Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik

herausgegeben von Prof. Dr. Stefan Voß

**Frank Schwartz**

# Störungsmanagement in Produktionssystemen

Shaker Verlag
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3088-2
ISSN 1616-1920

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

# Geleitwort

Die betriebliche Praxis zeigt, dass in Produktionssystemen vielfach Störungen auftreten, die den Ablauf der Produktion beeinflussen und deshalb eine Revision der bestehenden Produktionsfeinplanung erfordern. Zur Überwindung der unerwünschten Wirkungen von Produktionsstörungen wurden in der Vergangenheit verschiedene Ansätze für vorbeugende bzw. reagierende Strategien, so genannte Präventions- bzw. Reaktionsstrategien vorgeschlagen. Bislang fehlte jedoch eine geeignete Methode zur Bewertung einer zweckmäßigen Strategie für das Störungsmanagement.

Frank Schwartz entwickelt in der vorliegenden Arbeit ein Simulationsmodell, das jene Daten liefert, die für eine derartige Strategieentscheidung maßgebend sind. Dabei wird für industrielle Produktionssysteme, die Störungseinflüssen ausgesetzt sind, vor allem die dynamische Variante des Ablaufplanungsproblems untersucht. Für diese Problemstellung nimmt er eine Erweiterung der bekannten prioritätsregelbasierten Ansätze in der Weise vor, dass das dynamische Ablaufplanungsproblem in eine Folge von statischen Ablaufplanungsproblemen zerlegt wird und somit ein rollierender Planungsansatz entsteht.

Eine besondere Innovation stellt die Definition von Messkonzepten für die Beurteilung von instabilen Produktionsplänen als Folge von Störungen dar. Damit können die Maßnahmen des Störungsmanagements durch Kenngrößen bewertet werden, die insbesondere die Instabilität der Planung erfassen und darüber hinaus die Interdependenzwirkungen zur Kapazitätsnutzung und Dauer für die Abfertigung von Aufträgen berücksichtigen.

In umfangreichen Untersuchungen zeigt der Verfasser mithilfe des von ihm entwickelten Simulationsmodells die Wirksamkeit verschiedener präventiver und reaktiver Maßnahmen auf. Dabei wird erstmals die Bedeutung einer zeitlich stabilen Planung für die Produktion durch quantitative Aussagen aufgezeigt. Klassische dynamische betriebswirtschaftliche Planungsansätze ohne eine Berücksichtigung der Planungsstabilität sind deshalb vielfach für die Praxis nicht geeignet. Ein Planungsverfahren, das gleichermaßen zeitliche Planungsstabilität und betriebswirtschaftliche Optimierungskriterien in einem Ansatz vereint, ist deshalb als entscheidender Fortschritt anzusehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in dem vorliegenden Buch ein innovativer Ansatz vorgestellt wird, der es ermöglicht, praxisnahe Entscheidungen im Rahmen des Störungsmanagements zu treffen. Aus diesem Grund wird die vorliegende Arbeit eine breite Leserschaft finden.

Prof. Dr. Dr. h.c. Preßmar

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie als Lehrkraft für besondere Aufgaben am Institut für Wirtschaftsinformatik der Universität Hamburg und wurde im November 2003 am Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Universität Hamburg als Dissertation angenommen.

An dieser Stelle möchte ich meinem akademischen Lehrer, Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter B. Preßmar, für die vielfältige Unterstützung und die zahlreichen Anregungen bei der Anfertigung der Dissertation sehr herzlich danken. Ebenfalls danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Stefan Voß für die Übernahme des Korreferates. Aus dem Interesse heraus, das er der Arbeit bereits im Vorfeld des Begutachtungsprozesses entgegengebracht hat, sind diverse Gespräche mit wertvollen Anregungen hervorgegangen, die ebenfalls Eingang in die vorliegende Arbeit gefunden haben.

Darüber hinaus danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen, die zum Ende des Promotionsvorhabens hin meine über die üblichen Lehrveranstaltungen hinaus anfallenden Aufgaben in erheblichem Maße von mir übernommen haben, sodass mir die erforderliche Zeit für den Abschluss des Promotionsvorhabens in geeigneter Weise zur Verfügung stand.

Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei meiner Ehefrau Sabine Schwartz, die mir aufgrund ihrer eigenen beruflichen Aktivitäten und ihrer Vorbereitungen auf verschiedene Berufsexamina an Wochenenden vielfach ohne Klagen die Zeit ließ, den in der Woche unterbliebenen Arbeitsfortschritt an der Dissertation nachzuholen.

Abschließend möchte ich sowohl meinen Eltern als auch meiner Schwester für die (moralische) Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit danken. Meinen Eltern danke ich darüber hinaus für die Ausbildung, die sie mir zukommen ließen und die erst das Anfertigen dieser Arbeit ermöglichte.

Frank Schwartz

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... XVII
Tabellenverzeichnis ..... XXI
Abkürzungsverzeichnis ..... XXVII
Symbolverzeichnis ..... XXXI

**Einleitung ..... 1**

**Teil I Grundlagen ..... 3**
1 Grundlagen zur Produktion und ihrer Planung und Steuerung ..... 3
1.1 Das Wesen der Produktion ..... 3
1.2 Charakteristische Erscheinungsformen von Produktionssystemen ..... 4
1.3 Managementebenen in der Produktion ..... 6
1.4 Die Produktionsplanung und -steuerung als Bestandteil des operativen Produktionsmanagements ..... 7
2 Erstellung von Ablaufplänen ..... 13
2.1 Einführung ..... 13
2.2 Zielsetzungen bei der Erstellung von Ablaufplänen ..... 16
2.3 Verfahren zur Erstellung von Ablaufplänen ..... 21
2.3.1 Überblick ..... 21
2.3.2 Prioritätsregeln ..... 25
2.3.3 Lokale Suchverfahren ..... 30
2.3.3.1 Grundlagen ..... 31
2.3.3.1.1 Das Vorgehen einer lokalen Suche ..... 31
2.3.3.1.2 Ansätze zur Kodierung von Lösungen ..... 32
2.3.3.1.3 Berücksichtigung von Nebenbedingungen ..... 34
2.3.3.2 Simulated Annealing ..... 35
2.3.3.3 Threshold Accepting ..... 37
2.3.3.4 Genetische Algorithmen ..... 38
2.3.3.5 Weitere Verfahrensvarianten lokaler Suchverfahren ..... 41
2.3.3.6 Aussagen zur Leistungsfähigkeit der vorgestellten lokalen Suchverfahren ..... 42
2.3.4 Filtered Beam Search ..... 45
2.3.5 Constraint Based Search ..... 45

2.4 Ansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheit bei der Ablaufplanung ..... 48
2.4.1 Vollständig reaktive Ablaufplanung ..... 48
2.4.2 Nachträgliche Veränderung statischer Ablaufpläne ..... 53
2.4.3 Erstellung robuster bzw. flexibler Ablaufpläne ..... 61
2.4.4 Einsatz der Simulation ..... 65
2.4.5 Begründung für die Entwicklung eines eigenen Ansatzes ..... 67
3 Störungen in der Produktion ..... 68
3.1 Charakteristika und Klassen von Störungen ..... 68
3.2 Quantitative Erfassung von Störungen ..... 73
4 Strategien und Organisation des Störungsmanagements ..... 78
4.1 Überblick über verschiedene Strategien des Störungsmanagements ..... 79
4.2 Präventionsstrategien ..... 80
4.2.1 Kausale Strategien ..... 80
4.2.2 Abwehrstrategien ..... 83
4.3 Reaktionsstrategien ..... 84
4.3.1 Systemorientierte Strategien ..... 84
4.3.2 Reaktive Strategien ..... 86
4.4 Organisation des Störungsmanagements ..... 89
4.5 Beurteilung verschiedener Strategien des Störungsmanagements ..... 92

