

Forschungsberichte

iwb

Band 133

Knut Heitmann

***Sichere Prognosen für die
Produktionsoptimierung
mittels stochastischer Modelle***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iw b

**Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München**

herausgegeben von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iw b)**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 1999

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 1999

ISBN 3-89675-675-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Reinart, meinem Doktorvater, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

Nicht zuletzt gilt mein Dank auch meiner Familie, ohne deren große Geduld und verständnisvolle Unterstützung das Fertigstellen der Arbeit kaum möglich gewesen wäre.

München, Dezember 1999

Knut Heitmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit	4
1.3	Vorgehensweise	5
2	Randbedingungen und Motivation der Arbeit	7
2.1	Ziele und Aufgaben der Produktionsoptimierung	7
2.1.1	Ziele der Produktionsoptimierung	7
2.1.2	Aufgaben und Fragestellungen der Produktionsoptimierung	8
2.2	Anwendungsumfeld des Prognosesystems	9
2.2.1	Produktionssystem	10
2.2.2	Systembediener	10
2.2.3	Aufgabenstellungen	11
2.2.4	Datenquellen	11
2.2.5	Planungsergebnisse	11
2.3	Rolle des Prognosesystems im Rahmen der Aufgabenstellungen der Produktionsoptimierung	11
2.3.1	Rolle bei der taktischen Optimierung von Strukturen und Strategien	12
2.3.2	Rolle bei der operativen Optimierung der Betriebsparameter	12
2.4	Stellenwert der Prognosegüte für die Produktionsoptimierung	12
2.4.1	Stellenwert für die taktische Optimierung von Strukturen und Strategien	13
2.4.2	Stellenwert für die operative Optimierung der Betriebsparameter	13
2.4.3	Resultierende Anforderungen an die Prognosestreue	14
2.5	Zusammenfassung und Fazit	15

3 Betriebsbegleitende Simulation und Prognosefehler	16
3.1 Das Konzept der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation	16
3.1.1 Betriebsbegleitender Einsatz der Ablaufsimulation	17
3.1.2 Gegenüberstellung von planungsunterstützender und betriebsbegleitender Simulation	18
3.1.3 Stellenwert und Verbesserungsbedarf der Ablaufsimulation in der Praxis – Ergebnisse einer empirischen Studie	21
3.2 Typisierung von Prognosefehlern	25
3.3 Analyse der Prognosefehler bei realen Produktionssystemen	26
3.3.1 Die betrachteten Anlagen	26
3.3.2 Größenordnungen der Prognoseabweichungen	28
3.3.3 Statistische Besonderheiten	31
3.3.4 Theoretische Überlegungen zu den stochastischen Charakteristika unterschiedlicher Organisationstypen der Produktion	34
3.3.5 Schlußfolgerungen aus den Analyseergebnissen	36
3.4 Ursachen für eine mangelnde Prognosegüte bei der betriebsbegleitenden Simulation	37
3.4.1 Daten- und modellbedingte Prognosefehler	37
3.4.2 Experimentbedingte Prognosefehler	38
3.4.3 Auswertungsbedingte Prognosefehler	39
3.4.4 Konsequenzen für die Verbesserung der Prognosegüte	39
3.5 Zusammenfassung	40
4 Bekannte Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte	41
4.1 Verbesserung der Aktualität der Basis- und Eingangsdaten	41
4.2 Pflege und Aktualisierung des Simulationsmodells	41
4.3 Methoden zur korrekten Abbildung der Stochastik in der Simulation	42
4.4 Methoden und Systeme zur Experimentplanung	43
4.5 Statistische Korrekturmodelle und Fehlerkompensation	44
4.6 Systeme zur statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse	45
4.7 Benutzerschnittstellen und Visualisierungsmethoden	45

4.8	Zusammenfassung des Standes der Forschung und Fazit	46
5	Konzept eines Prognosesystems für die Produktionsoptimierung	49
5.1	Grundidee und Rahmenkonzept	49
5.1.1	Experimentplanung	49
5.1.2	Modellgenerierung und -konfiguration	50
5.1.3	Experimentsteuerung	50
5.1.4	Fehlerkompensation und Schätzung der stochastischen Unsicherheit	51
5.1.5	Ergebnisauswertung	51
5.1.6	Visualisierung	52
5.2	Ableitung eines Pflichtenheftes für die Funktionsmodule	52
5.2.1	Anforderungen an die Experimentplanung	52
5.2.2	Anforderungen an das Modell und die Modellierung	53
5.2.3	Anforderungen an die Experimentsteuerung	53
5.2.4	Anforderungen an die Fehlerkompensation und die statistische Auswertung	53
5.2.5	Anforderungen an die Ergebnisvisualisierung	54
5.3	Zusammenfassung	54
6	Experimentplanung und -steuerung	56
6.1	Analyse der Aufgabenstellung bei der Definition betriebsbegleitender Simulationsexperimente	56
6.1.1	Klassifizierung der Fragestellungen	57
6.1.2	Strategische und taktische Aspekte der Experimentplanung	58
6.2	Lösungskonzept zur Konfiguration und Steuerung stochastischer Einzelexperimente	59
6.2.1	Experimentplanung mittels Experimentrahmen	60
6.2.2	Konfiguration eines zum Experiment passenden Simulationsmodells	61
6.2.3	Experimentsteuerung	62
6.2.4	Baukasten geeigneter Auswerte- und Visualisierungsverfahren	64
6.3	Darstellung des Experimentablaufs	64
6.4	Zusammenfassung	66

7	Generierung prognostreuer Simulationsmodelle	67
7.1	Aspekte bei der Modellierung der Systemstochastik	68
7.2	Einflußfaktoren auf die Modellierung der Systemstochastik	69
7.3	Modellierungstypen	71
7.4	Spezielle Modellierungstechniken für stochastische Effekte bei der betriebsbegleitenden Simulation	74
7.4.1	Methoden zur Verdichtung und Abstraktion stochastischer Effekte	74
7.4.2	Methoden zur korrekten und effizienten Modellierung von Abhängigkeiten zwischen stochastischen Effekten	75
7.4.3	Methoden zur korrekten und effizienten Modellierung besonders seltener stochastischer Effekte	76
7.4.4	Vorgehen bei irrelevanten stochastischen Effekten	77
7.5	Automatische Modellgenerierung	77
7.5.1	Konzept generischer Modellbausteine	77
7.5.2	Auswahl von Modellierungstyp und Modellbausteinen	79
7.5.3	Akquisition aktueller Modelldaten	79
7.5.4	Modellaufbau	82
7.6	Zusammenfassung	83
8	Kompensation von Prognosefehlern und statistische Auswertung	84
8.1	Statistische Grundlagen und Verfahren	84
8.1.1	Statistische Standardverfahren und -kennzahlen	84
8.1.2	Spezielle Methoden zur Kennzahlberechnung	88
8.1.3	Methoden zur Prüfung der Voraussetzungen für die Kennzahlberechnung	97
8.1.4	Methoden zur Visualisierung der stochastischen Informationen	98
8.2	Konzeption der Funktionsmodule zur Fehlerkompensation, Auswertung und Darstellung	99
8.2.1	Berechnungsmodul	100
8.2.2	Daten- und Modellmanagement	104
8.2.3	Visualisierung	106
8.3	Ablauf der Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung	107

8.4	Zusammenfassung	108
9	Realisierung und beispielhafte Anwendung	109
9.1	Einbindung in ein Planungssystem zur Produktionsoptimierung	109
9.2	Realisierung der Module des Prognosesystems	110
9.2.1	Modul zur Experimentplanung und Experimentrahmen	110
9.2.2	Modellgenerator und Simulationsumgebung	111
9.2.3	Modul zur Auswertung, Fehlerkompensation und Visualisierung	113
9.3	Beispielhafte Anwendung	116
9.3.1	Erstellung der statistischen Modelle: Analyse und Darstellung der systematischen Prognosefehler und der realen Anlagenstochastik	117
9.3.2	Prognosekorrektur, Auswertung und Visualisierung	118
9.3.3	Bewertung des Aufwandes und der Akzeptanz	119
10	Zusammenfassung und Ausblick	121
10.1	Ergebnisse der vorliegenden Arbeit	122
10.2	Stellenwert der Forschungsergebnisse und kritische Würdigung	123
10.3	Ausblick	125
11	Literaturverzeichnis	126
12	Glossar	134

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Produzierende Unternehmen von heute sehen sich einem immer härter werdenden Wettbewerb ausgesetzt. Dieser Wettbewerb resultiert aus einer Globalisierung der Märkte, der Mobilität von Ressourcen, insbesondere der Information, und stetig wachsenden Qualitätsanforderungen an Produkte und Prozesse (Bild 1-1). Kunden sehen sich immer mehr in der Lage, Produkte und Dienstleistung weltweit zu beziehen. Wettbewerber können immer leichter Produktionsstandorte in verschiedenen Ländern und Kontinenten errichten und erschließen sich somit schnell das notwendige Wissen über Märkte, Produkt- und Produktionstechnologien. Sie sind imstande, qualitativ hochwertige Produkte zu geringen Kosten bereitzustellen.

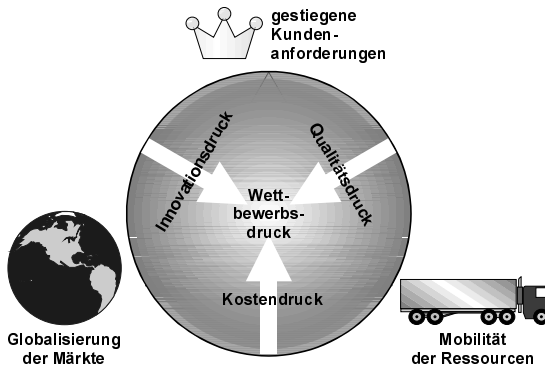


Bild 1-1: Aktuelle Herausforderungen produzierender Unternehmen

Um in diesem Wettbewerb zu bestehen, sind Unternehmen gezwungen, durch Innovationen ihrer Produkte oder Prozesse Wettbewerbsvorteile zu erhalten oder neue zu schaffen (REINHART 1997A, S. 12). Die Fähigkeit, sich neuen Randbedingungen rasch anzupassen, ist in diesem Umfeld der Schlüssel zum langfristigen Erfolg geworden. Produktionssysteme müssen in der Lage sein, flexibel ihre Prozesse, Systeme und Organisationsstrukturen auf geänderte Anforderungen umzustellen.

Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an Planungs- und Steuerungshilfsmittel (REINHART 1997B, S. 176). Es ist nicht mehr ausreichend, wenn ein solches Hilfsmittel die klassischen produktionslogistischen Ziele, Termintreue, Umlaufbestand, Durchlaufzeit und Auslastung, bei einem Produktionssystem mit konstantem Produktionsprogramm und unter statischen Betriebsbedingungen unterstützt (Bild 1-2). Vielmehr müssen moderne Hilfsmittel sich leicht an veränderte Abläufe und Strukturen anpassen lassen; sie müssen adaptiv sein. Hinzu kommt, daß moderne Produktionssysteme eine zunehmende

Komplexität und Vernetzung aufweisen. Die Auswirkungen einzelner Eingriffe auf das Gesamtsystem können nur sehr schwer vorhergesagt werden. Der Faktor Transparenz hat zunehmend an Bedeutung gewonnen (WESTKÄMPER ET AL. 1998, S.22, WIENDAHL & SCHEFFCZYK 1997). Damit ist es notwendig, daß Planungs- und Steuerungshilfsmittel detaillierte Einblicke in die produktionslogistischen Abläufe ermöglichen und Prognosen der zukünftigen Kennzahlen des Produktionssystems bereitstellen.

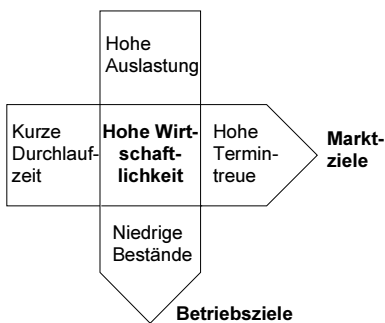


Bild 1-2: Klassische produktionslogistische Zielsetzung (WIENDAHL 1987)

Bei der Weiterentwicklung von Ansätzen und Hilfsmitteln zur Planung und Steuerung sind die klassischen Ziele der Produktionslogistik gegenüber diesen neuen, übergeordneten Zielen aus dem Zentrum der Betrachtung gerückt. Parallel dazu hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, daß eine extreme Ausrichtung an den klassischen Zielen im heutigen Wettbewerbsumfeld auch Nachteile bringen kann. Beispielsweise ist eine Vollausslastung der Ressourcen weder in der Praxis realisierbar, noch im Hinblick auf Flexibilität und Transparenz wünschenswert.

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, daß die betriebsbegleitende Ablaufsimulation sowohl bei der Optimierung der Strukturen und Steuerungsstrategien eines Produktionssystems, als auch bei der Produktionsplanung und -steuerung das Planungs- und Leitstandpersonal unterstützen kann (NOCHE 1993, DECKER & MARTIN 1994). Simulation schafft die notwendige Transparenz und hilft somit dem Planer, komplexe Abläufe besser zu verstehen. Sie stellt eine kostengünstige Experimentierbasis dar und bietet die Möglichkeit, Planungsszenarien zu bewerten und Prognosen über das zukünftige Verhalten eines Produktionssystems zu erstellen. Durch den Einsatz der Simulation können die Auswirkungen aktueller Entscheidungen auf das zukünftige Systemverhalten frühzeitig erkannt und eventuell notwendige flankierende Maßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden. Insbesondere bei sehr dynamischen und komplexen Produktionssystemen liefert sie in der Regel zuverlässigere Bewertungen und Prognosen als statische Prognose- und Bewertungsverfahren. Realistische Bewertungen und zuverlässige Prognosen einer Produktionssituation sind Voraussetzungen für eine qualitativ hochwertige Planung.

Simulationsexperimente können allerdings, je nach Modellqualität und Untersuchungsziel, sehr zeitaufwendig sein. WIENDAHL & SCHOLTISSEK (1993, S. 43) stellen fest, daß

sich aufgrund des Zeitaufwandes für Simulationsexperimente (Datenaufbereitung, mehrere Programmläufe, Ergebnisauswertung) die Analyse mittel- und langfristiger Fragestellungen anbietet. Als Beispiele für das mögliche Analysepotential führen sie folgende Fragen an:

Im Bereich Fertigungssteuerungsverfahren und -parameter:

Welche Vor- oder Nachteile ergeben sich für den Produktionsbereich aus der Wahl

- einer Auftrags- oder Arbeitsvorgangsterminierung?
- eines bestimmten Auftragsfreigabeverfahrens?
- einer bestimmten Prioritätsregel?
- von Parametern der Fertigungssteuerung?

Im Bereich Produktionsprogrammplanung und Auftragsbildung:

- Wie wirken sich Veränderungen im Produktionsprogramm auf die Ausbringung und die Lieferzeit aus?
- Ist der Produktionsbereich in seiner aktuellen Form flexibel genug, um ein verändertes Produktionsprogramm bewältigen zu können?
- Welche Auswirkungen auf die Produktionslogistik ergeben sich aus wechselnden Verfahren zur Losgrößenberechnung?

Inzwischen sind aber auch eine Reihe von Anwendungen bekannt, bei denen die Simulation im eher kurzfristigen Entscheidungsbereich eingesetzt wird. EULENBERGER & AUGUSTIN (1995, S. 65) und SCHALLA (1995, S. 20) führen auf, daß durch betriebsbegleitende Simulation eine erhebliche Verbesserung des Betriebsergebnisses erzielt werden konnte. Der Triebwerkshersteller Pratt & Whitney beispielsweise erhöhte seine Liefertermintreue durch den Einsatz eines Leitstandes auf Basis der betriebsbegleitenden Simulation von 50% auf nahezu 98% (PRITSKER ET AL. 1991, S. 15). Ein amerikanischer LKW-Teilefertiger erreichte eine Reduzierung der Rüstzeiten um 27% und der Rüstkosten um 12% sowie eine Erhöhung des Durchsatzes um 29% (CREDLE 1993, S. 30). Die Simulation wird dabei während des laufenden Betriebs zur Feinsteuerung eingesetzt, um beispielsweise die folgenden Fragestellungen zu klären:

- Werden die Aufträge termingerecht fertiggestellt, bzw. welche Aufträge werden nicht termingerecht fertiggestellt?
- Durch welche Maßnahmen kann die termingerechte Fertigstellung der Aufträge sichergestellt werden?
- Wie wirkt sich ein Eilauftrag auf die gegebene Fertigung aus?
- Wie wirkt sich die Erhöhung der Kapazität einer bestimmten Kostenstelle auf die anderen Kapazitäten sowie auf die Durchlaufzeit und Termineinhaltung aus?
- Wie wirkt sich eine Störung auf die Fertigstellungstermine aus?
- Wie wirken sich Instandhaltungsmaßnahmen auf den Auftragsdurchlauf aus?

Es kann also festgestellt werden, daß sich mit Planungs- und Steuerungshilfsmitteln, die auf der betriebsbegleitenden Simulation basieren, Möglichkeiten ergeben, die weit über die Funktionalität gegenwärtiger PPS- und Leitstandsysteme hinausgehen.

In der praktischen Anwendung der betriebsbegleitenden Simulation haben sich jedoch Defizite gezeigt, die ihren Einsatz insbesondere in Produktionssystemen, die einem stetigen Wandel unterliegen, in Frage stellen. Beispielsweise stellt gerade die Veränderung von Strukturen und Abläufen ein Problem dar, weil das Simulationsmodell ständig an die neue Situation angepaßt werden muß. Diese Modellanpassungen werden heute in der Regel noch manuell vorgenommen. Modellanpassungen erfordern meist einen geschulten Simulationsexperten und verursachen einen erheblichen Aufwand. Zudem wird bei der betriebsbegleitenden Simulation die Validierung des Modells erschwert, weil beispielsweise ein langfristiger Vergleich von Simulation und Realität zu zeitaufwendig ist. Wird ein Modell nicht regelmäßig gewartet, verschlechtert sich die Bewertungsqualität und die Prognosestreue.

Fehlerhafte Bewertungen und Prognosen bergen die Gefahr, daß nicht die beste der Planungsalternativen ausgewählt und infolgedessen das Planungsziel verfehlt wird oder daß wichtige Produktionsvorgaben, wie beispielsweise Fertigstellungstermine, nicht eingehalten werden. In der heutigen Wettbewerbssituation führt dies zu erheblichen Wettbewerbsnachteilen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zu einer verbesserten Prognosegüte für verschiedene Einsatzfälle der betriebsbegleitenden Simulation. Darunter wird im einzelnen verstanden, daß eine Prognose hinsichtlich **Informationsumfang und Detaillierung** an die Planungsaufgabe angepaßt wird. Weiterhin sollte die **Prognosestreue** hoch sein. Das bedeutet zum einen, daß der **Erwartungswert der Prognose** exakt sein und somit mit dem Mittelwert der realen Beobachtungen übereinstimmen sollte. Zum anderen muß auch die **Unsicherheit der Prognose** exakt abgeschätzt werden können. Dies bedeutet, daß die Prognose statistische Aussagen beinhaltet, die die Stochastik des realen Fertigungssystems genau widerspiegeln. Um die Prognosen besser interpretieren zu können, müssen geeignete Visualisierungsformen definiert werden (Bild 1-3).

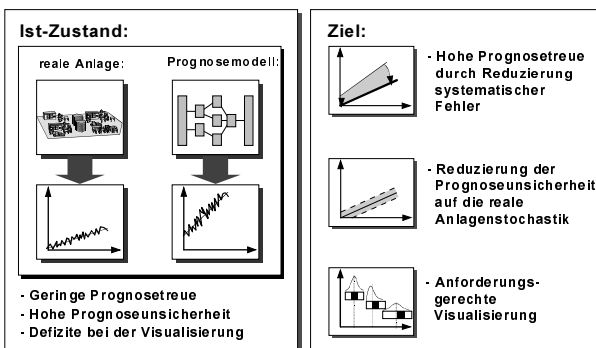


Bild 1-3: Zielsetzung der Arbeit

Die Verbesserung der Prognosegüte soll allerdings ohne zusätzlichen Aufwand für die Erstellung der Prognose erreicht werden. Der Aufwand für die Pflege des Prognosemodells, gerade unter den Randbedingungen der häufigen Veränderung des Produktionssystems, soll auf ein Minimum reduziert werden. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, daß die Prognosemodelle, zumindest in gewissen Grenzen, adaptiv sind, d.h. sich an ein verändertes Verhalten des Fertigungssystems anpassen. Auch die Funktionen Planung, Durchführung und Auswertung der Prognosen bzw. Experimente müssen zu einer Verbesserung der Prognosegüte beitragen. In der Gesamtheit führen die zu erarbeitenden Konzepte zu einer Verbesserung des Nettonutzens der betriebsbegleitenden Simulation.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll kein neues Planungs- oder Optimierungsverfahren entwickelt werden. Vielmehr wird am Ende der Arbeit ein Prognosesystem stehen, welches die Rahmenbedingungen und Anforderungen der unterschiedlichen typischen Fragestellungen der Produktionsoptimierung berücksichtigt und sich leicht an veränderte Strukturen und Abläufe in der Produktion anpassen läßt bzw. sich in Grenzen sogar selbstständig anpaßt. Das Informationsangebot des Prognosesystems ist mit dem Informationsbedarf der Fragestellungen der Produktionsoptimierung abgestimmt. Einen Schwerpunkt bildet die Integration verschiedener Lösungsansätze zu einem Prognosesystem auf Basis der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation. Als Anwendungsbeispiel dient die simulationsbasierte Produktionsregelung, in welche das Prognosesystem exemplarisch implementiert wird.

1.3 Vorgehensweise

Zum Erreichen der Zielsetzung werden verschiedene Ansätze aus den Bereichen Experimentplanung, Datenakquisition, Modellierung, Auswertung und Ergebnisdarstellung verfolgt und praxisingerechte Lösungen entwickelt (Bild 1-4).

Zu Beginn der Arbeit wird die Problemstellung analysiert. Hierzu wird die Aufgabenstellung der Produktionsoptimierung detailliert sowie die Bedeutung der Prognosegüte analysiert (Kapitel 2).

Anschließend werden das dieser Arbeit zugrundeliegende Konzept der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation vorgestellt und die allgemeinen Anforderungen und Randbedingungen der Simulation erläutert. Weiterhin werden die Ergebnisse empirischer Untersuchungen zur Prognosegüte vorgestellt. Zunächst werden Prognosefehler typisiert. Es folgt eine Analyse der stochastischen Besonderheiten von Prognosefehlern. Im Anschluß an eine Analyse der Ursachen für Prognosefehler wird der Handlungsbedarf hinsichtlich der Verbesserung der Prognosegüte dokumentiert (Kapitel 3).

In Kapitel 4 werden bestehende Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte hinsichtlich ihrer Eignung für das zu entwickelnde System analysiert. Auf Basis dieser Analyse des Stands der Forschung wird der verbleibende Handlungsbedarf detailliert. Vorgaben für die eigenen Arbeiten werden abgeleitet.

In einem nächsten Schritt wird das Grobkonzept des Prognosesystems entwickelt. Das modular aufgebaute Konzept legt bereits die Basis zur Erfüllung der Anforderungen und

Randbedingungen, die in den Kapiteln 2 und 3 dargestellt wurden. Auf Basis dieses Konzepts wird ein Pflichtenheft für die Module des Konzepts erstellt (Kapitel 5).

Im Anschluß werden die drei zentralen Komponenten des Konzepts detailliert dargestellt. Dabei handelt es sich um die Experimentplanung und -steuerung (Kapitel 6), die automatische Modellgenerierung (Kapitel 7) sowie das Modul zur Fehlerkompensation und Varianzschätzung mittels statistischer Verfahren, Auswertung und Darstellung der Ergebnisse (Kapitel 8). In jedem Kapitel werden bereits Implementierungsansätze für die einzelnen Komponenten aufgezeigt.

Kapitel 9 bietet eine Darstellung der realisierten Module sowie der Ergebnisse einer exemplarischen Anwendung. Beschreibungen der Ausgangssituation, der Systemimplementierung und der Anwendungsergebnisse sollen eine Bewertung von Aufwand und Nutzen ermöglichen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einer Darstellung des Ausblicks auf zukünftige Forschungsarbeiten (Kapitel 10).

Im Anschluß an das Literaturverzeichnis (Kapitel 11) befindet sich ein Glossar (Kapitel 12), der es dem Leser erleichtern soll, die Ausführungen der vorliegenden Arbeit zu verstehen.

1. Einleitung
2. Randbedingungen und Motivation der Arbeit
3. Betriebsbegleitende Simulation und Prognosefehler
4. Bekannte Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte
5. Konzept eines Prognosesystems
6. Experimentplanung und -steuerung
7. Generierung prognostreuer Simulationsmodelle
8. Kompensation von Prognosefehlern und statistische Auswertung
9. Realisierung und beispielhafte Anwendung

Bild 1-4: Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit

2 Randbedingungen und Motivation der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Prognosesystem auf Basis der betriebsbegleitenden Simulation entwickelt. Dieses Prognosesystem soll den Planer oder Produktionssteuerer bei der Produktionsoptimierung unterstützen. Unter Produktionsoptimierung werden alle planerischen Unternehmensprozesse verstanden, die das Ziel einer Optimierung eines Produktionssystems hinsichtlich einer logistischen Zielsetzung verfolgen. Produktionsoptimierung umfaßt dabei sowohl die Produktionsplanung und -steuerung als auch die mittelfristige Optimierung von Produktionsstrukturen und -strategien.

Im folgenden wird anhand der Beschreibung des Anwendungsumfelds dargestellt, welche Ziele und Aufgaben die Produktionsoptimierung umfaßt, welche Rolle ein Prognosesystem bei der Produktionsoptimierung spielt und welche Bedeutung dabei der Prognosegüte zukommt.

2.1 Ziele und Aufgaben der Produktionsoptimierung

2.1.1 Ziele der Produktionsoptimierung

WIENDAHL (1987) versteht unter Produktionsoptimierung die Optimierung der Produktion hinsichtlich der Kriterien Produktivität, Attraktivität und Flexibilität. Neben den klassischen Wirtschaftlichkeitszielen, Auslastung, Bestände, Durchlaufzeit und Termintreue, können bei der Produktionsoptimierung auch technologisch-organisatorische Ziele verfolgt werden. Beispielsweise kann es ein Ziel sein, durch Einführung einer Reihenfolgestrategie Rüstkosten zu reduzieren oder durch Installation eines Störungsmanagements die Reaktionszeiten auf Störungen zu verkürzen (vgl. Bild 2-1).

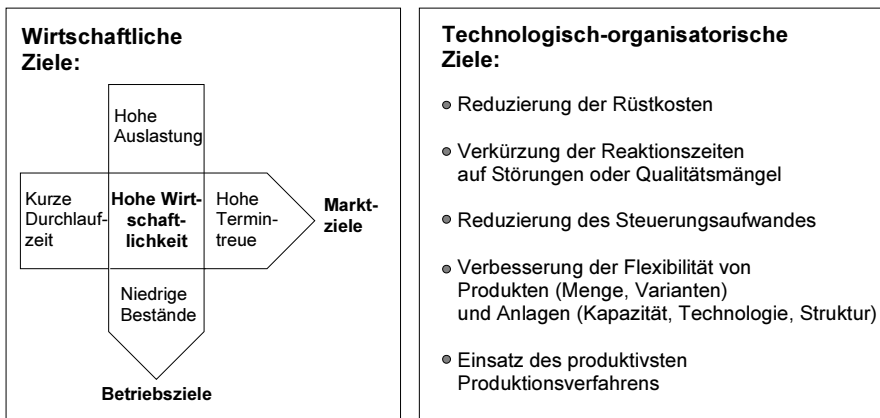


Bild 2-1: Ziele der Produktionsoptimierung

Die genannten Einzelziele beziehen sich vor allem auf die Strukturen und Abläufe des Produktionssystems. Es werden jedoch auch spezielle Ziele hinsichtlich der Informations-, Planungs- und Steuerungssysteme formuliert:

- Erhöhung der Transparenz und der Auskunftsfähigkeit
- Verbesserung der Planungsbereitschaft (Verfügbarkeit von Planungsdaten)

2.1.2 Aufgaben und Fragestellungen der Produktionsoptimierung

Die Zielsetzung der Produktionsoptimierung wird durch drei Ansätze erfüllt, die strategische, die taktische und die operative Optimierung (Bild 2-2). Die strategische Optimierung entspricht der Neuplanung eines Produktionssystems und besitzt eine sehr langfristige Ausrichtung. Sie wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Aufgaben und Fragestellungen der taktischen und der operativen Produktionsoptimierung werden im folgenden erläutert.

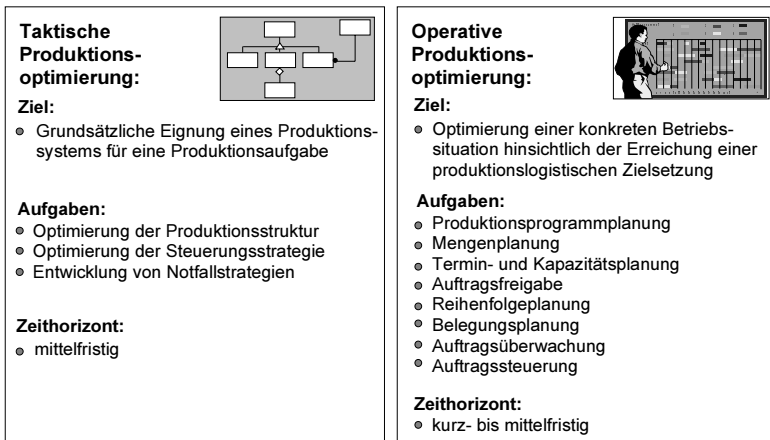


Bild 2-2: Gegenüberstellung der taktischen und operativen Produktionsoptimierung

Taktische Optimierung von Strukturen und Strategien

Im Bereich der taktischen Optimierung von Produktionsstrukturen und -strategien wird sichergestellt, daß das Produktionssystem für die Erreichung der produktionslogistischen Zielsetzung bei den zu erwartenden Anforderungen und Randbedingungen prinzipiell geeignet ist. Dabei werden die mittelfristigen Entwicklungstrends der Anforderungen und Rahmenbedingungen berücksichtigt. Kann die produktionslogistische Aufgabenstellung nur unzureichend erfüllt werden, werden Maßnahmen zur Anpassung der Strukturen und Strategien des Produktionssystems an die geänderten Rahmenbedingungen erarbeitet. Die Betrachtungszeiträume und die Optimierungsmaßnahmen sind mittelfristig.

Beispielsweise können sich durch ein verändertes Produktionsprogramm Engpässe in der Produktion verschieben, was sich wiederum in den Durchlaufzeiten der Aufträge niederschlägt. Auf solche Veränderungen kann mit einer Anpassung der Kapazitäten oder einer Modifikation der Steuerungsstrategie reagiert werden. Weiterhin können im Rahmen der taktischen Optimierung Notfallstrategien im voraus entwickelt werden, die im Falle einer auftretenden Störung rasch zum Einsatz kommen. Die Auswirkungen einer Störung können so reduziert werden.

Operative Optimierung der Betriebsparameter

Bei der operativen Optimierung eines Produktionssystems stehen die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung im Vordergrund. Ziel ist es, eine konkrete Betriebssituation der Produktionsanlage hinsichtlich der Erreichung der produktionslogistischen Zielsetzung zu optimieren. Betrachtungszeiträume und Maßnahmen besitzen einen kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont.

Im Rahmen der operativen Optimierung wird beispielsweise über die logistische Machbarkeit bzw. die Annahme eines Fertigungsauftrags entschieden oder es werden Terminprognosen erstellt bzw. optimale Freigabezeitpunkte für Aufträge bestimmt. Weiterhin werden die Auftragsreihenfolge und die Maschinenbelegung im Hinblick auf eine Optimierung der logistischen Ziele geplant. Darunter fällt auch die Optimierung von Engpässen und die sichere Planung kritischer Aufträge.

Extremfall der operativen Optimierung ist das Störungsmanagement. Hier müssen sehr kurzfristig Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen von Störungen und zur Sicherung der Produktionsziele erarbeitet werden.

2.2 Anwendungsumfeld des Prognosesystems

Die Darstellung der Aufgaben und Fragestellungen der Produktionsoptimierung haben gezeigt, daß zu einer optimierenden Planung Bewertungen der Auswirkungen von planerischen oder steuernden Maßnahmen auf das Produktionssystem benötigt werden. Werkzeuge zur Planung und Steuerung der Produktion beinhalten stets ein Prognosesystem, welches Kennzahlen über die zukünftige Produktionssituation liefert.

Zur Detaillierung der Anforderungen und Randbedingungen des Prognosesystems wird im folgenden das Anwendungsumfeld des Prognosesystems beschrieben. Anhand dessen wird erläutert, für welche Art von Produktionssystem das Prognosesystem eingesetzt wird, wer der Systembediener ist und welche Qualifikation dieser besitzt. Weiterhin wird dargestellt, welche Art von Aufgabenstellungen mit Hilfe des Systems bearbeitet werden sollen, welche Eingangsdaten als Planungsgrundlage zur Verfügung stehen und welche Qualität diese besitzen und welche Planungsergebnisse der Systembediener generiert. Bild 2-3 gibt einen Überblick des Anwendungsumfelds.

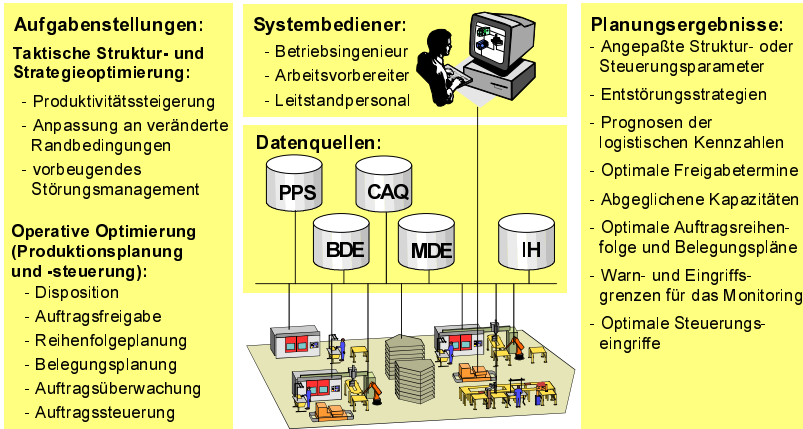


Bild 2-3: Anwendungsumfeld des Prognosesystems

2.2.1 Produktionssystem

Der Einsatzbereich wird auf Fertigungssysteme mit Stückgutprozessen begrenzt. Dabei wird der Schwerpunkt auf Systeme mit der Organisationsform Fließ-, Reihen-, Insel- und Werkstattfertigung gelegt. Montagesysteme erfordern in der Regel erweiterte Planungs- und Steuerungsfunktionalitäten, beispielsweise zur Synchronisation verschiedener Vormontagen mit der Endmontage. Hierfür sind zusätzliche Prognosen erforderlich.

2.2.2 Systembediener

Das zu entwickelnde simulationsbasierte Prognosesystem, das als Baustein eines Planungssystems eingesetzt werden soll, wird betriebsbegleitend zur Bearbeitung verschiedener produktionslogistischer Fragestellungen eingesetzt. Zur Bedienung des Systems sind Eingaben durch den Systembediener erforderlich, wie beispielsweise die Vorgabe von Parametern zur Steuerung der Prognosen oder Variationen von Parametern oder Strukturen des Simulationsmodells. Diese Benutzerinteraktion erfolgt über Masken und Editoren.

Typische Systembediener sind Betriebsingenieure, Arbeitsvorbereiter, Linien- bzw. Inselsteuerer oder das Personal eines zentralen Leitstandes. Bei diesen Bedienern ist in der Regel kein Expertenwissen hinsichtlich Modellierung, Simulation, Experimentplanung und Statistik vorhanden. Wichtig ist eine wissensbasierte Unterstützung des Systembedieners und eine zielgerichtete, aufgabenorientierte Benutzerführung. Diese soll es dem Nutzer ermöglichen, intuitiv durch das System zu navigieren und es pragmatisch einzusetzen. Der Systembediener muß in der Lage sein, das System im normalen Einsatz selbstständig, ohne Unterstützung durch Modellierungs- oder Statistikexperten zu bedienen. Fehlbedienungen sollten durch vorbeugende Maßnahmen weitgehend ausgeschlossen

werden, beispielsweise durch gezielte Freigabe und Sperrung einzelner Editoren und Eingabemasken.

2.2.3 Aufgabenstellungen

Die Aufgabenstellungen, die mit dem System bearbeitet werden sollen, lassen sich in die taktischen Optimierungsaufgaben aus dem Bereich der Struktur- und Strategieoptimierung sowie in die operativen Aufgabenstellungen der Produktionsplanung und -steuerung gliedern, die bereits in Abschnitt 2.1 dargestellt wurden.

Beide Aufgabengebiete erfordern aktuelle Daten als Planungsgrundlage sowie eine ständige Planungsbereitschaft von Planungssystem und Systembediener.

2.2.4 Datenquellen

Als Quellen für die Eingangsdaten des Planungssystems werden verschiedene operative Informationsverarbeitungssysteme und Datenbanken im Sinne des Data-Warehouse-Konzepts genutzt. Von besonderer Bedeutung sind das PPS-System, BDE/MDE-Systeme, das CAQ-System sowie das Instandhaltungssystem. Je mehr Eingangsdaten aus diesen Systemen übernommen werden können, desto geringer ist der Aufwand für den Einsatz des Prognosesystems. Von Vorteil ist es, wenn keine Einzelsysteme vorliegen, sondern ein integriertes Gesamtsystem existiert, weil dann einheitliche Datenformate gewährleistet sind und weniger Probleme aufgrund inkonsistenter Daten auftreten.

2.2.5 Planungsergebnisse

Im Rahmen der Aufgabenstellungen, die mit dem Prognosesystem bearbeitet werden können, ist eine Vielzahl von Planungsergebnissen möglich. Einige Beispiele sollen die Anforderungen an die Vielseitigkeit des Konzepts verdeutlichen. Beispielsweise kann ein Betriebsingenieur mit dem System Produktionsstrukturen oder -strategien bewerten und an neue Randbedingungen der Produktion anpassen. Ein Arbeitsvorbereiter wird in die Lage versetzt, logistische Kennzahlen vorauszusagen und mit entsprechenden Planungsmaßnahmen zu optimieren. Schließlich wird es für das Leitstandpersonal möglich, optimale Freigabezeitpunkte zu bestimmen oder einen dynamischen Kapazitätsabgleich vorzunehmen.

2.3 Rolle des Prognosesystems im Rahmen der Aufgabenstellungen der Produktionsoptimierung

Im folgenden wird aufgeschlüsselt, welche Informationen für die verschiedenen Aufgabenstellungen der Planung durch das Prognosesystem bereitgestellt werden müssen. Die Darstellung dient als Grundlage zur Formulierung der Anforderungen an die Prognosegüte und den Prognosehorizont. Insbesondere wird dargestellt für welche Aufgaben stochastische Informationen wichtig sind und wie diese genutzt werden.

2.3.1 Rolle bei der taktischen Optimierung von Strukturen und Strategien

Exemplarische Aufgaben des Prognosesystems im Rahmen der taktischen Optimierung von Strukturen und Strategien sind die Bewertung von Anpassungen der Struktur oder der Steuerungsstrategie eines Produktionssystems an geänderte Randbedingungen. Dies ist beispielsweise bei Änderung des Produktionsprogramms oder bei Einführung einer neuen Qualitätssicherungs- oder Instandhaltungs-Strategie notwendig.

Für die Bewertung müssen vom Prognosesystem logistische Kennzahlen, wie beispielsweise Durchlaufzeiten, Termintreue, Bestand oder Kapazitätsauslastung bereitgestellt werden. Die Kennzahlen können in der Regel über verschiedene Kapazitäts- oder Erzeugnisgruppen verdichtet werden. Allerdings ist die Identifikation kritischer Ressourcen oder Auftragsstypen wichtig. Stochastische Informationen sind für die Bewertung der Stabilität des Produktionssystems interessant.

2.3.2 Rolle bei der operativen Optimierung der Betriebsparameter

Bei der operativen Optimierung muß das Prognosesystem die Bewertung einer neuen Produktionssituation oder eines neuen Produktionsplans hinsichtlich der Einhaltung der logistischen Ziele vornehmen. Das System muß Grundlageninformationen zur Erkennung von Planabweichungen oder Störungen bzw. neuer Engpaßsituationen bereitstellen, mit denen die verursachenden und die betroffenen Aufträge und Ressourcen ermittelt werden können. Weiterhin sind die besonders kritischen Aufträge und Ressourcen zu ermitteln.

Für die operative Optimierung werden insbesondere folgende Informationen benötigt:

- Belegungszeiten und Fertigstellungstermine in der Fertigung
- Soll-Bestand-Überschreitungen und Mindest-Bestand-Unterschreitungen

Für eine optimale Planung sind besonders exakte und sichere Prognosen notwendig. Eine zusätzliche Angabe der zu erwartenden Unsicherheit der Prognose ermöglicht dem Planer eine Abschätzung des Risikos für eine Zielabweichung. Dieses Unsicherheitsmaß ist auch notwendig, um bei der Auftragsüberwachung entscheiden zu können, ob sich eine Planabweichung im Rahmen der normalen Stochastik befindet oder ob sie auf eine größere Störung hindeutet.

Für die Optimierung einzelner Aufträge oder Ressourcen sind arbeitsgang- und ressourcengenaue Informationen wichtig. Beispielsweise ist es für eine Rüstoptimierung an einem Engpaß notwendig zu wissen, welcher Auftrag wann mit welcher Sicherheit im Eingangspuffer der Ressource liegt.

2.4 Stellenwert der Prognosegüte für die Produktionsoptimierung

Die Güte der Prognosen hat entscheidenden Einfluß auf das Optimierungsergebnis. Im folgenden wird dargestellt, welche Auswirkung eine geringe Prognosegüte auf die Optimierung eines Produktionssystems haben kann. Ziel ist es zu identifizieren, welche Risi-

ken dadurch gegeben sind und welche Potentiale mit einer Verbesserung der Prognosegüte erschlossen werden können.

2.4.1 Stellenwert für die taktische Optimierung von Strukturen und Strategien

Bei der taktischen Optimierung von Produktionsstrukturen und -strategien wirkt sich eine schlechte Prognosegüte darin aus, daß für die Optimierung eine falsche Bewertungsgrundlage herangezogen wird. Dies kann bedeuten, daß ein Produktionssystem, das beispielsweise mittels eines simulationsbasierten Strukturplanungssystems optimiert wurde, in der Realität nicht das gewünschte Verhalten zeigt. Gegebenenfalls sind die logistischen Zielvorgaben hinsichtlich Bestand, Durchlaufzeit, Termintreue oder Durchsatz in der Realität nur mit erhöhtem Steuerungsaufwand oder verstärktem Ressourceneinsatz erreichbar. Das Produktionssystem würde unwirtschaftlich betrieben werden.

Bei einer strategischen Optimalplanung wird dieser Gefahr durch eine sorgfältige Verifizierung und Validierung des Simulationsmodells begegnet. Außerdem genügen bei vielen strategischen Planungsaufgaben qualitative Aussagen, für die ein Modell mit geringer Prognosegüte hinreichend ist. Bei der taktischen Optimierung hingegen werden in größerem Maße quantitative und realistische Bewertungen benötigt. Außerdem ist eine Bewertung der Prognoseunsicherheit wichtig, um abschätzen zu können, wie sicher die mittelfristigen Optimierungsziele erreicht werden. Hinzu kommt, daß bei der taktischen wie auch bei der operativen Optimierung nicht davon ausgegangen werden kann, daß ein valides Prognosemodell zur Verfügung steht. Angesichts sich häufig während des Betriebs eines Produktionssystems wandelnder Strukturen und Abläufe würde die ständige Pflege des Modells einen zu großen Aufwand bedeuten. Die Auswirkungen dieser Änderungen sind im voraus nicht abschätzbar.

2.4.2 Stellenwert für die operative Optimierung der Betriebsparameter

Bei der operativen Optimierung stellen Terminprognosen die Grundlage für die Planung dar. Anhand dieser Terminprognosen werden einzelne Abläufe aufeinander oder mit Zielterminen abgestimmt. Dabei werden auch die zu erwartenden Abweichungen, soweit bekannt, einkalkuliert. Fehlerhafte Terminprognosen führen zu einer schlechten Abstimmung der Produktionsabläufe oder zu einer Über- oder Unterschreitung der Zieltermine. Die mangelnde Abstimmung der Abläufe zieht in der Folge meist eine Verlängerung der Durchlaufzeiten und eine Erhöhung der Bestände nach sich. Zudem nimmt die Streuung der Durchlaufzeiten zu, was sich in einer geringen Termintreue äußert. Im folgenden werden die Auswirkungen einer mangelnden Prognosegüte auf die einzelnen Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung dargestellt.

Bei der **Produktionsprogrammplanung** kann eine fehlerhafte Prognose dazu führen, daß eine falsche Entscheidung hinsichtlich der Annahme oder Zurückweisung eines Auftrags getroffen wird. Wird ein Auftrag angenommen, der eigentlich hätte abgewiesen werden müssen, weil er beispielsweise terminlich bzw. kapazitiv nicht machbar ist, zieht dies in der Regel eine Terminüberschreitung oder Steuerungseingriffe zur Sicherung des

Termins nach sich. Im umgekehrten Fall wird ein machbarer Auftrag abgewiesen und damit der Durchsatz und die Auslastung des Produktionssystems reduziert.

Im Rahmen der **Mengenplanung** führen falsche Prognosen zu einer Fehleinschätzung des Bedarfs an Eigenbedarfsteilen für eine bestimmte Zeitperiode. Dies kann dazu führen, daß benötigte Teile nicht rechtzeitig verfügbar sind oder zu früh geliefert werden. In der Folge werden Aufträge verzögert und der Umlaufbestand erhöht.

In der **Termin- und Kapazitätsplanung** können fehlerhafte Prognosen zu falschen Freigabezeitpunkten oder unrealistischen Fertigstellungsterminen führen. Außerdem kann es vorkommen, daß Kapazitätsbedarfe falsch terminiert werden und deswegen Kapazitäten fehlen oder zuviel bereitgestellt werden.

Auch die **Auftragsfreigabe** wird beeinflusst, indem falsche Wiederbeschaffungszeiten angenommen werden. Dies führt zu einer zu späten oder zu frühen Freigabe. Eine geringe Termintreue und/oder zu hohe Umlaufbestände oder geringe Auslastung der Ressourcen sind die Folge.

Bei der **Reihenfolge- und Belegungsplanung** führen Prognosefehler dazu, daß Bereitstellungstermine falsch vorhergesagt werden. Dies schlägt sich in Warte- oder Liegezeiten nieder. Eine geplante Abarbeitungsreihenfolge ist nicht machbar oder ein Belegungsplan unrealistisch, wodurch beispielsweise eine Rüstzeitoptimierung unmöglich wird. Eine geringe Ressourcenauslastung, längere Durchlaufzeiten und erhöhte Bestände sind die Folge.

Die **Auftragsüberwachung** wird beeinträchtigt, weil keine präzisen Aussagen möglich sind, wann eine Abweichung vom Plan signifikant ist und ein Steuerungseingriff erforderlich wird. Dies bedeutet, daß entweder zu früh oder zu spät eingegriffen wird. Ein zu früher Steuerungseingriff bedeutet unnötigen Aufwand und Komplexität in der Produktion. Zu späte Eingriffe führen zu einer größeren Planabweichung verbunden mit höheren Kosten und der Notwendigkeit, stärker regelnd einzugreifen.

Im Rahmen der **Auftragssteuerung** bedeuten falsche Prognosen eine falsche Bewertung der Auswirkung von Steuerungseingriffen. Daraus folgt, daß nicht die optimale Maßnahme ergriffen wird oder die Maßnahme falsch dimensioniert wird. Dies führt zu einer zu starken oder zu geringen Wirkung des Steuerungseingriffs und damit zu Kosten durch den suboptimalen Betrieb des Produktionssystems und durch die unter Umständen ungeeignete Maßnahme.

2.4.3 Resultierende Anforderungen an die Prognosetreue

Für die Aufgaben der operativen Optimierung soll das Prognosesystem eine Vorausschau von bis zu 12 Wochen ermöglichen. Bei einem Zeithorizont von sieben Tagen ist eine Prognosetreue der Fertigstellungstermine der Aufträge von 95% bei +/- 1 Tag Toleranz erforderlich. Bei einem Zeithorizont von 14 Tagen soll diese noch 90% betragen.

Für die taktische Optimierung sind die Anforderungen geringer. Bei einem für diese Aufgaben üblichen Zeithorizont von über zwei Monaten werden keine außergewöhnlichen Anforderungen an die Ergebnisgüte gestellt.

Die Unsicherheiten der Prognosen hängen allerdings nicht alleine von dem Prognosesystem, sondern auch von der Stabilität der Produktionsprozesse ab. Gefordert wird deswegen, daß der Erwartungswert der Prognose mit dem Mittelwert der realen Termine übereinstimmt. Die Prognoseunsicherheit soll auf die real zu erwartende Unsicherheit begrenzt werden.

2.5 Zusammenfassung und Fazit

Die Aufgabe der Optimierung eines bestehenden Produktionssystems läßt sich in die taktische und die operative Optimierung gliedern. Im Bereich der taktischen Optimierung von Produktionsstrukturen und -strategien wird sichergestellt, daß das Produktionssystem für die Erreichung der produktionslogistischen Zielsetzung bei den zu erwartenden Anforderungen und Randbedingungen prinzipiell geeignet ist. Hingegen wird bei der operativen Optimierung eines Produktionssystems eine konkrete Betriebssituation der Produktionsanlage hinsichtlich der Erreichung der produktionslogistischen Zielsetzung optimiert. Die taktische Optimierung ist also eher mittelfristig, die operative eher kurzfristig ausgerichtet.

Zur Unterstützung der taktischen und operativen Optimierung können Softwarewerkzeuge eingesetzt werden. Diese Planungswerkzeuge besitzen stets ein Prognosesystem zur Vorhersage des zukünftigen Verhaltens eines Produktionssystems und zur Bewertung von Planungsmaßnahmen. Die Prognosegüte des Prognosesystems besitzt einen großen Einfluß auf das Optimierungsergebnis. Es wurde das Anwendungsumfeld eines solchen Prognosesystems beschrieben, an dem die Randbedingungen und allgemeinen Anforderungen des Prognosesystems verdeutlicht werden.

