

# **Produktionsplanung mit Echtzeitautomaten**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

vom Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen der Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Inform. Sebastian Panek**

aus

Peiskretscham

Tag der mündlichen Prüfung: 24. August 2007

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sebastian Engell, Dortmund
2. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Steffen, Dortmund

**Dortmund 2008**



Schriftenreihe des Lehrstuhls für Anlagensteuerungstechnik  
der Universität Dortmund (Prof.-Dr. Sebastian Engell)

Band 2/2008

**Sebastian Panek**

**Produktionsplanung mit Echtzeitautomaten**

D 290 (Diss. Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7160-2

ISSN 0948-7018

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Das Schreiben einer Dissertation ist eine recht anspruchsvolle und zeitraubende Angelegenheit und ich bin oft genug gewarnt worden, den Zeitaufwand nicht zu unterschätzen, die Sache mit dem nötigen Schwung anzugehen und rechtzeitig fertig zu stellen. Auch wenn es mir an Zeit und Schwung zunächst nicht gefehlt hat, so hat das Schreiben eine beträchtliche Zeit gedauert und mich ordentlich Schweiß gekostet. Es wäre an dieser Stelle nicht angebracht, all die vielen Kleinigkeiten aufzuzählen, von denen ich mich unnötigerweise habe aufhalten lassen. Stattdessen möchte ich die Hoffnung äußern, dass ein gewisser Reifungsprozess der Arbeit nicht geschadet hat und nun ein insgesamt stimmiges und fachlich interessantes Werk vorliegt. Natürlich haben auch andere Personen wesentlich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen und ich möchte sie und ihre wertvolle Hilfe nicht verschweigen.

Mein Dank gilt zunächst Prof. Dr. Sebastian Engell, dessen fachlicher Rat und Urteil gar nicht hoch genug eingeschätzt werden können und der mit erstaunlicher Präzision immer wieder den Kern der Sache trifft. Die hohen Ansprüche und die lobenden Worte, die Herr Engell an seine Mitarbeiter richtet, sind für mich immer ein großer Ansporn gewesen, ohne den eine solche Arbeit kaum möglich wäre.

Außerdem gilt mein Dank Prof. Dr. Olaf Stursberg, dem ich als studentische Hilfskraft während seiner Promotionszeit zur Seite gestanden habe und der mich insgesamt über fast acht Jahre fachlich begleitet hat. Ich verdanke ihm sehr viel, denn er war es, der mein Interesse an der Wissenschaft und Forschung geweckt hat.

Ein ganz besonders großer Dank gilt meinem Zweitgutachter Prof. Dr. Bernhard Steffen und meinen Prüfern Prof. Dr. Gerhard Schembecker und Prof. Dr. Peter Walzel für ihr Interesse an meiner Arbeit und ihre wertvollen Anregungen, die mich ein Stück über meinen Horizont hinaus geführt und die Verbindungen zu anderen Disziplinen aufgezeigt haben.

Des Weiteren danke ich herzlich Herrn Subanatarajan Subbiah, der mich bei dieser Arbeit mit großem persönlichen Engagement unterstützt hat und dem ich bei seiner akademischen Laufbahn weiterhin viel Erfolg wünsche.

Eine große Portion Lob und Anerkennung geht außerdem an meine ehemaligen Kollegen und Kolleginnen vom Lehrstuhl für Anlagensteuerungstechnik (der jetzt Systemdynamik und Prozessführung heißt), denen ich an dieser Stelle für ihre Kollegialität, ihre Hilfsbereitschaft, ihren Zusammenhalt und die schöne gemeinsame Zeit am Lehrstuhl sehr herzlich danken möchte. Dies gilt insbesondere für die guten Seelen des Lehrstuhls: für Frau Hensche und Frau Weber.

Ein großes Dankeschön geht an meine Arbeitskollegen Dr. Helmut Winter und Dr. Christoph Kögl, die sich viel Zeit genommen haben, diese Arbeit Korrektur zu lesen und deren Ratschläge eine große Hilfe für mich gewesen sind.

Die finanzielle Unterstützung meiner Forschung verdanke ich dem EU-Projekt AMETIST (IST-2001-35304) und daher gebührt mein Dank den Projektverantwortlichen sowie den akademischen und industriellen Kooperationspartnern.