**Teil II Entwicklung und Einsatz eines Simulationsmodells für das Störungsmanagement ..... 99**
1 Entwicklung eines Simulationsmodells für das Störungsmanagement ..... 99
1.1 Grundlagen zur Durchführung von Simulationsstudien ..... 99
1.1.1 Einsatzgebiete der Simulation ..... 99
1.1.2 Klassifizierung von Simulationsmodellen ..... 101
1.1.3 Schritte zur Durchführung einer Simulationsstudie ..... 103
1.2 Überblick über das entwickelte Simulationsmodell ..... 105
1.2.1 Überblick über die Modellelemente ..... 105
1.2.2 Überblick über das Zusammenwirken der Modellelemente ..... 107
1.2.3 Zufallsabhängige Größen im Modell ..... 108
1.3 Kenngrößen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems und der Instabilität der Ablaufplanung ..... 109
1.3.1 Effizienzmaße ..... 110
1.3.1.1 Kapazitätsinanspruchnahme ..... 110
1.3.1.1.1 Gesamte Kapazitätsinanspruchnahme ..... 112
1.3.1.1.2 Anteil der Ausfallzeiten von Maschinen an der Gesamtkapazität ..... 113
1.3.1.1.3 Anteil der Rüstzeiten an der Gesamtkapazität ..... 113

1.3.1.2 Auftragsbezogene Kenngrößen ..... 113
1.3.2 Instabilitätsmaße ..... 115
1.3.2.1 Bestehende Ansätze zur Messung der Planungsinstabilität ..... 115
1.3.2.2 Relevante Einflussgrößen für die Definition von Instabilitätsmaßen ..... 118
1.3.2.2.1 Ausprägungen von Veränderungen in Maschinenbelegungsplänen ..... 118
1.3.2.2.2 Äußere Umstände von Planänderungen ..... 120
1.3.2.3 Entwicklung von Instabilitätsmaßen für die Ablaufplanung ..... 121
1.3.2.3.1 Lage und Länge der Vergleichszeiträume von Maschinenbelegungsplänen ..... 121
1.3.2.3.2 Messung der Veränderung von Maschinenbelegungsplänen ..... 123
1.3.2.3.2.1 Veränderung der Kapazitätsauslastung ..... 124
1.3.2.3.2.2 Umfang der Veränderung der Kapazitätsnutzung ..... 125
1.3.2.3.2.3 Umfang an Verschiebungen, die Toleranzgrenzen überschreiten ..... 129
1.3.2.3.2.4 Umfang an Verschiebungen, die feste Bezugszeitpunkte überschreiten ..... 133
1.3.2.3.2.5 Auswahl eines Ansatzes ..... 135
1.3.2.3.3 Generierung von Instabilitätsmaßen aus dem Umfang von Veränderungen in Maschinenbelegungsplänen ..... 136
1.3.2.3.3.1 Einfluss der Häufigkeit von Planänderungen ... 136
1.3.2.3.3.2 Einfluss der Kapazitätsauslastung ..... 138
1.3.2.3.3.3 Zur Definition der Instabilitätsmaße ..... 138
1.4 Die Elemente Produktionssystem, Zufallseinflüsse und Ablaufplanung im Simulationsmodell ..... 139
1.4.1 Charakteristische Merkmale des simulierten Produktionssystems ..... 139
1.4.2 Eingang von Aufträgen ..... 143
1.4.3 Eintritt und Beseitigung von Maschinenausfällen ..... 147
1.4.4 Strategien zur Reaktion auf eintretende Ereignisse ..... 149
1.4.4.1 Modellierte Ereignisse ..... 149
1.4.4.2 Reaktionsstrategien auf das Eintreten der Ereignisse ..... 150
1.4.4.2.1 Eingang eines Normalauftrags und Erreichen eines Neuplanungszeitpunktes ..... 150
1.4.4.2.2 Eingang eines Eilauftrags ..... 152
1.4.4.2.3 Eintritt eines Maschinenausfalls ..... 154