Diese hier aufgezeigten allgemeinen Anforderungen und Randbedingungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei der Entwicklung des simulationsbasierten Prognosesystems berücksichtigt. Sie fließen in die Definition des Pflichtenheftes für das Prognosesystem ein (vgl. Abschnitt 5.2).

3 Betriebsbegleitende Simulation und Prognosefehler

Der vorangegangene Abschnitt hat gezeigt, daß die Prognosegüte des genutzten Bewertungsverfahrens einen hohen Stellenwert für die taktische und operative Optimierung eines Produktionssystems besitzt. Besonders wichtig ist die Prognosegüte für die Produktionsplanung und -steuerung. Insbesondere prädiktive Produktionsregler (vgl. SIMON 1995, ZETLMAYER 1994, MARTIN 1998) werden durch eine mangelnde Prognosegüte beeinträchtigt, weil bei diesen Konzepten die Vorausschau und der Vergleich mit der Ist-Situation zentraler Bestandteil des Regelkreises ist.

Aufgrund der prinzipbedingten Vorteile der betriebsbegleitenden Simulation wird dieser Ansatz als Basis für die weiteren Arbeiten gewählt. Jedoch besitzt auch dieser Ansatz Schwächen, die insbesondere unter praktischen Einsatzbedingungen zu einer mangelnden Prognosegüte führen können.

Im folgenden wird zunächst als Basiskonzept für die vorliegende Arbeit die betriebsbegleitende Simulation vorgestellt. Die Stärken und Schwächen zum aktuellen Stand der Forschung werden erläutert. Im Anschluß werden Prognosefehler typisiert. Weiterhin werden statistische Besonderheiten von Prognosefehlern in der Praxis analysiert. Beides dient dazu, ein genaueres Problemverständnis zu erlangen. Anschließend werden die Ursachen dargestellt, die zu einer mangelnden Prognosegüte bei der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation führen können. Zum Abschluß wird der grundsätzliche Handlungsbedarf dokumentiert.

3.1 Das Konzept der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation

Für die Optimierung der Produktion können verschiedene Softwarewerkzeuge eingesetzt werden. Diese nutzen entweder statische oder dynamische Planungs- bzw. Simulationsverfahren zur Prognose des zukünftigen Verhaltens des Produktionssystems. Statische Planungs- bzw. Prognoseverfahren, wie z.B. MRP oder MRP II, berücksichtigen nicht das dynamische Verhalten des Systems, beispielsweise bei Störungen oder wechselnden Lastzuständen. Außerdem werden stochastische Effekte in der Regel nicht bei der Berechnung der Prognosen berücksichtigt. Beide Eigenschaften der statischen Prognoseverfahren führen zu Fehlern des Erwartungswertes der Prognose sowie zu einer mangelnden Schätzung der Prognoseunsicherheit.

Dynamische Prognoseverfahren, wie die betriebsbegleitende Simulation, besitzen diese prinzipbedingten Nachteile nicht. In der Simulation wird das Produktionssystem mit seinen dynamischen Prozessen nachgebildet. Stochastische Effekte, wie beispielsweise Störungen, und Wechselwirkungen zwischen Abläufen werden bei der Prognose berücksichtigt. Dies wirkt sich in einer höheren erreichbaren Prognosestreue im Vergleich zu statischen Verfahren aus. Aus diesem Grund hat sich in den letzten Jahren eine Entwicklung abgezeichnet, die Ablaufsimulation auch als Unterstützung für den Betrieb komplexer Produktionssysteme einzusetzen (BURGER 1992, GÜNZEL 1993, AMANN 1993, HARLAND & KUHN 1993, ZETLMAYER 1994, PETERMANN 1996, RAUH 1997, MARTIN 1998, REINHART & LULAY 1998).

Im folgenden wird die betriebsbegleitende Simulation am Beispiel der simulationsbasierten Produktionsregelung dargestellt. Der Grundsätzliche Unterschied zwischen der planungsunterstützenden und der betriebsbegleitenden Simulation sowie allgemeine Anforderungen an die Simulation aus der Praxis werden detailliert erläutert.

3.1.1 Betriebsbegleitender Einsatz der Ablaufsimulation

Die betriebsbegleitende Simulation dient als Entscheidungshilfsmittel bei eher kurz- bis mittelfristigen, taktischen und operativen Entscheidungen. Mit Hilfe der Simulation können die Auswirkungen von Eingriffen in das reale System prognostiziert werden. Als Beispiel für den Einsatz der betriebsbegleitenden Simulation wird im folgenden das Konzept der simulationsbasierten Produktionsregelung von ZETLMAYER (1994) und MARTIN (1998) erläutert.

Für einen Planungslauf bei der simulationsbasierten Produktionsregelung wird zunächst ein zuvor erstelltes Simulationsmodell auf, verglichen mit der planungsunterstützenden Simulation, höherem Detaillierungsniveau entsprechend dem aktuellen Systemzustand initialisiert. Ausgehend von diesem aktuellen Zustand werden die Auswirkungen möglicher Planungsentscheidungen am Modell untersucht. Diese Untersuchung basiert auf den während des Simulationslaufs aufgezeichneten Daten. Die anschließende Interpretation der Simulationsergebnisse führt schließlich zu konkreten Maßnahmen, die im realen System umgesetzt werden. Zudem kann mit der Funktion des simulationsbasierten Beobachters erkannt werden, ob der Produktionsablauf gestört ist und an welcher Ressource diese Störung vorliegt. Hierfür wird ein Simulationsmodell synchron zur realen Produktion betrieben. Abweichungen zwischen realem Produktionsablauf und simuliertem deuten auf eine Störung hin (Bild 3-1).

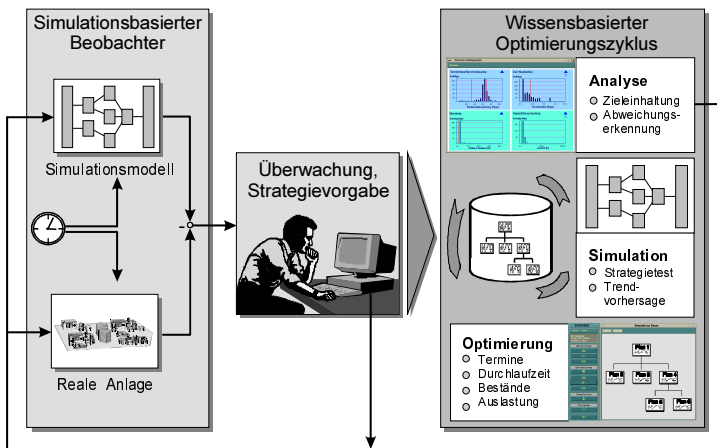


Bild 3-1: Konzept der simulationsbasierten Produktionsregelung nach ZETLMAYER (1994) und MARTIN (1998)

Die betriebsbegleitende Simulation eignet sich vor allen Dingen dann, wenn es um die Optimierung sehr komplexer Produktionssysteme geht, wenn also beispielsweise eine große Anzahl unterschiedlicher Maschinen oder Aufträge vorliegt und die Produktionsbereiche stark vernetzt sind. In diesem Fall ist es in der Regel nicht möglich, ein zuverlässiges mathematisches Modell für die Bewertung von Planungsalternativen zu entwickeln. Die betriebsbegleitende Simulation läßt sich sehr flexibel einsetzen, weil sehr unterschiedliche Strukturen, Strategien und Abläufe modelliert und damit deren Einflüsse bei der Bewertung berücksichtigt werden können. Die Ablaufsimulation ermöglicht zudem eine dynamische Bewertung der Prozesse. Stochastische Einflußfaktoren können berücksichtigt werden.

Trotz dieser Vorteile wird die Simulation in der Produktionsplanung und -steuerung der Unternehmen nur selten eingesetzt. WIENDAHL & SCHOLTISSEK (1993) sowie WIENDAHL & NYHUIS (1998) zufolge kann diese Zurückhaltung der Unternehmen gegenüber der Simulation auf den großen Aufwand für die Modellierung, die schwierige Ergebnisinterpretation und die notwendige umfangreiche Datenbereitstellung zurückgeführt werden.

3.1.2 Gegenüberstellung von planungsunterstützender und betriebsbegleitender Simulation

Es bestehen einige grundlegende Unterschiede zwischen planungsunterstützender und betriebsbegleitender Simulation, welche die weiteren Arbeiten entscheidend beeinflussen. Aus diesen Unterschieden resultieren besondere Anforderungen an die betriebsbegleitende Simulation. Daneben existieren aber auch einige günstige Randbedingungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Verbesserung der Ergebnisgüte genutzt werden.

Im folgenden werden die für die vorliegende Arbeit wesentlichen Unterschiede zwischen der planungsunterstützenden Simulation, die vorwiegend für strategische Optimierungsaufgaben eingesetzt wird, und der betriebsbegleitenden Simulation, deren Schwerpunkt auf taktischen und operativen Optimierungen liegt, verdeutlicht.

Betrachtungsobjekt und Gestaltungsfeld

Betrachtungsobjekte der **planungsunterstützenden** Simulation sind die Anlagenstruktur (d.h. Anlagenkomponenten, materialflußtechnische und informationstechnische Verknüpfungen), die Anlagenparametrisierung und die Eingangsdaten. Demzufolge können sowohl das Modell, als auch die Parameterwerte und Eingangsdaten bei der Simulation variiert werden. Die Variationsbreite der Untersuchungen ist sehr groß. Das Verhalten verschiedener Anlagenmodelle wird bei sehr unterschiedlichen Eingangsgrößen und Betriebsparametern simuliert. Bei der **betriebsbegleitenden** Simulation liegt dem Modell eine bereits existierende Anlage zugrunde. Weil das Produktionssystem real existiert, kann ein realitätsgetreues Modell erstellt werden. Beispielsweise liegen Erfahrungswerte über stochastische Einflüsse vor. Ein betriebsbegleitendes Simulationsexperiment basiert außerdem auf den aktuellen Gegebenheiten der realen Anlage. Daraus ergibt sich, daß das Modell im Rahmen der Analysen nicht oder nur marginal verändert wird. Untersucht wird auch nicht das Verhalten in sehr verschiedenen Betriebszuständen, sondern nur in der Nähe eines zu definierenden Arbeitspunkts. Variabel sind in erster Linie die Steuerungs-

eingriffe. Durch die Reduzierung der Freiheitsgrade wird die Zahl der Eingriffsmöglichkeiten und so die Anzahl der möglichen Experimente begrenzt. Außerdem ist das Analyseziel besser und klarer definiert als bei der planungsunterstützenden Simulation. Deshalb besteht eine natürliche Einschränkung der Variationsmöglichkeiten der Simulationsexperimente.

Ziele, Betrachtungszeitraum und Art der Ergebnisse

Die **planungsunterstützende** Simulation zielt auf eine langfristige Aussage über das Verhalten einer Anlage ab. Deswegen wird ein längerer Betrachtungszeitraum zugrundegelegt. Er kann Monate oder Jahre des Betriebs einer Produktionsanlage betragen. Exakte Aussagen über einzelne Aufträge werden in der Regel nicht benötigt. Oft genügen qualitative Aussagen über Durchschnittswerte der gesamten Anlage. Langfristig betrachtet gleichen sich die statistischen Effekte aus. Dagegen ist es Ziel der **betriebsbegleitenden** Simulation, kurzfristig Prognosen von Kennzahlen oder Aussagen über das Übergangsverhalten der Anlage nach einem Steuerungseingriff zu erhalten. Im Fokus der Betrachtung stehen, neben Aussagen über Trends im Verhalten der Anlage, Analysen und Prognosen für einzelne Aufträge. Untersuchungen im Rahmen von Industrieprojekten haben ergeben, daß zur Synchronisation von Fertigung und Montage im Zweischichtbetrieb die Fertigstellung von Fertigungsaufträgen mindestens schichtgenau vorhergesagt werden muß (ZETLMAYER 1994). Aus diesem Grunde sind detaillierte und exakte Daten sowie die Berücksichtigung stochastischer Effekte bei der Simulation notwendig (ZELL 1992). Nur so kann eine annähernde Übereinstimmung von simulierten und realen Werten erzielt werden.

Simulationsgeschwindigkeit

Bei der **planungsunterstützenden** Simulation ist die Anforderung an die Simulationsgeschwindigkeit verglichen mit der betriebsbegleitenden Simulation gering. Die **betriebsbegleitende** Simulation erfolgt simultan zum Betrieb der realen Anlage. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit kurzer Antwortzeiten des Simulators, um zu gewährleisten, daß die Anlage innerhalb kurzer Zeit wieder in einen stabilen Zustand überführt werden kann (SCHMIDT 1987). Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse sind aufwendige Verfahren notwendig, z.B. die Durchführung mehrerer Simulationsläufe. Trotzdem sollten die wichtigsten Simulationsergebnisse bereits nach wenigen Minuten vorliegen. Dient die betriebsbegleitende Simulation der Bewertung von Handlungsalternativen, tritt der Zeitaspekt noch stärker in den Vordergrund, weil eine größere Anzahl von Simulationsläufen durchgeführt werden muß.

Anwender

Planungsunterstützende Simulation wird vorwiegend in strategischen Planungsprojekten eingesetzt. Deswegen wird in der Regel ein Simulationsexperte mit der Erstellung des Simulationsmodells und der Durchführung der Experimente beauftragt. Die **betriebsbegleitende** Simulation meist von einem Mitarbeiter aus der Produktionsplanung und -steuerung, d.h. nicht von einem Simulationsexperten ausgeführt. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Modellierung, die Experimentplanung und die Aufberei-

tung und Darstellung der Ergebnisse. Bisher wurde diesen Punkten wenig Beachtung geschenkt (LAW & KELTON 1991). Die wesentlichen Ergebnisse müssen leicht ablesbar und auch ohne Statistikkennnisse einfach interpretierbar sein, um die Akzeptanz des Simulationswerkzeugs zu erhöhen und die Möglichkeiten der Fehlbedienung zu reduzieren. Für eine sachgerechte Interpretation müssen auch Angaben über die Güte der Simulationsergebnisse gemacht werden (FISCHER 1988).

Eingangsdaten und Initialisierung

Die Schwierigkeiten bei der **planungsunterstützenden** Simulation liegen im Mangel einer realen Ausgangssituation der Anlage. Das Simulationsmodell kann also in der Regel nicht mit einer realistischen Systemlast initialisiert werden. Deswegen muß abgewartet werden, bis sich das Modell eingeschwungen hat, bevor die Simulation realistische Ergebnisse liefert. Weitere Fehler ergeben sich aus Ungenauigkeiten bei der Abbildung des Modells und der Systemschnittstellen (z.B. Störgrößen). Diese Problematik besitzt die **betriebsbegleitende** Simulation nicht in diesem Maße. Zum einen kann für die Initialisierung des Modells der Betriebszustand der realen Anlage direkt aus dem System in das Modell übernommen werden. Dies hat den Vorteil, daß sich das Simulationsmodell bei Simulationsbeginn im Betriebspunkt der realen Anlage befindet und keine Einschwingzeit beachten werden muß. Auch die Eingangsgrößen (Auftragsdaten) werden aus dem realen System übernommen. Das vereinfacht die Initialisierung und ermöglicht auch bei kurzen Simulationsdauern realistische Ergebnisse. Zum anderen kann, weil das reale System vorhanden ist, sehr gut die Modellvalidierung durchgeführt werden. Man erhält somit ein exakteres Modell. Da auch über Störgrößen Erfahrungswerte vorliegen, können auch diese exakter modelliert werden. Desweiteren liegt Erfahrungswissen aus bereits abgeschlossenen Simulationsläufen vor, was die Beurteilung der Analyseergebnisse erleichtert.

	planungsunterstützende Simulation	betriebsbegleitende Simulation
Gestaltungsfeld	Anlagenmodell, Parametrierung, Eingangsdaten	in der Regel Steuerungseingriffe
Ziele	langfristige Bewertung der Stabilität der Anlage	kurzfristige Aussage über das Übergangsverhalten der Anlage
Betrachtungszeitraum	Monate, Jahre	Stunden, Tage, Wochen
Art der Ergebnisse	qualitativ, Durchschnittswerte über das Verhalten der Anlage	quantitativ, exakte Aussagen über einzelne Aufträge, Maschinen, ...
Simulationsgeschwindigkeit	nicht entscheidend	entscheidend
Anwender	Simulationsexperten	Produktionsplaner/-steuerer, keine Simulationsexperten
Eingangsdaten und Initialisierung	Prognosedaten, Planungsdaten	reale, erfaßte Daten

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung von planungsunterstützender und betriebsbegleitender Simulation

Während also bei der planungsunterstützenden Simulation das Verhalten einer gesamten Anlage über einen relativ langen Zeitraum eher qualitativ bewertet wird, ist es Ziel der betriebsbegleitenden Simulation, schnell detaillierte und quantifizierte Informationen über das kurzfristige Anlagenverhalten in aufbereiteter Form zu erhalten. Die genannten Punkte sind in Tabelle 3-1 nochmals zusammenfassend einander gegenübergestellt.

3.1.3 Stellenwert und Verbesserungsbedarf der Ablaufsimulation in der Praxis – Ergebnisse einer empirischen Studie

Als Grundlage für die Entwicklung der Ansätze der vorliegenden Arbeit wurden konkrete Anforderungen aus der praktischen Anwendung der Ablaufsimulation erarbeitet. Im Rahmen einer breit angelegten empirischen Studie wurde ermittelt, welche Erfahrungen mit der Simulationstechnik in der praktischen Anwendung existieren. Hierzu wurden rund 200 Führungskräfte und Anwender aus den Bereichen Produktion und Logistik in größeren und mittelständischen Unternehmen befragt.

Ziel war es, zu ermitteln, welchen Stand der Einsatz der Simulationstechnik in Deutschland derzeit besitzt, welche Potentiale durch die Simulationstechnik erschlossen werden können und welche Hindernisse bestehen, die einen häufigen Einsatz dieser Technologie bislang verhindern. Die Studie dient damit als Basis für eine systematische Ableitung von Strategien zur Verbreitung und Verbesserung des Einsatzes der Simulationstechnik. Dabei wurden die kritischen Faktoren für den Erfolg bei der Einführung und Anwendung der Simulation ermittelt, um auf dieser Basis Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Verbreitungs- und Wirkungsgrades des Simulationseinsatzes abzuleiten. Im folgenden werden Ergebnisse der Studie dargestellt, die für die betriebsbegleitende Simulation eine besondere Bedeutung besitzen. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse befindet sich in REINHART ET AL. 1997.

Anwendungsgebiete der Ablaufsimulation

Zunächst wurde analysiert, für welche Aufgabenstellungen die Ablaufsimulation eingesetzt wird. Größtes Anwendungsgebiet liegt im Rahmen der Planung von Produktionsanlagen. Allerdings setzen bereits 23% der Anwender die Ablaufsimulation im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung ein (vgl. Bild 3-2). Dies zeigt, daß in vielen Unternehmen bereits Akzeptanz zum Einsatz der betriebsbegleitenden Simulation vorliegt.

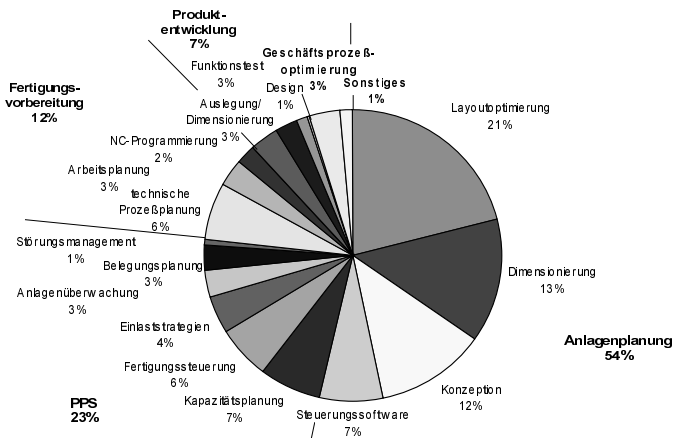


Bild 3-2: Anwendungsgebiete der Ablaufsimulation

Nutzen und Aufwand der Simulation

Bemerkenswert ist, daß 80% der aktuellen Anwender und immerhin 50% der ehemaligen Anwender den Nutzen der Simulation in Relation zum Aufwand bereits zum gegenwärtigen Entwicklungsstand der Simulationstechnik als groß oder sehr groß beurteilen (Bild 3-3). Trotz dieser positiven Einschätzung besteht der Wunsch zur weiteren Verbesserung der Effizienz des Simulationseinsatzes.

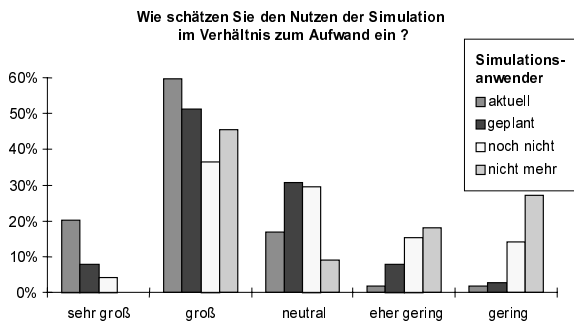


Bild 3-3: Aufwand/Nutzen-Verhältnis der Ablaufsimulation

Weitere Analysen haben gezeigt, daß viele Anwender das Problem sehen, daß sie Simulation in ihrem Unternehmen nicht regelmäßig anwenden können und darunter die Effizienz der Simulationsanwendung leidet. Dies ist ein wesentlicher Grund für die Tatsache, daß viele Anwender externe Experten für eine Simulationsstudie einsetzen.

Die Einführung der betriebsbegleitenden Simulation eröffnet die Möglichkeit, Simulation regelmäßig für verschiedene Optimierungsaufgaben einzusetzen. Investitionen in Hard- und Software sowie in die Ausbildung der Simulationsanwender verlieren vor dem Hintergrund der Generierung eines nachhaltigen Nutzens ihre Bedeutung.

Zusätzlich zur Nutzenerweiterung muß jedoch gerade beim betriebsbegleitenden Simulationseinsatz der Aufwand für die Simulation reduziert werden. Die empirische Studie hat gezeigt, daß große Potentiale zur Aufwandsreduzierung in der Datenakquisition und -bereinigung, der Modellierung, der Experimentplanung und -durchführung sowie in der Ergebnisinterpretation liegen.

Defizite bei Schnittstellen zu betrieblichen DV-Systemen

Direkte Schnittstellen zur Akquisition der Eingangsdaten für die Ablaufsimulation können helfen, den Aufwand eines Simulationsexperiments zu reduzieren. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen jedoch, daß die bislang verfügbaren Schnittstellen, beispielsweise zu PPS- und BDE/MDE-Systemen, keine Verbesserung der Effizienz ergeben. Aufgrund der Anwendungserfahrung mit dieser Art von Schnittstellen wird dieses Ergebnis wie folgt interpretiert: Es besteht die Gefahr inkonsistente oder fehlerhafte Eingangsdaten aus anderen Systemen zu übernehmen. Dies führt zu fehlerhaften Modellen oder erhöhtem Aufwand, wenn die Fehler erst spät erkannt werden, und kann zum Mißerfolg eines Simulationsprojekts führen (Bild 3-4).

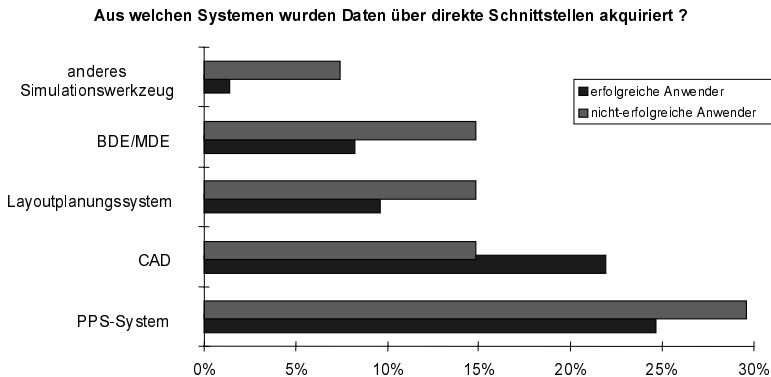


Bild 3-4: Schnittstellen zu anderen Planungssystemen

Ein weiterer Kritikpunkt ist, daß die Datenübernahme oft noch zu kompliziert ist. In der Regel sind nur einfache Schnittstellen vorhanden, wie beispielsweise ASCII-Schnittstellen oder SQL-Schnittstellen. Komplexe spezifische Abfragen müssen aus diesen entwickelt werden. Wichtig ist deshalb, daß Kopplungen zu Datenquellen geschaffen werden, die eine Akquisition konsistenter und fehlerfreier Daten ermöglichen. Außerdem sollte die strukturierte und an die jeweilige Aufgabenstellung der Simulation angepaßte Datenabfrage erleichtert werden.

Konkreter Verbesserungsbedarf aus Anwendersicht

Die Befragten wurden gebeten, ihre wichtigsten Wünsche hinsichtlich der Verbesserung der Simulationswerkzeuge zu nennen. Die Antworten ließen sich in elf Klassen unterteilen, von denen die wichtigsten im folgenden dargestellt sind (Bild 3-5).

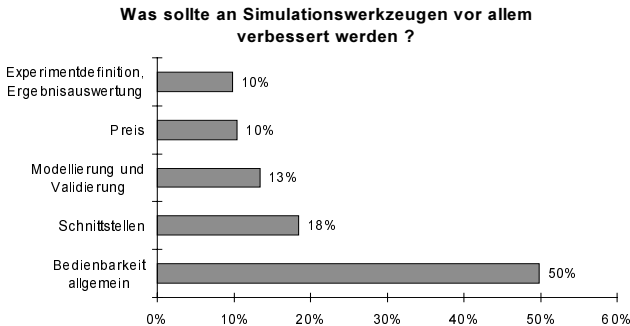


Bild 3-5: Verbesserungbedarf der Ablaufsimulation aus Anwendersicht

- **Bedienbarkeit (allgemein)**

Prinzipiell wird die geringe Bedienungsfreundlichkeit der aktuellen Simulationswerkzeuge als eine wesentliche Ursache dafür angesehen, daß Simulation nicht häufiger angewendet wird und für den betriebsbegleitenden Einsatz nur bedingt geeignet ist. Ein Großteil der Befragten äußerte den Wunsch, daß die Bedienungsfreundlichkeit der Simulationssoftware verbessert wird. Neben der allgemeinen Softwareergonomie wurde der Wunsch nach einer übersichtlichen und anwendergerechten Gestaltung der graphischen Benutzeroberfläche genannt.

Von einigen Anwendern wurde der Wunsch geäußert, bei der Bedienoberfläche zwischen einem Expertenmodus und einem Anwendermodus mit eingeschränktem Funktionsumfang wechseln zu können.

- **Schnittstellen**

Einen hohen Stellenwert nehmen auch die Schnittstellen der Simulationswerkzeuge zu Datenquellen ein. Hier wurde der Wunsch nach einem problemlosen Datenaustausch über genormte Schnittstellen zu PPS- und CAD-Systemen sowie verschiedenen Datenbanken genannt. Weiterhin besteht der Wunsch nach einem besseren Preprocessing der Eingangsdaten mit Kontrollmöglichkeiten (Konsistenzprüfungen).

- **Modellierung**

Die Anwender wünschen sich Verbesserungen bei der Modellierung und Validierung. Eine einfache und universelle Modellierung für unterschiedliche Anwendungsfälle steht

dabei an oberster Stelle. Der Abstraktionsgrad der Modellierung sollte frei wählbar sein. Weiterhin sollte eine konsequente Objektorientierung realisiert sein, und ein modularer Modellaufbau mit guten Strukturierungsmöglichkeiten erleichtert werden.

Es besteht der Wunsch, Modelle einfacher zu generieren und zu aktualisieren. Konkret werden eine automatische Modellgenerierung und selbstaktualisierende bzw. selbstlernende Modelle nachgefragt.

- **Experimentplanung**

Die Experimentplanung erfordert Expertenwissen in Statistik und in den Methoden des „Design of Experiments“. Eine Unterstützung bei der Experimentplanung wäre deswegen für viele Anwender hilfreich. Beispielsweise ist es wichtig, daß der Simulationsanwender dabei unterstützt wird, die Anzahl und die Länge der Simulationsläufe so zu bestimmen, daß Simulationsergebnisse statistisch abgesichert sind. Außerdem ist eine Unterstützung bei der Festlegung der Variation der Experimentparameter gefordert.

- **Ergebnisauswertung, -darstellung und -interpretation**

Es besteht ein Bedarf an statistischen Auswertungswerkzeugen mit graphischen Visualisierungsmöglichkeiten, die in das Werkzeug integriert sind oder an einer leistungsfähigen Schnittstelle zu Standard-Programmen wie MS-EXCEL. Damit sollte eine anwendungsorientierte Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse mit hoher Aussagekraft unterstützt werden. Neben den Analysen von Leistungen sollten Simulatoren auch Kostenanalysen bieten.

Der Bediener sollte bei der Interpretation der Simulationsergebnisse unterstützt werden, wozu auch eine Abschätzung der potentiellen Fehler gehört. Dabei sollten die Randbedingungen des Modells und des Experiments berücksichtigt werden. Gewünscht wird auch ein Werkzeug, welches den Bediener beim Entwickeln der Erkenntnisse unterstützt.

3.2 Typisierung von Prognosefehlern

Simulationsmodelle stellen eine vereinfachte Abbildung der Realität dar. Die simulierten Ergebnisse weisen deshalb gegenüber den Daten des realen Systems Abweichungen auf. Diese Abweichungen lassen sich in systematische und stochastische Fehler aufteilen (Bild 3-6).

Systematische Fehler sind Abweichungen zwischen dem Erwartungswert einer Prognose und dem Mittelwert der realen Beobachtungen. Sie beeinflussen zwar die Absolutgenauigkeit, aber nicht die Wiederholgenauigkeit einer Prognose. Aus diesem Grund sind sie prognostizierbar und damit korrigierbar. Sie lassen sich in der Regel durch einen funktionalen Zusammenhang beschreiben. Beispielsweise können konstante, kumulative oder multiplikative Fehlerfunktionen vorliegen. Die Abweichungen entstehen in erster Linie durch Fehler der deterministischen Eingangsdaten sowie durch Vereinfachungen oder Vernachlässigungen beim Modellaufbau, wie beispielsweise falsche Pausen-, Transport- oder Vorgabezeiten.

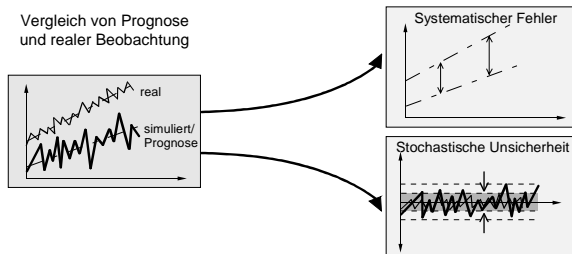


Bild 3-6: Arten von Prognoseabweichungen

Stochastische Fehler sind Schwankungen der einzelnen beobachteten Werte um den Erwartungswert der Prognose. Stochastische Abweichungen zwischen Realität und Prognose sind in ihrer Größe und Auswirkung definitionsgemäß nicht vorhersehbar (SCHRÜFER 1988). Sie lassen sich nicht funktional, aber statistisch beschreiben. Stochastische Abweichungen können im Gegensatz zu systematischen Fehlern nicht korrigiert werden. Jedoch ist es möglich, das Ausmaß der zu erwartenden stochastischen Abweichungen zu prognostizieren. Wichtig ist, daß der Schätzwert der **stochastischen Unsicherheit** auf die reale Unsicherheit des prognostizierten Wertes eingeeengt wird.

Stochastische Abweichungen entstehen durch eine Vernachlässigung oder eine fehlerhafte Abbildung von nicht-deterministischen Effekten, wie z.B. Störungen oder schwankende Bearbeitungszeiten. Stochastische Effekte einer oder mehrerer Systemkomponenten bewirken nicht nur stochastische Abweichungen, sondern in Summe auch eine systematische Abweichung.

3.3 Analyse der Prognosefehler bei realen Produktionssystemen

Um die Randbedingungen für die Auswahl von statistischen Verfahren, beispielsweise zur Auswertung und Analyse von Prognosen, zu bestimmen, müssen zunächst genaue Angaben über Art und Größe der zu erwartenden systematischen und stochastischen Abweichungen ermittelt werden. Insbesondere muß festgestellt werden, von welchem Typ die zu erwartenden Prognosefehler sind, beispielsweise, ob die Fehler additiv sind oder mit zunehmender Simulationszeit kumulative oder multiplikative Effekte auftreten. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Rahmenbedingungen für die in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommenden statistischen Verfahren ableiten. Gleichzeitig ist eine Abschätzung vorzunehmen, in welcher Größenordnung sich der relative systematische Fehler bewegt.

3.3.1 Die betrachteten Anlagen

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Untersuchungen in zwei Industriebetrieben durchgeführt. Diese setzen die betriebsbegleitende Simulation zur Sicherstellung der zeitlich korrekten Anlieferung der Teile aus

der Fertigung in der Montage bzw. zur Terminvorhersage ein. Es handelt sich dabei um eine komplexe mechanische Teilefertigung und eine Fließfertigung für elektronische Baugruppen. Ergänzend wurden Experimentiermodelle aufgebaut, basierend auf Realdaten einer dritten, nach dem Werkstattprinzip organisierten Anlage, bei der allerdings die betriebsbegleitende Simulation noch nicht eingesetzt wird. Die drei Anlagen stellen typische Repräsentanten für unterschiedliche Organisationstypen dar (Tabelle 3-2). Ziel ist es, die Randbedingungen bei verschiedenen Fertigungsorganisationsformen zu erfassen und somit das zu entwickelnde System auf eine breite Basis zu stellen.

	Organisa- tionstyp	Anzahl der Arbeits- stationen	Anzahl der Arbeitsgänge je Auftrag	Anzahl der Aufträge in Bearbeitung	Durchlaufzeit [Tage]	Auslastungs- grad
Anlage A	Inhomogen (Werkstätten, Inseln, Transferstraßen)	250	3-25	2000-3000	3-30	70%
Anlage B	Flexible Fließfertigung	25	10-15	3-10	3-6	65-70%
Anlage C	Werkstattorganisation	28	10-25	80	10-40	80%

Tabelle 3-2: Charakteristika der betrachteten Anlagen

Anlage A: Komplexe mechanische Teilefertigung

Die betrachtete Anlage besteht aus ca. 250 Arbeitsplätzen und zusätzlichen externen Fertigungsstätten. Die Teilefertigung setzt sich aus blechverarbeitenden und zerspanenden Bereichen zusammen. Diese Bereiche sind in Teilbereiche untergliedert, die nach unterschiedlichen Prinzipien (Werkstätten, Gruppenfertigung, flexibles Fertigungssystem, Transferstraßen) organisiert sind. Zu einem Zeitpunkt befinden sich ca. 2000 - 3000 Aufträge mit jeweils 3-25 Arbeitsgängen gleichzeitig im Umlauf. Die Durchlaufzeit beträgt zwischen 3 und 30 Tagen. Das gesamte Produktionssystem besitzt eine durchschnittliche Auslastung von 70%.

Anlage B: Flexible Fließfertigung für elektronische Baugruppen

Bei der zweiten Anlage handelt es sich um eine Fertigung für elektronische Baugruppen. Die Fertigung besteht aus zwei verketteten Fertigungslinien mit jeweils 10 Bearbeitungsstationen und zusätzlich 5 Prüfplätzen. Zur selben Zeit befinden sich zwischen 3 und 10 Aufträge in Bearbeitung. Die Aufträge bestehen aus 10-15 Arbeitsgängen, wobei die Auftragsdurchlaufzeit zwischen 3 und 6 Tagen beträgt. Die Anlage wird bei einer durchschnittlichen Auslastung von 65-70% betrieben.

Anlage C: Experimentiermodelle einer Werkstattfertigung

Für Grundlagenuntersuchungen standen zusätzlich Modellierungsdaten der Fertigung eines LKW-Komponenten-Herstellers zur Verfügung. Der Fertigungsbereich ist als Werk-

stattfertigung organisiert und umfaßt 12 Maschinengruppen mit insgesamt 28 Arbeitsstationen inklusive Prüfbereichen und externen Fertigungskapazitäten. Die Aufträge bestehen aus 10-25 Arbeitsgängen mit einer Gesamtdurchlaufzeit zwischen 10 und 40 Tagen. Es befinden sich durchschnittlich 80 Aufträge gleichzeitig in der Fertigung. Das Produktionssystem ist zu durchschnittlich 80% ausgelastet.

Um Analysen unabhängig vom Industriepartner durchführen zu können und um eine Testplattform für die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Konzepte zu errichten, wurden zwei Experimentiermodelle dieser Werkstattfertigung aufgebaut. Das eine Simulationsmodell liefert die realitätsgetreuen Daten, das andere die angenäherten. Das Modell, welches die „reale Anlage“ darstellt, wurde sehr exakt modelliert. Stochastische Effekte, wie z.B. Maschinenstörungen und Schwankungen der Transportzeiten wurden gemäß einer statistischen Auswertung des Industriepartners im Modell berücksichtigt. Übliche Modellvereinfachungen, wie beispielsweise Pauschalisierungen für Transportzeiten, wurden weitestgehend vermieden. Durch eine intensive Validierung wurde sichergestellt, daß das „reale“ Simulationsmodell die für die vorliegende Arbeit entscheidenden Effekte realitätsgetreu abbildet. Für die Untersuchungen und Testanwendungen wird dieses Modell als „reale Anlage“ verwendet. Ausgehend von diesem realitätsnahen Modell wurde ein weiteres, vereinfachtes Modell erstellt, in welches gezielt typische Modellvereinfachungen, wie z.B. Vernachlässigung stochastischer Effekte und Pauschalisierungen, implementiert wurden. Dieses Modell soll das Simulationsmodell der „realen Anlage“ darstellen.

Der Einsatz der Experimentiermodelle besitzt den Vorteil, daß Grundlagenuntersuchungen sehr rasch und ohne Beeinträchtigung des Betriebs einer realen Anlage durchgeführt werden können. Außerdem ermöglicht er die Analyse unterschiedlicher Szenarien, die sich in der Realität nicht so schnell durchführen ließen.

3.3.2 Größenordnungen der Prognoseabweichungen

Zunächst wurde untersucht, welche Prognosestreue mit den üblichen Maßnahmen der Modellvalidierung in der Praxis erzielbar ist und welche Größenordnungen und stochastischen Besonderheiten die Prognosefehler besitzen. Für die beiden realen Produktionssysteme (Anlagen A und B) wurden Simulationsmodelle erstellt und sorgfältig validiert. Weiterhin wurden bei den Industriepartnern organisatorische Vorkehrungen getroffen, um sicherzustellen, daß die Produktion auf Basis der Plandaten abläuft, beispielsweise daß die geplante Reihenfolge der Auftragsabarbeitung eingehalten wird. Es wurden Auftragslisten für jede Maschinengruppe ausgegeben, und die Maschinenbediener wurden angewiesen, sich an diese vorgegebene Reihenfolge zu halten.

Die ersten beiden exemplarisch dargestellten Auswertungen beziehen sich auf das Beispiel der komplexen mechanischen Teilefertigung (Anlage A), stimmen jedoch qualitativ mit den Auswertungen an den beiden anderen Anlagen überein.

Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung der Anlage A werden von der Simulation kurz- bis mittelfristige Prognosen erstellt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt bei einer Größenordnung zwischen 5 und 14 Tagen. Für größere Vorhersagehorizonte lassen sich nur sehr unscharfe Prognosen erstellen. Diese eignen sich nicht zur Ableitung

von Steuerungseingriffen. Aus diesem Grund wurden für die Untersuchungen maximale Prognosehorizonte von 14 Tagen definiert. Im folgenden werden die simulativ ermittelten Fertigstellungstermine den realen Fertigstellungsterminen gegenübergestellt.

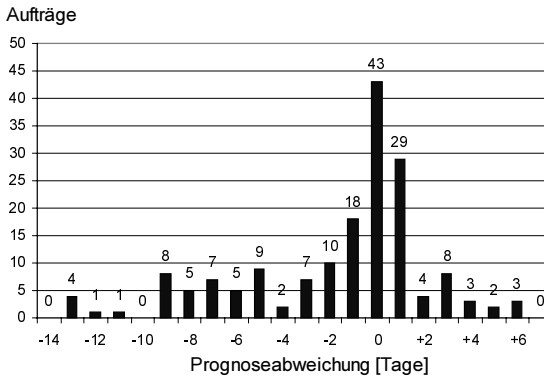


Bild 3-7: Abweichung von prognostizierten und real eingetretenen Fertigstellungsterminen bei 14 Tagen Vorhersagehorizont

In dem in Bild 3-7 dargestellten Histogramm ist auf der Abszisse die Terminabweichung als Differenz aus dem tatsächlichen Fertigstellungstermin und dem simulativ ermittelten Fertigstellungstermin aufgetragen. Auf der Ordinate ist jeweils die Summe der Aufträge angetragen, die eine bestimmte Terminabweichung aufweisen. Im vorliegenden Fall wurden also beispielsweise 29 Aufträge um einen Tag später fertig, als dies mit Hilfe der Simulation vorhergesagt wurde.

Aufgrund der Rückmeldedisziplin in der Fertigung werden alle Aufträge der zweiten und dritten Schicht erst am Folgetag rückgemeldet. Zusätzlich kommt es durch den einmaligen mitternächtlichen Datenabruf im Vergleich zum über den ganzen Tag verteilten Einlasten nochmals zu einer Unschärfe in ähnlicher Größenordnung.

Weiterhin gilt als Einschränkung, daß die Feineinstellung der in der Fertigung verfügbaren Kapazitäten auf einer Schätzung des Steuerungspersonals beruht. Auch die Übergangszeiten zwischen einzelnen Werkstätten und Arbeitssystemen basieren auf keiner empirisch fundierten Grundlage.

Trotz dieser erheblichen Fehlerpotentiale kann aus Bild 3-8 entnommen werden, daß für die innerhalb eines Zeithorizonts von 5 Tagen fertiggestellten Aufträge eine Übereinstimmung zwischen Realität und Prognose von 83% gegeben ist (als Verhältnis zwischen der Anzahl der Aufträge, die im Bereich +1 und -1 Tag Abweichung ermittelt wurden, und den übrigen Aufträgen, deren Abweichung zwischen Simulation und Realität größer war). Beide Grafiken zeigen, daß die systembedingten Unschärfen mit größer werdendem Betrachtungshorizont zunehmen. Nach 14 Tagen ist schließlich nur noch eine Übereinstimmung von 46% gegeben (Bild 3-7).

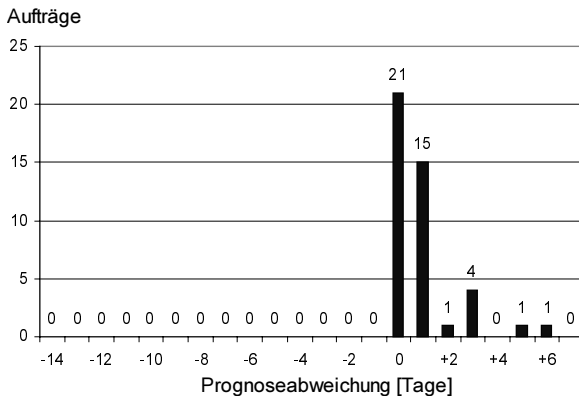


Bild 3-8: Abweichung von prognostizierten und real eingetretenen Fertigstellungsterminen bei 5 Tagen Vorhersagehorizont

Bei den Untersuchungen an der Anlage B, der Fertigung für elektronische Baugruppen, wurden zusätzlich die Fehlerquellen bei der Erfassung der realen Termine minimiert. Zunächst wurde festgestellt, daß bei dem Industriepartner eine schlechte Rückmeldedisziplin bei der Betriebsdatenerfassung (BDE) gegeben war. Dies führte zu Meßungenauigkeiten bei der Erfassung des realen Fertigungsbeginns bzw. -endes (+/- eine Schicht, in Ausnahmefällen +/- eine Woche). Es wurde veranlaßt, daß ständig der aktuelle Auftragsstatus über BDE verfügbar ist. Fertigungsbeginn und -ende mußten auf Listen vermerkt werden. Die Daten wurden am Ende einer jeden Schicht in das BDE-System eingegeben.

Zunächst wurden einige Datensätze der Ergebnisse verschiedener Simulationsläufe und jeweils entsprechender realer Ergebnisse aus der Datenbasis ausgewählt und hinsichtlich ihrer Korrelation untersucht. Eine erste Bewertung der Korrelation ermöglicht ein Streudiagramm. Bild 3-9 zeigt ein typisches Streudiagramm von 400 innerhalb eines Monats produzierten Aufträgen mit ihren realen und simulierten Fertigstellungsterminen.

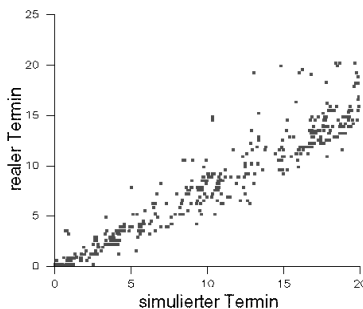


Bild 3-9: Streudiagramm von simulierten und realen Fertigstellungsterminen

Die Stärke der Korrelation wird durch den Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient „r“ dargestellt. Der Korrelationskoeffizient ist ein Maß für den linearen Zusammenhang der Ausprägungen zweier Merkmale (BOSCH 1993). Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Bei allen Untersuchungen ergaben sich Korrelationskoeffizienten in der Größenordnung zwischen 0,84 und 0,92. Das bedeutet, daß ein signifikanter Zusammenhang zwischen simulierten und realen Ergebnissen besteht, daß also die verwendeten Simulationsmodelle ausreichend validiert wurden. Die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen realen und prognostizierten Terminen mittels Regression ist sinnvoll. Gegebenenfalls kann eine weitere Verbesserung der Güte der Simulationsergebnisse mittels Regressionsanalyse erzielt werden. Dieser Ansatz wird in Kapitel 8 dieser Arbeit untersucht.

Aus den Streudiagrammen läßt sich auch erkennen, daß die Varianz der Ergebnisse bei großen Werten zunimmt, daß also die realen Werte mit zunehmendem Betrachtungshorizont stärker um den Erwartungswert streuen. Man spricht in diesem Fall von heteroskedastischen Daten. Als Konsequenz daraus ergibt sich eine Beschränkung des sinnvollen Prognosehorizonts. Die Grafik zeigt auch, daß die Ausreißer tendenziell in Richtung größerer realer Durchlaufzeiten liegen. Das bedeutet, daß die Fehlervariable eine schiefe Verteilungsfunktion besitzt. Beide Randbedingungen, Heteroskedastizität und Schiefe, schränken die Gültigkeit verschiedener statistischer Methoden ein. Auf diese Punkte wird im folgenden Abschnitt weiter eingegangen.

3.3.3 Statistische Besonderheiten

Die folgenden Untersuchungen wurden am Beispiel der Fließfertigung für elektronische Baugruppen durchgeführt (Anlage B). Stichprobenhafte Untersuchungen an den Anlagen A und C und deren Modellen ergaben keine zusätzlichen Anforderungen an die statistischen Methoden.

Die Daten, die aus einer Reihe von Simulationsläufen und aus Datenaufnahmen in realen Produktionsanlagen gewonnen wurden, weisen einige typische Charakteristika auf. Die Charakteristika besitzen einen maßgeblichen Einfluß auf die Auswahl der statistischen Methoden zur Bestimmung der stochastischen Kennzahlen. Wichtige statistische Analyseverfahren, die insbesondere in Kapitel 8 zur Anwendung kommen, sind die Regressionsanalyse und die Varianzanalyse (BOSCH 1993). Aus diesem Grund wird im folgenden auf die Besonderheiten der untersuchten Daten hinsichtlich dieser Methoden eingegangen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen werden im folgenden kurz zusammengefaßt. Eine Beschreibung der bei der Analyse eingesetzten Testverfahren befindet sich in GRUBER (1982). Im einzelnen wurden folgende wesentlichen Charakteristika analysiert, die einen Einfluß auf die Auswahl geeigneter statistischer Methoden besitzen:

Linearität der Abhängigkeit zwischen Prognose und Realität

Die Streudiagramme der untersuchten Daten weisen ausnahmslos auf eine **lineare Charakteristik der Regressionsmodelle** hin. Die Ergebnisse statistischer Tests auf Linearität unterstützen diese Beobachtung. In Ausnahmefällen sind jedoch auch nicht-lineare Modelle denkbar, beispielsweise wenn sich innerhalb des Betrachtungszeitraums die Charakteristik der realen Anlage ändert. Dies kann aufgrund einer Störung passieren. In diesem Fall ist jedoch der Ansatz der Prognosekorrektur nicht geeignet, weil zu einem solchen Fall in der Regel keine Erfahrungsdaten vorliegen. Liegt ein geplanter Wechsel der Charakteristik, wie beispielsweise ein Betriebspunktwechsel vor, ist es sinnvoll, diesen Wechsel auch im Simulationsmodell darzustellen. Der Ansatz der Prognosekorrektur ist auch in diesem Fall ungeeignet. Als Schlußfolgerung ergibt sich, daß lineare Regressionsverfahren ausreichend sind.

Verteilung der Fehlervariablen des Regressionsmodells

Die statistischen Standardverfahren zur Regressions- und Varianzanalyse setzen in der Regel eine Normalverteilung der Fehlervariablen voraus. Bild 3-10 zeigt links ein Histogramm der Residuen, d.h. der Abweichungen einzelner Beobachtungen von deren Erwartungswert, im Vergleich mit einer Normalverteilung. Auf der rechten Seite ist das Ergebnis eines graphischen Tests hinsichtlich Normalverteilung dargestellt. Bei diesem sogenannten Wahrscheinlichkeitstest müßten im Falle einer Normalverteilung der Stichprobe alle Werte auf der eingezeichneten Geraden liegen. In der Grafik ist erkennbar, daß dies insbesondere für die großen positiven Residuen nicht zutrifft. Die Normalverteilungsannahme ist nicht erfüllt.

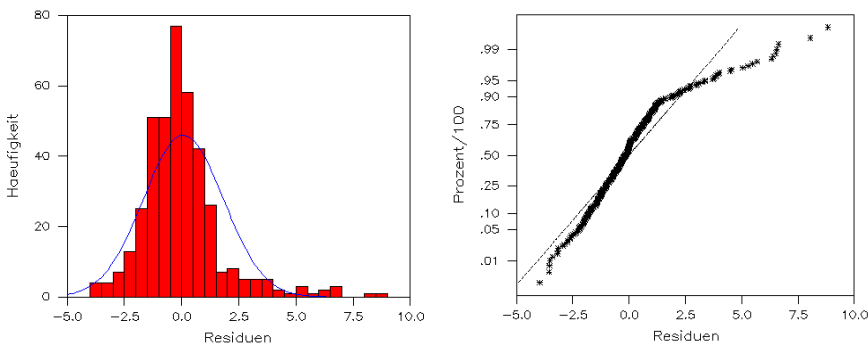


Bild 3-10: Verteilung der Fehlervariablen und Test auf Normalverteilung

Alle hier untersuchten Datensätze weisen eine asymmetrische, **rechtsschiefe Verteilung der Fehlervariablen** auf. Die Verteilung ähnelt der Lognormal- bzw. der Poissonverteilung. Verteilungstests sind in Abschnitt 8.1.3 beschrieben.

