn - Szenarien). Diese Technik verdeutlicht die Ursachen von Zeit wie Kapazitäts erhöht des Qualitätsbewusstsein und motiviert Mitarbeiter dazu Fertigungsprozesse objektiv zu bewerten und ständig zu verbessern. Mit Hilfe von Simulation werden Entscheidungen in der Produktion nicht nur aufgrund von Erfahrungen aus der Vergangenheit und den Kenntnissen der gegenwärtigen Situation getroffen, sondern es werden auch zukünftige Auswirkungen der geplanten Maßnahmen berücksichtigt [315].

Simulation ist aber kein Ersatz von PPS- und Leitstandsystemen, sondern ihre Ergänzung. Leistungsfähigere Hard- und Softwaretools für die Simulation, aber auch sehr viele Schwachstellen von PPS- Systemen haben den breiten Einsatz dieser Technik in der Produktionsplanung und -steuerung verursacht. Viele praktische Anwendungen haben gezeigt, daß die Simulation, sowohl für die langfristige, als auch für die kurzfristige

Machbarkeit der Produktionsabläufe die erforderliche Planungs- und Liefersicherheit bringt.

Die wichtigsten Eigenschaften eines Simulationssystems für den Einsatz, in der Produktionsplanung und -steuerung sind:

- Geschwindigkeit – schnelle Durchführung der Simulationsläufe
- Einbindung der Funktionen zur einfachen Abbildung der Steuerungsalgorithmen
- Offenheit und Integrationsfähigkeit – Verkopplung mit BDE, PPS und mit anderen Unternehmensteilsystemen (Interprozeß – Kommunikation, Programierschnittstelle, SQL und ASCH – Schnittstelle, graphische Schnittstelle, Datenaustausch während der Simulation, Verarbeitung von Laufzeitdaten) (Abb.4.6).
- Anschaulichkeit – übersichtliche Darstellung und Auswertung der Produktionsabläufe mit dynamischen Graphen, Animation und Statistiken
- Graphisch – interaktive dialogorientierte Arbeitsweise (Oberfläche, Hierarchie, Layoutgraphik, benutzerdefinierbare Diagonale)
- Einfache Modifizierbarkeit der Modellparameter und -logiken

Die wichtigste Vorteile der Anwendung der Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung sind:

- sichere Planung und machbare Produktionspläne (sichtbare Vorausschau, Variantenbewertung),
- Basis für objektive Entscheidungen,
- faktisch 100% -ige Termintreue,
- deutlich kürzere Durchlaufzeiten und kleinere Bestände,
- bessere Transparenz des Betriebsgeschehens,
- erhöhte innerbetriebliche Flexibilität,
- reduzierte Fertigungskosten,
- Einbindung des Anwenders in den Entscheidungsprozeß,
- interaktive Eingriffsmöglichkeiten erlauben Erfahrungsgewinn,
- Simulation erlaubt die Abbildung von unterschiedlichen Strukturen (Werkstattorganisation, Fertigungsinseln, Fraktale, Organisation usw.), Strukturelle Änderungen sind mit Hilfe der Simulation relativ leicht nachvollziehbar,
- ein Simulationsmodell kann unterschiedliche Planungstechniken abbilden (z.B. Kanban, belastungsorientierte Steuerung, Engpaßsteuerung), die in den unterschiedlichen Bereichen angewendet werden können,
- Simulationstechnik überwindet die Starrheit und den Determinismus bisheriger Planungs- und Steuerungssysteme.

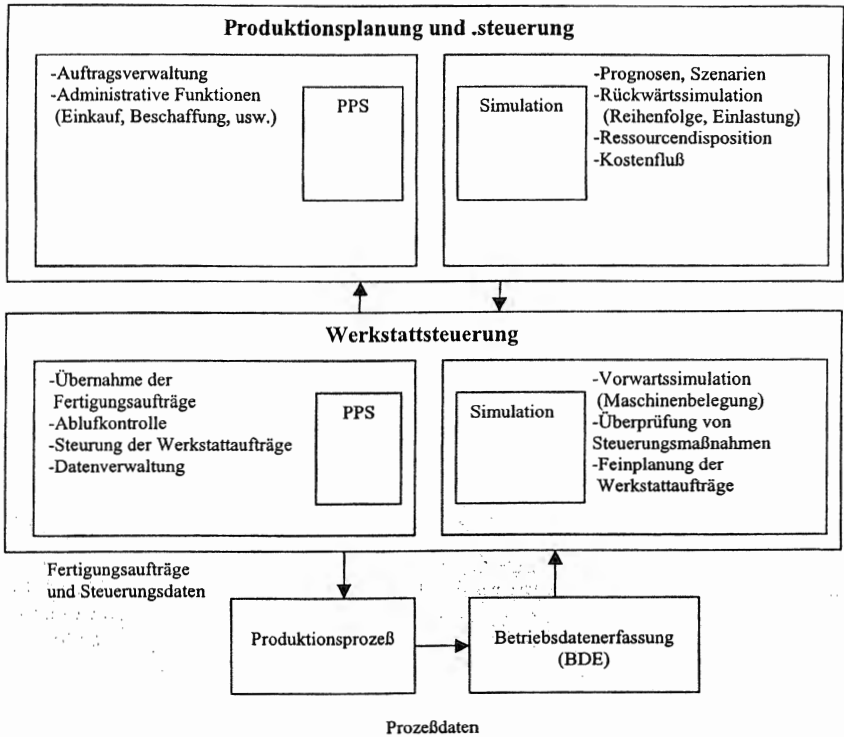


Abb. 4.6 Ergänzung von PPS- und Leitstandssystem mit der Simulation

Neue, dezentrale und dynamische Organisationsformen in der Produktion (Fraktale Fabrik) erfordern auch die Anwendung geeigneter Werkzeuge zum Beherrschen der Prozesse.

4.5 Simulation in FFS

Kürzere Produktlebenszyklen und die zunehmende Forderung der Märkte nach kundenspezifischen Produkten führen zu höherer Planungsfrequenz und kürzeren Planungszeiten für die Anlagen. Zusätzlich muß die Flexibilität und Komplexität der Produktionsanlagen gesteigert werden, um kleinere Lose über mehrere

Produktgenerationen wirtschaftlich fertigen zu können. Daraus ergeben sich einige Merkmale von heutigen Fertigungssystemen (Abb.4.7).

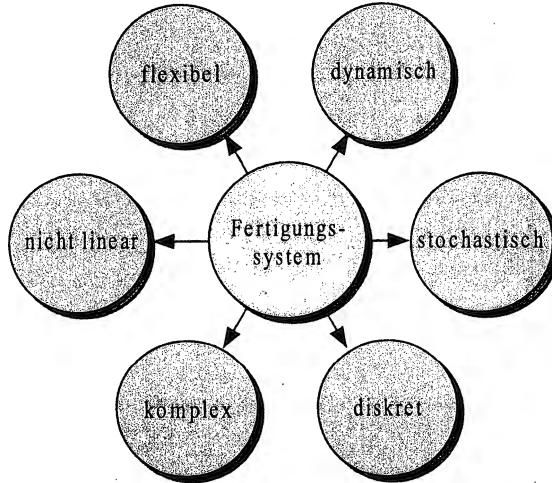


Abb.4.7 Merkmale von Fertigungssystemen

Dies führte bei einer zunehmenden Anzahl von Unternehmen zur Installation von flexiblen Fertigungssystemen (FFS). Da die Installation von FFS erhebliche finanzielle Aufwendungen erfordert, von deren erfolgreichem Einsatz oftmals das Überleben eines ganzen Betriebes abhängt, kommt einer höheren Planungssicherheit, insbesondere bei der Vorhersage des dynamischen Verhaltens der geplanten Anlagen, eine entscheidende Bedeutung zu. Wesentliche Eigenschaften von FFS, die die Analyse dieser Systeme erschweren, sind:

- hohe Systemkomplexität
- Strukturvariabilität der Systeme
- Nichtlinearitäten der Systeme
- unklare Wirkungszusammenhänge
- große Zahl von Parametern und Inputwerten
- stochastische Charakteristiken der Ereignisse.

Vor diesem Hintergrund gewinnt der Einsatz der Simulationstechnik zunehmend an Bedeutung. Neben dem Einsatz bei der Planung von Produktionsanlagen können entsprechend weiterentwickelte Simulationssysteme auch bei der Produktionssteuerung eingesetzt werden. Die Entwicklung von leistungsfähigen Simulationssystemen wurde durch die rasante Leistungssteigerung im Bereich der Rechnerhardware begünstigt.

In modernen FFS wird die Computersimulation in folgenden Phasen effizient verwendet (Abb.4.8):

- bei der Auslegung eines FFS
- beim Betrieb eines FFS, und zwar
- bei Systemänderungen des FFS
- bei der Planung und Ablaufsteuerung.

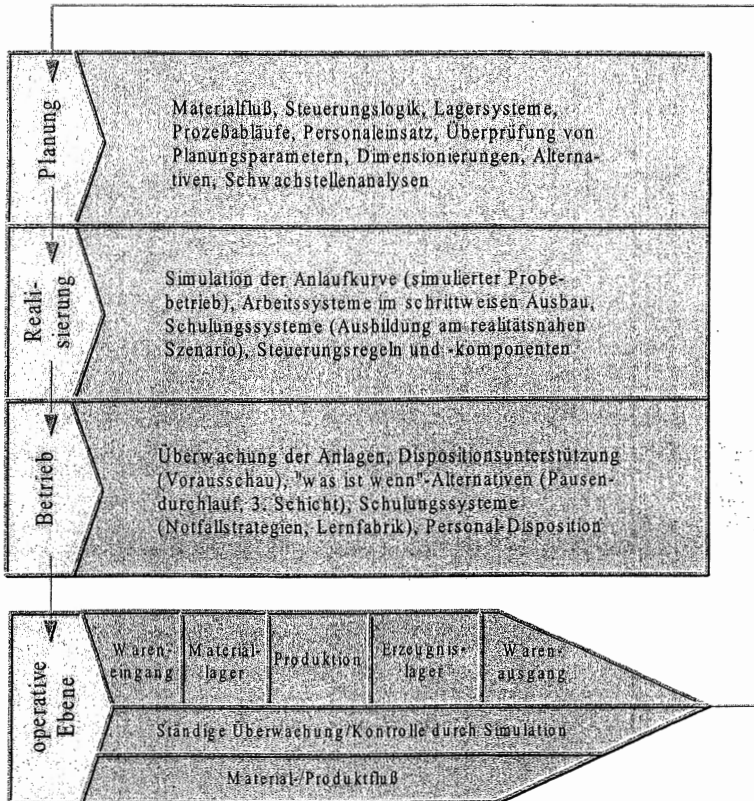


Abb.4.8 Simulation in FFS [309]

4.6 Vorteile der Nutzung der Simulation in FFS

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Simulationstechnik als effizientes Mittel zur Analyse komplexer Systeme etabliert. Mit der Anwendung von Errungenschaften der Informations- und Rechnertechnologie kommen auch die Vorteile der Simulationstechnik immer mehr zum Ausdruck.

Die größten Vorteile lassen sich folgendermaßen beschreiben:

Richtige Wahl

Die Simulation ermöglicht es alle Aspekte eventueller Parameteränderungen nachzuvollziehen und deren Folgen zu beurteilen ohne die Änderungen in Wirklichkeit vornehmen zu müssen. Ein Experiment solcher Art ist im Prinzip kostengünstiger als eines an einem Prototyp oder realem FFS - wenn es überhaupt möglich wäre.

Wanderung durch den Zeitablauf

Durch geänderte Geschwindigkeiten des Simulationsablaufs kann man gewünschte Ereignisse bzw. gewünschte Zeitabschnitte näher untersuchen oder überspringen.

Antwort auf die Frage "Warum?"

Mit Hilfe der Simulation kann man bestimmte Phänomene, die selten auftreten, beliebig oft nachvollziehen. Dadurch kann man die Ursachen dafür erkennen und besseres Verständnis für das System erlangen.

Wiederverwendung des Modells

Sind die Ergebnisse eines detailgetreuen Modells aussagekräftig, dann sind auch Modifikationen des Modells mit ähnlicher Aussagekraft durchzuführen.

Engpaßanalyse

Es wird sehr oft vergessen, daß ein Engpaß nur eine Folge meistens unklarer Ursachen ist. Die Simulation ermöglicht solche Ursachen zu entdecken und zu beseitigen.

Diagnose

Moderne flexible Fertigungssysteme sind zu komplex, um die Verhältnisse der wichtigen Variablen immer zu durchblicken. Simulation führt zu einem besseren Verständnis der Zusammenwirkungen der Systemkomponenten und erleichtert dadurch die Erstellung einer Diagnose des Systemzustandes.

Vertrauen

Simulationsergebnisse zeugen nicht nur davon, wie ein Prozeß ablaufen sollte oder könnte, sondern auch davon, wie er abläuft.

Schulung und Ausbildung des Personals

Dank der Computergraphik ist die heutige Simulationssoftware mit hervorragender 2D und 3D-Animation versehen, die zum besseren Verständnis des dynamischen Systemverhaltens führt und dadurch die Einschulung des Personals erleichtert.

Die allgemeine technische Entwicklung ermöglicht die Verbreitung der Simulationstechnik. Die Simulationssysteme werden für ein breites Problemspektrum und das Vertrauen zur Simulationsanalyse steigt. Die Mächtigkeit, die sich im Simulationskonzept verbirgt, wird in Zukunft noch deutlicher werden.

4.7 Nachteile der Simulation

Die Simulation ermöglicht, einen Blick in die Zukunft zu werfen und künftige Ereignisse im Voraus zu erfahren, ehe sie auftreten. Mittels Simulation werden die Ereignisse aus der Vergangenheit laut erfaßter Regelmäßigkeit und erwarteter Änderungen in die Zukunft projiziert. Daraus zieht man Schlüsse, die später auf das gegenwärtige System angewandt werden, um bestimmte Folgen in der Zukunft zu verhindern oder diese zu vergrößern. Das Vertrauen, das man in die Simulationsanalyse legt, entspricht manchmal nicht der Realität.

Wenn man über die Simulation und ihre Ergebnisse tiefer nachdenkt, sieht man, daß von etwas Prophetisches, sogar Magisches, erwartet wird. Was man in den vorherigen Jahrhunderten durch den Determinismus zu erreichen hoffte - nämlich, zur vollständigen Erkenntnis zu gelangen und die Zukunft vorhersagen zu können - wird ab und zu der Simulation zugeschrieben. Solche Erwartungen sind - milde gesagt - übertrieben, denn die Simulation hat auch ihre Grenzen, die nicht überschritten werden können.

Der Ausgangspunkt der Simulationsanalyse ist ein durch Abstraktion entstandenes Modell. Dieses kann keinen Anspruch auf vollständige Wahrheit erheben. Aus diesem Grund muß man auch den Simulationsergebnissen die absolute Wahrheit absprechen. Selbst wenn das Modell hundertprozent wahr ist (d.h. Simulation auf realem System), kann man nicht alle Zusammenhänge bis ins kleinste Detail nachbilden und analysieren. Immer muß von etwas abstrahiert und vereinfacht werden. Man kann nie wissen, ob gerade dieses kleine „Etwas“, welches z.B. der Abstraktion geopfert wurde mitwirken würde oder nicht.

Simulation ist ein effizientes aber begrenztes, technisches Analysemittel. Nur falls man sich dessen bewußt ist und die eigene Vorstellung über die Simulation von jeglichen magischen Erwartungen befreit, kann man die Simulationstechnik bei der Lösung von vielen Problemen sinnvoll einsetzen. Die Simulationstechnik darf ihres guten Rufes nicht beraubt werden.

Die konkreten Punkte, die nicht außer Acht gelassen werden dürfen, lassen sich folgendermaßen formulieren:

- Jedes System läßt sich modellieren und simulieren. Die Simulation zahlt sich aber nicht immer aus. Deshalb setzt die Simulationsanalyse eine vorherige Zieldefinition und Aufwandsabschätzung voraus.
- Simulationsergebnisse sind von Natur aus statistisch und dürfen deshalb nur als solche interpretiert werden. Eine unrichtige Interpretation der Simulationsergebnisse kann zu einer falschen Entscheidung führen.
- Vor der Simulation sollten analytische Methoden ausgeschöpft werden. Falls die analytischen Mittel für das Lösen einiger Probleme ausreichend sind, ist der Einsatz der Simulation überflüssig, da er keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse hervorbringt und mit erheblichen Kosten verbunden ist.
- Die Abbildungsgenauigkeit darf nicht so groß wie möglich sein, sondern so groß wie dies zur Zielerfüllung erforderlich ist.
- Hardwarekonfiguration und Anforderungen der zur Simulationsanalyse ausgewählten Software müssen im Einklang mit dem gesetzten Ziel stehen.
- Simulationsergebnisse können nur so gut sein, wie die Zusammenarbeit innerhalb des an der Simulationsstudie beteiligten Personenkreises ist.

4.8 Anforderungen an die Simulationssoftware

Diskrete Simulationssoftware wird von Jahr zu Jahr reifer und erfüllt immer besser die an sie gestellten Anforderungen. Dies führt immer mehr zur Verbreitung der Simulationstechnik. Mit der Verbreitung entfalten sich schon dagewesene Anforderungen und es werden auch neue dazu gestellt. Ein eklatantes Beispiel dafür sind die Animationsanforderungen. In den 80-er Jahren entstanden, ist die Animation heute zum unentbehrlichen Bestandteil der Modellentwicklung geworden.

Es gibt keine optimale Software, die sich für ein konkretes Problem absolut am besten eignen würde. Jedes Softwarepaket weist gewisse Vorteile und gewisse Nachteile gegenüber den anderen auf und für jedes Problem findet man mindestens ein paar geeignete Softwarepakete, die unter verschiedenen Betrachtungspunkten die beste Lösung zu sein scheinen. Einige allgemeine Softwaremerkmale, die bei der Auswahl geeigneter Software hilfreich sein können, lassen sich folgendermaßen systematisieren:

Modellierungsflexibilität und Detailreue

Allzweck-Software (general purpose language) sollte für ein möglichst breites Spektrum von Systemen verwendbar sein, da jedes System gewisse Unterschiede zu den anderen Systemen aufweist. Problemspezifische Software sollte eine möglichst detailgetreue Abbildung des realen Systems ermöglichen.

Einfache Modellbildung

Software, die leicht zu erlernen, zu bedienen und noch dazu mit einer graphischen Unterstützung zum Modellieren versehen ist, stellt ein mächtiges Mittel dar.

Schnelle Ausführung

Die stark gesunkenen Kosten von Computerhardware schaffen die Basis für die Entwicklung verbesserter, leistungsstarker Simulationssoftware, bei der die Ausführungszeit immer kürzer wird. Bei einem äußerst großen Modell mit komplizierter Steuerungslogik oder bei der Simulation längerer Zeitintervalle ist die Ausführungszeit der sequentiellen Simulation jedoch nicht zu unterschätzen.

Maximale Modellgröße

Die Modellgröße komplexer Systeme sollte kein Begrenzungsfaktor für den Einsatz der Simulationssoftware darstellen.

Lauffähigkeit auf mehreren Hardwareplattformen

Diskret-kontinuierliche Simulation

Diese Option ermöglicht eine breitere Anwendung der Software, da Systeme oft beide Charakteristiken aufweisen.

Kompatibilität

Die Software, die mit anderen Softwarekomponenten (MRP, Zeichen-, Datenanalysesoftware usw.) kompatibel ist, hat größere Chancen, sich die gewünschte Anwendungsbreite zu verschaffen.

Neben diesen allgemeinen Anforderungen seien an dieser Stelle einige erwähnt.

4.9 Simulationssoftware für Produktions- und Logistiksysteme

Samt deren Materialfluß- und Steuerungsmerkmalen stellen Produktionssysteme ein wichtiges Einsatzfeld der diskreten Simulation dar. 50% aller Simulationspakete sind für die Simulation von Produktionssystemen vorgesehen [178].

Die mächtigsten der heutigen Simulationspakete sind objektorientierte Simulatoren (Tab.4.1), die über mehrere Muster (Templates) für verschiedenste Anwendungsbereiche verfügen und das Erstellen neuer benutzerdefinierter Muster erlauben. Sie sind benutzerfreundlich und flexibel [17], [34], [267], [302],[213], [216], [20].

Software	Anwendungsgebiet	Hersteller
ARENA	Modellierung (dis)kontinuierlicher Systeme	Systems Modeling Corp.
AutoMod	Materialtransportsysteme	AutoSimulation, Inc.
Extend+Manufacturing	industrielle und kommerzielle Modellierung Operation Research (OR) Manufacturing-Operationen und -Design	Imagine That, Inc.
FACTOR/AIM	Modellierung für diskrete Manufacturingssysteme Scheduling Kostenanalyse	Pritsker Corp.
ProModel	Finite Capacity Scheduling (FSC) für (dis)kontinuierliche Systeme Job Shop	ProModel Corp.
SIMFACTORY II.5	für prozess- und ereignisorientierte Produktionssysteme	CACI Products Company
Taylor	FCS Manufacturing Materialflußsysteme Warenhäuser Service-Systeme Gesundheitswesen BPR	F&H Simulations Inc.
WITNESS	für (dis)kontinuierliche prozessorientierte Systeme	AT&T Istel

Tab. 4.1. Software für Produktions- und Logistiksysteme

Durchführbarkeit, Erfolg und Wirtschaftlichkeit einer Simulationsstudie werden bereits bei der Auswahl des Simulationssystems entschieden. Es wird nach Kriterien der Anwendungsbreite, des Benutzerkomforts, der Erlernbarkeit und der Bedienerfreundlichkeit ausgewählt.

4.9.1 ARENA

ARENA ist ein objektbasiertes graphisches Simulationssystem, das den Anwender befähigt alle möglichen Betriebsabläufe aus sämtlichen Wirtschaftszweigen modellhaft abzubilden. ARENA stellt eine komplette Simulationsumgebung zur Verfügung, die alle grundlegenden Schritte einer durchzuführenden Simulationsstudie unterstützt. Das ARENA System beinhaltet Werkzeuge zur Input-Datenanalyse, Modellbildung, interaktiven Durchführung von Experimenten, Animation und Output-Datenanalyse. ARENA ist ein graphisches Modellwerkzeug mit anwendungsspezifischen Bibliotheken (Templates) aus den Bereichen Produktion, Montage, Business Process Reengineering, Krankenhäuser, Transport etc. Anwender können selbst entsprechend ihrer spezifischen Anwendungen Modulkonstrukte auf der Basis der Simulationssprache SIMAN entwickeln. Die Schlüsselidee von ARENA ist ein Konzept zur Verfügung zu stellen, um entsprechend des Anwendungsgebietes, maßgeschneiderte Module für die Modellierung einsetzen und selbst entwickeln zu können. Die Einsatzmöglichkeiten von ARENA werden dadurch nicht wie bei anderen Simulationssystemen durch vordefinierte Modulkonstrukte eingeschränkt. ARENA läuft unter dem Betriebssystem WINDOWS.

ARENA als hierarchisches Simulationssystem, basierend auf der seit über 10 Jahren weltweit erfolgreich eingesetzten Simulationssprache SIMAN/CINEMA, mit seinen heute weltweit über 5000 Installationen ist durch seine Flexibilität die Nr. 1 auf unserem Globus. Konzerne wie GM, American Airlines, BMW, Coca Cola, Master Food etc. aber auch Universitätsinstitute setzen ARENA und seinen Vorgänger SIMAN/CINEMA seit Jahren mit großem Erfolg ein.

4.10 Software für Feinkapazitätsplanung

Auf den rasanten Fortschritten der Computertechnik basierend wurde hochleistungsfähige, simulationsbasierte Software für Feinkapazitätsplanung (*Finite Capacity Scheduling - FCS*) entwickelt, die sich als effizientes Instrument zur Verbesserung des Leistungsgrades bei der Planung und Steuerung komplexer Systeme erwiesen hat. Ein simulationsbasiertes Schedulingssystem ermöglicht es die im Laufe des Arbeitsganges vorkommenden Abweichungen zu bewerten und die Arbeitspläne kurzfristig umzusetzen [20], [267], [59], [238], [302], [253]. Der Einsatz von Software dieser Art kennt keine Einschränkung bezüglich der Systemart. In jedem System, in dem man mit der Steuerungsproblematik zu tun hat, läßt sich so eine Software verwenden. Die Ergebnisse, die eine gut validierte Ablaufsteuerungssoftware liefert, stimmen mit den realen Ergebnissen über 98% überein [302].

Um den Auftragsbestand in modernen komplexen FFS möglichst termingerecht und kostengünstig abzuwickeln, muß man ständig zwischen kundenabhängigem Bedarf und den zur Verfügung stehenden Ressourcen balancieren. Abweichungen zwischen geplantem Soll- und realem Istzustand kommen immer wieder vor und erschweren die Durchführung eingeplanter Aufträge (z.B. beim Ausfall einer Maschine) oder eröffnen die Möglichkeit eines noch besseren Einplanens (z.B. eine Maschine wurde früher repariert als geplant). Daraus entstehen komplexe Aufgaben für die Planung und Ablaufsteuerung. Simulationsbasierte Software für Feinkapazitätsplanung (FCS-Software) eignet sich auch

für die Steuerungsaufgaben in komplexen flexiblen Fertigungssystemen, wo Ressourcen in begrenzter Anzahl vorhanden sind wo:

- Neuverplanen oft durchgeführt werden muß
- Verzögerung bei einer Entscheidung bezüglich neuer Aufgaben zu erheblichen Maschinenstillständen und dadurch zu einem erheblichen Kostenaustieg führen kann.

Eingangsvariablen sind in FCS-Software die Reihenfolgen von Aufträgen. Ausgangsvariablen sind, im Unterschied zu einem erheblichen Kosteherkömmlicher Simulationssoftware, nicht mehr nur statistische Simulationsergebnisse, sondern auch Listen von Operationen samt deren zugewiesenen Ressourcen und Terminen.

Die FCS-Softwaresysteme sind durch folgende Merkmale zu beschreiben:

- Nur die **tatsächlich** zur Verfügung stehenden Ressourcen werden in Betracht gezogen.
- Sie sind **benutzerfreundlich**, verwendbar für verschiedene **Betriebssysteme** und besitzen entsprechende **Schnittstellen** zu anderen Programmen.
- Ihre **Ablaufzeit** stellt nur einen Bruchteil der realen Ablaufzeit dar.

Preactor stellt eine für Ablaufsteuerungsaufgaben spezialisierte Software dar. Am Beispiel des Einsatzes von Preactor bei der Reihenfolgeplanung im Drehzellen-FFS wird gezeigt, wie solche Software effizient eingesetzt werden kann.

4.10.1 PREACTOR

PREACTOR ist ein einfaches, auf PC lauffähiges Scheduling-System, das sehr viele Leistungsmerkmale für jene Anwender anbietet, die für die Teilefertigung oder für Fertigungsverfahren verantwortlich sind. Es ist ein sehr ausgereiftes dialogfähiges, menüorientiertes System. PREACTOR bietet zur Erweiterung des Grundmoduls eine Reihe von Möglichkeiten, wie Kapazitätsplanungsmodule, Schnittstellen zur Bedarfsermittlung (MRP), Kundenauftragsverwaltung (SOP), Betriebsdatatenerfassung (BDE) an. Diese Optionen für eine stufenweise Erweiterung ermöglichen dem Kunden im ersten Schritt nur jene Module einzusetzen, die gerade benötigt werden (Abb.4.9).

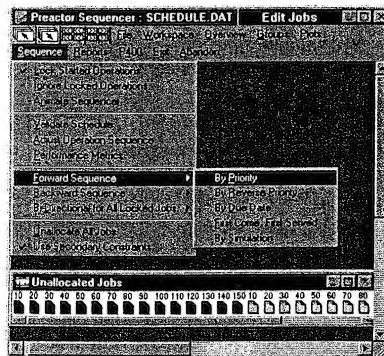


Abb. 4.9 Reihenfolgeplanung mit PREACTOR

Scheduling ist eine Frage der Balance zwischen kundenabhängigem Bedarf und verfügbaren Ressourcen. Diese Balance bestmöglich herzustellen, dabei rasch auf marktspezifische Änderungen zu reagieren, kostenoptimal zu produzieren und die Kundentermine einzuhalten ist lebenswichtig für jedes Unternehmen. PREACTOR wurde so entwickelt, daß sein modularer Aufbau es erlaubt gerade nur jene Funktionalität auszuwählen, die der Kunde für seine Anwendung benötigt. PREACTOR's interne Datenbank kann vom Anwender durch Konfiguration von Datenfeldern, Menüs und Funktionstasten auf seine Belange zugeschnitten werden und das in beliebigen Sprachen. PREACTOR wurde bereits mit Systemen wie PPS, BDE, Auftragsverwaltung, Kostenberechnung, Tabellenkalkulation, externen Datenbanken und mit dem Simulationssystem ARENA gekoppelt.