1.4.5 Erstellung von Maschinenbelegungsplänen ... 157
1.4.5.1 Bei der Planerstellung und -änderung zu berücksichtigende Operationen ... 157
1.4.5.2 Grundlegendes Vorgehen der Planerstellung ... 160
1.4.5.3 Kodierung der Lösung des Planungsproblems ... 161
1.4.5.4 Zielsetzungen bei der Erstellung einzelner Maschinenbelegungspläne ... 164
1.4.5.5 Schritte der Planerstellung und -verbesserung ... 166
1.4.5.5.1 Übersicht über die durchzuführenden Schritte ... 166
1.4.5.5.2 Schnittuferbestimmung (SUB) ... 168
1.4.5.5.3 Generierung des Lösungsvektors $J^E$ (GR) ... 169
1.4.5.5.4 Generierung des Belegungsplans (GB) ... 170
1.4.5.5.5 Ermittlung und Verringerung der Akzeptanzschwelle (EA bzw. VA) ... 174
1.4.5.5.6 Durchführung eines Mutationsschrittes (DM) ... 175
1.4.5.5.7 Bewertung und Annahme oder Ablehnung einer Lösung (Blbest, Bgbest) ... 175
1.5 Beispiel eines Simulationsablaufes ... 177
2 Realisierung der Simulationsstudie ... 186
2.1 Software für die Realisierung der Simulationsstudie ... 186
2.2 Generierung von Zufallsereignissen ... 191
2.2.1 Grundsätzliches Vorgehen ... 191
2.2.2 Generierung gleichverteilter Zufallszahlen ... 192
2.2.3 Generierung exponentialverteilter Zufallszahlen ... 193
2.2.4 Generierung betaverteilter Zufallszahlen ... 194
2.3 Vorgehen zur Ermittlung von Versuchsdaten für die statistische Analyse ... 195
2.3.1 Grundlagen ... 195
2.3.2 Bestimmung der Länge der Replikationen und der Anlaufphase ... 196
2.3.3 Festlegung der Zahl der Replikationen ... 198
2.4 Wahl des Versuchsplans ... 200
2.5 Vorgehen zur statistischen Analyse der Simulationsexperimente ... 202
2.5.1 Eingesetzte Verfahren ... 202
2.5.1.1 Varianzanalyse ... 203
2.5.1.1.1 Zweck und Voraussetzungen ihres Einsatzes ... 203
2.5.1.1.2 Durchführung der Varianzanalyse ... 205
2.5.1.2 Multiple Mittelwertvergleiche ... 206
2.5.2 Einsatz der Verfahren ... 207

2.6 Darstellung der simulierten Szenarien ..... 208
2.6.1 Variierte Systemparameter ..... 208
2.6.2 Daten der untersuchten Produktionssysteme vor dem Ergreifen von Maßnahmen ..... 213
2.6.3 Daten der untersuchten Produktionssysteme nach dem Ergreifen von Maßnahmen ..... 219
2.6.3.1 Untersuchung VU1BL und VU1KL: Parametrisierung des lokalen Suchverfahrens ..... 219
2.6.3.2 Untersuchung VU2BL und VU2KL: Zielsetzungen und Einplanungsstrategien bei der Erstellung von Maschinenbelegungsplänen ..... 220
2.6.3.3 Untersuchung HU1BL und HU1KL: Präventionsstrategien des Störungsmanagements ..... 222
2.6.3.4 Untersuchung HU2BL und HU2KL: Reaktionsstrategien des Störungsmanagements ..... 222

**Teil III Auswertung der Simulationsexperimente und Diskussion der Ergebnisse ..... 225**
1 Vorgehen ..... 225
2 Untersuchung VU1BL: Parametrisierung des lokalen Suchverfahrens ..... 226
2.1 Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und erfassten Kenngrößen ..... 226
2.1.1 Überblick über die erhobenen Daten ..... 226
2.1.2 Auswirkungen auf den Anteil der Rüstzeit $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 229
2.1.3 Auswirkungen auf die mittlere Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 230
2.1.4 Auswirkungen auf die Planungsinstabilität $\eta$ ..... 231
2.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 232
2.2 Verbesserungsmöglichkeiten einer bestehenden Systemkonfiguration ..... 234
3 Untersuchung VU2BL: Wirkung verschiedener Zielsetzungen und Einplanungsstrategien bei der Erstellung der Maschinenbelegungspläne ..... 238
3.1 Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und erfassten Kenngrößen ..... 238
3.1.1 Überblick über die erhobenen Daten ..... 238
3.1.2 Auswirkungen auf den Anteil der Rüstzeit $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 241
3.1.3 Auswirkungen auf die mittlere Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 243
3.1.4 Auswirkungen auf die Planungsinstabilität $\eta$ ..... 244
3.1.5 Auswirkungen auf die Planungsinstabilität $\eta^Z$ ..... 245
3.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 246