Heteroskedastizität der Fehlervariablen

Standardmethoden zur Schätzung der Parameter der Regressionsgeraden, wie beispielsweise die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, gehen davon aus, daß die Fehlervariable über den Wertebereich des Regressors eine konstante Varianz aufweist (Homoskedastizität). Im Streudiagramm (Bild 3-9) ist bereits erkennbar, daß die Varianz der Fehlervariablen mit großen x-Werten zunimmt, also nicht konstant ist. Man spricht auch von **Heteroskedastizität**. Dies wird auch im Residuenplot Bild 3-11 deutlich.

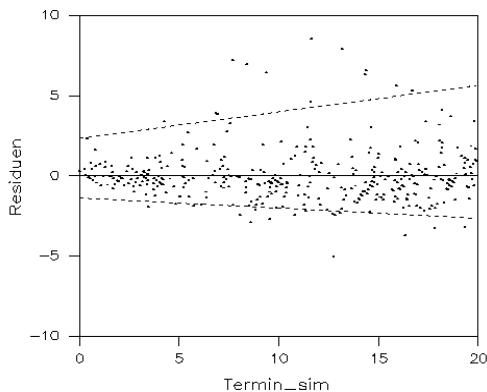


Bild 3-11: Residuenplot der heteroskedastischen Daten

Autokorrelation der Fehlervariablen

Bestimmte statistische Verfahren fordern, daß die Fehlervariable keine Autokorrelation besitzt. Autokorrelation würde vorliegen, wenn sich die Störung eines Wertes auf die Störung des Folgewertes auswirken würde. In einer Werkstattfertigung liegt beispielsweise in der Regel keine Autokorrelation vor. Die Störung eines Auftrages kann sowohl zur Verzögerung als auch zur Beschleunigung anderer Aufträge führen oder überhaupt keine Auswirkung besitzen.

Der Durbin-Watson-d-Test bzw. der Geary-Test (vgl. DURBIN 1970 (S. 410), JUDGE ET AL. 1980, GEARY 1970) haben ergeben, daß bei allen untersuchten Systemen **keine Autokorrelation** vorliegt. Dies ist insbesondere bei der untersuchten verketteten Fließfertigung für elektronische Flachbaugruppen überraschend. Bei diesem Fertigungsprinzip muß eigentlich damit gerechnet werden, daß sich Störungen nicht nur auf die aktuell in Bearbeitung befindliche Baugruppe sondern auch auf alle folgenden Fertigungslose auswirken. Diese Charakteristik konnte allerdings anhand der erfaßten Daten nicht festgestellt werden. Ursachen hierfür sind:

- Im betrachteten Zeitraum traten keine größeren Störungen an den Betriebsmitteln auf, die den Fertigungsfluß für eine längere Zeit unterbrechen.
- Die Arbeitsstationen sind flexibel miteinander verkettet. Zwischen den Arbeitsstationen befinden sich Puffer. Außerdem ist das Fertigungssystem in zwei parallele Fertigungslinien gegliedert. Jede Fertigungslinie ist wiederum in Abschnitte aufgeteilt. Zwischen den Abschnitten kann die Fertigungslinie gewechselt werden.
- Durch den großen Systemdurchsatz und den relativ langen Betrachtungszeitraum von 4 Wochen machen sich die in der Elektronikproduktion typischen kleinen, kurzfristigen Störungen wegen der Verwirbelungseffekte nicht in Form von Autokorrelation bemerkbar.

Ausreißer

In den betrachteten Anwendungen wurden die real beobachteten Daten in der Regel vom Steuerungspersonal der Produktionsanlagen oder von den Maschinenbedienern manuell erfaßt. Diese Erfassungsmethode ist fehlerträchtig, so daß auch **Ausreißer nicht ausgeschlossen** werden können, die nicht charakteristisch für das betrachtete System sind.

Zeitliches Verhalten des Prognosefehlers

Anhand der Daten aus der Fertigung für elektronische Baugruppen wurde untersucht, ob und wie sich der Prognosefehler zeitlich verändert. Zu diesem Zweck wurden Regressionsanalysen und Varianzanalysen mit verschiedenen Datensätzen bestehend aus realen und simulierten Terminen unternommen. Die Datensätze wurden jeweils mit einem Tag Abstand aufgenommen. Innerhalb des betrachteten Zeitraums lief die Produktionsanlage stabil, ohne große Störungen, die einen Wechsel des Betriebspunkts zur Folge gehabt hätten. Die Analysen haben gezeigt, daß die systematischen Prognosefehler **beim stabilen Betrieb** des Produktionssystems zeitlich **nahezu konstant** sind. Es konnten nur kleinere Abweichungen der Steigung und des Versatzes der Regressionsgeraden festgestellt werden.

Im Rahmen von Laboruntersuchungen mit den Experimentiermodellen wurde auch der **Einfluß größerer Störungen auf den Prognosefehler** untersucht. Beispielsweise führen Ausfälle von Ressourcen über mehrere Schichten hinweg zu anderen Charakteristika der Regressionsmodelle. Ein **Versatz**, eine andere **Steigung** und ein **Verlust der Linearität** des Modells konnten beobachtet werden. Auch die **Varianz** des Prognosefehlers nahm bei einer großen Störung zu.

3.3.4 Theoretische Überlegungen zu den stochastischen Charakteristika unterschiedlicher Organisationstypen der Produktion

Im folgenden werden auf Basis von Erfahrungen aus der industriellen Praxis und theoretischer Überlegungen qualitative Aussagen über die Auswirkungen von stochastischen Effekten und die Charakteristika von Prognosefehlern bei unterschiedlichen Organisationstypen der Fertigung getroffen. Die Ergebnisse der Überlegungen sind in Tabelle 3-3 zusammenfassend dargestellt. Die Berücksichtigung dieser Ergebnisse soll die Allgemeingültigkeit der zu entwickelnden Ansätze sicherstellen.

	Nicht-Linearität	Schiefe Verteilung der Fehlervariablen	Heteroskedastizität der Fehlervariablen	Autokorrelation der Fehlervariablen	Ausreißer	Hohe Prognoseunsicherheit
Starr verkettete Fließfertigung	+	++	++	++	+	-
Flexible Fließfertigung (Reihenfertigung)	+	++	++	+/-	+	+
Inselfertigung	+	++	++	+/-	+	+
Werkstattfertigung	-	++	++	-	++	++

Tabelle 3-3: Überblick der stochastischen Charakteristika unterschiedlicher Organisationstypen der Produktion (++: liegt i.d.R. vor, +: kann vorliegen, -: liegt i.d.R. nicht vor)

Starr verkettete Fließfertigung

Bei starr verketteten Fließfertigungen ist zu beachten, daß die Werkstückreihenfolge konstant ist. Es treten keine Überholvorgänge auf. Hinzu kommt, daß sich Störungen an einer Arbeitsstation sehr rasch auf die gesamte Anlage auswirken. Dies wirkt sich in Form einer starken Autokorrelation der Fehlervariablen aus, was den sinnvollen Einsatz der relevanten statistischen Verfahren, insbesondere der Regressions- und Varianzanalyse, in Frage stellt.

Allerdings ist bei einer starr verketteten Fließfertigung das Problem einer geringen Prognosegüte nicht in dem Maße gegeben, wie bei anderen Organisationstypen. Sowie die Fertigungslinie störungsfrei läuft, lassen sich alle Fertigstellungstermine mit analytischen Modellen oder mit Simulationsmodellen exakt vorhersagen. Ist die Linie gestört, verzögert sich der Fertigstellungstermin aller Werkstücke bzw. Aufträge ab dem Punkt an dem die Störung aufgetreten ist um die Stördauer. Modelle von starr verketteten Linien können zudem in der Regel sehr leicht validiert und an strukturelle Änderungen angepaßt werden.

Flexible Fließfertigung und Reihenfertigung

Die Flexible Fließfertigung und die Reihenfertigung stellen aus stochastischer Sicht einen Mischtyp zwischen einer starren Fließfertigung und einer Insel- oder Werkstattfertigung dar. Je nach Struktur und Ablauforganisation kann Autokorrelation vorliegen. Ansonsten gelten die Analyseergebnisse von Abschnitt 3.3.3.

Inselfertigung

Aufgrund der ablauforganisatorischen und fertigungstechnischen Gemeinsamkeiten, die Produkte besitzen, die gemeinsam in einer Insel gefertigt werden, kann der Charakter einer Reihenfertigung vorliegen. Das heißt, auch hier ist das Vorhandensein von Autokor-

relation denkbar. Wesentlicher Vorteil einer Insel ist jedoch die hohe Transparenz der Abläufe sowie der hohe Qualifikationsstand und die weitreichende Kompetenz der Inselmitarbeiter. Innerhalb einer Insel ist deswegen mit einer geringeren Auswirkung von stochastischen Effekten und mit einer hohen Prognosesicherheit zu rechnen. Allerdings kann diese Charakteristik bei verschiedenen Inseln unterschiedlich ausgeprägt sein. Aus diesem Grund ist es zielführend, für jede Insel ein eigenes Prognosemodell zu erstellen.

Valide Simulationsmodelle von Inseln, insbesondere hinsichtlich ihrer stochastischen Eigenschaften, sind schwierig zu erstellen, weil das Verhalten der Mitarbeiter sehr aufwendig und in der Regel nur stochastisch beschrieben werden kann (ZÜLCH & SCHINDELE 1994).

Werkstattfertigung

Bei einer Werkstattfertigung ist oft im Vergleich mit Inselfertigungen mit starker Stochastik und hoher Prognoseunsicherheit zu rechnen. Autokorrelation liegt meist nicht vor. Abgesehen von den Dimensionen gelten die Analyseergebnisse von Abschnitt 3.3.3.

3.3.5 Schlußfolgerungen aus den Analyseergebnissen

Zusammenfassend ergeben sich folgende Anforderungen an die Auswahl geeigneter statistischer Methoden:

Es sind Methoden zu implementieren, die auch bei einer asymmetrischen Verteilung der Fehlervariablen und Heteroskedastizität zuverlässige Schätzergebnisse liefern. Diese beiden Kriterien besitzen sowohl für die Regressionsanalyse als auch für die Varianzschätzung individueller Simulationsergebnisse besondere Bedeutung. Die beiden Punkte werden in Abschnitt 8.1.2 ausführlich diskutiert.

Autokorrelation konnte selbst bei der flexiblen Fließfertigung bzw. Reihenfertigung in der Praxis nicht beobachtet werden. Nur bei einer starren Fließfertigung tritt eine signifikante Autokorrelation auf. Bei diesem Organisationstyp liegt in der Verbesserung der Prognosegüte jedoch nur geringes Potential. Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnden Ansätze wird davon ausgegangen, daß keine signifikante Autokorrelation vorliegt. Auch nicht-lineare Abhängigkeiten werden bei der Auswahl statistischer Verfahren nicht betrachtet. Bei den Analysen wurden zum einen nur lineare Abhängigkeiten beobachtet. Zum anderen sind Nicht-Linearitäten in der Regel auf zeitlich begrenzte, dynamische Einflüsse zurückzuführen, zu denen meist kein Erfahrungswissen vorliegt. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, diese durch eine Anpassung des Simulationsmodells und nicht durch ein stochastisches Modell abzubilden.

Die zu entwickelnden statistischen Verfahren sollten unempfindlich gegenüber Ausreißern sein. Die Gültigkeit eines Prognosemodells sollte regelmäßig überprüft werden, damit bei schlechter werdender Prognosequalität rechtzeitig Maßnahmen zur Anpassung des Prognosemodells eingeleitet werden können.

3.4 Ursachen für eine mangelnde Prognosegüte bei der betriebsbegleitenden Simulation

Abweichungen von simulierten und realen Ergebnissen können unterschiedliche Ursachen haben. Es lassen sich drei Klassen solcher Abweichungen bilden. Eine Klasse dieser Abweichungen basieren auf Fehlern in den Eingangsdaten der Simulation oder im Simulationsmodell. Eine weitere Klasse von Abweichungen geht auf ein fehlerhaft spezifiziertes oder durchgeführtes Experiment zurück. Die dritte Klasse von Fehlern wird durch die Anwendung ungeeigneter Auswerte- und Visualisierungsmethoden hervorgerufen (Bild 3-12). Diese Ursachen werden in den folgenden Abschnitten detailliert.

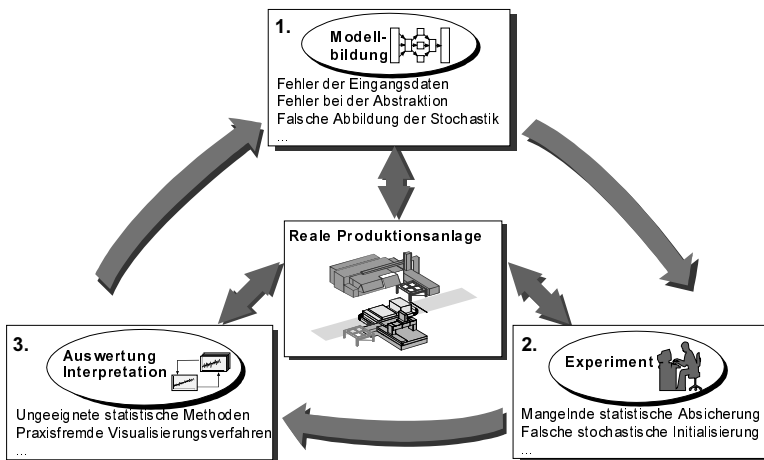


Bild 3-12: Ursachen für Abweichungen zwischen Prognose und Realität in den einzelnen Schritten eines Simulationsexperiments

3.4.1 Daten- und modellbedingte Prognosefehler

Jedes Modell ist per Definition eine abstrakte und damit vereinfachte Abbildung der Realität (VDI-RICHTLINIE 3633, BLATT 1 1994). Diese Vereinfachungen führen zwangsläufig zu Abweichungen des Modellverhaltens bezüglich des Verhaltens des realen Systems. Die Wahl des Abstraktionsniveaus ist maßgebend für die erzielbare Prognosegüte. Auch ist es wichtig, daß das Modell valide ist. Ziel der Modellbildung ist es, daß das Modell das Verhalten des realen Systems hinsichtlich der zu untersuchenden Kriterien hinreichend genau abbildet. In jedem Produktionssystem existieren stochastische Effekte, wie beispielsweise Störungen oder schwankende Bearbeitungszeiten. Wichtig ist es, diese stochastischen Effekte möglichst genau abzuschätzen und im Modell abzubilden.

Mangelnde Aktualität und Qualität der Eingangsdaten oder des Simulationsmodells führen zu Prognosefehlern. Prognosefehler werden durch deterministische oder stochastische Effekte des realen Systems hervorgerufen, die ungenau modelliert oder gänzlich vernachlässigt wurden. Dazu zählen beispielsweise:

- Unrealistische Vorgabezeiten in den Arbeitsplänen
- Unrealistische Transport- oder Übergabezeiten (oft pauschal)
- Vernachlässigung oder falsche Modellierung von Maschinenausfällen
- Vernachlässigung oder falsche Modellierung von organisatorischen Stillständen
- Vernachlässigung oder falsche Modellierung von Qualitätsmängeln bzw. Nacharbeit

Ein Teil dieser Modellierungsfehler läßt sich mit relativ geringem Aufwand vermeiden bzw. beheben. Die Erstellung eines validen Modells erfordert allerdings Modellierungserfahrung. Diese Erfahrung ist sehr selten in den operativen Planungsabteilungen vor Ort gegeben. Problematisch wird die Validierung des Simulationsmodells, das betriebsbegleitend eingesetzt werden soll, wenn sich die Charakteristik des Produktionssystems ständig ändert. Diese Systemeigenschaften, die durch dynamische und teilweise stochastische Einflüsse hervorgerufen werden, lassen sich oft nur mit einem unangemessen hohen Aufwand erfassen und im Modell berücksichtigen.

Weitere Abweichungen werden durch eine geringe Qualität der Initialisierungsdaten oder einen mangelhaften Informationsfluß zwischen planenden und operativen Produktionsbereichen hervorgerufen. Darunter fallen beispielsweise:

- Mangelnde Kenntnis über Auftragsstati, Anarbeitungszustände, aktuelle Störungen
- Abweichende Reihenfolge bei der Auftragsbearbeitung an den einzelnen Maschinen/abweichende Auftragsprioritäten

Dies führt zu einer mangelhaften Initialisierung des Simulationsmodells, wodurch sowohl die Anwendung der betriebsbegleitenden Simulation als auch die statistische Auswertung in Frage gestellt wird. Für die Anwendung der im Rahmen dieser Arbeit zu erarbeitenden Konzepte wird ein theoretisch ausreichend validiertes Simulationsmodell und eine hinreichend hohe Datenqualität vorausgesetzt. Es werden insbesondere die Daten- und Modellfehler betrachtet, die durch die Probleme des Praxiseinsatzes hervorgerufen werden.

3.4.2 Experimentbedingte Prognosefehler

Auch die Konfiguration des Experiments, mit dem die Prognose erstellt wird, besitzt einen Einfluß auf die Prognosegüte. Fundierte Aussagen über ein stochastisches System können erst nach einer statistischen Analyse gemacht werden. Obwohl die Notwendigkeit einer statistischen Analyse und Bewertung von Simulationsergebnissen allgemein anerkannt ist (ZELL 1992), wird in der Praxis häufig auf eine solche statistische Absicherung der Resultate verzichtet (LAW & KELTON 1991, KLEIJNEN 1987). Für den Anwender ist es allerdings wichtig zu wissen, wie gut die aus der Simulation gewonnenen Simulationsergebnisse sind, d.h. mit welcher Genauigkeit sie das reale Verhalten der Anlage charakterisieren und mit welcher Streuung der Ergebnisse in der Realität zu rechnen ist (WELCH 1983).

Die Streuung der Ergebnisse hängt einerseits von den stochastischen Unsicherheiten des abgebildeten Systems ab, andererseits aber auch von der Definition des einzelnen Experiments. Eine ungeschickte Zuordnung der Zufallszahlengeneratoren kann z.B. dazu führen, daß die eigentlich zu untersuchenden Unsicherheiten des Systems vollkommen durch das stochastische Verhalten der Zufallszahlengeneratoren, also durch das „Eingangsrauschen“, überlagert werden. Durch eine fehlerhafte Experimentkonfiguration können Ergebnisse entstehen, die wenig Aussagekraft besitzen oder sogar falsch sind.

Die Ursache dafür, daß Experimente in stochastischer Hinsicht oft unsachgemäß durchgeführt werden, können in der mangelnden Kenntnis der geeigneten statistischen Methoden und der fehlenden Unterstützung durch die gängigen Simulationssysteme liegen (FISCHER 1988). Oft ist auch die Zeit für die Experimentplanung vor Ort nicht vorhanden oder der Zeitdruck läßt die Durchführung stochastischer Simulationsexperimente nicht zu, obwohl sie aufgrund der Fragestellung erforderlich wären.

3.4.3 Auswertungsbedingte Prognosefehler

Abweichungen zwischen Prognose und Realität werden oft auch durch eine fehlerhafte statistische Auswertung hervorgerufen. Insbesondere die Auswertung statistischer Daten erfordert Expertise bei der Auswahl der geeigneten Verfahren. Bei der Bewertung der vorhandenen Angaben von statistischen Kennzahlen, wie z.B. der Erwartungswert für einen Termin und dessen Standardabweichung, ist in vielen Simulationssystemen Vorsicht geboten. Viele der statistischen Verfahren setzen bestimmte Annahmen voraus, wie beispielsweise die Normalverteilung einer stochastischen Variablen. Werden diese Annahmen verletzt, liefert das entsprechende Auswerteverfahren u.U. ein falsches Ergebnis (WAGNER & WARSCHAT 1994). Diese Kennzahlen stellen deswegen im allgemeinen nicht einen unverzerrten, erwartungstreuen Schätzwert für das stochastische Verhalten der realen Anlage dar, sondern geben lediglich einen Anhaltspunkt über die Verteilung der beobachteten Größen in einem speziellen Zufallsexperiment. Bei der Interpretation dieser Angaben ist also zu berücksichtigen, daß sie in aller Regel nicht repräsentativ für das reale Verhalten der Anlage sind.

Problematisch ist oft auch die Interpretation der stochastischen Ergebnisse. Die üblichen Darstellungen stochastischer Ergebnisse sind oft nur mit Statistikenkenntnissen zu verstehen. Hier fehlen meist Visualisierungsverfahren, die auf die Fragestellung des stochastischen Experiments angepaßt sind.

3.4.4 Konsequenzen für die Verbesserung der Prognosegüte

Es ist darauf zu achten, daß aktuelle und qualitativ hochwertige Eingangsdaten für das Modell genutzt werden. Bei der Modellbildung ist zu beachten, daß ein angemessenes Abstraktionsniveau für eine zu untersuchende Fragestellung gewählt wird. Außerdem ist es wichtig, die Stochastik so abzubilden, daß einerseits die notwendigen statistischen Aussagen getroffen werden können und andererseits die Antwortzeit des Prognosemodells im Rahmen bleibt.

Insbesondere bei der Durchführung stochastischer Experimente muß auf eine sachgemäße stochastische Initialisierung der einzelnen Läufe geachtet werden. Um eine stochastische Absicherung zu erreichen, müssen hinreichend viele Beobachtungen einer stochastischen Größe vorliegen.

Das Wissen um die Voraussetzungen, die beim Einsatz einer Auswertemethode erfüllt sein müssen, sollte bei der Auswahl einer geeigneten Methode verfügbar sein. Außerdem muß die Erfüllung dieser Voraussetzungen geprüft werden können. Geeignete Auswert- und Visualisierungsmethoden müssen in einem Bausteinkasten für den Praxiseinsatz verfügbar sein.

3.5 Zusammenfassung

Mit simulationsbasierten Prognoseverfahren lassen sich sehr gute Prognoseergebnisse erzielen, weil sie dynamische und stochastische Effekte des Produktionssystems berücksichtigen. Dieser betriebsbegleitende Einsatz der Simulation unterscheidet sich jedoch in vielen Aspekten grundlegend von der planungsunterstützenden Simulation. Beispielsweise muß die betriebsbegleitende Simulation detailliertere Informationen in kurzer Zeit bereitstellen. Die Prognosegüte spielt eine größere Rolle als bei der planungsunterstützenden Simulation.

Eine empirische Studie unter Anwendern der Simulation hat gezeigt, daß weitgehende Übereinstimmung hinsichtlich des großen Nutzens der Simulation herrscht. Viele Anwender setzen Simulation bereits zur Bearbeitung von Fragestellungen aus dem Bereich Produktionsplanung und -steuerung ein. Es besteht allerdings noch konkreter Handlungsbedarf, um die Praxistauglichkeit der betriebsbegleitenden Simulation weiter zu erhöhen.

Um die Randbedingungen eines Prognosesystems für die Produktionsoptimierung zu vervollständigen, wurden die stochastischen Eigenschaften verschiedener Produktionssysteme analysiert und systematisiert. Es zeigten sich statistische Besonderheiten, die bei der Auswahl und Entwicklung statistischer Verfahren zu berücksichtigen sind.

Um die Ursachen für eine mangelhafte Güte simulationsbasierter Prognosen zu beseitigen, müssen verschiedene Ansätze aus den Bereichen Datenakquisition und Modellierung, Experimentplanung sowie Auswertung und Visualisierung entwickelt werden.

4 Bekannte Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte

Aufgrund der großen Bedeutung der Prognosegüte für Planungssysteme zur Produktionsoptimierung wurden in der Vergangenheit bereits einige Ansätze entwickelt, wie diese gesteigert werden kann. Die Ansätze orientieren sich an den Ursachen für eine mangelnde Prognosegüte, die im Abschnitt 3.4 beschrieben wurden. Im folgenden werden die Ansätze dargestellt. Die Vor- und Nachteile der Ansätze, die für die vorliegende Arbeit Bedeutung besitzen, werden bewertet. Zudem wird der Handlungsbedarf auf Basis des aktuellen Stands der Forschung dokumentiert.

4.1 Verbesserung der Aktualität der Basis- und Eingangsdaten

Zur Verbesserung der Aktualität der Eingangsdaten für die Simulation wird vielfach vorgeschlagen, die Eingangsdaten der Simulation über Datenschnittstellen aus den operativen Informationssystemen zu akquirieren. Beispielsweise schlägt ZETLMAYER (1994, S. 106) vor, ein simulationsgestütztes Planungssystem an eine Werksgrunddatenbank, PPS-, BDE- und MDE-Systeme sowie Leitstände zu koppeln. Mit dem teilweise implementierten System konnte eine hohe Datenaktualität erzielt werden. Allerdings fehlt hier die Akquisition stochastischer Informationen.

Neuere Ansätze haben zum Ziel, die betrieblichen Informationssysteme so zu integrieren, daß auf einen konsistenten und aktuellen Datenbestand zugegriffen werden kann. Datenredundanzen werden konsequent vermieden und der Speicherort aller Daten wird eindeutig definiert. Diese Data-Warehouse-Ansätze schaffen die informationstechnischen und organisatorischen Grundlagen für eine effiziente Akquisition von Daten in hoher Güte (INMON & HAKATHORN 1994).

4.2 Pflege und Aktualisierung des Simulationsmodells

Zur Pflege und Aktualisierung des Simulationsmodells eignen sich prinzipiell die klassischen Ansätze der Modellvalidierung (BANKS ET AL. 1996, S. 406). Bei der Validierung werden die Werte wichtiger Variablen der Simulation statistisch ausgewertet (z.B. Mittelwert, Varianz, Verteilung) und mit den Ergebnissen des realen Produktionssystems verglichen, beispielsweise durch eine Korrelationsanalyse. Sind die Daten innerhalb definierter Toleranzgrenzen gleich, ist das Simulationsmodell valide, das heißt es spiegelt das reale Systemverhalten wider. Ist das Modell nicht valide müssen Korrekturen am Modell vorgenommen werden. Für die betriebsbegleitende Simulation sind diese Ansätze nicht geeignet, weil eine regelmäßige Validierung erforderlich wäre. Da die meisten der Validierungsschritte manuell von einem Bediener durchgeführt werden müssen, sind diese Ansätze zu aufwendig. Außerdem setzt die Validierung voraus, daß reale Beobachtungen vorliegen, was insbesondere bei der taktischen Optimierung, in deren Rahmen auch Produktionsstrukturen und Steuerungsstrategien verändert werden, oft nicht der Fall ist.

Liegen keine realen Beobachtungen vor, muß ein Simulationsmodell zumindest verifiziert werden, um sicherzustellen, daß es realistische Ergebnisse liefert. Im Rahmen der Verifi-

zierung werden die Abläufe im Simulationsmodell und die Zustände der Systemkomponenten analysiert und bewertet, ob diese plausibel sind. Außerdem wird sichergestellt, daß keine Programmierungsfehler vorliegen. Ein Modell gilt beispielsweise als verifiziert, wenn simulativ ermittelte Ergebnisse analytisch ermittelten Ergebnissen entsprechen. Weiterhin ist ein Modell verifiziert, wenn es aus validierten oder verifizierten Modellbausteinen aufgebaut wird und die Verkettung dieser Module verifiziert wird. Eine Verifizierung birgt allerdings stets die Gefahr, daß das Simulationsmodell nicht valide ist. Deswegen sollte, wann immer möglich, ein Simulationsmodell validiert werden.

In einigen wissenschaftlichen Arbeiten wird vorgeschlagen, ein Simulationsmodell bei Änderung des Produktionssystems automatisch aus den Grunddaten zu generieren (ZETLMAYER 1994, S. 88). Für einige kommerzielle Simulatoren, wie beispielsweise Factor/Aim, wird diese Funktionalität bereits als Standard angeboten (CREDLE 1993, PRITSKER ET AL. 1991). Allerdings werden von diesen Systemen Modelle generiert, die sehr abstrakt sind und zum Teil starke Vereinfachungen gegenüber dem realen Produktionssystem beinhalten. Beispielsweise werden in den Modellen keine komplexeren Steuerungsstrategien abgebildet. Außerdem wird keine individuelle und valide Abbildung der Stochastik vorgenommen. Der Abstraktionsgrad der Modelle ist konstant, weswegen sie nur für eine kleine Gruppe von Fragestellungen geeignet sind.

Andere Ansätze zur automatischen Modellgenerierung orientieren sich am Layout eines Produktionssystems (SPLANEMANN 1995). Sie sind allerdings nur für linienförmige Produktionssysteme geeignet, weil bei dieser Produktionsorganisation das Layout die Abläufe maßgeblich vorgibt. Auch hier wird die Modellierung der Steuerungsstrategien und der realen Stochastik weitgehend vernachlässigt.

Alle beschriebenen Ansätze sind nur dann geeignet, wenn die simulationsrelevanten Daten aktuell und konsistent sind, also eindeutig den tatsächlichen Zustand des Produktionssystems repräsentieren. Außerdem müssen die Daten in elektronischer Form vorliegen.

4.3 Methoden zur korrekten Abbildung der Stochastik in der Simulation

Ein in Wissenschaft und Praxis gleichermaßen anerkanntes Problem stellt die korrekte Abbildung der stochastischen Effekte in einem Simulationsmodell dar (BRATLEY ET AL. 1987). Oft führen falsch abgebildete Abhängigkeiten zwischen einzelnen stochastischen Effekten dazu, daß die Simulationsergebnisse eine andere Streuung aufweisen, als die realen Ergebnisse. Meist ist die Streuung in der Simulation größer als in der Realität, weil sich in einem realen Produktionssystem eine Vielzahl von Mechanismen, wie beispielsweise Steuerungsstrategien, reduzierend auf die Streuung auswirken.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Methoden und Verfahren vorgestellt, die Streuung von Simulationsergebnissen zu begrenzen. Bei diesen sogenannten Variance Reduction Techniques (VRTs) wird durch eine geeignete Definition und Zuordnung der Wahrscheinlichkeitsfunktionen versucht, die Streuung auf die systemimmanenten Unsicherheiten zu begrenzen (LAW & KELTON 1991, KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992). Diese Modellierungstechniken befinden sich allerdings noch auf einem Entwicklungsstand, der

weit von einer Praxistauglichkeit bei einer produktionstechnischen Anwendung entfernt ist. Es fehlen Untersuchungen, in wie weit VRTs für die betriebsbegleitende Simulation geeignet sind. Außerdem fehlen praxistaugliche Ansätze für die Anwendung dieser Modellierungstechniken.

4.4 Methoden und Systeme zur Experimentplanung

Die statistische Experimentplanung hat zum Ziel, ein Experiment mit möglichst geringem Aufwand durchzuführen und zu gewährleisten, daß die Experimentergebnisse eine hohe Aussagekraft besitzen und statistisch abgesichert sind. Im Rahmen der statistischen Experimentplanung werden strategische und taktische Aspekte der Experimentplanung festgelegt. Bei den strategischen Aspekten handelt es sich in erster Linie um die zu variierenden Eingangsparameter des Modells und um die Parameterwerte und -kombinationen. Taktische Aspekte betreffen in erster Linie die Frage, durch welche Experimentparameter, wie beispielsweise Anzahl der Beobachtungen oder Länge der Beobachtungszeiträume, gewährleistet wird, daß die Experimentergebnisse stochastisch abgesichert sind.

Zur Festlegung der strategischen Aspekte sind aus der Mathematik Methoden der statistischen Versuchsplanung bekannt („Design of Experiments“, DOE). Beispielsweise schlagen RAMBERG & SANCHEZ (1991, S.167) und MAYER & BENJAMIN (1992, S. 195) die Versuchsmethodik von Taguchi als einen pragmatischen Ansatz zur Planung von Simulationsexperimenten vor. Bei dieser Methodik werden durch Sensitivitätsanalysen die wesentlichen Steuerungsparameter eines Simulationsmodells identifiziert, so daß die Simulation aller denkbaren Kombinationen der Eingangsparameter, die sogenannte vollständige faktorielle Analyse, vermieden wird. Kommerzielle Systeme zur statistischen Versuchsplanung sind in der Regel sehr universell und setzen vom Systemanwender nur sehr geringe Kenntnisse über das zu analysierende System voraus. Beispielsweise wird vom Bediener nicht erwartet, daß er weiß, ob und wie stark sich bestimmte Parameter auf das System auswirken oder ob Wechselwirkungen zwischen den Parametern bestehen. Entsprechend viel Funktionalität hinsichtlich dieser Aspekte wird von den Experimentplanungssystemen zur Verfügung gestellt, was die Anwendung erschwert. Auf die spezifischen Belange der Simulation sind diese Systeme nicht zugeschnitten. Beispielsweise wird nicht berücksichtigt, daß mit der Simulation eine beliebige Anzahl von Replikationen erzeugt werden kann.

Auch hinsichtlich der Festlegung der taktischen Aspekte werden in der einschlägigen Simulations-Literatur Empfehlungen gegeben. Beispielsweise ist für die statistische Analyse von Zufallsexperimenten und einer weiteren Reduktion der Streuung eine Vielzahl von unabhängigen Beobachtungen notwendig. Es gibt prinzipiell zwei Vorgehensweisen, um zu der notwendigen Anzahl unabhängiger Beobachtungen zu kommen (KLEIJNEN 1987, LAW & KELTON 1991). Die erste Möglichkeit ist die Durchführung einer Vielzahl unabhängiger Simulationsexperimente am unveränderten Modell. Dazu werden eine große Anzahl von Simulationsläufen durchgeführt, die sich nur in den Anfangswerten des Zufallsgenerators unterscheiden (Modellstruktur und -parameter in den einzelnen Läufen sind identisch). Bei der alternativen Vorgehensweise wird ein sehr langer Simulationslauf durchgeführt, der so zerlegt wird, daß eine genügende Anzahl unabhängiger Simulati-

onsergebnisse gewonnen werden kann (KLEIJNEN 1987, FISCHER 1988). Eine solche Zerlegung und Auswertung ist allerdings nur möglich, wenn das zu untersuchende System einen stabilen Zustand erreicht hat. In diesen Quellen fehlt allerdings eine Systematik zur Auswahl der zu berücksichtigenden taktischen Experimentparameter sowie Vorschläge hinsichtlich einer Unterstützung des Simulationsanwenders.

Einige der genannten Ansätze zur Experimentplanung wurden bereits für den Einsatz bei der Simulation weiterentwickelt. Hier entstanden vielfach Experimentplanungssysteme, beispielsweise für das Simulationssystem SIMPLEX II (SCHMIDT 1995). Dieses und vergleichbare Experimentplanungssysteme sind jedoch bewußt für allgemeine Fragestellungen entwickelt worden. Diese Flexibilität erfordert vom Benutzer spezifische Kenntnisse in der Methode der Experimentplanung.

Es existieren bereits erste Konzepte, Experimentplanungssysteme und Modellbausteinkästen mit automatischem Modellgenerator zu einer universellen Simulationsumgebung zu integrieren. Allerdings hat sich gezeigt, daß diese Konzepte in der Praxis noch auf große Realisierungs- und Akzeptanzhürden stoßen (ÖZDEMIREL 1991 (S. 419), ÖZDEMIREL ET AL. 1993 (S. 583), ÖZDEMIREL ET AL. 1996 (S. 171)). Beispielsweise sind trotz eines hohen Aufwandes für die Entwicklung einer solchen Umgebung immer wieder Anpassungen des Modellbausteinkastens vorzunehmen. Durch die hohe Komplexität ist der Bedienungskomfort sehr gering. Es besteht zudem die Gefahr, daß mit ungeeigneten Modellen Experimente durchgeführt werden, die zu unzuverlässigen Ergebnissen führen. Weiterhin wird bei den beschriebenen Ansätzen den Aspekten „Effizienz der Modellierung“ und „Modellierung der Stochastik“ wenig Beachtung geschenkt.

Aus pragmatischen Gründen wurden Experimentier- und Simulationsumgebungen mit einem eingegrenzten Anwendungsgebiet entwickelt. Dieser Ansatz hat sich bislang als erfolgreich erwiesen (REDDY 1987 (S. 165), ÖZDEMIREL 1990). Beispielsweise verlangt das System „DOES“ (ÖZDEMIREL ET AL. 1996, S. 171) vom Anwender Vorkenntnisse hinsichtlich des zu untersuchenden Produktionssystems, des Simulationsmodells und der Statistik. Durch diese Voraussetzungen war es möglich, den Schwerpunkt des Systems weg von der klassischen, abstrakten Experimentplanung auf eine problemstellungsgetriebene Unterstützung des Produktionsplaners zu verlagern. Praxisanwender haben allerdings die Höhe der erforderlichen Kenntnisse in Statistik bemängelt. Außerdem bietet das System immer noch sehr viele Freiheitsgrade, die erforderlich sind, um das System für verschiedenste Experimentziele und unterschiedlichste Simulationsmodelle anzupassen. Für einen konkreten Anwendungsfall ist diese Fülle von Möglichkeiten und Bedienschritten jedoch verwirrend und umständlich.

4.5 Statistische Korrekturmodelle und Fehlerkompensation

Mit dem Parallelbetrieb von Anlage und Modell ergibt sich die Möglichkeit eines ständigen Abgleichs zwischen Modell und Realität. Dadurch kann einerseits gewährleistet werden, daß ständig mit aktuellen Daten simuliert wird, andererseits bestehen zusätzliche Möglichkeiten vorhandene Modellfehler zu kompensieren.

Systematische Abweichungen, die aufgrund experimenteller Erfahrungen deutlich werden, können in der Regel abgeschätzt werden (SCHRÜFER 1992). Eine solche Abschät-

zung ist mit geeigneten statistischen Verfahren, wie z.B. der Regressions- oder der Trendanalyse, möglich (PROFOS & PFEIFER 1992). Systematische Fehler, die nicht mehr mit vertretbarem Aufwand durch Verbesserungen des Modells zu eliminieren sind, können dann durch die Einführung von Korrekturgliedern kompensiert werden (PROFOS & PFEIFER 1992). Dieses Verfahren ist mit der in der Regelungstechnik bekannten Methode des adaptiven Beobachters zu vergleichen (FÖLLINGER 1985). Anwendungen dieser Verfahren zur Fehlerkompensation bei Prognose-Systemen sind allerdings nicht bekannt. Es existieren lediglich statistische Ansätze zur Validierung von Simulationsmodellen (RECKHOW 1987, SARGENT 1987). Die Verfahren sind allerdings sehr aufwendig und erfordern Expertenwissen. Sie sind deshalb nicht für eine Online-Fehlerkompensation geeignet.

In einigen anderen ingenieurwissenschaftlichen Anwendungsgebieten haben sich Kompensationsverfahren bereits bewährt. Beispielsweise existieren Ansätze zur Erhöhung der Genauigkeit von Industrierobotern und Werkzeugmaschinen durch den Ausgleich des Werkzeugverschleißes oder durch Temperaturkompensation (GOSSEL 1996). Ist der Fehler direkt meßbar bzw. eine Fehlerfunktion ermittelbar, kann die Kompensation durch eine mathematische Funktion erfolgen. Oft existiert allerdings nur eine stochastische Beschreibung des auszugleichenden Fehlers. In diesem Fall werden statistische Verfahren, wie die Regressions- oder die Fourier-Analyse eingesetzt (SCHRÖER 1993, HOFER & LUNDERSTEDT 1975). Trotz der Analogien lassen sich die Ansätze nicht direkt auf produktionslogistische Fragestellungen übertragen, weil hier die Anforderungen und Randbedingungen, beispielsweise hinsichtlich der erforderlichen Kenntnisse des Anwenders, der Antwortzeit oder der Abschätzung des nach der Kompensation verbleibenden Restfehlers, verschieden sind.

4.6 Systeme zur statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse

Verfahren zur statistischen Auswertung von Simulationsergebnissen werden in der Literatur bereits vielfach beschrieben. KLEIJNEN & GROENENDAAL (1992) und BANKS ET AL. (1995) weisen darauf hin, daß die stochastischen Besonderheiten, wie beispielsweise die Schiefe einer Verteilung, vom Auswerteverfahren berücksichtigt werden müssen. Diese Anforderungen werden von Auswertewerkzeugen, die bislang für Simulationswerkzeuge existieren, nicht erfüllt (WAGNER & WARSCHAT 1994). WAGNER & WARSCHAT (1994) beschreiben ein Auswertewerkzeug für Simulationsergebnisse, das diese Anforderungen berücksichtigen soll. Das Werkzeug ist jedoch nicht auf die spezifischen Belange der betriebsbegleitenden Simulation zugeschnitten, wie beispielsweise wenige Replikationen oder kurze Antwortzeiten. Außerdem werden nicht die spezifischen Auswertungen angeboten, die bei der betriebsbegleitenden Simulation erforderlich sind, wie beispielsweise Schätzungen der Zuverlässigkeit von Terminprognosen.

4.7 Benutzerschnittstellen und Visualisierungsmethoden

Simulationssoftwarepakete bieten viele Alternativen zur Visualisierung der Ergebnisse. Außerdem ist bei vielen Softwarepaketen die Möglichkeit gegeben, individuelle Benut-

zerschnittstellen zu entwickeln. Allerdings bieten die Pakete in der Regel nur Basismethoden, aus denen komplexere Visualisierungen und Eingabemasken erstellt werden können. Auch können Abläufe, beispielsweise zur Planung und Steuerung von Experimenten, programmiert werden.

ZETLMAYER (1994, S. 92) integriert verschiedene Visualisierungsmethoden in einen simulationsbasierten Leitstand „Synchro“. Neben Belegungsplänen und Histogrammen zur Darstellung der logistischen Kennzahlen wird ein Experimentbaum zur Verwaltung der Simulationsexperimente vorgestellt. Die Benutzerschnittstellen und Visualisierungen ermöglichen einem Bediener die Interpretation der Ergebnisse und das Ableiten geeigneter Maßnahmen erheblich. Allerdings wird die stochastische Unsicherheit der Kennzahlen in den Diagrammen nicht dargestellt. FELDMANN ET AL. (1997) und RAUH (1997) stellen ein Konzept zur Integration der Simulation in die betrieblichen Entscheidungsabläufe vor. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der informationstechnischen Integration. Auch hier fehlen noch spezielle Benutzeroberflächen für die betriebsbegleitende Simulation und Visualisierungsmethoden zur Darstellung der stochastischen Unsicherheiten.

4.8 Zusammenfassung des Standes der Forschung und Fazit

Aufgrund der großen Bedeutung der Prognosegüte für die Produktionsoptimierung wurden in der Vergangenheit bereits einige Ansätze entwickelt, um diese zu verbessern. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick und eine Bewertung der bekannten Ansätze. Die vorliegende Arbeit zeigt ein Konzept auf, mit dem die genannten Kriterien erfüllt werden können.

Aus der Tabelle läßt sich der verbleibende Handlungsbedarf hinsichtlich der Verbesserung der Prognosegüte und der Praxistauglichkeit der betriebsbegleitenden Simulation ableiten. Im einzelnen sind folgende Punkte zu beachten:

1. Die Qualität der Datengrundlage ist zu verbessern. Bestehende Lösungen zur Akquisition aktueller Eingangsdaten vernachlässigen in der Regel stochastische Informationen.
2. Zur Erreichung einer ständigen Planungsbereitschaft muß jederzeit ein aktuelles Prognosemodell vorliegen. Insbesondere bei der betriebsbegleitenden Simulation würde eine manuelle Modellpflege einen zu hohen Aufwand bedeuten. Bisherige Ansätze zur automatischen Modellgenerierung besitzen nicht den Anspruch, Simulationsmodelle zu generieren, die auch in stochastischer Hinsicht valide sind. Zudem sind die Modelle hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten auf wenige Fragestellungen beschränkt. In der Regel sind die Modelle zu abstrakt und für die Bearbeitung von Fragestellungen der Produktionsoptimierung ungeeignet. Die Prognosegüte ist gering. Es sind Lösungen zu erarbeiten, wie der Ansatz der automatischen Modellgenerierung hinsichtlich Prognosestreue und Prognoseschärfe verbessert werden kann. Die Praxistauglichkeit für den Einsatz im Rahmen der Produktionsoptimierung ist zu steigern. Die zu bearbeitende Fragestellung und das durchzuführende Experiment stehen auch in enger Wechselwirkung mit dem Prognosemodell. Teilweise erfordert eine bestimmte zu untersuchende Fragestellung ein Modell, das zugleich sehr genaue statistische Ergebnisse in sehr kurzer Zeit liefert, was sich in der Regel nur bei sehr kleinen

Modellen erfüllen läßt. Um auch bei größeren Modellen mit geringem Modellierungs- und Pflegeaufwand effiziente und valide stochastische Prognosemodelle zu erreichen, sind weitere Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte zu berücksichtigen, wie beispielsweise Ansätze der Fehlerkompensation (s.u.).

Ansatz:	ZETLMAYER 1994	INMON & HAKATHORN 1994	BANKS ET AL. 1996	CREDLÉ 1993	SPLANEMANN 1995	LAW & KELTON 1991	KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992	MAYER & BENJAMIN 1992	SCHMIDT 1995	ÖZDEMIREL ET AL. 1996	SCHRÜFER 1992	PROFOS & PFEIFER 1992	SCHRÖER 1993	RAUH 1997	WAGNER & WARSCHAT 1994
Kriterium:															
Verbesserung der Aktualität der Basis- und Eingangsdaten:															
- deterministische Daten	●	●	-	-	●	○	-	-	○	○	-	-	-	-	-
- stochastische Daten	-	○	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-
Pflege und Aktualisierung des Simulationsmodells															
- hinsichtlich deterministischer Charakteristik des Systems	●	-	●	●	●	-	-	-	○	●	-	-	-	-	-
- hinsichtlich stochastischer Charakteristik des Systems	-	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-
- bei fehlenden Daten zur Validierung	-	-	○	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-
- bei häufigen strukturellen Veränderungen des Systems	○	-	-	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	○	-
- bei Änderung der Steuerungsstrategie	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-
Methoden zur korrekten Abbildung stochastischer Effekte im Simulationsmodell	-	-	○	-	-	●	●	-	-	-	-	-	-	-	○
Methoden zur Experimentplanung															
- Strategische Experimentaspekte	○	-	○	-	-	○	○	●	●	●	-	-	-	-	-
- taktische Experimentaspekte	-	-	○	-	-	○	○	●	○	-	-	-	-	-	-
Statistische Korrekturmodelle und Fehlerkompensation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	-	-
Statistische Auswertung von Simulationsergebnissen	○	-	●	○	-	●	●	-	○	○	-	-	-	-	●
Benutzerschnittstellen und Visualisierungsmethoden															
- deterministische Informationen	●	-	-	●	-	-	-	-	○	●	-	-	-	●	●
- statistische Informationen	○	-	-	○	-	-	-	-	○	○	-	-	-	○	○

Tabelle 4-1: Bewertung bekannter Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte (●: Kriterium erfüllt, ○: teilweise erfüllt, -: nicht erfüllt)

3. Es sind methodische Ansätze aufzuzeigen, wie speziell bei der betriebsbegleitenden Simulation sichergestellt werden kann, daß stochastische Effekte korrekt im Modell abgebildet sind.
4. Unterschiedliche Fragestellungen der Produktionsoptimierung stellen jeweils verschiedene Anforderungen an das Experiment. Dies bedeutet, daß das Prognoseverfahren an diese Anforderungen und Randbedingungen angepaßt werden muß. Bestehende Verfahren und Systeme zur Experimentplanung sind zu mächtig und für eine Vielzahl potentieller Fragestellungen geeignet. Aus diesem Grund erfordern sie vom Bediener zu viele Kenntnisse in Statistik. Außerdem betrachten sie in erster Linie die strategischen Aspekte der Experimentplanung. Es fehlen Lösungen für die Experimentplanung, die den speziellen Fragestellungen und Einsatzbedingungen der betriebsbegleitenden Simulation im Rahmen der Produktionsoptimierung gerecht werden.
5. Korrekturmodelle sind ein möglicher Ansatz, um die Prognosegüte zu verbessern. Speziell für die betriebsbegleitende Simulation existieren bislang keine Lösungen auf Basis dieses Ansatzes.
6. Standardmethoden zur statistischen Auswertung der Prognosen berücksichtigen nicht die statistischen Besonderheiten der Daten und verfälschen deshalb die Ergebnisse. Geeignete Verfahren sind sehr speziell und erfordern besondere Statistikkennnisse. Eine Unterstützung des Anwenders bei Auswahl und Anwendung geeigneter Verfahren ist dringend geboten.
7. Auch die Ergebnisdarstellung ist oft nicht nutzergerecht. Stochastische Kennzahlen werden in der Regel nicht dargestellt. Dies kann zu Fehlinterpretationen führen. Es sind Visualisierungsverfahren zu entwickeln, die die Anforderungen aus der Praxis berücksichtigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden konkrete Lösungen für die vorgestellten Ansätze zur Verbesserung der Prognosegüte für den speziellen Einsatz im Rahmen der Produktionsoptimierung mittels der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation erarbeitet. Weiterhin wird ein praxistaugliches Konzept für ein Prognosesystem erarbeitet, welches die verschiedenen Ansätze integriert. Im folgenden Kapitel wird das Konzept eines Prognosesystems für die Produktionsoptimierung vorgestellt.

5 Konzept eines Prognosesystems für die Produktionsoptimierung

Im folgenden wird zunächst das Konzept des Prognosesystems dargestellt. Aus der Aufgabenstellung der Produktionsoptimierung wird im Anschluß ein Pflichtenheft für das Prognosesystem und für die einzelnen Komponenten des Systems abgeleitet.

5.1 Grundidee und Rahmenkonzept

Das Konzept des entwickelten Prognosesystems ist in sechs Funktionsmodule gegliedert. Diese werden zu drei Systemmodulen integriert. Ein Modul dient der Experimentplanung und -steuerung. Weiterhin sind ein Modellgenerator und ein Modul zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung zentrale Bestandteile des Konzepts (Bild 5-1).