4.11 Vergleich zwischen Simulationssoftware und Scheduling-Software

Dieser Vergleich wird in Tab.4.2 zwischen ARENA als Simulationssoftware auf dr einen Seite und PREACTOR als Schedulingsoftware auf anderen Seite zusammengestellt.

Tab.4.2.

ARENA	PREACTOR
<ul style="list-style-type: none"> ♦ Simulation ♦ Long-term planing ♦ Klassischer Einsatz als OFF - Line Planungshilfsmittel ♦ Mehrere Simulationsläufe ♦ Vermeidung von Planungsfehlern ♦ On-Line Hilfe und kleine Demonstration • Datenimport und Export durch ASCII mögliche Einbindung fremder Softwarepakete durch Visual Basic oder VBA • Berücksichtigung von Zufälligkeiten • Annähern der Inputdaten durch statistische Verteilungsfunktionen • STOCHASTIK • genaue System- und Datenanalyse erforderlich • Schwerpunkt der Datenanalyse: Datenaufbereitung und die Ermittlung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen • dynamische Abbildungen der Ereignisse im System Statische und dynamische Graphik • Vorwärtsreihung • Erkennen dynamischer Integrationseffekte 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Scheduling ♦ Short-term planing ♦ ON-Line Steuerungs- und Überwachungshilfsmittel ♦ Einplanung ♦ Reagiren auf Planungsfehlern ♦ Konfigurationsbeispiele • Datenimport und Export durch ASCII mögliche Einbindung fremder Softwarepakete durch Visual Basic oder VBA • Einsetzen deterministische Werte • DETERMINISTIK • genaue System- und Datenanalyse erforderlich • Schwerpunkt der Datenanalyse: Definition der Datenbank • statische Abbildung des Belegungszustandes der Ressourcen durch Gantt-Diagramm • Vorwärts-, Rückwärts, Bidirektionale Reihung möglich • Entwicklung geeigneter Planungsregeln • Programmierung benutzerdefinierter Schedulingregel mittels VBA

<ul style="list-style-type: none"> • Integration komplexer Entscheidungslogik mit VBA • Transaktionen durchwandern das System nach logischen Regeln • Statistische Analysetechnik • genaue Analyse der Ergebnisse • Experimentiermöglichkeit relativ einfach durch Modifikation der Systemparameter • graphische Darstellungsmöglichkeit (einfache Plots, Balkendiagramme, Histogramme) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufträge werden eingeplant und Operationen den verfügbaren Ressourcen zugeordnet • Keine statistischen Analysetechniken • Detaillierungsgrad kaum ausgebildet • Experimentierfähigkeit auf Auftragsplanung begrenzt • Definition von Raporte (Kosten, Ressourcenliste, Auftragsliste, etc.), Auslastungsdiagramme
---	---

Als Schlußbemerkung sei gesagt:

- Die Initialisierung des Simulationsmodell ist nicht immer einfach durchführbar
- Integration mit anderen Datenquellen ist erforderlich
- Rückwärts- und Vorwärtsreihung durch das Schedulingwerkzeug sind möglich, bei der Simulation ist nur eine Vorwärtsreihung möglich
- Verbindung zwischen Simulationsoutput und Scheduler erweist sich als schwierig
- Durch Simulation können dynamische Eigenschaften, Verhaltensweisen und Integrationseffekte im täglichen Planungsprozeß berücksichtigt werden.

5. GENETISCHE ALGORITHMEN

5.1 NP-Vollständig Probleme

Die kombinatorische Optimierung beschäftigt sich mit der typischen Frage: Welche aus einer Menge von (sehr vielen) Kombinationen ist die beste, kürzeste, billigste, kleinste oder effizienteste?

Die bekannteste dieser Aufgaben ist das Problem des Handlungsreisenden (TSP nach englisch Travelling Salesman Problem): ein Vertreter soll eine Reihe von Kunden nacheinander in beliebiger Reihenfolge aufsuchen, wobei er daran interessiert ist, die kürzestmögliche Strecke abzufahren. Dieses Problem und andere schwierige Aufgaben wie: Zuweisung von Ladung und Personal an Lastwagen oder Frachtflugzeuge, Maschinenbelegungsplanung, Fahrplangestaltung, Entwurf von Mikrochips, Kapitalanlageplanung, die Gestaltung von Kommunikationsnetzen, etc., gehören zur Klasse der NP-vollständigen Probleme. Innerhalb der größeren Klasse NP (nondeterministic polynomial), die ungefähr aus unseren Alltagsproblemen besteht, bezeichnet man als NP-vollständig, eine Unterklasse besonderes schwierig zu lösender Probleme. Wenn man aber ein effizientes Programm für eines von ihnen gefunden hat, kann man daraus ein ebenso gutes Programm für jedes andere Problem in NP ableiten. Man könnte damit also einige große Menge von Problemen auf einen Schlag lösen.

Nur sind die meisten Informatiker nach vielen Jahren Arbeit überzeugt davon, daß es ein solches Programm, genauer: ein Programm, welches globale Optima für NP-vollständige Probleme in angemessener Zeit liefert, nicht geben kann.

Evolutionäre Algorithmen stellen die neue Hoffnung auf diesem Gebiet für „schwierige“ Probleme dar, weil die konventionellen Optimierungsverfahren bei vielen Problemen aufgrund der Struktur ihrer Lösungsräume nicht mehr effizient oder effektiv eingesetzt werden können. Die hervorragenden Ergebnisse, die der Einsatz dieser Verfahren in anderen Bereichen gebracht hat, läßt vermuten, daß sie auch für die Optimierung von Fertigungsprozessen (wo unsere Interessen liegen) erfolgreich eingesetzt werden können.

In diesem Kapitel sollen kurz die Grundlagen der Optimierung erläutert werden, dann eine Hierarchie von gebräuchlichen Optimierungsverfahren vorgestellt werden und schließlich die Grundlagen der genetische Algorithmen vorgestellt werden.

5.2 Optimierung

Bei der Optimierung geht es darum, zu einem gegebenen Problem eine „beste“ Lösung zu finden.

Eine Lösung eines Parameterproblems läßt sich als Vektor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ von Werten $x_i \in D$ der Parameter auffassen. Dabei ist $n \in \mathbb{N}$ die Anzahl der Parameter des Problems, die hier als endlich angenommen wird. Die Menge $M \subseteq D^n$ aller möglichen Lösungen wird als *Lösungsraum* oder *Suchraum* bezeichnet. Jede Lösung x kann über eine Zielfunktion

$f: M \rightarrow \mathbb{R}$ eine Bewertung $f(x)$ zugeordnet werden. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit ist die Bewertung $f(x)$ um so kleiner, je besser die Lösung x ist.

Ziel der Optimierung ist es, ein globales Minimum $x_{min} \in M$ zu finden. Für dieses gilt:

$$\forall x \in M: f(x_{min}) \leq f(x),$$

d.h. es gibt keine Lösung x , die eine niedrigere Bewertung als $f(x_{min})$ besitzt. Dabei ist zu beachten, daß es durchaus mehrere globale Minima geben kann, sodaß die beste Lösung nicht eindeutig bestimmt ist.

Neben den globalen Minima gibt es auch lokale Minima x_l , für die gilt:

$$\exists \varepsilon \in \mathbb{R} \forall x \in M, d(x, x_l) \leq \varepsilon : f(x_l) \leq f(x). \quad (5.1)$$

Dabei ist die Funktion $d: M \times M \rightarrow \mathbb{R}$ ein Maß für den Abstand zweier Lösungen (zum Beispiel der euklidische Abstand $\sqrt{x_1^2 - x^2}$). Die Bedingung für lokale Minima bedeutet, daß in einer ε -Umgebung (definiert durch d) von x_l keine Lösung mit besserer Bewertung existiert. Nach dieser Definition sind alle globalen Minima auch lokale Minima, da ihre Minimalität für beliebige $\varepsilon \in \mathbb{R}$ gilt. Die lokalen Minima stellen bei der Optimierung ein Problem dar, da es Verfahren gibt, die in ihnen „hängen bleiben“. Das bedeutet, daß die Suche nicht mehr aus dem lokalen Optimum herausführt, weil in der näheren Umgebung des lokalen Optimums nur schlechtere Lösungen liegen.

Diese Definition für Optimierungsverfahren läßt sich auch auf Maximierungsprobleme anwenden, indem dort statt der Zielfunktion f die Zielfunktion $f^* = -f$ betrachtet wird. Dadurch wird aus dem Maximierungsproblem mit der Zielfunktion f ein Minimierungsproblem mit der Zielfunktion f^* .

In der Welt der alltäglichen oder technischen Vorgänge werden unter dem Begriff „Optimum“ sehr oft auch andere Inhalte verstanden, die der Definition nicht genau entsprechen, und lediglich eine zufriedenstellende Lösung bedeuten. Die breit gestreute Bedeutung des Wortes „zufriedenstellend“, gemeinsam kann zu Mißinterpretationen der den Begriff „Optimum“ beinhaltenden Aussagen führen. Um dies zu vermeiden wird vorgeschlagen diesen Begriff für die Zwecke dieser Arbeit präziser zu umschreiben, ohne seinen mathematischen Sinn zu verändern. Um sowohl mit den mathematischen als auch mit den praktischen, alltäglichen Interpretationen konform zu bleiben, werden zwei Klassen dieses Terminus verwendet. Es sind das **absolute Optimum (AO)** und das **technische Optimum (TO)**.

Das **AO** stellt die einzige, beste Lösung eines Problems in einem vordefinierten Raum dar und entspricht dem mathematischen Sinn des Optimums. Bevor auf die Definition des **TO** eingegangen wird, soll der Begriff - die **Erwartungshöhe (EH)** eingeführt und näher erläutert werden.

Bei den Untersuchungen der Optimierungs - Algorithmen wird fast immer nach dem Erreichen des Absoluten-Optimums gestrebt. Bei solchen, meistens stark theoretisch orientierten Forschungen, wird der benötigten Zeit und den erforderlichen Aufwendungen (Hard- und Software, Personal, Infrastruktur, usw.) nur eine sekundäre Bedeutung zu gemessen. In technischen Applikationen hingegen stößt das Streben nach **AO** an eine

Reihe von Einschränkungen, die mit limitierten Ressourcen wie Zeit, Arbeitskräfte, Ausrüstung und Risikobereitschaft verbunden sind. Es führt dazu, daß die Praktiker sich mehr am schnellen Erreichen von umsetzbaren Verbesserungen als am Suchen nach einem enigmatischen Optimum konzentrieren müssen. Zusätzlich läßt die Kurzlebigkeit vom in der Technik auftretenden Problem und deren Lösungen das langwierige Feilen an einem **AO** nicht zu.

Die **EH** bedeutet das minimale, zufriedenstellende Ergebnis eines Unternehmens. **EH** ist eine variable Größe und wird in Abhängigkeit von den Bedürfnissen, den zur Verfügung stehenden Ressourcen und den zu tragenden Aufwendungen gesetzt.

In diesem Zusammenhang wird das **TO** als eine der zufriedenstellenden Lösungen, deren Werte über die **EH** liegen, definiert. Der Begriff des **TO** gleicht damit der praktischen, alltäglichen Interpretation des Terminus „Optimum“. Es bedeutet auch, daß alle über der **EH** liegenden Lösungen, auch wenn sie im mathematischen Sinn nicht die „Spitzen“ der Zielfunktion sind, dem **TO** entsprechen können (Abb.5.1). Da in technischen Applikationen, nur selten das Erreichen des **AO** verlangt wird, sollen in erster Linie solche Verfahren im Auge behalten werden, die schnell und effizient zu einem der **TO** führen.

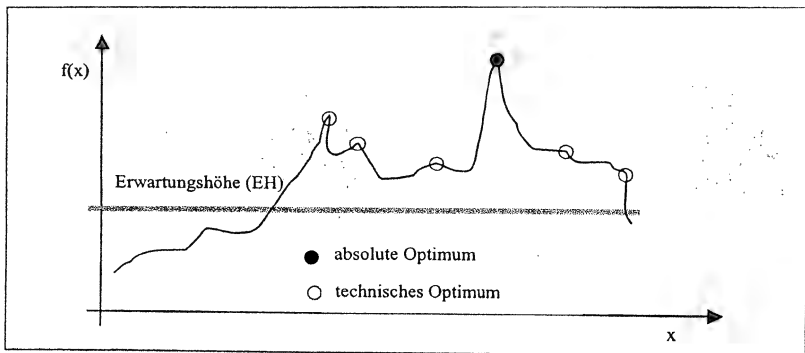


Abb. 5.1 Die Begriffe der Optimierung

5.2.1 Klassen von Optimierungsverfahren

Abb. 5.2 zeigt einen Überblick über die Hierarchie der bekannten Optimierungsverfahren, die sich an der Darstellung von Goldberg in [116] orientiert. Goldberg unterscheidet drei verschiedene Ansätze: enumerative, kalkülbasierte und zufallsgesteuerte Verfahren.

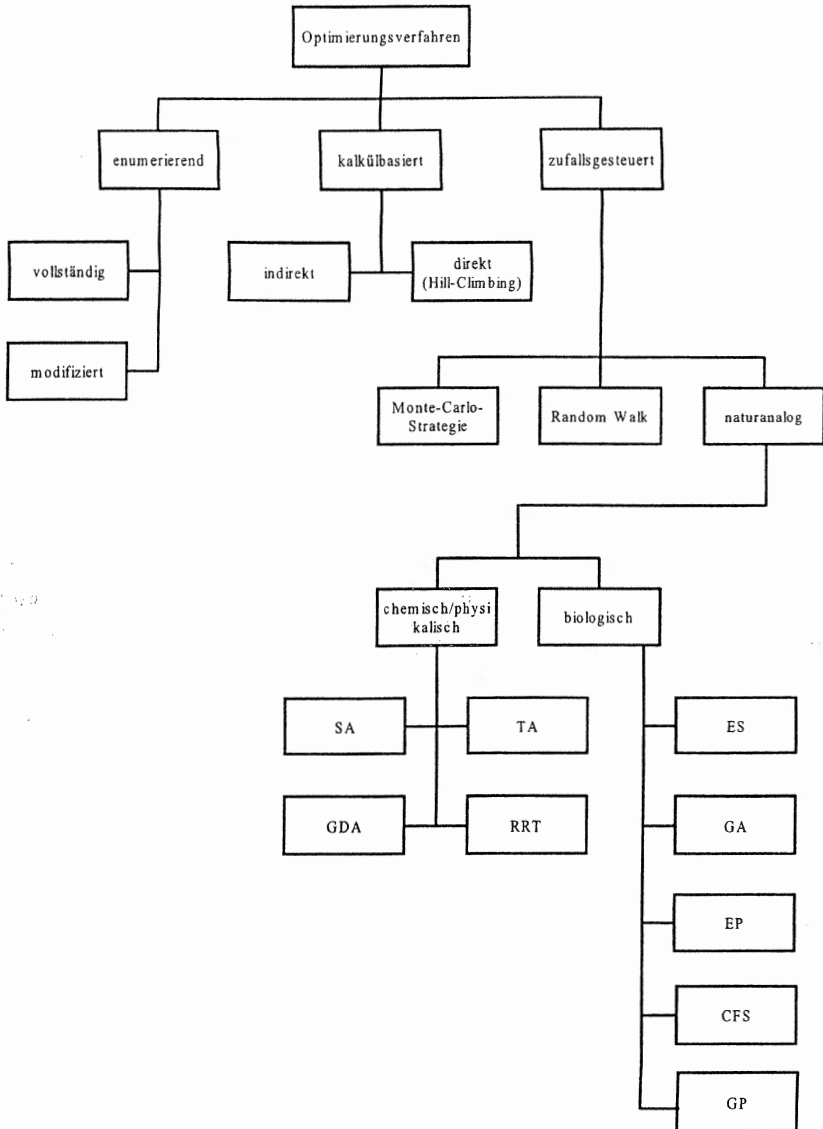


Abb.5.2 Hierarchie der Optimierungsverfahren.

Die Klassen der *enumerierenden* und der *kalkülbasierten* Verfahren sind dadurch charakterisiert, daß die Suche nach einem oder allen globalen Optima bei gleichen

Anfangsbedingungen immer gleich verläuft. Bei den *zufallsgesteuerten* Verfahren spielt jedoch der Zufall eine wesentliche Rolle, so daß das Suchverhalten im allgemeinen nicht vorhergesagt und nur schwierig reproduziert werden kann.

ENUMERIERENDE VERFAHREN

Beim *enumerierenden* Ansatz werden alle möglichen Lösungen untersucht. Die beste Lösung wird dadurch garantiert gefunden. Zur Untersuchung aller Lösungen müssen diese nacheinander erzeugt und bewertet werden. Da bei realen Problemen die Zahl der möglichen Lösungen jedoch sehr groß werden kann, sind die vollständig enumerierenden Verfahren dort nicht effizient einsetzbar.

Daher wurde versucht, die vollständig enumerierenden Verfahren durch Integration von Problemwissen, zum Beispiel Heuristiken, so zu modifizieren, daß möglichst wenig Lösungen betrachtet werden müssen, aber dennoch das Auffinden des globalen Optimums (der besten Lösung) garantiert bleibt. Ein bekanntes Beispiel für ein solches modifiziertes enumerierendes Verfahren ist der Branch-and-Bound-Algorithmus [287].

KALKÜLBASIERTE VERFAHREN

Goldberg unterscheidet hier zwei verschiedene Ansätze: den indirekten und den direkten Ansatz.

Beim *indirekten* Ansatz werden Optima durch mathematisch fundierte Verfahren ermittelt. Dies geschieht im allgemeinen durch ein Nullsetzen des Gradienten der Zielfunktion und Lösung des sich ergebenden Gleichungssystems für die Parameter. Die sich ergebenden Lösungen sind die lokalen Optima. Durch Vergleich der Bewertungen der gefundenen Optima lassen sich die globalen Optima identifizieren. Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist selbstverständlich die Möglichkeit zur Bestimmung der Gradienten und die Lösbarkeit des Gleichungssystems. Die Bezeichnung „indirekt“ kommt vermutlich daher, daß die Suche nicht direkt den Suchraum bearbeitet, sondern die ihn beschreibende Zielfunktion zur Suche nach den Optima verwendet.

Beim *direkten* Ansatz findet die Suche nach der besten Lösung durch gezielte Schritte im Suchraum statt. Ausgehend von einer zufällig ausgewählten Lösung wird in der Umgebung dieser Lösung die Richtung gesucht, in der der steilste Anstieg (der größte Gradientenwert) der Zielfunktion zu verzeichnen ist. In dieser Richtung wird die nächste Lösung gewählt, mit der das Verfahren weiter iteriert wird. Das Verfahren terminiert, wenn es keine Richtung mehr gibt, in der sich bessere Lösungen finden lassen. Man spricht dann davon, daß das Verfahren gegen die momentane Lösung konvergiert.

Dieser Ansatz ist ein Hill-Climbing-Verfahren [276], das zielsicher das nächstgelegene lokale Optimum findet. Da dieses jedoch kein globales Optimum sein muß, ist im Gegensatz zu den enumerierenden Verfahren die Optimalität der gefundenen besten Lösung nicht mehr garantiert. Dafür müssen jedoch in den meisten Fällen weniger Lösungen bis zur Konvergenz des Verfahrens untersucht werden.

ZUFALLSGESTEURTE VERFAHREN

Bei den zufallsgesteuerten Verfahren, die auch als stochastische Verfahren bezeichnet werden, wird der Zufall nicht nur zur Erzeugung einer Anfangslösung eingesetzt, sondern auch bei der anschließenden Suche nach besseren Lösungen verwendet.

Die einfachste Suchstrategie ist dabei die *Monte – Carlo – Strategie* [275]. Hier werden zufällig verschiedene Lösungen erzeugt und bewertet. Wird eine bessere Lösung als bisher gefunden, wird sie gemerkt. Das Verfahren wird solange fortgesetzt, bis ein bestimmtes Kriterium (z.B. das Erzeugen einer bestimmten Anzahl von Lösungen) erreicht wird.

Eine alternative Vorgehensweise, die als *random walk* bezeichnet wird, bewegt sich mit zufälligen Schritten durch den Lösungsraum. Die nächste Lösung wird aus der zuletzt betrachteten durch „kleine“ zufällige Änderungen erzeugt. Die beste auf dem Weg gefundene Lösung wird gemerkt. Auch hier ist das Abbruchkriterium in der Regel die Anzahl der erzeugten Lösungen.

Diese völlig zufälligen Verfahren lassen keinerlei Aussagen über Optimalität der gefundenen Lösungen zu. Es muß sich nicht einmal um lokale Optima handeln.

Im folgenden Abschnitt sollen nun einige neuere Ansätze der zufallsgesteuerten Suche, die *naturalanalogen Verfahren*, näher untersucht werden.

NATURANALOGE VERFAHREN

Die naturanalogen Verfahren sind an Optimierungsverfahren der Natur angelehnt. Bei diesen Verfahren gibt es zwei wichtige Strömungen. Die eine orientiert sich an chemischen und physikalischen Modellen, während die andere von biologischen Modellen abgeleitet sind.

Chemisch/physikalische Verfahren

Bekannte Vertreter dieses Ansatzes sind die folgenden:

- *Simulated Annealing (SA)* [68],
- *Threshold Algorithmus (TA)* [74],
- *Great Deluge Algorithmus (Sintflut – Algorithmus, GDA)* [76] und
- *Record to Record Travel (RRT)* [76].

Diesen Verfahren ist gemeinsam, daß sie mit einer Arbeitslösung x arbeiten, aus der durch eine kleine, zufällige Änderung eine neue Lösung x' erzeugt wird. Danach wird anhand bestimmter Kriterien entschieden, welche der beiden Lösungen zur neuen Arbeitslösung gemacht wird, mit der das Verfahren weiter iteriert wird.

Falls die Lösung x' besser als x ist, wird sie auf jeden Fall zur neuen Arbeitslösung. Die genannten Verfahren unterscheiden sich lediglich in den Kriterien, die die Übernahme einer schlechteren Lösung x' als neue Arbeitslösung gestatten. Diese Akzeptanz schlechterer Lösungen unter bestimmten Bedingungen soll es den Verfahren erlauben, lokale Optima wieder zu verlassen.

Als ein Vertreter der chemisch/physikalischen Verfahren wird im folgenden das SA näher vorgestellt.

In Abb.5.3 ist ein informeller Algorithmus für das *Simulated Annealing (SA)* angegeben. Dieses Verfahren fußt auf einem Modell des Abkühlungsprozesses einer Metallschmelze.

```

wähle eine Ursprungslösung x
berechne die Bewertung f(x) von x
wähle eine Anfangstemperatur T>0
repeat
  repeat
    erzeuge neue Lösung x durch kleine zufällige Änderung von x
    berechne die Bewertung f(x') von x'
    berechne den Bewertungsunterschied ΔE: = f(x') - f(x)
    if ΔE < 0 then // f(x) < f(x')
      x := x' // neue, bessere Lösung übernehmen
    else if Zufallszahl < e-(ΔE/k.T) then //k: Boltzmannkonstante
      x := x' // neue, schlechtere Lösung übernehmen
  until lange keine Verbesserung der Bewertung
  verringere T, T ≥ 0
until lange keine Verbesserung der Bewertung oder T=0

```

Abb. 5.3. Algorithmus des Simulated Annealing

Zu Beginn befinden sich die Atome in der Schmelze in völliger Unordnung. Beim Abkühlen streben die Atome die energetisch günstigsten Plätze an. Das sind die Plätze mit minimaler Energie, die in einer regelmäßigen Struktur, meistens einem Gitter, angeordnet sind. Dadurch ergibt sich eine regelmäßige Struktur, wenn jedes Atom seinen optimalen Platz einnimmt.

Um von einem Platz in einem lokalen Energieminimum zu einem Platz niedriger Energie gelangen zu können, müssen die Atome einen energetisch ungünstigeren Zwischenzustand durchlaufen. Dies ist bei hoher Temperatur leichter als bei niedriger Temperatur, da hier die temperaturbedingte Bewegung der Atome höher ist. Sinkt die Temperatur, werden Lageänderungen der Atome immer unwahrscheinlicher.

Dies schlägt sich im Algorithmus wie folgt nieder: Die Position eines Atoms im Raum wird durch eine Lösung x im Suchraum repräsentiert. Die temperaturbedingte Schwingung eines Atoms wird in eine kleine zufällige Änderung der Arbeitslösung umgesetzt. Die Größe der Änderung kann dabei von T abhängig gemacht werden, um nahe am Modell zu bleiben.

Eine neu erzeugte Lösung x wird auf jeden Fall akzeptiert, wenn sie besser als die momentane Arbeitslösung x ist. Mit einer von der Bewertungsdifferenz ΔE abhängigen Wahrscheinlichkeit wird aber auch eine schlechtere Lösung akzeptiert. Diese Wahrscheinlichkeit ist außerdem von der Temperatur T abhängig, die langsam verringert wird. Deshalb wird die Akzeptanz schlechterer Lösungen mit zunehmender Dauer der Anwendung des Verfahrens immer unwahrscheinlicher, da gilt:

$$\lim_{T \rightarrow 0} e^{-(\Delta E/k.T)} = 0 \text{ für } \Delta E > 0, T \geq 0. \quad (5.2)$$

Für $\Delta E = 0$ ergibt sich für beliebiges $T \geq 0$ eine Übernahmewahrscheinlichkeit von 1. Dies bedeutet, daß eine gute Lösung auf jeden Fall übernommen wird. Dies ist sinnvoll, um auf

Ebenen gleicher Energie (Energieplateaus) dennoch den Suchvorgang fortsetzen zu können, anstatt bei der alten Lösung zu verharren.

Eine einfache, vergleichende Einführung mit der Anwendung der ersten drei genannten Verfahren (SA,TA,GDA) auf das Travelling- Salesman- Problem findet sich in [245].

Biologische Verfahren

Die bekanntesten Verfahren, die auf biologischen Modellen beruhen, sind diejenigen, die die Evolution einer Art simulieren. Eine Menge von Lösungen wird einem Evolutionsprozeß unterworfen, bei dem die natürliche Auslese (natural selection), eine Gesetzmäßigkeit der Evolutionstheorie von Charles Darwin [61], zugrunde liegt. Durch die Generierung neuer Lösungen sollen immer bessere Lösungen gefunden werden. (Eine Einführung in die Grundlagen der Evolution findet sich in [283].

Die wichtigste Klasse der biologischen Verfahren ist die der *Evolutionären Algorithmen* (EA). Diese umfaßt die folgenden Teilbereiche [143]:

- *Genetische Algorithmen* (GA) [148] [116] [62],
- *Evolutionsstrategien* (ES) [263] [277],
- *Evolutionäre Programmierung* (EP) [96] [93],
- *Classifier Systems* (CFS) [148] [116] und
- *Genetische Programmierung* (GP) [179].

Die Verfahren der *Classifier Systems* und der *Genetischen Programmierung* lassen sich den *Genetischen Algorithmen* zurechnen, da sie sich zur Erzeugung neuer Lösungen eines GA bedienen [143]. Die CFS dienen der Optimierung von regelbasierten Entscheidungsverfahren, während bei der GP optimale (meistens: kürzeste) Programme zur Lösung einer Aufgabe gesucht werden. Diese beiden Verfahren werden hier nicht weiter betrachtet, da die von ihnen bearbeiteten Probleme keine direkten Parameteroptimierungsprobleme darstellen.

Die evolutionäre Programmierung befaßte sich ursprünglich mit der Suche nach optimalen endlichen Automaten für eine gegebene Aufgabe, wurde jedoch später auf Parameteroptimierungsprobleme mit reellen Parametern erweitert [93]. Auf dieses Verfahren wird im folgenden ebenfalls nicht weiter eingegangen. Wir werden uns hier auf die universellsten und damit am häufigsten eingesetzten Verfahren, die genetischen Algorithmen konzentrieren.

5.2.2 Wahl der Optimierungsverfahren

Enumerative Verfahren sind auf Grund der Größe des Untersuchungsraumes, sowohl in Hinsicht auf die Anzahl der Dimensionen als auch bezüglich ihrer Länge nicht vorstellbar. Als Beispiel kann die Fertigung von lediglich 10 Aufträgen dienen. Schon wenn die optimale (AO= Reihenfolge von 10 Aufträgen gefunden werden soll, müssen $10! = 3.628.800$ Alternativen untersucht werden. Mit der Annahme, daß die Analyse einer Auftragskonfiguration nur 10 Sekunden dauert, wird für das Suchen 420 Tage (je 24 Stunden) Rechenzeit benötigt.

Die bereits besprochenen *analytischen Verfahren* können kaum in der Fertigung eingesetzt werden, da die Zusammenhänge in einer Produktionsanlage meistens sehr diskontinuierlich ablaufen und sich in Form von mathematischen Funktionen nicht abbilden lassen.

Die naturanalogen Verfahren, zu welchem auch die genetischen Algorithmen gehören, sind also jene, die zwar das Erreichen des **AO** nicht garantieren können, welche aber eine Reihe von **TO**, deren Güte und Anzahl von der jeweiligen **EH** abhängt, liefern können.