3.2 Verbesserungsmöglichkeiten einer bestehenden Systemkonfiguration ..... 247
3.2.1 Überblick über die Ergebnisse ..... 248
3.2.2 Verbesserungsmöglichkeiten des Anteils der Rüstzeit $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 250
3.2.3 Verbesserungsmöglichkeiten der mittleren Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 251
3.2.4 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta$ ..... 252
3.2.5 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta^Z$ ..... 253
3.2.6 Vergleich der Wirkung von Faktorstufenveränderungen auf verschiedene Kenngrößen ..... 254
3.2.7 Verbesserungsmöglichkeiten bei einer Gesamtkenngröße ..... 254
3.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 255
4 Untersuchung HU1BL: Präventionsstrategien des Störungsmanagements ..... 256
4.1 Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und erfassten Kenngrößen ..... 256
4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 259
4.3 Verbesserungsmöglichkeiten einer bestehenden Systemkonfiguration ..... 260
4.3.1 Überblick über die Ergebnisse ..... 260
4.3.2 Verbesserungsmöglichkeiten des Rüstzeitanteils $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 262
4.3.3 Verbesserungsmöglichkeiten der mittleren Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 263
4.3.4 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta$ ..... 264
4.3.5 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta^Z$ ..... 265
4.3.6 Vergleich der Wirkung von Faktorstufenveränderungen auf verschiedene Kenngrößen ..... 266
4.3.7 Verbesserungsmöglichkeiten bei einer Gesamtkenngröße ..... 266
4.3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 268
5 Untersuchung HU2BL: Reaktionsstrategien des Störungsmanagements ..... 268
5.1 Zusammenhänge zwischen den untersuchten Faktoren und erfassten Kenngrößen ..... 268
5.1.1 Überblick über die erhobenen Daten ..... 268
5.1.2 Auswirkungen auf den Anteil der Rüstzeit $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 274
5.1.3 Auswirkungen auf die mittlere Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 275
5.1.4 Auswirkungen auf die Planungsinstabilität $\eta$ ..... 277
5.1.5 Auswirkungen auf die Planungsinstabilität $\eta^Z$ ..... 278
5.1.6 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 278

5.2 Verbesserungsmöglichkeiten einer bestehenden Systemkonfiguration ..... 280
5.2.1 Verbesserungsmöglichkeiten des Anteils der Rüstzeit $U^R$ an der Gesamtkapazität ..... 283
5.2.2 Verbesserungsmöglichkeiten der mittleren Überschreitung $V$ der Mindestverweildauern von Aufträgen im Produktionssystem ..... 284
5.2.3 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta$ ..... 285
5.2.4 Verbesserungsmöglichkeiten des Instabilitätsmaßes $\eta^Z$ ..... 286
5.2.5 Vergleich der Wirkung von Faktorstufenveränderungen auf verschiedene Kenngrößen ..... 287
5.2.6 Verbesserungsmöglichkeiten bei einer Gesamtkenngröße ..... 288
5.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse ..... 289
6 Zusammenfassung der Untersuchungen zum Produktionssystem vom Typ BL ..... 290
7 Untersuchung HU1KL: Präventionsstrategien des Störungsmanagements ..... 291
8 Untersuchung HU2KL: Reaktionsstrategien des Störungsmanagements ..... 295

**Schlussbetrachtung ..... 301**

Anhang ..... 307
1 Literaturübersicht über Simulationsstudien zur Ablaufplanung bei Zufallseinflüssen ..... 309
2 Anhang zur Untersuchung VU1BL ..... 321
3 Anhang zur Untersuchung VU2BL ..... 329
4 Anhang zur Untersuchung HU1BL ..... 336
5 Anhang zur Untersuchung HU2BL ..... 340

Literaturverzeichnis ..... 351
Stichwortverzeichnis ..... 389