Eine glückliche Kindheit, eine Portion gesunden Menschenverstandes, eine positive Einstellung zum Leben und zu anderen Menschen sowie die finanzielle Unterstützung während meines Studiums verdanke ich meinen lieben Eltern, die mir immer meinen Weg geebnet und das Erreichen meiner Ziele überhaupt erst ermöglicht haben.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner lieben Frau Anna bedanken. Ihre große Geduld, ihre liebevolle Unterstützung und die vielen aufmunternden Worte haben das Entstehen dieser Dissertation von Anfang an begleitet. Sie hat mich mit Sonnenschein und Zuversicht in schönen wie schwierigen Momenten begleitet und dafür gilt ihr mein größtes und herzlichstes Dankeschön.

Sebastian Panek

Bergen, 29.03.2008

# Zusammenfassung

Die chemische Industrie verwendet flexible Mehrprodukt-Batchanlagen, um eine Vielzahl von diversifizierten Produkten chargenweise in kleinen, bedarfsgerechten Mengen terminnah zu produzieren. Die Flexibilität solcher Anlagen führt zu einer Vielzahl von diskreten und kontinuierlichen Entscheidungsfreiheitsgraden, die eine Unterstützung durch Planungswerkzeuge unabdingbar machen.

Viele existierende Ansätze zur Produktionsplanung basieren auf ausgereiften mathematischen Optimierungsverfahren. Allgemeine und übertragbare mathematische Standardformulierungen für Planungsprobleme leiden jedoch unter fehlender Effizienz bei der Lösung von großen Problemen, so dass spezifische Anpassungen der Modelle oder der Algorithmen erforderlich sind.

Ein relativ neuer Planungsansatz basiert auf der Erreichbarkeitsanalyse von Echtzeitautomatenmodellen. Er bietet den Vorteil der intuitiven, teils graphischen Modellierungssprache, die es erlaubt, Automatenmodelle schrittweise und modular aufzubauen. Die Generierung des Gesamtmodells aus den Modulen läuft automatisch ab. Die Berechnung der Pläne geschieht durch simple und verständliche Algorithmen aus der Graphenanalyse, die mit wenig Aufwand erweitert werden können. Bisherige systematische Untersuchungen dieses Ansatzes beschränkten sich auf einfache Klassen von Planungsproblemen.

Diese Arbeit präsentiert eine allgemeine und übertragbare Methodik zur Anwendung der Modellierung und der Erreichbarkeitsanalyse von Echtzeitautomaten auf industrielle Planungsprobleme. Dabei wird ein auf Echtzeitautomaten aufbauendes Modellierungsschema für Batchprozesse mit netzwerkartigen Strukturen vorgeschlagen. Zur Steigerung der Effizienz wird eine Reihe von Algorithmen entwickelt, die um fortgeschrittene Methoden zum Absuchen und zur Reduktion des Zustandsraums ergänzt werden. Dabei wird zwischen konservativen Methoden, die die Optimalität der Lösung garantieren, und besonders effektiven heuristischen Methoden unterschieden. Ein weiterer Schwerpunkt ist ein hybrider Algorithmus, der die Erreichbarkeitsanalyse um die Berechnung von unteren Kosten-schranken durch lineare Programmierung erweitert und so eine Brücke zwischen der mathematischen Programmierung und der Erreichbarkeitsanalyse schlägt. Durch die Lösung eingebetteter linearer Programme während der Suche können die restlichen Kosten zum Ziel abgeschätzt werden. Durch Schrankenvergleiche werden so weite Bereiche des Zustandsraums von der Suche ausgeschlossen. Ausführliche numerische Experimente mit bekannten Benchmarkinstanzen sowie zwei anspruchsvollen industriellen Fallstudien demonstrieren die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen und die Eignung für den industriellen Einsatz.



# Abstract

Flexible multi-product batch plants are used in chemical and processing industries to produce various diversified products. The production is performed batch-wise, in small quantities and just-in-time. This flexibility leads to planning problems with a large number of decisions involving both, continuous and discrete degrees of freedom which require the use of special planning tools.

Many existing approaches to scheduling and planning are based on mathematical optimization algorithms. General and portable mathematical formulations for scheduling problems often suffer from weak efficiency when solving large problem instances. Hence, problem-specific modifications of the model or of the algorithm are often necessary.

A relatively new approach to scheduling and planning is the reachability analysis of timed automata. Its particular appeal results from the intuitive, partly graphical modeling which enables the user to create modular models step-by-step. The total model is composed automatically from the individual modules. The computation of schedules can be performed by simple and extensible algorithms from the domain of graph search. Systematic investigations of this approach, however, have been limited so far to simple classes of scheduling problems.