5.3 Genetische Algorithmen

Der Ursprung des genetischen Algorithmus liegt in den 50er Jahren, als Biologen versuchten, Abläufe in der Natur am Computer zu simulieren. Jedoch führte erst seine Weiterentwicklung in den späten 60er und frühen 70er Jahren an der Universität von Michigan, USA, unter der Leitung von John Holland zu dem klassischen genetischen Algorithmus in seiner heutigen Gestalt. Ausgangspunkt der Überlegung war die von Charles Darwin begründete Evolutionstheorie, die sich auf folgende Thesen [74] stützt:

- Die Lebewesen auf der Erde produzieren eine gewaltige Menge an Nachkommen, von denen viele vor Erlangen der Geschlechtsreife und damit ohne direkte Nachkommenschaft zugrunde gehen.
- Die Nachkommen der Lebewesen weisen Unterschiede auf, die sich manchmal positiv, manchmal negativ auswirken;
- Im ständigen Konkurrenzkampf (Kampf um des Dasein) bleiben diejenigen Individuen am Leben die sich besser an die jeweiligen herrschenden Bedingungen anpassen können, d.h. den anderen überlegen sind und diese können sich dann auch vermehren. Es kommt zu einer (natürlichen) Auslese (Selektion) unter den Individuen einer Population.

Der Versuch, den oben beschriebenen Evolutionsprozeß der Lebewesen nachzuahmen, führte zur Entwicklung der genetischen Algorithmen. Die Mechanismen, die die Evolution vorantreiben, konnten noch nicht vollständig geklärt werden, aber einige Gesichtspunkte sind bekannt:

Die Chromosomen sind Träger der Gene, d.h. der kleinsten Einheit der Erbinformation, und stellen den Ausgangspunkt der Evolution dar.

Es gelten folgende Grundsätze der Evolution:

- Die Evolution ist ein Prozeß, der neuartige Individuen zum Vorschein bringt, jedoch nicht durch direkte Veränderungen an ihnen selbst, sondern vielmehr durch Manipulation ihrer Erbanlagen.
- Die natürliche Auswahl (Selektion) zeigt einen Zusammenhang zwischen den Chromosomen und der Überlebenschance der daraus entschlüsselten Strukturen. Der Selektionsprozeß hat zur Folge, daß Chromosomen, die erfolgreiche Individuen (Strukturen) repräsentieren, sich öfters vermehren als andere.

- Der Reproduktionsprozeß ist der Punkt, an dem die Evolution stattfindet. Mutationen können verursachen, daß sich Gene der Kinder von denen der Eltern gänzlich unterscheiden. Der Kreuzungsprozeß - auch Crossover genannt - bei dem ein Austausch von Chromosomen stattfindet, produziert Kinder, deren Chromosomen denen der Eltern ähneln.

- Die Evolution hat kein Gedächtnis. Die Erscheinungsform der Individuen hängt nur vom vorhandenen Genpool (d.h. von der Menge der Gene, die bei den derzeitigen Individuen auftreten) und der Struktur des Decodierens der Gene ab.

In den frühen 70er Jahren glaubte John Holland, daß die Evolution - in passender Weise in einen Algorithmus umgesetzt - Grundlagen einer Technik sein könnte, mit der sich schwierige Probleme auf ähnliche Weise wie in der Natur lösen lassen - nämlich durch Evolution.

Er begann seinen Algorithmus zu entwickeln, der eine potentielle Lösung eines Optimierungsproblems als binären String darstellt. Dieser String wird als Chromosom bezeichnet, wobei jede Bitposition ein Gen repräsentiert. Dieser Algorithmus simulierte die Evolution an einer - Population genannten - Menge solcher Chromosomen. Die Vorgänge in der Natur nachahmend, versucht sein Algorithmus eine gute Lösung für das vorhandene Problem zu finden, indem er von Generation zu Generation die Information in den Chromosomen mit probabilistischen Mitteln verändert.

Dabei wird zwischen Operationen unterschieden die auf einem einzigen Chromosom arbeiten und dabei einzelne Gene mutieren, und Operationen, bei denen aus zwei Chromosomen, den Eltern durch Austausch von Genen zwei ähnliche Chromosomen, die Kinder produziert werden.

Wie die Natur weiß der Algorithmus nichts über die Art des Problems, welches er lösen soll. Die einzige Information, die ihm zur Verfügung steht ist eine Bewertungsmöglichkeit (Evolution) jedes Chromosoms, welche die relative Güte des entsprechenden Lösungsvorschlags widerspiegelt. Sie dient dazu, die Auswahl von Chromosomen für die nächste Generation so zu beeinflussen, daß Chromosomen mit besseren Bewertungen mehr dazu tendieren sich zu vermehren, als solche mit schlechten Bewertungen. Daher übernimmt diese Bewertungsfunktion die Rolle der Umwelt im natürlichen Evolutionsprozeß.

Und so wie in der Natur -- nach der Selektion von Darwin -- der Stärkere überlebt, so soll, nachdem der Algorithmus nach einigen Generationen konvergiert, dann das beste Individuum die hoffentlich optimale Lösung des Problems repräsentieren.

5.3.1 Grundgerüst eines genetischen Algorithmus

Der Genetische Algorithmus beginnt mit einer Anfangspopulation möglicher Lösungen, die es mit Mitteln aus der Evolution (Selektion, Crossover, Mutation) zu verbessern gilt. Ein Individuum der Population wird dargestellt als Feld von Bits (0 oder 1), seltener auch als Feld natürlicher Zahlen. Alle Individuen der Anfangspopulation werden zunächst

bewertet. Dazu ermittelt man ihre Fitneß mit Hilfe einer Fitneßfunktion. Nach der Bewertung der Individuen wird aus der Anfangspopulation ein Elternpaar entsprechend der Fitneß ausgewählt (Selektion). Durch Crossover der Bitstrings beider Elternteile entstehen zwei neue Individuen, die eventuell noch durch eine Mutation verändert werden. Diese neu gewonnenen Individuen gehören der Nachkommengeneration an. Selektion, Crossover und Mutation werden so lange wiederholt, bis die Nachkommengeneration ebensoviele Individuen enthält wie die Anfangspopulation. Nach einem bestimmten Ersetzungsschema können anschließend noch einige Individuen aus der Nachkommengeneration durch Individuen aus der Elterngeneration ersetzt werden. Auf diese Weise entsteht die aktuelle Generation, mit der ebenso verfahren wird wie mit der Anfangspopulation. Da bessere Individuen mit größerer Wahrscheinlichkeit zum Crossover ausgewählt werden, verbessert sich die Qualität der Nachkommen allmählich. Die einzelnen Schritte werden so lange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Mögliche Abbruchkriterien sind:

- Maximalzahl von Generationen, die durchlaufen werden
- Verbesserung während der letzten x Generationen ist kleiner als ein vorgegebener Wert
- maximale Laufzeit von k Minuten ist erreicht

In Abb.5.4 sehen wir den prinzipiellen Aufbau eines GA in einem Computerprogramm.

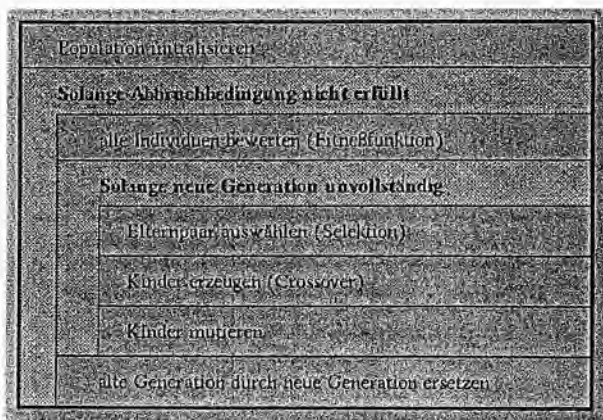


Abb.5.4 Schematische Darstellung eines GA

Im Prinzip folgen alle Varianten von genetischen Algorithmen diesem Grundschema. Kleinere Abwandlungen oder Erweiterungen können aber durchaus sinnvoll sein.

In der vorliegenden Arbeit werden zum Beispiel nicht alle neuen Individuen durch Crossover erzeugt, sondern einige Individuen der Elterngeneration werden vor der Mutation nur kopiert. Die sogenannte Crossover-Rate (oder auch Crossover-Wahrscheinlichkeit) gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß ein Crossover stattfindet. Mit der Wahrscheinlichkeit 1-Crossoverrate entsteht ein Nachkomme durch Kopieren eines Individuums.

Das Ersetzungsschema bietet einen Ansatzpunkt für zahlreiche Varianten. Die Wahl eines geeigneten Ersetzungsschemas kann das Optimierungsverfahren beträchtlich beschleunigen. Mit diesen Erweiterungen ergibt sich folgende Programmstruktur:

Alle Anwendungen Genetischer Algorithmen verwenden dieses Schema. Einzig die Fitneßfunktion hängt vom Problem ab. Sie muß für jede Anwendung neu implementiert werden. Manche Problemstellungen (wie z. B. das TS-Problem, welches Art auch unsere Problem gehört) erfordern aufgrund einer besonderen Codierungsart auch eigene Crossover- und Mutationsoperatoren oder eine eigene Initialisierung der Population. In sehr vielen Fällen jedoch sind eine einfache Bit-Codierung und die Anwendung von allgemein verwendbaren Crossover- und Mutationsoperatoren ausreichend.

Am Schluß dieses Unterkapitels seien die wesentliche Merkmale von GA zusammengestellt:

1. GA arbeiten mit einer Codierung der Parameter und nicht mit den Parametern selbst.
2. GA sind stochastische Suchmethoden, bei denen eine Population von Individuen (Punkten) gleichzeitig verwaltet wird. GA sind somit "robuste Suchverfahren", da sie Informationen von mehreren Punkten im Suchraum enthalten.
3. GA brauchen zum Suchen eine Gütefunktion; sie müssen keinen Gradienten berechnen. Die Berechnung der Gütefunktionswerte der einzelnen Individuen kann parallelisiert werden, da die Gütewerte voneinander unabhängig sind. Die einfache Parallelisierbarkeit ist ein wesentlicher Grund für die Attraktivität von GA, ihre Brauchbarkeit wäre ansonsten für die Zukunft sehr eingeschränkt.
4. GA arbeiten mit Wahrscheinlichkeiten und nichtdeterministischen Operatoren

Die folgenden Abschnitte erklären die einzelnen Schritte des GA im Detail.

CODIERUNG

Zuerst müssen wir uns entscheiden, wie wir das Problem in eine für GA adäquate Form bringen. Goldberg schreibt in seinem Buch "*Genetic Algorithmus in Search, Optimization, and Machine Learning*" dazu folgendes:

"In one sense coding a problem for genetic search is one problem, because the genetic algorithm programmer is limited largely by his imagination".

Die Codierung ist problemabhängig. Gemeinsam ist den GA allerdings, daß sie Ähnlichkeiten bzw. Merkmale der Individuen einer Population in verschiedenen Codierungen auswerten. Wichtig dabei ist, daß die Codierung zu sogenannten „building

blocks“ führt, die nahe dem Optimum liegen. Es gibt zwei fundamentale Prinzipien nach denen Codes entworfen werden können:

- I) *principle of meaningful building blocks*
Obwohl man eine Codierung mit Hilfe der von Walsh aufgestellten mathematischen Theorie überprüfen kann, ob sie dieses obengenannte Prinzip erfüllt, ist diese Möglichkeit nicht einfach durchzuführen. In der Praxis ist der Entwurf einer solchen Codierung eine Kunst.
- II) *principle of minimal alphabets*
Es sollte das kleinste Alphabet verwendet werden, daß eine natürliche Formulierung des Problems gestattet. Es ist einleuchtend und man kann beweisen, daß das binäre Alphabet von allen Codierungen die maximale Anzahl von Schemata/bit liefert. Da der GA Schemata entwickelt und auswertet, ist es sinnvoll, die Anzahl von ihnen zu maximieren und einen binären Code zu verwenden. Die Konvergenzanalyse von J. Holland geht von einer binären Codierung aus.

Die Codierung eines Problems wird nun wie folgt durchgeführt. Den Parametern einer Funktion werden Indizes zugewiesen. Die Numerierung der Parameter ist ein wichtiger Punkt, da Rekombinationsoperatoren (siehe Genetische Operatoren) verwendet werden. Parameter einer Funktion, die stark voneinander abhängen, sollten an benachbarten Stellen der codierten Kette stehen, damit die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbleibens nach der Anwendung rekombinatorischer Operatoren so groß wie möglich ist.

FITNEßFUNKTION

Die Fitneß- oder Bewertungsfunktion beurteilt die Güte eines Individuums. Die Begriffe „Fitneß“ und „Bewertung“ werden häufig im selben Sinne benutzt. Dies ist jedoch nicht ganz korrekt. Die Bewertung der Individuen dient dazu, die unterschiedlichen Lösungen miteinander vergleichen zu können. Falls der genetische Algorithmus ein Minimum ermitteln soll, ist die Bewertung eines guten Individuums immer kleiner als die Bewertung eines schlechten Individuums. Bei einer Maximierung verhält es sich genau umgekehrt. Die Fitneß hingegen repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Individuum zur Reproduktion herangezogen wird. Je besser ein Individuum ist, desto größer ist seine Fitneß. Meistens ist die Fitneßfunktion eine einfache Transformation der Bewertungsfunktion.

Umwandlung der Gütewerte in Fitneßwerte

Der GA versucht die Fitneßwerte der Individuen einer Population im Laufe der Evolution zu maximieren. Um nun aus der Minimumsuche der Gütefunktion eine Maximumsuche einer Fitneßfunktion zu machen, gibt es folgende zwei Möglichkeiten:

$$fitness = \frac{1}{guetewert} \quad (5.3)$$

oder

$$fitness = g_{max} - guetewert_i \quad (5.4)$$

wobei:

$fitne\beta_i$ der Fitneßwert des i .ten Individuums einer Population
 $guetewert_i$ der Gütewert des i .ten Individuums einer Population und
 g_{max} der größte aufgetretene Gütewert einer Population

ist.

Verwenden wir (4), so wird dem Individuum mit dem größten Gütewert der Fitneßwert 0 zugewiesen. Wollen wir verhindern, daß ein Individuum den Fitneßwert 0 zugewiesen bekommt und in der nächsten Generation auf keinen Fall mehr vertreten ist, müssen wir ein sogenanntes *scaling window* einführen. Ist *size-of-window* die Größe des *scaling window*, so werden darin die maximalen Gütewerte der letzten *size-of-window* Generationen gespeichert. Ist g_{max} im Laufe der letzten *size-of-window* Generationen kleiner geworden und wird für g_{max} der größte Wert im *scaling window* genommen, so sind alle Fitneßwerte größer 0. [122] empfiehlt 1986 ein *size_of_window* von 1 zu verwenden.

Skalierung der Fitneßwerte

Die Fitneßwerte, einer Population liegen oft weit auseinander. Wenn wir keine Skalierung der Fitneßwerte machen würden, um ein gewisses Niveau an Konkurrenz zwischen den Individuen einer Population sicherzustellen, würde es schon nach wenigen Generationen zu einer Dominierung einiger weniger Individuen kommen. Der Fitneßwert ist proportional zum Erwartungswert für die Anzahl an Nachkommen, die einem Individuum in der Selektion zugewiesen werden. Um nun eine frühzeitige Konvergenz zu vermeiden, wollen wir 4 Skalierungsmethoden näher erläutern.

Linear scaling

Hier wird eine lineare Beziehung zwischen dem skalierten ($fitne\beta$) und dem ursprünglichen Fitneßwert (fit_org) wie folgt:

$$fitness = a * fit_org + b \quad (5.5)$$

angenommen.

Die Koeffizienten a und b in (5) berechnen sich aus den beiden Bedingungen:

$$fitne\beta_average = fit_org_average \quad (5.6)$$

und

$$fitne\beta_max = c_mul * fitne\beta_average, \quad (5.7)$$

wobei:

$fit_org_average$ arithmetischer Mittelwert der ursprünglichen Fitneßwerte einer Population

$fitne\beta_average$ arithmetischer Mittelwert der skalierten Fitneßwerte einer Population

$fitne\beta_max$ maximaler skaliertes Fitneßwert einer Population

c_mul erwartete Anzahl an Nachkommen für des beste Individuum einer Population.

Aus (6) folgt, daß die Mittelwerte der ursprünglichen und der skalierten Fitneßwerte gleich sind. Damit wird bei den meisten Selektionsmethoden garantiert, daß ein

durchschnittliches Individuum einen Nachkommen erzeugen darf. Die zweite Bedingung (7) legt die Anzahl an Nachkommen fest, die das beste Individuum der Population erhält. Bei einer Populationsgröße von 20 – 30 sollte c_mul zwischen 1.8 und 3 gewählt werden. Wird c_mul zu groß gewählt, dominiert das beste Individuum nach wenigen Generationen die gesamte Population. Die graphische Darstellung der Skalierung sehen wir Abb.5.5.

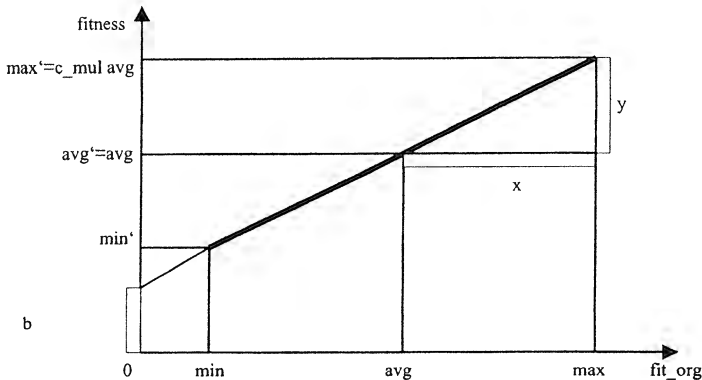


Abb.5.5 Lineare Skalierung

Der Koeffizient a errechnet sich aus der Steigung der Geraden in Abb. 5.5 zu

$$a = \frac{y}{x} = \frac{avg * c_mul - 1}{max - avg} \quad (5.8)$$

Wird (8) in (5) eingesetzt, kann daraus der Koeffizient b zu

$$b = avg * \frac{max - c_mul * avg}{max - avg} \quad (5.9)$$

berechnet werden.

Am Anfang der Evolution ist es kein Problem diese lineare Skalierungsmethode anzuwenden. Die wenigen Guten werden „runterskaliert“ und die anderen „raufskaliert“. Ist jedoch die Evolution schon weiter fortgeschritten, so ist der Abstand $max - avg$ kleiner geworden. Treten nun einige schlechtangepasste Individuen auf, so würden sie nach der Skalierung einen negativen Fitneßwert bekommen. Es gibt mehrere Möglichkeiten, dieses Problem zu lösen. Die erste Möglichkeit ist, daß wir alle Fitneßwerte kleiner Null gleich Null setzen, und die zweite Möglichkeit ist, daß wir die Skalierungsgerade in Abb. 5.6 solange um den Punkt (avg, avg) drehen, bis der kleinste Fitneßwert Null ist.

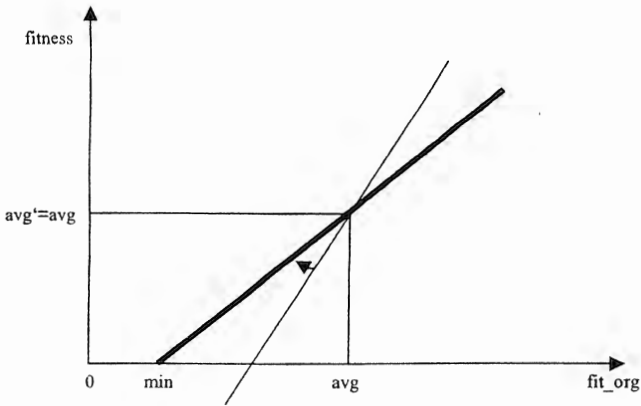


Abb. 5.6 Drehung der Skalierungsgeraden um (avg'/avg)

Die Koeffizienten a und b werden dann wie folgt berechnet :

$$a = \frac{avg}{avg - min} \quad (5.10)$$

$$b = -a * min = \frac{avg}{avg - min} * min \quad (5.11)$$

Sigma transaction

Bei dieser Methode wird die Standardabweichung der ursprünglichen Fitneßwerte einer Population für die Skalierung herangezogen. Diese Skalierungsmethode berücksichtigt also die Verteilung der ursprünglichen Fitneßwerte um den arithmetischen Mittelwert; sie lautet

$$fitneß = fit_org - (fit_org_avg - c * \sigma) \quad (5.12)$$

mit

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^{pop_anz} (fit_org_v - fit_org_avg)^2}{pop_anz}} \quad (5.13)$$

wobei :

fit_org_avg	arithmetischer Mittelwert der ursprünglichen Fitneßwerte einer Population
fit_org^v	ursprünglicher Fitneßwert des v .ten Individuums einer Population
pop_anz	Populationsgröße
c	Konstante, sollte zwischen 1 und 3 liegen.

ist.

Power Law Scaling

Diese Methode wurde 1985 von Gillies vorgeschlagen, und die Skalierung der Fitneßwerte erfolgt durch:

$$fitne\beta = fit_org^k \quad (5.14)$$

Gillies hat diese Methode in begrenzten Studien über *machine vision application* verwendet. k ist problemabhängig, und möglicherweise ist es sinnvoll k zeitlich zu ändern.

Ranking Procedures

Diese Methode wurde zum ersten Mal von Baker 1985 verwendet, und sie ist eine nichtparametrische Skalierungsmethode. Den Individuen wird die Anzahl der zu erwartenden Nachkommen abhängig von ihrem Rang zugewiesen. Der Rang reflektiert die Reihenfolge der Fitneßwerte. Dem Individuum mit dem größten Fitneßwert wird demnach der Rang 0 zugewiesen, und sein Erwartungswert für die Selektion (= Anzahl der zu erwartenden Nachkommen) ist max .

Ranking Procedures zeigte in unseren Versuchen die gleiche Widerstandskraft gegenüber Unter- und Überselektion wie die anderen Methoden. Diese Methode wurde aber von vielen anderen Forschern stark kritisiert, weil hier kein direkter Zusammenhang zwischen Fitneßwert und Gütewert vorhanden ist.

GENETISCHE OPERATOREN

CROSSOVER

Crossover ist ein rekombinatorischer Operator, der zwei Individuen benötigt und als Ergebnis zwei neue Individuen liefert. Er ist der wichtigste Operator, um neue Individuen von Generation zu Generation zu erzeugen. Nehmen wir an, daß die Parameter eines Individuums einer Population binär codiert und einem String der Länge *lchrom* zusammengefaßt wurden. Es werden dann beim crossover zwei Binärketten einer Population als „Elternpaar“ ausgewählt und eine Trennstelle zwischen 1 und *lchrom - 1* zufällig bestimmt eine der zwei neuen Binärketten wird aus zwei Teilketten so gebildet, daß der linke Teil von einem der Eltern und der rechte vom anderen stammt (siehe Abb. 5.7).

```

Vor Crossover:
Elternteil1  1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1
Elternteil2  1-1-0-0-0-1-1-0-0-1-0

Crossover:
Elternteil1  1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1
Elternteil2  1-1-0-0-0-1-1-0-0-1-0

Nach Crossover:
Kind1       1-1-1-1-0-1-1-0-0-1-0
Kind2       1-1-0-0-1-1-1-1-1-1-1
  
```

Abb.5.7 Crossover mit einer Trennstelle

Der crossover – Operator kann auch mehr als eine Trennstelle (CP) haben. Ist $CP > 1$, so werden bei gerader Anzahl von CP die beiden Binärketten jeweils als Ring aufgefaßt, bei dem abwechselnd zwischen den CPs Bits der beiden 'Elterninge' ausgetauscht werden oder nicht (Abb. 5.8).

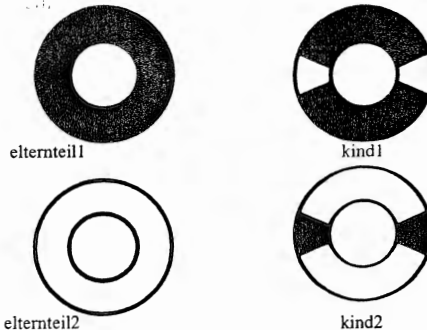


Abb. 5.8. Crossover mit vier Trennstellen

Bei ungerader Anzahl von CP wird immer ein CP bei string (0) angenommen.

De Jong hat die Auswirkungen von $CP > 1$ in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit eines GA in seinem *generalized crossover modell* untersucht. In seinen Studien kommt er zur Erkenntnis, daß *multiple crossoverpoints* eine Verschlechterung der *on-* als auch der *Offlineperformance* mit sich bringen. Im Falle von $CP = 1$ haben wir nämlich nicht einen crossover – Operator, sondern *chrom – 1* verschiedene, wenn wir als einen crossover – Operator einen mit einer bestimmten Trennstelle in den Binärketten der Länge *lchrom* auffassen.

Wenn wir $CP = 2$ annehmen, so gibt es $\binom{lchrom}{2}$ und allgemein $\binom{lchrom}{CP}$ Möglichkeiten einen crossover-Operator zu wählen; d.h. je größer CP gewählt wird, desto weniger Strukturen können erhalten bleiben, und es gleicht mehr einem „Hin- und Herschaufeln“ von Daten (*random search*). Aus diesem Grund gibt es im Programm nur crossover mit $CP=1$ und $CP=2$. Die Wahl der Wahrscheinlichkeit P_c , daß ein selektiertes Paar dem crossover-Operator unterzogen wird, hängt von zwei Faktoren ab:

1. Selektionsmethode: für Populationsgrößen von 20 – 30 sollte bei der *roulette-wheel-selection* $P_c < = 0.6$ gewählt werden; bei den anderen Selektionsmethoden, die einen geringeren stochastischen Fehler haben, kann P_c nahe 1 gewählt werden.

und

2. Populationsgröße : je größer *pop_anz*, desto kleiner sollte P_c gewählt werden.

De Jong empfahl nach seinen Untersuchungen die Tabelle in Abb. 5.9.

Pop anz	P_c
30	0.88
50	0.5
80	0.3

Abb. 5.9 Zusammenhang von Populationsgröße und Wahrscheinlichkeit für crossover [183].

MUTATION

Diesen Operator hat Holland ursprünglich eingeführt, um theoretisch jeden Punkt im Suchraum erreichen zu können. Für Binärketten bedeutet der Mutationsoperator, daß eine zufällig ausgewählte Bitstelle ihren Wert von 0 auf 1 umgekehrt ändert. Sind die Parameter der Individuen nicht codiert, so bedeutet Mutation eines Parameters eine zufällige Änderung innerhalb der Mutationsgrenzen. Ist die Populationsgröße klein (z.B.10), dann ist eine höhere Mutationsrate erforderlich, um eine zu schnelle Konvergenz der Individuen zu verhindern. Bei einer Populationsgröße von 25-30 konnte De Jong die Mutationsrate (P_m) auf $P_m = .01 / bit$ senken. Ein andere Möglichkeit besteht darin, die Mutationsrate adaptiv einzustellen. In der Natur ist die Wahrscheinlichkeit für die Mutation eines Gens $10^{-5} - 10^{-6}$ [83].

SELEKTION

Die Anzahl der Nachkommen für ein Individuum sollte irgendwie in Relation zu seinem Feitnsswert stehen; d.h. je besser das Individuum an seine Umwelt, repräsentiert durch ein Gütekriterium, angepaßt ist, desto mehr Nachkommen sollten ihm zustehen. Wir werden sechs Selektionsmodelle kennenlernen, in denen jedes Individuum die Anzahl der Nachkommen für die nächste Generation kopiert (reproduction) noch darf es Nachkommen zeugen (crossover), d.h. seine Merkmale gehen verloren. Das Ziel eines GA ist es die Fitneßwerte der Individuen einer Population zu maximieren. Welche Gütekriterien wir

verwenden und wie die Umwandlung der Gütewerte in Fitneßwerte erfolgt, zeigen wir erst in den folgenden Kapiteln.

Roulette Wheel Selection

Die einfachste Möglichkeit den obengenannten Gedanken zu realisieren ist die *roulette wheel selection*.

Dabei bekommt jedes Individuum auf einer Roulettescheibe einen Abschnitt zugewiesen, dessen Größe der Fitneß des Individuums entspricht. Nun wird die Kugel einmal gerollt. Das Individuum, in dessen Abschnitt die Kugel liegen bleibt, ist der ausgewählte Elternteil (Abb.5.10).