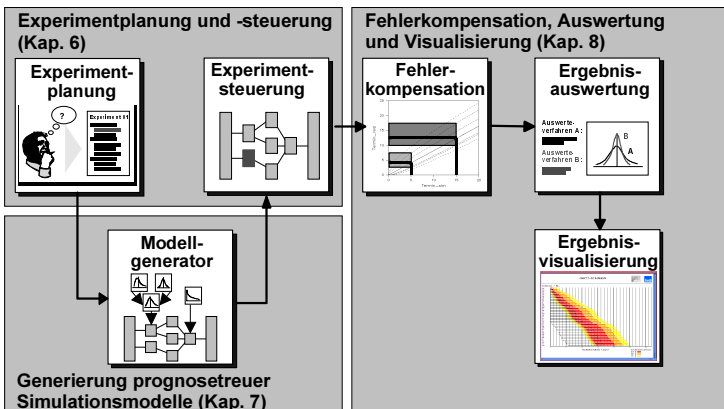


Bild 5-1: Überblick des Gesamtkonzepts

Im folgenden wird zunächst ein Überblick des Konzepts gegeben. Dadurch soll die Funktion der Module und der grobe Ablauf für die Erstellung sicherer Prognosen deutlich werden. An das Kapitel 5 schließen sich detaillierte Beschreibungen der zentralen Systemmodule an. In Kapitel 6 wird das Modul zur Experimentplanung und -steuerung dargestellt. Daran schließt sich die Darstellung der entwickelten Ansätze zur prognostreuen stochastischen Simulation und zur automatischen Modellgenerierung an (Kapitel 7). Zum Abschluß erfolgt eine Darstellung des Moduls zur Fehlerkompensation, Ergebnisauswertung und Ergebnisdarstellung (Kapitel 8).

5.1.1 Experimentplanung

Aufgabe des Funktionsmoduls Experimentplanung ist es, den Simulationsanwender von den anspruchsvolleren Aufgaben der Modellierung und der Festlegung der statistischen

Parameter und Auswerteverfahren im Rahmen der Experimentplanung weitgehend zu entlasten. Einzige Aufgabe des Anwenders soll es sein, die zu bearbeitende Fragestellung zu beschreiben sowie das Ziel des Experiments festzulegen. Auf Basis der Planungsaufgabe bzw. des Prognoseziels soll ein geeignetes Experiment im Hinblick auf die Fragestellung konfiguriert werden, durch das sichergestellt ist, daß aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Zu beachten ist, daß durch die zu bearbeitende Fragestellung nicht nur die Experimentparameter definiert werden, wie beispielsweise Länge und Anzahl der Simulationsläufe. Zusätzlich werden auch die Eigenschaften des Modells und die Art der Auswertung und der Visualisierung der Ergebnisse durch das Experiment festgelegt.

Als Lösungsansatz für die Experimentplanung wird hier die Klassifizierung der Fragestellungen gewählt (vgl. ÖZDEMIREL ET AL. 1996). Dies ermöglicht eine Vordefinition von Experimenten und Experimentdesigns. In diesen sogenannten „Design-sheets“ werden typische Konfigurationen aus Simulationszielen, Antwortvariablen, Modell- und Experimentparametern, Auswertungen und Visualisierungsverfahren vorab definiert. Ein Experimentrahmen legt die Freiheitsgrade bei der Experimentplanung fest. Ein vordefinierter Planungsablauf und eine Benutzeroberfläche führen den Systembediener durch den Prozeß der Experimentplanung und fordert ihn auf, Schritt für Schritt die wesentlichen Experimentparameter festzulegen, so daß am Ende eine geeignete Experimentkonfiguration vorliegt.

5.1.2 Modellgenerierung und -konfiguration

Das Simulationsmodell muß die spezifischen Anforderungen und Randbedingungen eines definierten Experiments berücksichtigen. Dies bedeutet, daß je nach zu bearbeitender Fragestellung unterschiedliche Simulationsmodelle mit abweichenden Modellierungsspezifika geeignet sind. Ziel der Modellgenerierung und -konfiguration ist es, den Systembediener von der aufwendigen und anspruchsvollen Arbeit der Modellierung zu entlasten. Aus diesem Grund wird auf Basis der Experimentkonfiguration automatisch ein Simulationsmodell konfiguriert, das für die zu untersuchende Fragestellung angepaßt und valide ist.

Für die Modellqualität ist unter anderem die Qualität der deterministischen und stochastischen Eingangsdaten entscheidend. Eine hohe Qualität soll durch Akquisition aktueller Daten aus den betrieblichen Informationssystemen erreicht werden, wie beispielsweise PPS-, BDE/MDE-, Instandhaltungs- oder CAQ-Systemen. Neben der Akquisition aktueller Eingangsdaten ist die korrekte Abbildung der stochastischen Effekte des realen Systems im Simulationsmodell ein wichtiges Ziel. Neben einer Auswahlmethodik für die im Rahmen der betriebsbegleitenden Simulation relevanten stochastischen Effekte steht hier die effektive und effiziente Modellierung im Vordergrund.

5.1.3 Experimentsteuerung

Die Experimentkonfiguration enthält bereits alle wichtigen Experimentparameter, wie die Länge eines Simulationslaufs, die Anzahl der Läufe oder die zu variierenden Modellparameter. Die Experimentsteuerung läßt ein Experiment auf Basis dieser Parameter auto-

matisch ablaufen, indem einzelne Simulationsläufe entsprechend initialisiert und durchgeführt werden. Während der Simulationsläufe werden Datenreihen für die Auswertung erfaßt und archiviert.

5.1.4 Fehlerkompensation und Schätzung der stochastischen Unsicherheit

Das Prognosesystem soll sichere Prognosen sowie eine Abschätzung der Prognoseunsicherheit ermöglichen. Bei der betriebsbegleitenden Simulation sind jedoch häufige Modellanpassungen nötig, um diese Anforderungen zu erfüllen. Dieser erhöhte Aufwand wird jedoch bei der betriebsbegleitenden Simulation nicht akzeptiert. Außerdem gelten bei bestimmten Fragestellungen der Produktionsoptimierung enge Zeitrestriktionen, die sich mit stochastischer Simulation nicht erfüllen lassen. Aus diesem Grund beinhaltet das Gesamtkonzept den Ansatz, zunächst einen Simulationslauf eines deterministischen Simulationsmodells durchzuführen und im Anschluß an das Simulationsexperiment eine Fehlerkompensation sowie eine Schätzung der stochastischen Unsicherheiten vorzunehmen. Durch diesen Ansatz lassen sich erhebliche Laufzeitvorteile gegenüber der stochastischen Simulation erzielen. Die Fehlerkompensation auf Basis aktueller Erfahrungsdaten soll es ermöglichen, daß bei kleineren Veränderungen des Produktionssystems nicht sofort das Simulationsmodell aktualisiert werden muß. Durch die Verlängerung der Aktualisierungsintervalle des Simulationsmodells erhöht sich die Praxistauglichkeit der betriebsbegleitenden Simulation entscheidend.

Aufgabe dieses Funktionsmoduls ist zum einen die Kompensation der systematischen Abweichungen von realen und simulierten Ergebnissen und die korrekte Berechnung und Visualisierung der stochastischen Abweichungen. Dabei sollte in erster Linie die Prognose-treue von Terminvorhersagen erhöht und die Prognoseschärfe bestmöglich geschätzt werden. Hierfür werden Methoden entwickelt, mit denen die realen Varianzen und Prognosebereiche analysiert und vorhergesagt werden können.

Die Fehlerkompensation und Schätzung der stochastischen Unsicherheiten erfolgt mit Hilfe von statistischen Modellen, die die wesentlichen Informationen über systematische und stochastische Prognosefehler für ein Produktionssystem beinhalten. Diese statistischen Modelle werden durch Analyse von Prognosedaten und real beobachteten Daten des Produktionssystems gewonnen.

5.1.5 Ergebnisauswertung

Im Anschluß an die Fehlerkorrektur werden die Daten der Simulation ausgewertet. Die Auswertungen sind wiederum abhängig von der zu bearbeitenden Planungsaufgabe. Wichtig ist, daß Auswerteverfahren zur Verfügung stehen, die an die Randbedingungen des Experiments und der auszuwertenden Daten angepaßt sind. Dies bedeutet, daß ein Verfahren beispielsweise die engen Zeitrestriktionen erfüllen, mit statistischen Besonderheiten zurecht kommen oder auch bei einer niedrigen Anzahl von Simulationsläufen stochastisch hinreichend abgesicherte Ergebnisse liefern muß.

5.1.6 Visualisierung

Das Modul zur Visualisierung beinhaltet verschiedene Visualisierungsmethoden, die die Prognoseergebnisse in geeigneter Form darstellen. Wichtig ist, daß Visualisierungstechniken eingesetzt werden, die bereits bei den Systembedienern im Rahmen der Erfüllung ihrer Optimierungsaufgaben genutzt werden. Somit kann die Akzeptanz und die intuitive Anwendung gefördert werden.

5.2 Ableitung eines Pflichtenheftes für die Funktionsmodule

Aus dem Anwendungsumfeld und den besonderen Rahmenbedingungen beim Einsatz der betriebsbegleitenden Simulation ergeben sich spezielle Anforderungen an das Modell und die Modellierung, das Simulationsexperiment und die Experimentplanung sowie an die Verfahren zur Prognosekorrektur, Auswertung, Aufbereitung und Darstellung der Simulationsergebnisse.

Die Anforderungen wurden im Rahmen von empirischen Untersuchungen, wie beispielsweise der in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten empirischen Studie, und ergänzenden Interviews mit potentiellen Anwendern erfaßt. Zusätzlich flossen Erfahrungen aus verschiedenen Projekten am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) ein, bei denen die Ablaufsimulation für Fragestellungen der Produktionsoptimierung eingesetzt wurde. Im folgenden wird das Pflichtenheft des zu entwickelnden Systems dargestellt.

5.2.1 Anforderungen an die Experimentplanung

Das Simulationsexperiment sollte an die zu bearbeitende Planungsaufgabenstellung angepaßt sein. Insbesondere muß die Wahl einer geeigneten Kombination von Modelltyp, Experimentparameter, Auswertungsverfahren und Visualisierung unterstützt werden. Auch der Detaillierungsgrad und die statistische Güte der Ergebnisse sowie die Antwortzeit der Simulation müssen zu der Planungsaufgabenstellung passen.

Im Falle der betriebsbegleitenden Simulation muß das Simulationsexperiment in der Regel besonders effizient gestaltet werden. Ziel ist es außerdem, eine hohe Güte der Ergebnisse sowohl bezüglich systematischer Fehler, als auch bezüglich stochastischer Unsicherheiten bereits bei der Simulation zu erreichen. Um diese Ziele zu erreichen sind neben den strategischen auch taktische Aspekte bei der Gestaltung des Simulationsexperiments zu berücksichtigen (KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992). Die strategischen Aspekte umfassen die richtige Auswahl, Parametrisierung und Initialisierung eines Simulationsmodells für ein bestimmtes Experiment. Die taktischen Aspekte definieren die eigentliche Experimentdurchführung, wie z.B. den simulierten Zeitraum oder die Anzahl der durchzuführenden stochastischen Simulationsläufe.

Zur Definition dieser Experimente sollten keine Expertenkenntnisse erforderlich sein. Der Experimentablauf bzw. die Steuerung der Simulationsläufe und die Erfassung der für die Auswertung relevanten Daten sollte automatisch erfolgen.

5.2.2 Anforderungen an das Modell und die Modellierung

Das Simulationsmodell muß die reale Anlage so exakt nachbilden, daß eine möglichst genaue Übereinstimmung von simulierten und realen Ergebnissen erreicht werden kann. Es muß Strukturidentität zwischen Modell und Anlage bestehen. Für stochastische Simulationsstudien sind zusätzlich die Verteilungsfunktionen der Zufallsereignisse realitätsgetreu zu modellieren. Nur so wird gewährleistet, daß das Simulationsmodell die dynamische Charakteristik des Produktionssystems weitgehend realistisch abbildet.

Das Modell sollte insbesondere für Aufgabenstellungen der operativen Optimierung sehr schnell sein. Aus diesem Grund sollte es auf die relevanten Elemente beschränkt werden. Weniger wichtige Materialflußelemente, Informationsflüsse oder Auswertemethoden sind zu vernachlässigen oder zu abstrahieren, weil diese in der Regel zu einer Verschlechterung der Laufzeiten führen. Die notwendigen Strukturen und Abläufe sollten außerdem effizient programmiert sein, um weitere Laufzeiteinsparungen zu erreichen.

Für die einfache und aufwandsarme und weitgehend automatische Erstellung solcher Modelle sind Modellierungshilfen vorzusehen, wie beispielsweise Modellbausteinkästen oder Modelleditoren mit wissensbasierter Unterstützung.

5.2.3 Anforderungen an die Experimentsteuerung

Nach Experimentplanung und Modellgenerierung soll das Experiment automatisch ablaufen. Dazu sollen für die notwendigen Simulationsläufe Modelle entsprechend der Experimentkonfiguration parametrisiert und initialisiert werden. Während des Simulationslaufs sollen die zu erfassenden Daten protokolliert und für eine spätere Auswertung archiviert werden.

In einigen Fällen muß die Experimentsteuerung benutzerinteraktiv sein. Beispielsweise ist es zu ermöglichen, einen Simulationslauf oder das ganze Experiment vorzeitig abzubrechen, wenn der Wert einer bestimmten Variablen hinreichend konvergiert oder wenn festgestellt wird, daß eine Planungsvariante offensichtlich nicht zielführend ist.

5.2.4 Anforderungen an die Fehlerkompensation und die statistische Auswertung

Die Kompensation des systematischen Fehlers sowie die Bewertung der stochastischen Unsicherheit sollten weitgehend automatisch ablaufen. Nur im Ausnahmefall darf der Bediener mit der interaktiven Eingabe zusätzlicher Informationen oder mit Entscheidungen über die Auswertemethode belastet werden. Auch die Überprüfung der Wirksamkeit bzw. der Güte des Korrekturglieds sollte möglichst automatisch erfolgen. Von den Anwendern wird akzeptiert, daß für die Erstellung der Korrekturmodelle und der statistischen Modelle Kenntnisse in Statistik erforderlich sind. Die Auswahl der Korrekturmodelle und die Prognosekorrektur sowie die Ergebnisinterpretation müssen jedoch ohne besondere Statistikkennntnisse möglich sein.

Trotz des automatischen Ablaufs der Kompensation ist für den Bediener ein transparenter Ablauf anzustreben. Bei Bedarf muß er nachvollziehen können, wie ein für ihn unerwar-

tetes Ergebnis zustande kommt. Zu diesem Zweck sind dem Bediener auch die originalen Simulationsergebnisse sowie bei Bedarf Informationen über das Korrekturmodell, wie beispielsweise eine Modellcharakterisierung, zur Verfügung zu stellen. Diese sollte Informationen über die Randbedingungen zum Zeitpunkt der Modellerstellung, wie beispielsweise den Auslastungsgrad des Produktionssystems, den Betriebsmodus (z.B. Schichtbetrieb) oder auch die Variante des Simulationsmodells beinhalten. Weiterhin sollte sie eine Bewertung enthalten, inwiefern das Korrekturmodell bei seiner bisherigen Anwendung zu einer Verbesserung der Prognosestreue beigetragen hat.

Um die Gefahr zu reduzieren, daß die Simulationsergebnisse durch eine geringe Güte des Korrekturglieds verschlechtert statt verbessert werden, ist vom Korrekturglied eine automatische Gütekontrolle durchzuführen. In deren Rahmen ist zu prüfen, ob die Anwendung eines Korrekturmodells auf die aktuellen Daten valide ist. Im Falle eines nicht validen Modells ist der Bediener vor entsprechend unsicheren Ergebnissen zu warnen.

Die betriebsbegleitende Simulation muß relativ kurzfristig Entscheidungshilfen für die Fertigungssteuerung liefern. Für diese Aufgabe sind in der Regel mehrere Simulationsläufe durchzuführen und auszuwerten. Aus diesem Grund dürfen die Auswertungsverfahren und die Prognosekorrektur die Auswertungszeiten für einen Simulationslauf nicht merklich verlängern.

5.2.5 Anforderungen an die Ergebnisvisualisierung

Die Ergebnisse müssen so aufbereitet und verdichtet werden, daß Steuerungsmaßnahmen ohne aufwendige Interpretation eingeleitet werden können. Die wesentlichen Ergebnisse sind leicht ablesbar darzustellen und sollten auch ohne Statistikkennnisse einfach interpretierbar sein. Zudem sollte beachtet werden, daß die Ergebnisse in einer Form präsentiert werden, die dem jeweiligen Systembediener im Rahmen seiner Aufgabe geläufig ist.

Beispielsweise sind für Terminprognosen Gantt-Charts eine weit verbreitete Visualisierungstechnik. Sie bieten allerdings bislang keine ausreichende Visualisierung statistischer Kennzahlen. Um die Sicherheit einer Prognose besser zu beurteilen, erwartet das Leitstandpersonal der Industriepartner in erster Linie Aussagen der folgenden Art: „Der Auftrag wird mit 95%-iger Sicherheit am 12. Juli gegen Ende der zweiten Schicht fertig bei einer Toleranz von -1 bis +2 Schichten“. Eine Erweiterung um die Visualisierung dieser Informationen ist für die betriebsbegleitende Simulation erforderlich.

5.3 Zusammenfassung

Es wurde das Konzept eines Prognosesystems entwickelt, bestehend aus den Funktionsmodulen Experimentplanung, Modellgenerierung und -konfiguration, Experimentsteuerung, Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung. Für diese Funktionsmodule wurde ein Pflichtenheft abgeleitet, das zusammenfassend in Tabelle 5-1 dargestellt ist.

Anforderungen an die Experimentplanung	<input type="checkbox"/> Anpassung des Experiments an die Planungsaufgabenstellung <input type="checkbox"/> Unterstützung des Auswahl von Modelltyp, Experimentparameter, Auswertungsverfahren und Visualisierung <input type="checkbox"/> Anwendung ohne Expertenkenntnisse
Anforderungen an das Modell und die Modellierung	<input type="checkbox"/> Exakte Wiedergabe der deterministischen und stochastischen Charakteristika des abgebildeten Systems durch das Modell <input type="checkbox"/> Kurze Antwortzeiten des Modells <input type="checkbox"/> Einfache und aufwandsarme Erstellung von Modellen
Anforderungen an die Experimentsteuerung	<input type="checkbox"/> Automatischer Ablauf des Experiments <input type="checkbox"/> Manuelle Eingriffsmöglichkeit in den Experimentablauf
Anforderungen an die Fehlerkompensation und die statistische Auswertung	<input type="checkbox"/> Weitgehend automatischer Ablauf der Fehlerkompensation <input type="checkbox"/> Automatische Überwachung des Korrekturerfolgs und Warnfunktion <input type="checkbox"/> Berücksichtigung statistischer Besonderheiten <input type="checkbox"/> Kurze Laufzeiten der Fehlerkompensation und der Auswertung <input type="checkbox"/> Nachvollziehbarkeit des Prozesses der Fehlerkompensation <input type="checkbox"/> Anwendung ohne Expertenkenntnisse
Anforderungen an die Ergebnisvisualisierung	<input type="checkbox"/> Unterstützung einer einfachen Interpretation der Ergebnisse <input type="checkbox"/> Anwendung ohne Expertenkenntnisse

Tabelle 5-1: Pflichtenheft des Prognosesystems

Die genannten Funktionen wurden Systemmodulen zugeordnet. Es wurden ein Modul zur Experimentplanung und –steuerung, ein Modellgenerator und ein Modul zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung definiert. In den folgenden Kapiteln werden diese Module des Prognosesystems detaillierter erläutert.

6 Experimentplanung und -steuerung

Ein wesentlicher Aspekt bei der Simulation ist die Definition eines geeigneten Simulationsexperiments. In besonderem Maße gilt dies für die betriebsbegleitende Simulation, weil hier die Anforderungen an die Absolutgenauigkeit der Ergebnisse in der Regel höher sind als bei der planungsunterstützenden Simulation. Hinzu kommt, daß die Randbedingungen des Experiments oft ungünstiger sind, weil beispielsweise kein Simulationsexperte für die Durchführung des Experiments zur Verfügung steht.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Aufgabenstellung der Experimentplanung bei der betriebsbegleitenden Simulation analysiert. Im Anschluß erfolgt eine Diskussion eines Lösungskonzepts und der einzelnen Lösungsansätze für ein Modul zur Experimentplanung und -steuerung (Bild 6-1). Abschließend wird das Zusammenspiel der Lösungsansätze und die Funktionsweise der Experimentplanung durch eine detaillierte Beschreibung des Ablaufes verdeutlicht.

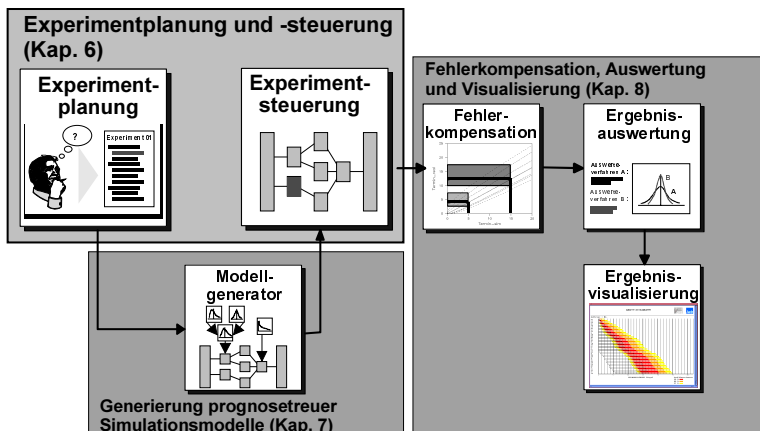


Bild 6-1: Funktionsmodul zur Experimentplanung und -steuerung

6.1 Analyse der Aufgabenstellung bei der Definition betriebsbegleitender Simulationsexperimente

Zunächst wird die Ausgangssituation bei der Konfiguration von Einzelexperimenten dargestellt. In der Folge werden die unterschiedlichen Fragestellungen sowie der Informationsbedarf bei verschiedenen Simulationsanwendungen analysiert. Weiterhin erfolgt eine systematische Darstellung der Aspekte der Experimentkonfiguration mit dem Ziel die Aufgabenstellung zu definieren.

6.1.1 Klassifizierung der Fragestellungen

Einen wesentlichen Einfluß auf die Experimentkonfiguration besitzt die Fragestellung, die mittels Simulation bearbeitet werden soll. Aus der Fragestellung lassen sich Ziele, Anforderungen und Randbedingungen des Simulationsexperiments ableiten.

Zunächst werden die Fragestellungen der Produktionsoptimierung weiter detailliert und der Zusammenhang mit der Definition betriebsbegleitender Simulationsexperimente verdeutlicht. Im Anschluß werden verschiedene Arten von Experimenten systematisiert und klassifiziert.

Basis für die Klassifizierung der Experimente sind Auswertungen einschlägiger wissenschaftlicher Veröffentlichungen (z.B. ÖZDEMIREL ET AL. 1993, S. 583) und Analysen der Charakteristika zahlreicher am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) durchgeführter Projekte im Bereich der betriebsbegleitenden Simulation. Um auf den Erkenntnissen der bereits in der Literatur dokumentierten Klassifizierungssysteme aufzubauen, wurden diese zunächst an den speziellen Anwendungsfall der betriebsbegleitenden Simulation angepaßt. Die im Rahmen der Projekte durchgeführten Simulationsexperimente wurden abstrahiert betrachtet und hinsichtlich der Kriterien „vorrangiges Ziel des Experiments und der Planung“, „geforderte Genauigkeit und Aussage-schärfe“, „Prognosehorizont“ und „Zeitrestriktion“ bewertet. Im Anschluß wurden Klassen typischer Simulationsexperimente gebildet. Ergebnis der Untersuchungen ist, daß sich die untersuchten betriebsbegleitenden Simulationsexperimente einem der drei in Tabelle 6-1 beschriebenen Experimentszenarien zuordnen lassen.

Szenario I entspricht einer sehr kurzfristigen Aufgabenstellung aus dem Bereich der operativen Produktionsoptimierung, beispielsweise im Rahmen des Störungsmanagements. Hier gilt es, sehr kurzfristige und exakte Prognosen über Produktionstermine zu gewinnen. Die Prognosen müssen sehr detailliert sein. Es werden Optimierungsmaßnahmen aus dem Bereich der kurzfristigen Steuerungseingriffe, d.h. ohne Variation der Produktionsstrukturen, getestet. Der Zeitdruck zum Erstellen der Prognose ist sehr hoch. Meist stehen nur wenige Minuten zur Verfügung.

Szenario II entspricht dem Einsatz des Prognosesystems im Bereich der mittelfristigen operativen Optimierung, d.h. im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung. Für diese Aufgabe müssen sehr exakte, detaillierte und quantifizierte Prognosen der Termine, Durchlaufzeiten und Umlaufbestände unter hohem Zeitdruck erstellt werden. Auch hier werden die Strukturen bei der Optimierung nicht variiert.

Szenario III beschreibt den Einsatz des Prognosesystems im Rahmen der taktischen Produktionsoptimierung. Für diese Optimierungsaufgabe werden auch die Strukturen des Produktionssystems variiert. Es müssen exakte und detaillierte mittel- bis langfristige Prognosen des Durchsatzes und der Auslastung des Produktionssystems, der Bestände und der Durchlaufzeiten erstellt werden. Diese können allerdings zu einem Teil qualitativ sein. Der Zeitdruck ist nicht besonders groß. Ein Experiment sollte allerdings im Bereich von einigen Stunden abgeschlossen sein.

Nr.	Planungs-/Experiment-szenario	Vorrangiges Ziel des Experiments und der Planung	Geforderte Genauigkeit und Aussageschärfe	Prognosehorizont	Zeitrestriktion
I	Operative Optimierung (1): Bewertung von Maßnahmen zur Reaktion auf Störungen oder Qualitätsmängel	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung von Terminprognosen Optimierung ohne Variation der Produktionsstrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Exakt Sehr detailliert (Minuten, Stunden) Quantitativ und qualitativ 	Kurzfristig (1-3 Wochen)	Sehr hoch (wenige Minuten / Experiment)
II	Operative Optimierung (2): Optimierungsaufgaben parallel zum normalen Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung von Terminprognosen, Durchlaufzeit- oder Bestandsanalysen Optimierung ohne Variation der Produktionsstrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Sehr exakt Detailliert (Tage) Quantitativ 	Mittelfristig (2-12 Wochen)	Hoch (ca. 1 h / Experiment)
III	Taktische Optimierung: Mittelfristige Struktur- oder Strategieoptimierung	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung von Durchsatz-, Auslastungs-, Durchlaufzeit- oder Bestandsanalysen Optimierung mit Variation der Produktionsstrukturen 	<ul style="list-style-type: none"> Exakt Detailliert (Tage) Qualitativ 	Mittel- bis langfristig (> 2 Monate)	Mittel (wenige Stunden / Experiment)

Tabelle 6-1: Überblick der Experimentszenarien

6.1.2 Strategische und taktische Aspekte der Experimentplanung

Im Rahmen der Experimentplanung werden verschiedene Entscheidungen hinsichtlich Modell, Experimentdurchführung und Ergebnisauswertung getroffen. Die zu treffenden Entscheidungen lassen sich in strategische und taktische Aspekte gliedern.

Strategische Aspekte werden im Rahmen der inhaltlichen Definition des Experiments festgelegt. Sie werden durch die Art der Fragestellung, die der Benutzer im Simulationsexperiment bearbeiten möchte, bestimmt. In erster Linie handelt es sich bei den strategischen Aspekten um die zu variierenden Eingangsparameter des Modells und um die zu simulierenden Parameterwerte und -kombinationen. Beispiele für diese Eingangsparameter sind die Anzahl von Ressourcen oder Schichten oder die Wahl der Reihenfolgestrategie.

Die zu variierenden Eingangsparameter hängen sehr stark vom Anwendungsfall der Simulation ab. Die Menge der variablen Eingangsparameter besitzt einen großen Einfluss auf die Gestaltung des Simulationsmodells und den Umfang des Experiments. Aus dem Anwendungsfall lassen sich Anforderungen an das Modell ableiten, die in erster Linie langfristiger und grundlegender Natur sind, wie beispielsweise über den Abstraktionsgrad und die Grenzen des Modells oder die Art der durchzuführenden Auswertungen. Die Werte der Eingangsparameter werden spezifisch vor jedem Simulationslauf festgelegt. Zur Festlegung der Parameterwerte für die einzelnen Simulationsläufe werden klassische Methoden der Experimentplanung (Design of Experiments - DOE) herangezogen.

Taktische Aspekte betreffen in erster Linie die Frage, durch welche Experimentparameter gewährleistet wird, daß die Simulationsergebnisse stochastisch abgesichert sind. Hierzu zählen vor allem die Anzahl und die Länge der einzelnen Simulationsläufe sowie die Entscheidung, ob stochastisch simuliert wird oder nicht. Auch die Entscheidung über den

Einsatz bestimmter Variance-Reduction-Techniques (VRTs) gehört zu den taktischen Aspekten (vgl. Abschnitte 6.2.3 und 7.4).

Taktische Aspekte betreffen eher ein spezifisches Simulationsexperiment. Sie müssen deswegen kurzfristig festgelegt und verändert werden können. Taktische Aspekte sind für den Systemanwender uninteressant, weil sie nichts mit dem Experimentinhalt zu tun haben. Die Festlegung dieser Experimentparameter erfordert allerdings in der Regel Spezialkenntnisse in Statistik. Aus diesem Grund sollte der Systembediener insbesondere bei der Festlegung der taktischen Aspekte von einem Experimentplanungssystem unterstützt werden.

Durch das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Experimentplanungssystem wird vorrangig die Planung der taktischen Aspekte der Experimentplanung unterstützt.

6.2 Lösungskonzept zur Konfiguration und Steuerung stochastischer Einzelexperimente

Im Rahmen der Konfiguration eines stochastischen Einzelexperiments müssen abhängig vom gewählten Experimentszenario ein geeigneter Modellierungstyp und spezifische Simulationsbausteine ausgewählt sowie Experimentparameter festgelegt werden. Weiterhin muß eine Auswahl geeigneter Auswerte- und Visualisierungsmethoden getroffen werden. Liegt ein geeignetes Simulationsmodell vor, muß dieses im Rahmen der Durchführung des Experiments entsprechend der Experimentparameter initialisiert und der Simulationslauf gesteuert werden.

Zwischen der Konfiguration von Experiment und Modell existieren starke Wechselwirkungen. Beispielsweise erfordert ein Experiment, welches zum Ziel hat, sehr schnell eine optimale Maßnahme zur Beseitigung einer Störung zu ermitteln, ein sehr schnelles, eher abstraktes Modell ohne Stochastik. Im Gegensatz dazu wird für ein Experiment im Rahmen der mittelfristigen Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung oder der taktischen Produktionsoptimierung ein detaillierteres Modell benötigt, das zuverlässige Aussagen und eine stochastische Bewertung liefert. Durch die Art des Experiments werden der Abstraktionsgrad des Modells, die Modellgrenzen, die Art und Detaillierung der durch das Simulationsmodell bereitzustellenden Daten und die Abbildung der Stochastik bestimmt.

Aufgrund dieser Abhängigkeiten besteht die Gefahr, daß für jedes neue Experiment das Modell neu angepaßt werden muß. Dieser Anpassungsvorgang würde in der Regel einen Simulationsspezialisten erfordern. Um dies zu vermeiden, fordert ZEIGLER (1990) die Beschreibung von Modell und Experiment strikt zu trennen. Ziel muß es sein, Modelle für eine größere Bandbreite von Experimenten zu entwickeln.

Allerdings hat sich gezeigt, daß sich erste Konzepte universeller Experimentierumgebungen in der Praxis durch mangelnden Bedienkomfort und hohe Komplexität noch auf große Realisierungs- und Akzeptanzhürden stoßen (ÖZDEMIREL 1991 (S. 419), ÖZDEMIREL ET AL. 1993 (S. 583)). Aus pragmatischen Gründen wurden deshalb Experimentier- und Simulationsumgebungen mit einem eingegrenzten Anwendungsgebiet entwickelt (z.B. ÖZDEMIREL ET AL. 1996, S. 171). Angesichts der hohen Anforderungen der betriebsbe-

gleitenden Simulation hinsichtlich Modelleffizienz und Prognosegüte sowie der stark eingeschränkten Vielfalt der Experimente erweist sich dieser Ansatz als besonders vielversprechend.

Wechselwirkungen existieren auch zwischen Experiment, Auswertungsverfahren und Visualisierungstechnik. Bild 6-2 zeigt das Lösungskonzept zur Experimentplanung, bestehend aus Experimentrahmen, Modellkonfigurator, Experimentsteuerung und Auswertungs-/ Visualisierungsbaukasten. Im folgenden werden der Experimentrahmen und die Experimentsteuerung detailliert beschrieben. Die beiden anderen Bestandteile des Konzepts, werden im vorliegenden Kapitel nur kurz dargestellt, um das Zusammenspiel der Ansätze zu verdeutlichen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Ansätze befindet sich in den Kapiteln 7 und 8.

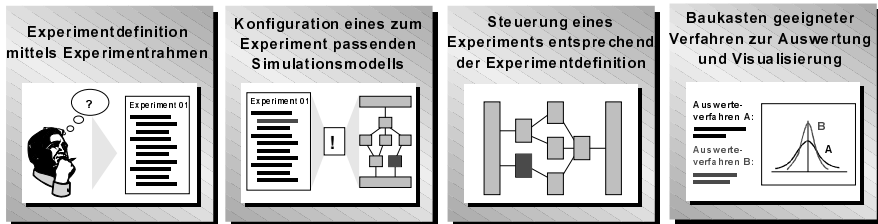


Bild 6-2: Elemente des Lösungskonzepts für die Experimentplanung und -steuerung

6.2.1 Experimentplanung mittels Experimentrahmen

Allgemein bezeichnet der Begriff „Experimentrahmen“ die Bedingungen, unter denen ein System oder ein Modell beobachtet oder experimentiert wird. Konkret wird darunter im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Menge und die Struktur der interaktiv vom Benutzer einzugebenden Daten verstanden, mit denen das Verhalten des korrespondierenden Simulationsmodells sowie die Parameter des Simulationsexperiments definiert werden. Mit Hilfe des Experimentrahmens wird die Experimentplanung vorgenommen. Ergebnis der Experimentplanung ist die Experimentkonfiguration. Der hier zu entwickelnde Experimentrahmen muß den Anwender in der Lage versetzen, folgende Aspekte des Experiments zu definieren:

Untersuchungsobjekt

Das Untersuchungsobjekt stellt das Simulationsmodell des Produktionssystems mit seinen für das Experiment gültigen Systemgrenzen dar. Hinzu kommt eine Beschreibung der Randbedingungen des Systems sowie dessen Verhalten an den Schnittstellen. Im Rahmen der Definition des Untersuchungsobjekts werden auch die beim Experiment variierbaren Modellparameter (strategische Aspekte der Experimentplanung) festgelegt. Weiterhin wird der Initialzustand des Simulationsmodells vom Benutzer definiert.

Experimentziel

Das Experimentziel wird vom Systemanwender durch die Fragestellung definiert, die untersucht werden soll. Daraus werden die zu messenden Größen abgeleitet. Sofern sich daraus nicht unmittelbar ein bestimmtes Auswerte- und Visualisierungsverfahren ergibt, werden diese hier ausgewählt.

Experimentrestriktionen

Zum Abschluß werden die Experimentrestriktionen definiert. Entscheidende Parameter sind der Untersuchungszeitraum, die Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse und Restriktionen hinsichtlich der Laufzeit. Zwischen diesen Parametern bestehen enge Wechselwirkungen. Nicht alle Kombinationen von Parameterausprägungen sind möglich. Geeignete Kombinationen werden bereits aus dem Experimentziel abgeleitet. In diesem Schritt erfolgt eine Feineinstellung dieser Parameter.

Im Experimentrahmen sind die Freiheitsgrade für die Experimentplanung definiert. Bestimmte Kombinationen von Experimentparametern ergeben in der praktischen Anwendung keinen Sinn. Beispielsweise ist bei kurzen Prognosehorizonten in der Regel eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse sowie eine kurze Antwortzeit des Simulators gefordert. Andere Kombinationen können ausgeschlossen werden. Die sinnvollen Kombinationen sind durch Regeln im Experimentrahmen definiert. Auch ist es möglich, bestimmte typische Experimentkonfigurationen vorab zu definieren. Vordefinierte, typische Experimentkonfigurationen werden in der Literatur als „Design-sheets“ bezeichnet.

Nachdem alle Parameter festgelegt sind, erfolgt automatisch, ohne Benutzerinteraktion, eine Auswahl des Modellierungstyps sowie der geeigneten Bausteine. Daraus wird das Simulationsmodell generiert. In einem nächsten Schritt werden das Modell initialisiert und die Simulationsläufe parametrisiert. Nach der Durchführung der Experimente (Laufparametrisierung, Lauf) werden die Ergebnisse mit geeigneten Verfahren ausgewertet und visualisiert. In den folgenden Abschnitten werden die grundlegenden Ideen und Ansätze hierzu skizziert. Detaillierte Beschreibungen befinden sich in den Kapiteln 7 und 8.

6.2.2 Konfiguration eines zum Experiment passenden Simulationsmodells

Zur Durchführung eines Simulationsexperiments muß ein Simulationsmodell vorliegen, welches für das Experiment geeignet ist. Aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Experimentkonfiguration und Modell wurde der Ansatz gewählt, für jedes Experiment ein geeignetes Simulationsmodell neu aufzubauen. Für diesen Zweck wird ein Modellbausteinkasten aus individuell konfigurierbaren Bausteinen angelegt. Die Generierung von Simulationsmodellen erfolgt innerhalb bestimmter Grenzen automatisch. Der konzeptionelle Aufbau der Modellbausteine und die Funktion des Modellgenerators werden in Kapitel 7 detailliert erläutert.

Im Hinblick auf eine effiziente und transparente Experimentplanung besitzt jeder Baustein eine Bewertung seines Abstraktions- und Verdichtungsniveaus, der spezifischen statistischen Besonderheiten bei der Modellierung, wie beispielsweise den Modellie-

rungstyp, die Verwendung von VRTs sowie Listen der in einem Experiment variierbaren Parameter und der meßbaren Größen. Mit dieser Klassifizierung ist es möglich, geeignete Modellbausteine für ein Experiment aus einem Modellbausteinkasten auszuwählen.

Bei diesem Lösungsansatz ist zu beachten, daß bislang die meisten Versuche, einen allgemeingültigen Simulationsbausteinkasten aus generischen Modellbausteinen aufzubauen, an praktischen Hürden gescheitert sind (ÖZDEMIREL 1991, S. 419). In der Regel sind diese Bausteinkästen zu komplex, so daß die Anwendung Expertenkenntnisse erfordert. Trotz der großen Anzahl von Bausteinen tritt häufig das Problem auf, daß bei neuen Anwendungen kein geeigneter Baustein verfügbar ist und neue Bausteine entwickelt werden müssen. Um diesen Ansatz praxistauglich zu machen, wurde er folgendermaßen modifiziert: Der Bausteinkasten wird speziell für einen Anwendungsfall mit fest definierten Variationsmöglichkeiten angelegt. Dies bedeutet, daß nur die Bausteine entwickelt werden, die für ein spezifisches Produktionssystem und im Rahmen der Variationsmöglichkeiten des Experimentrahmens erforderlich sind. Durch diese Einschränkung der Fragestellungen wird die Anzahl unterschiedlicher Bausteine stark reduziert. Der Bausteinkasten ist somit auch in der praktischen Anwendung wart- und handhabbar.

Für typische Experimentkonfigurationen, die in Design-sheets vordefiniert sind, werden Bausteine im Simulationsbausteinkasten bereitgehalten. Das Abstraktionsniveau und der Modellierungstyp (vgl. Abschnitt 7.3) der Bausteine sowie die Modellierungstechniken für die Stochastik werden so gewählt, daß die Bausteine die spezifischen Anforderungen des Experiments erfüllen. Welche Bausteine für eine bestimmte Experimentkonfiguration geeignet sind, wird in der Bausteinklassifikation festgelegt. Anhand dieser Klassifikation erfolgt im Rahmen der automatischen Modellgenerierung die Bausteinauswahl (vgl. Abschnitt 7.5).

6.2.3 Experimentsteuerung

Aufgaben und Ablauf der Experimentsteuerung

Die Experimentsteuerung hat die Aufgabe, ein vollständiges Einzelexperiment entsprechend der vorliegenden Konfiguration durchzuführen. Wichtigste Aufgaben der Experimentsteuerung sind:

1. Modellinitialisierung

- Parametrisierung der deterministischen und stochastischen Modellelemente (entsprechend der in der Experimentkonfiguration definierten Parametervariation)
- Initialisierung der Systemlast entsprechend der aktuellen Produktionssituation
- Archivierung der Initialisierungsdaten (zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Experimente)

2. Laufinitialisierung:

- Neuinitialisierung des Modells
- Initialisierung der Zufallszahlengeneratoren für jeden Lauf
- Einstellen der Laufdauer
- Gegebenenfalls Parallelisierung von Läufen

3. Laufdurchführung:

- Start der Läufe
- Erfassung der auszuwertenden Rohdaten
- Überwachung der Läufe hinsichtlich Abbruchkriterium (Zeit, Konvergenz)

4. Ergebnisarchivierung:

- Vorbereitung der Daten für Archivierung (Vorauswertung)
- Archivierung der Datensätze

Die genannten Funktionen werden als Programmodule in die Simulationsumgebung implementiert.

Varianzreduktion bei der Experimentsteuerung

Auch im Rahmen der Experimentsteuerung kommen VRTs zum Einsatz. Beispielsweise wird die Technik der „Common Random Numbers“ dazu verwendet, um beim Vergleich verschiedener Modellalternativen mittels stochastischer Experimente weniger Läufe durchführen zu müssen (KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992, S. 197). Bei dieser VRT werden die Varianten eines Simulationsmodells mit den identischen Zufallszahlenströmen simuliert. Dies ist speziell für taktische Optimierungsaufgaben interessant, bei denen Simulationsläufe über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden und keine Absolutgenauigkeit, sondern nur eine qualitative Aussage über Planungsalternativen gefordert wird.

Eine VRT, die speziell bei der Experimentplanung eine Rolle spielt, heißt „Antithetic Variables“. Die Technik dient dazu, die Zahl der Simulationsläufe zu reduzieren, indem zu jedem stochastischen Simulationslauf ein Gegenstück mit entgegengesetzten Zufallsereignissen erzeugt wird (KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992, S. 198). Ziel ist es, daß auf diese Weise Ausreißer durch Ausreißer in entgegengesetzter Richtung kompensiert werden. So wird eine schnellere Konvergenz und eine Verbesserung der Absolutgenauigkeit der statistischen Schätzer erreicht.

Über den Einsatz dieser Techniken wird bereits im Rahmen der Experimentplanung entschieden. In die Experimentsteuerung sind Funktionen implementiert, die die VRTs bei der Parametrisierung und Initialisierung des Simulationsmodells anwenden.

Benutzerinteraktion

Der Systembediener erhält die Möglichkeit, einen Simulationslauf oder ein Experiment vorzeitig interaktiv abzubrechen. Um dem Systembediener die Entscheidung über einen vorzeitigen Abbruch zu erleichtern, werden zur Laufzeit dynamische Grafiken präsentiert, die diesem die Beurteilung des Abbruchkriteriums ermöglichen. Beispielsweise wird der Verlauf des gleitenden Mittelwerts einer im Rahmen des Experiments zu ermittelnden Variablen angezeigt. Ist eine asymptotische Annäherung an einen Zielwert erkennbar, kann der Bediener den Lauf abbrechen.

6.2.4 Baukasten geeigneter Auswerte- und Visualisierungsverfahren

Auch die Auswerte- und Visualisierungsverfahren müssen zum Experiment passen. Im Experimentrahmen werden die jeweils für ein Experiment relevanten Verfahren bereitgestellt und können interaktiv ausgewählt werden. Folgende Arten von Verfahren sind in einem Baukasten vorhanden.

Verfahren zur Auswertung der Experimentergebnisse

Die Auswahl eines geeigneten Auswerteverfahrens wird im wesentlichen durch die zu untersuchende Fragestellung bestimmt. Von dieser hängt ab, welche Daten analysiert werden sollen und wie stark die Daten bei der Auswertung verdichtet werden sollen. Außerdem wird durch die Fragestellung definiert, wie genau die Ergebnisse sein sollen.

Verfahren zur Beurteilung der Experimentgüte

Aus der Fragestellung kann auch abgeleitet werden, ob eine Schätzung der potentiellen Abweichungen, also eine Angabe der Konfidenz, erforderlich ist. Diese Konfidenz hängt zum einen vom Experiment, beispielsweise von der Zahl der Läufe, und zum anderen von der Stochastik des Produktionssystems ab.

Verfahren zur Visualisierung der Experimentergebnisse

Zusätzlich kann aus der Art der Fragestellung ein geeignetes Visualisierungsverfahren abgeleitet werden. Neben Visualisierungstechniken zur Darstellung der Experimentergebnisse wurden auch Darstellungen entwickelt, anhand derer die Güte des Ergebnisses beurteilt werden kann. Beispielsweise kann im Anschluß an eine Prognose das Prognoseergebnis mit dem tatsächlich eingetretenen Ergebnis durch Überlagerung der Darstellungen verglichen werden. Kennlinien, wie beispielsweise die Konfidenzlinien, geben darüber Aufschluß, ob die realen Ergebnisse im Konfidenzbereich der Prognose liegen.

Eine detaillierte Darstellung des Moduls zur Kompensation von Prognosefehlern und statistischen Auswertung wird in Kapitel 8 gegeben.

6.3 Darstellung des Experimentablaufs

Im folgenden ist der Experimentablauf dargestellt, um das Zusammenspiel der Lösungsansätze und die Funktion des Konzeptes zu verdeutlichen.

Der Ablauf der Experimentplanung ist hierarchisch aufgebaut. Schritt für Schritt werden die einzelnen Festlegungen hinsichtlich des Experiments getroffen. Dabei schränken einzelne Entscheidungen die Auswahlmöglichkeiten in den folgenden Stufen des Prozesses ein. Im folgenden werden der Ablauf der Experimentplanung grob umrissen und die Abhängigkeiten der Entscheidungen erläutert.

Die Experimentplanung beginnt mit der **Definition des Untersuchungsgegenstands**. Hier wird festgelegt, welches Produktionssystem untersucht werden soll, und wie die Systemgrenzen liegen, bzw. auf welchem Bereich der Fokus der Betrachtung liegen soll.

Durch die Entscheidung für einen bestimmten Untersuchungsgegenstand werden die Wahlmöglichkeiten für Experimentziele durch den Experimentrahmen eingeschränkt. Dadurch wird die Transparenz des Verfahrens erhöht und die Möglichkeit einer Fehlbedienung reduziert. Beispielsweise würden betriebsbegleitende Untersuchungen des Umlaufbestands in einer starr verketteten, ungepufferten Fertigungslinie keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wird dieses Experiment nicht angeboten. Weiterhin erfordert beispielsweise eine exakte Terminprognose von Fertigungsaufträgen ein entsprechend konkretes Simulationsmodell. Liegt ein solches Modell nicht vor, kann dieses Experiment nicht durchgeführt werden. Nicht sinnvolle oder nicht realisierbare Experimentziele werden vorab im Experimentrahmen definiert. Sie werden vom System nicht in der Auswahlliste angeboten.

Anhand der verbleibenden Auswahlliste wird die **Experimentzielsetzung** definiert. Dies geschieht in zwei Stufen, der Definition der **Hauptziele** und der Definition der **Unterziele**. Bei den Hauptzielen wird unterschieden hinsichtlich Prognose von Kennzahlen, Bewertung von Maßnahmen zur Produktionssteuerung, Optimierung im laufenden Betrieb und Optimierung von Produktionsstrukturen. Zu jedem Hauptziel existieren jeweils verschiedene mögliche Unterziele. Eine solche Zielhierarchie muß speziell für einen Anwendungsfall mit seinen zu untersuchenden Fragestellungen zugeschnitten werden. Bild 6-3 zeigt den Ausschnitt einer Zielhierarchie.

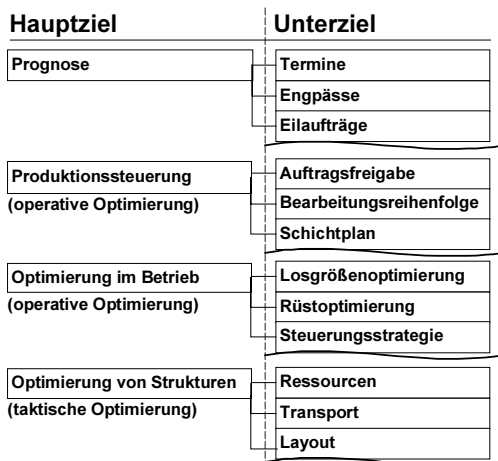


Bild 6-3: Ausschnitt der Zielhierarchie

Im nächsten Schritt wird der **Betrachtungszeitraum** des Experiments eingegrenzt. Anhand des definierten Experimentziels läßt sich bereits der Bereich der sinnvollen Zeiträume eingrenzen. Eine exakte Festlegung kann an dieser Stelle erfolgen.

Auch die Art der **Auswertungen** wird bereits durch das Experimentziel vorbestimmt. Hier kann aus der Menge der sinnvollen Auswertungen ausgewählt werden.

Den Abschluß der Experimentplanung bildet die Festlegung der **Zeit- und Genauigkeits-Restriktionen**. Auch hier leiten sich sinnvolle Kombinationen aus dem Experimentziel ab. Der Nutzer hat jedoch die Möglichkeit, an dieser Stelle eine manuelle Einstellung vorzunehmen.

Der **Aufbau des Modells** erfolgt im Anschluß an die Experimentplanung. Aus der Experimentkonfiguration werden die Anforderungen an das Modell abgeleitet, wie beispielsweise die Modellgrenzen, der Modellierungstyp, das Abstraktionsniveau, die Modellparameter und die auszuwertenden Variablen (vgl. Kapitel 7). Anhand dieser Kriterien erfolgt eine Selektion der für die Modellierung geeigneten Bausteine.

Die oben genannten Methoden zur **Experimentsteuerung** greifen direkt auf Modellparameter und Variablen zu, tauschen Daten über eine Datei- oder Datenbankschnittstelle aus oder steuern den Ereignisverwalter.

Nach Durchführung der Simulationsläufe erfolgt zunächst die **Kompensation systematischer Prognosefehler und Abschätzung der stochastischen Unsicherheiten**. Entsprechend der Experimentkonfiguration werden die definierten **Auswertungen der Simulationsergebnisse** durchgeführt. Hierfür werden die geeigneten Verfahren als Bausteine zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse müssen abschließend in einer dem Simulationsziel entsprechenden Form **visualisiert** werden. Dabei muß die Qualifikation des Systembedieners Beachtung finden. Ein Bausteinkasten stellt diese Darstellungstechniken bereit.