This work presents a general and portable methodology to extend the modeling and the reachability analysis of timed automata to large-scale industrial scheduling problems. It proposes a modeling framework for network-like batch processes based on timed automata. The efficiency of the solution procedure is increased by improvements of the reachability algorithm and by advanced state-space reduction techniques. These techniques generally fall into two main categories: conservative techniques which guarantee that the optimal solution will never be cut off and heuristic techniques which are often more effective but may prune the optimal solution.

This work also introduces a hybrid algorithm which enhances the reachability analysis by embedded linear programming to compute lower bounds of the costs-to-go and thus establishes a connection between mathematical programming methods and reachability analysis. The computation of lower bounds enables the algorithm to estimate the effort to reach the optimal solution. Comparisons of lower and upper bounds provide particularly effective reductions of the search space. Detailed computational experiments with well-known benchmark problems and two industrial case studies demonstrate the performance of the developed algorithms and the applicability to industrial problems.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Terminologie	3
<b>2</b>	<b>Produktionsplanung</b>	<b>7</b>
2.1	Chemische und verfahrenstechnische Prozesse	7
2.2	Mathematische Planungsmethoden	9
2.3	Andere Planungsansätze	10
<b>3</b>	<b>Echtzeitautomaten</b>	<b>13</b>
3.1	Geschichte und Hintergrund	13
3.2	Echtzeitautomaten in der Produktionsplanung	15
3.3	Methodik	16
3.4	Definitionen	17
3.4.1	Diskrete endliche Automaten	17
3.4.2	Unbewertete Echtzeitautomaten	18
3.4.3	Parallelkomposition	19
3.4.4	Semantik	20
3.4.5	Erreichbarkeitsanalyse	21
3.4.6	Inklusionstest	24
3.4.7	Bewertete Echtzeitautomaten	25
3.5	Zusammenfassung und Diskussion	26
<b>4</b>	<b>Job-Shops</b>	<b>29</b>
4.1	Einführendes Beispiel	29
4.2	Charakteristika von Job-Shop-Problemen	29
4.3	Lösungsansätze	31
4.3.1	Lokale Suche und Meta-Heuristiken	31
4.3.2	Prioritätsregeln	32
4.3.3	Disjunktive Graphen und disjunktive Programmierung	32
4.3.4	Gemischt-ganzzahlige Programmierung	33
4.4	Modellierung von Job-Shops mit Echtzeitautomaten	33
4.5	Parallelkomposition	36
4.6	Erreichbarkeitsgraph	37
4.7	Verzögerungsfreie und verzögerte Pläne	38
4.8	Dominanz in Inklusionstests	40

4.9	Träge Pläne . . . . .	41
4.9.1	Definitionen . . . . .	41
4.9.2	Vermeidung von trägen Plänen . . . . .	43
4.9.3	Ausschlusskriterien für träge Nachfolger . . . . .	44
4.9.4	Strikt-eifrige Pläne . . . . .	45
4.10	Sleep-Set-Methode . . . . .	48
4.10.1	Diamant-Strukturen . . . . .	48
4.10.2	Vermeidung von Diamant-Strukturen . . . . .	48
4.10.3	Persistenz von Transitionen in Job-Shops . . . . .	50
4.10.4	Unabhängigkeit von Transitionen in Job-Shops . . . . .	51
4.10.5	Dominanz von zeit-persistenten Transitionen . . . . .	52
4.10.6	Erweiterung des Algorithmus' . . . . .	53
4.11	Experimente . . . . .	54
4.11.1	Grundlegende Erweiterungen . . . . .	55
4.11.2	Fortgeschrittene Zustandsraumreduktion . . . . .	56
4.11.3	Kombinierte Methoden zur Zustandsraumreduktion . . . . .	57
4.12	Zusammenfassung . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Kostenschranken in der Erreichbarkeitsanalyse</b>	<b>61</b>
5.1	Einleitung . . . . .	61
5.2	Verzweige-und-Begrenze-Verfahren . . . . .	61
5.3	Erreichbarkeitsalgorithmus mit Kostenschranken . . . . .	62
5.4	Naive Schranken . . . . .	63
5.5	Generische Schranken mit Linearer Programmierung . . . . .	64
5.5.1	Modellformulierung . . . . .	65
5.5.2	Zielfunktion . . . . .	69
5.5.3	Dynamik von $A$ in $LP$ . . . . .	69
5.5.4	Lösung und Auswertung von $LP^{fix}$ . . . . .	70
5.5.5	Experimente und Diskussion . . . . .	70
5.6	Problemspezifische LP-Schranken . . . . .	71
5.6.1	Ansatz . . . . .	71
5.6.2	Modellierung . . . . .	71
5.6.3	Beispiel . . . . .	73
5.7	Führungsfunktionen . . . . .	73
5.8	Alternativen zur Tiefensuche . . . . .	76
5.9	Experimente mit einfachen Instanzen . . . . .	78
5.9.1	Auswahlkriterien ohne Kostenschranken . . . . .	78
5.9.2	Auswahlkriterien mit Kostenschranken . . . . .	80
5.9.3	Auswahlkriterien mit Kostenschranken und Führungsfunktion . . . . .	81
5.10	Experimente mit Benchmark-Instanzen . . . . .	82
5.10.1	Beschreibung der Tests . . . . .	82
5.10.2	Vergleich der Techniken zur Zustandsraumreduktion . . . . .	83
5.10.3	Vergleich der Tiefensuche mit iterativer Breitensuche . . . . .	84
5.10.4	Vergleich mit CPLEX . . . . .	85