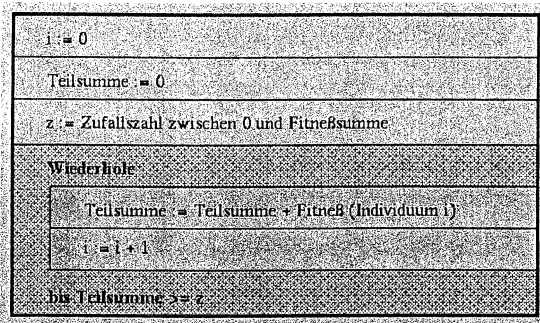


Abb.5.10. Strukturdiagramm roulette wheel selection

Die Umsetzung dieses Prinzips in einen Algorithmus ist ebenso einfach wie das Prinzip selbst. Zunächst wird eine Zufallszahl zwischen 0 und der Gesamtfitneßsumme aller Individuen bestimmt. Danach werden die Fitneßwerte der Individuen nacheinander aufaddiert. Das Individuum, bei dessen Aufsummierung diese Fitneß--Teilsumme die Zufallszahl überschreitet, wird ausgewählt. Auf diese Weise pflanzen sich Individuen mit größerer Fitneß mit einer höheren Wahrscheinlichkeit fort. Aber auch Individuen mit kleiner Fitneß können zum Zuge kommen.

Deterministic Sampling Selection

Die erwartete Anzahl an Nachkommen für das i -te Individuum einer Population errechnet sich zu

$$\text{expected}_i = \frac{\text{fitness}_i}{\text{sum_fitness}} * \text{pop_anz} \quad (5.15)$$

wobei:

fitness_i	Fitneßwert des i -ten Individuums einer Population
expected_i	Erwartungswert des i -ten Individuum.
Sum_fitneß	Summe aller Fitneßwerte einer Population
pop_anz	Populationsgröße

ist.

Der Integer – Anteil vom Erwartungswert in (15) ist die Anzahl der sicheren Nachkommen des i .ten Individuums. Sind, nachdem alle Individuen ihre sichere Anzahl an Nachkommen zugeteilt bekommen haben, noch Plätze für neue Individuen frei, so werden die Fraction – Anteile der Erwartungswerte der Individuen der Größe nach geordnet, und die Restplätze werden der Reihe nach ausgefüllt.

Expeced Value Selection (Preselection)

Für die Integer-Anteile gilt das Gleiche wie bei deterministic sampling selection. Die Fraction – Anteile dienen hier auch wieder zum Ausfüllen der Restplätze, nur daß hier der Fraction – Anteil des Erwartungswerts als Wahrscheinlichkeit behandelt wird. Bei der Vergabe der restlichen freien Plätze wird zufällig ein Individuum aus der Population gewählt, und ist eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 kleiner als der Fraction – Anteil, so bekommt das ausgewählte Individuum einen Nachkommen zugeteilt und vom Fraction Anteil wird 1 abgezogen. Dieser Prozeß wird solange fortgesetzt bis alle Plätze für die nächste Generation vergeben sind.

Stochastic Tournament Selection

Hier werden jeweils zwei Individuen mit roulette wheel selection ausgewählt. Das Individuum, das den größeren Fitneßwert hat, bekommt einen Nachkommen. Dieser Vorgang wird solange ausgeführt, bis alle Plätze für die nächste Generation vergeben sind.

ERSETZUNGSSHEMA

Mit Hilfe eines Ersetzungsschemas wird bestimmt, wie viele und welche Individuen aus der aktuellen Generation in die nächste Generation übernommen werden. Von den zahlreichen Ersetzungsschemata seien hier drei Versionen genannt:

keine Ersetzung:

aus der aktuellen Generation wird kein Individuum in die nächste Generation übernommen.

Elitismus:

die besten n Elemente der aktuellen Generation werden unverändert in die nächste Generation übernommen.

schwacher Elitismus:

die besten n Elemente der aktuellen Generation werden mutiert in die nächste Generation übernommen.

Der Nachteil des ersten Ersetzungsschemas besteht darin, daß sehr gute Individuen und Genkombinationen wieder verloren gehen können und sich dadurch die Konvergenzgeschwindigkeit verringert. Die Anwendung des Elitismus verhindert dies. Der Elitismus sorgt für ein monotonen Ansteigen der Fitneß der besten Individuen von Generation zu Generation. Andererseits besteht die Gefahr, daß dadurch zu schnell recht gute Genkombinationen eine Population dominieren und eine frühzeitige Stagnation des Evolutionsprozesses eintritt. Das globale Optimum kann dann nicht mehr gefunden werden. Dieser Effekt wird durch die Verwendung des schwachen Elitismus verringert.

In unsere Applikation haben wir auch andere Ersetzungsschema verwendet. Diese werden in der folgenden Kapiteln erklärt.

6. DIE STRUKTUR EINES INTELLENTEN MODULS FÜR DIE LEISTANDSSOFTWARE KOMPLEXER FFS

6.1 Konzept

In Rahmen dieses Kapitels wird ein intelligenter Modul für die Leitstandssoftware vorgestellt, der die Optimierung der dynamischen Planung und Überwachung von Fertigungsabläufen in einem komplexen FFS unterstützen soll.

Dieser Modul wird aus mehreren Teilen aufgebaut (Abb.6.1). Hauptteil dieses Moduls ist der „Optimizer“, der zusammen mit anderen Teilen unter Zuhilfenahme einer Reihe automatisch durchgeführter Simulationsexperimente die optimale Lösung des vordefinierten Fertigungsproblems ausarbeitet. Für die Entwicklung des „Optimizers“ werden genetische Algorithmen als Optimierungsverfahren eingesetzt.

6.2 Die Struktur des Moduls

Das Modul besteht aus einem Computermodell der untersuchten Anlage sowie einer Reihe von Eingabe-, Ausgabe-, Kommunikations- und Analysemodulen. Das Konzept ist in Abb. 6.1 dargestellt.

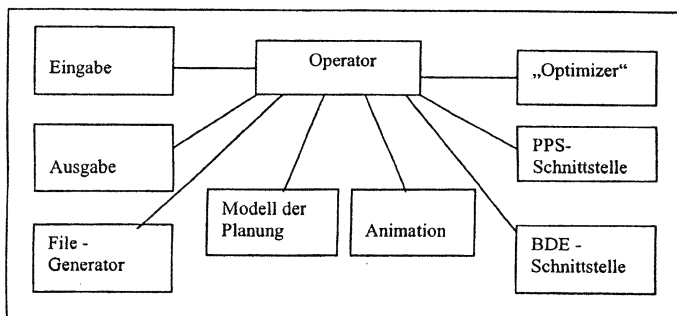


Abb.6.1 Konzept eines intelligenten Moduls für die Leitstandssoftware

Mit Hilfe dieses Moduls kann das Verhalten des Fertigungssystems in Folge der geplanten Maßnahmen (die Einlastung eines Auftrages mit hoher Priorität, die Wegnahme von Maschinen oder Personal aus dem Betrieb, die Änderung der Operationsreihenfolge in

einem bestimmten Auftrag, usw.) untersucht werden. Auf Grund der durch Simulation gewonnenen Daten können Aussagen über die Durchführbarkeit und Konsequenzen der geplanten Maßnahmen getroffen werden.

In Abhängigkeit der Ausbaustufe der CIM-Komponente einer Anlage (PPS (Produktionsplanung- und Steuerung), BDE (Betriebsdatenerfassung), Leitstand) wird das Modul in drei Ausbaustufen implementiert und installiert:

1. *Off-Line Applikation*

Das Instrument arbeitet unabhängig von anderen Anlagekomponenten. Der Werkstattleiter soll mit Hilfe des Moduls seine bisher allein auf Erfahrung basierende Entscheidung verifizieren, die in Frage kommenden Varianten der Fertigungskonfigurationen untersuchen und eine Reihe von Lösungen für mögliche Notsituationen (z.B. Ausfall einer Maschine, Personalmangel) ausarbeiten. Die Eingabe der Parameter erfolgt manuell.

2. *Off-Line Lösung mit integriertem „Optimizer“*

Das rein manuelle Modul wird durch einen auf genetischen Algorithmen basierenden „Optimizer“ ergänzt. Der Werkstattleiter gibt dem Modul den aktuellen Status der Anlage, sowie einen Parametersatz (die Auslastung der Maschinen, die Termintreue, die Kosten der Fertigung, die Durchlaufzeiten, usw.) der im Optimierungsprozeß als Zielfunktion dient ein. Die vom Optimizer vorgeschlagene Lösung kann entweder als Richtlinie für die Ausarbeitung der Arbeitspläne dienen, oder, wenn die entsprechenden Schnittstellen vorhanden sind, für die automatische Erzeugung von Arbeitspapieren nach dem Akzeptieren der vorgeschlagenen Fertigungskonfigurationen verwendet werden.

3. *Ein On-Line Modul für automatisches Reagieren auf IST/SOLL-Abweichungen.*

Das Instrument der zweiten Stufe soll mit einer Reihe von Schnittstellen ausgestattet werden, die es mit der PPS und BDE verbinden. Im Fall einer Störung der realisierten Prozesse soll automatisch eine Suche nach optimalen (annehmbaren) Lösungen gestartet werden.

6.3 Operator

Die Koordination und Verwaltung der Arbeit der einzelnen Module wird vom Operator übernommen. Nicht nur die internen Funktionen und Kommunikationsprozesse des Moduls, sondern auch die Schnittstellen mit der Außenwelt und der an das System angeschlossenen Hardwarekomponenten sind davon betroffen. Die einzelnen Module, die in ihrer Gesamtheit den Modul bilden, werden als unabhängige, selbstständige Programmblöcke aufgebaut, die miteinander mittels gemeinsamer Datenstrukturen (Datenbank) und Files kommunizieren. Die Formen dieser Datenstrukturen und Files werden vom Operator festgelegt, erzeugt und verwaltet. Diese Bauweise des Moduls ermöglicht eine weitgehende Unabhängigkeit und Austauschbarkeit der Module. Dadurch sollen die für die erste Stufe der Entwicklung (Entscheidungshilfe für die Umplanung von Fertigungsprozessen) ausgearbeiteten Ein- und Ausgabemodule vollständig (oder nach geringfügigen Erweiterungen) von der zweiten und dritten Stufe übernommen werden.

6.4 Modell

Die untersuchte Fertigungsanlage wird in Form einer mathematischen Beschreibung des Modells dargestellt. Form und Genauigkeit dieser „Abbildung“ entscheiden in großem Ausmaß über die künftige Einsetzbarkeit des Moduls. Von der Gestalt des Modells hängt aber nicht nur die Richtigkeit der durchgeführten Analysen, sondern auch die Flexibilität, Erweiterbarkeit, Portierbarkeit, Benutzerfreundlichkeit und Arbeitsgeschwindigkeit des Moduls ab. Aus diesem Grund muß dessen Aufbau und Funktionsumfang besonders sorgfältig geplant und realisiert werden. Diese Forderungen schließen sich oft gegenseitig aus.

Der Versuch alle Anlagenelemente und alle internen Verbindungen in dem Modell abzubilden führt zu dessen Überkomplexität.

In diesem Zusammenhang soll ein „Goldener Mittelweg“ gesucht werden, der eine optimale Kombination aller vorher genannten Forderungen und Modellmerkmalen darstellt und den zweckmäßigen Einsatz der Moduls ermöglicht. Dazu dient der „Optimizer“, der als intelligenter Modul in diesem Simulator implementiert wird.

Unsere Modell eines komplexen FFS, wird später gemeinsam mit dem „Optimizer“ erklärt.

6.5 Interfaces (Benutzerschnittstelle)

Die Eingabe- und Ausgabemodule, sowie der Filegenerator bilden die Schnittstellen des Modells mit der Außenwelt. Sie ermöglichen, sowohl den manuellen, als auch den automatischen (in Form von Files) Datentransfer. Kommunikation mit den Datenbanken (SQL-Standard) soll entweder durch Austausch von Files-oder Direkt durch Routinen mit Embedded SQL abgewickelt werden. Unabhängig von der Kommunikationsart (manuell oder File) wird ein besonderes Gewicht auf die Benutzerfreundlichkeit der entwickelten Module gelegt. Sie müssen es erlauben, daß auch Personen, die mit dem Computer oder der EDV nicht sehr vertraut sind, diese Module bedienen zu können.

Der Modul und seine Kommunikationsmodule machen das Eintippen von langen und unverständlichen Befehlen unnötig. Die einzige zukunftsweisende Lösung bilden Graphische Bedienungsoberflächen (GUI- Graphical User Interface).

Ein zusätzlicher Faktor, der für den Einsatz von GUI's spricht, ist die vereinfachte Realisierung von Multitaskingverfahren. Das erlaubt gleichzeitiges Arbeiten mit mehreren Programmen, deren Ablauf parallel in verschiedenen Bereichen des Bildschirms (Windows) kontrollierbar ist. Durch den Einsatz von schnellen Rechnern ist es möglich geworden, gleichzeitig und relativ komfortabel, eine Reihe von Simulationsexperimenten zu realisieren, die Experimentergebnisse zu präsentieren, Daten von der PPS-Datenbank zu holen und die Parameter für das nächste Experiment vorzubereiten.

Eingabe-Modul

Die Aufgabe dieses Moduls liegt in der Bereitstellung aller Funktionen, die der Benutzer für das Setzen des Modul- Parameters benötigt. Dieses Modul kann für drei Zwecke aufgerufen werden:

- Eingabe, Korrektur und Update von Parametern der Fertigungsstrukturen
- Eingabe und Korrektur von Daten für Simulationsexperimente
- Ändern von Parametern während des Simulationsexperiments.

Ausgabe-Modul

Das Ausgabe-Modul ist die zweite Komponente des Dialog-Systems, das den Benutzer mit dem Modell verbindet und hat folgende Aufgaben zu erfüllen:

- die Präsentation des aktuellen Zustandes der Parameter des Fertigungssystems;
- die Durchführung der Auswertung der Ergebnisse der Simulationsexperimente;
- die Präsentation der ermittelten Werte.

Obwohl Animation und Datenweitergabe auch als eine Form der Ausgabe gelten, werden sie, auf Grund ihrer Komplexität und der Vielfalt der zu erfüllenden Aufgaben, als getrennte Module behandelt.

Filegenerator

Der Filegenerator ist einer der wichtigsten Schnittstellen, die das Modul mit der Außenwelt verbinden. Dieses Modul hat eine besondere Bedeutung für die zukünftige Erweiterbarkeit des Modells und die Möglichkeit seiner Anpassung an die gegebenen Betriebsbedingungen. Es soll erlauben beliebige auf Filertransfer basierende, Schnittstellen mit allen damit verbundenen Umrechnungen und Formaten in das Modul einzubauen und richtig zu nutzen.

Der Filegenerator hat in der ersten Entwicklungsphase (Einsatzentscheidungshilfe für die Umplanung von Fertigungsprozessen) zwei Arten von Files zu erzeugen:

- die Ausgabefiles mit der Historie der gewählten Parameter,
- die Statusfiles in denen der jeweilige Status der Simulationsexperimente (Parameter der Fertigung) gespeichert wird.

6.6 Animation

Die Animation kann als eine Art der Ausgabeform gesehen werden und sollte im Ausgabemodul integriert werden. Durch ihre Komplexität und die Vielzahl der gebotenen Funktionen wird sie aber als ein selbständiges Modul behandelt. Sie soll zwei Gruppen von Aufgaben unterstützen:

- das Testen der Anlagenmodelle,
- die Analyse des Anlageverhaltens.

Die Aufgabe des Animationsmoduls soll durch folgende Funktionsblöcke realisiert werden:

- bildhafte Darstellung der gesamten Anlage,
- Bereitstellen der Schaltflächen für die Funktionsaufrufe,
- Zoomen der gewählten Anlagenkomponenten,
- graphische Darstellung der Modellparameter und deren Online-Auswertungen in Diagrammform.

6.7 PPS- und BDE- Schnittstellen

Für den Fall, daß in der modellierten Anlage ein PPS- und/oder BDE- System vorhanden ist, soll das Modul mit den entsprechenden Schnittstellen ausgestattet werden. Im allgemeinen können zwei Varianten von Kommunikationsverfahren klassifiziert werden:

- die Offline-Verbindung in der das PPS-, die BDE- Systemfiles erzeugen, welche die vom Modul benötigten Daten enthalten,
- die Online-Verbindung in der das PPS-System, das BDE- System und das Modul miteinander vernetzt sind, und alle drei Systeme Daten frei miteinander austauschen können.

Aufgrund der Vielfalt der möglichen PPS- und BDE- Varianten soll der Operator imstande sein Daten in Form von vordefinierten Files, gemeinsam benutzten Datenbanken oder programmierbaren Erweiterungen auszutauschen.

6.8 „Optimizer“

Der „Optimizer“ hat die Aufgabe, das Suchen nach einer optimalen (akzeptablen) Lösung zu automatisieren. Diese soll durch die automatische Generierung, Durchführung und Analyse einer Reihe von Simulationsexperimenten realisiert werden. Der Benutzer gibt dem Modul den aktuellen Status der Anlage, sowie einen Parametersatz (die Auslastung der Maschinen, die Termintreue, die Kosten der Fertigung, die Durchlaufzeiten, usw.), der im Optimierungsprozeß als Zielfunktion dient ein. Für die Parameteranalyse werden Genetische Algorithmen eingesetzt. Dieser Prozeß wird so lange wiederholt bis die Zielfunktion, die ihr gestellte (optimale) Größe erreicht. Das Wort „optimal“ soll in diesem Zusammenhang als z.B. „sehr gut“, „zufriedenstellend“ oder „den Erwartungen gerecht,“ verstanden werden.

7. OPTIMIERUNG DER MASCHINENBELEGUNG DURCH GENETISCHE ALGORITHMEN

Das Problem der Maschinenbelegung ist im Allgemeinen NP-vollständig [233], [206]. Das bedeutet: Werden alle Kombinationen an Belegungsmöglichkeiten durchgerechnet, steigt der Rechenaufwand exponentiell mit der Anzahl der planbaren Aufträge. Die Leistungsgrenze des Rechners ist damit rasch erreicht.

Der Einsatz von GA zur Optimierung der Maschinenbelegung ist vielversprechend. Er erlaubt eine effizientere und flexiblere Planung in einem Bereich, der sich wegen seiner Komplexität und der Vielzahl von Restriktionen heuristischen Planungsstrategien oder klassischen Algorithmen im allgemeinen entzieht. Dies gilt um so mehr für sehr spezielle Anwendungsbereiche, die weitere Bewertungskriterien erfordern. Zusätzliche Kriterien bedeuten im GA-Ansatz lediglich eine Erweiterung der Bewertungsfunktion, während eine konventionelle Planungsheuristik unter Umständen völlig neu konstruiert und programmiert werden muß. Ein GA stellt in diesem Sinne ein flexibleres Konzept dar. GA liefern bereits nach relativ kurzer Zeit zulässige Lösungen, welche dann immer weiter verbessert werden können. Um den genetischer Algorithmen beschäftigen zu können braucht man eine Bewertungsfunktion. Die Bewertungsfunktion im Leitstandskonzept ist eine komplexe Funktion, die verschiedene Kriterien berücksichtigen muß. Daher muß zuerst eine einfache Bewertung nach Einzelkriterien erfolgen und dann kann eine gewichtete Gesamtbewertung als Fitneßfunktion dienen. Solche Einzelkriterien im PPS-System können z.B. Termintreue (Einhaltung vorgegebener Solltermine), Rüstzeiten, Auslastung oder sekundärer Kapazitäten (Ressourcen, die neben der Hauptkapazität, z.B. Maschinenkapazität, zur Durchführung eines bestimmten Arbeitsvorganges benötigt werden) sein.

Das Problem der Auftragsreihung ist mit dem TSP in ihrer Bedingungen sehr ähnlich. Es soll eine vordefinierte Menge von Aufträgen realisiert werden, mit der Aufgabe die gesamte Durchlaufzeit zu minimieren, wobei die Realisierungsreihenfolge, die durch die Prioritäten gesteuert wird, geändert werden kann.

In Abb. 7.1 ist ein Struktur der GA-Optimizer gegeben, mit dessen Hilfe die Optimierung der Maschinenbelegung durchgeführt wird.

Die gewählten Kundenaufträge werden einer Anlage zugeordnet (man kann hier auch die Priorität für jeden Auftrag wählen), womit gleichzeitig die operationellen Möglichkeiten und deren zulässige Kombinationen festgelegt sind. Vom Kernsystem kommen die aktuellen Zustände der Subsysteme des FFS. Der Operator des Leitstandes benötigt die Auftragswahlkriterien, die in dieser Simulation teilnehmen werden und ihre Gewichtungskoeffizienten. Aus der Kombination von Prioritäten, Auftragswahlkriterien, Istzustand der Subsysteme des FFS wird ein Modell gebaut, welches als erste

Fitneßfunktion verwendet wird. Dieses Modell soll Konfliktsituationen lösen. Die Expertensysteme sollen die Aufgabe des Algorithmus realisieren. Zielfunktionen zur Reihenfolgeplanung werden durch statische oder dynamische Untersuchungen erreicht. Der Operator initialisiert zuerst eine Population. Dann finden genetische Algorithmen mittels ihrer Operatoren eine Lösung. Mit einer speziellen Schnittstelle kann man auch verschiedene Kriterien während der Simulation verwenden.

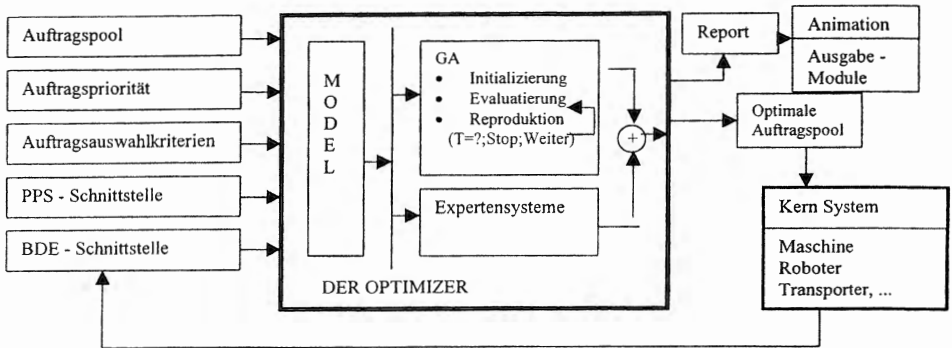


Abb.7.1 Die Struktur dem GA-Optimizer.

In Abb.7.3 ist die implementierte Struktur der genetischen Algorithmen während der Optimierung der Auftragsreihenfolgen gegeben.

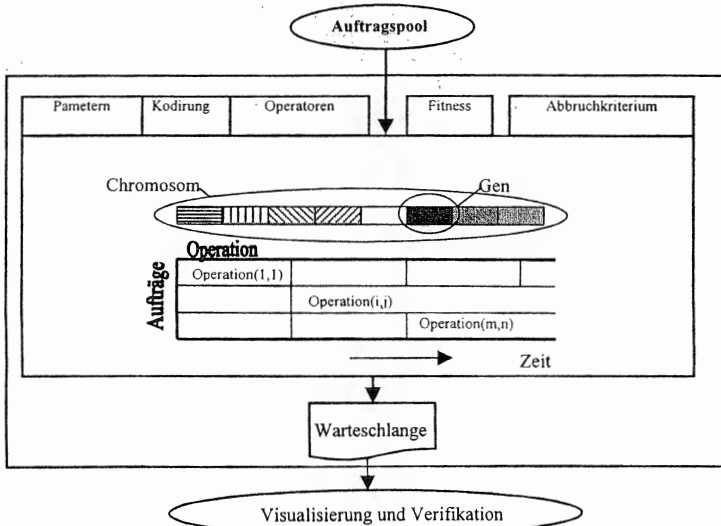


Abb.7.2 Implementierte Struktur der genetischen Algorithmen

Die wichtigsten Teile der genetischen Algorithmen sind: Repräsentation der Syntax der Individuen, Operatoren und Selektion.

7.1 Repräsentation

In den realisierten Untersuchungen besteht ein Chromosom (String) aus einer Reihe von Genen, die jeweils einen der auszuführenden Aufträge darstellen. Die Länge des Chromosoms repräsentiert Anzahl der Aufträge. Die Position des Gens zeigt die Position des Auftrages in der Warteschlange. Im Modell besteht die Beschreibung eines Auftrages aus Produktnummer, Operationsnummer, technische Sequenz des Auftrages, Produktionsalternative (Maschine), Werkstücktyp und Werkzeugtyp (Abb.7.3).

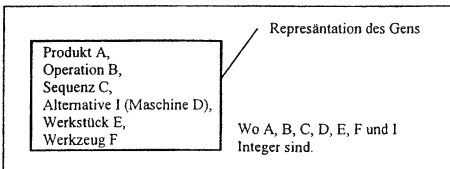


Abb. 7.3 Die Syntax des Gens.

Diese Repräsentation hilft während der Simulation einige Konfliktsituationen zu lösen.

Die *Produktnummer*, *Operationsnummer*, *Werkstücktyp* und *Werkzeugtyp* stellen die direkte Verbindung mit Datenbanken von der Produktionplanung her. Die *technische Sequenz* des Auftrages hilft die technischen Beschränkungen zu lösen (z.B. *Parallelität*) und die *Alternative* zeigt alternative Möglichkeiten einer Auftrag zu produzieren.

z.B. als Codierung sei gegeben.

01 20 22 01 03 02

Damit wird gezeigt, daß der Auftrag zum Produkt 1 gehört. Es handelt sich um die Operation mit der Nr. 20, welche in Maschine Nummer 1 produziert werden kann. Dafür brauchen wir Werkstücktyp 3 und Werkzeugtyp 2.

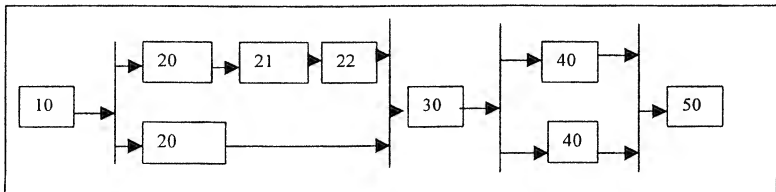


Abb. 7.4 Parallelität

Vor Beginn der Operation 20, z.B. der GA stellt sicher, daß alle Operationen mit niedrigeren Reihenfolgennummern fertiggestellt wurden. Operationen mit gleichen Nummern können gleichzeitig erfolgen (Abb.7.4).

Diese Syntax ermöglicht es dem GA-Optimizer eine direkte Verbindung mit den Datenbanken der Produktionsplanung und mit Istzuständen der Subsysteme des FFS herzustellen.

7.2 Die Operatoren der GA

Die Operatoren der GA bilden eine neue potentielle Lösung für die nächste Generation. Die wichtigsten Operatoren genetischer Algorithmen sind Selektion, Crossover und Mutation.

7.2.1 Selektion

Selektion ist ein Prozeß, in dem einzelne Individuen eine ihrer Fitness entsprechende Chance bekommen sich in der nächsten Generation fortzupflanzen. Je höher die Fitnessfunktion ist desto mehr Chance hat dieses Individuum in die nächste Generation zu selektieren.

Vier Selektionsmethoden stehen hier zur Auswahl: (1) *roulette-wheel*, (2) *random selection*, (3) *deletion and* (4) *duplicate selection*.

Roulette-wheel

Die einfachste Möglichkeit den obengenannten Gedanken zu realisieren ist das „roulette wheel“.

Je größer der Fitnesswert eines Individuums ist, desto größer ist sein Anteil am „roulette wheel“. Ein besseres Individuum bekommt pro Durchlauf mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als ein schlechtes Individuum einen Nachkommen zugeteilt. Dieser Vorgang wird solange durchgeführt bis alle Plätze für neue Individuen vergeben sind.

Random selection

Zwei Individuen werden zufällig selektiert. Das Individuum mit höherer Fitness wird in die nächste Population selektiert.

Dieser Vorgang wird solange durchgeführt, bis alle Plätze für neue Individuen vergeben sind.

Deletion

Bei der *Deletion*- Methode werden bessere Individuen in die neue Population aufgenommen. Die anderen werden zufällig selektiert.

Duplicate

Bei *Duplicate*-Methode wird die beste Kombination der Aufträge zweimal in der nächste Population ohne Änderungen gebracht und die schlechteste Kombination wird gelöscht.

7.2.2 Skalierung der Fitneßwerte

Die Fitneßwerte einer Population liegen oft weit auseinander. Wenn wir keine Skalierung der Fitneßwerte machen, um ein gewisses Niveau an Konkurrenz zwischen den Individuen einer Population sicherzustellen, würde es schon nach wenigen Generationen zu einer Dominanz einiger weniger Individuen kommen. Der Fitneßwert ist proportional zum Erwartungswert für die Anzahl an Nachkommen, die einem Individuum in der Selektion zugewiesen werden. Um nun eine frühzeitige Konvergenz zu vermeiden, haben wir hier 2 Skalierungsmethoden implementiert: *Linear scaling* und *sigma transaction*. Mehr über diese Methoden in Kapitel 5.

7.2.3 Crossover Operatoren

Crossover ist ein rekombinatorischer Operator, der zwei Individuen benötigt und als Ergebnis zwei neue Individuen liefert. Es soll eine vordefinierte Menge von Aufträgen realisiert werden, mit der Aufgabe eine Zielfunktion zu realisieren, wobei die Realisierungsreihenfolge, die durch Prioritäten gesteuert wird, geändert werden kann.