6.4 Zusammenfassung

Die Experimentplanung besitzt einen großen Einfluß auf die Güte der Ergebnisse betriebsbegleitender Simulationsexperimente. Zunächst wurde die Aufgabenstellung der Experimentplanung bei der betriebsbegleitenden Simulation untersucht und die strategischen und taktischen Aspekte der Experimentplanung dargestellt. Die Konkurrenzsituation zwischen Ergebnisgüte und Laufzeit des Experiments, die bei betriebsbegleitenden Experimenten besonders zum tragen kommt, wurde herausgearbeitet. Daraufhin wurden zunächst die Fragestellungen, die mittels betriebsbegleitender Simulation untersucht werden sollen, klassifiziert. Dabei konnte diese Konkurrenzsituation entschärft werden. Für jede Klasse von Fragestellungen konnte eine geeignete Experimentkonfiguration gefunden werden.

Ein Lösungskonzept zur Konfiguration betriebsbegleitender Simulationsexperimente wurden erarbeitet. Ein Experimentrahmen wurde definiert, der die Freiheitsgrade bei der Experimentplanung vorgibt und den Systembediener durch die Experimentplanung führt. Aus der Experimentkonfiguration ergeben sich konkrete Anforderungen an das Modell und die Auswertemethoden. Diese werden erfüllt, indem Modellbausteine in Bausteinkästen bereitgehalten und speziell für ein konfiguriertes Experiment ausgewählt und zu einem Modell kombiniert werden. Die Simulationsläufe werden entsprechend der Experimentparameter durch eine Experimentsteuerung durchgeführt. Zur Auswertung und Visualisierung werden geeignete Verfahren in einem Methodenbausteinkasten bereitgestellt.

7 Generierung prognostreuer Simulationsmodelle

Bei vielen Fragestellungen der Produktionsoptimierung wird vom Prognosesystem eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse gefordert, beispielsweise wenn es darum geht, ein Produktionssystem optimal zu steuern. Bei dem zugrundeliegenden Simulationsmodell sollte deswegen die Stochastik nicht pauschal, beispielsweise auf Basis einer unternehmensübergreifenden Analyse von Maschinenstörungen, modelliert werden. Die Existenz einer realen Anlage bietet gerade den Vorteil, die Systemstochastik realitätsnah modellieren zu können. Doch erfordert eine realitätsnahe Modellierung stochastischer Effekte in der Regel als ersten Schritt eine relativ aufwendige Systemanalyse und in der Folge eine wiederholte Pflege des Simulationsmodells. Dies bedeutet bislang einen hohen Aufwand und eine potentielle Fehlerquelle.

Neben einer hohen Genauigkeit ist es oft wichtig, daß das Prognosesystem in sehr kurzer Zeit Ergebnisse liefert, beispielsweise wenn es gilt, rasch auf eine Störung zu reagieren. Allerdings hat sich gezeigt, daß die Zufallszahlengeneratoren der Simulation und die Abarbeitung der stochastischen Ereignisse im Ereignisverwalter eine nicht unerhebliche Rechenzeit benötigen. Außerdem ist es bei der stochastischen Simulation notwendig, daß zur statistischen Absicherung der Ergebnisse entweder ein ausreichend langer Simulationslauf oder mehrere Läufe durchgeführt werden. Hinzu kommt, daß bei einer größeren Menge der modellierten stochastischen Effekte der erforderliche Aufwand für Simulation und Auswertung zum Erhalt von statistisch abgesicherten Erkenntnissen höher ist. Deshalb ist es besonders bei der betriebsbegleitenden Simulation notwendig, besondere Modellierungstechniken zur Abbildung der stochastischen Effekte einzusetzen. Ziel ist es, ein effizientes Modell mit kurzer Antwortzeit zu erhalten.

Beide Anforderungen, Ergebnistreue und Effizienz, lassen sich nicht ohne weiteres mit einem Modell erzielen. Vielmehr ist genau abzuwägen, welche stochastischen Effekte im Modell abgebildet werden, mit welcher Technik eine größtmögliche Effizienz erzielt wird und durch welche Maßnahmen die Gefahr von Modellierungsfehlern reduziert werden kann. Außerdem ist zu überlegen, für welche Fragestellungen ein deterministischer Simulationslauf ausreichend ist.

Im folgenden wird zunächst dargestellt, welche Freiheitsgrade bei der Modellierung genutzt werden können und welche Faktoren einen wesentlichen Einfluß auf die Art und Weise besitzen, wie stochastische Effekte effektiv und effizient im Modell abgebildet werden sollten. Aus einer empirischen Untersuchung verschiedener betriebsbegleitender Simulationsmodelle werden fünf grundlegende Modellierungstypen abgeleitet. Im Anschluß werden spezielle Modellierungstechniken für stochastische Effekte dargestellt. Wesentliches Ergebnis ist ein Kriterienkatalog zur Auswahl eines Modellierungstyps und spezifischer Modellierungstechniken. Abschließend wird das Modul der automatisierten Modellgenerierung auf Basis generischer Modellbausteine vorgestellt (Bild 7-1).

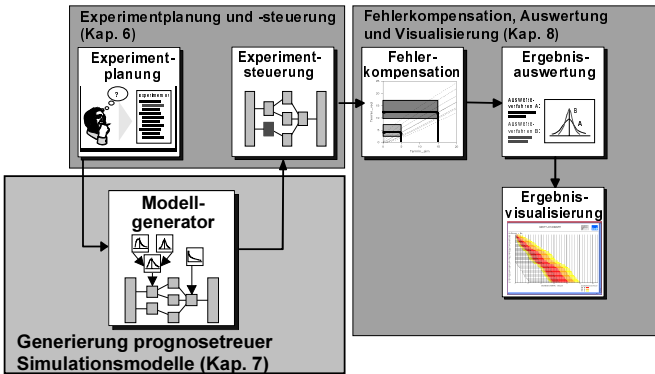


Bild 7-1: Funktionsmodul zur Generierung prognostreuer Simulationsmodelle

7.1 Aspekte bei der Modellierung der Systemstochastik

Im Rahmen der Modellierung der stochastischen Effekte eines Produktionssystems muß eine Reihe von Modellierungsentscheidungen sorgfältig getroffen werden, um ein effektives und effizientes Simulationsmodell zu erhalten (Bild 7-2).

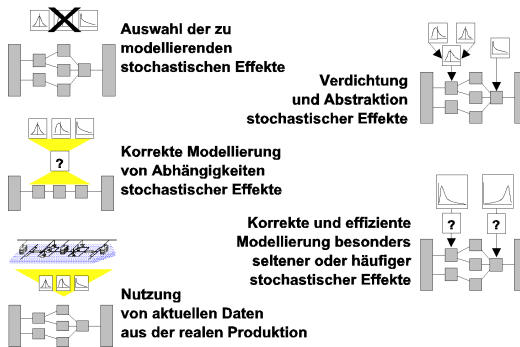


Bild 7-2: Ansätze zur Erstellung prognostreuer und effizienter Simulationsmodelle

Beispielsweise ist zunächst zu entscheiden, ob es sinnvoll ist stochastisch zu simulieren oder ob eine deterministische Simulation hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Eine weitere wesentliche Entscheidung betrifft den Grad der Modellabstraktion. Speziell für die Stochastik bedeutet dies, daß entschieden werden muß, ob verschiedene stochastische Einzeleffekte einzeln modelliert werden oder ob sie sinnvoll gruppiert und in verdichteter Form modelliert werden können. Im Falle einer Verdichtung ist ein methodisches Vorge-

hen wichtig, um zu gewährleisten, daß das Ergebnis der Verdichtung valide ist. Im Rahmen der Abstraktion kann aber auch entschieden werden, daß bestimmte stochastische Effekte nicht modelliert werden, beispielsweise weil vorausszusehen ist, daß sie einen geringen Einfluß auf das Simulationsergebnis besitzen.

Weiterhin ist wichtig, die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen stochastischen Effekten auch im Modell zu berücksichtigen. Verschiedene Variance-Reduction-Techniques (VRT) liefern systematische Ansätze, wie diese Effekte in einem Modell valide abgebildet werden können.

Ein weiterer Modellierungsaspekt, um ein weitgehend valides Modell für die betriebsbegleitende Simulation zu erhalten, ist die Implementierung von Feedback-Kopplungen. Durch Anbindungen an betriebliche Informationsverarbeitungssysteme, wie beispielsweise BDE/MDE-Systeme, Instandhaltungs-, oder CAQ-Systeme, kann auf aktuelle Daten der realen Produktion zugegriffen werden. Mit diesen Informationen ist es möglich, die Modellbausteine aktuell zu parametrisieren. Beispielsweise kann die aktuelle bzw. die zu erwartende Stör-Charakteristik einer Bearbeitungsmaschine in den entsprechenden Modellbaustein übernommen werden.

Weitere Modellierungsentscheidungen müssen abhängig von der Art des durchzuführenden Experiments getroffen werden. Beispielsweise ist festzulegen, welche Daten während der Simulation erfaßt werden sollen. Entsprechende Sensoren, Datenarchivierungs- und -aufbereitungsbausteine sind zu implementieren.

7.2 Einflußfaktoren auf die Modellierung der Systemstochastik

Im folgenden wird systematisch dargestellt, welche Faktoren einen wesentlichen Einfluß auf die Modellierung besitzen. Grundlage hierfür sind Reviews verschiedener Simulationsprojekte, deren Modellierungsentscheidungen bei der Erstellung des Simulationsmodells analysiert wurden. Abschließend wird dargestellt, welche Ausprägungen die Einflußfaktoren besitzen können.

Einige Strukturgrößen der Produktion (vgl. Aachener PPS-Modell, beschrieben in EVERSHEIM & SCHUH 1996, S. 14-61, und HORNUNG & LAAKMANN 1995) sind ausschlaggebend dafür, wie stark sich stochastische Effekte in der Produktion auswirken und welche Kennzahlen durch sie beeinflußt werden. Damit wirken sie sich auch darauf aus, wie die Stochastik am besten modelliert werden sollte. Beispielsweise wirken sich Störungen in einer Inselfertigung in der Regel weniger stark aus als in einer zentralistisch organisierten Werkstattfertigung, weil wesentlich schneller und flexibler reagiert werden kann. Das kann bedeuten, daß auf die Modellierung vieler stochastischer Effekte verzichtet werden kann. Qualitätsmängel an einem Erzeugnis, das nach Kundenspezifikation produziert wird, wirken sich sehr stark auf die Durchlaufzeit bzw. die Termintreue dieses einen Auftrags aus. Ist das Erzeugnis hingegen ein Standarderzeugnis, kann es schnell durch ein gleiches ersetzt werden. Der Qualitätsmangel wirkt sich in diesem Fall vorrangig auf die Auslastung bzw. den Durchsatz der Produktion aus und weniger auf die Termintreue eines einzelnen Kundenauftrags.

Hinsichtlich der Modellierung bei der betriebsbegleitenden Simulation lassen sich allerdings aus den Strukturgrößen der Produktion keine konkreten und detaillierten Handlungsempfehlungen ableiten, weil die Art der Modellierung durch sehr viele Einflußfaktoren der Strukturen und Abläufe des Produktionssystems beeinflusst wird. Es läßt sich lediglich die allgemeine Aussage treffen, daß die Homogenität der Produkte und Abläufe Einfluß auf die Besonderheiten und Möglichkeiten bei der Modellierung besitzt. Die Modellierungsentscheidungen werden im übrigen nach den gleichen Maßstäben wie bei der konventionellen, planungsunterstützenden Simulation getroffen.

Einige Einflußfaktoren sind jedoch besonders wichtig für betriebsbegleitende Simulationsmodelle. In Tabelle 7-2 ist dargestellt, welche Charakteristika des Experiments und welche stochastischen Merkmale des Untersuchungsobjekts einen Einfluß auf die Modellierung besitzen. Hieraus werden später Modellierungstypen sowie eine Systematik zur Auswahl eines passenden Modellierungstyps für einen konkreten Anwendungsfall abgeleitet.

Eine Gruppe von Einflußfaktoren läßt sich aus den Randbedingungen und der Zielsetzung des Simulationsexperiments ableiten. Hinsichtlich der Statistik spielt der **Prognosehorizont** und die **zur Verfügung stehende Zeit für das Experiment** eine wesentliche Rolle für die Entscheidung, ob stochastisch simuliert wird und welche stochastischen Effekte berücksichtigt werden sollten. Ebenso wichtig sind die Anforderungen an die **Genauigkeit** und die **Aussageschärfe der Ergebnisse**. Diese beiden Kriterien haben einen Einfluß darauf, wie valide und detailliert das Prognosemodell sein muß. Durch die Tatsache, ob **Erfahrungsdaten** vorliegen wird entschieden, ob der Ansatz der Fehlerkompensation angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 8.2).

Einflußfaktoren	Ausprägungen		
Prognosehorizont	kurzfristig	mittelfristig	langfristig
Zur Verfügung stehende Zeit	enge Zeitrestriktion		keine besonderen Anforderungen
Anforderung an die Auswertungen			
Genauigkeitsanforderung	hoch	gering	
geforderte Aussageschärfe	hoch	gering	
Vorhandensein von Erfahrungsdaten	ja	nein	
Stochastik der Produktion			
Einfluß der Stochastik	hoch	niedrig	
Variabilität der Stochastik	hoch	niedrig	
Homogenität der Produkte u. Abläufe	hoch	gering	

Tabelle 7-2: Einflußfaktoren auf die Art der Modellierung der Systemstochastik und deren Ausprägungen

Von großer Bedeutung ist die **Stärke der stochastischen Einflüsse**, d.h. ob beispielsweise Störungen von Engpässen oder Änderungswünsche der Kunden die Abläufe in der Produktion so stark stören, daß Prognosen ab einem bestimmten Prognosehorizont sehr unsicher werden. Damit wird der sinnvolle Prognosehorizont und die erreichbare Prognoseschärfe determiniert. Es muß sorgfältig abgewogen werden, ob und wie ein stochasti-

scher Effekt modelliert werden soll. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die **zeitliche Variabilität der Stochastik** und die **Homogenität der Produkte und Abläufe**. Verändert sich die Stochastik des Systems sehr schnell, ist es meist nicht möglich Erfahrungsdaten zur Fehlerkompensation und zur Varianzschätzung zu verwenden. Statt dessen muß stochastisch simuliert werden. Sind die Produktionsabläufe der Produkte sehr ähnlich und werden die gleichen Produktionsmittel verwendet, sind auch die stochastischen Unsicherheiten in gleicher Größenordnung. Das bedeutet, daß für alle Produkte Terminprognosen mit dem gleichen statistischen Modell erstellt werden können. Andernfalls sollte für jede Produktgruppe ein eigenes Modell berechnet werden.

7.3 Modellierungstypen

Bei der Klassifikation der Einflußfaktoren stellte sich unter anderem heraus, daß nicht alle denkbaren Faktorkombinationen in der Praxis auftreten. Beispielsweise ist bei kurzen Prognosehorizonten in der Regel eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse sowie eine kurze Antwortzeit des Simulators gefordert. Dies bedeutet, daß auch die Vielfalt unterschiedlicher Modelltypen eingegrenzt werden kann. Dieses Untersuchungsergebnis wird u.a. durch eine Studie untermauert, die an der Arizona State University durchgeführt wurde (ÖZDEMIREL ET AL. 1993, S. 583).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden fünf Modellierungstypen definiert, bei denen jeweils die Systemstochastik auf unterschiedliche Weise abgebildet wird. Ein Kriterienkatalog stellt die Grundlage für einen systematischen Auswahlprozeß dar. In diesem Katalog wird unter anderem festgelegt, bei welchen Randbedingungen bestimmte Anlagenbereiche und Einzelkomponenten stochastisch modelliert werden sollen.

Simulationsziel / Genauigkeitsanforderungen	Prognosehorizont	Zeitrestriktion	Erfahrungsdaten und Variabilität der Stochastik	Homogenität der Produkte und Abläufe	Modellierungstyp
Terminprognosen [Minuten, Stunden]	kurzfristig (1-3 Wochen)	hoch	Vorhanden und geringe Variabilität	Homogene Strukturen, ähnliche Produkte	I
Terminprognosen [Minuten, Stunden]	kurzfristig (1-3 Wochen)	hoch	Vorhanden und geringe Variabilität	inhomogene, vernetzte Strukturen, unterschiedliche Produkte	II
Terminprognosen [Minuten, Stunden]	kurzfristig (1-3 Wochen)	hoch	Nicht vorhanden oder hohe Variabilität	(kein Kriterium)	III
Terminprognosen [Tage], Durchlaufzeit- oder Bestandsanalysen	mittelfristig (2-12 Wochen)	gering	(kein Kriterium)	(kein Kriterium)	IV
Durchsatz-, Durchlaufzeit- oder Bestandsanalysen	mittel- bis langfristig (1-12 Monate)	gering	(kein Kriterium)	(kein Kriterium)	V

Tabelle 7-3: Kriterienkatalog zur Auswahl eines Modellierungstyps

Im folgenden sind spezifische Modellierungstypen für typische Faktorkombinationen detailliert beschrieben. Weitere Ausführungen zu speziellen Modellierungstechniken befinden sich in Abschnitt 7.4. Tabelle 7-3 zeigt den Kriterienkatalog, mit dem ein geeigneter Modellierungstyp für eine spezifische Anwendung ausgewählt werden kann.

Modellierungstyp I:

Die Systemstochastik wird nicht modelliert. Stochastische Simulationen würden zuviel Zeit beanspruchen, weil eine hinreichend große Anzahl von stochastischen Simulationsläufen erforderlich wäre. Als grober Richtwert für die Mindestanzahl von unabhängigen Beobachtungen wird in der Literatur oft die Zahl 20 genannt (BOSCH 1993). In vorliegenden Anwendungsfall würde dies der gleichen Anzahl von Simulationsläufen entsprechen. Die erforderliche Zeit für das Experiment würde mit der Anzahl der Läufe ansteigen.

Allerdings kann speziell in diesem Anwendungsfall die Stochastik in der Regel gut mittels Verfahren, die in Abschnitt 8.2 beschrieben werden, aus den Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Das der Simulation nachgeschaltete Modul zur Fehlerkompensation und Abschätzung der stochastischen Unsicherheit liefert die Daten, die das deterministische Simulationsmodell nicht bereitstellen kann. Der Einsatz der stochastischen Simulation wäre zu aufwendig, zu zeitintensiv und würde kaum zusätzliche Erkenntnisse liefern.

Modellierungstyp II:

Die Systemstochastik wird nicht modelliert. Ähnlich wie bei Modellierungstyp I kann in diesem Anwendungsfall die Stochastik aus den Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Allerdings sollten sowohl die unterschiedlichen Produkte als auch die verschiedenen strukturierten Produktionsbereiche hinsichtlich der Ähnlichkeit ihrer Technologien und Produktionsabläufe klassifiziert werden.

In der Regel führen unterschiedliche Technologien, Abläufe oder Strukturen zu jeweils anderen systematischen und stochastischen Fehlern. Würde das gesamte Produktionsspektrum in einer Auswertung betrachtet werden, könnten nur pauschale Ergebnisse erzielt werden. Ein erhebliches Potential zu Verbesserung der Ergebnisgüte bliebe ungenutzt. Deshalb sollten die beschriebenen Methoden für jede Produktklasse oder für jeden Strukturbereich isoliert angewendet werden. Auf diese Weise ist es möglich, zu differenzierteren Ergebnissen mit einer höheren Prognosetreue zu gelangen.

Modellierungstyp III:

Ist die Nutzung von Erfahrungswissen von vornherein ausgeschlossen, müssen stochastische Simulationen durchgeführt werden, um abgesicherte Ergebnisse und statistische Informationen zu erhalten. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn ein Produktionssystem neu in Betrieb genommen wird, die Struktur oder Abläufe des Systems verändert werden oder die Produktion eines neuartigen Produkts aufgenommen werden soll.

Bei diesem Modellierungstyp sollten nur die kleineren, häufig auftretenden stochastischen Effekte auf konventionelle Art modelliert werden, wie beispielsweise schwankende Bearbeitungszeiten oder kleinere Störungen. Anders müssen stochastische Effekte behandelt werden, deren Auftreten in dem betrachteten Zeitraum zwar unwahrscheinlich ist, die

aber doch typisch für ein Produktionssystem sind. Dies sind Ereignisse, die zwar mit geringer aber doch kalkulierbarer Wahrscheinlichkeit auftreten, wie beispielsweise ein längerer Maschinenausfall aufgrund eines Defekts der Hauptspindel. Auch diese Art von Effekten sollte im Modell berücksichtigt werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß bei klassischer Modellierung sowohl das Auftreten dieser sehr seltenen Ereignisse als auch das Nicht-Auftreten innerhalb einer in der Praxis üblichen geringen Anzahl von etwa 20 Simulationsläufen keine statistisch abgesicherten Erkenntnisse liefern würde. Vielmehr sollte hier eine spezielle Variance-Reduction-Technique (VRT), das sogenannte „Importance Sampling“, eingesetzt werden, die in Abschnitt 7.4 detailliert erläutert wird. Diese Technik führt bei selten auftretenden stochastischen Effekten auch mit wenigen Simulationsläufen zu abgesicherten Ergebnissen. Sehr unwahrscheinliche oder untypische Ereignisse, deren Auftreten zu einer Ausnahmesituation führen würde, wie beispielsweise ein Totalausfall der Produktionsanlage aufgrund einer großen Störung oder eines Streiks, sollten bei den meisten Simulationsuntersuchungen vernachlässigt werden.

Bei diesem Modellierungstyp wird auch eine Rückkopplung der Modellelemente der Simulation an die Elemente der realen Produktionsanlage implementiert, um eine möglichst realistische und aktuelle Modellierung der Stochastik zu erreichen. Beispielsweise wird der Ansatz verfolgt, einer frisch gewarteten Ressource ein anderes Störverhalten zuzuweisen, als einer ungewarteten. Diese Rückkopplung wird beispielsweise über eine Anbindung an BDE/MDE-Systeme, Instandhaltungssysteme oder an CAQ-Systeme über Datenschnittstellen erzielt. Allerdings sind dafür in diese Systeme entsprechende Auswertungen zu implementieren.

Problematisch ist bei diesem Modellierungstyp die erforderliche Zeit für die stochastischen Simulationsläufe (vgl. Modellierungstyp I). Da jedoch im Modell nur kleinere, häufig auftretende stochastische Effekte berücksichtigt und die selteneren Effekte besonders behandelt werden (s.o.), ist eine geringe Anzahl von etwa 20 Simulationsläufen für die sichere Schätzung der Parameter und Kennzahlen zulässig.

Modellierungstyp IV:

Für mittelfristige Terminprognosen sowie Durchlaufzeit- und Bestandsanalysen sollten kleinere bis mittlere stochastische Effekte konventionell im Simulationsmodell abgebildet werden, d.h. beispielsweise Werkzeugbrüche oder ungeplante Wartungsmaßnahmen. Zur effizienten Modellierung sehr großer, eher selten auftretender Effekte kann auch hier die VRT „Importance Sampling“ dienen. Allerdings sollten untypische Effekte vernachlässigt werden. Wie bei Modellierungstyp III sollte eine Rückkopplung des Modells an die reale Anlage hergestellt werden, um zuverlässigere Terminprognosen zu erhalten. Zur Steigerung der Effizienz sollte die Möglichkeit genutzt werden, Maschinengruppen hinsichtlich ihrer stochastischen Eigenschaften gemeinsam zu bewerten und wenn möglich zusammenzufassen (vgl. Abschnitt 7.4).

Modellierungstyp V:

Die Anwendung der betriebsbegleitenden Simulation für taktische Optimierungsaufgaben stellt den Übergang zur planungsunterstützenden Simulation dar. Demzufolge werden auch die stochastischen Effekte in gleicher Weise modelliert. Zu beachten ist allerdings,

daß nur die mittleren und größeren stochastischen Effekte modelliert werden, um den Modellierungsaufwand gering zu halten. Als Beispiel ist hier der Ausfall einer Maschine für eine Dauer im Stundenbereich zu nennen. Bei der für taktische Optimierungen typischen „Makro-Betrachtung“ hat sich gezeigt, daß eine Modellierung der kleineren stochastischen Effekte, wie beispielsweise die Schwankung der Bearbeitungszeiten um wenige Minuten, keine zusätzlichen Erkenntnisse liefern würde. Diese kleineren Störungen wirken sich bei dieser Sichtweise durch Kovarianz-Effekte in erster Linie in einer systematischen Abweichung aus. Diese kann entweder durch eine Anpassung der deterministischen Parameter des Modells oder durch eine Fehlerkompensation ausgeglichen werden.

Auch hier bietet die betriebsbegleitende Simulation gegenüber der planungsunterstützten Simulation den Vorteil, auf Erfahrungswissen zurückgreifen zu können. Dies ermöglicht eine exaktere Modellierung der Stochastik. Eine direkte Rückkopplung des Modells zur realen Anlage ist angesichts der Länge des Betrachtungszeitraums nicht erforderlich. Erfahrungswissen sollte bei jeder Modellvalidierung bzw. -pflege einfließen.

7.4 Spezielle Modellierungstechniken für stochastische Effekte bei der betriebsbegleitenden Simulation

Bei den Modellierungstypen III bis V muß darauf geachtet werden, daß das Modell die reale Anlagenstochastik widerspiegelt. Hinzu kommt, daß bei Simulationsmodellen, die betriebsbegleitend eingesetzt werden sollen, in der Regel der Antwortzeit der Simulation besonderer Stellenwert beigemessen werden sollte. Um laufzeitoptimierte Simulationsmodelle zu erhalten, können diverse Techniken der Verdichtung und Abstraktion angewendet werden (ZEIGLER 1985, S. 39ff). Die Behandlung der stochastischen Effekte ist bei der Verdichtung und Abstraktion allerdings nicht trivial. Werden Fehler bei der Abbildung der Systemstochastik begangen, kann dies dazu führen, daß die Simulationsergebnisse sowohl systematische als auch stochastische Abweichungen aufweisen.

Um auch mit stochastischen Modellen die Anforderungen, die im Rahmen der betriebsbegleitenden Simulation an die Simulation gestellt werden, zu erfüllen, ist der Einsatz spezieller Methoden und Techniken bei der Modellierung notwendig. Diese sollen sicherstellen, daß die stochastischen Effekte valide im Modell abgebildet werden. Im folgenden werden einige in der wissenschaftlichen Literatur beschriebene Techniken dargestellt (s. KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992). Die Einsatzmöglichkeiten und die besondere Bedeutung dieser Techniken im Zusammenhang mit der betriebsbegleitenden Simulation werden anhand von Beispielen dargestellt.

7.4.1 Methoden zur Verdichtung und Abstraktion stochastischer Effekte

Bestimmte stochastische Effekte lassen sich bei der Abstraktion eines Modells zusammenfassen und in verdichteter Form modellieren. Mit mathematischen Mitteln gelingt dies, beispielsweise wenn mehrere starr verkettete Einzelstationen einer Linie zu einem abstrakten Baustein zusammengefaßt werden. Da jede Störung einer Arbeitsstation zwangsläufig in kurzer Zeit zum Stillstand der gesamten Linie führt, können in diesem

Fall die Störstatistiken der Einzelstationen summiert und als Störstatistik für den abstrahierten Baustein verwendet werden (Bild 7-3).



Bild 7-3: *Verdichtung stochastischer Effekte am Beispiel einer starr verketteten Produktionslinie*

Schwieriger wird die Verdichtung und Abstraktion, wenn die Stationen durch Puffer entkoppelt sind oder sich Parallelstationen bzw. Beipässe in dem zu verdichtenden Produktionsbereich befinden. Eine mathematische Berechnung der Störcharakteristik aus den Einzelstatistiken ist dann in der Regel nicht möglich. Die deterministischen und stochastischen Parameter des abstrahierten Bausteins können allerdings durch statistische Auswertung der Materialflüsse an den Schnittstellen des zu verdichtenden Produktionsbereichs ermittelt werden. Hierzu kann entweder ein detailliertes Simulationsmodell des Produktionsbereichs (Offline-Simulation) oder der Bereich in der realen Produktion beobachtet werden. Daraus lassen sich Statistiken beispielsweise der Durchlaufzeiten oder der Produktfehler berechnen. Diese Statistiken werden zur Parametrisierung der abstrahierten Modellbausteine verwendet.

7.4.2 Methoden zur korrekten und effizienten Modellierung von Abhängigkeiten zwischen stochastischen Effekten

Abhängigkeiten zwischen stochastischen Effekten spielen oft eine entscheidende Rolle. Diese Abhängigkeiten treten in der Praxis häufig auf. So kann in hybriden oder teilautomatisierten Produktionssystemen oft beobachtet werden, daß im Falle einer Störung einer automatisierten Arbeitsstation ein Mitarbeiter an einer manuellen Station seine Arbeit unterbricht, um die Störung zu beheben. Dies bedeutet, daß beide Stationen während der Dauer der Störung ausfallen.

Eine Lösung zur Abbildung dieser Charakteristik im Modell ist, den Mitarbeiter als diskrete Ressource mit der Funktionalität eines Springers zu modellieren. Diese Lösung ist jedoch sehr aufwendig und erfordert viel Rechenzeit bei der Simulation. Eine effizientere Alternative ist es, nur den Arbeitsplatz des Mitarbeiters zu modellieren und diesen gleichzeitig mit der betreffenden automatisierten Arbeitsstation durch den selben Störungsgenerator auf „gestört“ zu schalten (Bild 7-4). Diese VRT heißt „Common Random Numbers“ oder „Technik der gemeinsamen Zufallszahlen“.

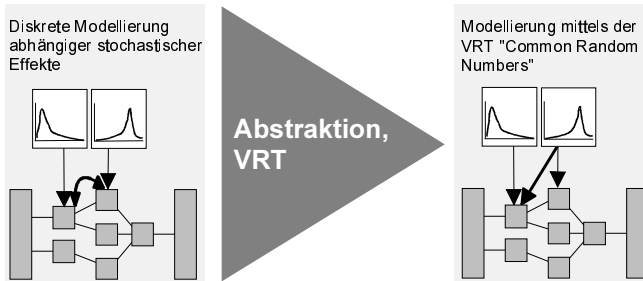


Bild 7-4: Modellierung von Abhängigkeiten zwischen stochastischen Effekten

Eine weitere VRT kommt zum Einsatz, wenn eine Input-Zufallsvariable mit einer Output-Zufallsvariablen im Modell korreliert. Werden beispielsweise in einem realen Produktionssystem zu einer bestimmten Zeit sehr viele Transportaufträge ausgelöst, führt dies in der Regel dazu, daß die Wartezeit für den Transport steigt. Dieser Effekt tritt auch im Simulationsmodell auf, wenn die Ressourcen des Transportsystems diskret modelliert werden. Häufig wird allerdings aus Vereinfachungs- und Laufzeitgründen im Simulationsmodell der Transport als abstrakter Baustein mit unendlicher Kapazität auf Basis einer Transportzeitmatrix modelliert. Schwankungen der Transportzeit werden durch ein einfaches statistisches Modell abgebildet.

Bei dieser Art der Modellierung wird die oben beschriebene Abhängigkeit nicht korrekt abgebildet. Mit einer speziellen Modellierungstechnik ist es möglich, die Korrelation der Variablen „Transportaufkommen“ (Input-Variable) und „Wartezeit auf den Transport“ (Output-Variable) im Modell darzustellen. Durch eine Korrelations- bzw. Regressionsanalyse wird die Abhängigkeit der beiden Variablen beschrieben. In das Modell wird eine Methode eingebaut, die zur Laufzeit der Simulation den aktuellen Wert der Output-Variablen durch die Input-Variable steuert. Diese Technik wird in der Literatur als „Control Variates“ oder „Regression Sampling“ bezeichnet (KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992, S. 200).

7.4.3 Methoden zur korrekten und effizienten Modellierung besonders seltener stochastischer Effekte

Die VRT „Importance Sampling“ wird eingesetzt, um stochastische Effekte, die eine geringe Wahrscheinlichkeit besitzen, valide im Modell abzubilden. Bei dieser Technik wird in der Simulation die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten stochastischen Effekts bewußt erhöht, so daß er innerhalb des betrachteten Zeitraums und bei der angestrebten geringen Anzahl von Simulationsläufen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mehrmals auftritt. Im Anschluß wird im Rahmen der Auswertung die Wirkung dieses Effekts wieder mit statistischen Verfahren reduziert (Bild 7-5). Dieses Auswerteverfahren ist allerdings sehr aufwendig und schwierig anzuwenden. Das Verfahren wird derzeit von der Wissenschaft noch weiterentwickelt. Zum gegenwärtigen Stand ist es für die betriebsbegleitende Si-

mulation nur bedingt geeignet. Eine detaillierte Darstellung des Verfahrens befindet sich in KLEINEN 1995 (S. 423).



Bild 7-5: Valide Abbildung seltener stochastischer Effekte

7.4.4 Vorgehen bei irrelevanten stochastischen Effekten

Wird die Stochastik nicht modelliert, wie bei den Modellierungstypen I und II der Fall, sollte zumindest sichergestellt werden, daß die Einflüsse von stochastischen Ereignissen auf die systematischen Fehler bereits in der Simulation berücksichtigt werden.

Beispielsweise wirken sich Störungen an Engpaßmaschinen direkt auf den Durchsatz aus und verzögern alle Aufträge, die über sie laufen. Nicht-Engpaßmaschinen können hingegen die verlorene Fertigungszeit schnell wieder aufholen. Die Auswirkung von Störungen ist also geringer. Aufträge, die nicht über Engpaßmaschinen laufen, werden in Summe durch Störungen also kaum beeinflusst. Folglich sollte insbesondere die Durchsatzleistung bzw. die Arbeitszeit der Engpaßmaschinen entsprechend ihrer Verfügbarkeit reduziert werden. Falls das Produktionsprogramm häufig wechselt und sich die Engpässe dadurch verschieben, ist es sicherer, alle Ressourcen auf diese Weise zu parametrisieren.

7.5 Automatische Modellgenerierung

Um die Anwendung des Prognosesystems zu vereinfachen und um sicherzustellen, daß für jede Optimierungsaufgabe ein geeignetes Prognosemodell verfügbar ist, wird ein Konzept entwickelt, Simulationsmodelle automatisch aus generischen Modellbausteinen zu generieren. Im folgenden wird zunächst das Konzept der generischen Bausteine vorgestellt. Im Anschluß erfolgt eine Darstellung des Auswahlverfahrens für Modellierungstyp und Bausteine. Daran schließt sich eine Beschreibung der Datenakquisition und des Modellaufbaus an.

7.5.1 Konzept generischer Modellbausteine

Die Modellbausteine besitzen eine einheitliche Architektur (vgl. Bild 7-6). Sie beinhalten im wesentlichen ein individuelles Modell der Struktur des Materialflusses einer Ressour-

ce oder eines Produktionsbereichs. Für jede typische Ressource, wie beispielsweise eine spanende Bearbeitungsmaschine oder ein Montagearbeitsplatz, bzw. jeden typischen Produktionsbereich, wie beispielsweise eine Insel oder eine Werkstatt, wird ein spezieller Baustein im Bausteinkasten vorgehalten. Über Parameter können die Bausteine individuell an die Charakteristik einer spezifischen Ressource angepaßt werden. Die Material- und Informationsflußschnittstellen der Bausteine sind standardisiert. Beispielsweise wird der Materialfluß über Standard-Materialflußschnittstellen der Bausteine direkt mit einem flexiblen Transportbaustein verknüpft.

Weiterhin enthält ein Baustein wichtige lokale Methoden zur Informationsverarbeitung und zur Steuerung des Materialflusses, beispielsweise Methoden zur Reihenfolgebildung, zur Engpaßoptimierung oder zum Störungsmanagement. Variablen und Steuerungen sind über Listen und Kataloge abrufbar. Auf diese Weise ist eine einfache Implementierung der Material- und Informationsflüsse im Rahmen des automatischen Modellaufbaus möglich. Ein übergeordneter Steuerungsbaustein, die globale Ablaufsteuerung, übernimmt zentrale Funktionen der Ablaufsteuerung, beispielsweise die ressourcenübergreifende Informationsverarbeitung oder die Änderung einer übergreifenden Steuerungsstrategie.

Durch diesen Ansatz wird eine automatische Anpassung des Simulationsmodells an Änderungen der Parameter oder der Struktur des Produktionssystems durch Anpassung der Parametrisierung der Modellbausteine oder der Verknüpfungen ermöglicht. Manuelle Eingriffe sind allerdings notwendig, wenn sich die Struktur innerhalb einer Ressource ändert, die durch einen generischen Modellbaustein abgebildet ist. In diesem Fall muß ein anderer, geeigneter Modellbaustein zugeordnet oder ein neuer generischer Baustein modelliert werden.

Ein großer Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, daß die automatisch generierten Modelle aufgrund der Standard-Architektur der Bausteine transparent sind. Dadurch wird einem Simulationsexperten der manuelle Zugriff auf das Modell erleichtert.

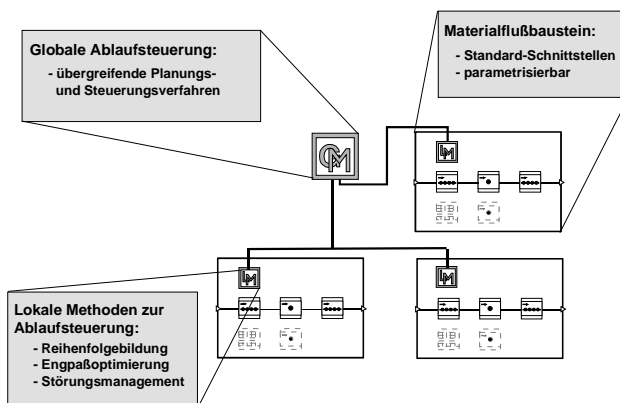


Bild 7-6: *Simulationsmodell bestehend aus Modellbausteinen mit einheitlicher Architektur*

7.5.2 Auswahl von Modellierungstyp und Modellbausteinen

Die Modellgenerierung wird von der Experimentplanung angestoßen (vgl. Abschnitt 5.1). Zunächst werden der geeignete Modellierungstyp sowie die entsprechenden Modellbausteine ausgewählt. Dieser Schritt erfolgt zuerst, weil durch die Art der Modellierung festgelegt wird, welche Daten zur Modellparametrisierung und -initialisierung akquiriert werden müssen.

Der Auswahlprozeß für den Modellierungstyp besitzt einen hierarchischen Ablauf. Das heißt, nacheinander werden mehrere Modellierungsentscheidungen getroffen und somit die einzelnen Aspekte der Modellcharakteristik festgelegt. Wie bereits erläutert, tritt in der Praxis nur eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Modellierungstypen auf. Für den Auswahlprozeß bedeutet dies, daß jede einzelne Modellierungsentscheidung die möglichen Alternativen auf der nächsten Entscheidungsebene eingrenzt. Auf diese Weise bleibt der Auswahlprozeß überschaubar und transparent.

Die experimentunabhängigen Modellierungsentscheidungen können und sollten bereits im Vorfeld, müssen also nicht erst im Rahmen der Definition eines konkreten Experiments, getroffen werden, weil die grundsätzliche Charakteristik des Produktionssystems relativ konstant ist. Diese Vorfeldentscheidungen grenzen die notwendige Anzahl und Flexibilität der Modellbausteine für eine Simulationsanwendung bereits deutlich ein. Dies ist notwendig, damit der Ansatz der automatischen Modellgenerierung realisierbar ist und die Modelle die notwendige Effizienz aufweisen. Im Rahmen der Definition eines Simulationsexperiments müssen dann weitere Entscheidungen getroffen werden (vgl. Kapitel 6). Aus diesen Informationen kann der Modellierungstyp mit Hilfe der Tabelle 7-3 abgeleitet werden.

Mit der Auswahl des Modellierungstyps wird bereits eine Vorauswahl der Simulationsbausteine getroffen. Anhand der Kriterien Abstraktionsniveau, abzubildende Modellparameter und auszuwertende Variablen, alles Ergebnisse aus der Experimentplanung, werden die für die Modellierung geeigneten Bausteine selektiert.

7.5.3 Akquisition aktueller Modelldaten

Der eigentliche Aufbau und die Parametrisierung eines Modells erfolgen auf Basis von Daten, die in einer Modelldatenbank abgelegt sind. Die Rolle dieser Modelldatenbank kann beispielsweise von einer Unternehmensdatenbank oder einer PPS-Datenbank in Verbindung mit zusätzlichen simulationsrelevanten Datenbanken, übernommen werden (vgl. Bild 7-7). Durch direkte Akquisition der technischen Daten, Systemlastdaten und Organisationsdaten aus den betrieblichen Informationssystemen wird bereits eine gute Basis für eine hohe Qualität des Modells erreicht. Zu den drei genannten simulationsrelevanten Datenkategorien gehören auch stochastische Modellinformationen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine besondere Bedeutung besitzen, wie beispielsweise Qualitätsdaten und Instandhaltungsdaten. Abhängig vom Modellierungstyp (vgl. Abschnitt 7.3) werden deshalb zusätzlich zu den deterministischen Informationen aktuelle stochastische Eingangsdaten akquiriert.

Die Daten, die zum Aufbau eines Modells des gewählten Modellierungstyps notwendig sind, werden aus der Datenbank ausgelesen und strukturiert. Abhängig von dem zur Aufgabenstellung passenden Abstraktionsniveau der Simulationsbausteine werden die Daten entsprechend verdichtet, so daß die Parameterwerte für die Modellbausteine gewonnen werden können. Hier kommen unter anderem einige der in Abschnitt 7.4 beschriebenen Methoden zum Einsatz.

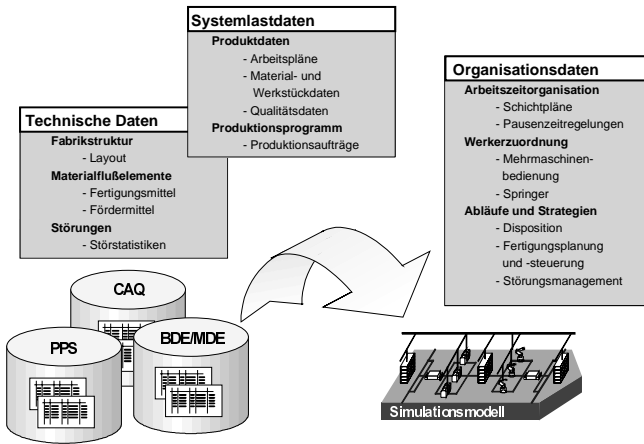


Bild 7-7: Klassifikation simulationsrelevanter Daten

Hinzu kommt, daß hinsichtlich der stochastischen Informationen in der Regel nur Listen mit protokollierten stochastischen Ereignissen, wie beispielsweise Maschinenstillstände, verfügbar sind. In diesem Fall müssen aus den Daten die entsprechenden statistischen Verteilungsfunktionen berechnet werden.

Zum Abschluß dieses Schrittes erfolgt eine Zuordnung der Daten zu einem definierten Übergabeformat an den Modellgenerator. Dieses Übergabeformat besteht aus vier Tabellen, der Strukturtablelle, der Arbeitsplantabelle, der Systemlasttablelle und der Initialisierungstabelle (Bild 7-8).

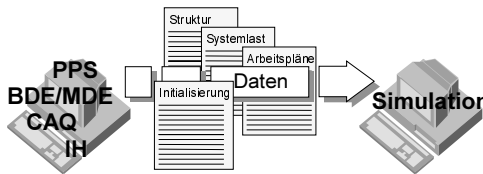


Bild 7-8: Übergabetabellen der simulationsrelevanten Daten

Die Strukturtablette enthält alle Arbeitsplätze und Produktionsbereiche mit einer Referenzierung des zu verwendenden Standard-Bausteins (Arbeitsplatzart) und die Standorte der Arbeitsplätze in der Produktionsstruktur. Tabelle 7-4 zeigt ein kurzes Beispiel einer Strukturtablette. Zusätzlich werden zu jedem Baustein Listen mit Parametern, wie beispielsweise die Parameter zur Beschreibung des Störungsverhaltens oder des Arbeitszeitmodells, und feste Materialflußverknüpfungen zu anderen Bausteinen übergeben.

Arbeitsplatzname	Arbeitsplatzart	Standort
L10	0003	L_P
FMGRP_1	0004	M_PG
FMGRP_2	0004	M_PG

Tabelle 7-4: Beispiel einer Strukturtablette

Die Arbeitsplantagebelle enthält die Arbeitspläne der in dem betrachteten Produktionssystem gefertigten Produkte. Ein Arbeitsplan enthält die Folge der Arbeitsplätze mit den Rüst- und Bearbeitungszeiten sowie einer Beschreibung des Bearbeitungsvorgangs (Tabelle 7-5).

Arbeitsplatz	Ruestzeit	Bearbeitungszeit	Vorgang
L10	288.000	30.000	Speichen in Nabe einhängen
L11A	510.000	9.000	Felge in Einspeichmaschine
L11A	0.000	78.000	Speichen in Felge einfädeln

Tabelle 7-5: Beispiel einer Arbeitsplantagebelle

In der Systemlasttablette sind alle Fertigungsaufträge mit ihrer Losgröße, dem Startdatum, dem Zieldatum und einer Referenzierung des zugehörigen Arbeitsplanes aufgeführt (Tabelle 7-6).

Auftragsnummer	Losgroesse	Starttag	Zieltag	NrAPlan
000001700509	32	276	276	0420111
000001700519	100	277	278	0313124
000001700520	80	277	279	0313026

Tabelle 7-6: Beispiel einer Systemlasttablette

Die Initialisierungstablette enthält alle Fertigungsaufträge, die sich zum Initialisierungszeitpunkt bereits in der Produktion befinden. Zu jedem Fertigungsauftrag sind die gleichen Informationen wie in der Systemlasttablette angegeben. Zusätzlich wird aufgeführt, an welchem Arbeitsplatz der Auftrag sich gerade befindet, welche Position im Arbeitsplan gerade bearbeitet wird (Bearb.-Zustand) und wie weit der Bearbeitungsschritt bereits abgearbeitet ist (Tabelle 7-7). In einer weiteren Initialisierungstablette sind die Störungszustände der Arbeitsplätze dokumentiert.

Auftragsnr.	Losgr.	Starttag	Zieltag	NrAPlan	Arbeitsplatz	Bearb.-Zustand	%_abgearb
000001700503	300	274	277	0420111	L11A	3	40
000001700507	50	274	275	0450001	L14	7	27

Tabelle 7-7: Beispiel einer Initialisierungstabelle

7.5.4 Modellaufbau

Aus den Tabellen kann das Modell automatisch aufgebaut werden. Zunächst werden die Zeilen der Strukturtablette abgearbeitet und die entsprechenden Modellbausteine (Station oder Teilfeld) aus dem Bausteinkasten in ein Rumpfprogramm oder ein Simulationsnetzwerk (Hauptfeld oder Teilfeld) eingesetzt und ihre deterministischen und stochastischen Parameter eingestellt (Bild 7-9). Im Anschluß daran erfolgen die material- und informationsflußtechnischen Verknüpfungen sowie die Implementierung der Ablaufsteuerung. Die Systemlasttablette und die Arbeitsplantabelle werden in die Ablaufsteuerung übernommen. Als letzter Schritt erfolgt die Initialisierung. Hierzu wird jeder Auftrag der Initialisierungstabelle generiert und mit seinem Bearbeitungszustand gekennzeichnet. Dann wird er dem entsprechenden Arbeitsplatz zugeordnet. Die verbleibende Restbearbeitungszeit wird berechnet und dem Arbeitsplatz zugewiesen. Abschließend werden die aktuellen Störungszustände initialisiert.

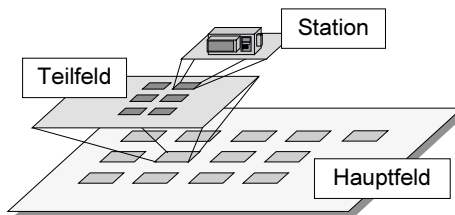


Bild 7-9: Aufbau des Simulationsmodells einer Produktionsstruktur

Zusätzlich müssen für ein Experiment Modellerweiterungen vorgenommen werden. Beispielsweise werden zu messende Variablen und Meßpunkte implementiert und Methoden zur Datensammlung, -verdichtung und -protokollierung in das Modell eingefügt. Die Implementierung ist abhängig von der Experimentkonfiguration. Die Realisierung und die genaue Funktionsweise des Modellgenerators sind in Abschnitt 9.2.2 beschrieben.

Das Layout des Produktionssystems wird im wesentlichen vernachlässigt, weil dieses abgesehen von Transportwegen keine Informationen beinhaltet, die das Simulationsergebnis beeinflussen. Transportwege und -zeiten können allerdings auch ohne ein entsprechendes Layout modelliert werden.

Neben der automatischen Modellgenerierung sind noch manuelle Modelleditoren notwendig. Beispielsweise können zur Zeit nicht alle Aspekte eines Simulationsmodells au-

tomatisch generiert werden. Aspekte, die für die Prognosegüte relevant sind, wie beispielsweise spezielle Steuerungsstrategien zum Störungsmanagement, müssen aus diesem Grund gegebenenfalls manuell modelliert werden. Außerdem wird ein Modelleditor benötigt, um im Rahmen der taktischen Optimierung strukturelle Modifikationen am Modell durchzuführen.

7.6 Zusammenfassung

Die verschiedenen Fragestellungen der betriebsbegleitenden Simulation stellen unterschiedliche Anforderungen an das Modell, beispielsweise hinsichtlich Genauigkeitsgrad und Antwortzeit. Mit einem einzigen Modell lassen sich diese konkurrierenden Anforderungen nicht erfüllen. Zur Modellierung der Simulationsbausteine wurden fünf unterschiedliche Modellierungstypen entwickelt, mit denen sich die gängigen Fragestellungen der taktischen und operativen Produktionsoptimierung bearbeiten lassen. Um die Effizienz und Validität stochastischer Simulationsmodelle zu optimieren, wurde ein Katalog spezieller Modellierungstechniken entwickelt.

Die automatische Modellgenerierung aus Modellbausteinen stellt einen Lösungsansatz dar, um schnell und mit geringem Aufwand zu einem geeigneten Modell für eine spezifische Fragestellung zu kommen. Beim automatischen Modellaufbau wird für jede Resource ein Baustein aus einer Bausteinbibliothek ausgewählt, parametrisiert und mit den anderen Bausteinen über Standard-Schnittstellen vernetzt. Die Simulationsbausteine werden nach einer einheitlichen Architektur erstellt. Sie enthalten parametrisierbare Teilmole des Material- und Informationsflusses.