<b>6</b>	<b>Erweiterte Problemstellungen</b>	<b>89</b>
6.1	Einleitung	89
6.2	Industrielle Planungsprobleme	89
6.3	Erweiterte RTN	91
6.3.1	STN und RTN	91
6.3.2	Stellen	92
6.3.3	Beispiel	92
6.3.4	Definitionen	92
6.3.5	Spezifikation mit erweiterten RTN	94
6.3.6	Übersetzung in Echtzeitautomaten	96
6.3.7	Effiziente Echtzeitautomaten-Modelle	98
6.3.8	Diskussion der Automatenmodelle	102
6.4	Zusammenfassung	103
<b>7</b>	<b>Zustandsraumreduktion bei erweiterten Modellen</b>	<b>105</b>
7.1	Vorüberlegungen	105
7.2	Eifrige und träge Pläne	107
7.3	Gierige Pläne	109
7.4	Eingeschränkt strikt-eifrige und gierige strikt-eifrige Läufe	111
7.5	Vergleich schwach eifriger und gieriger Läufe	113
7.6	Erweiterte Sleep-Set-Methode	115
7.7	Gierige Sleep-Set-Methode	117
7.8	Diskussion der erweiterten Sleep-Set-Methode	118
7.9	Untere Kostenschranken	119
7.9.1	Annahmen und Vereinfachungen	119
7.9.2	Modellformulierung	119
7.9.3	Beispiel	122
7.10	Zulässige Zielfunktionen	124
7.11	Zusammenfassung	125
<b>8</b>	<b>Die Axxom-Fallstudie</b>	<b>127</b>
8.1	Einleitung	127
8.2	Beschreibung	128
8.3	Vereinfachungen und Annahmen	129
8.4	RTN-Spezifikation	130
8.5	Automatenmodell	131
8.6	Problemspezifische Verbesserungen	132
8.7	Numerische Experimente	133
8.7.1	Führungsfunktionen	134
8.7.2	Führungsfunktionen mit unteren Schranken	134
8.7.3	Methoden zur Zustandsraumreduktion	135
8.7.4	Methoden zur Zustandsraumreduktion mit unteren Kostenschranken	137
<b>9</b>	<b>Die Westenberger-Kallrath-Fallstudie</b>	<b>139</b>
9.1	Einleitung	139
9.2	RTN-Modell	139
9.3	Vereinfachungen und Annahmen	141