Die Lösung von der Probleme der Maschinebelegung wie auch von TSPs kann mit Hilfe von Reordering Operators (RO), die in sich Eigenschaften von Inversionsoperatoren und Crossover verbinden, gefunden werden. Zu dieser Gruppe gehören vier Typen von Operatoren:

- der Edge NN Operator
- der Order Crossover (OC) Operator
- der Partially Matched Crossover (PMC) Operator
- der Cycle Crossover (CX) Operator

die in unsere GA implementiert werden.

Der Edge NN Operator:

Aus zwei Eltern, E1 und E2, wird ein Nachkomme, N, erzeugt:

- a. Man bestimme von jedem Gen i alle Nachbargene $n(i)$ beider Eltern und sortiere sie nach der Entfernung. Alle Nachbargene, die in beiden Eltern vertreten sind, bekommen ein negatives Vorzeichen und werden vorrangig behandelt.

$$E1 = (2 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

$$E2 = (4 - 5 - 6 - 3 - 2 - 7 - 1)$$

$$i = 1: n(1) = 7, 6, 7, 4; \text{ sortiert: } -7, 6, 4$$

$$i = 2: n(2) = 4, 3, 3, 7; \text{ sortiert: } -3, 4, 7$$

$i = 3: n(3) = 2, 5, 6, 2; \text{sortiert: } -2, 5, 6$
 $i = 4: n(4) = 6, 2, 1, 5; \text{sortiert: } 5, 6, 2, 1$
 $i = 5: n(5) = \dots$

- b. Wähle ein Gen aus dem ersten Elternchromosom aus:

$$E1 = (2 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

- c. Die restlichen Gene werden anhand der sortierten Listen bestimmt. Sollte für ein Gen bereits die komplette Liste abgebaut sein, so wird das nächstliegende Gen (Entfernung der Orte) gewählt:

$$N = 3; \text{first}(n(3)) = 2$$

$$N = 3-2; \text{first}(n(2)) = 4 \text{ (Gen 3 ist schon im Nachkommen vorhanden)}$$

$$N = 3 - 2 - 4; \text{first}(n(4)) = 5$$

$$N = 3 - 2 - 4 - 5; \text{first}(n(5)) = \dots$$

Der OC Operator (Order Crossover):

Aus zwei Eltern, E1 und E2, werden zwei Nachkommen, N1 und N2, erzeugt:

- a. Wähle einen Teil aus dem Elternchromosom aus, der direkt in die Nachkommen kopiert wird:

$$E1 = (2 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

$$E2 = (4 - 5 - 6 - 3 - 2 - 7 - 1)$$

$$N1 = (x - x - x - 3 - 2 - 7 - x)$$

$$N2 = (x - x - x - 7 - 1 - 6 - x)$$

- b. Die restlichen Gene werden von der Eltern übernommen, wobei schon vorhandene Gene weggelassen werden. Die Ersetzung beginnt hinter den übernommenen Chromosomenstücken:

$$N1 = (5 - 1 - 6 - 3 - 2 - 7 - 4)$$

$$N2 = (5 - 3 - 2 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

Der PMC-Operator (Partially Mapped Crossover):

Aus zwei Eltern, E1 und E2, werden zwei Nachkommen, N1 und N2, erzeugt:

- a. Wähle einen Teil aus den Elternchromosomen aus, der direkt in die Nachkommen kopiert wird:

$$E1 = (2 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

$$E2 = (4 - 5 - 6 - 3 - 2 - 7 - 1)$$

$$N1 = (x - x - x - 3 - 2 - 7 - x)$$

$$N2 = (x - x - x - 7 - 1 - 6 - x)$$

- b. Es werden so viele Gene wie möglich von den Eltern übernommen (Position beibehalten):

$$N1 = (x - x - 5 - 3 - 2 - 7 - 6)$$

$$N2 = (4 - 5 - x - 7 - 1 - 6 - x)$$

- c. Die restlichen Gene werden von links nach rechts ausgefüllt:

$$N1 = (1 - 4 - 5 - 3 - 2 - 7 - 6)$$

$$N2 = (4 - 5 - 3 - 7 - 1 - 6 - 2)$$

Der CX Operator (Cycle Crossover):

Aus zwei Eltern, E1 und E2, werden zwei Nachkommen, N1 und N2, erzeugt:

- a. Wähle ein Gen aus dem ersten Elternchromosom aus und ermittle das passende Gegenstück im zweiten Elternchromosom. Suche dieses Gen wiederum in E1 und führe dies so lange fort, bis sich ein Kreis gebildet hat:

$$E1 = (2 - 3 - 5 - 7 - 1 - 6 - 4)$$

$$E2 = (4 - 5 - 6 - 3 - 2 - 7 - 1)$$

Kreis: (3 - 5 - 6 - 7 - 3)

- b. Die Gene, die im Kreis vorhanden sind, werden von den Eltern übernommen:

$$N1 = (x - 3 - 5 - 7 - x - 6 - x)$$

$$N2 = (x - 5 - 6 - 3 - x - 7 - x)$$

- c. Die restlichen Gene werden vom zweiten Elternteil übernommen:

$$N1 = (4 - 3 - 5 - 7 - 2 - 6 - 1)$$

$$N2 = (2 - 5 - 6 - 3 - 1 - 7 - 4)$$

7.2.4 Mutation

Mutation arbeitet ähnlich wie Crossover, aber nur mit einem Individuum.

Hier sind implementiert zwei mutation Methoden: Order-based Mutation (OM) und Position-based Mutation (PM).

Order-based Mutation (OM)

Zwei Gene werden zufällig in einem Individuum selektiert, um ihre Position zu wechseln.

$$E1 = (4 - 3 - 5 - 7 - 2 - 6 - 1)$$

Zufällig sind 3 und 2 selektiert; so der Nachkomme lautet:

$$N1 = (4 - 2 - 5 - 7 - 3 - 6 - 1)$$

Position-based Mutation (PM)

Zwei Gene werden zufällig in einem Individuum selektiert. Das zweite Gen wird vor dem ersten positioniert.

$$E1 = (4 - 3 - 5 - 7 - 2 - 6 - 1)$$

Zufällig sind 3 und 2 selektiert; so der Nachkomme lautet:

$$N1 = (2 - 4 - 3 - 5 - 7 - 6 - 1)$$

7.3 Fitneßfunktion

Hier werden zwei Fitneßfunktionen verwendet werden.

Die erste Fitneßfunktion ist ein gewichtete Gesamtbewertungsfunktion. Die Bewertungsfunktion im Leitstandskonzept ist eine komplexe Funktion, die verschiedene Kriterien berücksichtigen muß. Daher muß zuerst eine einfache Bewertung nach Einzelkriterien erfolgen, und dann kann eine gewichtete Gesamtbewertung als Fitneßfunktion dienen. Solche Einzelkriterien sind z.B. Priorität, Solltermin, Starttermin, Rüstzeit, Istzustand des FFS, u.a. Die Gesamtbewertung wird in Form einer mathematischen Beschreibung des Modells dargestellt. Von der Gestalt des Modells hängt aber nicht nur die Richtigkeit der durchgeführten Analysen, sondern auch die Flexibilität, Erweiterbarkeit, Portierbarkeit, Benutzerfreundlichkeit und Arbeitsgeschwindigkeit des Schedulers ab. Aus diesem Grund muß dessen Aufbau und Funktionsumfang besonders sorgfältig geplant und realisiert werden. Das Erreichen all dieser Forderungen ist sehr schwierig, da sich manche von ihnen gegenseitig ausschließen.

Der Versuch alle Anlagenelemente und alle internen Verbindungen im Modell abzubilden, führt zu dessen Überkomplexität. Mit Hilfe dieses fertigen Modell (7.1), dass absolute Optimum zu finden würde zu nehmen, sodaß die gewonnen Daten viel zu spät stünden, was wiederum den Scheduler unbrauchbar macht. In diesem Zusammenhang soll ein „Goldener Mittelweg“ gesucht werden, der eine optimale Kombination von allen vorher genannten Forderungen und Modellmerkmalen und den zweckmäßigen Einsatz des GA-Optimizers ermöglicht.

In unserem Modell, das für ein FFS für Drechteile erstellt wird, werden 39 Auswahlkriterien sowie die Informationen vom Ist-Zustand des Kernsystems implementiert.

$$\max/\min(\text{SUM}_{i=1}^n \text{kij} * \text{Ki}) \quad (7.1)$$

wo sind:

k_{ij} = Gewichtungsfaktor;

K_i = Kriteriengewichtung;

$i = \{1, \dots, n = p+r+s \text{ (PrioritÄtskriterien+Auftragswahlkriterien+Kernsystemkriterien)}\}$

$p = 1, \dots, 9$ – PrioritÄtskriterien;

$r = 1, \dots, 20$ (von 39 gesamte) – Auftragsauswahlkriterien

$s = \text{Kernsystemkriterien}$

Die zweite Fitneßfunktion wird eine Zielfunktion sein.

Es gibt verschiedene Zielfunktionen, die man als Fitneßfunktion verwenden kann, z.B.:

- die Minimierung der gesamten Durchlaufzeit (FDGZ)

$$\text{FDGZ} = \min \sum T_{ij}, \quad (7.2)$$

- die Balancierung der Maschinen (FBM)

$$\text{FBM} = \min \frac{\sum(\sum T_{ij})}{n} \quad (7.3)$$

n -nr. der Maschinen,

- die Minimierung der Umrüstzeit (FUZ),

$$\text{FUZ} = \min \sum T_{ijk}, \quad (7.4)$$

- die Minimierung des Makespan

Die Produktion des letzten Auftrages so früh wie möglich zu realisieren.

- die Minimierung der Produktionskosten (FPK)

$$\text{FPK} = \min \sum C_{ij}, \quad (7.5)$$

oder

- eine Funktion als Linearkombination von einzeln Zielfunktionen (FGF).

$$\text{FGF} = \min(\alpha_1 * F_1 + \alpha_2 * F_2 + \alpha_3 * F_3 + \alpha_4 * F_4) \quad (7.6)$$

7.4 Abbruchkriterium

Es ist sehr wichtig ein Abbruchkriterium zu definieren, mit dem man die Simulation abbrechen.

Als Abbruchkriterien kann man die Generationsnummer und ein Zeitintervall verwenden.

Im ersten Fall legt der Operator vor Beginn der Simulation eine vordefinierte Anzahl von Generationen fest. Im zweiten Fall legt er die Dauer der Simulation durch Vorgabe einer

Intervallzeit fest. Das letzte Kriterium kann man für eine statische wie auch für eine dynamische Simulation verwenden.

7.5 Populationsgröße

Die Populationsgröße wird vom Operator nach seiner Erfahrung gewählt.

- Je größer die Anzahl der Individuen in der Population ist, desto länger dauert die Simulation.
- Je größer die Anzahl der Individuen in der Population ist, desto mehr Kombinationen gibt es zwischen den Individuen.
- Wenn die Populationsgröße sehr groß ist, kann es passieren, daß die Lösung sehr weit vom absoluten Optimum entfernt ist.

8. IMPLEMENTIERUNG EINES INTELLIGENTEN SOFTWAREMODULS FÜR SIMULATIONSBASIERTES OPTIMALES SCHEDULING

In diesem Kapitel wird die Funktionalität des „Optimizers“ erklärt. Er wird mit Hilfe der Programmierungssprache Delphi 4 realisiert.

8.1 Algorithmen des „Optimizers“

Der Algorithmus des „Optimizers“ besteht aus folgenden Schritten:

1. Kundenaufträge einladen
2. Abholen aller relevanten Daten von der Stammdaten
3. Online- Verbindung mit dem Kernsystem herstellen
4. Wählen der gewünschten Kriterien und ihrer Gewichtungsfaktoren
5. Berechnung der Gesamtbewertung für jeden Auftrag
6. Wählen der gewünschten Zielfunktion als Fitneßfunktion, die gewünschten Operatormethoden und das Abbruchkriterium
7. Initialisierung der neuen Population
8. Crossover
9. Mutation
10. Sortieren der Aufträge nach der Gesamtbewertung
11. Berechnung der Fitneßfunktion
12. Berechnung der relativen Fitneßfunktion
13. Selektion
14. In erster Position ohne Veränderung bleibt immer die beste Population
15. Grafische Darstellung der Fitneß (Maksimum, Minimum, Mittelwert)
16. Wiederholung der Punkte 8-15, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist
17. Grafische Darstellung des Gantt- Diagramms für die beste Kombination

Die gewünschte Information der Simulation für eine spätere Analyse wird in eine Datei zu gespeichert.

8.2 Datenstruktur

In Abb. 8.1 ist die Struktur der Informationen (Dateien), die während der Simulation für die Optimierung der Reihenfolgeplanung verwendet werden, dargestellt.

Während der Konfigurierung der Datenbanken haben wir immer aufpasst, daß die Strukturen so einfach wie möglich werden, jedoch schon mit allen Informationen, die wir während der Optimierung brauchen. Diese Datenbank wurde in MS - Access realisiert. Grund dafür war, daß die meisten Firmen in der Planungsabteilung oder in der Produktionsvorbereitung für die

Datenbearbeitung MS-Access und MS-Excel verwenden. MS-Access ist kompatibel mit anderen Softwareprodukten zur Datenbearbeitung.

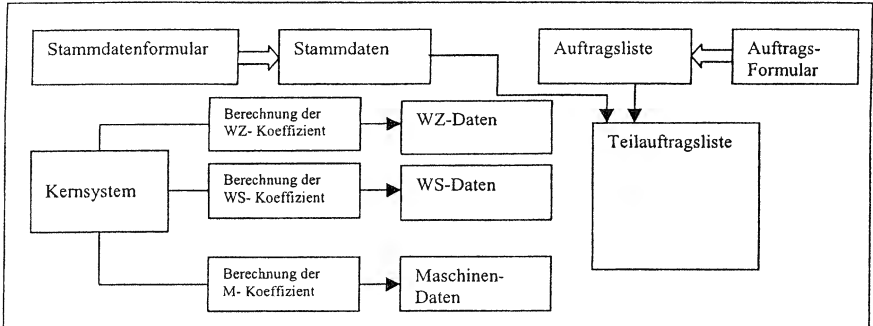


Abb. 8.1 Datenstruktur.

Die Hauptdaten sind: Auftragsliste, Teilauftragsliste, Stammdaten und Daten für den aktuellen Stand des Kernsystems (Abb. 8.2).

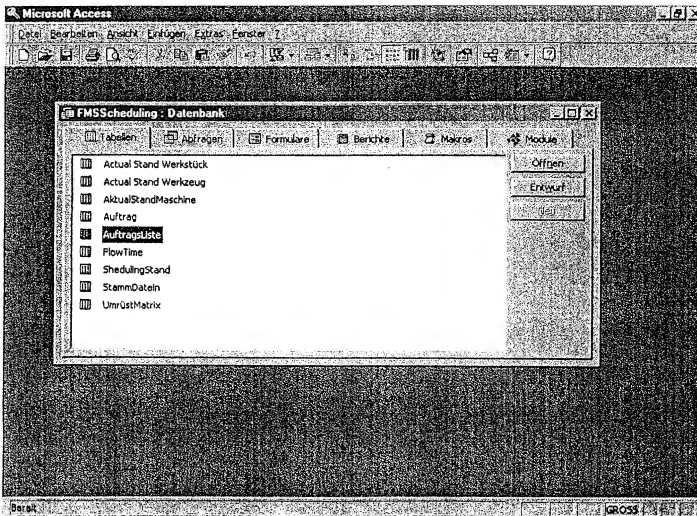


Abb. 8.2 Die Hauptdaten der Datenbank.

8.3 Stammdaten

Die Stammdaten geben uns alle technologischen Informationen über Produkte, die bis jetzt bei der Firma produziert wurden. Wenn ein neues Produkt in der Firma hergestellt werden

soll, dann werden seine technologischen Daten über ein Stammdatenformular in die Stammdaten eingebracht (Abb.8.3).

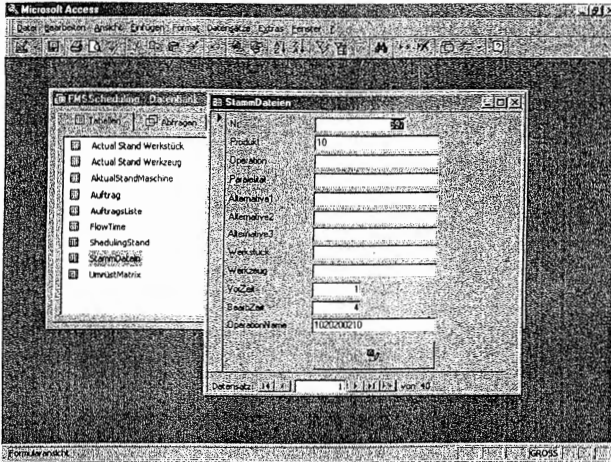


Abb.8.3 Stammdaten und Stammdatenformular.

8.4 Auftragsliste

In der Teilauftragsliste werden die Informationen über Produktname, Menge, Starttermin, Endtermin und Prioritäten ein, gegeben (Abb.8.4).

Die Auftragsliste kommt aus der Planungsabteilung. Wir können aber auch hier alle Daten direkt eingeben, wenn es erforderlich ist. Wenn ein neues Produkt kommt, dann gibt es die Möglichkeit direkt dieses Produkt mit allen Informationen aus der Auftragsliste einzugeben.

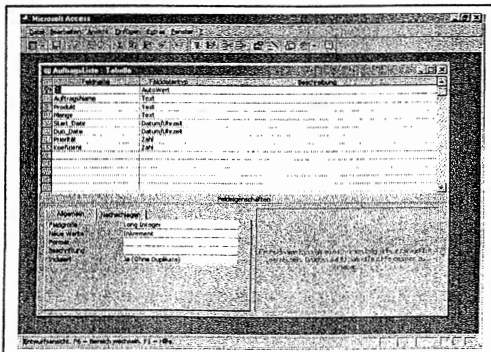


Abb.8.4 Auftragsliste

8.5 Teilauftragsliste

Die Teilauftragsliste wird mit Informationen aus den Stammdaten und der Auftragsliste aufgebaut. Dort werden alle wichtigsten Informationen, die für die Optimierung erforderlich sind, eingetragen. D.h. alle Informationen während der Optimierung werden aus dieser Dateien abgeholt, außer den Daten für den aktuellen Stand (Abb.8.5).

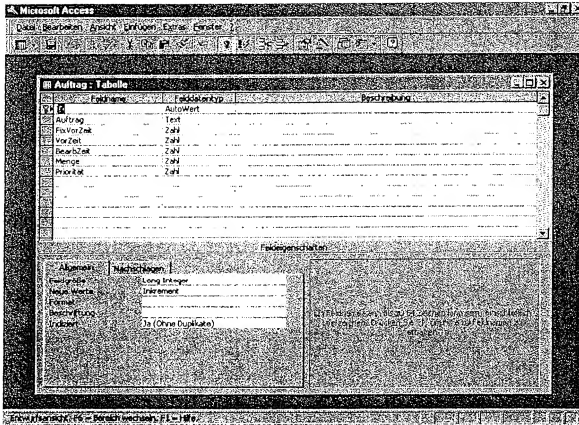


Abb.8.5 Teilauftragsliste.

8.6 Koeffizient des IST- Zustandes

Diese Dateien informieren durch einen Koeffizient über den aktuellen Stand des Kernsystems (Maschine, Werkstücktransport, Werkzeug, ...) informieren (Abb.8.6).

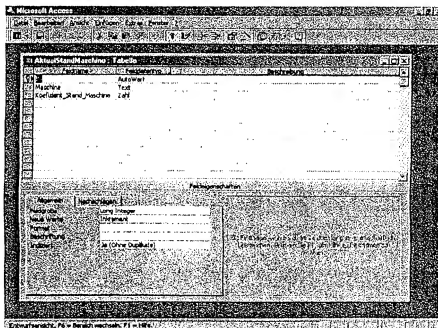


Abb.8.6 Aktuellenstandskoeffizient.

Dieser Koeffizient wird in einem Echtzeitprozessor gerechnet und informiert, ob die Ressourcen in Betrieb sind (wie lange sie besetzt sind) oder ob sie außer Betrieb sind. Diese Informationen werden so geregelt:

- wenn z.B. die Maschine frei ist, dann ist der Koeffizient Null,
- wenn z.B. die Maschine momentan besetzt ist, dann ist der Koeffizient gleich dem Relativwert des Zeitintervalls bis dieser Auftrag (ab jetzt) fertig ist. z.B. Maschine 1 wird noch 20 Minuten sein. Der Koeffizient $K1 = (20/60) * 100 = 33,3$.
- Wenn aber z.B. die Maschine außer Betrieb ist, dann nimmt der Koeffizient den Wert 1000 an.

Dieser Koeffizient reguliert während des Aufbaus der Warteschlange gemeinsam mit anderen Koeffizienten die Reihenfolge der Teilaufträge, bzw. löst er die Konfliktsituationen. Sie nehmen direkt in der Gewichtung der Gesamtfunktion teil. Für jede Generation werden dadurch die aktuellen Informationen in das Modell eingebracht.

Der Echtzeitprozessor (z.B. Prozessor NI3333 von National Instruments) bietet die Möglichkeit in relativ kurzer Zeit über den aktuellen Stand des Systems zu informieren (Online Simulation). In einer Offline Simulation werden die Informationen des aktuellen Standes nur am Anfang der Simulation eingebracht und bleiben bis aus Ende oder werden überhaupt nicht ins Modell eingebracht. Das führt natürlich zu einem schlechteren Ergebnis.

8.7 Verbindung zwischen Datenbanken und „Optimizer“

Die Verbindung wird automatisch durch „Data Source“ zwischen Datenbanken und „Optimizer“ realisiert (Online), obwohl in vielen Fällen wird uns hier auch der „Data Client Server (DCS)“ helfen. Der DCS speichert die Informationen von Datenbanken in dynamischen Memoiren innerhalb des „Optimizers“ und in dieser Form werden die Suchwege für die Information verkürzt, d.h. die Geschwindigkeit des „Optimizers“ wird vereinfacht. Natürlich werden für jede neue Simulation die aktuellen Informationen aus den Datenbanken mit Hilfe des DCS in die dynamische Memoiren eingebracht.

In Abb.8.7 wird gezeigt die Verbindung zwischen Datenbanken und „Optimizer“ dargestellt. Der Operator kann in diesem Fenster immer auf die Dateien zugreifen und diese ändern (z.B. die Priorität der Teilaufträge modifizieren).

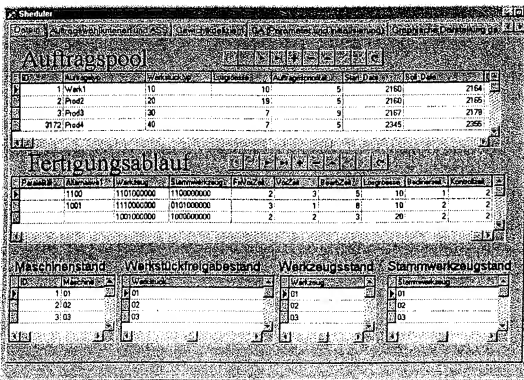


Abb.8.7 Die Verbindung zwischen Datenbanken und „Optimizer“.

Die weiteren Informationsverbindungen mit dem „Optimizer“ werden entweder manuell oder online gemacht. Hier entscheidet der Operator.

8.8 Auswahlkriterien

Die Nummer der Kriterien, die während der Optimierung im Modell teilnehmen, wird vom Leitstandspersonal entscheiden. Der Operator wählt diese Kriterien. In Abb. 8.8 sind die wichtigsten Kriterien angeführt. D.h. er kann alle oder nur ein paar Kriterien wählen, aber nicht gleichzeitig alle Unterkriterien, die innerhalb eines Kreises sind. Hier werden auch die Aktuellenstandskriterien gewählt. Wenn aber der Operator nicht diese Kriterien wählt, dann wird die Simulation selbstverständlich eine Offline- Simulation sein, ohne Informationen vom Kernsystem.

In Abb.8.8 sind die Auswahlkriterien und Aktuellenstandskriterien, die im „Optimizer“ verwendet werden, angegeben.

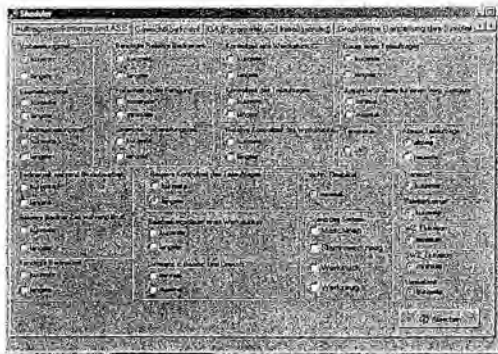


Abb. 8.8 Auswahlkriterien.

8.9 Kriteriengewichtung

Der nächste Schritt ist die Gewichtung der Kriterien. Diese Entscheidung wird wieder vom Operator gemacht. Die Gewichtung erfolgt für die Kriteriengruppe, z.B. Zeitfaktorgewicht, Prioritätsfaktorgewicht, Lieferungstermingewicht, u.a. Diese Gewichtungsfaktor ist als Rapport zwischen Kriteriengruppe zu sehen, bzw. als Priorität der Kriterien. Zusammen mit allen gewählten Kriterien bildet eine Linearkombination $((\alpha_1 * K_1 + \alpha_2 * K_2 + \alpha_3 * K_3 + \dots + \alpha_n * F_n))$. Er wird später als erste Fitneßfunktion später verwendet. Diese Linearkombination ergibt eine Konstante. Diese Konstante einschneidet welcher Teilauftrag in seiner Gruppe an der erste Stelle der Warteschlange kommt. Der Teilauftrag mit einem größeren Gewicht hat mehr Chance im Normalfall früher zu produziert zu werden.

Es kann vorkommen, daß infolge der Störung eines anderen Teilauftrages ein Teilauftrag nicht fertiggestellt wird und warten muß bis die Störung behoben wird, obwohl er unter allen Teilaufträgen den höchsten Gewichtungsfaktor hat.

In Abb.8.9 wird das Fenster, wo man die Gewichtung der Kriterien entscheiden kann, gezeigt.

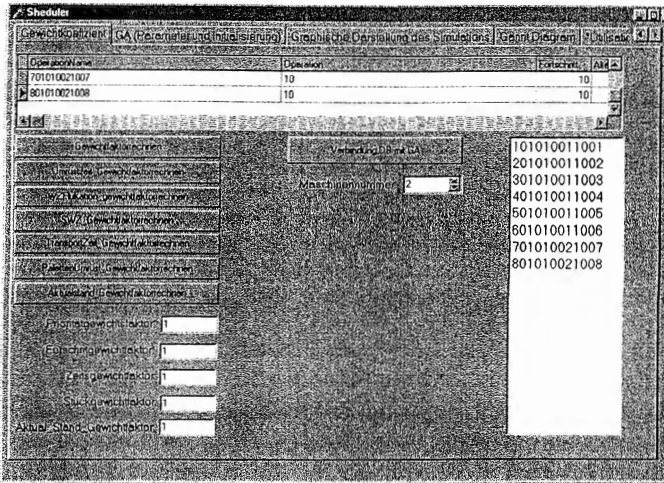


Abb.8.9 Gewichtung der Kriterien.

8.10 „Optimizer“

Der „Optimizer“ (Abb.8.10) bildet zuerst eine Population von Teilaufträgen. Dann wird mittels der Operatoren und der Fitneßfunktionen versucht ein optimale Reihenfolge der Teilaufträge zu finden, bzw. die optimale Warteschlange für jede Maschine gebildet.

Die Parameter der genetischen Algorithmen (die Nummer der Population, die Abbruchkriterien, Crossover- Operatoren, Mutations- Operatoren, Selektions- Operatoren, Fitneßfunktionen, werden am Anfang von Leitsands (physische Person!) gewählt bzw. es stellt sich nach einem Experiment ein Operator (siehe oben) als beste Kombination heraus. Aber das entscheidet wider der Leitstandsoperator.

Die Ergebnisse der Simulation werden am Ende gezeigt. Die Abbruchkriterien können sein:

- die Nummer der Generation, d.h. daß die Simulation läuft so lange bis diese Nummer erreicht ist.
- das Zeitintervall, d.h. die Simulation wird beendet nach dieser Zeitintervall. Das Letzte Abbruchkriterium gibt die Möglichkeit für eine Onlinesimulation, d.h. immer nach dem Zeitintervall gibt es ein Ergebnis. Danach läuft die nächste Simulation ohne Unterbrechung mit immer neue Aktuellenstandsinformationen weiter sowie weitere neue Teilaufträge, wenn es sie gibt.