8 Kompensation von Prognosefehlern und statistische Auswertung

Im vorliegenden Kapitel wird das Modul zur Kompensation von Prognosefehlern und zur statistischen Auswertung und Visualisierung vorgestellt. Zum besseren Verständnis des Konzepts werden zunächst statistische Grundlagen und Verfahren vorgestellt, die bei dem Konzept eingesetzt werden. Darauf aufbauend werden spezielle Verfahren für die Implementierung in das Modul entwickelt. Im Anschluß an die Darstellung der statistischen Verfahren werden die einzelnen Funktionsmodule entwickelt. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise wird zum Abschluß der Ablauf der Fehlerkompensation und Auswertung dargestellt.

8.1 Statistische Grundlagen und Verfahren

Aus den statistischen Besonderheiten von Produktionsanlagen ergeben sich Anforderungen und Randbedingungen für die Auswahl der statistischen Methoden. Im folgenden werden statistische Kennzahlen und Berechnungsverfahren vorgestellt, die für das Konzept der Fehlerkompensation relevant sind.

8.1.1 Statistische Standardverfahren und -kennzahlen

Regressionsanalyse

Zentraler Ansatzpunkt für die Fehlerkorrektur ist die Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen simulierten und realen Terminen. Die Statistik stellt für derartige Aufgabenstellungen die Methode der Regressionsanalyse zur Verfügung. Die Regressionsanalyse stellt allerdings nicht eine Variable (Regressand) im mathematischen Sinn eindeutig als Funktion anderer Zufallsvariablen (Regressoren) dar. Dieser funktionale Zusammenhang gilt nur für den Erwartungswert des Regressanden, um den die beobachteten Werte streuen. Im folgenden wird eine kurze Einführung in diese Methodik gegeben. Eine ausführlichere theoretische Beschreibung der Methode ist der Literatur zu entnehmen (BOSCH 1993 (S. 592ff), BELSLEY ET AL. 1980, DRAPER & SMITH 1981, SACHS 1984).

Man unterscheidet nach Art der Regressionsfunktion zwischen linearer und nichtlinearer sowie nach der Anzahl der Regressoren zwischen einfacher und multipler Regression. Bei der multiplen Regression wird der Regressand durch eine größere Anzahl von Regressoren dargestellt. Die Regressoren müssen voneinander unabhängig sein. Sie sollten eine möglichst geringe Kollinearität aufweisen. Kollinearität erschwert die Schätzung der Regressionskoeffizienten. Im Extremfall werden die Regressionskoeffizienten instabil oder unbestimmbar. Die wichtigen Einflußgrößen auf die Durchlaufzeiten in der Produktion werden auch in der Simulation berücksichtigt und die vernachlässigten Größen sind in der Regel nicht explizit bekannt. Einflußgrößen, die in der Simulation nur vereinfacht berücksichtigt werden, weisen in der Regel eine zu große Kollinearität auf. Aus diesem

Grund ist es im Sinne der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit weder erforderlich noch zielführend, eine multiple Regressionsanalyse durchzuführen.

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, konnten in der Praxis nur lineare Zusammenhänge zwischen realen und simulierten Terminen festgestellt werden. Im folgenden wird deswegen nur die lineare Regression beschrieben. Sollte in einer bestimmten Anwendung doch einmal ein nichtlinearer Zusammenhang festgestellt werden, kann oft mittels Transformation eine Linearisierung erreicht werden. Beispielsweise kann im Falle einer Parabelform der Regressionsfunktion durch eine Wurzeltransformation der y-Werte eine Linearisierung herbeigeführt werden.

Im Fall der linearen Regression wird der Regressand (Y) durch eine lineare Funktion mit einer Variablen, dem Regressor (x), und zwei Regressionsparametern (β_0 und β_1) sowie einer stochastischen Fehlervariablen (u) beschrieben:

$$Y(x) = \beta_0 + \beta_1 x + u$$

Das klassische Modell der Normalregression geht dabei von einigen wichtigen Annahmen aus. Die Erfüllung der Annahmen muß vor der Anwendung des klassischen Modells geprüft werden. Dafür existiert eine Reihe von Testverfahren. Insbesondere die folgenden drei Annahmen sind explizit zu testen, weil sie die Wahl der anzuwendenden Schätzverfahren bestimmen:

- Normalverteilung der Fehlervariablen (u)
- Homoskedastizität (konstante Varianz der Fehlervariablen)
- Keine Autokorrelation der Fehlervariablen

Die entsprechenden Testverfahren sind in 8.1.3 dokumentiert. Eine Zusammenstellung der Annahmen, der Test- und der Schätzverfahren befindet sich in GRUBER (1982).

Sind einzelne Annahmen nicht erfüllt, muß das klassische Modell durch eine geeignete Wahl der Methoden und Schätzverfahren entsprechend verallgemeinert werden (vgl. Abschnitt 8.1.2). Beispielsweise können die Parameter des Regressionsmodells, abhängig davon, welche Annahmen erfüllt sind, mit Hilfe verschiedener Schätzverfahren bestimmt werden. Beispielsweise gilt die Maximum-Likelihood-Methode (ML) nur bei Normalverteilung der Fehlervariablen. Die Methode der kleinsten Abstandsquadrate (1KQ oder ELS-Methode) setzt keine bestimmte Verteilung voraus, allerdings wird eine konstante Varianz der Fehlervariablen (Homoskedastizität) angenommen (GRUBER 1982). Sonderverfahren gelten auch bei Verletzung der oben genannten Annahmen. Beispielsweise gilt die Methode der gewichteten kleinsten Abstandsquadrate (WLS-Methode) auch für den Fall der Heteroskedastizität und Autokorrelation der Fehlervariablen. Dieses Verfahren wird in Abschnitt 8.1.2 dargestellt.

Die Güte eines Regressionsmodells wird durch das Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. R^2 entspricht dem Quadrat des Korrelationskoeffizienten r (BOSCH 1993, S. 75). Nimmt R^2 den Wert 1 an, so entspricht dies einer vollständigen Anpassung des Regressionsmodells an die beobachteten Werte. Der Wert 0 sagt aus, daß die Beobachtungen nicht durch ein Regressionsmodell beschrieben werden können.

Regressionsmodelle haben einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich. Sie gelten nur für den Wertebereich der Variablen, der auch für die Konstruktion des Modells verwendet

wurde. Auf keinen Fall dürfen Regressionsfunktionen über diesen Wertebereich hinaus extrapoliert werden.

Beschreibung der Stochastischen Unsicherheit

Aussagen über die stochastische Unsicherheit von Terminprognosen sind von besonderem Interesse bei der betriebsbegleitenden Simulation. Sinnvoll ist es, die Schätzung der Prognosestreue nach der Korrektur des systematischen Fehlers vorzunehmen. Diese Informationen sind dem Streudiagramm mit eingezeichneter Regressionsfunktion zu entnehmen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist, daß der Zusammenhang zwischen Prognosehorizont und Prognosestreue erhalten bleibt. Aus diesem Grund soll im folgenden auf diese Erkenntnis aufgebaut und das Regressionsmodell um stochastische Informationen erweitert werden.

Eine geeignete Kennzahl muß den Anforderungen der betriebsbegleitenden Simulation entsprechen, d.h. sie sollte schnell zu berechnen, möglichst universell anwendbar und leicht zu verstehen sein. Weiterhin muß bei der Auswahl einer Kennzahl auch auf deren Visualisierbarkeit geachtet werden. Aus diesem Grund bestand die Notwendigkeit, basierend auf diesen Kennzahlen eine geeignete Ergebnisdarstellung zu entwickeln, die von einem Systembediener einfach erkannt und interpretiert werden kann und sich in leicht erfaßbaren Grafiken mit hoher Aussagekraft darstellen läßt.

Tabelle 8-1 gibt einen Überblick der gängigen Kennzahlen zur Darstellung stochastischer Größen. Die Kennzahlen wurden hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im Rahmen der betriebsbegleitenden Simulation bewertet.

Kennzahl	Aussagekraft	Interpretierbarkeit	Visualisierbarkeit	Berechnungsaufwand unter den gegebenen Voraussetzungen
Standardabweichung: σ	+	-	o	o
Varianz: $\text{Var} = \sigma^2$	+	-	o	o
Variationskoeffizient	o	-	-	o
Schiefe	+	o	o	o
Exzeß (Wölbung)	+	o	o	o
Spannweite	o	+	+	+
mittlere Spannweite	o	o	+	+
mittlerer Abstand	o	-	+	+
Quantil	+	+	+	-
Konfidenz-/ Prognosestreifen	++	++	++	-

Tabelle 8-1: Bewertung von Kennzahlen zur Darstellung der Prognoseschärfe
(++: sehr gut, +: gut, o: neutral, -: schlecht, --: sehr schlecht)

Kennzahlen zur Darstellung der stochastischen Unsicherheiten sind beispielsweise die verschiedenen Streuungsmaße, wie die Varianz und die Standardabweichung, der Varia-

tionskoeffizient sowie die Schiefe und der Exzeß einer Häufigkeitsverteilung. Eine ausführliche Beschreibung dieser Kennzahlen der deskriptiven Statistik befindet sich in BOSCH (1993, S. 28ff). Ein Nachteil der meisten Kennzahlen liegt in der mangelhaften Interpretierbarkeit für den praktischen Anwender. Höheren Nutzen versprechen Kennzahlen wie beispielsweise die Spannweite, die mittleren Abstände oder die Quantilsabstände.

Den Anforderungen entsprechen Konfidenz- oder Prognoseintervalle und -streifen am besten. Sie besitzen eine hohe Aussagekraft und sind gut interpretierbar, weil sie sich leicht in die Sprache des Anwenders übersetzen lassen. Ein Konfidenzintervall sagt aus, daß ein geschätzter Parameter θ mit einer Wahrscheinlichkeit in der Höhe des Konfidenzniveaus γ innerhalb der Intervallgrenzen θ_u , θ_o liegt. Außerdem sind sie anschaulich und lassen sich gut visualisieren. Je nach Problemstellung wählt man einseitige oder zweiseitige Konfidenzintervalle (Bild 8-1):

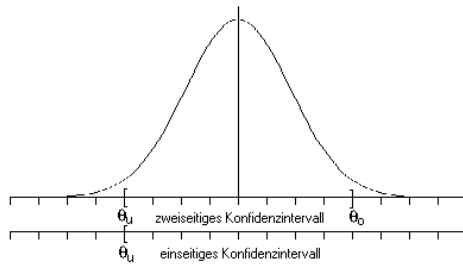


Bild 8-1: Einseitiges und zweiseitiges Konfidenzintervall für eine Normalverteilung

- zweiseitiges Konfidenzintervall: $\theta_u \leq \theta \leq \theta_o$
- einseitige Konfidenzintervalle: $\theta_u \leq \theta$ oder $\theta \leq \theta_o$

Bei manchen Anwendungen sind Konfidenzintervalle mit unterschiedlichen Konfidenzniveaus γ_u und γ_o für die Bestimmung der unteren bzw. der oberen Intervallgrenze sinnvoll. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine Unterschätzung der zu bestimmenden Größe andere Konsequenzen nach sich zieht als eine Überschätzung.

Konfidenzstreifen entsprechen den Konfidenzintervallen im zweidimensionalen Fall. Im Rahmen der Regressionsanalyse ist ein Konfidenzstreifen eine Fläche, begrenzt durch zwei Konfidenzlinien, innerhalb der die Regressionsgerade mit einer Wahrscheinlichkeit in der Höhe des Konfidenzniveaus liegt. Ein Konfidenzstreifen ist somit ein Maß für die Schätzgenauigkeit der Parameter des Regressionsmodells bzw. der Lage der Regressionsgeraden. Demgegenüber ist der Prognosestreifen der Bereich in dem eine individuelle Beobachtung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit enthalten ist (HARTUNG 1995, S. 582). Weil es ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Prognoseschärfe der Termenschätzung einzelner Aufträge zu ermitteln, besitzen Prognoseintervalle und -streifen eine besondere Bedeutung. Bild 8-2 zeigt eine Regressionsgerade mit den dazugehörigen Konfidenz- und Prognosestreifen.

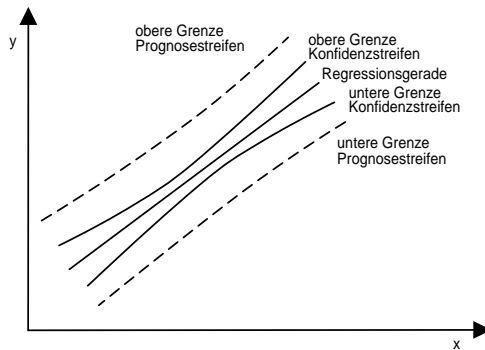


Bild 8-2: *Regressionsgerade mit Konfidenz- und Prognosestreifen*

Die Breite des Prognosestreifens setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Dies ist zum einen die Breite des Konfidenzstreifens der geschätzten Regressionsgeraden, zum anderen die zu erwartenden Abweichungen der individuellen beobachteten Werte von dieser Regressionsgeraden. Für eine zuverlässige Schätzung des Prognosestreifens ist es also wichtig, den Konfidenzstreifen der Regressionsgeraden einzuengen und die zu erwartenden Abweichungen möglichst genau zu schätzen.

Die Schätzung von stochastischen Kennzahlen bei Verletzung der klassischen Annahmen stellt neue Anforderungen an die auszuwählende Methode. Standardmethoden zur Kennzahlberechnung setzen homoskedastisches Datenmaterial sowie eine Normalverteilung der Fehlervariablen voraus. Deshalb liefern sie in der Regel parallele Prognoselinien gleichen Abstands von der Regressionsfunktion. Das hier betrachtete Datenmaterial ist meist heteroskedastisch, und die Fehlervariable besitzt eine schiefe Verteilung (vgl. Abschnitt 3.1). Unter diesen Verhältnissen führen Standardauswertungen nur zu pauschalen Aussagen über alle Aufträge. Beispielsweise wird nicht berücksichtigt, daß die Unschärfe mit zunehmendem Prognosehorizont zunimmt oder daß Ausreißer nach oben häufiger vorkommen als Ausreißer nach unten. Pauschale Aussagen besitzen keinen besonderen Nutzen für den Anwender. Vielmehr werden spezifische Angaben der Prognosestreue für einzelne Werte bzw. Prognosehorizonte gefordert.

Im folgenden Abschnitt werden eine Vorgehensweise und spezielle Methoden zur Berechnung der Regressionsfunktion und der Prognosestreifen unter den im hier betrachteten Fall vorliegenden Gegebenheiten, wie Heteroskedastizität und schiefe Verteilung der Fehlervariablen, detailliert beschrieben.

8.1.2 Spezielle Methoden zur Kennzahlberechnung

Zur Berechnung der Parameter der Regressionsfunktion muß ein Verfahren entwickelt werden, das gegen die Verletzung der Annahmen „Normalverteilung“ und „Homoskedastizität der Fehlervariablen“ unempfindlich ist. Die Charakteristika „Normalverteilung“ und „Homoskedastizität“ besitzen zudem einen erheblichen Einfluß auf die Breite sowie

auf die Schätzgenauigkeit der Konfidenz- und Prognosestreifen. Nur eine hinreichende Erfüllung beider Annahmen ermöglicht eine zuverlässige Schätzung der Lage der Regressionsgeraden und eine weitere Einengung der Prognosestreifen. Weiterhin verdeutlichen die in Abschnitt 3.3.3 dargelegten Analyseergebnisse, daß bei der beschriebenen Anwendung Grenzlinien von divergierenden asymmetrischen Prognosestreifen berechnet werden müssen. Dies kann durch Standardverfahren nicht erreicht werden.

Transformation und Gewichtung bei der Regressionsanalyse

Die Methoden der Transformation und der Gewichtung stellen gängige Ansätze für die Parameterschätzung bei schiefen Verteilungen und heteroskedastischem Datenmaterial dar. Zunächst werden im folgenden als Grundlage für die Kennzahlberechnung die beiden Methoden etwas ausführlicher diskutiert.

Transformation beider Seiten (TBS)

Für die Kennzahlberechnung in dem vorliegenden Fall eignet sich oft die Methode der Varianzstabilisierung durch eine Transformation von Regressand und Regressor mit derselben Transformationsfunktion (Transformation beider Seiten, TBS). Mit dieser Methode gelingt es oft, sowohl näherungsweise eine Normalverteilung bzw. symmetrische Verteilung der Fehlervariablen als auch eine konstante Varianz zu erzielen. Nach der Varianzanalyse der transformierten Daten kann durch Rücktransformation auf die stochastischen Unsicherheiten der ursprünglichen Daten geschlossen werden.

Wie in Abschnitt 3.3.3 dargestellt, besitzt die Fehlervariable in den betrachteten Anwendungen eine Verteilung, die der Lognormalverteilung ähnlich ist. Diese Verteilung ist bei Auswertungen der Terminabweichung typisch (WAGNER & WARSCHAT 1994). In diesem Fall erzielen Varianten der Logarithmustransformation eine gute Verteilungskorrektur, aber auch Wurzeltransformationen bringen eine deutliche Verbesserung. Die Linearität der Regressionsfunktion bleibt in erster Näherung erhalten, wenn, wie hier der Fall, die Regressionsgerade annähernd durch den Koordinatenursprung geht.

Bild 8-3 zeigt die Auswirkung einer Wurzeltransformation auf die Verteilungsfunktion. In der Histogrammdarstellung ist zu erkennen, daß die Fehlervariable nach der Transformation annähernd symmetrisch verteilt und sogar recht gut an die Normalverteilung angepaßt ist. Die unteren beiden Plots sind graphische Testverfahren derselben Daten hinsichtlich Normalverteilung. Auch hier ist zu erkennen, daß die Daten nach der Transformation besser an die Normalverteilung angepaßt sind. Mathematische Tests hinsichtlich der Kriterien Exzeß (Wölbung) und Schiefe (vgl. HARTUNG 1995, S. 47ff) ergaben eine deutliche Abnahme der Schiefe von 1,5 auf 0,7, jedoch im Gegenzug eine geringfügige Zunahme des Exzesses von 4,5 auf 5,5. Hinsichtlich der Auswahl der Schätzverfahren für die Regressionsanalyse stellt jedoch die Schiefe das entscheidende Kriterium dar. Aus diesem Grund wird bei der Transformation auf die Reduktion der Schiefe der Schwerpunkt gelegt.

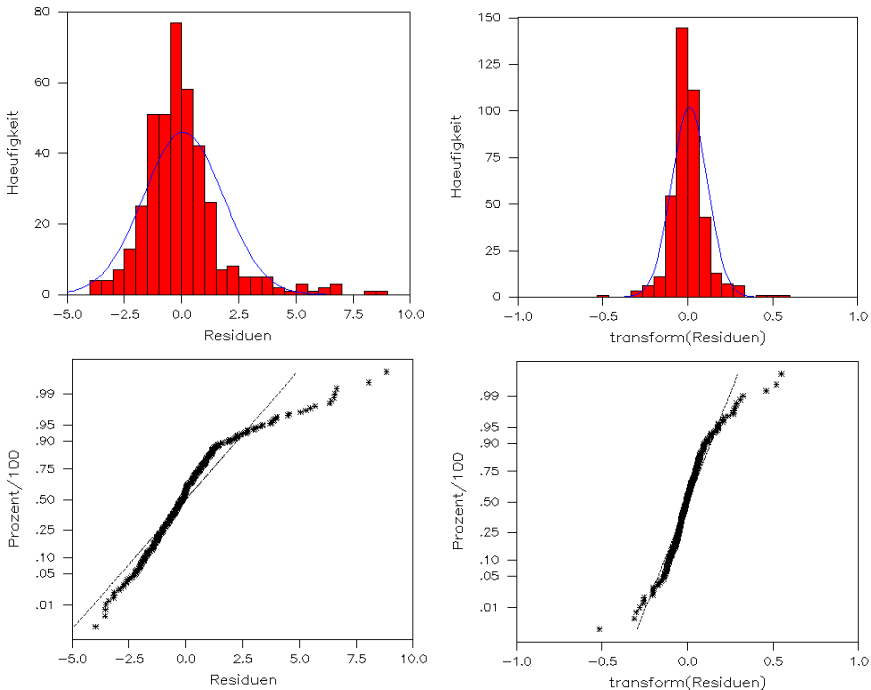


Bild 8-3: Wirkung der Transformation auf die Verteilung der Fehlervariablen:
1. Histogramm der Residuen, 2. Wahrscheinlichkeitstest

Neben der Verteilungskorrektur wird mit der Transformation beider Seiten häufig zugleich eine Varianzstabilisierung erreicht. In den hier beschriebenen Anwendungen haben sich Varianten der Wurzel- und Logarithmustransformation auch zur Varianzstabilisierung bewährt. Bild 8-4 zeigt die Wirkung der Varianzstabilisierung bei einer Wurzeltransformation. Nach der Transformation besitzt die ursprünglich heteroskedastische Fehlervariable eine näherungsweise konstante Varianz, die Daten sind also homoskedastisch. Eine geeignete Transformationsfunktion kann iterativ durch „Trial-and-Error“ ermittelt werden.

Die geschickte Wahl der Transformationsfunktion kann sowohl zu einer annähernden Normalverteilung der Fehlervariablen als auch zu einer konstanten Varianz führen. Die Wahl dieser Funktion wird von der Art der Verteilungsfunktion und der Varianzfunktion bestimmt (CARROLL & RUPPERT 1988, S. 161). Bei der exemplarischen Anwendung führten in manchen Fällen Varianten der Wurzel- und der Logarithmustransformation zu einer Varianzstabilisierung und einer akzeptablen Verteilungskorrektur der Daten. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, daß dies immer gelingt. Einen Ausweg bietet dann die Kombination der Methoden Transformation und Gewichtung.

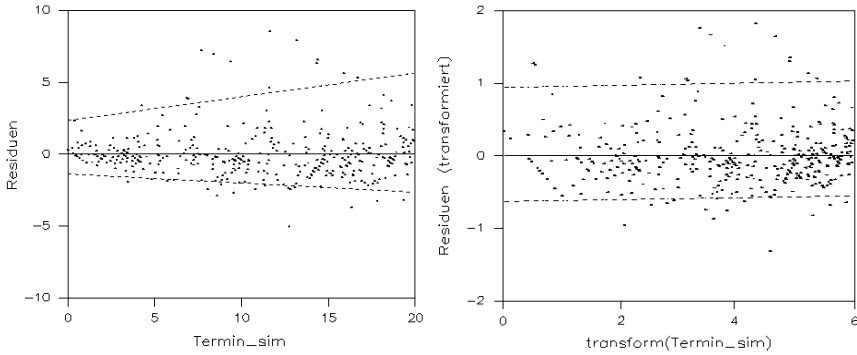


Bild 8-4: Wirkung der Varianzstabilisierung durch Transformation beider Seiten

Varianzstabilisierung durch Gewichtung

Gelingt mittels TBS zwar eine Verteilungskorrektur, jedoch nicht eine Varianzstabilisierung, so ist bei der Regressionsanalyse eine Gewichtung der Fehlerquadrate vorzunehmen (WLS). Weil die Gewichtungskoeffizienten in der Regel nicht bekannt sind, müssen diese geschätzt werden. In der praktischen Anwendung entspricht der Gewichtungskoeffizient w an einer Stelle x_0 dem Kehrwert der Varianz, d.h. $1/\sigma^2$, an der Stelle x_0 . Ein guter Schätzwert s^2 für σ^2 kann mittels Regression der quadrierten Residuen bestimmt werden. Das Verfahren ist empfindlich gegenüber Ausreißern. Für den Fall einer großen Wahrscheinlichkeit von Ausreißern in den Daten schlagen CARROLL & RUPPERT (1988, S. 81) ein alternatives Verfahren auf Basis der Absolutwerte der Residuen vor, das einen Schätzer s für σ ergibt. Bild 8-5 zeigt, wie mittels Regression der absoluten Residuen die Standardabweichung und damit die Gewichtungskoeffizienten geschätzt werden können.

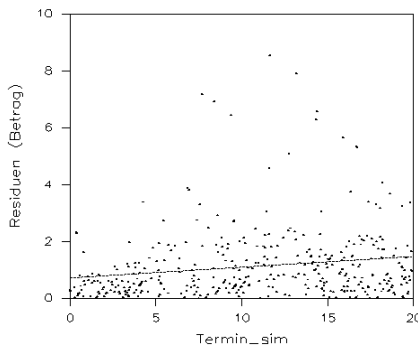


Bild 8-5: Schätzung der Standardabweichung durch Regression der absoluten Residuen

Doch ist zu beachten, daß zuverlässige Schätzer für die Parameter der Regressionsgeraden und damit auch die genauen Werte der Residuen zunächst nicht bekannt sind. Für diesen Fall wird ein iteratives Verfahren zur Bestimmung der Gewichtungskoeffizienten und der Regressionsgeraden vorgeschlagen (IWLS) (vgl. CUTHBERT & WOOD 1980, CARROLL & RUPPERT 1988, S. 13ff, S. 69f):

Schritt 1: Ermittlung eines vorläufigen Schätzers für die Parameter des Regressionsmodells mittels ungewichteter kleinste Quadrateschätzung

Schritt 2: Schätzung der Gewichtungskoeffizienten (s.o.)

Schritt 3: Ermittlung der gewichteten Schätzer der Parameter des Regressionsmodells mittels gewichteter kleinste Quadrateschätzung

Schritt 4: Aktualisierung der Parameter und Neuschätzung der Gewichtungskoeffizienten

Die Schritte 3 und 4 werden so oft wiederholt, bis das Schätzergebnis zufriedenstellend ist. In der Literatur findet man verschiedene Angaben über die Zahl der notwendigen Iterationsschritte. Studien haben jedoch gezeigt, daß der Unterschied vom ersten Iterationsschritt zum zweiten relativ groß sein kann. Mit weiteren Iterationsschritten nimmt er jedoch in der Regel sehr schnell ab, d.h. daß das Verfahren schnell konvergiert. CARROLL & RUPPERT (1988, S. 15) empfehlen, mindestens zwei Iterationen durchzuführen.

Eine detaillierte Diskussion der Parameterschätzung bei Heteroskedastizität und bei schiefen Verteilungen ist in WIEGERT (1980) und CARROLL & RUPPERT (1988) nachzulesen.

Behandlung von Ausreißern bei der Regression

Unter Ausreißern versteht man Werte, die sich weit außerhalb des Bereichs der anderen Beobachtungen befinden. Diese kommen entweder durch Sonderfälle, wie z.B. langen Störungen, oder durch Fehler bei der Datenakquisition zustande. Welche der beiden Ursachen tatsächlich vorliegt, ist meist alleine anhand der Daten nicht erkennbar.

Bei den Auswertungen hat sich gezeigt, daß die Qualität der Regressionsmodelle sehr stark von Ausreißern beeinträchtigt werden kann. Für den praktischen Einsatz ist es deswegen notwendig, die Methoden zur Regressionsanalyse robust zu gestalten. In der beschriebenen Anwendung wurden die Methoden durch das Verfahren des routinemäßigen Trimmens der Analysedaten robustifiziert (vgl. BÜNING 1991). Bei diesem Verfahren werden prinzipiell die am meisten vom Durchschnitt abweichenden Daten von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. In der Praxis hat sich bewährt, 5-10% der Daten durch Trimmen zu eliminieren (5-10%-Residuen) (Bild 8-6). Da bei der betrachteten Anwendung heteroskedastische Daten und eine schiefe Verteilung der Fehlervariablen vorliegen und dieser Charakter der Daten beim Trimmen nicht verfälscht werden soll, erfolgt die Elimination von Ausreißern im TBS-transformierten Datensatz. Mit dem getrimmten Datenbestand wird dann ein neues Regressionsmodell erstellt.

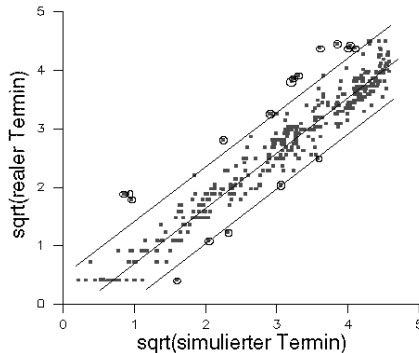


Bild 8-6: Robustheit durch routinemäßiges Trimmen

Robuste Verfahren zur Schätzung von Prognosestreifen

Im folgenden werden einige alternative Verfahren zur Schätzung von Prognosestreifen entwickelt. Ziel ist, daß die Verfahren robust, d.h. unempfindlich hinsichtlich der Erfüllung der klassischen Annahmen „Homoskedastizität“ und „Normalverteilung“ sind. Bei jeder Berechnungsalternative ist explizit angegeben, welche Annahmen für eine zuverlässige Schätzung erfüllt sein müssen.

Verfahren 1 ist eine einfache Methode zur näherungsweise Bestimmung von Prognosestreifen. Es hat sich gezeigt, daß bei großen Stichproben für die Praxis annehmbare Ergebnisse erzielt werden. Verfahren 2 liefert insbesondere bei kleinen Stichproben bessere Schätzergebnisse für die Prognosestreifen als Verfahren 1. Es erfordert allerdings auch einen höheren Rechenaufwand.

Verfahren 1: Empirisches Prognoseintervall bei großen Stichproben

Bei diesem Verfahren wird zunächst versucht, mittels der Methode der Transformation beider Seiten (TBS) sowohl eine Normalverteilung der Fehlervariablen als auch eine konstante Varianz zu erzielen. In diesem Fall werden für die transformierten Daten parallele, lineare Prognoselinien berechnet. Die Funktion der Prognoselinien wird dann rücktransformiert (vgl. Bild 8-7). Auf diese Weise erhält man die Funktion der nichtlinearen Prognoselinien. So wird es möglich, individuelle Aussagen über die Prognosestreue einzelner Aufträge zu treffen.

Für das Verfahren 1 existieren drei Berechnungsalternativen. Alternative 1 geht davon aus, daß sowohl die Verteilungskorrektur als auch die Varianzstabilisierung durch Transformation gelingt. Die Alternativen 2 und 3 beschreiben, in welcher Weise das Verfahren modifiziert werden muß, sofern die Annahmen hinsichtlich Normalverteilung und Homoskedastizität nicht erfüllt werden können.

Grundlage von Verfahren 1 ist die Möglichkeit, bei größeren Stichprobenumfängen die Grenzen eines Prognoseintervalls direkt aus den empirischen Beobachtungen zu ermit-

tel. Bei den hier betrachteten Konfidenzniveaus im Bereich von 0,80 bis 0,95 sollten die Stichproben allerdings einen Umfang von $n > 50$ Beobachtungen besitzen.

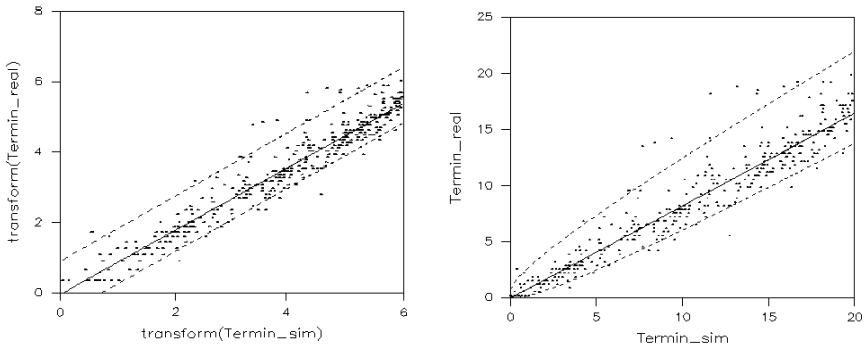


Bild 8-7: Regressionsmodell und Prognosestreifen vor und nach Rücktransformation

Zur Bestimmung des Intervalls werden die beobachteten Werte $x_{1..n}$ der Größe nach geordnet. Dann lautet das γ -Quantil allgemein folgendermaßen (vgl. BOSCH 1993, S. 23):

$$x_{\gamma} = \begin{cases} x_{(k)} & , \quad n \cdot \gamma \text{ nicht ganzzahlig} \\ \frac{1}{2}(x_{(k)} + x_{(k+1)}) & , \quad n \cdot \gamma \text{ ganzzahlig} \end{cases} \quad (1)$$

(k sei die auf $n \cdot \gamma$ folgende ganze Zahl.)

Alternative 1: homoskedastische symmetrisch verteilte Daten:

Für diese Berechnungsalternative werden Homoskedastizität sowie eine symmetrische Verteilung der Fehlervariablen im TBS-transformierten Datensatz angenommen. In erster Näherung sind die obere und untere Grenze des Prognosestreifens Parallelen zur Regressionsgerade mit jeweils gleichem Abstand. Der Abstand der Grenzlinien von der Regressionsgeraden wird folgendermaßen bestimmt:

1. Beträge der Residuen berechnen
2. Werte der Größe nach sortieren
3. Intervallgrenze gemäß (1) berechnen. Der Abstand der oberen und unteren Grenzlinie entspricht dem γ -Quantil.

Alternative 2: homoskedastische schief verteilte Daten:

Besitzt die Fehlervariable nach Varianzstabilisierung durch TBS-Transformation immer noch eine schiefe Verteilung, muß der Abstand der oberen und der unteren Grenze des Prognosestreifens individuell bestimmt werden. Hierzu werden die positiven und die negativen Residuen getrennt voneinander ausgewertet. Ansonsten entspricht die Vorgehensweise Alternative 1.

Alternative 3: heteroskedastische Daten:

Kann eine Varianzstabilisierung nicht erreicht werden, ist es möglich, den Prognosestreifen abschnittsweise zu schätzen (Patchen). Hierzu ist die x-Achse in 5 bis 10 gleich große Abschnitte aufzuteilen. Für jeden Abschnitt werden analog Alternative 1 oder 2 Abschnitte des Prognosestreifens geschätzt. Man erhält auf diese Weise Stützpunkte der Grenzlinien des Prognosestreifens. Die obere und untere Grenze des Prognosestreifens ergibt sich als Polygon durch diese Stützpunkte. Etwas robuster hinsichtlich Ausreißern in den einzelnen Abschnitten hat sich die Bestimmung der Grenzlinien als Regressionsgerade durch diese Stützpunkte erwiesen. Hierfür muß allerdings die Annahme erfüllt sein, daß die Varianz linear zu- oder abnimmt. Diese Annahme wird hier annähernd erfüllt.

Verfahren 2: Berechnung des Prognoseintervalls mit Hilfe der Standardabweichung σ

Das Verfahren 2 basiert auf einer Schätzung des Prognoseintervalls mit Hilfe der Standardabweichung σ . Das Verfahren berücksichtigt neben der Unsicherheit der individuellen Beobachtungen auch die Schätzunsicherheit der Parameter der Regressionsgeraden. Das Verfahren geht weder von der Annahme linearer Grenzlinien noch von homoskedastischen Daten aus. Es liefert auch bei relativ kleinen Stichproben zuverlässige Schätzergebnisse (vgl. HARTUNG 1995 (S. 582) und HEINHOLD & GAEDE 1979). Angenommen wird allerdings eine Normalverteilung der Fehlervariablen. Da dies nicht immer gewährleistet werden kann, wird in Alternative 2 erläutert, wie das Verfahren bei Verletzung dieser Annahme modifiziert werden muß.

Grundlage des Verfahrens ist die Kenntnis der Standardabweichung σ für jeden beobachteten Wert des Regressors x. Nach CARROLL & RUPPERT (1988, S. 80) und HARTUNG (1995, S. 585) kann σ recht gut mittels Regression der absoluten Residuen geschätzt werden. Der Erwartungswert der absoluten Residuen an jeder Stelle x_0 ist der Schätzer s der Standardabweichung σ .

Alternative 1: symmetrische Verteilung der Fehlervariablen

Das Prognoseintervall für y_0 an der Stelle x_0 mit der Trefferwahrscheinlichkeit γ wird dabei wie folgt beschrieben:

$$[\beta_0 + \beta_1 x_0 - D ; \beta_0 + \beta_1 x_0 + D] \quad (2)$$

β_0 und β_1 sind die Parameter des linearen Regressionsmodells. D berechnet sich nach der Formel:

$$D = s \cdot t_{n-2; 1-\gamma/2} \cdot \sqrt{1 + 1/n + (x_0 - \bar{x})^2 / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Dabei sind t die Quantile der Student-Verteilung. Die Werte für t sind tabellarisch in HARTUNG (1995, S. 892) erfaßt. Dort ist auch ein Verfahren zur Approximation der Werte angegeben, welches in einen Algorithmus zur Kennzahlberechnung implementiert werden kann. Der Prognosestreifen ergibt sich, wenn man an jeder Stelle x_0 ein Prognoseintervall berechnet.

Alternative 2: schiefe Verteilung der Fehlervariablen

Bei einer schiefen Verteilung der Fehlervariablen müssen wiederum die oberen und unteren Grenzen des Prognoseintervalls getrennt berechnet werden. Es wird dabei eine näherungsweise Normalverteilung des positiven und des negativen Teils der Residuenverteilung angenommen. Für die positiven und die negativen Residuen werden getrennt Schätzwerte s_o und s_u für die Standardabweichungen σ_o und σ_u berechnet.

Das Prognoseintervall kann nun wie folgt beschrieben werden:

$$[\beta_0 + \beta_1 x_0 - D_u ; \beta_0 + \beta_1 x_0 + D_o] \quad (4)$$

mit

$$D_u = s_u \cdot t_{n-2, 1-\gamma/2} \cdot \sqrt{1 + 1/n + (x_0 - \bar{x})^2 / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5a)$$

und

$$D_o = s_o \cdot t_{n-2, \gamma/2} \cdot \sqrt{1 + 1/n + (x_0 - \bar{x})^2 / \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5b)$$

Diese Methode liefert allerdings nur einen unsicheren Schätzwert, weil die oben beschriebene Normalverteilungsannahme für den oberen und unteren Teil der Verteilung nur ungenau erfüllt wird. Beispielsweise weicht der Exzeß mit Werten zwischen 4,5 und 5,5 signifikant von 0 ab. Aus diesem Grund sollte versucht werden, eine Beseitigung der Verteilungsschiefe durch TBS zu erreichen, damit Alternative 1 angewendet werden kann. Wenn Alternative 2 angewendet werden muß, sollten keine Quantile kleiner als 0,8 berechnet werden, weil die Abweichung der vorliegenden Verteilung von der Normalverteilung in Richtung des Erwartungswertes zunimmt.

Verfahrensauswahl

Für die spätere Implementierung muß ein geeignetes Verfahren zur Berechnung der Prognosestreifen ausgewählt werden. Grundsätzlich sind beide Verfahren geeignet. Die Anforderungen aus Abschnitt 5.2, beispielsweise daß das Verfahren einfach anzuwenden und möglichst universell einsetzbar sein sollte, werden allerdings am besten von Verfahren 2 erfüllt. Außerdem liefert das Verfahren 2 auch bei kleineren Stichproben bessere Schätzergebnisse als Verfahren 1. Der Nachteil des höheren Rechenaufwandes kann aufgrund der Implementierung der Methode in ein Rechnerwerkzeug in Kauf genommen werden. Die Berechnungsalternative 1 für Verfahren 2 liefert die besseren Ergebnisse. Diese verlangt zwar eine Normalverteilung der Fehlervariablen, setzt jedoch keine Homoskedastizität voraus.

Alle Verfahren sind bedingt empfindlich hinsichtlich Ausreißern, wobei speziell bei Verfahren 2 für die Schätzung von σ ein relativ unempfindliches Verfahren vorgestellt wurde. Bei der Regressionsanalyse wurde zur Ausreißerbehandlung die Methode des routinemäßigen Trimmens vorgeschlagen. Hier ist es allerdings das Ziel, Varianzschätzungen für individuelle Aufträge durchzuführen. Routinemäßiges Trimmen aller Werte mit großen Residuen würde zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen. Entfernt werden dürfen und müssen nur diejenigen Ausreißer, die auf Meßfehlern beruhen, weil diese nicht die Charakteristik der realen Anlage widerspiegeln. Für jedes außergewöhnliche Residu-

um ist individuell zu entscheiden, ob es auf einem Meßfehler beruht und eliminiert werden muß. Da diese Vorgehensweise sehr aufwendig wäre, wird vorgeschlagen, vorbeugende Maßnahmen zu treffen, um die Qualität der zu erfassenden Daten zu sichern und Meßfehler weitestgehend auszuschließen. Hierzu zählen aus dem Qualitätsmanagement bekannte Maßnahmen wie die Einführung von Erfassungsbögen oder die Information und Motivation der beteiligten Mitarbeiter.

8.1.3 Methoden zur Prüfung der Voraussetzungen für die Kennzahlberechnung

Die Analysen in Abschnitt 3.3 haben gezeigt, daß bei allen Anwendungen in erster Linie die Normalverteilungsannahme und die Annahme konstanter Varianz geprüft werden müssen. Die Ausprägungen dieser beiden Charakteristika können sich im laufenden Betrieb ändern. Aufgrund der durchgeführten Analysen wird davon ausgegangen, daß die Annahme, daß keine Autokorrelation vorliegt in den betrachteten Anwendungen stets erfüllt wird. Auch wird davon ausgegangen, daß das Regressionsmodell linear ist, bzw. durch Transformation linearisiert wurde. Diese Annahmen müssen einmalig im Rahmen der Inbetriebnahme des Systems bei einer neuen Produktionsanlage aber nicht im laufenden Betrieb getestet werden.

Die Erfüllung der Normalverteilungsannahme und der Annahme konstanter Varianz muß im Rahmen der Erstellung des Regressionsmodells sowie für die Schätzung der Prognosestreifen geprüft werden. Grundsätzlich sind Hypothesentests von graphischen Testverfahren zu unterscheiden. Hypothesentests liefern ein numerisches Ergebnis, das abhängig von dessen Wert als Ablehnung oder Bestätigung der Hypothese interpretiert wird. Damit eignen sich diese Tests für eine automatische Überprüfung der Annahmen. Neben den Hypothesentests haben sich in der Praxis graphische Testverfahren bewährt. Diese Testverfahren sind leichter durch den Laien anzuwenden. Die Testergebnisse sind anschaulicher und lassen sich schneller interpretieren. Sie stellen geringere Anforderungen an die Qualifikation des Bedieners und fördern eine pragmatische Vorgehensweise bei der Modellgenerierung. Alle Tests sollten von einem Bediener mit statistischen Grundkenntnissen durchgeführt werden.

Methoden zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme

Beide Kennzahlen besitzen bei einer Normalverteilung den Wert 0. Die Normalverteilungsannahme läßt sich mittels Verteilungstests, wie beispielsweise dem Kolmogoroff-Smirnov-Test oder dem χ^2 -Test, prüfen. (HARTUNG 1995, S. 182ff). Hinweise auf Verletzung der Normalverteilungsannahme liefert auch die Bestimmung von Schiefe und Exzeß. Graphische Testverfahren sind beispielsweise eine Darstellung der Verteilung als Histogramm oder ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm (vgl. Bild 8-3).

Methoden zur Prüfung auf Homoskedastizität

Homoskedastizität läßt sich mit dem sogenannten F-Test prüfen (JUDGE ET AL. 1980). Dieser Test benötigt allerdings alle übrigen Voraussetzungen des klassischen Modells, wie beispielsweise Normalverteilung. Für den Fall der Verletzung der Normalverteilung

lungssannahme wird der Gipfel-Test (Peak Test) vorgeschlagen (GOLDFELD & QUANDT 1965, S. 539). CARROLL & RUPPERT (1988, S. 29ff) schlagen graphische Testverfahren vor, wie beispielsweise das Residuenplot (vgl. Bild 3-10).

8.1.4 Methoden zur Visualisierung der stochastischen Informationen

Da das Gantt-Diagramm in Leitständen einen großen Verbreitungs- und Bekanntheitsgrad besitzt, ist es sinnvoll auf diese Darstellung aufzubauen. Aus der Literatur bekannt sind bisher vergleichbare Darstellungen von Mittelwerten und Intervallschranken. Diese Darstellungsform liefert jedoch keine Aussage über weitere statistische Kennzahlen, wie z.B. die Schiefe oder den Exzeß der Verteilungsfunktion. Aufbauend auf diese Darstellung wurden der Ansätze entwickelt, diese zusätzliche Information dem Leitstandpersonal zugänglich zu machen. Die graphische Darstellung der stochastischen Informationen kann prinzipiell folgendermaßen erfolgen:

- Verteilungskurven
- Balken mit Marken
- Balken mit Helligkeitsstufen oder -verläufen
- Balken mit Farbstufen oder -verläufen

Verteilungskurven eignen sich nur bedingt für eine Integration in das Gantt-Diagramm, weil sie einen erheblichen Platzbedarf beanspruchen. Balken mit Marken ermöglichen die Darstellung zusätzlicher Informationen, beispielsweise die Lage eines Mittelwerts oder Quantilswerts. Problematisch wird jedoch die Darstellung mehrerer Werte, weil die einzelnen Marken relativ klein sein sollten und somit nur schwer voneinander unterschieden werden können. Helligkeits- und Farbstufen oder -verläufe bieten den Vorteil einer kompakteren Visualisierung der darzustellenden Informationen. Farbstufen und -verläufe besitzen gegenüber Helligkeitsstufen und -verläufen den Vorteil, daß die Signalwirkung bestimmter Farben für weitere Informationen genutzt werden kann. Beispiele hierfür sind die Darstellung von Eingriffsgrenzen oder das Hervorheben kritischer Aufträge. (vgl. Bild 8-8).

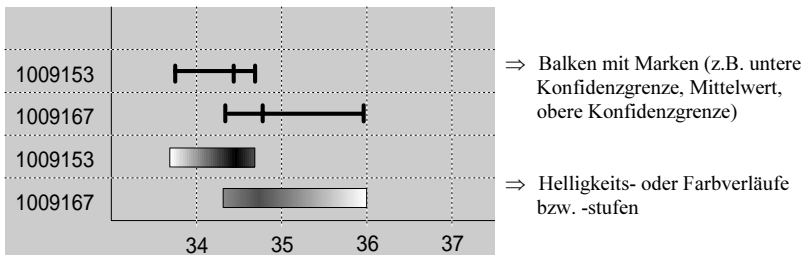


Bild 8-8: Alternative Darstellungsformen für Konfidenzbereiche

8.2 Konzeption der Funktionsmodule zur Fehlerkompensation, Auswertung und Darstellung

Im folgenden wird ein Konzept vorgestellt, mit dem eine automatische Kompensation der systematischen Fehler von Simulationsergebnissen sowie die Schätzung der Prognoseunsicherheit vorgenommen wird. Das Konzept berücksichtigt die spezifischen Anforderungen des Pflichtenheftes (vgl. Abschnitt 5.2.4). Die Fehlerkompensation erfolgt nicht im Simulationsmodell sondern durch ein nachgeschaltetes Korrekturglied (Bild 8-9). Dieses ist in der Lage, sich an veränderte Situationen, wie beispielsweise andere Störungs- oder Belastungszustände des Produktionssystems, selbständig anzupassen.

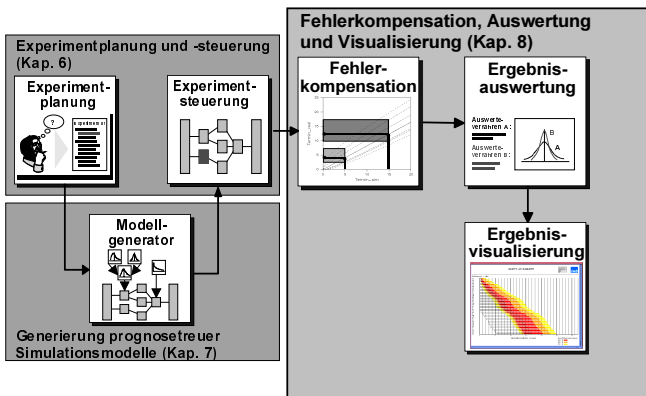


Bild 8-9: Funktionsmodul zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung

Das Konzept gliedert sich in folgende drei Hauptmodule: „Daten- und Modellmanagement“, „Berechnung“ sowie „Visualisierung“. Das Modul „Berechnung“ enthält die drei Kernfunktionen „Modellerstellung“, „Prognosekorrektur“ und „Modellbewertung“. In diese wurden Methoden und statistische Verfahren implementiert, die im Abschnitt 8.1 beschrieben sind. Bild 8-10 zeigt die anwendungsorientierte modulare Struktur des Moduls zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung.

Im folgenden werden zunächst die drei Kernfunktionen des Moduls „Berechnung“ erläutert. Daran schließen sich eine Diskussion des Daten- und Modellmanagements, insbesondere der Datenstruktur, mit der Korrekturmodelle in der Datenbank abgelegt werden, sowie eine Beschreibung der Datenbankschnittstelle an. Zum Abschluß folgen Darstellungen des Visualisierungsmoduls und der Benutzeroberfläche.

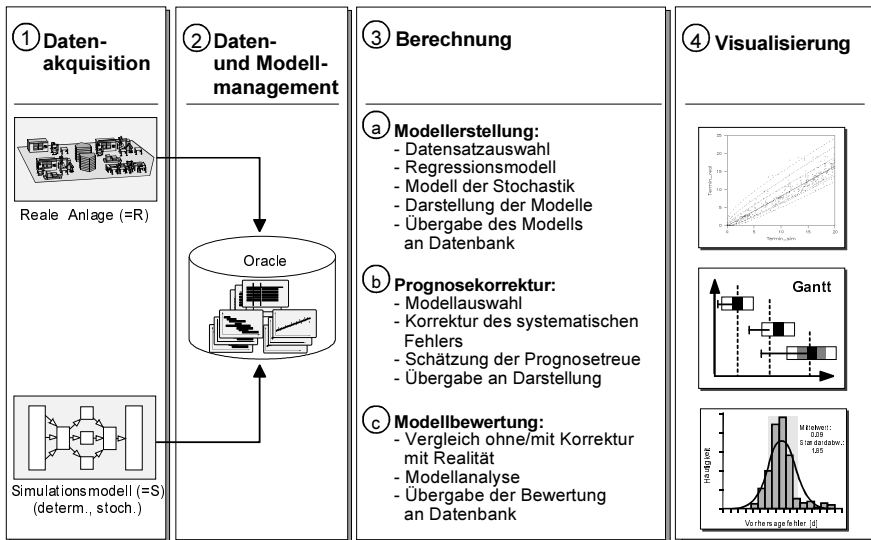


Bild 8-10: Anwendungsorientierte modulare Struktur des Moduls zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung

8.2.1 Berechnungsmodul

Modellerstellung: Berechnung des statistischen Modells

Ausgehend von dem Konzept, ein statistisches Modell zu erstellen, welches sowohl das Korrekturmodell als auch stochastische Informationen beinhaltet, wurde zunächst ein Modellierungsablauf entworfen. Bei der Berechnung und Bewertung kommen spezielle statistische Verfahren zur Anwendung, die detailliert in Abschnitt 8.1 dargestellt sind. Während des Ablaufs werden alle Informationen für eine vollständige Beschreibung des statistischen Modells ermittelt. Dem Bediener werden Informationen bereitgestellt, die ihm eine objektive Beurteilung seines Modellierungsergebnisses ermöglichen.