9.4	Automatenmodell . . . . .	141
9.5	Numerische Experimente . . . . .	142
9.5.1	Rohstoffvorräte und Führungsfunktionen . . . . .	142
9.5.2	Untersuchungen der Zustandsraumreduktion . . . . .	144
9.5.3	Zustandsraumreduktion mit verkleinerter Instanz . . . . .	146
9.6	Vergleich und Diskussion . . . . .	148
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
10.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . . .	151
10.2	Ausblick . . . . .	153
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>161</b>
	<b>Semantik der erweiterten RTN</b>	<b>165</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Produktionsplanung durch einen Planer für eine Menge von Ressourcen, eine Menge von Aufträgen (Marktnachfrage) und unter Berücksichtigung von Produktionsvorschriften (Rezepten). . . . .	2
3.1	Ein diskreter Automat mit drei Zuständen und zwei Zustandsübergängen. . . . .	18
3.2	Ein einfacher Echtzeitautomat mit drei Lokationen, zwei Transitionen und einer Uhr. . . . .	18
3.3	Eine Zone $Z$ und Operationen darauf im Uhrenraum von $c_i$ und $c_j$ . . . . .	21
4.1	Einige Produktionspläne als Lösungen des trivialen Planungsproblems. . . . .	30
4.2	Ein disjunktiver Graph für das triviale Job-Shop-Problem. . . . .	33
4.3	Eine Präzedenzmatrix mit einer Belegung der Reihenfolge $o_3, o_1, o_2$ . . . . .	33
4.4	Das Echtzeitautomatenmodell eines einfachen Planungsproblems mit zwei Jobs und zwei Maschinen. . . . .	34
4.5	Der komponierte Echtzeitautomat des einfachen Planungsproblems mit zwei Jobs und zwei Maschinen. Aus Platzgründen sind die Namen der Lokationen und der Signale nur oben (für $j_1$ ) und links (für $j_2$ ) abgebildet. . . . .	36
4.6	Der Erreichbarkeitsgraph des komponierten Echtzeitautomaten des einfachen Planungsproblems mit zwei Jobs und zwei Maschinen. Die möglichen absoluten Zeitwerte für die Transitionen sind neben den Pfeilen angegeben. Die einzelnen Zeitwerte $t_{ij}$ und $t_{ij} + d_j$ sind absolute Zeiten, in denen der Job $i$ die Ressource $j$ belegen bzw. freigeben kann. Sie steigen monoton entlang der Pfade. . . . .	38
4.7	Eine Job-Uhr $c_i$ über der absoluten Zeit $t$ . Reduktion einer unnötigen Verzögerung $\tau$ zwischen dem Ende der Operation $j$ ( $\phi_j$ ) und dem Beginn der nachfolgenden Operation $k$ ( $\alpha_k$ ) führt zum Kollaps der Zone auf den dominierenden Punkt. . . . .	39
4.8	Schrittweise Konstruktion eines verzögerungsfreien Laufs $S_1$ aus einem verzögerten Lauf $S'_1$ mit dem Zwischenschritt $S''_1$ . . . . .	40
4.9	Ein Erreichbarkeitsgraph mit ausschließlich trägen Läufen. . . . .	42
4.10	Ein Erreichbarkeitsgraph ohne träge Läufe. . . . .	42
4.11	Erkennen von trägen Läufen zum aktuellen Zeitpunkt $t'$ durch die Bedingung $\tau_1 + dur(\alpha_i) \leq enabl(\alpha_i) + \tau_2$ anhand von zwei Entscheidungsalternativen (obere und untere Zeile). . . . .	45
4.12	Erkennen von potenziell trägen Läufen zum aktuellen Zeitpunkt $t'$ anhand von zwei Entscheidungsalternativen (obere und untere Zeile). . . . .	46
4.13	Teilmengenbeziehungen zwischen (potenziell) trägen und (strikt-) eifrigen Läufen. . . . .	47
4.14	Die Scheduling-Anomalie: das Verbot der Wartezeit auf $r_2$ im linken Plan führt zu einer längeren Produktionsdauer, als im rechten Plan. . . . .	47