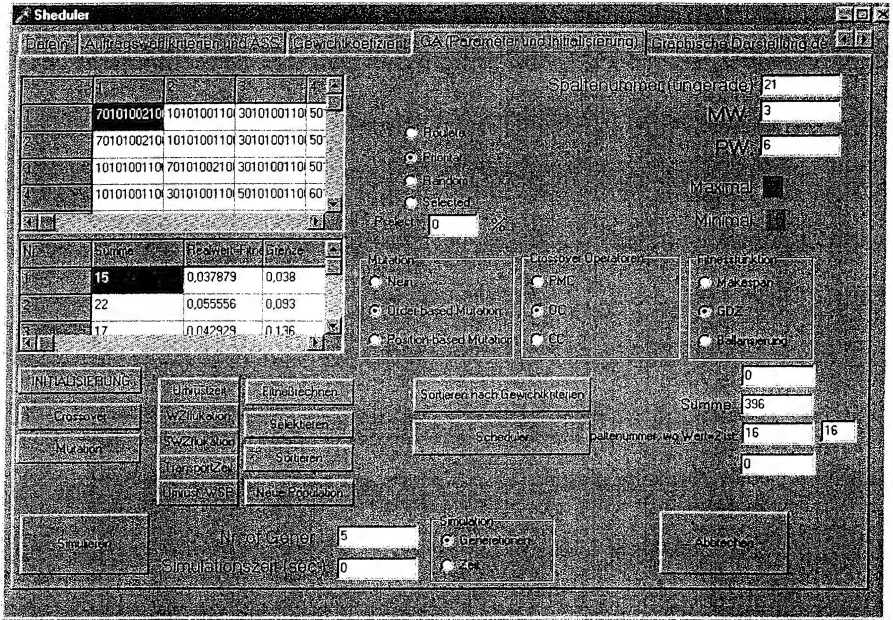


Abb.8.10 „Optimizer“

Dieser „Optimizer“ wird immer während der Simulation Parallelität, Priorität, Überlappung, Grenze und viele andere Dinge berücksichtigen (mehr darüber in Kap.7).

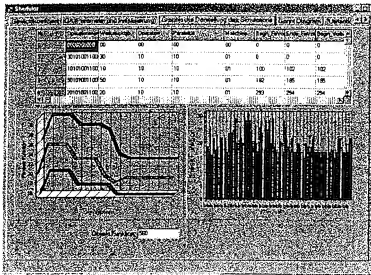
8.11 Graphische Darstellung der Simulation

Während der Simulation wird auch eine graphische Darstellung der Fitneßfunktion gegeben. Es wird Maximum, Minimum und Mittelwert der Gütefunktion für jede Generation angegeben (Abb.8.11a).

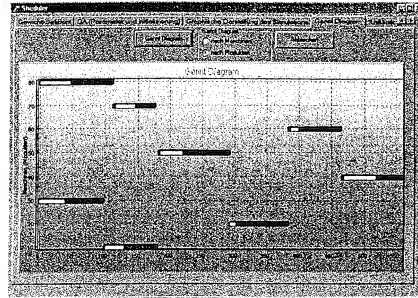
8.11.1 GANNT DIAGRAMM

Die Warteschlange der Teilaufträge wird graphisch im Gantt-Diagramm dargestellt (Abb.8.11b). Es gibt zwei Möglichkeiten die Warteschlange zu bilden:

- nach Maschinen
- nach Aufträgen



a.)



b.)

Abb.8.1. Graphische Darstellung der Simulation.

Die Zeitintervalle werden in drei Gruppe aufgeteilt (Abb.8.12):

- Zeitintervall, welches die Umrüstzeit repräsentiert (T_F),
- Zeitintervall, welche die Vorbereitungszeit der Maschine ohne Werkstück repräsentiert (T_V),
- Zeitintervall, welches die Bearbeitungszeit des Teilauftrages in einer Maschine repräsentiert (T_B).

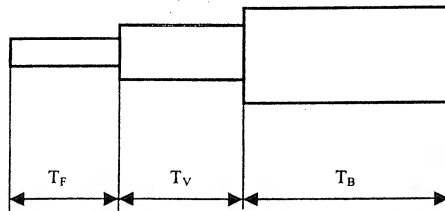


Abb.8.11 Der Zeitintervall der Teilaufträge.

Als Sequenzalgorithmen für die Konstruktion des Gantt- Diagramms wird das „Simulation-Based Sequencing“ verwendet.

Diese Methode ist sehr attraktiv und flexibel für die Konstruktion des Scheduling.

9. STUDIENFALL

1. Beispiel

Optimierung der Reihenfolgeplanung der flexiblen SMD-THT Linien bei der Firma Siemens AG in Wien/Erdberg

Um die Untersuchung des Verhaltens der Zielfunktion zu ermöglichen, wird ein Modell der Fertigungsanlage gebaut. Die im Modell abgebildeten Anlagenelemente können in drei Gruppen aufgeteilt werden:

1. Beschreibung der Fertigungsanlage (Ressourcen),
2. Definitionen der Fertigungsprozesse,
3. Charakteristika der Aufträge.

Die *Fertigungsanlage* besteht aus 10 FFS-Linien die Bestückung von Leiterplatten. Jede Linie besteht aus: Eingabestation, Siebdruck, Kleberstation, Bestückstation, Thermostation, Ausgabestation.

Die theoretische Kapazität dieser Linien ist von 25000 bis 32000 Bestückerlemente pro Stunde.

Für die Untersuchungszwecke wurden 200 *Fertigungsprozesse* definiert.

Charakteristika der Aufträge.

Wir haben 200 Aufträge. Jeder Auftrag besteht aus Auftragsnummer, Werkstücktyp, Werkstückanzahl und der Priorität.

Im Standardfall wird die bereits als Ausgangspopulation definierte Gruppe nun 20 Chromosomen (je mit 200 Genen), die mit Hilfe eines Zufallsgenerators erstellt wurden verwendet. Von dieser Population ausgehend wurden mit Hilfe des „Optimizers“ fünf Generationen untersucht, welche Fortgang durch Reproduktion und *cycle crossover* realisiert wurde. Um unbeeinflusste Ergebnisse zu bekommen, wurde in dieser Untersuchungsserie die Mutation nicht eingesetzt. Die Resultate der Simulationsexperimente sind auf Abb.9.1 dargestellt.

Die in der ersten Generation zu beobachtete breite Streuung der Durchlaufzeit der zufällig zusammengestellten Prioritätskonfiguration, beträgt 42,08 Stunden und erstreckt sich von 1963,1 bis 1920,05 Stunden. Diese Differenz, die mehr als eine Woche Arbeitszeit der gesamten Anlage bedeutet, zeigt welches Verbesserungspotential in der Optimierung der Auftragsreihung vorhanden ist. Mit dem Gang der Generationen sinkt diese Differenz und

erreicht bereits in der Generation 5 den Wert von 12,45 Stunden. Diese fällt sogar auf 7,35 Stunden, wenn die ohnedies ausscheidende Ausreißer nicht berücksichtigt werden. Ähnlich sinkende Trends zeigen die Verläufe der Maxima, der Mittelwerte und der Standardabweichungen von Mittelwerten.

Extremwerte der CX-Untersuchung (Normale Case, 5 Generationen,
Population von 20 Chromosome mit 200 Gene

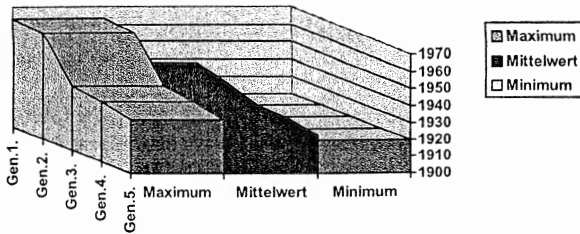


Abb.9.1.

Die realisierten Experimente zeigen, daß sich genetische Algorithmen in der Optimierung der Auftragsabwicklung bewähren.

2. Beispiel

Vergleich der GA-Operatoren

Um die günstigste Kombination von GA-Operatoren während ihrer praktischen Anwendung zu finden, ist es hilfreich die GA-Operatoren zu vergleichen.

GA-Operatoren

Die Operatoren genetischer Algorithmen schaffen ein neues Lösungspotential. Die wichtigste Operatoren der genetischen Algorithmen sind: *Selektion*, *Crossover* und *Mutation* (mehr darüber in Kap. 5 und 7).

Experiment

In diesem Experiment gibt es 40 Aufträge und 6 Maschinen. Die erlaubten Aufträge Kombinationen von Aufträgen sind vorher bestimmt und sie haben verschiedene Prioritäten.

Informationen bezüglich Priorität, Produkte und andere wichtige Stammdaten können direkt aus der Datenbasis bezogen werden. Als Fitnessfunktion wird die Minimierung der Gesamtdurchlaufzeit verwendet.

Hier werden diese Operatortechniken verglichen:

- Selektion:
 - *roulette-wheel*
 - *random selection*
 - *deletion*
 - *duplicate selection*
- Crossover:
 - *order crossover*
 - *partially matched crossover*
 - *cycle crossover*
- Mutation:
 - *order-based mutation*
 - *position-based mutation*

Die Parameter für die genetischen Algorithmen sind in Tabelle 9.1 zusammengestellt..

Parameter	Description	Wert
AI	Anzahl von Individuen	30
PS	Selektionsrate	0.4
PC	Crossoverrate	0.8
PM	Mutationsrate	0.4

Table 9.1 Die Parameter der GA

Als Abbruchkriterien für das Experiment dienen:

- die Anzahl der zu durchlaufenden Generationen, und
- das Versuchszeitintervall.

Das Ziel dieses Experiment ist es jene Kombination von mit der das beste Ergebnis von Operatortechniken zu finden mit der das beste Ergebnis in kürzeste Zeit gefunden wird.

Ergebnis

Sämtliche Kombinationen zwischen den einzelnen Operatortechniken wurden erprobt und die Ergebnisse vielfach getestet.

Die Kombination zwischen *order crossover*, *order-based mutation* und *roulette-wheel selection* Technik haben die besten Ergebnisse in kurzer Zeit ergeben (Abb. 9.2).

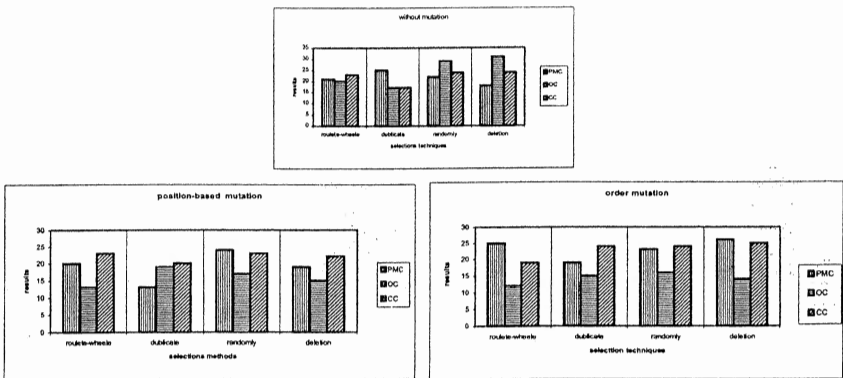


Abb.9.2 Die Ergebnisse des Experiment

Die Differenz zwischen den Kombinationen ist nicht groß.

Die vergleichenden experimentellen Ergebnisse helfen bei der praktischen Anwendung die am besten geeigneten Operatortechniken auszuwählen.

3. Beispiel

Um die Untersuchung des Verhaltens der Zielfunktion zu ermöglichen wird ein Modell der flexiblen Fertigungssysteme gebaut. Die im Modell abgebildeten Anlagenelemente können in drei Gruppen aufgeteilt werden: Beschreibung der Fertigungsanlage (Ressourcen), Definitionen der Fertigungsprozesse, Charakteristika der Aufträge.

Die Fertigungsanlage besteht aus 4 Maschinen, einer Beladenstation, einer Entladestation und einem Transporter (AGV). Jede Maschine ist mit einem Portalkran für das Be- und Entladen von Werkzeugen und Werkstücken ausgerüstet. Der Portalkran kann nur leichte Teile in die Maschine laden, schwere Teile werden manuell unter Zuhilfenahme eines Kranes in die Maschine geladen. Es stehen je Maschine 2 Positionen für das Be-/Entladen von Schwerteilen zur Verfügung. Es existieren 2 Be-/Entladestationen mit Palettenwechsler für Werkstücke und Werkzeuge pro Maschine. Der eingesetzte Transporter hat die Aufgabe Werkstückpaletten und Werkzeugpaletten zu transportieren.

Wir haben z.B. 40 Aufträge. Ein Auftrag kann in einer oder in mehreren Maschinen bearbeitet werden. Es kommt auf den betreffenden Fertigungsablauf an. Jeder Auftrag besteht aus Auftragsnummer, Stückzahl, Priorität, Starttermin und Solltermin. Die Fertigungsablaufdaten (Bearbeitungszeit, Umrüstzeit, Fortschritt, Kontrollzeit, Bedienerzeit, Werkstücktyp, Werkzeugtyp,...) werden direkt während der Simulation von der Datenbank genommen.

Als Fitnessfunktion wird die Minimierung des *Makespan* verwendet. Als GA- Operator werden *order crossover*, *order-based Mutation* und *roulette-wheel* Selektion verwendet. Die Parameter der GA sind in Tabelle 9.2 zusammengestellt:

Parameter	Beschreibung	Wert
IN	Individuen	20
PS	Selektionsrate	0.03
PC	Crossoverrate	0.07
PM	Mutationsrate	0.02

Tab.9.2 Die Parameter der GA.

Als Unterbrechungskriterium wird die Generationsnummer verwendet (40 Generationen). Ziel dieses Experimentes ist der Vergleich der Ergebnisse zwischen den einzelnen Kriterien (kürzeste Bearbeitungszeit, Priorität, kürzeste Umrüstzeit, minimale Werkzeugfluktuation) und ihrer Kombination. Die Gewichtung der Kriterien soll für alle gleich „1“ sein. Die letzten drei Arbeitsszenarien sind kombinatorische Probleme und dafür werden genetische Algorithmen eingesetzt. Diese Simulation wird mit Hilfe des Simulationswerkzeugs „GA-Optimizer“ durchgeführt [138].

Die Resultate der Simulationsexperimente sind auf der Tabelle 9.3 dargestellt.

	Priorität	Bearbeitungszeit	Umrüstzeit	WZ- Fluktuation	Kombination
„makespan“	2236	2030	1835	1960	1563

Tab. 9.3

Betrachtet man die verschiedenen Ergebnisse des Experimentes, dann sieht man, daß Arbeitsszenarien als Kombination verschiedener Kriterien ein besseres Ergebnis liefern als jene von einzelnen Kriterien.

SCHLUSSBEMERKUNG UND AUSBLICK

Das vorgelegte Konzept eines intelligenten Moduls für die Optimierung der Abläufe innerhalb eines FFS wurde zum Zweck der Erhöhung der Effizienz des FFS entwickelt. Diese Erhöhung der Effizienz wurde durch die Einbindung der Erfahrungen des Operators und der aktuellen Zustände des Systems bzw. der Umgebung in die Entscheidungsprozesse erreicht. Dadurch wurde die Zeit für das Treffen von Entscheidungen verkürzt und/oder die Qualität der Lösungen erhöht. In diesem Modul werden genetische Algorithmen und Expertensysteme in Verbindung eingesetzt. Die Kombination zwischen Expertensystemen und genetischen Algorithmen hat bessere Ergebnisse ergeben als nur genetische Algorithmen und Auswahlkriterien.

Die Optimierung der FFS- Abläufe am Leitstand ist fallspezifisch. Man muss für jedes System die Präsentation der Chromosomen für das zuständige Modell erstellen.

Als weitere Forschungsarbeiten sind geplant:

1. Implementierung des „Optimizers“ und weitere Untersuchungen in einem realen System
2. Einbindung des „Optimizers“ mit einem Simulationswerkzeug (z.B.: Arena, TED) d.h. volle Integration zwischen Simulation und Optimierung.
3. Erhöhung der Intelligenz durch die Kombination zwischen mehreren KI-Methoden
4. Vorbereitung der Produktionsplanungs- und Steuerungssysteme für „e-manufacturing“ als Plattform für die Vernetzung aller Systeme.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb.1.1 Einsatzbereiche unterschiedlicher flexibler
Produktionssysteme[261]
- Abb.1.2 Flexibilitätskriterien für FFS [32]
- Abb.1.3 Flexibilitätsbewertung der flexiblen Transferstraße, des flexiblen
Bearbeitungszentrums und des FFS
- Abb.1.4 FFS-Materialfluß
- Abb.1.5 FFS-Informationsfluß
- Abb.1.6 Subsysteme eines FFS [155].
- Abb.1.7 Einflußgrößen auf FFS- Ausfallzeiten [191]
- Abb.1.8 Verantwortungsbereiche für Ausfallzeiten [235]
- Abb.1.9 Entwicklungsschwerpunkte auf dem Weg zur automatisierten Fabrik
[172]
- Abb.2.1 PPS-Funktionen [315]
- Abb.2.2 PPS-Struktur des FFS
- Abb.2.3 Kompromißlösung.
- Abb.2.4 Datenferfassung zur Steuerung und Regelung von FFS
- Abb.2.5 Einbindung einer FFS- Steuerung in die
Unternehmensinformationsflüsse
- Abb.2.6 Informationstechnische Verbindung.
- Abb.2.7 Auftragsstruktur [155]
- Abb.2.8 Ablaufsequenz einer Arbeitsgängeserie auf einer Maschine [155]
- Abb.2.9 Ablaufsequenz - Gesamtsystem [155]
- Abb.2.10 Einsatz von Expertensystemen in PPS-Systemen [83]
- Abb. 2.11 Simulation in PPS-Systemen [83]
- Abb.3.1 Ermitteln/Einplanen eines Folgeauftrages
- Abb.3.2 Simulation und Optimierung.
- Abb.4.1 Simulationskreislauf [272]
- Abb.4.2 Rolle der Simulation in der Systemanalyse
- Abb.4.3 Simulationsmerkmale
- Abb.4.4 Simulationsschritte [17], [193], [309]
- Abb.4.5 Klassifizierung von Simulationsmodellen
- Abb.4.6 Ergänzung von PPS- und Leitstandsystem mit der Simulation
- Abb.4.7 Merkmale von Fertigungssystemen
- Abb.4.8 Simulation in FFS [309]
- Abb.4.9 Reihenfolgeplanung mit PREACTOR
- Abb.5.1 Die Begriffe der Optimierung

- Abb.5.2 Hierarchie der Optimierungsverfahren
- Abb.5.3 Algorithmus des Simulated Annealing
- Abb.5.4 schematische Darstellung eines GA
- Abb.5.5 Lineare Skalierung
- Abb. 5.6 Drehung der Skalierungsgeraden
- Abb.5.7 Crossover mit einer Trennstelle
- Abb.5.8 Crossover mit vier Trennstellen
- Abb.5.9 Zusammenhang von Populationsgröße und Wahrscheinlichkeit für Crossover [183].
- Abb.5.10 Strukturdiagramm roulette wheel selection
- Abb.6.1 Konzept eines intelligenten Moduls für das Leitstandsoftware
- Abb.7.1 Die Struktur des GA-Optimizers.
- Abb.7.2 Implementierte Struktur der genetischen Algorithmen
- Abb. 7.3 Die Syntax des Gens.
- Abb.7.4 Parallelität
- Abb.8.1 Datenstruktur.
- Abb.8.2 Die Hauptdaten der Datenbank.
- Abb.8.3 Stammdaten und Stammdatenformular.
- Abb.8.4 Auftragsliste
- Abb.8.5 Teilauftragsliste.
- Abb.8.6 Aktuellenstandskoeffizient
- Abb.8.7 Die Verbindung zwischen Datenbanken und GA-Optimizer.
- Abb.8.8 Auswahlkriterien.
- Abb.8.9 Gewichtung der Kriterien
- Abb.8.10 GA-Optimizer
- Abb.8.11 Die Gantt-Diagramm-Darstellung.
- Abb.8.12 Der Zeitintervall der Teilaufträge
- Abb.9.1 Reihenfolgeplanung durch GA
- Abb.9.2 Die Ergebnisse der Vergleichen

LITERATURVERZEICHNIS

- [1.] **Abeln, O.**, Die CA-Techniken in der industriellen Praxis. Handbuch der Computergestützten Ingenieur-Methoden, Hanser, Wien 1990
- [2.] **Akbay, K.S.**, Using Simulation Optimization to Find the Best Solution, IIE Solutions, pp 24-29, May 1996
- [3.] **Amos, F., et al.**, Zwischenbericht der Projektgruppe Genetische Algorithmen. Technical report, Universität Stuttgart Fakultät Informatik, Institut für Informatik, Abteilung Formale Konzepte, 1994.
- [4.] **APTECH**, Advanced Manufacturing Technologies. An Introductory Reference Book, Issue 1, Aptech Australia Pty. Ltd., Preston (Victoria) 1988
- [5.] **Arbib, Michael A.**, Brains, machines, and mathematics, McGraw-Hill, Inc., 1964, Springer-Verlag 1987
- [6.] **ARENA - SIMAN V** Reference Guide, Systems Modeling Corporation, 1994
- [7.] **Armstrong, B.**, Manufacturing Simulation Consultant's Forum, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1052-1056, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [8.] **Arthur, J.D. & Nance, R.E.**, Independent Verification and Validation: A Missing Link in Simulation Methodology?, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 230-236, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [9.] **ATMOS**, Entscheidungsgrundlagen für die Schwerpunktpolitik des Innovations und Technologiefonds für die beginnenden 90er Jahre, Austrian Technology Monitoring System, Seibersdorf 1990
- [10.] **Aupperle, G. & Schön, W.-U.**, Informations- und Steuerungssysteme in der Fraktalen Fabrik, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 195-225, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [11.] **Autorenkollektiv**, Industrielle Softwareproduktion für die Fertigungsleichtstechnik, ZwF 86 , C. Hanser Verlag, München, 1991
- [12.] **AWF**, Integrierter EDV-Einsatz in der Produktion, CIM, Begriffe, Definitionen, Funktionszuordnungen, Eschborn, November 1985
- [13.] **AWK-Buch (Autorenkollektiv)**, Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Aachen, 1990
- [14.] **Back, Th., Schwefel, H.-P.**, Anoverview of evolutionary algorithms for

- parameter optimization. In *Evolutionary Computation*, pages 23. The Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [15.] **Balzer, H.**, Fertigungsleitsysteme haben ihre Leistungsfähigkeit – Zunehmende Akzeptanz, *Industrie-Anzeiger* 95, 1988
- [16.] **Banks, J.**, *Simulation Languages and Simulators*, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 88-96, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [17.] **Banks, J.**, *Software for Simulation*, Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 26-33, Florida, December 11-14, 1994
- [18.] **Banks, J.**, *Output Analysis Capabilities of Simulation Software*, *Simulation*, Volume 66, pp 23-30, January 1996
- [19.] **Banks, J.**, *Getting Started in Simulation Modeling*, IIE Solutions, pp 34-39, November 1996
- [20.] **Banks, J.**, *Software for Simulation*, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 31-38, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [21.] **Banks, J. & Carson, J.S.**, *Discrete-Event System Simulation*, PRENTICE-HALL, INC., New Jersey, 1984
- [22.] **Banks, J. & Norman, V.B.**, *Justifying Simulation in Today's Manufacturing Environment*, IIE Solutions, pp 16-19, November 1995
- [23.] **Barnes, M.**, *Virtual Reality and Simulation*, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 101-110, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [24.] **Barr, Avron u. Feigenbaum, Edward A.**: *The Handbook of Artificial Intelligence*, Vol. I., 1981
- [25.] **Barton, R.R. & Schruben, L.W.**, *A New Graduate Course: Using Simulation Models for Engineering Design*, *Simulation* 64(3), pp 145-153, March 1995
- [26.] **Brtach H., Teufel, Th.**, *Supply Chain Management mit SAP APO*, ISBN 3-934358-17-9, Galileo Press, Bonn 2000
- [27.] **Baumann, C.**, *Intranets - Unternehmensinterne Informations- und Kommunikationssysteme*, Proceedings of the 7th International DAAAM Symposium, ISBN 3-901509-02-X, pp 025-026, Wien, 17.-19. Oktober 1996
- [28.] **Bauske, J.**, *Gewinnmaximierung durch Serviceleistungen*, in Sihm, W. (Hrsg.), *Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung*, pp. 127-160, Carl Hanser Verlag, München - Wien

1995

- [29.] **Becker, B.-D.**, Der schnellste Weg zur schlanken Produktion. Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung. VDI Haus, Stittgart, 1992.
- [30.] **Becker, J. & Rosemann, M.**, Logistik und CIM, Die effiziente Material- und Informationsflußgestaltung im Industrieunternehmen, Springer-Verlag, Berlin 1993
- [31.] **Becker, B.-D. & Schulte, J.W.**, Simulation-based Integrated Planning and Control Systems for Manufacturing, Proceedings of the WORKSIMS'94, ISBN 974-8256-154, pp 34-38, Bangkok, Thailand, Nov. 9-11th 1994
- [32.] **Behrendt, W.**, Flexible numerisch gesteuerte CNC-Fertigungssysteme, expert verlag 1986, Band 221
- [33.] **Beier, H.H.**, Kybernetik Flexibler Fertigungssysteme, VDI-Z, Steuerungen, October, 1988.
- [34.] **Benson, D.**, Simulation Modeling and Optimization Using ProModel, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 447-452, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [35.] **Blohm, H.**, et al., Produktionswirtschaft: Neue Wirtschaftsbriefe, Herne/Berlin, 1988.
- [36.] **Boyer, J.M.**, Global Modeling for the Experinced, Simulation 64(3), pp 203-206, March 1995
- [37.] **Braun, H.-J.**, Unternehmensstrukturierung vom „Scheitel bis zur Sohle“, in Sih, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 33-63, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [38.] **Breitenecker, F.; Kiss, C.; Lingl, M. & Salzmann, M.**, Einführung in den diskreten Simulator Micro Saint, Skriptum, Technische Universität Wien, Wien 1996
- [39.] **Breitenecker, F.**, Diskrete Simulation – Optimierung mit genetischen Algorithmen. Seminar über Simulation (SIMPLE). TU Wien, 1992
- [40.] **Brown, C.E. & O'Leary, D.E.**, Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems, Oregon State University 1994
- [41.] **Bruns, R.**, Knowledge-argumeted genetic algorithm for production scheduling, Workshop Notes IJCAI-93, Workshop on Knoledge-Based Production Planning, Scheduling and Control (Chambery, 1993) ed N. Sadeh, pp.49-58
- [42.] **BSI**, Computersimulation: (K)ein Spiegel der Wirklichkeit. Interdisziplinärer

- Diskurs zu querschnittlichen Fragen der IT-Sicherheit, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) - SecuMedia Verlag, Ingelheim 1994
- [43.] **Buhrmann, P. & Kretzberg, T.**, Java. Interaktiv im WorldWideWeb, Addison-Wesley, Bonn 1996
- [44.] **Bullinger, H.J. & Kornwachs, K.**, Expertensysteme, Verlag C.H.Beck, München 1990
- [45.] **Buss, A.H. & Stork, K.A.**, Discrete Event Simulation on the World Wide Web Using Java, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 780-785, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [46.] **Carrie, A.S., et al.**, Operation sequencing in a FMS, Robotica Vol. 3, S.259 – 264, 1985
- [47.] **Carson, J.S.**, So You Want to be a Simulation Consultant, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 111-113, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [48.] **Carson, J.S.**, AutoStat™: Output Statistical Analysis for AutoMod™ Users, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 492-499, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [49.] **CDI (Hrsg)**, SAP R/3 -Einführung, ISBN 3-8273-1467-4, Addison-Wesley, 1998
- [50.] **CECIMO**, Working Party on Standardisation: Terminology for automated manufacturing and machining systems. CECIMO, Brüssel 1985
- [51.] **Celar, S.**, Konzept eines intelligenten Moduls für die Optimierung der Abläufe innerhalb des FFS, Dissertation, TU Wien 1997
- [52.] **Centeno, M.A.**, An Introduction to Simulation Modeling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 15-22, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [53.] **Centeno, M.A. & Standridge, C.R.**, Databases and Artificial Intelligence: Enabling Technologies for Simulation Modeling, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 181-189, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [54.] **Cha, S.K. and Park, J.H.**, An object-oriented model for FMS control. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.7, No. 5, pp.387-391
- [55.] **Chan, S. & Koh, P.H.**, A Simulation Model for Planning and Scheduling a Complex Warehousing Operation, Proceedings of the WORKSIMS '94, ISBN 974-8256-154, pp 267-272, Bangkok, Thailand, Nov. 9-11th 1994