Beispielsweise wird sukzessive die Erfüllung der relevanten Annahmen für die Berechnung der Modellparameter geprüft. Der Bediener hat in jedem Modellierungsschritt die Möglichkeit, aus einer Liste von Maßnahmen, wie beispielsweise Transformationen oder Gewichtungen, auszuwählen, um die Erfüllung der Voraussetzungen für die Parameter- und Kennzahlenberechnung zu verbessern (vgl. Abschnitt 8.1). Im Anschluß an jede Maßnahmenauswahl erfolgt eine erneute Bewertung hinsichtlich der Erfüllung der Annahmen. Bild 8-11 zeigt den Ablauf der Modellerstellung.

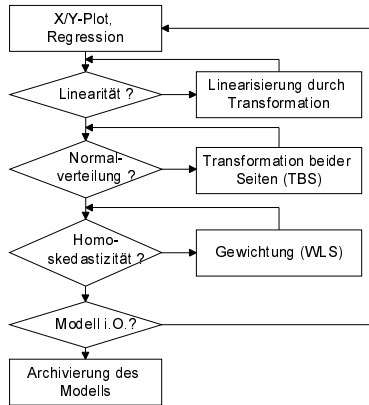


Bild 8-11: Vorgehensweise bei der Erstellung des Korrekturmodells

Mit dem Abschluß der Modellierung quittiert der Bediener den Modellierungsvorgang und speichert das Modell ab. Ergebnis ist das Regressionsmodell und die Prognosestreifen verschiedener Konfidenzniveaus (Bild 8-12).

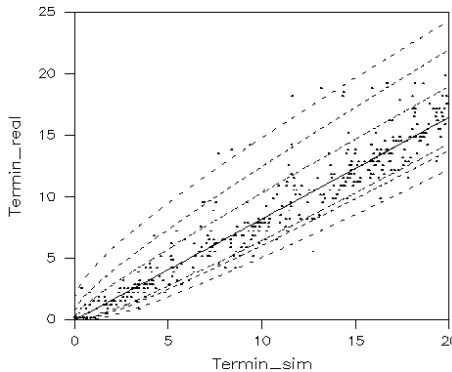


Bild 8-12: Modell mit Prognoselinien unterschiedlicher Konfidenzniveaus

Vor dem Abspeichern in der Datenbank wird dieses Regressionsmodell verdichtet. Alle für den späteren Einsatz unwesentlichen Daten werden entfernt, beispielsweise auch die Originaldatensätze. Abgespeichert werden lediglich die für die Korrektur und die Prognose-schätzung notwendigen Daten. Dies sind die Parameter der Regressionsfunktion und der Konfidenzlinien sowie weitere Modellierungsspezifika, wie beispielsweise die gewählte Transformationsfunktion oder die Funktion der Gewichtungsfaktoren (vgl. Abschnitt 8.1.2).

Prognosekorrektur

In diesem Kernmodul wird die Korrektur des systematischen Fehlers der Simulationsergebnisse sowie die Berechnung der zu erwartenden Prognosestreue vorgenommen und für die Visualisierung vorbereitet.

Dazu wird ein gültiges statistisches Modell auf die Ergebnisse eines Simulationslaufs angewendet. Das heißt, die Simulationsergebnisse werden zunächst entsprechend der Transformationsfunktion des statistischen Modells transformiert. Anschließend wird die Regressionsfunktion des Modells angewendet. Zum Abschluß werden die Daten entsprechend rücktransformiert. Analog werden die Konfidenzbereiche aus dem statistischen Modell übernommen und für jeden Prognosewert individuell berechnet. Als Ergebnis liegen zu jedem Prognosewert der korrigierte Wert sowie die Intervallgrenzen zu einem oder mehreren Konfidenzniveaus vor. Die Vorgehensweise bei der Korrektur wird durch Bild 8-13 verdeutlicht: Ein Produktionsauftrag wird beispielsweise in der Simulation am Termin 5 fertig. Durch die Prognosekorrektur verschiebt sich der Termin auf den Wert 4. Der graue Bereich gibt die Unsicherheit der Prognose an. In diesem Fall wird der Auftrag mit 90%iger Sicherheit zwischen den Terminen 2,5 und 7,5 fertig. Ein Auftrag, der simuliert am Termin 15 fertig werden soll, wird wahrscheinlich am Termin 12,5 fertig korrigiert, bei einem 90%-Konfidenzbereich von 10 bis 17,5.

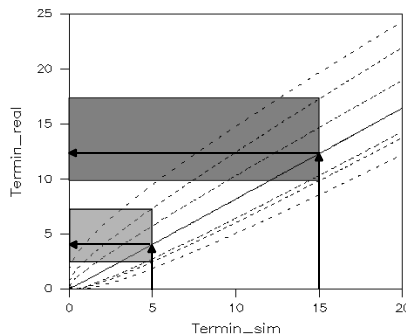


Bild 8-13: Prognosekorrektur und Schätzung der stochastischen Unsicherheiten

Modellbewertung

Eine erste, prinzipielle Bewertung, wie sicher Termine mittels Simulation und anschließender Prognosekorrektur vorhergesagt werden können, liefert das Bestimmtheitsmaß R^2 der Regressionsanalyse (vgl. Abschnitt 8.1.1). Ein Wert nahe 1 besagt, daß die korrigierten Prognosen eine geringe Unsicherheit besitzen. Wird bei der Modellierung ein Bestimmtheitsmaß $R^2 < 0,5$ festgestellt, macht der Ansatz der Prognosekorrektur keinen Sinn, weil die Unsicherheiten der Prognose zu groß wären. In diesem Fall muß das Simulationsmodell validiert oder die Stabilität der Produktionsprozesse verbessert werden. Diese erste Bewertung und der Gültigkeitsbereich des Korrekturmodells können bereits

bei der Erstellung des statistischen Modells vorgenommen werden und sind feste Eigenschaften des Korrekturmodells. Sie werden mit dem Modell zusammen gespeichert und geben dem Anwender der Prognosekorrektur Auskunft darüber, wie groß die Unsicherheiten der Prognosen mindestens sein werden.

Weiterhin erfolgt im Bewertungsmodul eine Bewertung des Korrekturergebnisses im nachhinein durch einen Vergleich von unkorrigierten und korrigierten Simulationsergebnissen mit real erzielten Ergebnissen. So kann die Gültigkeit des Korrekturmodells für eine aktuelle Korrekturaufgabe abgeschätzt werden. Diese Bewertung stellt einen Hinweis hinsichtlich der Gültigkeit des Modells für die Korrektur weiterer Simulationsdatensätze dar.

Der Test erfolgt graphisch durch den Vergleich von Histogrammen, die die erzielte Prognoseschärfe visualisieren. Weicht der Mittelwert der Prognoseabweichung deutlich von null ab oder ist die Standardabweichung zu groß, deutet dies auf ein nicht valides Korrekturmodell hin. Bild 8-14 zeigt zwei dieser Histogramme. Das erste Histogramm stellt die Bewertung der Prognostreue ohne Korrektur, das zweite die Bewertung nach Anwendung eines validen Korrekturmodells dar. Erkennbar ist, daß mit dem Modell eine sehr gute Korrektur erzielt werden konnte. Der Mittelwert des Prognosefehlers wurde auf nahezu 0 verschoben und die Standardabweichung wurde um 17 % reduziert.

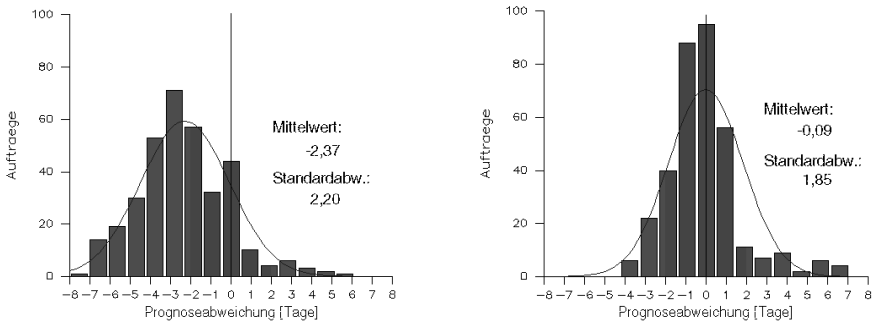


Bild 8-14: Bewertung von Korrekturmodellen durch Vergleich der Prognostreue der korrigierten mit den nicht korrigierten Terminen

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung der Modellgüte ist der Vergleich der Parameter des angewendeten Korrekturmodells mit den Parametern eines Regressionsmodells, das aus dem aktuellen Datensatz konstruiert wird. Die Parameter eines validen Korrekturmodells sollten weitgehend mit den Parametern des neuen Modells übereinstimmen. Bild 8-15 zeigt ein älteres Korrekturmodell und ein aktuelles Regressionsmodell in einer Grafik. Die Abweichung der Modelle ist signifikant, weil sowohl eine Verschiebung der Regressionsgeraden als auch eine deutliche Veränderung der Steigung stattgefunden hat. Das Korrekturmodell ist nicht für die Korrektur aktueller Daten geeignet. Für diesen Test können vom Benutzer individuelle Toleranzgrenzen eingestellt werden, durch die definiert wird, ab wann eine Abweichung signifikant ist.

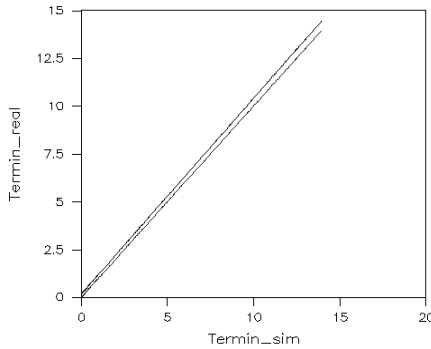


Bild 8-15: Bewertung von Korrekturmodellen durch Parametervergleich

Zeigt die Bewertung keine nennenswerte Ergebnisverbesserung durch die Anwendung der Korrektur, ist das Korrekturmodell in der Datenbank entsprechend zu kennzeichnen. Auf diese Weise wird der Benutzer vor der Anwendung eines nicht validen Modells gewarnt.

Zugleich sollte unbedingt analysiert werden, warum das Modell keine guten Korrekturergebnisse mehr liefert. In einem ersten Schritt wird geprüft, ob sich lediglich der systematische Fehler der Simulation geändert hat. Zu diesem Zweck wird ein Regressionsmodell mit aktuellen Daten erstellt und mittels Berechnung des Bestimmtheitsmaßes bewertet. Ist das Bestimmtheitsmaß nahe dem Wert 1, kann das neue Modell zur Prognosekorrektur herangezogen werden. Ist das Bestimmtheitsmaß deutlich kleiner als 1, läßt sich mit dem Regressionsmodell die Ergebnisstreuung nicht unter ein akzeptables Maß reduzieren. In diesem Fall sind in der Regel zu große strukturelle Abweichungen von Simulationsmodell und realer Anlage oder unsichere Produktionsprozesse die Ursache. Es müssen unbedingt entweder eine Anpassung des Simulationsmodells oder eine Stabilisierung der Produktionsprozesse vorgenommen werden.

Wie oft solche Maßnahmen erforderlich sind, hängt von der Änderungsdynamik des Systems ab. Die Modelle einer Produktionsanlage, deren Struktur sich nicht ändert und auf der stets die gleichen Produkte mit den gleichen Ressourcen gefertigt werden, müssen in der Regel nicht angepaßt werden.

8.2.2 Daten- und Modellmanagement

Beschreibung statistischer Modelle

Das statistische Korrekturmodell wird nach seiner Erstellung und einer ersten Bewertung strukturiert in einer Datenbank abgespeichert. Ein Korrekturmodell wird im wesentlichen durch folgende Informationen beschrieben:

- Transformationsfunktion zur Linearisierung
- Transformationsfunktion für das TBS-Verfahren (vgl. Abschnitt 8.1.2)
- Gewichtungskoeffizienten für das WLS-Verfahren (vgl. Abschnitt 8.1.2)
- Parameter des Regressionsmodells
- Parameter der Grenzlinien der Prognosestreifen und die zugehörigen Konfidenzniveaus

In Bild 8-16 ist ein Korrekturmodell mit stochastischen Informationen graphisch dargestellt.

Parameter des stochastischen Modells:

- Transformation Linearisierung: $x' := x$
- Transformation TBS: $x' := x^2, y' := y^2$
- Gewichtung WLS: $w(x) = 1$
- Parameter Regression: $\beta_0 = 0,561; \beta_1 = 0,752$
- Parameter Prognosestreifen:
(für alle gilt: $\beta_1 = 0,752$)
 $k_{80}: \beta_{0u} = -69,2; \beta_{0o} = 48,2$
 $k_{90}: \beta_{0u} = -88,2; \beta_{0o} = 119,8$
 $k_{95}: \beta_{0u} = -120,2; \beta_{0o} = 191,1$

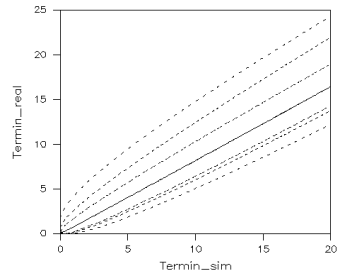


Bild 8-16: Korrekturmodell mit stochastischen Informationen

Um zu gewährleisten, daß ein gültiges Korrekturmodell für einen aktuellen Datensatz von Simulationsergebnissen in der Datenbank gefunden werden kann, muß das Korrekturmodell charakterisiert werden. Die Charakterisierung des Modells umfaßt folgende Informationen:

- Identifizierungsnummer des statistischen Modells
- Betrachtetes Produktionssystem
- Klassifikation des Betriebszustands
- Verwendetes Simulationsmodell einschließlich Variante und Szenario
- Startzeitpunkt des für die Modellierung verwendeten Simulationslaufs
- Identifizierungsnummer des Simulationsdatensatzes
- Modellierter Prognosehorizont
- Bestimmtheitsmaß
- Modellhistorie (Gültigkeitsdauer, Bewertung der erzielten Korrekturergebnisse)

Auf diese Weise wird der Systembediener in die Lage versetzt, schon bei der Auswahl des Korrekturmodells und des statistischen Modells die zu erwartende Güte der Korrektur und die Prognoseschärfe abzuschätzen. Die Gefahr, daß ein ungültiges Modell oder ein Modell, welches in der Vergangenheit nur unzureichende Ergebnisverbesserungen bewirkt hat, ausgewählt wird, wird so reduziert.

Die Klassifikation typischer Betriebszustände verbessert die Wiederverwendung von Modellen, wenn es gelingt, das Modell mit einem bestimmten Betriebszustand in Verbindung

zu bringen. Ein Betriebszustand wird durch typische, relevante und leicht meßbare Merkmale beschrieben, wie beispielsweise Systemlast, Fehlerhäufigkeit, durchschnittlicher Ausbildungsstand der eingesetzten Mitarbeiter, Schichtbetrieb oder klimatische Randbedingungen. Abhängig vom betrachteten Produktionssystem können weitere Einflußfaktoren für die Auswahl eines Korrekturmodells relevant sein. Aufschluß über die entscheidenden Faktoren liefert eine Korrelationsanalyse.

8.2.3 Visualisierung

Bei der Visualisierung wird die Qualifikation des Systembedieners berücksichtigt. Das Visualisierungsmodul stellt diese Darstellungstechniken bereit. Für die Visualisierung der prognostizierten Termine und der zugehörigen Prognosestreue eignet sich eine Kombination aus den Visualisierungsalternativen 2 und 4 aus Abschnitt 8.1.4, d.h. Balken mit Begrenzungsmarken und Farbverläufen. Dabei stellt ein schwarzer Balken die Durchlaufzeit eines Auftrags dar. Zwei Begrenzungslinien am Anfang und am Ende markieren den Starttermin sowie den prognostizierten Fertigstellungstermin. Dieser Endterminmarke ist ein Balken mit einer Farbabstufung hinterlegt, der die stochastische Unsicherheit der Terminprognose visualisiert. Es wurden drei Farbstufen für die Konfidenzniveaus „bis 80%“ (rot), „80 bis 90%“ (orange) und „90 bis 95%“ (gelb) gewählt. Bild 8-17 zeigt den Aufbau und die Informationen im erweiterten Gantt-Diagramm.

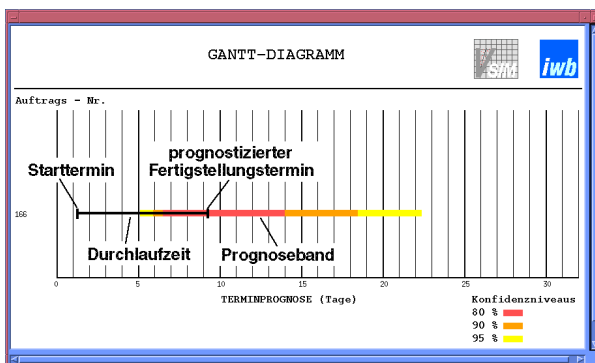


Bild 8-17: Informationen im erweiterten Gantt-Diagramm

Bei einer arbeitsganggenauen Betrachtung der Produktionsabläufe ist ein Belegungsplan zur Darstellung geeignet. Analog zu erweiterten Gantt-Chart wurde ein erweiterter Belegungsplan entworfen. Dabei werden die Belegungstermine der Ressourcen durch Aufträge um Konfidenzinformationen ergänzt. Dieser erweiterte Belegungsplan ist insbesondere zur Optimierung kritischer Ressourcen geeignet, wie beispielsweise Engpässen, bei denen eine Rüstzeitoptimierung vorgenommen werden soll. Auch bei Ressourcen mit Los- oder Chargen-Prozessschritten, die einen hohen Einfluß auf die DLZ der Aufträge haben, wie beispielsweise Wärme- oder Oberflächenbehandlung, ist der Einsatz sinnvoll.

Weitere Auswertungen betreffen die übrigen logistischen Kennzahlen, wie die Durchlaufzeit oder den Umlaufbestand. Zur Darstellung dieser Kennwerte sind Histogramme geeignet. Um auch hier den Unsicherheitsbereich der Prognose darzustellen, sind diese Verteilungs-Diagramme durch maximale und minimale Grenzverteilungen zu ergänzen. Insbesondere bei der Maximierung des Durchsatzes einer Fertigungslinie oder im Rahmen der Engpaßoptimierung spielt der Pufferbestand eine wesentliche Rolle. Hier wird die übliche Darstellung des Pufferbestands in einem Histogramm mit minimalen und maximalen Bestandsgrenzen um eine Unsicherheits-Information in Form von zusätzlichen Schranken ergänzt. Weitere Darstellungstechniken können entsprechend dem Einsatzzweck bei Bedarf hinzugefügt werden.

Wichtig bei allen Darstellungen ist, daß der Verdichtungsgrad der dargestellten Information und die Darstellungsvariante für die untersuchte Fragestellung voreingestellt, aber auch interaktiv an die Benutzerbedürfnisse anpaßbar sind. Beispielsweise ist der Verdichtungsgrad skalierbar bzw. zoombar. Falls zu einer Information alternative Darstellungstechniken existieren, kann zwischen diesen gewechselt werden.

8.3 Ablauf der Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung

Ein Simulationsexperiment kann stochastisch oder deterministisch sein. Ergebnisse eines deterministischen Simulationslaufs werden direkt der Fehlerkompensation übergeben. Ergebnisse aus stochastischen Experimenten müssen zunächst statistisch ausgewertet werden, bevor auch sie ggf. einer Fehlerkompensation unterzogen werden. Für die Fehlerkompensation werden die in Abschnitt 8.1 beschriebenen Verfahren eingesetzt. Diese Verfahren werden vor der Berechnung der Kennzahlen und der Visualisierung auf die vorausgewerteten Rohdaten der Simulation angewendet (Bild 8-18).

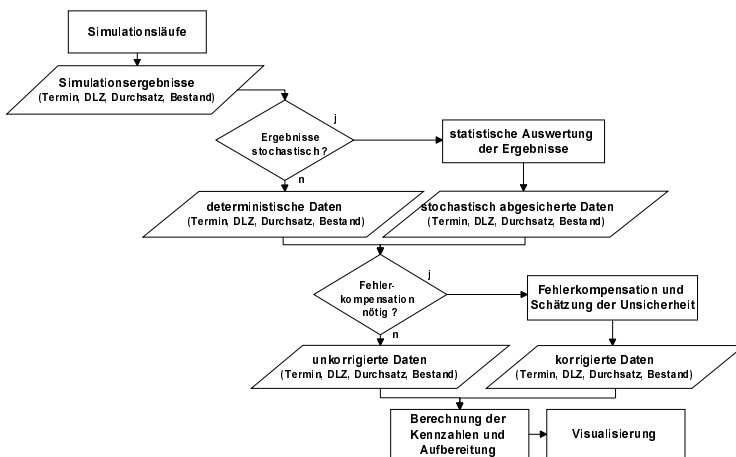


Bild 8-18: Ablauf und Ergebnisse der Auswertung und Fehlerkompensation

Der Fokus der Betrachtung liegt auf den Terminen, und zwar in erster Linie auf den Fertigstellungsterminen von Aufträgen in der Produktion. Aus den korrigierten Terminen können die korrigierten Durchlaufzeiten direkt abgeleitet werden. Über die Gesetzmäßigkeiten der Betriebskennlinientheorie lassen sich ausgehend von den korrigierten Durchlaufzeiten Rückschlüsse auf die logistischen Kenngrößen Bestand und Durchsatz bzw. Auslastung ziehen (WIENDAHL 1987). Auch ist es möglich, aus Datenprotokollen bzw. Zugangs-/Abgangsauswertungen der korrigierten Ereignisse oder Belegungsplänen den Bestand und die Auslastung der Ressourcen zu berechnen.

Entsprechend der Experimentkonfiguration werden die definierten Auswertungen der Simulationsergebnisse und Kennzahlberechnungen durchgeführt. Hierfür werden die geeigneten Verfahren als Bausteine zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse werden abschließend in einer dem Simulationsziel entsprechenden Form visualisiert.

8.4 Zusammenfassung

Für die statistische Auswertung und Fehlerkompensation müssen die statistischen Besonderheiten stochastischer Simulationsergebnisse berücksichtigt werden. Diese Besonderheiten erfordern den Einsatz spezieller statistischer Verfahren.

Es wurde der Ansatz der Fehlerkompensation entwickelt. Der Ansatz erlaubt es, ausgehend von Vergangenheitsdaten ein statistisches Modell des systematischen Prognosefehlers zu ermitteln und die zu erwartenden stochastischen Unsicherheiten einer Prognose abzuschätzen. Diese Informationen können dann zur Fehlerkompensation und zur Schätzung der Unsicherheit einer aktuellen Prognose genutzt werden. Hierbei kommen die speziell entwickelten statistischen Verfahren zum Einsatz.

An die Fehlerkompensation schließt sich die Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse an. Bei der Auswertung werden aus einem Baukasten statistischer Verfahren diejenigen ausgewählt, die den statistischen Besonderheiten gerecht werden. Zur Visualisierung der Ergebnisse wurden spezielle Visualisierungstechniken entwickelt, die auf die üblichen Visualisierungstechniken bei den Fragestellungen der betriebsbegleitenden Simulation aufbauen und dem Bediener die Interpretation der statistischen Ergebnisse erleichtern.

9 Realisierung und beispielhafte Anwendung

Im folgenden wird zunächst dargestellt, wie das Prognosesystem in ein Werkzeug zur Produktionsoptimierung eingebunden wird. Als Beispiel für ein Werkzeug zur Produktionsoptimierung wird die simulationsbasierte Produktionsregelung gewählt (vgl. ZETLMAYER 1994). Insbesondere wird die informationstechnische Integration des Prognosesystems beschrieben. Im Anschluß wird durch eine beispielhafte Anwendung der Komponenten des Prognosesystems deren grundsätzliche Einsatztauglichkeit nachgewiesen sowie Nutzen und Aufwand seines Einsatzes abgeschätzt. Zum Abschluß erfolgt eine kritische Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf den Einsatz im Rahmen der Produktionsoptimierung sowie theoretische Überlegungen zur Verallgemeinerung der Ansätze.

9.1 Einbindung in ein Planungssystem zur Produktionsoptimierung

Das System zur simulationsbasierten Produktionsregelung besteht aus zwei Hauptmodulen, dem Optimierungsmodul und dem Prognosemodul (Bild 9-1). Das Prognosemodul dient dazu, Produktionspläne zu testen und Prognosen über das zukünftige Verhalten der Produktionsanlage bzw. der logistischen Kennzahlen zu erstellen. An dieser Stelle wird das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Prognosesystem implementiert. Das Optimierungsmodul besitzt die Aufgabe, Produktionspläne zu erstellen und das Prognoseergebnis hinsichtlich der Erfüllung logistischer Zielvorgaben zu bewerten.

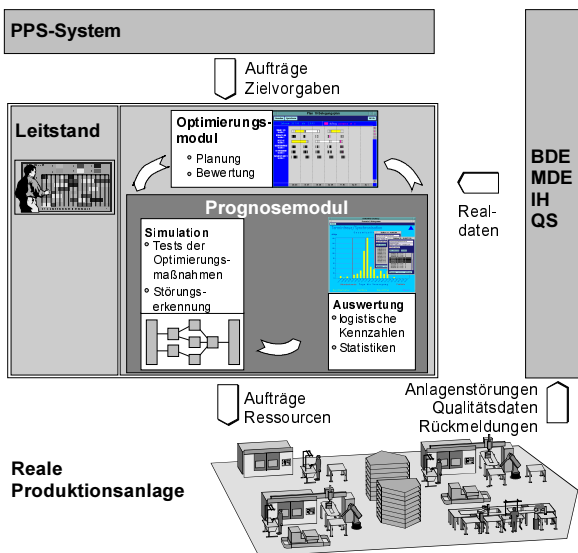


Bild 9-1: Einbindung des Prognosesystems in ein Werkzeug zur Produktionsoptimierung am Beispiel der simulationsbasierten Produktionsregelung

Das Produktionsregelungssystem besitzt verschiedene Schnittstellen zu weiteren Informationsverarbeitungssystemen. Beispielsweise werden über eine Schnittstelle zu einem übergeordneten PPS-System Daten hinsichtlich der Produktionsaufträge, wie Arbeitspläne und Produktionsprogramm, sowie logistische Zielvorgaben eingelesen. Aus BDE- und MDE-Systemen werden Informationen über den aktuellen Zustand der Produktionsanlage, wie der Bearbeitungszustand von Aufträgen und der Status von Betriebsmitteln, erfaßt. Instandhaltungs- und CAQ-Systeme stellen stochastische Informationen über Maschinenausfälle und Qualitätsmängel bereit. Aus dem Produktionsregelungssystem gehen Steuerungsvorgaben in die Produktion, beispielsweise zu dezentralen Leitständen oder BDE-Terminals. Diese Steuerungsvorgaben können terminierte Aufträge und Arbeitsgänge oder Arbeitszeiten von Ressourcen sein.

Außerdem bestehen Schnittstellen zwischen den Modulen. Das Optimierungsmodul übergibt einen Produktionsplan an das Prognosemodul. Dieser Produktionsplan besteht, ebenso wie ein Produktionsplan für die reale Produktionsanlage, aus Steuerungsvorgaben für Aufträge und Ressourcen. Nach Auswertung der Prognose übergibt das Prognosemodul Kennzahlen zur Bewertung des Produktionsplans an das Optimierungsmodul zurück. Beispielsweise werden Terminprognosen einzelner Aufträge und statistische Kennzahlen, wie die durchschnittliche Termintreue, übergeben.

Benutzerinteraktionen sind im Rahmen des Prognosemoduls bei der Experimentplanung, bei der Modellierung und bei der Auswertung erforderlich, wobei das Prognosemodul Hilfestellung bietet. Bei der Optimierung sind interaktive und automatische Ansätze denkbar (vgl. MARTIN 1998).

9.2 Realisierung der Module des Prognosesystems

Wesentliche Bausteine des Konzepts wurden zur Überprüfung der Funktion und der Leistungsfähigkeit prototypisch implementiert. Beispielsweise wurde für die Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung ein Softwareprototyp entwickelt und anhand realer Datensätze aus einem Industriebetrieb getestet. Weiterhin wurde der Prototyp eines Modellgenerators sowie eine Simulationsbausteinbibliothek realisiert. Die speziellen Modellierungstechniken wurden bei der Modellierung der Simulationsbausteine testweise angewendet und validiert. Das Experimentplanungssystem wurde als abgeschlossenes Konzept entwickelt und hinsichtlich seiner Funktion verifiziert. Zusätzlich wurden Prototypen der Benutzeroberflächen realisiert.

Im folgenden wird die Realisierung der drei zentralen Module des Konzepts, des Experimentplanungssystems, der Simulationsumgebung mit Modellgenerator und des Moduls zur Fehlerkompensation, Auswertung und Visualisierung, dargestellt.

9.2.1 Modul zur Experimentplanung und Experimentrahmen

Das Experimentplanungssystem wurde als Datenbanksystem realisiert. Dem System liegt die relationale Datenbank (MS Access) zugrunde, in der für verschiedene Fragestellungen der Produktionsoptimierung die einzelnen Wahlmöglichkeiten der Experimentaspekte und deren Abhängigkeiten sowie die Baumstruktur der Auswahlhierarchie hinterlegt sind.

Der Anwender kann das System über eine komfortable Benutzeroberfläche steuern. Über diese Oberfläche werden alle Benutzerinteraktionen durchgeführt. Bei der Definition des Experiments werden schrittweise nach dem in Abschnitt 6.3 beschriebenen Ablauf die Experimentaspekte festgelegt. Nach jedem Schritt werden die Filter und Vorbelegungen des Folgeschritts festgelegt. Die Dateneingabe erfolgt über Maskenfelder. In die Maske werden auch die Steuerungsfunktionen für den Modellgenerator, den Experimentkonfigurator, die Initialisierung, Experimentsteuerung und Auswertung integriert. In weiteren Fenstern werden das Simulationsmodell animiert und die Ergebnisse der Simulation dargestellt. Bild 9-2 zeigt die prototypenhaft realisierte Benutzeroberfläche.

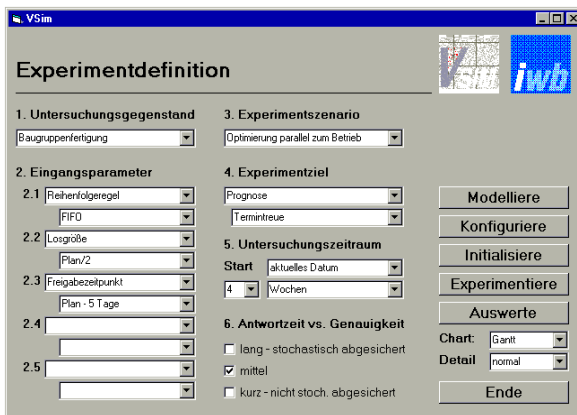


Bild 9-2: Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung / Experimentrahmen

9.2.2 Modellgenerator und Simulationsumgebung

Die Simulationsumgebung wurde mit Hilfe des Simulationssystems SiMPLE++ realisiert. Dieses wurde ausgewählt, weil es sehr leistungsfähig und flexibel ist und über sehr offene Programm- und Datenschnittstellen verfügt. Die Schnittstellen bieten die Möglichkeit, Eingangsinformationen aus anderen Systemen einzulesen und die Simulation über das externe Experimentplanungs- und -steuerungssystem zu steuern. Die Simulationsumgebung besteht aus einem Modellbaukasten und Methoden zur Modellkonfiguration und -initialisierung sowie zur Datensammlung.

Über Datenbank- und Filetransfer-Schnittstellen werden zunächst die für die Modellierung und Initialisierung notwendigen Daten aus Planungs- und Betriebsdatenbanken, dem PPS-System und/oder dem Leitstandsystem akquiriert. Im Falle des realisierten Prototypen wurde eine Anbindung zum System SAP R/3 implementiert. Ein weiteres Kernstück der Datenakquisition und -aufbereitung ist eine Methode, die aus den eingelesenen Daten die Übergabetabellen (Strukturtable, Arbeitsplantabelle, Systemlasttable und Initialisierungstabelle) generiert (vgl. Abschnitt 7.5.3).

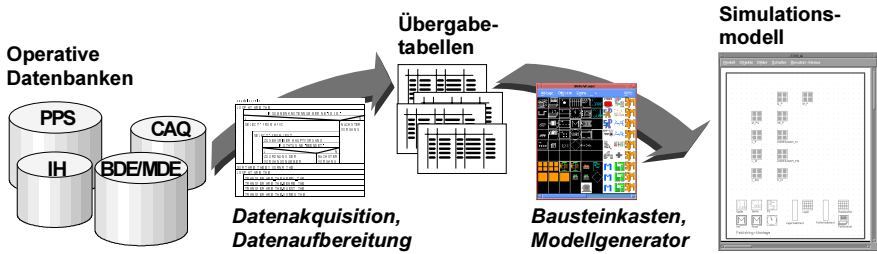


Bild 9-3: Systemarchitektur der Simulationsumgebung mit Datenakquisition, Datenaufbereitung, Bausteinkasten und Modellgenerator

Das Simulationsmodell wird aus Universal-Bausteinen generiert, die nach dem in Abschnitt 7.3 beschriebenen Ansatz modelliert wurden. Wichtige Universal-Bausteine sind das Hauptfeld, der globale Fertigungssteuerungsbaustein (FS), das Teilfeld sowie die Arbeitsstation. Das Hauptfeld stellt den Rahmen für ein Modell dar. Es enthält die globale Fertigungssteuerung und Auswertebausteine sowie simulationsspezifische Bausteine, wie Quelle, Senke, Ereignisverwalter und Methoden zum Rücksetzen und Initialisieren des Modells. Im Hauptfeld wird das Modell eines Produktionssystems aufgebaut. Der FS-Baustein enthält Methoden zur Verwaltung und übergreifenden Steuerung der Arbeitszeiten und Aufträge.

Der Baustein Teilfeld bildet die zweite hierarchische Ebene des Modells ab, d.h. beispielsweise einen Werkstattbereich oder eine Insel. Das Teilfeld enthält in erster Linie Materialflußschnittstellen sowie lokale Steuerungsmethoden. In diesem Baustein werden die einzelnen Arbeitsstationen aufgebaut. Die Arbeitsstationen stellen die Bausteine auf unterster Detaillierungsebene dar. Sie kommen in den Varianten Bearbeitungszelle, Montagezelle und Prüfplatz vor. Die beiden Strukturvarianten können über Parameter entweder als automatische Maschine oder als manueller Arbeitsplatz konfiguriert werden. Auch die Arbeitsstationen enthalten lokale Steuerungsmethoden, wie beispielsweise Sensoren und Aktoren, mit denen die Anbindung der Steuerung an den Materialfluß realisiert werden kann.

Durch den Modellgenerator wird das Simulationsmodell aus diesen Bausteinen aufgebaut. Dabei wird als erster Schritt die Strukturtafel abgearbeitet. Zunächst werden die Bausteine der Klasse „Teilfeld“ in das Hauptfeld des Modells eingefügt. In den Teilfeldern wiederum werden Arbeitsstationen erzeugt und entsprechend ihrer Eigenschaften parametrisiert. Im Anschluß wird die Ablaufsteuerung des Simulationsmodells implementiert. Dies beinhaltet die Generierung von Arbeits- und Schichtplänen sowie die Aktivierung und Vernetzung der globalen und lokalen Steuerungsbausteine. Die Arbeitsplan- und die Systemlasttafel werden eingelesen und im Baustein „Globale Ablaufsteuerung“ abgespeichert. Außerdem wird die Initialisierungstabelle eingelesen und das Simulationsmodell mit den enthaltenen Daten initialisiert. Die Modellinitialisierung wird vom Modul „Experimentsteuerung“ vor jedem Simulationslauf aufgerufen. Bild 9-4 zeigt exemplarisch ein automatisch generiertes Modell einer Inselfertigung.

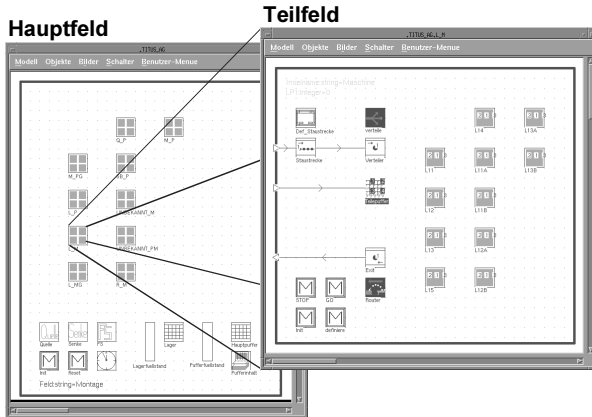


Bild 9-4: Beispiel eines automatisch generierten Modells einer Inselfertigung

9.2.3 Modul zur Auswertung, Fehlerkompensation und Visualisierung

Die Methoden aus Kapitel 8 wurden in ein Rechnerwerkzeug implementiert, welches den Simulationsanwender bei der Aufgabe unterstützt, die Güte von Simulationsergebnissen zu bewerten und ihn in die Lage versetzt, die zu erwartenden Abweichungen zwischen Modell und Realität besser abzuschätzen. Ein weiterer Schwerpunkt war die Implementierung der spezifischen Auswerte- und Visualisierungsmethoden. Im folgenden werden wichtige Implementierungsaspekte dieses Rechnerwerkzeugs dargestellt.

Benutzeroberfläche

Um den zielführenden und logischen Ablauf innerhalb der drei Hauptmodule zu verbessern und eine einfache Bedienung zu ermöglichen, wurde für dieses Modul eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt. Diese führt den Benutzer modulübergreifend und innerhalb der Teilmodule. Die Benutzeroberfläche stellt das Verbindungsglied der Teilmodule dar. Von ihr aus werden die einzelnen Teilmodule des Werkzeugs angesteuert. Außerdem zeigt sie dem Benutzer zur Laufzeit wesentliche Informationen, Kontrollkommentare und Systemmeldungen an. Bild 9-5 zeigt die Benutzeroberfläche des entwickelten Werkzeugs.

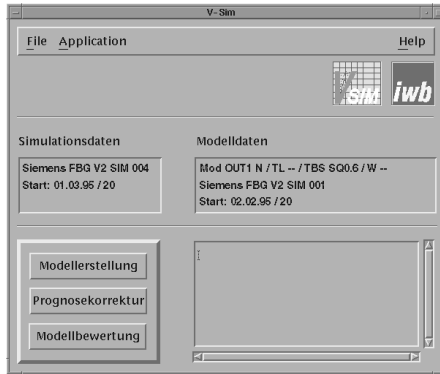


Bild 9-5: Die Benutzeroberfläche des Moduls zur Fehlerkompensation

Berechnungsmodul

Das Berechnungsmodul wurde als Programm mit der prozeduralen Programmiersprache C realisiert. Das Programm führt durch den Modellierungsprozeß wie in Abschnitt 8.2.1 beschrieben. Aus dem Programm werden spezielle Statistik- und Visualisierungsfunktionen eines kommerziellen Statistikwerkzeugs aufgerufen. Die Benutzerinteraktion erfolgt über die beschriebene Benutzeroberfläche. Das eingesetzte Statistikwerkzeug „Statit“ verfügt über eine umfangreiche Bibliothek statistischer Funktionen sowie über leistungsfähige Programm- und Datenschnittstellen, die eine komfortable Anbindung an die anderen Module des Prognosesystems ermöglichten.

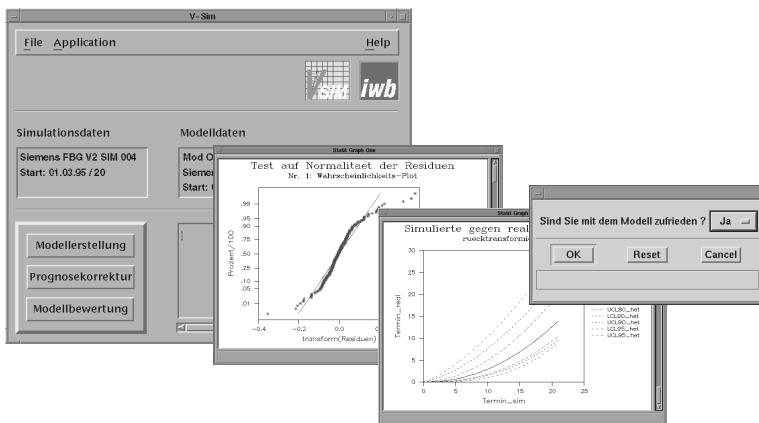


Bild 9-6: Darstellung von Informationen bei der Parameter- und Kennzahlberechnung

Zur Überprüfung der Annahmen bei der statistischen Modellierung werden vorzugsweise graphische Testverfahren eingesetzt, weil diese für Statistik-Laien in der Regel besser zu verstehen sind. Bild 9-6 zeigt, wie während der Modellierung dem Bediener verschiedene graphische Informationen, wie Wahrscheinlichkeitstests, Streudiagramme und Regressionsmodelle, bereitgestellt werden. Zum Abschluß der Modellierung wird das statistische Modell in einer Datenbank archiviert.

Das Programm nimmt auch die Prognosekorrektur und die Bewertung des statistischen Modells vor. Für die Prognosekorrektur wird ein für den aktuellen Anwendungsfall geeignetes statistisches Modell aus der Datenbank entnommen. Die Auswahl eines geeigneten Modells erfolgt anhand der Modellklassifizierung und -bewertung. Im Anschluß wird die Kompensationsfunktion, wiederum mit Hilfe der Funktionen der Statistiksoftware, auf den aktuellen Simulationsdatensatz angewendet. Es folgen die Berechnung und Aufbereitung der Kennzahlen. Sowie neue reale Datensätze vorliegen, kann der Systembediener ein statistisches Modell im nachhinein bewerten. Hier werden vor allem die Visualisierungsfunktionen der Statistiksoftware, wie Histogramme und Streudiagramme eingesetzt.

Visualisierungsmodul

Im Anschluß an die Prognosekorrektur werden die korrigierten Prognosewerte und die Konfidenzintervalle dargestellt. Wie bereits erläutert, wurde hier die klassische Gantt-Chart-Darstellung um eine Visualisierung der Terminunsicherheit erweitert. Bild 9-7 zeigt ein exemplarisches Gantt-Diagramm mit Terminprognosen für individuelle Aufträge.

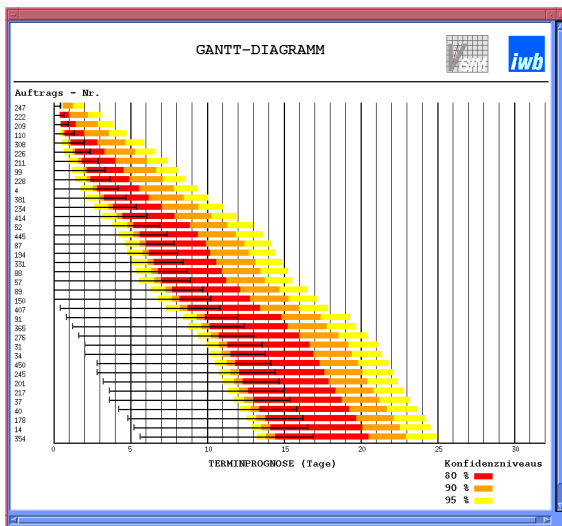


Bild 9-7: Gantt-Diagramm mit Terminprognosen für individuelle Aufträge

Darüber hinaus bietet das Visualisierungsmodul weitere Visualisierungstechniken, wie Histogramme, Streudiagramme und graphische Verteilungstests. Die Skalierung der Diagramme paßt sich automatisch an die darzustellenden Daten an. Der Bediener hat die Möglichkeit, bestimmte Bereiche vergrößert darzustellen. Das Visualisierungsmodul kann im Bedarfsfall um weitere Visualisierungen erweitert werden.

Realisierung der Datenbankkopplung

Das Ziel einer hohen Praxistauglichkeit erfordert angesichts der großen Anzahl von Analysedatensätzen, die bei Industrieanwendungen anfallen, eine leistungsfähige Datenhaltung. Aus diesem Grund wurde das Modellmanagement mittels einer Datenbank realisiert. Bei der Implementierung der Datenbank wurde auf eine relationale Datenstruktur Wert gelegt, weil relationale Datenbanken einen hohen Verbreitungsgrad in Industrieunternehmen besitzen. Für die prototypische Realisierung des Moduls wurde eine Oracle-Datenbank eingesetzt. Die Realisierung der Datenbank machte die Implementierung von Programmen zur Datenaufbereitung notwendig, deren Aufgabe es ist, Datensätze für die statistische Analyse zusammenzustellen. Dies hat den Vorteil, daß das System sehr flexibel eingesetzt werden kann, weil die bislang weitgehend manuelle Datenaufbereitung entfällt.

Für die Anbindung des Systems an neue Industrieanwendungen müssen die Datenbankzugriffe angepaßt werden, was allerdings eine einmalige Maßnahme darstellt. Ein weiterer Vorteil der Datenbankkopplung ist die komfortablere Möglichkeit, Korrekturmodelle zu archivieren und zu suchen.

9.3 Beispielhafte Anwendung

Das entwickelte Konzept wurde bereits in einer frühen Entwicklungsphase mit verschiedenen Industriepartnern diskutiert, um eine Bewertung des Systems aus Sicht der potentiellen Anwender zu erhalten. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde insbesondere ein Abgleich hinsichtlich des Informationsbedarfs der Anwender, der Informationsdarstellung (Visualisierung) und der Systembedienung vorgenommen.

Zum Abschluß der Arbeiten wurden der Prototyp und die entwickelten Konzepte exemplarisch angewendet und ihre Funktion und Wirkung getestet. Die Oberfläche des Experimentplanungs- und -steuerungssystems wurde als Prototyp realisiert und im Rahmen von Demonstrationen und Interviews mit positivem Ergebnis auf Akzeptanz geprüft (vgl. Kapitel 6). Außerdem wurde ein Softwareprototyp der automatischen Modellgenerierung und -konfiguration programmiert. Unter Laborbedingungen wurde grundsätzlich die Validität der entwickelten Modellierungsansätze und die Plausibilität der erzielten Ergebnisse nachgewiesen (vgl. Kapitel 7).

Das für das Gesamtkonzept zentrale Modul zur Auswertung, Fehlerkompensation und Visualisierung wurde als Softwarewerkzeug realisiert (vgl. Kapitel 8). Das Modul wurde anhand von realen Daten der Produktionsanlage B, der flexiblen Fließfertigung für elektronische Baugruppen, getestet. Ziel war es nachzuweisen, ob das Modul in der Lage ist, den systematischen Prognosefehler und die stochastische Unsicherheit der Prognosen

unter praktischen Bedingungen zu analysieren. Außerdem galt es festzustellen, bis zu welchem Zeithorizont sinnvolle Prognosen erstellt werden können. Zweites Ziel des Tests war es, die Funktion und Wirkung der Prognosekorrektur und der Visualisierung zu prüfen. Zum Abschluß wurde der Aufwand für die Anwendung des Moduls und die Akzeptanz bei den potentiellen Anwendern bewertet.

Es hat sich gezeigt, daß das Modul auch unter Praxisbedingungen einen erheblichen Nutzen besitzt. Im folgenden sind die Ergebnisse des exemplarischen Einsatzes mit realen Daten und unter Praxisbedingungen dargestellt.

9.3.1 Erstellung der statistischen Modelle: Analyse und Darstellung der systematischen Prognosefehler und der realen Anlagenstochastik

Das entstandene System ist in der Lage, die systematischen Prognosefehler und die reale Anlagenstochastik zu analysieren und darzustellen. Hierfür wird das Teilmodul Modellerstellung des Berechnungsmoduls verwendet. Bei der Erstellung der statistischen Modelle werden die realen Datensätze den Ergebnissen deterministischer Simulationsläufe gegenübergestellt. Die im Anschluß an die Regressionsanalyse berechneten Prognosestreifen spiegeln die reale Anlagenstochastik in dem betrachteten Zeitraum wider.

In diesem Zusammenhang läßt sich auch die Frage beantworten, ab welchem Simulationshorizont die Analyse der Prognosefehler und damit auch der Ansatz der Prognosekorrektur (vgl. Abschnitt 8.2) sinnvoll ist. Prinzipiell lassen sich alle Prognoseergebnisse eines Simulationslaufs mit einem Korrekturglied, welches hinreichend sorgfältig modelliert wurde und valide ist, verbessern. Bei der Modellierung der Korrekturglieder ist folgendes zu beachten: Verwendet man für die Regressionsanalyse einen Datensatz mit einem sehr kurzen Prognosehorizont, so können in der Regel die Parameter der Regression nicht zuverlässig geschätzt werden. Dies liegt daran, daß bei kleinen betrachteten Zeitabschnitten Störungen zu relativ großen Unschärfen führen. Damit verschlechtert sich der Korrelationskoeffizient r und das Bestimmtheitsmaß R^2 der Regression, welches angibt, wie gut der Zusammenhang zwischen Regressor und Regressand mit dem Regressionsmodell beschrieben werden kann (vgl. Abschnitt 8.1.1). Deswegen ist bei jeder Modellierung eines Korrekturglieds das Bestimmtheitsmaß der Regression zu prüfen. Es sollte nicht kleiner als 0,5 sein. Bei kleineren Werten für R^2 ist der Zusammenhang von realen und simulierten Terminen sehr schwach. Die Prognosen werden ab diesem Prognosehorizont zu unsicher. Zusätzlich wirkt sich negativ aus, daß in kleinen Zeitabschnitten auch weniger Werte beobachtet werden können. In den betrachteten Anwendungen konnten hinreichend gute Korrekturglieder erst ab Prognosehorizonten von ca. drei Tagen modelliert werden. Um eine bestmögliche Güte der Korrekturmodelle zu erreichen, sollten jedoch auch für kurze Planungshorizonte Regressionsmodelle herangezogen werden, die auf den Ergebnissen längerer Simulationsläufe, d.h. in der Größenordnung von 10-20 Tagen, basieren. Längere Prognosehorizonte bringen wiederum das Problem mit sich, daß die Prognoseunsicherheit zu groß wird.

Beachtet werden muß jedoch, daß der Gültigkeitsbereich des Korrekturglieds nicht überschritten wird. Das ist beispielsweise der Fall, wenn das Regressionsmodell unzulässigerweise über den Prognosehorizont der für die Modellierung herangezogenen Simulati-

onsdaten hinaus extrapoliert wird. Die Charakteristik des Modells jenseits des gültigen Prognosehorizonts ist nicht abschätzbar. Beispielsweise ist es denkbar, daß eine nichtlineare Modellcharakteristik, bei kurzen Planungshorizonten nicht festgestellt werden kann und erst bei längeren Prognosehorizonten ins Gewicht fällt.