4.15	Erkennen von eifrigen $\alpha$ -Transitionen zum Zeitpunkt $t'$ . Die Transition $\alpha_i$ ist eifrig, weil die Dauer der Operation kleiner ist als alle Wartezeiten der $\phi$ -Transitionen. . . . .	51
4.16	Drei Typen von Diamant-Strukturen bei Job-Shops: $\alpha\alpha$ (links), $\phi\phi$ (Mitte), $\phi\alpha$ (rechts). Die Pfeile sind mit den zeitbewerteten Transitionen und dem absoluten Zeitpunkt $t$ beschriftet. . . . .	52
4.17	Der Erreichbarkeitsgraph nach der Anwendung der Sleep-Set-Methode. . . . .	54
5.1	Der Erreichbarkeitsgraph mit unteren Kostenschranken an den Knoten. . . . .	64
5.2	Aufbau und Lösung von eingebetteten generischen linearen Programmen während der Erreichbarkeitsanalyse. . . . .	65
5.3	Aufbau und Lösung von problemspezifischen eingebetteten linearen Programmen während der Erreichbarkeitsanalyse. . . . .	72
5.4	Erreichbarkeitsgraph mit LP-basierten problemspezifischen unteren Kostenschranken. . . . .	74
5.5	In diesem Erreichbarkeitsgraphen ist der untere Zweig aufgrund der unteren Kostenschranke 12 abgeschnitten worden. . . . .	77
5.6	Iterative Breitensuche in einem Graphen. Die Breite $N$ wird von 2 (links) auf 4 (Mitte) und 8 (rechts) erhöht. Die in jeder Phase neu besuchten Knoten sind jeweils grau gefärbt. . . . .	78
6.1	Ein einfacher Produktionsprozess als erweitertes RTN. . . . .	93
6.2	Das Gantt-Diagramm mit einem optimalen Produktionsplan. . . . .	93
6.3	Parallele und alternative Verzweigungen mit Stellen in erweiterten RTN. . . . .	94
6.4	Auftrags- und Fälligkeitsdaten in erweiterten RTN. Die Konstante $H$ ist eine konservative Abschätzung des benötigten Zeithorizonts. . . . .	95
6.5	Eine Aufgabe im erweiterten RTN (links) und die entsprechenden Transitionen und Lokationen in einem Ressourcenautomaten (rechts). Es werden $n$ Marken verbraucht, die Aufgabe $T$ wird gestartet. Nach Ablauf von $T$ werden $m$ Marken in nachfolgenden Stellen produziert. . . . .	96
6.6	Ein Automatenmodell aus drei Ressourcen- und einem synchronisierten Stellenautomaten $P_1$ . . . . .	99
6.7	Ein RTN mit Stellen und Zuständen, unterteilt in drei Segmente. . . . .	100
6.8	Ein segmentiertes RTN mit drei Segmenten (1), (2) und (3). Unten sind die entsprechenden Netzwerkautomaten mit gestrichelten Extra-Lokationen stark vereinfacht abgebildet. Die Synchronisationspunkte sind mit $a$ bis $d$ gekennzeichnet, die markierten Transitionen werden also stets synchron durchlaufen. . . . .	102
7.1	Drei Produktionsprozesse mit zwei Rohstoffen und drei Endprodukten. . . . .	106
7.2	Erkennen von trägen Läufen zum aktuellen Zeitpunkt $t'$ durch die Bedingung $\tau_1 + dur(\alpha_i) \leq enabl(\alpha_i) + \tau_2$ anhand von zwei Entscheidungsalternativen (obere und untere Zeile). . . . .	108
7.3	Schwach eifrige, eifrige, träge und zwingende träge Läufe. . . . .	109
7.4	Erkennen von potenziell trägen Läufen zum aktuellen Zeitpunkt $t'$ anhand von drei ausgehenden zeitbewerteten Transitionen. . . . .	113
7.5	Zusammenhänge zwischen zwingenden trägen, nicht gierigen, schwach eifrigen und gierigen Läufen. . . . .	114
7.6	Vier Produktionsprozesse mit zwei Rohstoffen und vier Endprodukten. . . . .	117
7.7	Ein Prozess mit zwei Jobs. . . . .	122
7.8	Kosten des Plans in Abhängigkeit vom Endzeitpunkt von $T'$ . . . . .	125

---

8.1	Das Rezept zur Herstellung von Lacken als Flussdiagramm. . . . .	129
8.2	Das RT-Netzwerk zu einem Job für Metallic-Lacke. . . . .	130
8.3	Die Netzwerk-Automaten eines Jobs zur Herstellung eines Metallic-Lacks. Die durch (A) bzw. (B) gekennzeichneten Transitionen werden jeweils synchron mit korrespondierenden Transitionen in den Ressourcenautomaten durchlaufen. . . . .	132
9.1	Das RT-Netzwerk zur Fallstudie. . . . .	140
9.2	Einer der Produktionspläne für die kleine Instanz der Westenberger-Kallrath-Fallstudie berechnet mit TAOpt. Die Operationen sind beschriftet mit den Indizes der Aufgaben. . . . .	145
9.3	Einer der Produktionspläne für die kleine Instanz der Westenberger-Kallrath-Fallstudie berechnet mit TAOpt. Die Operationen sind beschriftet mit den Indizes der Aufgaben.. . . .	147
9.4	Einer der Produktionspläne für die kleine Instanz der Westenberger-Kallrath-Fallstudie berechnet mit GAMS/CPLEX. Die Operationen sind beschriftet mit den Indizes der Aufgaben.. . . .	148