- [56.] **Chance, F.; Robinson, J. & Fowler, J.**, Supporting Manufacturing with Simulation: Model Design, Development, and Deployment, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 114-121, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [57.] **Christaller, T., et al.**, Die KI-Werkbank Babylon - Eine offene und portable Entwicklungsumgebung für Expertensysteme, Bonn, 1989.
- [58.] **Christaller, T.**, Kontrolle von Bewegung in biologischen Systemen und Navigation mobiler Roboter. Vortrag, gehalten auf dem IK-98 (Interdisziplinäres Kolleg), 7.-14. März, Günne am Möneseesee, 1998.
- [59.] **Clark, G.M.**, Introduction to Manufacturing Applications, Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 15-21, Florida, December 11-14, 1994
- [60.] **Computerwoche**, IDG Communications Verlags G. mbH., Zieglergasse 6, A-1070 Wien, Austria, computerwelt@cw.co.at
- [61.] **Darwin, C.**, On the Origin of Species by Means of Natural Selection, John Murray, London, 1859
- [62.] **Davis, L.**, Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinold, New York, 1991
- [63.] **Davidor, Y. et al.**, The Ecological Framework II: improving GA performance at virtually zero cost, Proc 5th International Conference on Genetic Algorithms (Urbana-Champaign, IL, July 1993) ed S Forrest (San Mateo, CA: Morgan Kaufmann), pp 171-176
- [64.] **Day, J.E. & Hottenstein, M.P.**, Review of sequencing research, Naval Research Logistics Quarterly, 17, pp. 11-39, 1970.
- [65.] **De Jong, K.**, An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems. Doctoral thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [66.] **Delen, D.; Pratt, D.B. & Kamath, M.**, A New Paradigm for Manufacturing Enterprise Modeling: Reusable, Multi-Tool Modeling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 985-992, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [67.] **Demant, B.**, Fuzzy-Theorie oder die Faszination des Vagen - Grundlagen einer präzisen Theorie des Unpräzisen, Bonn, 1993.
- [68.] **DGWH**, Claas de Groot et al., Optimizing complex problems by nature's algorithms: Simulated Annealing Evolution Strateg – a comparative study. In Parallel Problem Solving from Nature, 1st Workshop, PPSN I, S.445-454. Springer-Verlag, 1990

- [69.] **Diekmann, H. & Hellbrück, G.**, Flexible Fertigungssysteme - von Projekten zu Produkten, Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung 86 (1991), Volume 5, pp 245-248, München 1991
- [70.] **Dorninger, C.; Janschek, O.; Olearczick, E. & Röhrenbacher, H.**, PPS-Produktionsplanung und -steuerung, Konzepte, Methoden und Kritik, Ueberreuter, Wien 1990
- [71.] **Doyle, J., et al.**, Strategic Directions in Artificial Intelligence, ACM Computing Surveys, Vol. 28, No. 4, p. 654 – 670, December, 1996.
- [72.] **Drake, G.R. & Smith, J.S.**, Simulation System for Real-Time Planning, Scheduling, and Control, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1083-1090, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [73.] **Drury, C.E.**, Advanced Uses for Micro Saint Simulation Software, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 510-516, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [74.] **Dueck, G., Scheuer, T.**, Threshold acceptance: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. Journal of Computational Physics, S.161-175, 1990
- [75.] **Dudewicz, E.J. & Karian, Z.A.**, Modern Design and Analysis of Discrete-event Computer Simulations (Tutorial), IEEE Computer Society 1985
- [77.] **Dueck, G.; Scheuer, T.**, Threshold acceptance: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. Journal of Computational Physics, (90):161 - 175, 1990.
- [78.] **Dueck, G.**, New optimization heuristics for the Great Deluge Algorithm and the Record- to- Record Travel. In Journal of Computational Physics, volume 104, pages 86 - 92, 1993.
- [79.] **Emde, W., et al.**, Data-Mining - Ein Überblick. In: Kursunterlagen des IK-97 (Interdisziplinäres Kolleg), Band 3, 15.-22. März, Günne am Möhnesee, 1997.
- [80.] **Eversheim, W.; Schmitz-Mertens, H.J. & Wieggershaus, U.**, Organizational Integration of Flexible Manufacturing Systems in Conventional Workshop Structures, Robots & Computer-Integrated Manufacturing, Vol.7, Nr.1/2, 1990
- [81.] **Ewans, G.W.; Gor, T.B. & Unger, E.**, A Simulation Model for Evaluating Personnel Scheduling in a Hospital Emergency Department, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1205-1209, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [82.] **Ewans, G.W. & Biles, W.E.**, Simulation of Advanced Manufacturing Systems, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-

- 7803-07987-4, pp. 163-169, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [83.] **Fandel, G.; François, P. & Gubitz, K.-M.**, PPS-Systeme. Grundlagen, Methoden, Software, Marktanalyse, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1994
- [84.] **Fang, H-L. et al.**, A promising genetic algorithm approach to job-shop scheduling, rescheduling and open-shop scheduling problems, Proc 5th International Conference on Genetic Algorithms (Urbana-Champaign, IL, July 1993) ed S Forrest (San Mateo, CA: Morgan Kaufmann), pp 375-382
- [85.] **Farahmand, K. & Martinez, A.F.G.**, Simulation and Animation of the Operation of a Fast Food Restaurant, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1264-1271, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [86.] **Fishwick P.A.**, An Integrated Approach to System Modelling using a Synthesis of Artificial Intelligence, Software Engineering and Simulation Methodologies, ACM Transactions on Modelling and Computer Simulation, Volume 2(4), pp 307-330
- [87.] **Fishwick P.A.**, Simulation Model Design and Execution. Building Digital Worlds, Prentice Hall, New Jersey 1995
- [88.] **Fishwick, P.A.**, Web-Based Simulation: Some Personal Observations, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 772-779, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [89.] **Fishwick, P.A.; Narayanan, N.H.; Sticklen, J. & Bonarini, A.**, A Multi-Model Approach to Reasoning and Simulation, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 24(10), pp 1433-1449.
- [90.] **Fishwick, P.A.; Kim, G., & Lee, J.J.**, Improved Decision Making Through Simulation-Based Planning, Simulation, Volume 67(5), pp 315-327, November 1996
- [91.] **Focke, K. & Mensel, G.**, Werkstattsteuerung – Konzept eines gazzeitlichen Fertigungsinformationssystems, wt Werkstattstechnik 78, s.412-415, 1998
- [92.] **FOCUS**, Künstliches Leben. Die zweite Schöpfung, Forschung & Technik, FOCUS-Das moderne Nachrichtenmagazin 34/1994, FOCUS-Verlag, pp. 83-89, München 1994
- [93.] **Fogel, D.B.**, An analysis of evolutionary programming. In D.B. Fogel and J.W. Atmar, editors, Proceedings of the first annual conference on evolutionary programming, La Jolla. Evolutionary Programming Society, 1992
- [94.] **Fogel, L.J. et al.**, Artificial Intelligence through Simulated Evolution. Wiley, New York, 1966.

- [95.] **Förster, H.-U.**, Integration von flexiblen Fertigungszellen in die PPS, New York, Heidelberg, Wien, London, Paris, Tokio, Springer Verlag, 1988
- [97.] **Franke, D.**, Sequentielle Systeme, Binäre und Fuzzy Automatisierung mit arithmetischen Polynomen, Vieweg Verlag, Wiesbaden 1994
- [98.] **Fraser, J.**, Finite Scheduling and Manufacturing Synhronization, IIE Solutions, pp 44-45, September 1995
- [99.] **Freska, C.**, Fuzzy Systems in AI, In: KRUSE, R., PALM, R., GEBHARDT, J., Fuzzy Systems in Computer Science, Braunschweig, 1994.
- [101.] **Frey, H.**, CIM-Strategie: Vorteile und Gefahren für Anwender und Anbieter, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [102.] **Frey, V. & Bischoff, O.**, Konfiguration flexibler Fertigungssysteme, Deckblatt, pp 64-67, Nr. 5 1994
- [103.] **Frohberg, W.**, Künstlichen Intelligenz und Telekommunikation Hrsg. von Fridhelm Bergmann. - 1. Aufl.-Berlin; München: Verl. Technik, 1993, Bosch-Druck S. 14-20
- [104.] **Gadbois, M.**, Shipments flow Smoothly at Flow International, IIE Solutions, pp 40-43, March 1996
- [106.] **Gangl, P.; Shuler, K.**, Fortschrittliche Produktionslogik mit Simulationstechnik. Simulation wird Bestandteil von PPS- und Leitstandsystemen. Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung. VDI Haus, Stuttgart, 1992.
- [107.] **Gehrke, R.**, Strategie zur Einführung von Produktionsplanungs- und steuerungssystemen, Zwf 84, 1989
- [108.] **Geitner, U.W. (Hrsg.)**, CIM Handbuch, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig 1991
- [109.] **Gerfried, Z., Karl, F.**, Automasierte Industrieprozesse, ISBN 3-211-83560, Springer WienNewYork Verlag, Wien 2000
- [110.] **Giaglis, G.M.; Paul, R.J. & Doukidis, G.I.**, Simulation for Intra- and Inter-Organisational Business Process Modelling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1297-1304, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [111.] **Giarratano, J.C.**, CLIPS User's Guide, CLIPS Version 6.0, 1993
- [112.] **Giloi, W.K.**, Principles of Continuous System Simulation: Analog, Digital and Hybrid Simulation in a Computer Science Perspective, B.G. Teubner, Stuttgart 1975

- [113.] **Glover, F.; Kelly, J.P. & Laguna, M.**, New Advances and Applications of combining Simulation and Optimization, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 144-152, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [114.] **Grundig, C-G.**, Fabrikplanung, ISBN 3-446-21373-2, Carl Hanser Verlag, München, 2000
- [115.] **Göckler, E., et al.**, Dokumentation zur Vorbereitung der Projektgruppe Genetische Algorithmen. Technical report, Universität Stuttgart, Fakultät Informatik, Institut für Informatik, Abteilung Formale Konzepte, 1994.
- [116.] **Goldberg, D.E.**, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, New York 1989
- [117.] **Gonzalez, F.G.**, A Simulation-Based Controller Builder for Flexible Manufacturing Systems, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1068-1075, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [118.] **Gonzalez, L.R.; Garcia, M.L. & Centeno, M.A.**, On-Line Knowledge-Based Simulation for FMS: A State of the Art Survey, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1057-1061, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [119.] **Görz, G.**, Einführung in die künstliche Intelligenz, Bonn, 1993
- [120.] [Goyal 1975] **Goyal, S.K.**, Scheduling a single machine system: A multiproduct multi-item case, Operational Research Quarterly, 26, pp. 619-627, 1975.
- [121.] **Graffenstette, J.**, Incorporation Problem Specific Knowledge into Genetic Algorithms. Naval Research Laboratory, Washington, 1986
- [122.] **Graffenstette, J.**, Optimization of control parameters for genetic algorithms. IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, SMC-16(1):122- 128, 1986.
- [123.] **Gronalt, M.; Katalinic, B. & Schmid, M.**, Engpaßanalyse eines flexiblen Fertigungssystems mit Hilfe von Computersimulationen, Proceedings of the 2nd DAAAM International Symposium, ISBN 80-233-0225-6, pp 118-119, Strbske Pleso, 9.-11. December 1991
- [124.] **Claas de Groot, et al.**, Optimizing complex problems by nature's algorithms: Simulated Annealing and Evolution Strategy – a comparative study. In Parallel Problem Solving from Nature, 1st Workshop, PPSN I, pages 445-454. Springer - Verlag, 1990.
- [125.] **Grötschel, M.; Holland, O.**, Solution of large-scale symmetric travelling

- salesman problems. *Mathematical Programming*, 51:141 – 202, 1991.
- [126.] **Gumaer, R.**, Beyond ERP and MRP II: Optimized Planning and Synchronized Manufacturing, *IIE Solutions*, pp 32-35, September 1996
- [127.] **Gupta, J.N.D.**, M-state scheduling problem – a critical appraisal, *Int. J. Prod. Res.*, 9, pp. 267 – 281, 1971.
- [128.] **Habich, M.**, Koordination autonomer Fertigungsinseln durch ein adaptiertes PPS- Konzept *Zwf* 84, 1989
- [129.] **Hackstein, R.**, Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Ein Handbuch für die Betriebspraxis, VDI Verlag, Düsseldorf 1989
- [130.] **Hajrizi, E.**, Simulation und Optimierung der Abläufe den flexiblen SMD & THT-Linien, SIEMENS AG, Wien, Österreich, 1998
- [131.] **Hajrizi, E. & Breitenecker, F.**, INTSCHED –ein intelligentes software modul für die Simulation basierend Scheduling in flexible Fertigungssystemen, ASIM2000/ESS2000 international Tagung, Hamburg, Deutschland, 2000
- [132.] **Hajrizi, E. & Katalinic, B.**, Modelling Production Processes using Petri nets, DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing, Automation & Networking", Cluj-Napoca, Rumania, October 1998.
- [133.] **Hajrizi, E.**, Implementation a GA-Optimizer for Optmization of Complex FMS Scheduling, DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing &Automation: Past – Present – Future“, Vienna, Austria, October 1999.
- [134.] **Hajrizi, E.**, Anwendungen der Genetischen Algorithmen in der Technik, TU-Wien, IFT-IMS, Wien, Mai, 1997
- [135.] **Hajrizi, E.**, Anwendung der Experten Systemen für Auswahl der Steuerungstechnologien, International Symposium: „Nxitja Teknologjike e Ndërmarrjeve të vogla dhe të mesme“, Dezember 1997, Tiranë, Albania
- [136.] **Hajrizi, E.**, Modellbildung und Simulation eines Flexiblen Fertigungssystem in Taylor ED, ARGESIM:“Diskrete Simulation mit Taylor ED, Netzwerksimulation mit Opnet“, Juni 2000, Wien, Austria,
- [137.] **Hajrizi, E.**, Modellierung der Flexibel Fertigungssysteme mit Petri-Netz, TU-Wien, IFT-Intelligent Manufacturing Systems, Wien, Mai, 1998.
- [138.] **Hajrizi, E.**, Optimierungsabläufe der flexiblen Ferigungssystemen durch genetische Algorithmen, ASIM2000/ESS2000 International Tagung, Hamburg, Deutschland, 2000
- [139.] **Hajrizi, E.**, Simulation der Flexible Fertigung Systemen mit Arena, ARGESIM: "Anwendungen Diskreter Simulation – ARENA“, April 1999,

Wien, Austria.

- [140.] **Hajrzi, E.**, Soft Computing in LabVIEW, ARGESIM: "Soft Computing in Modellbildung und Simulation", Dezember 1998, Wien, Austria.
- [141.] **Harell, C.R. & Field, K.C.**, Integrating Process Mapping and Simulation, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1292-1296, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [142.] **Hartmann, D. & Lehner, K.**, Technische Expertensysteme, Springer-Verlag, 1990
- [144.] **Heitkotter, J.; Beasley, D.**, The hitchhiker's guide to evolutionary computation: A list of frequently asked questions (faq). USENET: comp.ai.genetics, erhältlich über anonymous FTP mit: rtfm.mit.edu: /pub/usenet/news.answers/ai-faq/genetic, 1994.
- [145.] **Henderson, R. & Zorn, B.**, A Comparison of Object-oriented Programming in Four Modern Languages, Software-Practice and Experience, Vol. 24(11), pp 1077-1095, November 1994
- [146.] **Hoffmeister, F. & Bäck Th.**, Genetic Algorithms and Evolution Strategies: Similarities and differences. In Parallel Problem Solving from Nature, 1st Workshop, PPSN I, pages 455 - 469. Springer-Verlag, 1990.
- [147.] **Hofstädter, Douglas R.**, Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid Basic Books 1979
- [148.] **Holland, J.H.**, Adaption in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- [149.] **The MAP Report**, Manufacturing Automation Protocol, New York, Heidelberg, Wien, London, Tokio, Springer Verlag 1987
- [150.] **Hurriion, R.D. (Ed.)**, Simulation. Applications in Manufacturing. (International trends in manufacturing technology), IFS (Publications) Ltd and Springer-Verlag, 1986
- [151.] **Indefrey, K.**, MMS in Siemens – Automatisierungssystemen, atp 33, R. Oldenbourg Verlag, 1989
- [152.] **INTERNET - Computerwelt Special**, IDG Communications Verlagsges. mbH., Zieglergasse 6, A-1070 Wien, Austria, computerwelt@cw.co.at
- [153.] **Immanuel, M.B., Grossmann, W.**, Optimierung- Theorie und Algorithmen, Eine Einführung in Operations Research für Wirtschaftsinformatiker, ISBN 3-411-15091-2, Wissenschaftsverlag, Deutschland, 1993
- [154.] **Iuliano, M. & Jones, A.**, Controlling Activities in a Virtual Manufacturing Cell, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-

- 3383-7, pp 1062-1067, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [155.] **Katalinic, B.**, Industrieroboter und flexible Fertigungssysteme für Drehteile, VDI Verlag, Düsseldorf 1990
- [156.] **Katalinic, B.**, Complex Flexible Manufacturing Systems - Design of Control Structures and Scheduling Strategies, Annals of CIRP, Manufacturing Systems, Vol.23 (1994), No.1, pp 65-70, ISSN 0176-3377, WISU Verlag Aachen & Faculty Press International, Aachen 1994
- [157.] **Katalinic, B.**, Intelligent Manufacturing Systems als logisches Ergebnis der Evolution von Produktionssystemen, Elektrotechnik und Informationstechnik, ÖVE-Verbandszeitschrift, pp 249 - 252, Volume 4, Wien, 1996
- [158.] **Katalinic, B.**, Design of Scheduling Structures and Strategies for Complex Flexible Manufacturing Systems, International Conference on Computer Integrated Manufacturing, CIM 96, May 14-17, 1996, Zakopane, Poland
- [159.] **Katalinic, B. & Celar, S.**, Computersimulation für Optimierung der Struktur des FFS, 5. Internationales DAAAM Symposium "Automation und Metrologie: Herausforderungen und Chancen", Tagungsband pp 201-202, ISBN 3-901509-00-3 & ISBN 86-435-0084-4, Universität Maribor, Technische Fakultät, 27-29. Oktober 1994, Maribor, Slowenien
- [160.] **Katalinic, B. & Celar, S.**, Discrete-event Based Computer Simulation of Complex Flexibel Manufacturing Systems, Proceedings of the 13th International Conference BIAM '96, ISBN 953-6037-12-2, pp J-1 J-4, June 18-21st, 1996, Zagreb, Croatia
- [161.] **Katalinic, B. & Hajrizi, E.**, Comparison of working scenarios by „GA-Optimizer – an intelligent modul for optimization of complex FMS scheduling“, 11th DAAAM Symposium, Opatija, 200
- [162.] **Katalinic, B. & Hajrizi, E.**, Genetic Algorithm as a Tool for the Optimisation of order Sequences of Complex FMS, Proc. 9th DAAAM International Symposium "Intelligent Manufacturing, Automation & Networking" (Ed. B. Katalinic), pp XXII, Technical University of Cluj-Napoca, October 22-24, 1998, Cluj-Napoca, Rumania
- [163.] **Katalinic, B. & Hajrizi, E.**, Die Struktur eines intelligentes Moduls für Leitstandssoftware komplexer FFS, CO-MATH-TECH International Tagung, Trnava, 2000
- [164.] **Katalinic, B. & Hajrizi, E.**, Genetic Algorithms as a Tool for Optimisation of Order Sequences of Complex FMS, DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing, Automation & Networking", Cluj-Napoca, Rumani, October 1998,
- [165.] **Katalinic, B. & Hajrizi, E.**, Design Methodology of Scheduling Strategies and Scenarios of Complex Flexible Systems, International Symposium: „Nxitja

- Teknologjike e Ndërmarrjeve të vogla dhe të mesme“, Dezember 1997, Tiranë, Albania
- [166.] **Kateel, G.; Kamath, M. & Pratt, D.**, An Overview of CIM Enterprise Modeling Methodologies, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1000-1007, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [167.] **Kelly, J.**, Artificial Intelligence. A Modern Myth, Ellis Horwood, London 1993
- [168.] **Kellermayer, K.H.**, Technische Informatik, ISBN 3-211-83486-9, Springer Verlag, Wien, 2000
- [169.] **Kief, K.B.**, FFS-Handbuch, Carl Hanser Verlag, München-Wien 1993
- [170.] **King, I.**, The Road to Continuous Improvement: Business Prozess Reengineering and Project Management, IIE Solutions, pp 23-27, October 1996
- [171.] **King, C.B.**, Taylor II Manufacturing Simulation Software, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 569-573, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [172.] **Koh, E.**, Informationsverarbeitung in FFS, VDI - Bericht, 830, 1990
- [173.] **Köhler, Ch.**, Der elektronische Leitstand – Befehlsempfänger der PPS oder Partner der Werkstatt?, VDI-Z 132, Nr.3, 1990
- [174.] **Kolb-Autorenkollektiv**, Flexible Fertigungssysteme in der Praxis, Werner & Kolb, Berlin, 12/1998
- [175.] **König, S.**, Wertschöpfungs- und Geschäftsprozesse, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 99-125, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [176.] **Kopacek, P.; Probst, R. & Zauner, M.**, Informatik für Maschinenbauer, Springer Verlag, Wien - New York 1995
- [177.] **Kortüm, W.**, Trends in der Rechnersimulation im Hinblick auf die Systemdynamik Fahrzeug-Fahrweg, VDI Berichte Nr. 1219, pp 169-203, 1995
- [178.] **Kosturiak, J. & Gregor, M.**, Simulation von Produktionssystemen, Springer-Verlag, Wien - New York 1995
- [179.] **Koza, J.R.**, Genetic Programming. The MIT Press, 1992.
- [180.] **Kristof, R.**, Der Mensch als Träger kontinuierlicher Unternehmensentwicklung, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im

- Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 161-194, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [181.] **Kruse, R.**, Fuzzy-Systeme - Positive Aspekte der Unvollkommenheit. In: Informatik-Spektrum 19, Seite 4 – 11, 1996.
- [182.] **Kruse, R., Nauk, D.**, Fuzzy- und Neuro-Fuzzy-Systeme. Vortrag, gehalten auf dem IK-98 (Interdisziplinäres Kolleg), 7.-14. März, Günne am Möhnesee, 1998.
- [183.] **Küchenhoff, V.**, Synthesis of Prolog Programs by Knowledge Guided Genetic Learning. Diplomarbeit an der TU-München, Juli, 1986
- [184.] **Küchenhoff, V.**, Synthesis of Prolog Programs by Knowledge Guided Genetical Learning, Diplomarbeit an der Tu München, 1996
- [185.] **Kunnathur, A.S., Sundararaghavan, P.S. & Sampath, S.**, Dynamic Rescheduling of a Job Shop: A Simulation Study, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1091-1098, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [186.] **Kurbel, K.**, Produktionsplanung und -steuerung. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen, Oldenbourg Verlag, München Wien 1993
- [187.] **Kurzweil, R.**, The Age of Intelligent Machines Massachusetts Institute of Technology, 1990
- [188.] **Kusiak, A.**, Intelligent Manufacturing Systems, Prentice Hall, New Jersey 1990
- [189.] **Kusiak, A. & Dagli, C.**, Intelligent Systems in Design and Manufacturing, New York 1994
- [190.] **Lang, U.**, Modularisierungskonzepte bei Simulationsproblemen in integrierten Programmsystemen, Dissertation, Universität Stuttgart 1988
- [191.] **Lange N.**, Dezentrale, universelle Steuerungsarchitektur für flexible Fertigungssysteme, Dissertation, Verlag Shaker, Aachen, 1993
- [192.] **Laurini, R.; Thompson, D.**, Fundamentals of Spatial Information Systems, London, 1992.
- [193.] **Law, A.M. & Kelton, W.D.**, Simulation Modeling and Analysis, 2nd edition, McGraw-Hill Inc., 1991
- [194.] **Law, A.M. & McComas, M.G.**, How to Select Simulation Software for Manufacturing Applications, Industrial Engineering, pp 29-35, July 1992
- [195.] **Law, A.M. & McComas, M.G.**, Simulation of Communications Networks, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-

- 4, pp 170-173, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [196.] **Law, A.M. & McComas, M.G.**, ExpertFit: Total Support for Simulation Input Modeling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 588-593, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [197.] **Lazzari, D. & Crosslin, R.**, Introduction to Work Flow Modeling with BPSimulator, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 429-431, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [198.] **Leemis, L.M.**, Discrete-event Simulation Input Process Modeling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 39-46, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [199.] **Levy, S.**, Künstliches Leben aus dem Computer, Droemersch Verlaganstalt Th. Knauer Nachf., München 1996
- [200.] **Lilegdon, W.R.**, Simulation Works: A Panel Discussion, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1337-1340, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [201.] **Lingineni, M.; Caraway, B.; Benjamin, P.C. & Mayer, R.J.**, A Tutorial on PROSIM™: A Knowledge-Based Simulation Model Design Tool, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 476-480, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [202.] **Logan, F.A.**, Automatisierungsstufen der rechnerunterstützten Arbeitsplanung, Zwf 85, 1989
- [203.] **Löschner, J. & Menzel, U.**, Künstliche Intelligenz. Ein Handwörterbuch für Ingenieure, VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- [204.] **Lowery, J.C.**, Introduction to Simulation in Health Care , Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 78-84, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [205.] **Lowery, J.C.**, Design of Hospital Admissions Scheduling System Using Simulation, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1199-1204, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [206.] **Luh, P.B. et al.**, Schedule Generation and Reconfiguration for Parallel Machines, IEEE Transactions on Robotics and Automation Control, Vol.6, S.687 – 686, Dezember 1990
- [207.] **Lukanowicz, M.**, Spezifikation von Simulationsmodellen für Fertigungsprozesse, (Schriftenreihe der Österreichischen Computer-Gesellschaft; Bd. 67), Oldenbourg, Wien-München 1993
- [208.] **Lunze, J.**, Künstliche Intelligenz für Ingenieure. Methodische Grundlagen,

Oldenbourg Verlag, München 1994

- [209.] **Lunze, J.**, Künstliche Intelligenz für Ingenieure. Technische Anwendungen, Oldenbourg Verlag, München 1995
- [210.] **Lutz, P.**, Leitsysteme für die rechnerintegrierte Auftragsabwicklung, TU München, Forschungsbericht Band 16, München, 1987
- [211.] **Mabrouk, K.M.**, Create Your Own Low-Risk Manufacturing Environment, IIE Solutions, pp 19-24, January 1996
- [212.] **Macmillan, W.**, Modelling: fuzziness revisited. In: Progress in Human Geography 19, 3, 404-413, 1995.
- [213.] **Macredie, R.; Taylor, S.J.E.; Yu, X. & Keeble, R.**, Virtual Reality and Simulation: An Overview, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 669-674, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [214.] **Manansang, H. & Heim, J.A.**, An Online, Simulation-Based Patient Scheduling System, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1170-1175, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [215.] **Marhold, Gerhard (Hrsg.)**, Künstlichen Intelligenz: Wesen u. Bedeutung neuer Computerleistungen VDI-Verlag, 1987, Düsseldorf:
- [216.] **Markovitch, N.A. & Profozich, D.M.**, ARENA[®] Software Tutorial, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 437-440, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [217.] **Masood, A. & Srihari, K.**, RDCAPP: A Real-Time Dynamic CAPP System for an FMS, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1993), Volume 8, pp 358-370, August 1993
- [218.] **Mazziotti, B.W.**, Get More Mileage from Flexible Simulation, IIE Solutions, pp 14-22, May 1996
- [219.] **McConnell, P.G. & Medeiros, D.J.**, Real-Time Simulation for Decision Support in Continuous Flow Manufacturing Systems, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 936-944, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [220.] **Meißner, K.**, Evolutionsstrategien zur Prozessoptimierung, Proceedings of the 6th International DAAAM Symposium, ISBN 3-901509-01-1, pp 225-226, Technische Universität Krakow, 26.-28. Oktober 1995, Polen
- [221.] **Meißner, K.**, Optimization by Genetic Algorithm, Proceeding of 2nd Mendel Conference on Genetic Algorithms, ISBN 80-214-0769-7, pp 79-84, Technical

University of Brno, Brno, Czech Republic, June 26-28

- [222.] **Michalewicz, Z.**, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutions Programs, Springer, Berlin 1992
- [223.] **Möck, C.**, Keine Angst vor Audits, Qualität und Zuverlässigkeit, Band 37, Heft 4, pp 193-195, 1992
- [224.] **Moerike, M. & Verhoeven, G.**, Die Trends der Informationstechnologie: Hintergründe -Praxis - Visionen, Computerwoche-Verlag, München 1995
- [225.] **Moldaschl, M.**, Krankheit JIT-Syndrom – Therapie Leitstand, VDI-Z 132, Nr.3, 1990
- [226.] **Morito, S.; Lee, K.H. & Mizoguchi, K.**, Development of a Simulation-based Planning System for a Flexible Manufacturing System, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 908-915, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [227.] **Müller, J.**, Verteilte Künstliche Intelligenz. Methoden und Anwendungen, B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim 1993
- [229.] **Musselman, K.J.**, Conducting a Successful Simulation Project, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 115-121, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [230.] **Nair, R.S.; Miller, J.A. & Zhang, Z.**, Java-Based Query Driven Simulation Environment, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 786-793, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [231.] **Nakano, R. & Yamada, T.**, Conventional genetic algorithm for job shop problems, Proc. 4th International Conference on Genetic Algorithms (San Diego, CA, July 1991) ed R. K. Belew and L.B. Booker (San Mateo, CA: Morgan Kaufmann), pp 474-479.
- [232.] **Nanasi, J.**, Konzept eines intelligenten Moduls für die Optimierung der Abläufe innerhalb des FFS, Dissertation, TU Wien 1996
- [233.] **Neumann, A. et al.**, Einige Aspekte der organisatorischen Steuerung flexibler Fertigungssysteme, msr, Berlin, S.539 – 542, Dezember, 1986.
- [234.] **Nilsson, Nils J.**, Principles of artificial intelligence orgen Kaufmann Publishers, Inc., Springer-Verlag, Druckhaus Beltz, 1980
- [235.] **N.N.**, Ausführungsbeispiele von rechnergesteuerten Flexiblen Fertigungssystemen, Werner & Kolb Firmenveröffentlichung, 12/1988
- [236.] **Nnaji, B.O., et al.**, Multi-stage multi-product lot size sequencing of operations, Applied Mathemaical Modeling, 12, pp.593 – 600, 1988.