9.3.2 Prognosekorrektur, Auswertung und Visualisierung

Im Teilmodul Prognosekorrektur wird auf Basis eines validen Korrekturmodells eine Kompensation des systematischen Fehlers sowie eine Schätzung der Prognosetreue individueller Fertigungsaufträge vorgenommen. Um die Wirksamkeit der beiden zentralen statistischen Methoden, Regressionsanalyse und Varianzanalyse, zu testen, wurden Experimente in unterschiedlichen Betriebsphasen des Produktionssystems durchgeführt. Ausgewählt wurde eine quasistatische Phase, eine Phase eines Betriebspunktwechsels und eine dynamische Betriebsphase. Während der quasistatischen Betriebsphase wurde ein Zeitraum untersucht, innerhalb dessen nur kleinere Änderungen des Betriebspunkts durchgeführt wurden. Im zweiten Betriebsfall wurde ein Wechsel der Systemlast sowie strukturelle Änderungen beim Produktionssystem betrachtet. Während der dynamischen Betriebsphase wurde das System bei häufigen Störungen oder Betriebspunktwechseln der Produktionsanlage getestet.

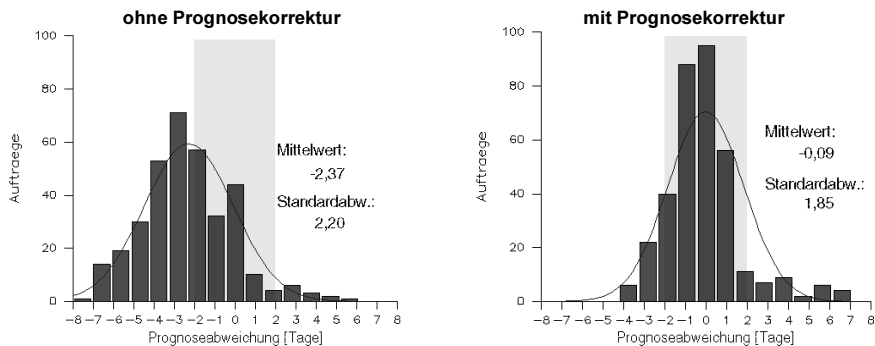


Bild 9-8: Gegenüberstellung der Prognosetreue nicht korrigierter und korrigierter Simulationsergebnisse bei quasistatischem Betrieb

Zunächst sind die Ergebnisse der quasistatischen Betriebsphase dargestellt. Bild 9-8 zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung zweier Auswertungen der Prognosetreue, und zwar zuerst ohne Prognosekorrektur und dann mit Prognosekorrektur. Es ist erkennbar, daß durch die Korrektur der Mittelwert der Prognoseabweichung von -2,37 auf -0,09 deutlich verbessert werden konnte. Die Unsicherheit der Prognose, gemessen in der Standardabweichung, reduzierte sich wesentlich von 2,20 auf 1,85. Wird ein Toleranzband von +/- zwei Tagen zugrundegelegt, wird die Verbesserung der Vorhersagetreue noch deutlicher. In der linken Grafik liegen 47% der Aufträge im Toleranzband, in der rechten Grafik da-

gegen 85%. Die Auswertung bezieht sich auf einen Prognosehorizont von 20 Arbeitstagen. Bei 10 Tagen Prognosehorizont betrug die Vorhersagetreue nach der Prognosekorrektur über 93%.

Die Wirkung des Korrekturglieds ist in der Phase eines Betriebspunktwechsels deutlich geringer. Der Grad der Prognoseverbesserung hängt von der Geschwindigkeit des Wechsels ab. Wenn kein statistisches Modell der neuen Betriebsituation in der Modelldatenbank vorhanden ist, kann bei einem schnellen Wechsel die Wirkung der Prognosekorrektur auf null absinken oder sogar zu einer Verschlechterung der Prognose führen. Im Anschluß eines Zeitraums in der Länge des Prognosehorizonts nach einer solchen Betriebspunktänderung wird jedoch das statistische Modell neu parametrisiert. Hat das Simulationsmodell durch die Änderungen nicht seine strukturelle Validität eingebüßt, sind mit Hilfe der Prognosekorrektur dann wieder zuverlässige Prognosen möglich.

Bei häufigen Störungen und Betriebspunktwechseln ist der Ansatz der Prognosekorrektur nur bedingt geeignet. Nur wenn das Produktionssystem zwischen bekannten und wiederkehrenden Störungs- bzw. Betriebszuständen wechselt, ist es möglich, für verschiedene dieser Zustände statistische Modelle in einer Datenbank bereitzuhalten und zur Prognosekorrektur in der jeweiligen Betriebsphase zu nutzen.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, daß sich mit dem Korrekturglied bei einem statischen Systembetrieb, bzw. bei kleineren und langsamen Betriebspunkt- oder Strukturänderungen, sehr gute bis gute Ergebnisverbesserungen erzielen lassen. Bei sehr dynamischem Systemverhalten, insbesondere bei einem schnellen und größeren Wechsel des Betriebspunkts oder bei häufigen oder starken Änderungen der Struktur des Produktionssystems, ist die Wirkung der Prognosekorrektur begrenzt. Die Güte der Prognosekorrektur hängt davon ab, ob gültige statistische Modelle dieser dynamischen Betriebsituationen in der Datenbank bereitgehalten und gefunden werden können.

9.3.3 Bewertung des Aufwandes und der Akzeptanz

Der Zusatzaufwand für die Erstellung der Prognosen ist sehr gering. Das System erfordert nur wenige Benutzerinteraktionen und geringe Rechenzeit für die Prognosekorrektur. Das System ist so ausgelegt, daß die Aufgaben der Fehlerkompensation und der Abschätzung der Prognosetreue ohne Einsatz von Experten unmittelbar vom Planungs- oder Steuerungspersonal durchgeführt werden können. Bei diesen Vorgängen sind lediglich statistische Grundkenntnisse erforderlich, die leicht im Rahmen einer Einführung vermittelt werden können. Damit ist der Bediener in der Lage abzuschätzen, ob die Fehlerkompensation zu besseren Prognosen führt oder ob nur ungenaue Prognosen erzielt werden können. Bei sehr stabilen und beherrschten Produktionssystemen können diese beiden Aufgaben sogar im Automatikmodus betrieben werden, so daß keine Interaktionen mit dem Bediener erforderlich sind. Im Falle einer Verschlechterung der Prognosetreue alarmiert eine implementierte Warnfunktion das Leitstandpersonal.

Der Aufwand für die Erstellung eines statistischen Modells beträgt wenige Minuten. Da die statistischen Modelle in der Modelldatenbank archiviert werden, können sie für mehrere Prognosen wiederverwendet werden. Für die Erstellung der statistischen Modelle sowie für die nachträgliche Bewertung des Prognoseergebnisses werden vom Bediener

Kenntnisse über die Anforderungen und Restriktionen der implementierten statistischen Methoden gefordert. Das entwickelte Rechnerwerkzeug führt den Anwender jedoch durch einen vorgegebenen Ablauf von Analyse-, Test- und Modellierungsschritten und stellt dieses Wissen bereit. Der Bediener übernimmt lediglich beurteilende und bewertende Funktionen. Gespräche mit potentiellen Anwendern haben ergeben, daß die notwendigen Kenntnisse hierfür meist innerhalb weniger Stunden vermittelt werden können. Hinzu kommt, daß diese Aufgaben nicht täglich erledigt werden müssen. Es ist also nicht notwendig, alle Systembediener für diese Aufgaben auszubilden. Das Werkzeug ist somit praxistauglich und für den fertigungsnahen Einsatz in einem Leitstand geeignet.

Der Investitionsaufwand in das System lohnt sich bei regelmäßiger Anwendung, wie es bei der betriebsbegleitenden Simulation gegeben ist. Hier kommt zum Tragen, daß sich die Aktualisierungszyklen des Simulationsmodells verlängern und sich damit der Pflegeaufwand für das Modell reduziert.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen sehen sich heutzutage zunehmend einer neuen Wettbewerbssituation ausgesetzt. Die Globalisierung der Märkte, die Mobilität der Ressourcen und die gestiegenen Anforderungen der Kunden rufen einen hohen Wettbewerbsdruck unter den Unternehmen hervor. Unternehmen sind gefordert, ihre Produkte und Dienstleistungen in hoher Qualität und zu geringen Kosten bereitzustellen sowie durch Innovationen kontinuierlich und schnell an neue Anforderungen und Randbedingungen anzupassen. Diese Wettbewerbssituation stellt die Produktionslogistik vor neue Herausforderungen. Neben den klassischen produktionslogistischen Zielgrößen, Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue, haben die Transparenz und die Wandlungsfähigkeit der Prozesse an Bedeutung gewonnen.

Diese neue Wettbewerbssituation, verbunden mit einer Neugewichtung der produktionslogistischen Ziele, stellt neue Anforderungen an Werkzeuge, die die Planung und Steuerung von Produktionssystemen unterstützen. Die Werkzeuge müssen neben der Optimierung der klassischen Ziele Produktionsstrukturen und -abläufe transparent machen und die Wandlungsfähigkeit unterstützen. Dies bedeutet, daß auch die Werkzeuge selbst an veränderte Strukturen und Abläufe anpaßbar sein müssen. Wegen ihrer anerkannten Vorteile hinsichtlich Transparenz und Flexibilität wird zunehmend die betriebsbegleitende Simulation als Entscheidungshilfsmittel im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung eingesetzt. Sie steigert die Transparenz bei der Planung und ist in der Lage, auch komplexe dynamische Prozesse realistisch abzubilden und zu bewerten. Der Einsatz der betriebsbegleitenden Simulation bringt jedoch auch Nachteile mit sich, wie beispielsweise einen höheren Aufwand für die Datenakquisition, Modellierung und die Simulationsexperimente oder eine besondere Qualifikation des Systembedieners.

Gegenüber der planungsunterstützenden Simulation ergeben sich für die betriebsbegleitende Simulation höhere Anforderungen und teilweise ungünstigere Randbedingungen. Die betriebsbegleitende Simulation soll innerhalb kurzer Zeit Aussagen über das Übergangverhalten der Anlage nach Steuerungseingriffen liefern. Um zur Steuerung einer Anlage beizutragen, sind weiterhin detailliertere Informationen, beispielsweise über einzelne Aufträge, gefordert. Die Informationen müssen eine hohe Genauigkeit besitzen. Zusätzlich wird eine Abschätzung der stochastischen Unsicherheiten gefordert.

Bei der betriebsbegleitenden Simulation wird allerdings meist der Experimentplanung nicht genügend Beachtung geschenkt. Beispielsweise wird oft aus Zeitgründen auf eine stochastische Simulation verzichtet und statt dessen deterministisch simuliert. Hinzu kommt, daß oft nicht die Qualifikation und die Zeit vorhanden sind, ein Simulationsmodell regelmäßig an sich ändernde Abläufe und Strukturen in der Produktion anzupassen, womit das Modell seine Validität verliert. In der Regel werden statistische Standardverfahren zur Auswertung herangezogen, die stochastische Besonderheiten der Daten nicht berücksichtigen. Dieses Vorgehen führt in der Regel zu fehlerbehafteten Prognosen. Außerdem fehlen zuverlässige Angaben über die zu erwartenden stochastischen Prognoseunsicherheiten. Hinzu kommt, daß geeignete Visualisierungsverfahren für stochastische Ergebnisse der betriebsbegleitenden Simulation fehlen. Geringe Akzeptanz oder Fehlinterpretationen durch den Bediener können die Folge sein.

10.1 Ergebnisse der vorliegenden Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Konzept eines Prognosesystems für die Produktionsoptimierung entwickelt. Weiterhin wurden Ansätze aus den Bereichen Experimentplanung, Modellierung und Auswertung entwickelt, mit denen die Anforderungen an die betriebsbegleitende Simulation erfüllt werden.

Um die sehr hohen Anforderungen an Ergebnislage und Antwortzeiten zu erfüllen, muß die Experimentplanung effektiv und effizient gestaltet werden. Es wurden ein effizientes Verfahren sowie schlüssige Konzepte entwickelt, mit denen der Simulationsaufwand reduziert werden kann, ohne unzulässige Einbußen an Ergebnisqualität zu erleiden. Kernpunkte des Konzepts sind ein Experimentrahmen, ein Modul zur Konfiguration eines geeigneten Simulationsmodells sowie ein Baukasten mit Auswerte- und Visualisierungsmodulen.

Speziell wenn bei der betriebsbegleitenden Simulation stochastische Simulationsmodelle zum Einsatz kommen, ist darauf zu achten, daß diese effektiv und effizient sind. Das heißt, die Simulationsmodelle sollen eine hohe Ergebnisgüte und eine kurze Antwortzeit der Simulation ermöglichen. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurden Modellierungstypen entwickelt, die verschiedenen Fragestellungen der Produktionsoptimierung gerecht werden. Weiterhin wurde ein Katalog spezieller Modellierungstechniken entwickelt, mit denen Modelle erstellt werden können, die effizient und stochastisch valide sind.

Die stochastische Simulation ist jedoch, gerade wenn kurze Antwortzeiten gefordert werden, ungeeignet, weil sie eine Vielzahl von Läufen erfordert. Aus diesem Grund wurden Konzepte und praxiserrechte statistische Verfahren entwickelt, die Erfahrungsdaten zur Prognosekorrektur und zur Abschätzung der stochastischen Prognoseunsicherheiten nutzen. Falls allerdings kein Erfahrungswissen vorliegt, wenn sich die Produktionsanlage beispielsweise in einem neuen Betriebspunkt befindet, muß auch bei kurzfristigen Planungen stochastisch simuliert werden. Anders verhält es sich bei mittel- und längerfristigen Planungshorizonten. In diesem Fall hängt es vom Planungsziel ab, ob stochastische Effekte in das Simulationsmodell einbezogen werden sollten. Hierfür werden Entscheidungshilfen gegeben.

Zum Abschluß der Arbeiten wurden die Konzepte prototypenhaft als Softwarewerkzeug implementiert und einem Test unterzogen. Die Bedienoberfläche des Experimentplanungs- und -steuerungssystems wurde als Prototypen realisiert und im Rahmen von Demonstrationen und Interviews mit positivem Ergebnis auf Akzeptanz geprüft. Außerdem wurde ein Softwareprototyp der automatischen Modellgenerierung und -konfiguration entwickelt. Unter Laborbedingungen konnte grundsätzlich die Validität der entwickelten Modellierungsansätze und die Plausibilität der erzielten Ergebnisse nachgewiesen werden. Insbesondere das für das Gesamtkonzept zentrale Modul zur Auswertung, Fehlerkompensation und Visualisierung wurde als Softwarewerkzeug realisiert und einem Test unter den Bedingungen eines praktischen Einsatzes unterzogen.

Das Modul besitzt auch unter Praxisbedingungen einen erheblichen Nutzen. Es eignet sich vor allem beim Einsatz im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung und für die Berechnung kurzfristiger Terminprognosen. Besonders bei stabilen, eingeschwungenen Fertigungsanlagen werden sehr gute Prognoseergebnisse erzielt. Auch wenn das Sy-

stem zwischen bekannten Betriebszuständen wechselt, ist eine gute Fehlerkompensation und Schätzung der Stochastik möglich. Bei einer Testanwendung konnten ohne Prognosekorrektur nur 47% der Fertigungstermine innerhalb eines Toleranzbands von +/- zwei Tagen prognostiziert werden. Mit Prognosekorrektur waren es dagegen 85%. Die Auswertung bezog sich auf einen Prognosehorizont von 20 Arbeitstagen. Bei zehn Tagen Prognosehorizont betrug die Vorhersagetreue nach Prognosekorrektur sogar über 93%.

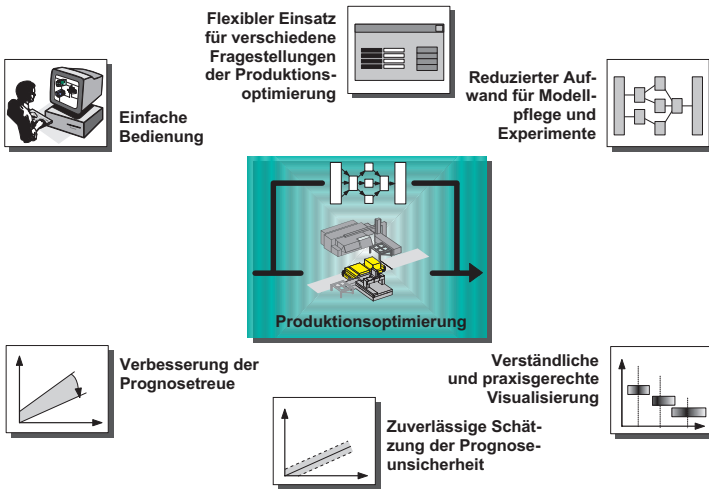


Bild 10-1: *Adaptives stochastisches Prognosesystem auf Basis der betriebsbegleitenden Ablaufsimulation*

Bei Fertigungssystemen mit variabler Stochastik ist der Ansatz der Fehlerkompensation nicht zielführend. In diesem Fall führt die stochastische Simulation mit den oben geschilderten Ansätzen zur Modellierung und Experimentplanung zu guten Ergebnissen. Nur im Bereich der Kurzfristplanung können Konflikte zwischen Ergebnisgenauigkeit bzw. stochastischer Absicherung und Antwortzeit auftreten. Wenn diese Kombination aus Randbedingungen und Anforderungen vorliegt, sollte versucht werden, die Variabilität der Stochastik durch die bekannten technischen und organisatorischen Maßnahmen des Qualitätsmanagements zu reduzieren.

10.2 Stellenwert der Forschungsergebnisse und kritische Würdigung

Wie eine empirische Studie des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) unter Anwendern zeigte, stellen die Aspekte „Aufwand für Modellierung und Modellpflege“ sowie „Qualifikationsanforderungen an den Bediener“ bislang die größten Hindernisse bezüglich einer weiteren Verbreitung der Simulation beim betriebsbegleitenden Einsatz dar (REINHART ET AL. 1997). In direkten Gesprächen mit Produkti-

onsplanern und -steuerern hat sich immer wieder gezeigt, daß exakte Terminprognosen, sowohl hinsichtlich des Lieferzeitpunkts als auch des Materialbedarfs, eine zunehmende Rolle in schlanken Fertigungsunternehmen spielen. Nur wenn es möglich ist, exakte Terminprognosen über Produktionsaufträge zu erstellen, können Pufferzeiten im Produktionsablauf ohne eine Verschlechterung der Termintreue reduziert werden. Dadurch reduzieren sich Durchlaufzeiten und Umlaufbestände. Eine Studie des Instituts für Technologie und Management der TU Berlin bestätigt, daß in Zukunft leistungsfähige Prognoseverfahren für die Logistik einen hohen Stellenwert erlangen werden (BAUMGARTEN & BENZ 1997, S. 22).

In den vergangenen Jahren haben sich simulationsbasierte Systeme zur Produktionssteuerung weiter etabliert. Durch die Implementierung der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte in diese Systeme lassen sich die Planungsgüte sowie das Aufwand/Nutzen-Verhältnis deutlich verbessern. Durch das Gesamtkonzept des Prognosesystems mit seinen Modulen konnte nachgewiesen werden, daß für konkrete Anwendungsfälle sichere Prognosen über Fertigungsaufträge effizient erstellt werden können. Im einzelnen wurde die Leistungsfähigkeit der Fehlerkompensation, die Effizienz der speziellen Modellierungstechniken sowie die Bedienerfreundlichkeit und Akzeptanz des Experimentplanungssystems und der Benutzeroberflächen nachgewiesen. Der Aufwand für den Einsatz des Systems ist gering, verglichen mit der Alternative, ein Simulationsmodell durch manuelle Modellpflege täglich aktuell zu halten. In gewissen Grenzen und bei geringen und langsamen Änderungen des Betriebspunktes oder der Produktionsstrukturen bleibt die hohe Prognosetreue erhalten. Das Konzept ist somit grundsätzlich geeignet, zu einer Verbesserung der Logistik in Produktionsunternehmen beizutragen.

Das System ist so konzipiert, daß es für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle der taktischen und operativen Produktionsoptimierung und für verschiedene Produktionssysteme eingesetzt werden kann. Der Abstraktionsgrad der verwendeten Modelle ist skalierbar, so daß der bislang geltende Widerspruch zwischen **hohem Detaillierungsgrad und Genauigkeit der Prognosen** auf der einen Seite und **kurzer Antwortzeit des Prognosesystems** auf der anderen Seite für die wichtigsten Anwendungsfälle entkräftet wird.

Jedoch ist zu beachten, daß das System für jede Anwendung speziell konfiguriert werden muß. Im Experimentplanungssystem müssen die Freiheitsgrade der Experimentplanung durch den Experimentrahmen definiert werden. Hierfür sind die Auswahllisten und die Design-sheets anzupassen. Außerdem ist der Simulationsbausteinkasten um Modellbausteine der spezifischen Ressourcen des Produktionssystems zu erweitern. Das Modul zur Fehlerkompensation wird im Rahmen einer Initialisierungsphase konfiguriert. In dieser Phase werden statistische Modelle für typische Betriebszustände des Produktionssystems aus Erfahrungsdaten und Simulationsdaten berechnet und in der Modelldatenbank archiviert. Schließlich wird der Katalog von Methoden und Verfahren zur statistischen Auswertung und Visualisierung nach Bedarf ergänzt. Diese Erstinstallation kann je nach Größe und Komplexität des Produktionssystems einige Tage Programmieraufwand erfordern.

Neben des eigentlichen Zwecks des Systems ergeben sich für Teilmodule des Konzepts weitere Anwendungsperspektiven. Beispielsweise kann das Modul zur Auswertung, Fehlerkompensation und Visualisierung ohne konzeptuelle Modifikationen auch mit ei-

nem PPS- oder Leitstandsystem anstelle eines Simulationssystems gekoppelt werden. Weiterhin kann dieses Modul auch im Rahmen der Validierung von Simulationsmodellen zur Analyse der Abweichungen zwischen Modell und Realität eingesetzt werden.

10.3 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit liegen grundlegende Rahmenkonzepte und erste Realisierungsergebnisse bezüglich der gewählten Ansätze vor. Vor einer Umsetzung in ein allgemeingültiges und unter verschiedenen Bedingungen praxistaugliches Werkzeug sind noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Beispielsweise fehlen noch Arbeiten, wie die erzielten Ergebnisse mit Verfahren der klassischen Experimentplanung für den betriebsbegleitenden Einsatz der Simulation integriert werden können. Ferner sollten noch Forschungsarbeiten hinsichtlich des Vergleichs von stochastischen Simulationsexperimenten durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Abstraktion von Simulationsmodellen sind ergänzende Arbeiten mit weiterführenden Modellabstraktionen sinnvoll. Ein guter Ansatz, der einen Nutzen für das vorgestellte Prognosesystem verspricht, ist die hierarchische Modellierung (LULAY & REINHART 1998). Im Rahmen dieser Arbeiten werden auch Lösungen entwickelt, wie unterschiedlich abstrakte Simulationsbausteine ein und des selben Produktionsbereichs mit geringem Aufwand konsistent gehalten werden können.

Schließlich fehlen noch ergänzende Arbeiten zur automatischen Modellgenerierung. Wichtig ist es vor allem, daß die Strategien, beispielsweise zur vorbeugenden Instandhaltung, Störungsmanagement und Qualitätssicherung identifiziert und modelliert werden (SELKE 1998). Damit würde das automatisch generierte Modell die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit der realen Strukturen und Abläufe im Hinblick auf stochastische Einflüsse besser wiedergeben. Dies würde sich positiv auf die Prognosegüte auswirken.

11 Literaturverzeichnis

AMANN 1994

Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen. Berlin: Springer 1994. (iwb Forschungsberichte Nr. 71).

BANKS ET AL. 1996

Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.: Discrete-Event System Simulation (2nd Edition). Upper Saddle River: Prentice-Hall 1996.

BAUMGARTEN & BENZ 1997

Baumgarten, H.; Benz, M.: Karrierechancen in der Logistik. Ergebnisse der Untersuchung Trends und Strategien in der Logistik 2000. Berlin 1997.

BELSLEY ET AL. 1980

Belsley, D.A.; Kuh, E.; Welsch, R.E.: Regression Diagnostics. New York: John Wiley & Sons Inc. 1980.

BOSCH 1993

Bosch, K.: Statistik-Taschenbuch. München: Oldenbourg-Verlag 1993.

BRATLEY ET AL. 1987

Bratley, P.; Fox, B.L.; Schrage, L.E.: A Guide to Simulation. New York 1987.

BÜNING 1991

Büning, H.: Robuste und adaptive Tests. Berlin: Walter de Gruyter 1991.

BURGER 1992

Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen. Berlin: Springer 1992. (iwb Forschungsberichte Nr. 42).

CARROLL & RUPPERT 1988

Carroll, R. J.; Ruppert, D.: Transformation and Weighting in Regression. Chapman and Hall; 1988.

CREDLER 1993

Credler, R.: Finite Scheduling Helps Eaton Cut Line Setups and Increase Line Throughput. In: APICS - The Performance Advantage 01/93, S. 30-32.

CUTHBERT & WOOD 1980

Cuthbert, D.; Wood, F. S.: Fitting Equations to Data. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons 1980.

DECKER & MARTIN 1994

Decker, F.; Martin, C.: Simulation schafft Transparenz. In: Die neue Fabrik. mi Sonderpublikation. Landsberg 1994, S. 44-46.

DRAPER & SMITH 1981

Draper, N. R.; Smith, H.: Applied Regression Analysis, 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons 1981.

DURBIN 1970

Durbin, J.: Testing for Serial Correlation in Least Squares Regression. Econometrica 38 (1970), S. 410-421.

EULENBERGER & AUGUSTIN 1995

Eulenberger, L.; Augustin, H.: Simulation in PPS-Systemen. VDI-Z 137, (1995) 1/2, S. 65-67.

EVERSHEIM & SCHUH 1996

Eversheim, W. (Hrsg.); Schuh, G. (Hrsg.): Betriebshütte - Produktion und Management, Teil 2. Berlin: Springer 1996.

Feldmann et al. 1997

Feldmann, K.; Rauh, E.; Collisi, T.; Steinwasser, P.: Modular Tool for Simulation Parallel to Production Planning. Proceedings of the 16th IASTET International Conference on Modeling Identification and Control, Innsbruck 1997.

FISCHER 1988

Fischer, J.: Die statistische Auswertung von Simulationsdaten. In: Feldmann, K.; Schmidt, B. (Hrsg.): Simulation in der Fertigungstechnik. Berlin 1988, S.391-412.

FÖLLINGER 1985

Föllinger, O.: Regelungstechnik. Heidelberg 1985.

GEARY 1970

Geary, R.C.: Relative Efficiency of Count of Sign Changes for Assessing Residuals Autoregression in Least Squares Regression. Biometrika 57 (1970), S. 123-127.

GOLDFELD & QUANDT 1965

Goldfeld, S. M.; Quandt, R. E.: Some Tests for Homoscedasticity. Journal of the American Statistical Association 60 (1965), S. 539-547.

GOSSEL 1996

Gossel, O.: Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse. Dissertation TU Hamburg-Harburg 1996.

GRUBER 1982

Gruber, J.: Regressionsanalyse I. Skriptum der Fernuniversität - Gesamthochschule - in Hagen, Fachbereich Wirtschaftswissenschaft, 1982.

GÜNZEL 1993

Günzel, Uwe: Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung. München: Carl Hanser 1993. (Fertigungstechnik-Erlangen Nr. 34)

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989.

HARLAND & KUHN 1993

Harland, J.; Kuhn, A. (Hrsg.): Logistikorientierte Materialflußregelung - Ein Beitrag zur ganzheitlichen, permanenten Gestaltung von Fertigungssystemen. Dortmund: Praxiswissen 1993. (Unternehmenslogistik)

- HARTUNG 1995
Hartung, J.: Statistik, 10. durchgesehene Auflage. München: Oldenbourg 1995.
- HEINHOLD & GAEDE 1979
Heinhold, J.; Gaede, K.-W.: Ingenieur-Statistik München: Oldenbourg 1979.
- HEITMANN 1995
Heitmann, K.: Using Statistical Methods to Improve Prediction in Simulation-Based Scheduling. In: Breitenecker, F. ; Husinsky, I. (eds.) Proc. EUROSIM'95, Vienna. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1995, S.1041-1046.
- HEITMANN 1997
Heitmann, K.: Ablaufsimulation leicht gemacht. Die Neue Fabrik - Modellfabrik als Denkmodell. mi Verlag1997, S. 48-50.
- HOFER & LUNDERSTEDT 1975
Hofer, E.; Lunderstedt, R.: Numerische Verfahren der Optimierung. München: Oldenbourg 1975.
- HORNUNG & LAAKMANN 1995
Hornung, V.; Laakmann, J.: Aachener PPS-Modell. Aachen: Sonderdruck des fir 1995.
- INMON & HAKATHORN 1994
Inmon, W.H.; Hakathorn, R.D.: Using the Data Warehouse. New York: John Wiley & Sons 1994.
- JUDGE ET AL. 1980
Judge, G.G.; Griffith, W.E.; Hill, R.C.: The Theory and Practice of Econometrics. New York: Wiley 1980.
- KLEIJNEN 1987
Kleijnen, J.P.C.: Statistical Tools for Simulation Practitioners. New York: Marcel Dekker 1987.
- KLEIJNEN 1995
Kleijnen, J.P.C.: Simulation: Runlength Selection and Variance Reduction Techniques. In: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Current Issues and Challenges in the Reliability and Maintenance of Complex Systems, Kemer-Antalya, 1995. 1995, S. 411-428.
- KLEIJNEN & GROENENDAAL 1992
Kleijnen, J. P .C.; Groenendaal, W. v.: Simulation - A Statistical Perspective. Chichester: Wiley 1992.
- KOBYLKA & WIRTH 1997
Kobylka, A.; Wirth, S.: Beitrag zur adaptiven Kopplung von statischer und dynamische Fabrikplanungssoftware. Institut für Betriebswissenschaften und Fabrik-systeme, TU Chemnitz: 1997 (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Heft 13).

KÖHLER 1997

Köhler, U.: Effizientes Planen senkt die Produktionskosten – Durchgängige Materialfluß- und Logistikplanung. *Industrieanzeiger* 1997, Nr. 10., S. 60-61.

LAW & KELTON 1991

Law, A.M.; Kelton, W.D.: *Simulation Modelling and Analysis*, 2. Auflage. New York: McGraw-Hill 1991.

LULAY & DECKER 1996

Lulay, W. E.; Decker, F.: Planung im Dialog: Interaktive, werkzeugunterstützte Planung von Fertigungsinseln. In *SMM- Schweizer Maschinenmarkt* 1996, Nr. 37, S. 28-33.

LULAY & REINHART 1998

Lulay, W.; Reinhart, G.: Hierarchical Simulation Models Improve Production-Accompanying-Simulation. In: *EuroSIM 98 - 3rd International Congress of the Federation of EUROpean SIMulation Societies*, Helsinki 1998

LULAY ET AL. 1998

Lulay, W. E.; Mößmer, H. E.; Rudorfer, W.: Ablaufsimulation – leistungsfähiges Werkzeug zur Optimierung von Produktionssystemen. *Iwb Newsletter* (1998) 2. S. 3-4.

MARTIN 1998

Martin, C.: *Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz*. Berlin: Springer 1998. (iwb Forschungsberichte 113)

MAYER & BENJAMIN 1992

Mayer, R.H.; Benjamin, P.C.: Using the Taguchi Paradigm for Manufacturing System Design using Simulation Experiments. *Computers and Industrial Engineering* 22 (1992) 2, S. 195-209.

MÖßMER 1998A

Mößmer, H. E.: Flexible Zukunft. *Logistik Heute* (1998) Nr. 4, S. 47-49.

MÖßMER 1998B

Einsatz der Simulation bei zeitvarianten Produktionsstrukturen. In: Tagungsband „Simulation und Visualisierung“, Magdeburg 1998. SCS Eigenverlag 1998.

NOCHE 1993

Noche, B.: Vorauseschaut - Simulation und Expertensysteme als Instrument einer leistungsfähigen Logistik in der spanenden Fertigung. In: *Maschinenmarkt* 99 (1993) 1, S. 18-22.

NOCHE & WENZEL 1991

Noche, B.; Wenzel, S.: *Marktspiegel Simulationstechnik in Produktion und Logistik*. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1991.

ÖZDEMIREL 1990

Özdemirel, N. E.: *Generic Manufacturing Simulation Model Construction Based on Group Technology Classification of Models*. Dissertation Arizona State University: 1990.

ÖZDEMIREL 1991

Özdemirel, N. E.: Measuring the User Acceptance of Generic Manufacturing Simulation Models by Review of Modeling Assumptions. In: Nelson, B. L.; Kelton, W. D.; Clark, G. M. (Hrsg.): Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference. 1991. S. 419-427.

ÖZDEMIREL ET AL. 1993

Özdemirel, N. E.; Mackulak, G. T.; Cochran, J.K.: A Group Technology Classification and Coding Scheme for Discrete Manufacturing Simulation Models. Int. Journal of Production Research 31 (1993) 3, S. 579-601.

ÖZDEMIREL ET AL. 1996

Özdemirel, N. E.; Gazanfer, Y. Y.; Köksal, G.: Computer-Aided Planning and Design of Manufacturing Simulation Experiments. San Diego: Simulation 67 (1996) 3, S. 171-191.

PETERMANN 1996

Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Düsseldorf: VDI 1996. (Fortschrittsberichte VDI, Reihe 20).

PRITSKER ET AL. 1991

Pritsker, A.B.; Schmidt-Weinmar, G.; Ortmann, L.: Management der Liegezeiten durch zeitdynamische Simulation. In: CIM Management 6/91, S. 15-22.

PROFOS & PFEIFER 1992

Profos, Paul; Pfeifer, Tilo: Handbuch der industriellen Meßtechnik. München, Wien 1992.

RAMBERG & SANCHEZ 1991

Ramberg, J.S.; Sanchez, S.M.; Sanchez, P.J.: Designing Simulation Experiments: Taguchi Methods and Response Surface Metamodels. Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, S.167-176.

RAUCH ET AL. 1996

Rauch, C.; Augustin, H.; Warnecke, G. (Hrsg.): Marktstudie PPS/CAQ - Innovative Entwicklungen und Integrationspotentiale. Düsseldorf: VDI 1996.

RAUH 1997

Rauh, E.: Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe. Dissertation Universität Erlangen 1997.

RECKHOW 1987

Reckhow, K. H.: Validation of Simulation Models: Philosophy and Statistical Methods of Confirmation. In: Systems & Control Encyclopedia (Hrsg.: Singh, M. D.), Pergamon Press, 1987, S. 5011 - 5015.

REDDY 1987

Reddy, R.: Epistemology of Knowledge Based Simulation 48 (1987) 4, S. 162-166.

REINHART 1997A

Reinhart, G.: Mit Schwung zum Aufschwung - Kreatives Agieren statt optimierendes Reagieren. In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung, Tagungsband des Münchener Kolloquiums 1997. Landsberg: mi Verlag 1997. S. 9-16.

REINHART 1997B

Reinhart G.: Innovative Prozesse und Systeme - Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Milberg, J.; Reinhart, G. (Hrsg.): Mit Schwung zum Aufschwung, Tagungsband des Münchener Kolloquiums 1997. Landsberg: mi Verlag 1997. S. 173-202.

REINHART ET AL. 1997

Reinhart, G.; Feldmann, K.; Heitmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft ? Stand und Perspektiven. München: Herbert Utz 1997.

REINHART & HEITMANN 1997

Reinhart, G.; Heitmann, K.: Improved Prediction Accuracy in Simulation-Based Scheduling. In: Proceedings of the 14th International Conference on Production Research, 1997, Osaka. IFPR 1997, S. 90-93.

REINHART & LULAY 1998

Reinhart, G.; Lulay, W.: Koordination dezentraler Produktionsstrukturen durch betriebsbegleitende Simulation. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 1-2 (1998).

SACHS 1984

Sachs, L.: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden. 6. Auflage. Berlin 1984.

SARGENT 1987

Sargent, R. G.: Validation of Simulation Models: Statistical Approach. In: Systems & Control Encyclopedia (Hrsg.: Singh, M. D.), Pergamon Press, 1987, S. 5015 - 5019.

SCHALLA 1995

Schalla, A.-J.: Täglich geplant - Simulationssysteme in der Alu-Dünnschicht-Produktion. AV 32, (1995) 1, S. 20-23.

SCHMIDT 1987

Schmidt, R.: Einsatzmöglichkeiten der Simulation in der Werkstattsteuerung. In: Halin, J. (Hrsg.): Simulationstechnik 4. Symposium, Zürich. Berlin 1987, S. 520-538.

SCHMIDT 1995

Schmidt, B.: Benutzerhandbuch SIMPLEX II. San Diego: SCS 1995.

SCHRÖER 1993

Schröder, K.: Identifikation von Kalibrationsparametern kinematischer Ketten. Dissertation TU Berlin 1993.

SCHRÜFER 1988

Schrüfer, E.: Elektrische Meßtechnik. München, Wien 1988.

SCHRÜFER 1992

Schrüfer, E. (Hrsg.): Lexikon Meß- und Automatisierungstechnik. VDI, Düsseldorf 1992.

SELKE 1998

Selke, C.: Einfache Modellbildung durch Integration in das informationstechnische Umfeld. In: Mertins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): 8. ASIM-Fachtagung: Erfahrungen aus der Zukunft. Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Logistik (1998), Berlin.

SIMON 1995

Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement. Berlin: Springer 1995. (iwb Forschungsberichte Nr. 85)

SPLANEMANN 1995

Splanemann, R.: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. Dissertation Universität Bremen 1995.

VDI NACHRICHTEN 1997

N.N.: Software ermittelt Abweichungen zwischen Virtualität und Realität - Betriebsbegleitende Simulation bringt präzise Prognosen. VDI-Nachrichten 51 (1997) 19, S. 15.

VDI-RICHTLINIE 3633, BLATT 1:

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Grundlagen. Düsseldorf: VDI 1993.

VDI-RICHTLINIE 3633, BLATT 3

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Experimentplanung und -auswertung (Gründruck). Düsseldorf: VDI 1995.

VDI-RICHTLINIE 3633, BLATT 6

VDI-Richtlinie 3633, Blatt 6: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Begriffsdefinitionen (Entwurf). Düsseldorf: VDI 1996.

WAGNER & WARSCHAT 1994

Wagner, F.; Warschat, J.: IAOSAS - Ein Werkzeug zur methodisch korrekten statistischen Auswertung von Simulationsergebnissen. In: Proceedings ASIM-Symposium 1994 in Stuttgart, 1994.

WELCH 1983

Welch, P. D.: The Statistical Analysis of Simulation Results. In: Lavenberg, Stephen S. (Hrsg.): Computer Performance Modelling Handbook. New York, London 1983, S. 267-329.

WESTKÄMPER ET AL. 1998

Westkämper, E.; Balve, P.; Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement in wandlungsfähigen Produktionsstrukturen – Anforderungen und Ansätze. PPS-Management 3(1998) 1, S. 22-26.

WIEGERT 1980

Wiegert, R.: Schätzung bei Heteroskedastizität. Tübingen: Mohr 1980. (Tübinger Wirtschaftswissenschaftliche Abhandlungen 28)

WIENDAHL 1987

Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung- Grundlagen, Verfahrensaufbau, Realisierung. München 1987.

WIENDAHL & SCHEFFCZYK 1997

Wiendahl, H.-P.; Scheffczyk, H.: Gestaltung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen: Strategien, Planungsmethoden, Beispiele. In: Innovation durch Technik und Organisation. Tagungsband zum Fertigungstechnischen Kolloquium am 11. und 12. November 1997 in Stuttgart. Berlin: Springer 1997.

WIENDAHL & SCHOLTISSEK 1993

Wiendahl, H.-P.; Scholtissek, P.: Produktionssimulation als Versuchsstand für Fertigungsstrukturen und PPS-Verfahren. VDI-Z 135, (1993) 3, S. 43-51.

WIENDAHL & NYHUIS 1998

Engpaßorientierte Logistikanalyse. München: TCW Transfer-Centrum GmbH 1998.

ZEIGLER 1985

Zeigler, B. P.: Theory of Modelling and Simulation. Malabar: Robert E. Krieger Publishing Company 1985.

ZEIGLER 1990

Zeigler, B. P.: Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models. Boston, San Diego 1990.

ZETLMAYER 1994

Zetlmayer, H.: Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion. Berlin: Springer-Verlag 1994. (iwb Forschungsberichte Nr. 74).

ZELL 1992

Zell, M.: Simulationsgestützte Fertigungssteuerung. München 1992.

ZÜLCH & SCHINDELE 1994

Zülch, G.; Schindele, H.: Simulation qualitätsförderlicher Personalstrukturen. In: Pfeifer, T. (Hrsg): Innovative Qualitätssicherung in der Produktion. Berlin: Beuth 1994. S. 239-245.

12 Glossar

Im folgenden werden Definitionen zu den speziellen Begriffen gegeben, die das Lesen der vorliegenden Arbeit erleichtern sollen. Für das Verständnis der Ausführungen ist es zunächst wichtig, die zentralen Begriffe *Simulationsstudie*, *Simulationsexperiment*, *Einzelexperiment* und *Simulationslauf* zu definieren. Bild 12-1 soll dabei helfen, diese Begriffe gedanklich zu strukturieren.

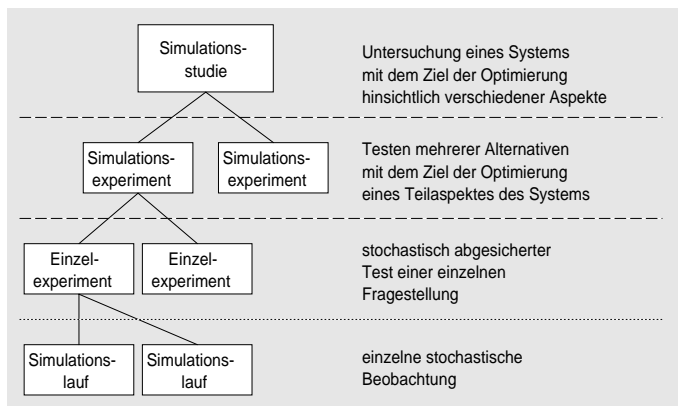


Bild 12-1: Abgrenzung der Begriffe

Im weiteren werden die einzelnen Begriffe in Anlehnung an den Entwurf der VDI-Richtlinie 3633, Blatt 6 definiert:

deterministische Simulation

Simulation ohne stochastische Elemente im *Simulationsmodell* (vgl. *stochastisches Simulationsmodell*, *stochastische Simulation*).

Einzelexperiment

Gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch eine Schar stochastisch unterschiedlich initialisierter *Simulationsläufe*. Alle übrigen Parameter bleiben konstant. Ziel ist es, ein stochastisch abgesichertes Ergebnis zu einer einzelnen Fragestellung zu erlangen. Im Falle der *deterministischen Simulation* entspricht ein *Simulationslauf* einem Einzelexperiment. (s. auch *Simulationsexperiment*)

Experiment

s. *Simulationsexperiment*

<i>Experimentkonfiguration</i>	Ergebnis der <i>Experimentplanung</i>
<i>Experimentplanung</i>	Auswahl und Voreinstellung der <i>Modell-</i> und <i>Experimentparameter</i> und <i>Initialisierung</i> eines <i>Einzelexperiments</i> oder einer Menge von <i>Einzelexperimenten</i> , Spezifikation der zu messenden Experimentdaten sowie Auswahl der Auswerteverfahren. Ergebnis der Experimentplanung ist die <i>Experimentkonfiguration</i> .
<i>Experimentparameter</i>	Wert einer Variablen, die einen Ablaufaspekt des <i>Simulationslaufs</i> oder des <i>Einzelexperiments</i> beschreibt. Beispiele sind der Start- und Endzeitpunkt eines <i>Simulationslaufs</i> . Ein Experimentparameter wird vor einem <i>Simulationslauf</i> gesetzt und ändert sich innerhalb des Laufs bzw. des <i>Einzelexperiments</i> nicht.
<i>Experimentrahmen</i>	(engl.: experimental frame) allgemein: Die Bedingungen, unter denen ein System oder ein Modell beobachtet oder experimentiert werden. Konkret werden darunter im Rahmen dieser Arbeit die Datenfelder verstanden, in denen das Verhalten des korrespondierenden <i>Simulationsmodells</i> sowie die Parameter des <i>Simulationsexperiments</i> definiert werden. Mit Hilfe des Experimentrahmens wird die <i>Experimentplanung</i> vorgenommen.
<i>Initialisierung</i>	Belegung von Modellgrößen zu Beginn eines <i>Simulationslaufes</i> . Auf diese Weise wird ein definierter Anfangszustand des <i>Simulationsmodells</i> erreicht.
<i>Korrekturmodell</i>	Modell, das die systematischen Abweichungen von simulativ ermittelten Prognosen beschreibt.
<i>Modellparameter</i>	Wert eines Attributs eines Modellelements, der vor einem <i>Simulationslauf</i> gesetzt wird und sich innerhalb des Laufs oder des <i>Einzelexperiments</i> nicht ändert.

- operative Optimierung*** Optimierung im Rahmen der Produktionsplanung und –steuerung mit dem Ziel, eine konkrete Betriebssituation der Produktionsanlage hinsichtlich der Erreichung der produktionslogistischen Zielsetzung zu optimieren. Betrachtungszeiträume und Maßnahmen besitzen einen kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont.
- Produktionsoptimierung*** Alle planerischen Unternehmensprozesse, die das Ziel einer Optimierung eines Produktionssystems hinsichtlich einer logistischen Zielsetzung verfolgen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zwischen *taktischer* und *operativer Optimierung* unterschieden.
- Prognosemodell*** Abstraktes Abbild eines Produktionssystems in einem Computer zur Vorhersage logistischer Kennzahlen und zukünftiger Zustände des Produktionssystems.
- Simulation*** Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen *Simulationsmodell*, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.
- Simulationsexperiment*** Gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte *Einzelexperimente* mit systematischen Parametervariationen. Ziel ist es den optimalen Parametersatz im Sinne der Zielsetzung zu finden. Ein Simulationsexperiment besteht in der Regel aus mehreren *Einzelexperimenten*, die wiederum aus mehreren *Simulationsläufen* bestehen können.
- Simulationslauf*** Nachbildung des Verhaltens eines Systems mit einem spezifizierten ablauffähigen *Simulationsmodell* über einen bestimmten Modellzeitraum. Ein Simulationslauf besitzt einen festen Satz von *Modell- und Experimentparametern* sowie eine definierte *stochastische Initialisierung*. Ein einzelner stochastischer Simulationslauf liefert keine abgesicherten Ergebnisse, weil er nur eine spezifische Kombination stochastischer Ereignisse repräsentiert. Im Falle der *deterministischen Simulation* entspricht ein Simulationslauf einem *Einzelexperiment*. (vgl. *Einzelexperiment*)

<i>Simulationsmodell</i>	Vereinfachte experimentierbare Nachbildung eines existierenden oder gedachten Systems mit seinen Prozessen. Es wird genutzt, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung mittels direkter Operationen am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre.
<i>Simulationsstudie</i>	Projekt zur simulationsgestützten Untersuchung eines Systems. Eine Simulationsstudie kann mehrere <i>Simulationsexperimente</i> umfassen, die ihrerseits aus mehreren <i>Einzelexperimenten</i> und <i>Simulationsläufen</i> bestehen.
<i>statistisches Modell</i>	Modell, welches die systematischen und stochastischen Abweichungen von simulativ ermittelten Prognosen beschreibt. Das statistische Modell stellt eine Erweiterung des <i>Korrekturmodells</i> dar. Der Begriff <i>statistisches Modell</i> ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff <i>stochastisches Simulationsmodell</i> .
<i>stochastische Initialisierung</i>	<i>Initialisierung</i> der stochastischen Verteilungen, Funktionen, Zufallszahlengeneratoren oder Zufallszahlenströme eines <i>Simulationsmodells</i> .
<i>stochastische Simulation</i>	<i>Simulation</i> mit stochastischen Elementen im <i>Simulationsmodell</i> (s. auch <i>stochastisches Simulationsmodell</i>).
<i>stochastisches Simulationsmodell</i>	<i>Simulationsmodell</i> , in dem zufällig auftretende Effekte modelliert sind. Das Auftreten dieser Effekte wird durch Zufallszahlengeneratoren gesteuert. (s. auch <i>deterministische Simulation</i> , <i>stochastische Simulation</i>)
<i>taktische Optimierung</i>	Mittelfristige Prüfung und Optimierung der prinzipiellen Eignung eines Produktionssystems für eine produktionslogistische Aufgabenstellung. Die Betrachtungszeiträume und die Optimierungsmaßnahmen sind mittelfristig.

Validität (prädiktiv)

Gültigkeit eines *Simulationsmodells* in bezug auf ein System innerhalb eines *Experimentrahmens*. Gültigkeit liegt vor, wenn es möglich ist, das Modell mit einem Zustand des Systems zu initialisieren, so daß für die gleichen Input-Daten die Ausgabe-Daten des Modells die Ausgabe-Daten des Systems innerhalb der annehmbaren Toleranz voraussagen. Prädiktive Validität ist ein stärkeres Kriterium als *replikative Validität*.

Validität (replikativ)

Gültigkeit liegt vor, wenn über alle Experimente, die innerhalb eines *Experimentrahmens* möglich sind, die Ausgabe-Daten des Simulationsmodells und des Systems innerhalb der annehmbaren Toleranz übereinstimmen.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26 –28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Arbeit von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubtriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klippsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Flascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozesskommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfarr, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54078-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotion- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Haßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55200-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Probeforschungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Heiml, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Reith, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und
variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen ·
Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit
3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in
Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und
integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und
rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der
Produktenwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagment
unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Fischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen
variantenreichen Kleinproduktionen
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte
Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch
Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für
maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationgestützte Kostenanalyse in
produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kränert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche
und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur
Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische
Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und
Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung
ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und
Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter
Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit
Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von
hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur
herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-
Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfaff, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei
Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungseleitierte Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-00, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmitelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**
ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
ISBN 3-89675-048-8

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-00, utz@utzverlag.com

- 122 Burghard Schneider
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Bernd Goldstein
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · 65 Abb. · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Helmut E. Mößner
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
156 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Ralf-Gunter Gräser
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Hans-Jürgen Trossin
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Doris Kugelmann
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
158 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Rolf Diesch
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · 69 Abb. · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Werner E. Lulay
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
170 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Otto Murr
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Michael Macht
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · ISBN 3-89675-638-9