# Tabellenverzeichnis

4.1	Die Erreichbarkeitsgraphen für grundlegende Erweiterungen des Erreichbarkeitsalgorithmus': kostenminimierende Erreichbarkeitsanalyse (1), Äquivalenztests (2) und Dominanztests (3). Die Spalten zeigen die Anzahl der Jobs und der Ressourcen, die Pfadlängen, die optimalen Produktionsspannen und die Zahlen der besuchten Knoten.	55
4.2	Die Größen der Erreichbarkeitsgraphen für fortgeschrittene Methoden zur Zustandsraumreduktion: eifrige Läufe (4), strikt-eifrige Läufe (5), sichere $\alpha\alpha$ -Dominanz (6), $\phi\phi$ -Dominanz (7), $\phi\alpha$ -Dominanz (8), unsichere $\alpha\alpha$ -Dominanz (9). Die Spalten zeigen die Zahl der Jobs und der Ressourcen und die besuchten Knoten. Suboptimale Produktionsspannen sind besonders gekennzeichnet: * steht für 30 ZE, ** steht für 33 ZE, *** steht für 24 ZE	57
4.3	Die Größen der Erreichbarkeitsgraphen für kombinierte Methoden zur Zustandsraumreduktion. Die Kombinationen umfassen: eifrige Läufe (4), strikt-eifrige Läufe (5), sichere $\alpha\alpha$ -Dominanz (6), $\phi\phi$ -Dominanz (7), $\phi\alpha$ -Dominanz (8), unsichere $\alpha\alpha$ -Dominanz (9). Die Spalten zeigen die Zahl der Jobs und der Ressourcen sowie die besuchten Knoten. Suboptimale Produktionsspannen sind besonders gekennzeichnet: * steht für 30 ZE, ** steht für die 33 ZE, *** steht für 24 ZE.	58
5.1	Die Größen der Erreichbarkeitsgraphen in Knoten für verschiedene einzelne und kombinierte Auswahlmethoden für $\mathcal{W}$ ohne untere Kostenschranken und ohne eine schrankenbasierte Führungsfunktion, d.h. ohne das Kriterium <i>mb</i> .	79
5.2	Die Größen der Erreichbarkeitsgraphen in Knoten für verschiedene einzelne und kombinierte Auswahlmethoden für $\mathcal{W}$ mit unteren Kostenschranken <i>aber</i> ohne eine schrankenbasierte Führungsfunktion, d.h. ohne Kriterium <i>mb</i> .	81
5.3	Die absoluten Rechenzeiten ohne und mit eingebetteter linearer Programmierung.	82
5.4	Die Größen der Erreichbarkeitsgraphen in Knoten für verschiedenen einzelne und kombinierte Auswahlmethoden für $\mathcal{W}$ mit der Berechnung von unteren Kostenschranken. In allen Tests wurden optimale Lösungen gefunden.	83
5.5	Beste gefundene Lösungen für Benchmark-Instanzen mit zwei verschiedenen Auswahlstrategien, mit und ohne LP-basierte untere Schranken, mit sicheren (4)+(6) und heuristischen (5)+(9) Reduktionstechniken. Die optimalen Produktionsspannen sind in der Spalte <i>Opt.</i> aufgelistet, alle Werte weiter rechts in der gleichen Zeile enthalten die Differenzen zwischen den besten innerhalb der vorgegebenen Rechenzeitschranken gefundenen Produktionsspannen und dem Optimum.	86