- [237.] **Norman, V.B.**, Future Directions in Manufacturing Simulation, Industrial Engineering, pp 36-37, July 1992
- [238.] **Novels, M. & Jonik, S.**, Scheduling with Simulation in the Food & Drinks Industrie, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1252-1256, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [239.] **Obaidat, M.S.**, High Speed Networking: Performance Simulation Modeling and Applications, Simulation, pp 4-6, January 1995
- [240.] **Openshaw, S. & Openashaw, S.**, Artificial Intelligence in Geography, Chichester, 1997
- [241.] **Ortiz, C.**, Implementation Issues: A Recipe for Scheduling Success, IIE Solutions, pp 29-32, March 1996
- [242.] **Osanna, P.H.; Durakbasa, M.N.; Oberländer, R. & Waczek, G.**, CIM-Ein Schlagwort unter der Lupe, WUV-Studienbücher, Wien 1991
- [244.] **Ottawa Report** on Reference Models for Manufacturing Standards ISO TC 184.5.1 – 14.09, 1986
- [245.] **Otto, T.**, Reiselust. c't, (1):188 - 193, 1994.
- [246.] **Ousterhout, J.K.**, Tcl and the Toolkit. Addison-Wesley professional computing series. Addison-Wesley, Reading, Mass. [u.a.], 1994.
- [247.] **Özdemirel, N.E.; Yurttas, G.Y. & Köksal, G.**, Computer-Aided Planning and Design of Manufacturing Simulation Experiments, Simulation, Volume 67, pp 171-191, September 1996
- [248.] **Padgett, M.L & Padgett, W.D.**, Simulation and Computational Intelligence in Real-World Applications, Simulation, Volume 64:1, pp 5-9, July 1995
- [249.] **Painter, M.K.; Fernandes, R.; Padmanaban, N. & Mayer, R.J.**, A Methodology for Integrating Business Process and Information Infrastructure Models, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1305-1312, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [250.] **Pegden, C.D.**, Simulation Based Scheduling: Preactor 400, Preactor News, No. 96001, pp 5-6, Summer 1996
- [251.] **Pegden, C.D.; Shannon, R.E.; Sadowski, R.P.**, Introduction to Simulation Using SIMAN, McGraw-Hill, New York, 1990
- [252.] **Pegden, C.D. & Davis, D.A.**, ARENA™: A SIMAN/Cinema-based Hierarchical Modeling System, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 390-399, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992

- [253.] **Peters, B.A.; Smith, J.S.; Curry, J. & LaJimodiere, C.**, Advanced Tutorial - Simulation-Based Scheduling and Control, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 194-198, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [254.] **Pidd, M.**, Five Simple Principles of Modelling, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 721-728, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [255.] **Porcaro, D.**, Simulation Modeling and Design of Experiment, IIE Solutions, pp 24-30, September 1996
- [256.] **Preactor Technical Manual**, The CIMulation Centre, 1994
- [257.] **Preissler, H.**, Von simulierten Wirklichkeiten und realen Illusionen, VDI Berichte Nr. 1219, pp 1-12, 1995
- [258.] **Puppe, F.**, Einführung in Expertensysteme, Springer-Verlag, Berlin 1991
- [259.] **Rachinger, P.**, Computersimulation - Einsatzmöglichkeiten in der Fertigungstechnik, Proceedings of the 2nd International Conference on Production Engineering, pp G-145 - G-155, Zagreb, 18. November 1993
- [260.] **Rachinger, P.**, Fertigungsplanung durch Online-Simulation, Proceedings of the 12th International Conference BIAM '94, ISBN 953-6037-03-3, pp B-5 B-8, Zagreb, Kroatien, 23.-24. Juni 1994
- [261.] **Rametsteiner, W.**, Algorithmen und Softwarefunktionen zur organisatorischen Prozeßführung in der flexiblen Automation komplexer Drehzellensysteme, Dissertation, TU Wien 1993
- [262.] **Ranky, P.G.**, Flexible Manufacturing Cells and Systems in CIM, CIMware Limited, Guildford 1990
- [263.] **Rechenberg, I.**, Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- [264.] **REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.)**, Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme, Carl Hanser Verlag, München 1987
- [265.] **Roberts, N.; Andersen, D.; Deal, R.; Garet, M. & Shaffer, W.**, Introduction to Computer Simulation. A System Dynamics Modeling Approach, Addison-Wesley, 1983
- [266.] **Rogers, R.V. & Zyda, M.**, Modeling and Simulation Education: Is There a Need for Graduate Degrees in Modeling and Simulation?, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1401-1406, Coronado, California, December 8-11, 1996

- [267.] **Rohrer, M.W.**, AutoMod™ Tutorial, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 500-505, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [268.] **Rohrer, M.W.**, AutoSched™ Tutorial, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 506-509, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [269.] **Rolstadas, A.**, Production Planing in a Cellular Manufacturinmg Environment, Computers in Industry, 8, S. 151 – 156, 1987.
- [270.] **Sadowski, R.P.**, Selling Simulation and Simulation Results, Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 122-125, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [271.] **Salvendy, I.**, Handbook of Industrial Engineering, Second Edition, John Wiley & Sons, New York 1991
- [272.] **Salzmann, M.**, Genetische Algorithmen in diskreter Simulation, Dissertation, TU Wien 1995
- [273.] **Sammons, S.M. & Cochran, J.K.**, The Use of Simulation in the Optimization of a Cellular Manufacturing System, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1129-1134, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [274.] **Sargent, R.**, Verifying and Validation Simulation Models, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 55-64, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [275.] **Schwefel, H. & Bäck, Th.**, Künstliche Evolution – eine intelligente Problemlösungsstrategie? In KI – Zeitschrift, S.1-20, 1992
- [277.] **Schwefel, H.P.**, Numerical optimization of computer models. John Wiley & Sons, 1981
- [278.] **Schaffer, J.D., et al.**, Combinations of genetic algoritms and neural networks: a survey of the state of art. In COGANN-92, International Workshop on Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks, 1993.
- [279.] **Scheer, A.-W.**, CIM. Der computergesteuerte Industriebetrieb, 2. durchgesehene Auflage, Springer 1987
- [280.] **Schefe, P.**, Künstliche Intelligenz - Überblick und Grundlagen: grundlegende Konzepte und Methoden zur Realisierung von Systemen der Künstlichen Intelligenz /-2., vollst. überarb. und erw.Aufl. - Hrsg. von K.H.Böhling, U.Kulisch, H.Maurer: (Reihe Informatik; Bd. 53) BI-Wiss.-Verl.,1991 - Mannheim; Wien; Zürich Progressdruck GmbH, Speyer S.15-32 Frohberg, 1993

- [281.] **Schelasin, R.E.A.**, Creating Flexible, IIE Solutions, pp 50-55, May 1995
- [282.] **Schmid, M.**, Erhöhung der Produktionsrate eines Fertigungssystems mit Hilfe „Intelligent Group Technology“, Proceedings of the 2nd DAAAM International Symposium, ISBN 80-233-0225-6, pp 74-75, Strbske Pleso, 9.-11. December 1991
- [283.] **Schöneburg, E.; Heinzmann, F. & Feddersen, S.**, Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien, Addison-Wesley Publishing Company, Bonn, Paris 1994
- [284.] **Schraft, R.-D.**, Produktionstechnologie: Quo vadis?, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 227-266, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [285.] **Schwefel, H-P.**, Numerical optimization of computer models. John Wiley & Sons, 1981.
- [286.] **Schwefel, H.-P.; Bäck, Th.**, Künstliche evolution – eine intelligente Problemlösungsstrategie? In KI – Zeitschrift, pages 1 – 20, 1992.
- [287.] **Sedgewick, R.**, Algorithmen. Addison Wesley, Bonn, 1991.
- [288.] **Sengupta, S. & Van Til, P.R.**, Procedures for estimating desirable initial states of a production line: a comparative study. Journal of Intelligent Manufacturing, April 1997, Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London, pp 489-495
- [289.] **Shukla, C.S. and Chen, F.F.**, The state of art in intelligent real-time FMS control: a comprehensive survey. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.7, No. 6, pp.441-455, (1996).
- [290.] **Sihm, W.**, Unternehmensmanagement bei turbulenter Umwelt, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp. 1-32, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [291.] **SIMTECH**, Diskrete Simulation - Einführung in GPSS/H. Seminarunterlagen (S36), SIMTECH - ARGESIM - EDV-Zentrum TU, Wien 1996
- [292.] **Soliman, M.**, Rechnerunterstützte Optimierung des Betriebsmittelflusses in flexibel automatisierten Fertigung, IFW-Hanover, Hanover, 1988
- [293.] **Spaniol, P.**, Leitstand und PPS-Systeme sollten integriert arbeiten, Fabrik 2000 Nr.5, 1992
- [294.] **Steger, G.**, Termin- und Kapazitätsplanung der Arbeitsplanung, New York, Heidelberg, Wien, London, Paris, Tokio, Springer Verlag, 1988.

- [295.] **Stender, S. & Wincheringer, W.**, Integration indirekter Bereiche in die Wertschöpfungskette am Beispiel der Instandhaltung, in Sihm, W. (Hrsg.), Unternehmensmanagement im Wandel: Erfolg durch Kunden-, Mitarbeiter- und Prozessorientierung, pp.65-98, Carl Hanser Verlag, München - Wien 1995
- [296.] **Sturrock, D.T. & Drake, T.**, Simulation for High-Speed Processing, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 432-436, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [297.] **Syswerda, G.**, Uniform crossover in genetic algorithms. In J. D. Schaffer, editor, Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms, San Matteo, 1989.
- [298.] **Takatori, N.; Minagawa, Y. & Kakazu, Y.**, A Co-Evolutionary Model for Jobshop Scheduling - An Experimental Study of a Multiple-Project Type Problem, , Proc. 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems (Ed. K. Iwata & K. Ueda), pp 197-203, Osaka University, May 11-13, 1997, Osaka, Japan
- [299.] **Tempelmeier, H.**, Simulation mit SIMAN, Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg, 1991
- [300.] **Tempelmeier, H. & Kuhn, H.**, Flexible Fertigungssysteme. Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb, Springer-Verlag, Berlin 1992
- [301.] **Thomas, M.Jr.**, Emerging Technology: Production Scheduling Matures, IIE Solutions, pp 24-29, January 1997
- [302.] **Thompson, W.B.**, Introduction to the WITNESS Visual Interactive Simulator and OLEII Automation, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 547-550, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [303.] **Thompson, M.**, Simulation-Based Scheduling, IIE Solutions, pp. 30-34, May 1996
- [304.] **Tumay, K.**, Business Process Simulation, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 93-98, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [305.] **Tysiak W.**, Einführung in die Fertigungswirtschaft, ISBN 3-446-21522-0, Carl Hanser Verlag, München 2000
- [306.] **Ueda, K.**, Biological Manufacturing Systems and IMS Program, Proceedings of the 7th International DAAAM Symposium, ISBN 3-901509-02-X, Editor B. Katalinic, pp 449 - 452, Wien, 17.-19. Oktober 1996
- [307.] **VDI 1990**, Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion 1. CIM-

- Management, Leitfaden des VDI-Gemeinschaftsausschusses CIM, VDI Verlag, Düsseldorf 1990
- [308.] **VDI 1991**, Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion 5, Produktionslogistik, Leitfaden des VDI-Gemeinschaftsausschusses CIM, VDI Verlag, Düsseldorf 1991
- [309.] **VDI 1993**, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Grundlagen, VDI 3633, Blatt 1, Dezember 1993
- [310.] **VDI 1994**, Holonische Fertigungssysteme arbeiten autonom, VDI Nachrichten, Nr. 44, 4. November 1994
- [311.] **VDI 1995**, Auswahl von Simulationswerkzeugen. Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien, VDI 3633, Entwurf, Blatt 4, Mai 1995
- [312.] **VDI 1996a**, Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Begriffsdefinitionen, VDI 3633, Entwurf, November 1996
- [313.] **VDI 1996b**, Lastenheft/Pflichtenheft und Leistungsbeschreibung für die Simulationssoftware, VDI 3633, Entwurf, Blatt 2, Dezember 1996
- [314.] **Warnecke, G.**, Expertensysteme in CIM, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1991
- [315.] **Weck, M.(Bd.Hrsg.)**, Simulation in CIM, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1991
- [316.] **Weigl, K.H.**, Graphische Simulation in der Fertigungstechnik: Verfahren zur Planung und Systemanalyse eines modularen flexiblen Fertigungssystems mit Hilfe der visuellen, interaktiven Computersimulation, Dissertation, TU Wien 1992
- [317.] **Weigl, K.H.**, Simulation in der Fertigungstechnik, Skriptum, Technische Universität Wien - IFT, Wien 1993
- [318.] **Weigl, K.H.**, Scheduling und Simulation - industrieller Einsatz mit modernen Werkzeugen, Proceedings of the 7th International DAAAM Symposium, ISBN 3-901509-02-X, Editor B. Katalinic, pp 477-478, Wien, 17.-19. Oktober 1996
- [319.] **Weizenbaum, J.**: Computer Power and Human Reason. From Judgement to Calculation, 1977
- [320.] **Wessely, E.; Anna, V.; Hradocky, L.; Duranik, M. & Mendel, M.**, Semiautomated Workplace with Transport Welding Unit, Proceedings of the 7th International DAAAM Symposium, ISBN 3-901509-02-X, Editor B. Katalinic, pp 011 - 012, Wien, 17.-19. Oktober 1996
- [321.] **Westkämper, E.**, Zertifizierung, Anstoß für ein Reengineering der Produktion, Sonderteil in Hanser Fachzeitschriften, Zertifizierung, November 1994, pp 88 -93, Carl Hanser Verlag, München 1994

- [322.] **Whyte, T.C. & Starks, D.W.**, ACE: A Decision Tool for Restaurant Managers, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 1257-1263, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [323.] **Wildberger, A.M.**, Introduction & Overview of „Artificial Life“ - Evolving Intelligent Agents for Modeling & Simulation, Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-3383-7, pp 161-168, Coronado, California, December 8-11, 1996
- [324.] **William K., Inc.**, 1981, Pitman Books Limited.
- [325.] **Winston, P.**, Henry: Artificial Intelligence Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading 1984, 1981
- [326.] **Withers, D.**, Software/Modelware Application Requirements (Panel), Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, ISBN 0-7803-07987-4, pp 205-210, Arlington, Virginia, December 13-16, 1992
- [327.] **Wright, P.K.**, Manufacturing Intelligence, Addison-Wesley Publishing Company, Bonn, Paris 1988
- [328.] **Yamada, T. & Nakano, R.**, A genetic algorithm applicable to large-scale job-shop problems, Proc. 2nd Conference on Parallel Problem Solving from Nature (Brussels, 1992) ed. R. Männer and B. Manderick (Amsterdam: Elsevier), pp281-290
- [329.] **Zadeh, L. A.**, Fuzzy Logic = Computing with Words, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 103 - 111., 1996
- [330.] **Zeigler, B.P.**, Theory of Modelling and Simulation, John Wiley & Sons, 1976
- [331.] **Zeigler, B.P.**, Multifaceted Modelling and Discrete Event Simulation, Academic Press Inc., London 1984
- [332.] **Zhang, J. et al.**, Information Modeling for Manufacturing Systems: A Case Study, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 12, No. 3, pp. 217-225, 1996
- [333.] **Zörnlein, G.**, Flexible Fertigungssysteme, Carl Hanser Verlag, München-Wien 1988

TABELLEVERZEICHNIS

- Tab.1.1 Vergleich wichtigsten flexibler Produktionssysteme [169]
- Tab.3.1 Vergleich der Möglichkeiten des Lösungsverhaltens beim Verplanen von Aufträgen
- Tab.4.1 Software für Produktions- und -logistiksysteme
- Tab.4.2 Software für Produktions- und Logistiksysteme
- Tab.9.1 Parametern der GA für Beispiel 2.
- Tab.9.2 Parametern der GA für Beispiel 3.
- Tab.9.3 Vergleich zwischen Auswahlkriterien und ihre Kombination



LEBENS LAUF

1 NAME

EDMOND HAJRIZI

Familienstand
Staatsangehörigkeit

27.08.1971 geboren in Lipjan / Kosovo, als Sohn des
Prof. Bislim Hajrizi und der Gjemile Hajrizi geb. Breznica
verheiratet
Kosovo

2 AUSBILDUNG

1977 - 85

Grundschule in Lipjan

1985 - 89

Gymnasium in Ferizaj

6/1989

Fachrichtung: Maschinenbau- Konstruktion von Werkzeugmaschinen
Reifeprüfung

1989 - 93

Studium an der Universität von Prishtina / Fakultät für Maschinenbau

11/1993

Sponson zum Diplomingenieur für Maschinenbau

1993 -1996

Außerordentlicher Student an der Philologischen Fakultät der

Universität Prishtina / Abt. für die deutsche Sprache

1995 - 1997

Nachdiplomstudim („master of science“)

an der Fakultät für Maschinenbau der Universität von Prishtina

10/1996 - 6/1997

Besuch des Vorstudienlehrganges der Wiener Universitäten in Wien

10/1997 - 2000

Doktoratsstudium an der TU-Wien / Abtlg. für Computersimulation

1997 -

Studium der Informatik an der TU- Wien

3 ARBEITEN ZUM ERREICHEN DER FACHTITEL

1. Diplomarbeit:

„Automatisiertes Schweißen des Wassertanks RU-1“,
Universität von Prishtina / Fakultät für Maschinenbau.

2. Abschlussarbeit für „master of science“:

„Die Synthese der asynchronen Automaten und Auswahl der Steuerungstechnologie mit Computer“,
Universität von Prishtina / Fakultät für Maschinenbau.

3. Doktorarbeit:

„Intelligentes Online- Planungs- und Steuerungssystem für flexible Produktionssysteme basierend auf Simulation und Optimierung mit genetischen Algorithmen“, TU-Wien,

4 SPRACHKENNTNISSE

Deutsch, Englisch, Albanisch

5 BISHERIGE TÄTIGKEITEN

- Universitätsassistent an der Fakultät für Maschinenbau, Prishtina
- Projektmitarbeiter, SIEMENS AG, Wien, Österreich
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU- Wien, MB, Institut für Fertigungstechnik, Abtlg. Intelligent Manufacturing Systems
- Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU-Wien, TNF, Abtlg. Computersimulation

6 PROFESSIONELLE ERFAHRUNGEN

- Simulation und Optimierung
- Supply Chain Management
- Automatisierungstechnik (SPS-Steuerung, Sensorik, Feldbussysteme, Prozeßvisualisierung)
- SoftComputing (Neuronale Netze, genetische Algorithmen, Fuzzy Logik, ...)
- Software Engineering (Programmierung),
- Projektmanagement,
- Internet Applikationen,
- CAD Applikationen,
- Robotik

7 EINIGE FACHPROJEKE

1. Hajrizi, E.: „Simulierung und Optimierung der Abläufe den flexiblen SMD & THT-Linien“, SIEMENS AG, Wien, Österreich, 1998
2. Hajrizi, E.: "Projektentwurf und Investitionslaborat für die Stoßdämpferfabrik für die Produktion der hydraulischen Teleskopstoßdämpfer ϕ 28", Fakultät für Maschinenbau, Prishtina, 1996
3. Hajrizi, E.: "Betrachten der Temperatur während der Bearbeitung durch Schneiden des Materials Stahl 0645", Fakultät für Maschinenbau, Prishtina, 1995

8 EINIGE PUBLIKATIONEN

1. **Hajrizi, E.:** Comparison nr.2 (flexible Fertigungslinie) with Taylor TED", EUROSIM Simulation News, November 2000, Wien, Österreich.
2. **Hajrizi, E. & Breitenecker, F.:** „INTSCHED –ein intelligentes software Modul für die Simulation basierend Scheduling in flexible Fertigungssystemen“, ASIM2000/ESS2000 international Tagung, Hamburg, Deutschland, 2000
3. **Hajrizi, E.:** „Optimierungsabläufe der flexiblen Fertigungssystemen durch genetische Algorithmen“, ASIM2000/ESS2000 International Tagung, Hamburg, Deutschland, 2000
4. **Katalinic, B. & Hajrizi, E.:** „Die Struktur eines intelligentes Moduls für Leitstandssoftware komplexer FFS“, CO-MATH-TECH International Tagung, Trnava, 2000
5. **Katalinic, B. & Hajrizi, E.:** „Comparison of working scenarios by „GA-Optimizer“ – an intelligent modul for optimization of complex FMS scheduling“, 11th DAAAM Symposium, Opatija, 200
6. **Hajrizi, E.:** „Modellbildung und Simulation eines Flexiblen Fertigungssystem in Taylor ED“, ARGESIM: “ Diskrete Simulation mit Taylor ED, Netzwerksimulation mit Opnet“, Juni 2000, Wien, Österreich.
7. **Hajrizi, E.:** "Implementation a GA-Optimizer for Optmization of Complex FMS Scheduling“, DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing &Automation: Past – Present – Future“, Vienna, Österreich, October 1999.
8. **Hajrizi, E.:** „Simulation der Flexible Fertigungssystemen mit Arena“, ARGESIM: "Anwendungen Diskreter Simulation – ARENA“, April 1999, Wien, Österreich.
9. **Hajrizi, E.:** „Design the control system with a neuronal network for robot's joint“, ARGESIM Symposium: "MATLAB-Seminar“, März 1999, Wien, Österreich.
10. **Hajrizi, E.:** Comparison nr.9 (Fuzzy Logic-Problem) with LabVIEW", EUROSIM Simulation News, Dezember 1998, Wien, Österreich.
11. **Hajrizi, E.:** Soft Computing in LabVIEW", ARGESIM: "Soft Computing in Modellbildung und Simulation", Dezember 1998, Wien, Österreich.
12. **Katalinic, B. & Hajrizi, E.:** "Genetic Algorithms as a Tool for Optimisation of Order Sequences of Complex FMS", DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing, Automation & Networking", Cluj-Napoca, Rumani, October 1998,
13. **Hajrizi, E. & Katalinic, B.:** "Modelling Production Processes using Petri nets", DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing, Automation & Networking", Cluj-Napoca, Rumania, October 1998.
14. **Katalinic, B. & Hajrizi, E.:** „Design Methodology of Scheduling Strategies and Scenarios of Complex Flexible Systems“, International Symposium: „Nxitja Teknologjike e Ndërmarrjeve të vogla dhe të mesme“, Dezember 1997, Tiranë, Albania
15. **Hajrizi, E.:** „Anwendung der Experten Systemen für Auswahl der Steuerungstechnologien, International Symposium: „Nxitja Teknologjike e Ndërmarrjeve të vogla dhe të mesme“, Dezember 1997, Tiranë, Albania
16. **Hajrizi, E.; Shabani, S. & Katalinic, B.:** "Computer Design Optimal Asinchronous Devices", 8th DAAAM International Symposium: "Intelligent Manufacturing & Automation", ICCU, 23-25th October 1997, Dubrovnik, Croatia
17. **Bytyçi, B. & Hajrizi, E.:** "Zeitgenossische Kriterien bei der Auswahl des Werkstoffs für den Schweißbedarf", Werkensammlung I, Universität von Prishtina, Fakultät für Maschinenbau Prishtina, 1995
18. **Bytyçi, B. & Hajrizi, E.:** "Schweissen des Gußstahles", Handbuch, Prishtina, 1994

9 TECHNICAL EDITOR

1. **Proceedings** of the 10th International Danub Adria Association for Automation & Manufacturing Symposium, „Intelligent Manufacturing & Automation: Past-Present-Future“, Vienna, 1999, Österreich
2. **Proceedings** of the 9th International Danub Adria Association for Automation & Manufacturing Symposium, „Intelligent Manufacturing, Automation and Networking“, Cluj Napoca, 1998, Romenien
3. **Proceedings** of the 8th International Danub Adria Association for Automation & Manufacturing Symposium, 23-“Intelligent Manufacturing & Automation“, Wien, 1997
4. Q. Buqinca: "Die Organisation der Produktion", Universitätsbuch, Universität von Prishtina, Fakultät für Maschinenbau, Prishtina, 1996.
5. S. Shkodra: "Mathematik I", Universitätsbuch, Universität von Prishtina, Fakultät für Maschinenbau Prishtina, 1996.
6. Z. Krasniqi: "Technologische Systeme", Vorlesungsskriptum, Universität von Prishtina, Fakultät für Maschinenbau, Prishtina, 1995
7. Z. Krasniqi & N. Qehaja: "Technologische Systeme-Übungen", Vorlesungsskriptum, Universität von Prishtina, Fakultät für Maschinenbau, Prishtina, 1995

10 MITGLIED DES „ASIM“ (VEREIN FÜR SIMULATION UND MODELLBILDUNG)

11 MITGLIED DES ORGANISATIONSKOMITEES DES INTERNATIONALEN SYMPOSIUMS: „DANUBE ADRIA ASSOCIATION FOR AUTOMATION AND MANUFACTURING“

12 MITGLIED DES ÖSTERREICHISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTENVEREINS

13 AUSZEICHNUNGEN

1. „Preis von DAAAM-International Symposium“, Dubrovnik, Kroatien, 1997
2. "Preis der Universität von Prishtina für Studenten mit ausgezeichnetem Erfolg", Universität von Prishtina, Kosovo, 1994
3. "Preis der Fakultät für Maschinenbau für den besten Studenten an der Fakultät für Maschinenbau, Universität von Prishtina, Kosovo, 10. 1993
4. "Preis des Unterrichtsministeriums für Schüler mit ausgezeichnetem Erfolg", Unterrichtsministerium des Kosovo, Prishtina, Juni 1985

Über den Autor



Dipl.-Ing. Dr.techn. Edmond Hajrizi arbeitete von 1999 bis 2005 an Technischen Universität Wien, Abteilung Computersimulation, als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Der größte Teil seiner Arbeiten befasst sich mit Produktionsplanung- und Steuerung, Optimierung, Simulation und mit der Anwendung der Künstlichen Intelligenz, besonders Softcomputing, im Bereich von Produktionstechnik und Robotik. In diesen Bereichen hat er zahlreiche wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht und an Projekten mitgearbeitet.

Über diesen Band ...

Flexible Fertigungssysteme (FFS) stellen eine sehr effiziente Form von Produktionssystemen dar, jedoch sind ihre Abläufe extrem komplexe Optimierungsaufgaben. Dabei spielen viele unterschiedliche Restriktionen bei einer realen Problemstellung eine Rolle, beispielsweise alternative Prozesspläne für die Herstellung eines Produktes etc.

Für einen effizienten Ablauf ist es erforderlich, intelligente Werkzeuge zur Optimierung von Produktionsszenarien zu implementieren, um Problemsituationen lösen zu können. Der Autor stellt in dieser Arbeit eine "intelligente" Leitstandssoftware mit entsprechender Umgebung vor, die alle notwendigen Eigenschaften für die moderne Lösung solch eines Problems besitzt.

Bemerkenswert ist aber auch die einheitliche und konsistente Darstellung des optimalen Scheduling aus den verschiedenen Sichten, einschließlich der Anwendung, Software, Methodik und Effizienz. Dadurch kann die Arbeit auch als Referenzwerk für die Entwicklung und Adaptierung solcher Software gesehen werden.

Über diese Reihe ...

Die Bände dieser neuen ASIM - Reihe Fortschrittsberichte Simulation konzentrieren sich auf neueste Lösungsansätze, Methoden und Anwendungen der Simulationstechnik (Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften, Medizin, Ökonomie, Ökologie, Soziologie, etc.).

ASIM, die deutschsprachige Simulationsvereinigung (Fachausschuss 4.5 der GI - Gesellschaft für Informatik) hat diese Reihe ins Leben gerufen, um ein rasches und kostengünstiges Publikationsmedium für derartige neue Entwicklungen in der Simulationstechnik anbieten zu können.

Die Fortschrittsberichte Simulation veröffentlichen daher: * Monographien mit speziellem Charakter, wie z. B. Dissertationen und Habilitationen * Berichte zu Workshops (mit referierten Beiträgen) * Berichte von Forschungsprojekten * Handbücher zu Simulationswerkzeugen (User Guides, Vergleiche, Benchmarks), und Ähnliches.

Die Kooperation mit den ARGESIM Reports der ARGESIM vermittelt dabei zum europäischen Umfeld und zur internationalen Publikation.