5.6	Vergleich zwischen Suchstrategien basierend auf der Tiefensuche (DFS) und der iterativen Breitensuche (IBFS). Die optimalen Produktionsspannen sind in der Spalte <i>Opt.</i> aufgelistet, alle Werte weiter rechts in der gleichen Zeile enthalten die Differenzen zwischen den besten innerhalb der vorgegebenen Rechenzeitschranken gefundenen Produktionsspannen und dem Optimum. . . . .	87
5.7	Vergleich zwischen TAopt mit iterativer Breitensuche (IBFS) und CPLEX (Cpl). Die optimalen Produktionsspannen sind in der Spalte <i>Opt.</i> aufgelistet, alle Werte weiter rechts in der gleichen Zeile enthalten die Differenzen zwischen den besten innerhalb der vorgegebenen Rechenzeitschranken gefundenen Produktionsspannen und dem Optimum. . . . .	88
7.1	Gegenüberstellung schwach eifriger und gieriger Läufe . . . . .	115
7.2	Reduktion des Erreichbarkeitsgraphen für unterschiedliche Konfigurationen der eifrigen, schwach eifrigen und gierigen Läufe . . . . .	115
7.3	Reduktion des Erreichbarkeitsgraphen für unterschiedlichen Konfigurationen der erweiterten Sleep-Set-Methode . . . . .	118
8.1	Vergleich unterschiedlicher Führungsfunktionen bei Tests <i>ohne</i> untere Kostenschranken. Die Spalte <i>Best</i> enthält die besten gefundenen Produktionsspannen. Alle Werte rechts davon sind Produktionsspannen dargestellt als Differenzen zu <i>Best</i> . . . . .	134
8.2	Vergleich unterschiedlicher Führungsfunktionen bei Tests mit unteren Kostenschranken durch lineare Programmierung. Die Spalte <i>Best</i> enthält die besten gefundenen Produktionsspannen. Alle Werte rechts davon sind Produktionsspannen dargestellt als Differenzen zu <i>Best</i> . . . . .	135
8.3	Vergleich unterschiedlicher Reduktionsmethoden (1)-(7) (S.133) bei Tests ohne untere Kostenschranken. Die letzten vier Spalten enthalten Produktionsspannen die mit <i>gierigen Läufen</i> erzielt wurden. Die Spalte <i>Best</i> enthält die besten gefundenen Produktionsspannen. Alle Werte rechts davon sind Testresultate dargestellt als Differenzen zu <i>Best</i> . . . . .	136
8.4	Vergleich unterschiedlicher Reduktionsmethoden (1)-(7) (S.133) bei Tests ohne untere Kostenschranken. Alle Produktionsspannen sind mit <i>schwach eifrigen Läufen</i> erzielt worden. Die Spalte <i>Best</i> enthält die besten gefundenen Produktionsspannen. Alle Werte rechts davon sind Testresultate dargestellt als Differenzen zu <i>Best</i> . . . . .	136
8.5	Vergleich unterschiedlicher Reduktionsmethoden kombiniert mit unteren Kostenschranken durch lineare Programmierung, die in jeder <i>n</i> -ten Knotenschicht des Erreichbarkeitsgraphen berechnet werden. Alle Produktionsspannen sind mit <i>gierigen Läufen</i> erzielt worden. Die Spalte <i>Best</i> enthält die besten gefundenen Produktionsspannen. Alle Werte rechts davon sind Testresultate dargestellt als Differenzen zu <i>Best</i> . . . . .	138
9.1	Auswirkungen unterschiedlich großer Rohstoffvorräte von $S_0$ zum Zeitpunkt 0 auf die Rechenzeiten in Sekunden, auf den Speicherverbrauch in besuchten Knoten, auf die Produktionsspannen (PS) und auf die Überproduktion (ÜP). Angegeben sind die jeweils ersten und letzten (besten) gefundenen Lösungen. Untersucht werden zwei verschiedenen Auswahlmethoden: Mdmc und Mdmcmp. . . . .	143

---

9.2	Experimente mit <i>großer</i> Marktnachfrage. Auswirkungen der Methoden zur Zustandsraumreduktion auf die CPU-Zeit in Sekunden, gestoppt beim Finden der ersten und der besten Lösung, auf den Speicherverbrauch in besuchten Knoten, auf die Produktionsspanne (PS) und auf die Überproduktion (ÜP). Die getesteten Konfigurationen sind: schwach eifrige (1), eingeschränkt strikt-eifrige (2), gierige (3), und gierige strikt-eifrige (4) Läufe kombiniert mit der sicheren (5) und der gierigen (6) $\alpha\alpha$ -Konfiguration der Sleep-Set-Methode. . . . .	144
9.3	Experimente mit <i>kleiner</i> Marktnachfrage. Auswirkungen der Methoden zur Zustandsraumreduktion auf die CPU-Zeit in Sekunden, gestoppt beim Finden der ersten und der besten Lösung, auf den Speicherverbrauch in besuchten Knoten, auf die Produktionsspanne (PS) und auf die Überproduktion (ÜP). Die getesteten Konfigurationen sind: schwach eifrige (1), eingeschränkt strikt-eifrige (2), gierige (3), und gierige strikt-eifrige (4) Läufe kombiniert mit der sicheren (5) und der gierigen (6) $\alpha\alpha$ -Konfiguration der Sleep-Set-Methode. Vergleich mit Testergebnissen von GAMS/CPLEX - angegeben sind hier die Knotenzahlen, die das Verzweige-und-Begrenze-Verfahren von CPLEX benötigte. . . . .	146